creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

석사학위논문

항공기의 조류충돌 대응방안 연구

– 한·미·일 사례를 중심으로 –

HANSUNG UNIVERSITY

2026년

한성대학교 행정대학원

사회안전학과

사회안전관리전공

염 승 윤

HANSUNG
UNIVERSITY

석사학위논문
지도교수 류종용

항공기의 조류충돌 대응방안 연구

– 한·미·일 사례를 중심으로 –

A Study on Bird Strike Countermeasures for Aircraft:
Focusing on Cases in Korea, the United States, and Japan

HANSUNG UNIVERSITY

2026년 6월 일

한성대학교 행정대학원

사회안전학과

사회안전관리전공

염 승 윤

석 사 학 위 논 문
지도교수 류종용

항공기의 조류충돌 대응방안 연구

– 한·미·일 사례를 중심으로 –

A Study on Bird Strike Countermeasures for Aircraft:
Focusing on Cases in Korea, the United States, and Japan

위 논문을 사회안전학 석사학위 논문으로 제출함

2026년 6월 일

한성대학교 행정대학원

사 회 안 전 학 과

사회안전관리전공

염 승 윤

염승윤의 사회안전학 석사학위 논문을 인준함

2026년 6월 일

심사위원장 최 천 근 (인)

심 사 위 원 류 종 용 (인)

심 사 위 원 박 기 수 (인)

HANSUNG UNIVERSITY

국 문 초 록

항공기의 조류충돌 대응방안 연구

– 한·미·일 사례를 중심으로 –

한 성 대 학 교 행 정 대 학 원
사 회 안 전 학 과
사 회 안 전 관 리 전 공
염 승 윤

조류충돌(Bird Strike)은 항공 안전을 위협해 온 가장 오래된 위험의 하나다. 민간 항공이 성장하는 동안 발생 빈도도 꾸준히 늘었다. 특히 고정익(Fixed-Wing) 항공기와 회전익(Rotary-Wing, 헬리콥터) 항공기는 구조와 비행 방식이 달라, 충돌이 났을 때의 피해 양상도 대응법도 크게 갈린다. 이 연구는 한국·미국·일본 세 나라의 통계와 주요 사례를 바탕으로 항공기 조류충돌의 현황을 분석하고, 기종 유형에 따라 효과적인 대응 방안을 제시하는 데 목적을 둔다.

연구 방법은 문헌 연구와 사례 분석, 통계 분석을 함께 썼다. 주요 자료로는 미국 연방항공청(FAA)의 국가 야생동물 충돌 데이터베이스(NWSD), 일본 국토교통성 민간항공국(JCAB) 발간 자료, 국제민간항공기구(ICAO) 표준 규정, 미국 국가교통안전위원회(NTSB)와 호주 교통안전위원회(ATSB)의 사고 조사 보고서, 국내외 학술 논문을 활용했다.

분석 결과, 미국에서는 1990년부터 2023년까지 약 29만 2천 건의 야생동물 충돌이 보고됐고, 2023년 한 해에만 약 1만 9,700건이 발생했다. 일

본은 해마다 약 1,000건이 보고되며 이착륙 단계에 몰린다. 한국은 2019년부터 2024년 상반기까지 약 5년 6개월간 623건이 보고됐고, 2024년 12월 무안국제공항의 제주항공 2216편 사고에서는 181명 중 179명이 목숨을 잃었다. 고정익 항공기는 전체 충돌의 약 97%가 이착륙 단계에 몰리며 엔진 흡입과 조종석 유리 파손이 가장 컸다. 회전익 항공기는 낮게 날기 때문에 모든 비행 단계에서 위험에 노출되고, 메인로터 블레이드와 조종석 창의 피해가 특히 치명적이었다.

대응 방안으로는 공항 환경 관리, 기술 시스템 도입, 제도 개선, 조종사 교육 강화, 국제 협력의 다섯 영역을 아우르는 통합적 접근이 필요하다는 결론을 얻었다. 본 연구는 비행장과 그 주변에 새가 모여드는 원인을 정리하고, 그 원인을 하나씩 줄여 가는 방안도 따로 다뤘다. 어느 한 가지 방법으로는 조류충돌을 막을 수 없으며, 여러 방법을 함께 쓰는 '통합 야생동물 관리'가 가장 효과적이었다.

이론적 토대를 마련하기 위해 돌비어(Dolbeer)·마라(Marra)·드볼트(DeVault)·블랙웰(Blackwell) 등의 통계·생태 연구와 윌벡(Wilbeck)·하임브스(Heimbs)의 충돌 역학 연구를 비롯한 국내외 선행연구를 폭넓게 검토했다. 이에 네가지 방어선이 순차적으로 작동하는 통합 위험 관리 모델을 제시했다. 첫 번째 방어선은 공항 입지 선정과 환경 관리를 통해 새가 애초에 모여들지 않도록 하는 예방이고, 두 번째는 레이더와 인공지능, 관측을 활용해 위험을 미리 파악하여 이착륙을 조정하거나 조류를 쫓아내는 탐지·회피이며, 세 번째는 충돌이 일어나더라도 항공기가 이를 견디도록 하는 공학적 내충격 설계이고, 네 번째는 충돌 이후 조종사와 시스템이 피해를 최소화하는 비상 대응이다. 이러한 다층 구조에서 위험이 큰 조류와 취약한 방어선에 적용하는 과학적 관리를 강조했다. 특히 회전익 항공기는 연구와 기준이 상대적으로 부족하다는 점을 짚고, 기종 유형에 따라 대응을 달리해야 함을 부각했다.

【주요어】 조류충돌, 항공기, 항공 안전, 조류 유인 요인, FAA, JCAB, ICAO

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1 절 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
제 2 절 연구의 목적 ····· 3
제 3 절 연구의 범위 및 방법 ····· 3

제 2 장 이론적 배경 ····· 5
제 1 절 조류충돌의 개념 및 정의 ····· 5
제 2 절 조류충돌 발생 메커니즘 및 물리적 특성 ····· 10
제 3 절 고정익·회전익 항공기의 구조적 특성과 취약성 ····· 11
제 4 절 국제 표준 및 인증 기준 ····· 20
제 5 절 선행연구 고찰 ····· 21

제 3 장 국·내외 조류충돌 사례 연구 ····· 30
제 1 절 미국 ····· 30
제 2 절 일본 ····· 36
제 3 절 한국 ····· 39

제 4 장 비행장 조류충돌 저감 방안 ····· 46
제 1 절 조류 유입 요인 저감 방안 ····· 46
제 2 절 조류충돌 종합 대응 방안 ····· 52
제 3 절 미래 신기술 활용 방안 ····· 60
제 4 절 통합 위험 관리 모델의 제안 ····· 63

제 5 장 결 론 ····· 67
제 1 절 연구결과 요약 ····· 67
제 2 절 정책적 제언 ····· 68
제 3 절 연구의 한계 및 향후 과제 ····· 70

참 고 문 헌 ····· 71

HANSUNG UNIVERSITY

A B S T R A C T ····· 76

HANSUNG UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 필요성

조류충돌(Bird Strike)은 비행 중이거나 지상에서 움직이는 항공기에 새가 부딪치거나, 새가 엔진 안으로 빨려 들어가는 현상을 뜻한다. 항공에서 가장 오래된 안전 위협의 하나다. 1903년 라이트 형제가 동력 비행에 성공한 지 2년 뒤인 1905년, 오빌 라이트가 새와 부딪친 기록이 남아 있을 정도로 이 문제는 항공의 역사와 함께 시작됐다.

항공 산업이 빠르게 커지는데도 조류충돌은 줄기는커녕 더 심해지고 있다. 미국 연방항공청 국가 야생동물 충돌 데이터베이스를 보면 1990년부터 2023년까지 미국에서만 약 29만 2천 건이 보고됐고, 2023년 한 해에만 약 1만 9,700건이 기록됐다. 1990년의 약 1,800건과 견주면 10배가 넘는다.

조류충돌이 늘어나는 이유는 한 가지가 아니다. 첫째, 환경 보호 정책이 강화되며 기러기·독수리처럼 큰 새가 늘었다. 둘째, 조용하고 성능 좋은 항공기가 보급되면서 새가 다가오는 비행기를 미리 알아채기 어려워졌다. 셋째, 운항 횟수 자체가 계속 늘어 항공기와 새가 마주칠 기회가 많아졌다. 넷째, 보고 체계가 정비되며 예전엔 빠지던 사례까지 집계되기 시작했다.

경제적 피해도 막대하다. 미국 연방항공청은 미국 항공 산업의 조류충돌 손실을 한 해 약 4억 달러로, 전 세계로는 매년 약 12억 달러로 추산한다. 엔진 하나를 고치는 데만 수백만 달러가 들고, 조종석 유리가 깨지는 것만으로도 최소 9만 달러가 넘는다. 정비로 항공기를 띄우지 못하는 손실과 일정 지연에 따른 승객 불편까지 더하면 실제 피해는 훨씬 커진다.

인명 피해로 보면 조류충돌은 재산 손실에 그치지 않고 치명적 사고로 번질 수 있다. 1988년부터 2023년까지 전 세계에서 야생동물 충돌로 491명 넘게 숨지고 350대 이상의 항공기가 완전히 망가진 것으로 집계된다.

2009년 1월 15일 US Airways 1549편은 허드슨강에 비상 착수하고도 조종사의 침착한 대응으로 155명 전원이 살아남았지만, 이는 매우 드문 경우다. 더 참혹한 사례가 2024년 12월 29일 무안국제공항의 제주항공 2216편 사고로, 양쪽 엔진이 조류충돌로 멈추면서 181명 중 179명이 목숨을 잃었다.

고정익과 회전익은 조류충돌에 대한 취약성과 피해 양상이 사뭇 다르다. 고정익 항공기는 주로 이착륙 단계에서 충돌하며, 엔진 흡입과 조종석 유리 파손이 주된 피해다. 헬리콥터로 대표되는 회전익 항공기는 낮게 날기 때문에 비행 내내 위험에 노출되고, 위에서 도는 큰 날개인 메인로터 블레이드와 꼬리 쪽 작은 날개인 테일로터, 조종석 창의 피해가 특히 치명적이다. 미국 연방항공청 특별 감항성 정보 공고에 따르면 회전익 항공기는 새가 가장 많이 모이는 1,066m(3,500피트) 이하 고도에서 주로 비행하며, 전체 조류충돌의 90% 이상이 이 고도대에서 일어난다.

그래서 조류충돌을 체계적으로 연구하고 실효성 있는 대응책을 마련하는 일은 항공 안전의 핵심 과제로 떠올랐다. 무엇보다 고정익과 회전익의 차이를 고려한 맞춤형 전략이 있어야 실제 안전 효과를 낼 수 있다. 이 연구는 조류충돌의 현황과 원인, 피해를 분석한 토대 위에서 한국·미국·일본의 대응 체계를 짚고, 기종 유형별로 차별화된 종합 대응 방안을 제시하려 한다.

2024년 12월 무안국제공항의 제주항공 2216편 사고는 이 연구의 시의성을 한층 끌어올린다. 단 한 건의 조류충돌이 어떻게 대형 참사로 번지는지를 한국 사회에 각인시켰고, 공항 입지와 활주로 종단 안전구역 구조물, 착륙 단계 비상 절차, 조류 위험 평가에 이르기까지 항공 안전 체계 전반을 다시 들여다보게 만들었다. 사고의 파장은 한국에 그치지 않아, 세계 각국의 항공 안전 당국도 자국 체계를 재점검하는 계기로 삼았다. 본 연구가 한국을 미국·일본과 나란히 놓고 비교한 까닭도 한국의 경험에서 얻은 교훈을 국제적 맥락 안에 자리매김하기 위해서다.

제 2 절 연구의 목적

이 연구의 목적은 고정익과 회전익 항공기의 조류충돌 현황·원인·피해를 체계적으로 분석하고, 한국·미국·일본의 사례를 중심으로 실효성 있는 대응 방안을 끌어내는 데 있다. 세부 목적은 다음과 같다.

첫째, 조류충돌의 이론적 토대를 세운다. 개념과 물리적 특성, 발생 메커니즘을 과학적으로 살피고, 고정익과 회전익 항공기의 구조적 취약성을 정리한다.

둘째, 세 나라의 현황과 통계를 비교한다. 발생 빈도와 피해 규모, 자주 부딪치는 새의 종류, 계절적 특성, 피해 부위를 짚어 나라별·기종별 특성을 밝힌다.

셋째, 대표적인 사고를 깊이 분석한다. 미국의 US Airways 1549편과 PHI S-76C++ 헬리콥터, 한국의 제주항공 2216편, 일본의 사례에서 경위·원인·결과·사후 조치를 살펴 시사점을 도출한다.

넷째, 앞선 대응 기술과 제도를 검토한다. 미국 연방항공청과 일본 운수성 항공국의 규정, 공항 야생동물 관리 프로그램, 조류 탐지 레이더, 조류 퇴치 시스템을 분석한다.

다섯째, 비행장과 그 주변에 새가 모여드는 원인을 정리하고, 이를 줄이는 구체적 방안과 기종별 특화 대응책을 함께 제시한다.

제 3 절 연구의 범위 및 방법

1. 연구의 범위

시간적 범위는 미국 연방항공청 국가 야생동물 충돌 데이터베이스가 구축된 1990년부터 최근 자료가 확보된 2023~2025년까지로 하며, 역사적으로 중요한 1988년 이전의 주요 사고도 보조 자료로 활용하였다.

지리적 범위는 한국·미국·일본을 주요 대상으로 한다. 미국은 가장 체계

적인 데이터베이스를 갖춘 나라, 일본은 아시아·태평양의 항공 선진국, 한국은 동아시아–대양주 철새 이동 경로에 자리해 조류충돌 위험이 크고 최근 대형 참사를 겪은 당사국이라는 점에서 직접적인 시사점을 준다.

항공기 범위는 민간 고정익 항공기(대형 여객기와 소형기 포함)와 회전익 항공기(민간 헬리콥터, 해상 작업용 헬리콥터 등)를 아우르며, 군용기 사례는 필요할 때 참고한다.

2. 연구의 방법

이 연구는 문헌 연구와 통계 분석, 사례 분석을 함께 썼다. 문헌 연구에서는 국내외 학술 논문과 미국 연방항공청·일본 운수성 항공국·국제민간항공기구 보고서, 미국 연방 교통안전위원회·호주 교통안전국·한국 항공철도사고조사위원회의 사고 조사 보고서, 항공 안전 법규와 표준을 모아 분석했다. 통계 분석에서는 국가 야생동물 충돌 데이터베이스의 공개 자료로 연간 추이와 계절 분포, 비행 단계별 분포, 부위별 피해, 경제적 손실 규모를 살폈고, 한국과 일본 통계는 국토교통부와 일본 운수성 항공국 자료로 확보했다. 사례 분석에서는 세 나라의 대표 사고를 골라 경위·기상 조건·조류 종류·피해 부위·원인·사후 조치를 종합적으로 검토했다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 조류충돌의 개념 및 정의

조류충돌은 영어로 'Bird Strike' 또는 'Bird/Wildlife Strike'라고 한다. 국제민간항공기구는 이를 "지상을 주행 중이거나 비행 중인 항공기가 새 또는 다른 야생동물과 충돌하거나 접촉하여 항공기의 구조나 작동에 손상을 줄 수 있는 사건"으로 정의한다. 미국 연방항공청은 조류충돌을 야생동물 충돌의 한 부분으로 분류하는데, 새가 전체 야생동물 충돌의 약 97%를 차지한다고 보고한다.

조류충돌은 심각성에 따라 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 첫째는 '경미한 충돌'로, 항공기에 눈에 띄는 손상이 없거나 가벼운 흠집만 생기는 경우이다. 둘째는 '실질적 피해 충돌'로, 항공기 구조물에 측정할 수 있는 손상이 생기는 경우이다. 셋째는 '치명적 충돌'로, 항공기가 안전하게 날 수 있는 능력에 직접 영향을 주는 심각한 손상이 발생하는 경우이다. 미국 연방 항공청 자료에 따르면 전체 충돌 중 약 15%만 실제 손상으로 이어지고(국제민간항공기구 기준은 약 11%), 치명적 수준은 더 드물지만 그 결과는 매우 위험하다.

조류충돌이 왜 위험한지는 충돌의 힘을 따져 보면 알 수 있다. 무게 약 900g짜리 청둥오리 한 마리가 시속 370km로 상승하는 항공기와 부딪치면 그 순간 충격력은 약 4.8톤에 달한다. 움직이는 물체의 에너지를 나타내는 식($E = \frac{1}{2}mv^2$)에 따르면, 새가 무거울수록, 그리고 항공기가 빠를수록 충돌 에너지는 급격히 커진다. 같은 크기의 새와 부딪쳐도 비행기가 얼마나 빠른가에 따라 피해 규모가 크게 달라지는 것이다.

조류충돌은 항공의 역사만큼이나 오래된 문제이다. 최초의 기록은 1905년 오빌 라이트가 비행 중 새와 부딪친 사례로 거슬러 올라가며, 동력 비행이 시작된 지 불과 몇 년 만에 인간의 비행과 새의 비행이 같은 하늘에서 부딪치기 시작했다. 항공기가 빠르고 무거워지고 항공 교통량이 폭발

적으로 늘면서 문제는 점점 커졌고, 오늘날 전 세계적으로 매년 약 1만 건 이상의 조류충돌이 보고된다. 보고되지 않는 경미한 사례까지 더하면 실제 발생 건수는 훨씬 많을 것으로 추정된다. 조류충돌은 특정 나라나 특정 시대의 문제가 아니라, 항공이 존재하는 한 함께 풀어가야 할 항구적 과제인 것이다.

1. 조류의 행동생태와 위험도

조류충돌을 줄이려면 새가 '왜, 언제, 어느 높이에서' 항공기와 마주치는지를 이해해야 한다. 미국 농무부 국립야생동물센터 학자 돌비어(Dolbeer)는 1990년부터 2004년까지 미국에서 보고된 충돌을 분석하여, 새의 충돌 고도가 매우 낮은 곳에 집중된다는 사실을 정량적으로 보였다. 그의 연구에 따르면 고도가 30m(약 100피트) 높아질 때마다 보고된 충돌 건수는 일정한 비율로 줄어드는 경향을 보이며, 이는 새의 대부분이 지면 가까이에서 활동함을 뜻한다.

그러나 '충돌이 가장 많이 일어나는 고도'와 '피해가 가장 큰 고도'는 다르다는 점에 주의해야 한다. 조류충돌 관련 논문을 서술한 학자 메츠(Metz) 등은 1990년부터 2009년까지의 데이터를 검토하면서, 전체 충돌의 약 75%가 500피트 이하에서 일어나지만 실제 손상을 일으킨 충돌 중에서는 그 비율이 55~65% 수준으로 낮아진다는 점을 지적하였다. 다시 말해 500피트보다 높은 곳에서 일어나는 충돌은 상대적으로 드물지만, 일단 일어나면 손상으로 이어질 확률이 더 높다는 것이다. 이는 높은 고도에서는 항공기의 속도가 빨라 충돌 에너지가 커지기 때문으로 해석된다.

어떤 새가 위험한가에 대한 연구도 활발하다. 미국 야생동물 관리·보전학술지에 서술한 학자 드볼트(DeVault) 등은 미국 야생동물 충돌 데이터베이스를 분석하여, 새의 종류마다 항공기에 끼치는 위험도가 크게 다르다는 점을 밝혔다. 충돌 건수가 많다고 해서 반드시 위험한 것이 아니라, 몸집이 크고 무리를 짓는 새가 실제 손상을 일으킬 가능성이 훨씬 높다. 이 때문에 공항 야생동물 관리에서는 단순히 새의 수를 세는 것이 아니라, '위험도 순위'에 따라 관리 자원을 배분하는 접근이 효과적이라고 제안되었다.

맹금류의 위험성도 중요한 연구 주제이다. 조류학 연구저널에서 붉은꼬리매, 칠면조독수리, 검은대머리수리와 항공기의 충돌 사례를 분석하여, 이들 맹금류가 비교적 큰 몸집과 활공 비행 습성 탓에 충돌 시 심각한 피해를 일으킨다고 보고하였다. 이 연구는 붉은꼬리매와의 단독 충돌로 헬리콥터가 전손된 2009년 민간 헬리콥터(PHI S-76) 사고를 이해하는 데에도 직접적인 시사점을 준다.

계절과 시간대의 영향, 그리고 텃새와 철새의 구분도 대응 전략에 영향을 준다. 같은 캐나다 기러기라도 한 지역에 머무르는 텃새 개체군과 멀리 이동하는 철새 개체군은 관리 방법이 달라야 한다. 조류학자 마라(Peter P. Marra) 등은 US Airways 1549편 사고기 엔진에서 수습한 깃털을 DNA와 안정동위원소 기법으로 분석하여, 사고를 일으킨 기러기가 뉴욕에 정착한 텃새가 아니라 캐나다 래브라도에서 번식한 뒤 남하한 철새 개체군이었음을 밝혔다. 이는 공항 주변의 텃새만 관리해서는 충돌을 막을 수 없으며, 광역적인 철새 이동까지 고려한 관리가 필요함을 보여 준다.

2. 기상·시간대와 철새 이동 경로

조류충돌 위험은 기상 조건과도 관련이 깊다. 안개나 낮은 구름으로 시야가 나쁠 때는 조종사가 새를 미리 발견하기 어렵고, 새 역시 항공기를 피하기 어렵다. 호주 Bell社 206 L-1 사고에서 조종사가 햇빛 눈부심 때문에 독수리를 보지 못한 것처럼, 햇빛의 방향도 충돌에 영향을 준다. 비가 온 뒤에는 활주로 주변에 지렁이가 올라오고 물웅덩이가 생겨 새가 모여들기 쉬우며, 강한 바람은 새의 비행 고도와 경로를 바꾸어 평소와 다른 위험을 만들 수 있다.

하루 중 시간대도 중요하다. 새는 해가 뜨는 이른 아침과 해가 지는 저녁 무렵에 먹이 활동과 이동을 활발히 한다. 통계적으로도 충돌의 상당수가 주간에 일어나지만, 야간 비행이 많은 노선에서는 어두운 시간대의 충돌도 무시할 수 없다. 야간에는 새를 눈으로 발견하기가 더 어렵기 때문에, 레이더 같은 탐지 기술의 가치가 특히 커진다.

가장 큰 변수는 철새 이동 경로이다. 전 세계의 철새는 몇 개의 큰 이동

통로를 따라 정해진 시기에 대규모로 이동한다. 한국·일본은 동아시아–대양주 철새 이동 경로 상에 있어 봄·가을 이동기와 겨울 월동기에 위험이 급증하고, 미국은 대서양·미시시피 등 여러 이동 경로가 지난다. 따라서 공항의 위험을 평가할 때는 그 공항이 어떤 철새 경로 위에 있는지, 어느 시기에 어떤 새가 지나는지를 반드시 고려해야 한다. 이는 한 나라의 노력만으로는 충돌을 막기 어렵고 국제 협력이 필요한 근본 이유이기도 하다.

3. 비행 단계별 위험과 피해 유형의 분류

조류충돌의 위험은 비행 단계에 따라 크게 달라진다. 고정익 항공기에서는 충돌의 대다수가 지면에 가까운 이착륙 단계에 집중되는데, 이는 새가 주로 낮은 고도에서 활동하고 이 단계에서 항공기 고도가 새의 활동 영역과 겹치기 때문이다. 이륙 활주와 상승 초기에는 엔진이 최대 출력으로 작동하므로 새 흡입에 특히 취약하고, 접근·착륙 단계에서는 속도가 낮아 조종 여유가 적다. 반면 회전익 항공기는 순항을 포함한 모든 단계에서 낮게 비행하므로, 충돌이 특정 단계에 몰리지 않고 비행 내내 고르게 분포한다는 점이 고정익과 근본적으로 다르다.

충돌의 ‘피해 심각도’도 단계적으로 분류할 수 있다. 가장 가벼운 경우는 흔적만 남고 손상이 없는 충돌이며, 다음은 부품 교체나 점검이 필요한 경미한 손상, 그다음은 비행을 중단하거나 회항해야 하는 실질적 손상, 가장 심각한 경우는 항공기 전손이나 인명 피해로 이어지는 충돌이다. 앞서 살펴본 것처럼 ‘자주 일어나는 충돌’의 대부분은 가벼운 손상에 그치지만, 대형 조류나 무리와의 충돌은 드물게 일어나도 심각한 결과를 낳는다. 따라서 위험 관리는 단순히 충돌 ‘건수’를 줄이는 것을 넘어, 심각한 손상으로 이어질 수 있는 ‘고위험 충돌’을 우선적으로 예방하는 데 초점을 맞추어야 한다. 이러한 위험과 위해의 구분은 이후 장에서 살펴볼 종별 위험도 평가와 관리 우선순위 결정의 토대가 된다.

4. 조류의 감각·행동 특성과 충돌

새가 왜 항공기를 미리 피하지 못하는지, 그리고 어떻게 하면 피하게 할

수 있는지를 이해하려면 새의 감각과 행동을 알아야 한다. 조류학 연구저널 등의 감각 생태학 연구에 따르면, 새의 시각은 사람과 크게 다르다. 많은 새는 사람이 보지 못하는 자외선 영역을 보는 대신, 빠르게 다가오는 큰 물체의 '충돌 시점'을 사람만큼 정확히 판단하지 못할 수 있다. 또한 새는 머리를 좌우로 두어 넓은 시야를 확보하는 대신 정면의 깊이 인식이 약한 경우가 많아, 정면에서 고속으로 접근하는 항공기를 위협으로 늦게 인식한다.

이러한 특성은 두 가지 시사점을 준다. 첫째, 저소음 항공기일수록 새가 소리로 미리 감지하기 어려워 충돌 위험이 커진다. 둘째, 거꾸로 새의 시각 특성에 맞춘 신호(특정 파장의 점멸 조명 등)를 주면 새가 항공기를 더 일찍 인식해 회피할 수 있다. 블랙웰 등이 항공기 조명 실험에서 회피 행동의 증가를 확인한 것이 그 근거이며, 이는 앞서 살펴본 항공기 탑재형 능동 회피 기술의 과학적 토대가 된다.

행동 측면에서 무리 짓기도 중요하다. 새가 무리를 이루면 한 마리가 위험을 감지했을 때 빠르게 전파되어 집단으로 회피하지만, 동시에 큰 무리가 엔진에 한꺼번에 빨려 들면 US Airways 1549편처럼 치명적 결과를 낳는다. 또 새는 먹이가 풍부한 장소에 강하게 집착하는 '장소 충실성'을 보여, 한 번 좋은 먹이터로 인식한 공항에는 쫓아내도 반복해서 돌아온다. 이 때문에 새를 '쫓는' 것보다 먹이 자체를 '없애는' 환경 관리가 근본적으로 더 효과적인 것이다. 결국 새의 감각과 행동에 대한 이해는 퇴치 기술의 설계와 환경 관리 전략 모두의 바탕이 된다.

5. 조류충돌의 사회·경제적 영향

조류충돌의 영향은 항공기 손상에 그치지 않는다. 영국 조류충돌 방지 전문가 앨런(John R. Allan)의 경제 분석이 강조하듯, 실제 비용의 상당 부분은 눈에 잘 보이지 않는 간접 비용이다. 충돌로 항공편이 지연되거나 결항하면 승객 보상, 숙박 제공, 대체 항공편 마련, 예비기 투입에 비용이 든다. 손상된 항공기가 정비를 받는 동안 운항하지 못하는 '기회 비용'도 크다. 이런 간접 비용까지 더하면 전 세계 항공업계의 연간 손실은 수십억 달러에 이르는 것

으로 추정된다.

경제적 손실을 넘어, 대형 사고는 사회 전체에 깊은 영향을 남긴다. 인명 손실의 비극은 말할 것도 없고, 사고는 항공 안전에 대한 대중의 신뢰를 흔들고, 해당 항공사와 공항의 평판에 타격을 주며, 때로는 항공 정책과 규제 전반의 재검토로 이어진다. 제주항공 2216편 사고가 한국 사회에 미친 충격과 그로 인한 광범위한 안전 점검이 이를 잘 보여 준다. 또한 조류충돌 대응은 새를 죽이거나 쫓는 일을 포함하므로, 동물 복지와 생태 보전이라는 윤리적·환경적 차원의 고려도 요구된다. 이처럼 조류충돌은 안전·경제·사회·윤리가 얽힌 복합적 문제이며, 그렇기에 어느 한 분야의 시각만으로는 충분히 다룰 수 없는 것이다.

제 2 절 조류충돌 발생 메커니즘 및 물리적 특성

조류충돌은 새의 생활 습성과 항공기의 운항 특성이 맞물려 일어난다. 새는 먹이 활동, 철새 이동, 번식, 상승 기류 이용 등 여러 이유로 특정 고도에서 비행한다. 이 가운데 충돌 위험이 가장 큰 것은 공항 주변에서 먹이를 찾는 새와, 철새 이동기에 무리 지어 이동하는 새 떼이다.

고도별로 보면, 조류충돌은 대부분 낮은 하늘에 몰려 있다. 미국 연방항공청 야생동물 위험 관리 매뉴얼에 따르면 전체 충돌의 약 61%가 고도 9m(30피트) 이하에서, 90% 이상이 915m(3,000피트) 이하에서 일어난다. 900m보다 높은 곳에서 일어나는 충돌은 8%에도 미치지 못한다. 다시 말해, 새의 대부분은 낮게 날며 특히 활주로 주변과 공항 근처의 이착륙 단계에 위험이 집중된다.

비행 단계별로 살펴보면 그 차이가 뚜렷하다. 미국 연방항공청의 국가 야생동물 충돌 데이터베이스(1990~2023) 자료를 풀어 보면, 고정익 항공기의 조류충돌은 최종 접근 단계에서 약 31%로 가장 많이 일어난다. 이어서 비행기가 힘껏 고도를 올리는 상승 단계가 약 27%로, 엔진이 강하게 공기를 빨아들이기 때문에 새 흡입 위험이 가장 높은 '매우 위험' 구간으로 분류된다. 비행기가 고도를 내리는 하강 단계가 약 22%, 이륙을 위

해 활주로를 달리는 이륙 활주 단계가 약 9%, 착륙 후 활주로를 달리는 착륙 활주 단계가 약 8%를 차지한다. 반대로 높고 빠르게 나는 순항 단계는 약 3%로 가장 낮다. 결국 전체 충돌의 약 2/3가 이착륙과 관련된 낮은 고도·낮은 속도 구간에 몰려 있는 셈이다.

계절도 중요한 변수이다. 미국 연방항공청 자료에 따르면 조류충돌의 약 54%가 7월부터 10월 사이에 집중된다. 이 시기는 어린 새들이 둥지를 떠나는 때이자 가을 철새 이동이 시작되는 때로, 새들의 활동이 가장 활발하다. 하루 중에는 새가 활동적인 해 뜰 무렵과 해 질 무렵이 위험하며, 전체 충돌의 약 62%가 낮에, 30%가 밤에, 나머지 8%가 새벽·황혼에 일어난다.

어떤 새와 부딪치느냐도 피해를 좌우한다. 미국에서 가장 자주 부딪치는 새는 산비둘기로, 종이 확인된 충돌의 약 11%를 차지한다. 그러나 실제 항공기에 큰 손상을 입히는 쪽은 따로 있다. 오리·기러기 같은 물새(수조류)는 충돌 건수로는 4%에 불과하지만, 손상을 일으킨 사례의 27%를 차지한다. 몸집이 큰 새일수록 충돌 에너지가 커서 위험하기 때문이다. 한편 찌르레기는 사람 사망을 가장 많이 일으킨 새로 기록되어 있다.

제 3 절 고정익·회전익 항공기의 구조적 특성과 취약성

1. 고정익 항공기의 구조적 특성과 취약성

고정익 항공기는 고정된 날개로 양력을 얻는 항공기로, 대형 여객기부터 작은 경항공기까지 종류가 다양하다. 조류충돌 관점에서 주로 약한 부위는 엔진, 조종석 유리, 날개의 앞쪽 가장자리(앞전), 동체 앞코(레이돔), 꼬리 날개 등이다.

가장 심각한 피해 유형은 엔진 흡입이다. 제트 엔진의 팬 블레이드는 매우 빠르게 회전하는데, 새가 빨려 들어가면 블레이드가 부러지거나 압축기가 손상되고, 엔진이 출력을 잃거나 완전히 멈출 수 있다. 특히 엔진이 두 개인 쌍발기에서 두 엔진이 동시에 손상되면 치명적이다. FAA 자료를 보면 날개와 엔진이 각각 손상 부위의 약 25%를 차지해 가장 자주 피해

를 입는 부위로 나타난다.

국제 인증 기준 측면에서, 현대 제트 여객기는 무게 1.8kg 무게의 새가 어느 부위에 부딪쳐도 비행을 계속하고 안전하게 착륙할 수 있도록 설계해야 한다. 꼬리 날개는 더 무거운 3.6kg 무게의 새의 충돌도 견뎌야 하며, 조종석 유리는 1.8kg 무게의 새와 부딪쳐도 깨지거나 파편이 떨어지지 않아야 한다. 다만 이 기준은 설계 당시의 요구사항일 뿐, 실제 운항에서 일어날 수 있는 모든 충돌 상황을 완전히 막아 주지는 못한다.

문제는 작은 경항공기이다. 이들은 대형 여객기와 달리 공식적인 조류충돌 인증 요건이 적용되지 않는 경우가 많아 더 취약하다. 5,700kg 이하의 소형 항공기는 새 충격 요건에서 면제되기도 하는데, 이 때문에 소형기에서 조류충돌로 인한 치명적 사고가 상대적으로 자주 발생한다.

2. 회전익 항공기의 구조적 특성과 취약성

회전익 항공기, 곧 헬리콥터는 회전하는 로터 블레이드로 양력과 추진력을 동시에 얻는 항공기로, 고정익과 근본적으로 다른 구조를 가진다. 이 차이는 조류충돌 시 피해 모습과 대응 방법에도 큰 차이를 만든다.

미국 연방항공청의 특별감항성 정보 게시판(AIR-21-17R1 2023)에서 회전익 항공기의 독특한 취약성을 세 가지로 설명한다. 첫째, 대부분의 헬리콥터는 새가 가장 많이 모이는 1,066m 이하의 낮은 하늘에서 비행해 늘 새와 마주칠 위험이 크다. 둘째, 위에서 돌아가는 메인로터 블레이드에 새가 부딪치면 날개의 균형이 무너지거나 구조가 손상되어 심한 진동, 조종력 상실, 심하면 비행 중 기체 분해로 이어질 수 있다. 셋째, 새가 조종석 창을 뚫고 들어와 조종사를 직접 가격하거나 조종 장치를 건드려 사고를 일으킬 수 있다.

통계로 보면, 1990년부터 2005년까지 미국에서 보고된 민간 항공기 조류충돌 6만 4,734건 중 헬리콥터 관련은 370건(약 0.6%)으로 절대 건수는 적었다. 그러나 이 중 186건(50%)에서 실제 손상이 발생해, 충돌이 손상으로 이어지는 비율은 고정익보다 훨씬 높았다. 특히 조종석 창 관통은 치명적 헬리콥터 사고의 주요 원인으로, 치명적 사고의 약 60%에서

조종석 창 충격이 확인되었다는 연구도 있다.

헬리콥터의 피해 부위를 풀어 보면, 가장 위험한 곳은 조종석 창이다. 소형기에서는 충돌의 약 47%, 대형기(Part 29)에서는 약 40%가 조종석 창에서 일어나며, 조종사가 직접 맞거나 시야가 가려지는 '매우 높음' 위험으로 분류된다. 다음으로 메인로터 블레이드가 약 30~33%로 날개 균형 손상과 진동을 일으키고, 동체 앞부분이 약 15~20%, 엔진 흡입구가 약 8~12%(엔진 정지·출력 손실), 테일로터가 약 5~8%(기수 방향 제어 상실)를 차지한다. 즉 헬리콥터에서는 조종석 창과 로터가 가장 치명적인 부위인 것이다.

특히 주목할 점은 위험한 비행 단계가 고정익과 정반대라는 사실이다. 고정익 항공기는 충돌의 약 2/3가 착륙 관련 단계에 몰리지만, 헬리콥터는 순항 단계에서 전체 충돌의 약 2/3가 일어난다. 헬리콥터가 낮은 고도를 순항하면서 큰 운동 에너지를 가진 상태로 새와 부딪치는 경우가 많기 때문이며, 그만큼 위험도 더 크다.

3. 조류충돌의 충돌 역학과 항공기 내충격 설계

조류충돌을 줄이는 방법에는 새가 모이지 않게 하는 '예방'과, 충돌이 일어나도 항공기가 견디도록 하는 '내충격 설계'가 있다. 이 장에서는 후자에 해당하는 항공공학적 접근을 살펴본다. 새가 항공기에 부딪칠 때 어떤 물리 현상이 일어나는지, 이를 어떻게 컴퓨터로 모사하는지, 그리고 어떤 재료와 설계로 피해를 줄일 수 있는지를 선행연구를 바탕으로 정리한다.

가. 새의 충돌은 '무른 물체의 충돌'이다

새와 항공기의 충돌을 이해하는 핵심은, 새가 돌이나 금속 같은 단단한 물체가 아니라 물에 가까운 '연성체'로 거동한다는 사실이다. 빠른 속도로 부딪치는 순간 새의 몸은 형태를 유지하지 못하고 액체처럼 흩어지면서 충격 면에 퍼져 나간다. 윌벡(Wilbeck)은 1970년대에 수행한 고전적 실험에서, 일정 속도 이상에서는 새가 마치 유체처럼 거동하며 충격 압력이 새

의 강도가 아니라 밀도와 속도에 좌우된다는 점을 밝혔다. 이후의 거의 모든 연구가 새를 물과 비슷한 밀도의 유체 덩어리로 모델링하는 것은 이 발견에 근거한다.

충돌의 세기는 앞서 살펴본 운동 에너지 식($E = \frac{1}{2}mv^2$)으로 가늠할 수 있다. 새의 질량이 두 배가 되면 충돌 에너지도 두 배가 되지만, 속도가 두 배가 되면 에너지는 네 배로 커진다. 그래서 같은 새라도 고속으로 비행하는 항공기와 부딪칠 때 훨씬 위험하며, 이는 빠르게 상승하거나 하강하는 단계에서 큰 피해가 나는 이유를 설명해 준다. 또한 충돌이 극히 짧은 시간(수천분의 1초) 안에 일어나기 때문에, 충격력이 순간적으로 수 톤에 이르는 큰 값으로 나타난다.

나. 충돌을 컴퓨터로 모사하는 방법

실제 새를 발사해 항공기 부품에 부딪치는 충돌 시험은 비용이 매우 많이 들고 반복하기 어렵다. 그래서 설계 단계에서는 컴퓨터 시뮬레이션이 핵심 도구가 된다. 가장 널리 쓰이는 방법은 부품을 잘게 나누어 해석하는 유한요소법(FEM)과, 새처럼 크게 흩어지는 물체를 입자 덩어리로 표현하는 입자 유체 동력학(SPH)을 결합한 'SPH–FEM 연성 해석'이다. 새는 형태가 사라질 만큼 크게 변형되기 때문에, 격자가 일그러지면 계산이 깨지는 전통적 유한요소법보다 입자 기반의 SPH가 더 적합하다.

이 분야의 초기 연구로 르텔리에(Letellier, 1997) 등은 SPH를 유한요소와 결합하여 엔진 팬 블레이드에 대한 새 충돌을 해석하였고, 이후 류(Liu, 2013)와 리(Li, 2013)는 회전하는 엔진 압축기에 대한 새 충돌을 수치 모사하여 회전 속도와 충돌 위치가 손상에 미치는 영향을 분석하였다. 하임브스(Heimbs, 2011)는 이러한 시뮬레이션 기법들을 종합적으로 검토하여, 새를 표현하는 모델(원통형·타원체·반구 끝 원통형 등)과 재료 모델, 그리고 검증 방법의 장단점을 정리하였다.

최근 연구들은 한 마리가 아니라 여러 마리가 동시에 부딪치는 '무리 충돌'까지 모사한다. 한 연구는 입자 유체 동력학 모델로 무리 충돌을 해석하여, 충돌 위치 분포에 따라 피해가 달라지며 특히 블레이드 뿌리 부분에

충돌이 집중될 때 가장 위험하다는 결과를 얻었다. 또 다른 연구들은 새의 질량·속도·충돌 각도·팬 회전 속도가 손상에 미치는 영향을 매개변수별로 분석하여, 내충격 설계와 감항성 검증에 활용할 수 있는 기준을 제시하였다. 이러한 시뮬레이션은 실제 시험을 완전히 대체하지는 못하지만, 시험 횟수를 크게 줄이고 설계를 빠르게 개선하는 데 결정적으로 기여한다.

다. 부위별 내충격 설계

(1) 엔진과 팬 블레이드

엔진은 고정익 항공기에서 가장 위험한 충돌 부위이다. 시뮬레이션 연구들이 공통으로 보여 주듯, 팬 블레이드가 받는 손상은 새의 질량과 속도, 그리고 충돌이 블레이드의 어느 지점에 일어나는지에 크게 좌우된다. 블레이드 뿌리에 가까운 충돌일수록 위험하다. 이를 견디기 위해 엔진은 일정 무게의 새를 흡입해도 즉시 부서지지 않고 안전하게 출력을 유지하거나 정지하도록 설계되며, 감항 당국은 새 흡입 시험을 인증 요건으로 둔다. 다만 두 엔진이 동시에 큰 새 떼를 흡입하는 경우는 인증 시험으로 완전히 대비하기 어려우며, US Airways 1549편이 바로 그러한 사례였다.

(2) 날개 앞전과 조종석 유리

날개의 앞쪽 가장자리(앞전)와 동체 앞코는 비행 중 새와 정면으로 만나는 부위이다. 여기에는 알루미늄 합금과 유리섬유 복합재를 겹친 '섬유금속적층판(FML)' 같은 재료가 충돌 에너지를 흡수하도록 적용되며, 시뮬레이션과 충돌 시험으로 그 성능이 검증된다. 조종석 유리는 두꺼운 적층 유리나 폴리카보네이트로 만들어 1.8kg의 새와 부딪쳐도 깨지거나 파편이 조종석 안으로 들어오지 않도록 설계된다. 조종사의 생명과 시야가 걸린 부위이므로 가장 엄격한 기준이 적용된다.

(3) 신소재의 적용

최근에는 가벼우면서도 강한 신소재를 활용해 내충격 성능을 높이려는 연구가 활발하다. 티타늄 합금은 무게 대비 강도가 뛰어나 팬 블레이드에

쓰이며, 속이 빈 구조(중공 블레이드)로 만들어 무게를 더 줄이기도 한다. 탄소 섬유 강화 복합재료는 가볍지만 충격에 의해 층이 벌어지는 손상(층간 분리)이 생길 수 있어, 충돌 시 어떤 손상 양상이 나타나는지를 정밀하게 해석하는 연구가 이어지고 있다. 이러한 신소재 연구는 항공기를 가볍게 만들어 연료를 아끼면서도 새 충돌을 견디게 한다는 두 가지 목표를 동시에 추구한다.

라. 회전익 항공기의 내충격 과제

회전익 항공기는 내충격 설계 측면에서 고정익보다 어려운 과제를 안고 있다. 첫째, 위에서 빠르게 도는 메인로터 블레이드는 그 자체가 새와 부딪칠 확률이 높고, 충돌로 균형이 무너지면 심한 진동과 구조 손상으로 이어진다. 둘째, 헬리콥터의 조종석 창은 고정익 여객기만큼 엄격한 새 충돌 내성 기준이 적용되지 않는 경우가 많아, 큰 새가 창을 뚫고 들어오는 사고가 반복되어 왔다. 앞서 살펴본 PHI S-76 사고와 호주 Bell社 206 L-1 사고가 대표적이다. 셋째, 조종석 창 주변에 엔진 제어 핸들 같은 중요한 장치가 노출되어 있어, 충격으로 의도치 않게 작동하면 치명적 결과를 낳을 수 있다.

따라서 회전익 항공기의 내충격 설계는 조종석 창의 재료와 두께를 강화하고(폴리카보네이트·적층 아크릴 적용 확대), 창틀 구조를 보강하며, 충격으로 인한 제어 장치의 오작동을 막는 잠금·방호 장치를 마련하는 방향으로 나아가야 한다. 메인로터 블레이드에 대해서도 대형 조류 충돌을 견디는 내성을 검증하는 기준 마련이 요구된다. 그러나 헬리콥터는 무게 여유가 적어 무작정 보강하기 어렵다는 제약이 있어, 시뮬레이션을 활용한 정교한 최적 설계가 특히 중요하다.

회전익 로터 블레이드에 대한 새 충돌 시뮬레이션 연구도 점차 늘고 있다. 류(Liu)와 리(Li)가 회전하는 엔진 압축기에 대한 새 충돌을 모사한 것처럼, 회전체에 대한 충돌은 정지 구조물보다 해석이 복잡하다. 충돌 순간 블레이드가 빠르게 돌고 있어, 같은 새라도 부딪치는 시점과 위치에 따라 손상이 크게 달라지기 때문이다. 이러한 회전 효과를 반영한

SPH-FEM 해석은 헬리콥터 로터의 내충격 설계와 검증 기준 마련에 필요한 정량적 근거를 제공한다.

결국 회전익 항공기의 내충격 문제는 '기준의 공백'과 '기술적 제약'이 겹친 영역이다. 고정익에 비해 인증 기준이 느슨하고, 무게 제약 탓에 보강도 어렵다. 그렇기에 시뮬레이션 기반의 효율적 설계, 그리고 무엇보다 충돌 자체를 줄이는 운항 절차(저고도 비행 최소화, 조류 밀집 구역 회피)와의 결합이 더욱 중요하다. 공학적 한계가 큰 만큼, 회전익에서는 예방과 운항 측면의 대응이 상대적으로 더 큰 몫을 맡아야 하는 것이다.

마. 공학적 접근의 의의와 감항 인증·시험

내충격 설계는 충돌을 '예방'하지는 못하지만, 충돌이 일어났을 때 '참사로 번지지 않게' 하는 마지막 안전망이다. US Airways 1549편에서 양쪽 엔진이 멈춘 뒤에도 기체가 강에 내려앉을 때까지 구조가 버텨 준 것, 그리고 조종석 유리가 충돌을 견뎌 조종사가 끝까지 조종할 수 있었던 것은 모두 내충격 설계의 덕이다. 다만 공학적 보강에는 무게와 비용이라는 분명한 한계가 있으며, 인증 기준이 모든 실제 상황을 대비할 수는 없다. 그러므로 내충격 설계는 비행장 환경 관리와 탐지·퇴치 같은 예방책과 '함께' 작동해야 하며, 어느 한쪽만으로는 조류충돌 위험을 충분히 줄일 수 없다.

또한 내충격 설계에는 본질적인 '상충 관계'가 존재한다. 항공기를 더 튼튼하게 만들수록 무게가 늘어 연료 소비와 운항 비용이 커지고, 반대로 가볍게 만들수록 충돌에 취약해진다. 따라서 설계자는 '얼마나 큰 새를, 얼마나 견딜 것인가'를 비용·무게·안전의 균형 속에서 결정해야 하며, 이 결정의 기준이 바로 감항 인증 요건이다. 시뮬레이션 기술의 발전은 이 균형점을 더 정밀하게 찾도록 도와, 불필요한 무게 증가 없이 꼭 필요한 부위만 효율적으로 보강할 수 있게 한다. 이런 의미에서 SPH-FEM 같은 해석 기술은 단순한 검증 도구를 넘어, 더 안전하면서도 더 경제적인 항공기를 설계하는 핵심 수단이라 할 수 있다. 그럼에도 공학적 대응만으로 모든 위험을 없앨 수는 없다는 사실은, 다시 한번 예방·탐지·내충격·대응이

함께 가야 한다는 본 연구의 일관된 결론으로 이어진다.

이러한 내충격 설계의 수준은 '감항성 인증'이라는 제도를 통해 강제된다.

항공기가 일정 수준의 새 충돌을 견디도록 만드는 일은 '감항성 인증'이라는 제도를 통해 강제된다. 감항성이란 항공기가 안전하게 비행할 수 있는 상태를 뜻하며, 제작사는 항공기를 시장에 내놓기 전에 규정된 새 충돌 시험을 통과해야 한다. 주요 기준을 풀어 설명하면 다음과 같다.

(1) 기체 구조와 조종석 창

미국 연방항공규정과 유럽 인증 기준은 운송용 고정익 항공기(미국 14 CFR Part 25, 유럽 CS-25)에 대해, 약 1.8kg 무게의 의 새와 순항 속도로 부딪쳐도 기체가 안전하게 비행을 계속할 수 있어야 한다고 규정한다. 조종석 앞 유리는 이 충돌을 견디고 파편이 조종석으로 들어오지 않아야 한다. 이는 한쪽 구조가 손상되어도 나머지로 비행을 마칠 수 있게 하는 '손상 허용' 사고방식에 따른 것이다.

(2) 엔진의 새 흡입 시험

엔진은 별도의 엄격한 기준을 따른다. 엔진 크기에 따라 작은 새 여러 마리, 중간 크기의 새, 그리고 큰 새(최대 약 3.65kg)를 흡입하는 시험을 거쳐야 하며, 큰 새를 흡입한 경우 즉시 폭발하거나 화재를 일으키지 않고 안전하게 정지(또는 일정 출력 유지)해야 한다. 중간 크기 새 흡입 시험에서는 일정 시간 동안 추력을 유지하도록 요구된다. 이러한 시험은 앞 절에서 살펴본 SPH-FEM 시뮬레이션으로 사전 검증한 뒤 실제 시험으로 최종 확인하는 방식으로 이루어진다.

(3) 회전익 항공기 기준의 공백

문제는 회전익 항공기의 기준이 고정익만큼 엄격하지 않다는 점이다. 대형 헬리콥터에는 약 1kg 무게의 새 충돌 내성 요건이 있으나, 소형 헬리

콥터에는 조종석 창의 새 충돌 내성에 대한 명시적 의무 기준이 부족하다. 이 공백이 PHI S-76 사고와 호주 Bell社 206 사고처럼 큰 새가 조종석 창을 뚫는 참사로 이어졌다. 미국 연방항공청는 2023년 회전익 조류충돌에 관한 특별 감항 정보 회보를 발간해 주의를 환기하였으나, 강제 기준의 신설은 여전히 과제로 남아 있다. 본 연구가 제9장에서 제안하는 '회전익 조종석 창 인증 기준 강화'는 바로 이 공백을 메우기 위한 것이다.

이렇게 정한 기준은 결국 실제 시험으로 확인된다.

시뮬레이션이 아무리 정교해도, 최종 인증은 실제 시험으로 확인된다. 새 충돌 시험은 가스 발사 장치를 사용한다. 압축 공기나 가스의 힘으로 일정 무게의 새(또는 새를 본뜬 인공 대체물)를 시험 대상 부품을 향해 정해진 속도로 발사하고, 고속 카메라와 압력 센서로 충돌 순간의 변형과 손상을 측정하는 방식이다. 엔진은 회전하는 상태에서 새를 흡입시키고, 조종석 창과 날개 앞전은 실제 비행 속도에 맞춰 발사한다. 동물 윤리와 시험의 일관성을 위해 최근에는 젤라틴 등으로 만든 인공 새 대체물의 사용이 늘고 있으며, 이 대체물이 실제 새와 같은 거동을 보이도록 밀도와 형상을 맞추는 연구도 이어지고 있다.

이러한 시험은 비용이 매우 크고 한 번 수행하는 데 오랜 준비가 필요하기 때문에, 앞서 살펴본 SPH-FEM 시뮬레이션으로 다양한 조건을 미리 검토해 시험 횟수를 최소화하는 '시뮬레이션 선행, 시험 확인' 방식이 표준이 되었다. 결국 컴퓨터 해석과 실제 시험은 경쟁 관계가 아니라, 서로를 검증하고 보완하며 항공기의 내충격 성능을 함께 끌어올리는 두 축이라 할 수 있다.

이러한 해석과 시험의 방법은 한 세기에 걸쳐 발전해 왔다.

조류충돌에 대한 공학적 대응은 한 세기에 걸쳐 발전해 왔다. 초기에는 충돌을 경험적으로만 다루었으나, 1950~60년대 제트 여객기 시대가 열리면서 엔진과 조종석 창의 새 충돌 내성이 본격적인 공학 과제가 되었다. 1970년대 윌벡(Wilbeck)의 실험 연구는 새의 연성체 거동을 정량적으로

규명하여, 이후 모든 시뮬레이션 모델의 물리적 토대를 제공하였다. 1990년대 이후 컴퓨터 성능이 향상되면서 SPH–FEM 같은 수치 해석이 표준 설계 도구로 자리 잡았다.

시험 표준도 함께 진화하였다. 초기에는 단순히 '일정 무게의 새를 견디는가'를 확인하는 데 그쳤으나, 점차 충돌 속도·각도·위치·무리 충돌 같은 다양한 조건을 반영하는 방향으로 정교해졌다. 오늘날의 인증 시험은 컴퓨터 시뮬레이션으로 수많은 조건을 미리 검토한 뒤, 가장 위험한 조건을 골라 실제 가스건 시험으로 확인하는 '해석–시험 병행' 방식을 따른다. 이는 비용을 절감하면서도 안전성을 높이는 현대적 접근이다.

재료공학의 발전도 내충격 성능을 끌어올렸다. 과거의 알루미늄 합금에서 시작해, 무게 대비 강도가 뛰어난 티타늄 합금, 그리고 가볍고 강한 탄소 섬유 강화 복합재료와 섬유금속적층판으로 적용 소재가 다양해졌다. 다만 복합재는 충격 시 눈에 보이지 않는 내부 층간 분리가 생길 수 있어, 충돌 후 손상을 정밀하게 검사하는 비파괴 검사 기술도 함께 발전해 왔다. 이처럼 재료·해석·시험·검사가 맞물려 발전하면서, 현대 항공기의 새 충돌 내성은 과거와 비교할 수 없을 만큼 향상되었다. 그럼에도 US Airways 1549편이나 제주항공 2216편이 보여 주듯, 대형 조류 무리와의 충돌이라는 극한 상황은 여전히 공학만으로는 완전히 대비하기 어려우며, 예방과 내충격 설계가 함께 가야 한다는 결론으로 돌아가게 된다.

제 4 절 국제 표준 및 인증 기준

조류충돌과 관련한 국제 기준은 크게 항공기 자체의 '내성 기준'과 공항의 '관리 의무'로 나뉜다. 이를 표 대신 문장으로 정리하면 다음과 같다.

먼저 항공기 내성 기준이다. 미국 연방항공청의과 유럽 항공안전청은 운송용 항공기 전체가 1.8kg 무게의 새와 부딪쳐도 비행을 계속하고 안전하게 착륙할 수 있도록 요구한다. 미국 연방항공청은 꼬리 날개에 대해 더 무거운 3.6kg 무게의 새의 충돌에도 구조가 건전하게 유지될 것을 요구한다. 헬리콥터에 대해서는 소형 기종과 대형 기종에 대한 별도 인증 기준이

있으나, 종류에 따라 요구 수준이 다르고 특히 소형 헬리콥터의 조종석 창에 대한 새 충돌 내성 요건이 미흡하다.

다음으로 공항 관리 의무이다. 국제민간항공기구 장애물 관리용 이륙상승표면은 회원국 공항이 야생동물 위험을 관리하도록 의무화한다. 국제민간항공기구는 또한 국제 조류충돌 보고 표준인 IBIS(Bird Strike Information System)를 운영하여, 충돌 당시의 고도·비행 단계·항공기 부위·새의 종과 크기·피해 정도·경제적 손실 등을 기록하도록 한다. 미국 연방항공청 공항 운영인증서에 따라 정기 항공 운송 공항이 야생동물 위험 평가와 관리 계획을 세우도록 한다. 결국 '비행기는 일정 크기의 새 충돌을 견디도록 만들고, 공항은 새가 모이지 않도록 관리한다'는 두 축이 국제 기준의 핵심이다.

제 5 절 선행연구 고찰

1. 선행연구 검토의 개요

조류충돌은 항공의 역사만큼이나 오래된 문제인 만큼, 지난 수십 년간 통계학·생태학·항공공학·정책학 등 다양한 분야에서 폭넓은 연구가 축적되어 왔다. 본 장에서는 이러한 선행연구를 주제별로 정리하여 현재까지 무엇이 밝혀졌고 무엇이 더 필요한지를 살피고, 이를 바탕으로 본 연구가 기여할 수 있는 지점을 분명히 한다.

최근에는 그동안의 연구를 종합한 체계적 문헌 고찰도 여러 차례 이루어졌다. 미국 켄트 주립대학교 항공공학대학에서 2025년에 발표한 체계적 검토에서, 2020년 이후의 새로운 연구 흐름을 계량서지학적으로 분석하고 조류 이동 예측, 도심 항공교통, 항공 교통 관리와의 연계 등 새로운 연구 방향을 제시하였다. 또 다른 체계적 검토 연구들은 전 세계적으로 보고된 야생동물 충돌의 거의 대부분이 조류에 의한 것이며, 민간 항공기에 대한 조류충돌이 연평균 약 1만 건 수준으로 보고된다는 점을 확인하였다.

본 장의 검토는 크게 여섯 갈래로 나누어 진행한다. 첫째는 충돌의 규모와 추세를 다루는 통계·추세 연구, 둘째는 어떤 새가 어느 높이에서 위험한지를 다루는 고도·종별 위험도 연구, 셋째는 새가 항공기 구조물에 부딪칠 때의 물리와 손상을 다루는 충돌 역학·내충격 공학 연구, 넷째는 새를 미리 찾아내는 탐지·경보 기술 연구, 다섯째는 새를 쫓고 서식지를 관리하는 퇴치·관리 연구, 여섯째는 데이터를 모으고 위험을 관리하는 보고·위험관리 연구이다. 이 여섯 갈래는 본 연구의 전체 구성과도 대응되며, 각 분야의 대표적 연구를 선별해 그 핵심 발견과 한계를 정리한다. 인용한 연구는 가능한 한 동료 심사를 거친 학술지 논문, 공신력 있는 기관의 보고서, 그리고 널리 인용되는 단행본을 우선하였고, 내용은 직접 풀어 서술하여 원문과의 중복을 최소화하였다.

2. 통계와 위험도에 관한 연구

조류충돌 연구의 토대는 신뢰할 수 있는 통계이다. 미국 농무부 국립야생동물센터 학자 돌비어(Dolbeer, 2021)는 미국 연방항공청 국가 야생동물 충돌 데이터베이스를 바탕으로 미국의 조류충돌 현황을 정기적으로 보고해 왔으며, 이 일련의 보고서는 전 세계 조류충돌 연구의 표준 자료로 인용된다. 이들은 보고 건수가 1990년 이후 꾸준히 증가했으며, 이것이 야생동물 충돌이 항공 안전의 점증하는 관심사가 되었음을 보여 준다고 평가하였다.

증가의 원인에 대해서는 여러 연구가 일관된 설명을 내놓는다. 첫째, 환경 보호로 인한 대형 조류 개체 수 증가이다. 유럽항공안전청은 1999년부터 2008년까지의 조류 개체군 추세를 분석한 안전 보고서에서, 기러기·맹금류 등 대형 조류의 개체 수 증가가 항공 안전에 미치는 영향을 경고하였다(EASA, 2009). 둘째, 항공 교통량의 증가이다. 셋째, 저소음 항공기의 보급으로 새가 항공기를 미리 감지하기 어려워진 점이다. 넷째, 보고 체계의 개선으로 과거에는 집계되지 않던 사례까지 기록된 점이다.

다만 보고 건수의 증가를 곧바로 위험의 증가로 해석하는 데에는 주의가 필요하다는 지적도 있다. 일부 연구는 손상을 일으키지 않는 경미한 충돌의 보고율이 높아지면서 ‘위험이 커진 것처럼 보이는’ 착시가 생길 수

있고, 이로 인해 공항 관리자가 실제로는 위험하지 않은 종의 관리에 자원을 낭비할 수 있다고 경고하였다. 따라서 단순 건수보다 '손상으로 이어진 충돌'과 '종별 위험도'를 함께 보는 것이 중요하다.

이와 관련해 '보고의 완전성' 문제도 꾸준히 연구되어 왔다. 조류충돌, 특히 손상이 없는 경미한 충돌은 상당수가 보고되지 않는 것으로 알려져 있다. 영국 민간항공청을 비롯한 여러 기관의 분석은 실제 발생 건수가 보고된 수치를 크게 웃돌 수 있음을 시사하며, 이는 통계 비교 시 '보고율의 차이'를 함께 고려해야 함을 뜻한다. 예컨대 한 나라의 보고 건수가 다른 나라보다 많다고 해서 반드시 위험이 더 큰 것이 아니라, 보고 체계가 더 잘 갖추어져 더 많이 집계되었을 수 있다. 따라서 국가 간 통계를 비교할 때는 절대 건수보다 운항 횟수 대비 비율, 손상률, 보고 문화의 성숙도를 함께 살펴야 한다는 것이 선행연구의 공통된 권고이다.

경제적 손실에 관한 연구로는 앨런(Allan, 2002)의 분석이 대표적이다. 그는 조류충돌로 인한 직접 수리비뿐 아니라 운항 지연·결항·예비기 투입 등 간접 비용까지 포함하면 실제 손실이 보고된 금액을 크게 웃돈다고 분석하였다. 이러한 비용 분석은 예방 투자의 경제적 타당성을 뒷받침하는 근거로 자주 인용된다.

이러한 통계 연구는 '어떤 새가, 어느 높이에서 더 위험한가'를 따지는 연구로 자연스럽게 이어진다.

앞 장에서 살펴본 것처럼, 국 농무부 국립야생동물센터 학자 돌비어(Dolbeer, 2006)는 충돌 고도가 지면 가까이에 집중된다는 점을 정량적으로 보였고, 메츠(Metz, 2020) 등은 충돌이 많이 일어나는 고도와 피해가 큰 고도가 다르다는 점을 강조하였다. 이러한 연구는 '낮은 고도의 이착륙 구간을 집중 관리하되, 그보다 높은 고도의 위험도 과소평가해서는 안 된다'는 균형 잡힌 시각을 제공한다.

종별 위험도 연구에서는 드볼트(DeVault, 2011) 등의 기여가 두드러진다. 이들은 충돌 빈도, 손상 유발률, 새의 체중과 군집 행동을 함께 고려한 '상대 위험도' 개념을 제시하여, 관리 우선순위를 정하는 과학적 틀을 마련하였다.

또한 공항 바깥에서 비롯되는 종간 위험을 식별하는 후속 연구를 통해, 공항 울타리 안쪽만이 아니라 주변 광역 환경까지 관리 범위를 넓혀야 함을 보였다.

개별 종에 대한 심층 연구도 축적되었다. 마라(Marra, 2009) 등은 US Airways 1549편 사고를 일으킨 캐나다 기러기가 텃새가 아니라 철새 개체군이었음을 분자생물학적으로 규명하여, 종 식별을 넘어 개체군의 출처까지 밝히는 연구의 가능성을 열었다. 블랙웰(Blackwell)과 라이트(Wright, 2006)의 맹금류 충돌 연구는 회전익 항공기 안전과 직접 연결되는 시사점을 제공한다.

3. 충돌 역학과 탐지 기술에 관한 연구

항공공학 분야에서는 새가 항공기 구조물에 부딪칠 때의 물리 현상과 손상 양상을 규명하는 연구가 활발하다. 새는 단단한 발사체가 아니라 물처럼 흐트러지는 '연성체'로 거동하기 때문에, 윌벡(Wilbeck, 1978)의 고전적 실험 연구 이후 새를 유체에 가까운 모델로 다루는 접근이 표준이 되었다.

계산 기법으로는 유한요소법과 입자 기반 기법인 평활입자유체동력학을 결합한 방식이 널리 쓰인다. 르텔리에(Letellier, 1997) 등은 일찍이 SPH를 유한요소와 결합하여 엔진 팬 블레이드에 대한 새 충돌을 해석하였고, 하임브스(Heimbs, 2011)는 조류충돌 시뮬레이션의 계산 기법을 종합적으로 검토하여 각 방법의 장단점을 정리하였다. 이러한 연구는 실제 충돌 시험에 드는 막대한 비용을 줄이면서도 설계 단계에서 내충격 성능을 검증할 수 있게 해 준다. 본 연구는 이 분야를 제2장 제3절에서 다룬다.

충돌의 물리를 규명하는 공학 연구와 더불어, 새를 미리 찾아내는 탐지 기술에 관한 실증 연구도 빠르게 늘고 있다.

조류 탐지 레이더의 실효성에 관한 실증 연구가 늘고 있다. 필립스(Phillips, 2018) 등은 시카고 오헤어 국제공항에서 세 대의 X-밴드 해양 레이더를 동시에 운용하며 새와 새 떼의 추적 성능을 평가하였는데, 몸집이 큰 새일수록, 그리고 레이더에 가까이 있고 높이 나는 새일수록 추적 성공률이 높아진다는 점을 확인하였다. 다만 레이더가 제공하는 정보가 생물학적으로 무엇을 의미하는지에 대한 '지상 검증' 연구가 더 필요하다

고 지적하였다.

게린저(Gerringer, 2016) 등도 중서부 지역에서 상용 조류 레이더 시스템의 탐지·추적 능력을 평가하여, 레이더가 공항에서 멀리 떨어진 곳이나 야간, 높은 고도의 위험을 평가하는 데 잠재력이 있지만 아직 검증 연구가 부족하다고 결론지었다. 미국 FAA는 이러한 연구를 바탕으로 공항 조류 레이더 시스템에 관한 회람을 발간하였다(FAA, 2010). 이들 연구는 레이더가 만능 해결책이 아니라, 다른 관리 수단과 결합될 때 가치가 커지는 '정보 제공 도구'임을 보여 준다.

4. 퇴치·관리와 보고 체계에 관한 연구

퇴치 기술의 효과를 실험적으로 검증한 연구도 많다. 블랙웰(Blackwell, 2012) 등은 새의 시각 특성을 이용해 항공기 조명을 조절하면 새의 회피 행동을 유도할 수 있다는 점을 실험으로 보여, 항공기 자체에서 충돌을 줄이는 접근의 가능성을 제시하였다. 이는 공항에서 새를 쫓는 전통적 방법과 더불어, 항공기 쪽에서 능동적으로 충돌을 회피하는 새로운 방향을 연 연구로 평가된다.

여러 퇴치 기법의 효과를 종합한 메타분석 연구는, 어느 한 가지 방법도 단독으로는 충분하지 않으며 경로·시간 조정, 유인 환경 제거, 기피제·분산 기법 등을 통합적으로 사용해야 효과가 극대화된다고 결론지었다. 이는 클리어리(Cleary)와 돌비어(Dolbeer)의 공항 야생동물 관리 매뉴얼(Cleary & Dolbeer, 2005)이 강조한 '통합 관리' 원칙과 일치한다. 드볼트(DeVault), 블랙웰(Blackwell), 벨란트(Belant)가 엮은 단행본 『공항 환경의 야생동물』(DeVault, Blackwell, & Belant, 2013)은 이러한 과학 기반 관리의 원리와 사례를 집대성한 대표적 저작이다.

한편 새가 같은 퇴치 자극에 반복 노출되면 위협으로 여기지 않게 되는 '습관화' 문제는 거의 모든 퇴치 연구가 공통으로 지적하는 한계이다. 이를 극복하기 위해 자극을 무작위화하거나 여러 방법을 번갈아 쓰는 전략, 그리고 실제 천적을 이용하는 생물적 방법이 제안되어 왔다.

새를 쫓고 서식지를 관리하는 연구와 함께, 그 바탕이 되는 데이터를 모으는 보고 체계 연구도 중요한 흐름을 이룬다.

조류충돌 대응의 출발점은 정확한 데이터이며, 이를 위한 보고 체계 연구도 중요한 흐름을 이룬다. 한 문헌 고찰 연구(Sabziyan Varnousfaderani & Shihab, 2025)는 웹 오브 사이언스 등에서 542편을 추려 분석한 뒤, 현행 보고 요건이 '충돌 사건 자체를 세는 것'에 머물러 있어 현대적 위험 관리 철학을 충분히 뒷받침하지 못한다고 비판하였다. 즉 단순한 사건 집계를 넘어, 위험과 위해를 구분하여 관리하는 체계로 발전해야 한다는 것이다.

매키(McKee, 2016) 등은 항공 분야의 야생동물 관리 접근법을 정리하며 규제·생태·운영 측면의 통합이 필요하다고 보았다.

5. 국내 연구와 선행연구의 종합

국내에서도 조류충돌에 관한 연구가 꾸준히 이루어져 왔다. 김건웅과 정용만(2015)은 버드 스트라이크 예방을 위한 공항 야생동물 관리 방안을 연구하였고, 김도현(2018)은 조류충돌 방지 기술의 현황과 발전 방향을 정리하였다. 정유진과 최재훈(2019)은 국내 조류충돌의 경제적 피해를 분석하고 저감 방안을 제시하였으며, 조현주(2016)는 공항 조류 위험 관리를 위한 법·제도 개선 방안을 다루었다. 이현주(2017)는 공항 환경 관리 측면에서, 박상준과 이재용(2021)은 상대적으로 연구가 부족한 회전익 항공기의 조류충돌 위험과 대응 방안을 다루어 본 연구와 직접 맞닿는 주제를 선구적으로 검토하였다.

이들 국내 연구는 공항 환경 관리, 기술적 대응, 법·제도 개선 등 개별 영역에서 의미 있는 성과를 거두었으나, 대체로 고정익 항공기와 공항 운영에 초점을 두었고 회전익 항공기를 별도로 다룬 연구는 상대적으로 적다. 또한 미국 국가 야생동물 충돌 데이터베이스와 같은 전국 통합 공개 데이터베이스가 없는 국내 여건상, 통계 기반 분석에서 일정한 한계를 안고 있다.

이러한 국내외 연구를 종합하면 선행연구의 성과와 본 연구의 차별성이 분명해진다.

이상의 검토를 종합하면, 조류충돌 연구는 통계·추세 분석, 고도·종별 위험도 분석, 충돌 역학·내충격 공학, 탐지·경보 기술, 퇴치·서식지 관리, 보고·위험 관리 체계 등 여러 분야에서 풍부한 성과를 축적해 왔다. 그러나 다음과 같은 공백도 확인된다. 첫째, 고정익에 비해 회전익 항공기에 관한 연구가 부족하다. 둘째, 개별 국가나 단일 분야에 집중한 연구가 많아, 여러 나라의 사례와 여러 분야의 지식을 항공기 유형별 관점에서 통합한 연구가 드물다. 셋째, 비행장에 새가 모여드는 원인을 체계적으로 정리하고 그 원인을 단계적으로 줄이는 방안을 일반 독자도 이해할 수 있도록 정리한 연구는 많지 않다.

본 연구는 이러한 공백에 대응하여, 한국·미국·일본 세 나라의 통계와 사례를 비교하고, 통계·생태·공학·정책의 지식을 항공기 유형별로 통합하며, 비행장의 조류 유입 요인과 저감 방안을 별도의 장으로 정리한다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다. 또한 가능한 한 원 출처를 밝히고 내용을 직접 풀어 설명함으로써, 학술적 정확성과 대중적 이해 가능성을 함께 추구한다.

조류충돌 연구는 어느 한 분야에 머물지 않고 여러 학문이 만나는 지점에 있다. 조류충돌은 단순한 항공공학 문제가 아니라, 새의 생태와 인간의 항공 활동이 같은 하늘을 두고 경쟁하는 데서 비롯되는 '인간–야생동물 갈등'의 한 형태이다. 소디(Sodhi, 2002)는 이를 '공중에서의 경쟁'이라 표현하며, 조류충돌 문제를 항공 안전의 관점만이 아니라 조류 생태와 보전의 관점에서도 바라보아야 한다고 주장하였다. 새를 무조건 제거 대상으로만 보는 접근은 한계가 있으며, 새의 행동과 서식 요구를 이해해야 근본적인 해결이 가능하다는 것이다.

이러한 학제적 시각은 엘사예드(El-Sayed, 2019)의 단행본에서도 강조된다. 그는 통계, 충돌 분석, 관리 방안을 한데 묶어 조류충돌을 종합적으로 다루면서, 어느 한 분야의 지식만으로는 문제를 해결할 수 없다고 보았

다. 통계학자는 위험을 정량화하고, 생태학자는 새의 행동을 이해하며, 공학자는 항공기를 견고하게 만들고, 정책 입안자는 제도를 정비하는 등, 여러 분야가 협력해야 비로소 실효성 있는 대응이 가능하다. 본 연구가 통계·생태·공학·정책을 아우르려는 것도 이러한 학제적 필요성에 따른 것이다.

항공기 유형의 관점에서 보면, 회전익 항공기에 관한 연구의 공백이 특히 두드러진다.

선행연구를 항공기 유형의 관점에서 다시 살펴보면, 압도적 다수가 고정익 항공기와 공항 환경에 집중되어 있음을 알 수 있다. 통계 데이터베이스의 보고 건수 자체가 고정익에 편중되어 있고, 충돌 시뮬레이션 연구도 대부분 제트 엔진 팬 블레이드를 대상으로 한다. 그러나 블랙웰과 라이트(Blackwell & Wright, 2006)가 분석한 맹금류 충돌, 그리고 민간 헬리콥터 PHI S-76·호주 Bell社 206 사고(ATSB, 2023)가 보여 주듯, 회전익 항공기는 단 한 마리의 큰 새와의 충돌만으로도 전손에 이를 수 있는 독특한 취약성을 지닌다.

회전익 항공기는 낮은 고도에서 오래 비행하고, 조종석 창의 새 충돌 내성 기준이 고정익만큼 엄격하지 않으며, 조종석 주변에 노출된 제어 장치가 충격에 취약하다는 점에서 별도의 연구와 기준이 필요하다. 그럼에도 이 분야를 체계적으로 다룬 연구는 상대적으로 적으며, 회전익 전용 충돌 데이터의 수집·분석도 미흡하다. 본 연구가 고정익과 회전익을 나란히 다루고 유형별 특화 대응을 제시하는 것은 이러한 연구 공백을 메우려는 시도이다. 연구의 또 다른 축은 조류충돌이 빚는 경제적 손실을 정량화하는 작업이다.

조류충돌의 경제적 영향을 정량화한 연구도 정책 결정에 중요한 근거를 제공한다. 앞서 소개한 앨런(Allan)의 분석은, 직접 수리비뿐 아니라 운항 지연·결항·승객 보상·예비기 투입 같은 간접 비용까지 포함하면 실제 손실이 보고된 금액을 크게 웃돈다고 보았다. 미국에서만 수십 년간 누적 손실이 수억 달러에서 십수억 달러에 이른다는 추정이 제시되어 왔다.

경제 분석은 ‘예방에 드는 비용’과 ‘충돌로 인한 손실’을 비교함으로써, 환경 관리·탐지 장비·전문 인력에 대한 투자가 장기적으로 경제적으로도 타당함을 보여 준다. 특히 단 한 건의 대형 사고가 가져오는 인명·경제·사회적 손실(제주항공 2216편처럼)을 고려하면, 예방 투자의 비용 대비 효과는 매우 크다. 다만 간접 비용의 산정 기준이 연구마다 달라 추정치에 편차가 있으므로, 표준화된 비용 산정 방법론의 개발이 후속 과제로 지적된다.

이러한 데이터는 조류충돌을 하나의 관리 가능한 위험으로 다루는 안전관리시스템(SMS) 연구로 이어진다.

조류충돌을 ‘하나의 안전 위험’으로 체계적으로 관리하려는 흐름은 안전관리시스템 연구로 이어진다. 여러 국가의 데이터를 비교한 연구들은, 데이터 수집·위험 식별·심각도 평가·완화 조치·효과 점검으로 이어지는 안전관리시스템의 순환 구조가 조류충돌 관리에도 그대로 적용된다고 본다. 즉 충돌을 ‘우연한 사고’가 아니라 ‘관리 가능한 위험’으로 다루는 관점의 전환이다.

한 문헌 고찰은 현행 보고 요건이 ‘사건을 세는’ 데 치우쳐 현대적 위험관리를 충분히 뒷받침하지 못한다고 비판하며, 위험과 위해를 구분해 관리하는 체계로의 발전을 제안하였다. 이러한 연구들은 본 연구가 강조하는 ‘데이터에서 행동으로’의 연결, 그리고 한국의 통합 데이터베이스 구축 필요성과 직접 맞닿아 있다. 이상의 검토를 마무리하며, 선행연구의 성과와 한계를 간추리면 다음과 같다.

이상의 검토를 통해, 조류충돌 연구가 풍부한 성과를 축적해 왔으나 회전익 항공기, 국가 간 비교, 그리고 학제적 통합과 대중적 소통의 측면에서 보완의 여지가 있음을 확인하였다.

제 3 장 국·내외 조류충돌 사례 연구

제 1 절 미국

1. 미국 조류충돌 통계 현황

미국은 전 세계에서 가장 체계적이고 방대한 조류충돌 데이터베이스를 운영한다. 는 1990년부터 국가 야생동물 충돌 데이터베이스를 구축해 왔으며, 이 자료는 세계 조류충돌 연구의 핵심 참고 자료로 쓰인다.

연도별 추이를 풀어 보면 증가세가 뚜렷하다. 1990년 약 1,851건이던 연간 보고 건수는 2000년 약 5,171건, 2009년 약 9,840건, 2015년 약 1만 3,802건, 2018년 약 1만 7,228건으로 꾸준히 늘었다(FAA, 2024). 2020년에는 코로나19로 항공 수요가 급감해 약 1만 2,115건으로 일시 감소했지만, 비행 횟수 대비 충돌 비율은 오히려 늘어나는 역설적인 현상이 나타났다. 운항이 줄자 새들이 한산해진 활주로 주변에 자리를 잡았기 때문으로 분석된다. 이후 2022년 약 1만 8,001건을 거쳐 2023년에는 약 1만 9,700건으로 미국 780개 공항에서 역대 최고를 기록하였다. 1990년부터 2023년까지 34년간 누적 건수는 약 29만 2천 건, 그중 손상으로 이어진 사례는 약 4만 3,800건에 이른다.

같은 기간 인명 피해와 경제 손실도 함께 정리할 수 있다. 누적 인명 피해는 357명, 보고된 경제적 손실은 약 14억 8천만 달러에 달한다. 다만 이 금액은 보고된 수리비와 운항 불가에 따른 직접 손실만 반영한 것이어서, 실제 손실은 훨씬 클 것으로 추정된다. 참고로 조종석 유리 파손 수리에만 약 9만 달러, 날개 손상 수리에는 최대 50만 달러 이상이 든다.

부위별 손상을 문장으로 풀면 다음과 같다. 1990년부터 2023년까지 손상 사례를 부위별로 보면 날개·로터가 약 25%로 구조 손상과 연료 누출을, 엔진이 약 25%로 출력 저하와 엔진 정지를 일으켰다. 조종석 유리가 약 16%(파손·시야 차단·조종사 부상), 레이돔·기수가 약 12%(항법 장비 손상), 동체가 약 10%, 착륙 장치가 약 6%, 기타 외부 장착물이 약 6%

였다. 즉 날개와 엔진이 미국 조류충돌 손상의 절반을 차지한다.

충돌하는 새의 종류를 보면, 가장 자주 부딪치는 새는 애도비둘기로 종이 확인된 충돌의 약 11%를 차지한다. 그러나 실제 손상을 크게 일으키는 쪽은 오리·기러기 같은 물새로, 충돌 건수는 4%에 불과하지만 손상 사례의 27%를 차지해 가장 위험한 새로 분류된다. 갈매기, 독수리·매 같은 맹금류, 캐나다 기러기도 주요 위험 조류이며, 미국 공군 기록에서는 칠면조독수리와 붉은꼬리매가 군용기 피해의 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

미국 데이터가 특히 가치 있는 까닭은, 단순한 건수를 넘어 '손상으로 이어진 충돌'의 추세까지 분석할 수 있기 때문이다. 돌비어 등의 분석에 따르면, 전체 보고 건수가 늘어나는 가운데 손상을 일으키는 심각한 충돌의 절대 수도 함께 증가해 왔으며, 이는 대형 조류 개체 수 증가와 맞물린 현상으로 해석된다. 또한 미국은 보고된 충돌 중 종이 확인되는 비율이 꾸준히 높아져, 2023년에는 약 59%에서 종 수준의 식별이 이루어졌다. 종 식별률이 높을수록 공항별 위험 조류를 정확히 파악하고 맞춤형 관리를 할 수 있다는 점에서, 이는 미국 체계의 큰 강점이다.

2. 고정익 항공기 주요 사례

가. US Airways 1549편 허드슨강 불시착 (2009. 1. 15.)

2009년 1월 15일, US Airways 1549편(에어버스 A320-214)이 뉴욕 라과디아 공항을 출발해 샬럿으로 향하던 중 이륙 약 2분 뒤 고도 약 980m(3,200피트)에서 캐나다 기러기 무리와 부딪쳐 양쪽 엔진이 모두 멈췄다. 기장 체슬리 설렌버거와 부기장 제프리 스카일스는 인근 공항으로 돌아갈 시간이 없는 극한 상황에서 허드슨강에 비상 착수를 결정했고, 충돌 208초 만에 강 위에 무사히 내려앉아 탑승객 150명과 승무원 5명 전원이 살아남았다(NTSB, 2010). 이 사고는 '허드슨강의 기적'으로 불린다.

사고 개요를 정리하면, 시각은 2009년 1월 15일 15시 27분(EST), 기종은 에어버스 A320-214(등록번호 N106US), 충돌 고도는 약 980m, 충돌 새는 캐나다 기러기 무리였다. 결과는 양쪽 엔진 완전 정지였고 뉴욕

허드슨강에 착수했으며, 탑승 155명 전원이 생존했으나 부상자는 다수였다. 항공기는 완전히 못 쓰게 되어 약 6,000만 달러의 손실이 추산된다. 미국 연방 교통안전위원회는 최종 보고서(AAR-10/03, 2010년 5월)에서 사고 원인을 캐나다 기러기 흡입에 따른 양쪽 엔진 추력 상실로 명시하였다. 이 사고는 조류충돌이 대형 항공 재난으로 이어질 수 있음을 분명히 보여 주었고, 이후 유럽 항공안전청가 2017년 하강 단계 엔진 내성 기준 강화를 제안하는 계기가 되었다.

이 사고는 학술적으로도 두 가지 중요한 함의를 남겼다. 첫째, 마라 등(Marra et al., 2009)의 후속 연구가 사고기 엔진의 깃털을 분석해 사고를 일으킨 기러기가 텃새가 아니라 캐나다 래브라도에서 남하한 철새임을 밝힌 것은, 종 식별을 넘어 개체군의 출처까지 규명함으로써 광역적 관리의 필요성을 입증한 사례로 평가된다. 둘째, 이 사고는 현행 엔진 새 흡입 인증의 한계를 드러냈다. 인증 시험은 정해진 무게의 새를 흡입하는 상황을 가정하지만, 1549편처럼 두 엔진이 동시에 여러 마리의 큰 기러기를 흡입하는 '무리 충돌'은 시험으로 완전히 대비하기 어렵다. 이는 앞서 제3장에서 살펴본 무리 충돌 시뮬레이션 연구의 중요성과도 직접 연결된다.

나. Eastern Air Lines 375편 추락 (1960. 10. 4.)

미국 내 조류충돌 사고 중 가장 큰 인명 피해를 낸 것은 1960년 10월 4일의 이스턴 항공 375편 사고이다. 록히드社 L-188 일렉트라가 보스턴 로건 국제공항을 이륙하던 중 유럽찌르레기 무리와 부딪쳐 네 개의 엔진이 모두 손상되었고, 항공기는 보스턴 항에 추락해 62명이 숨졌다. FAA 데이터베이스 구축 이전의 사고이지만, 오늘날까지 미국 내 조류충돌 최대 인명 피해 사고로 기록된다.

다. 그 밖의 주요 사고 목록

표 대신 주요 사고를 시간 순으로 풀어 보면 다음과 같다. 1960년 이스턴 375편(L-188)은 찌르레기 떼로 전 엔진이 손상되어 추락, 62명이 숨졌다. 1995년 미 공군 E-3 센트리(보잉 707)는 캐나다 기러기로 이륙

직후 추락해 24명이 숨졌다. 2009년 1월 4일 민간 헬리콥터 PHI S-76C는 붉은꼬리매와 충돌 후 비상 착수에 실패해 8명이 숨졌다. 같은 해 1월 15일 US Airways 1549편은 캐나다 기러기로 허드슨강에 불시착했으나 사망자는 없었다. 2023년 이탈리아 군 MB-339는 엔진 고장으로 추락해 지상에서 1명이 숨졌고, 2024년 12월 29일 한국 제주항공 2216편(보잉 737-800)은 양쪽 엔진 고장과 충돌로 179명이 숨졌다.

미국의 더 이른 사례들도 조류충돌의 위험을 잘 보여 준다. 1962년 11월 유나이티드 항공의 비커스 비스카운트 여객기가 미국 메릴랜드주 상공에서 큰고니(휘파람고니) 두 마리와 충돌해 수평 안정판이 손상되면서 추락, 탑승자 17명 전원이 숨졌다. 1975년 11월에는 오버시즈 내셔널 항공의 DC-10이 뉴욕 JFK 공항에서 이륙하던 중 갈매기 떼를 흡입해 엔진에 화재가 발생했고, 조종사가 이륙을 중단했으나 항공기는 전소되었다. 다행히 탑승자 전원이 탈출해 인명 피해는 없었다. 이 두 사례는 '대형 단일 조류 한 마리도, 그리고 작은 새의 떼도' 모두 치명적일 수 있음을 보여 준다.

이러한 위험은 미국에 국한되지 않는다. 국제적으로도 1988년 에티오피아 항공의 보잉 737이 이륙 중 비둘기 떼를 흡입해 양쪽 엔진을 잃고 추락, 35명이 숨진 사고, 2008년 라이언에어 여객기가 이탈리아 로마 치암피노 공항 착륙 중 찌르레기 떼와 충돌해 두 엔진이 손상되고 거친 착륙을 한 사고, 2019년 우랄 항공의 A321이 모스크바 인근에서 갈매기 떼로 양쪽 엔진 추력을 잃고 옥수수밭에 비상 착륙해 탑승자 전원이 생존한 사고 등이 잘 알려져 있다. 이들 국제 사례는 본 연구가 다루는 한·미·일의 교훈이 전 세계 항공 안전과 직결됨을 보여 준다.

3. 회전익 항공기 주요 사례

가. PHI Sikorsky S-76C 헬리콥터 사고 (2009. 1. 4.)

2009년 1월 4일, 루이지애나주에서 운항하던 PHI 소속 시코르스키 S-76C 헬리콥터(등록번호 N748P)가 붉은꼬리매와 부딪치는 사고가 일어났다. 단 한 마리의 새와 부딪쳤는데도 헬리콥터가 완전히 못 쓰게 된

드문 사례로, 회전익 항공기의 조류충돌 위험을 경고하는 대표 사례로 자주 인용된다.

사고 경위는 이러하다. 붉은꼬리매가 조종석 창 바로 윗부분을 때리면서 그 충격으로 엔진 화재 진압용 손잡이가 작동했고, 이로 인해 스로틀이 공회전 위치로 후퇴하며 두 엔진이 동시에 출력을 잃었다. 승무원들은 갑작스러운 동력 상실 속에서 적절히 대응하지 못했고, 헬리콥터는 이륙 지점에서 약 19km 떨어진 습지에 추락했다. 탑승자 9명 중 8명이 숨지고 1명만 중상을 입은 채 살아남았다. 미국 연방 교통안전위원회은 사고 원인으로 매 충돌에 따른 엔진 출력 상실, 조종사들의 즉각 대처 실패, 헬리콥터 인증 당시 조종석 창의 새 충돌 내성 요건 부재, T-핸들의 의도치 않은 작동을 막는 보호 장치 결여 등을 지적했다. 이 사고를 계기로 미국 연방 항공청은 헬리콥터 조종석 창의 새 충돌 내성 기준 강화를 검토하기 시작했다.

나. 헬리콥터 조류충돌 사례 정리

표로 정리되던 헬리콥터 사례를 문장으로 풀면 다음과 같다. 2009년 1월 미국의 시코르스키 S-76C는 붉은꼬리매가 조종석 창 상단에 부딪쳐 전손, 8명이 숨졌다. 2013년 7월 미국의 로빈슨 R22는 미상의 새가 메인 로터에 부딪쳤으나 비상 착륙으로 경상에 그쳤다. 2019년 3월 캐나다의 벨 206은 대형 갈매기가 조종석 창에 부딪쳐 파손되었으나 안전하게 착륙했다. 2022년 7월 호주의 벨 206 L-1은 독수리가 조종석 창 하단에 부딪쳐 비행 중 기체가 분해되며 조종사가 숨졌다.

다. Bell 206 L-1 헬리콥터 사고 (2022. 7. 9., 호주)

2022년 7월 9일, 호주 뉴사우스웨일스주 캐타이 지역에서 벨 206 L-1 헬리콥터가 이륙 약 9분 뒤 비행 중 공중에서 분해되어 추락했다. 탑승자는 조종사 1명으로 현장에서 숨졌다. 호주 교통안전위원회 조사 결과, 앞쪽 왼쪽 조종석 창 하단에 쐐기꼬리독수리가 부딪친 것으로 확인되었다. 조종사가 햇빛 눈부심과 무선 주파수 변경 작업 때문에 독수리를 미리 보

지 못했을 가능성이 높으며, 갑작스러운 충돌로 인한 급격한 조종 입력이 메인로터의 테일 붐 충격으로 이어져 기체가 분해된 것으로 분석되었다. 단 한 마리의 큰 새와의 충돌이 헬리콥터 전손과 조종사 사망이라는 최악의 결과로 이어질 수 있음을 잘 보여 주는 사례이다.

4. 미국의 조류충돌 대응 체계

미국은 세계에서 가장 체계적인 대응 시스템을 갖추고 있다. 크게 규제·제도, 데이터 관리, 현장 대응의 세 축으로 나눌 수 있다. 규제 측면에서 미국 연방항공청은 항공 운송 공항에 야생동물 위험 평가와 야생동물 위험 관리 계획을 수립·시행을 의무화하고, 공항 개선 프로그램을 통해 비용을 지원한다.

데이터 관리 측면에서 국가 야생동물 충돌 데이터베이스는 1990년 이후 30만 건이 넘는 충돌 데이터를 보유하며, 조종사·공항 직원·항공사 등 누구나 온라인으로 보고할 수 있는 시스템을 운영한다. 수집된 데이터는 스미소니언 연구소의 깃털 식별 연구소와 협력하여 새의 종을 식별하는 데 쓰이며, 공항별 위험 조류 프로파일을 만드는 데 활용된다. 2023년 보고 사례의 약 59%에서 새의 종이 종 수준까지 식별되었다.

현장 대응 측면에서 미국 공항들은 농무부의 야생동물 서비스와 협력해 서식지 관리, 새 포획·이동, 음향·시각 퇴치 장치 운영 등 통합 프로그램을 시행한다. 또한 반경 수 마일의 새 움직임을 실시간으로 추적해 관제탑과 관리팀에 경보를 주는 조류 탐지 레이더 도입 연구도 진행 중이다.

미국 체계의 핵심 강점은 '데이터에서 정책으로 이어지는 선순환'에 있다. 방대한 국가 야생동물 충돌 데이터베이스 데이터가 학술 연구(고도 분포, 종별 위험도 등)로 이어지고, 그 연구가 다시 관리 매뉴얼과 인증 기준 개선의 근거가 되며, 개선된 기준이 현장에 적용되어 새로운 데이터를 낳는 구조이다. 또한 미국 연방항공청과 농무부 산하 야생동물 전문기관(야생동물 관리국)이 협력하여, 항공 안전 전문성과 야생동물 생태 전문성을 결합한 점도 돋보인다. 다만 미국 역시 헬리콥터 운항자의 보고율이 낮아 회전익 데이터가 부족하다는 한계를 안고 있어, US Airways

1549편 같은 고정익 대형 사고에 비해 회전익 위험에 대한 제도적 대비는 상대적으로 더디다.

제 2 절 일본

1. 일본 조류충돌 통계 현황

일본은 동아시아 주요 철새 이동 경로 상에 위치해 다양한 철새와 텃새가 서식한다. 일본 운수성 항공국에 따르면 일본에서는 매년 약 1,000건의 조류충돌이 보고되며, 미국에 비해 절대 수치는 적지만 운항 횟수 대비 비율로는 결코 낮지 않다. 일본 통계의 특징은 가을·겨울 철새 이동기(10~1월)에 충돌이 집중되는 계절적 편향이 뚜렷하고, 간사이·간토 지역 공항에서 충돌이 많으며, 왜가리·기러기류·갈매기류가 가장 자주 부딪치는 새라는 점이다.

연도별 추이를 문장으로 풀면, 2010년 약 890건(손상 180건), 2013년 약 1,050건, 2015년 약 980건, 2018년 약 1,120건으로 대체로 1,000건 안팎을 오갔다. 2020년에는 코로나19 영향으로 약 680건까지 줄었다가, 2022년 약 1,050건으로 운항이 회복되었고 2023년에도 약 1,100건이 보고되었다. 손상 건수는 대체로 보고 건수의 약 20% 수준이다.

공항별로 보면, 도쿄만 연안의 하네다 공항이 연평균 약 200건으로 갈매기·왜가리가 주요 위험 조류이며 레이저 퇴치기와 음향 장치로 대응한다. 내륙 농경지 근처의 나리타 공항은 약 150건으로 매를 활용한 퇴치와 서식지 관리를 한다. 오사카만을 매립해 만든 해상 공항인 간사이 국제공항은 약 180건으로 갈매기·가마우지가 많아 Bird Sonic과 환경 관리를 적용한다. 도심에 가까운 이타미 공항은 약 100건, 인공섬인 고베 공항은 약 80건으로 음향을 통한 조류퇴치를 시험하고 있다.

특이한 점은 비교적 높은 고도에서의 충돌 사례이다. 2020년 8월 29일 하네다 공항 동북동 약 17km 지점 고도 약 2,590m(8,500피트)에서 스카이마크 항공 여객기가 조류충돌을 겪었고, 일본 교통안전위원회는 이를 항공기 사고로 분류해 조사했다. 이는 일본 상공에서 큰 새가 예상보다 높은 고도까지 비행할 수 있음을 보여 준다.

2. 주요 사례 분석

가. 일본항공 JL646편 조류충돌 (2025. 11. 14.)

2025년 11월 14일, 일본항공 JL646편 보잉 767-346(ER)(등록번호 JA612J)이 가고시마 공항을 출발해 도쿄 하네다로 향하던 초기 상승 단계에서 조류충돌이 발생했다. 이륙 직후 엔진에 새가 부딪쳐 저압 1단계 팬 블레이드가 손상되었다. 승무원은 표준 절차에 따라 공중 회항을 선언하고 약 45분간 대기 비행을 하며 피해를 점검한 뒤 가고시마 공항에 안전하게 착륙했고, 탑승자 258명 전원이 무사히 대피했다. 항공기는 팬 블레이드 수리가 필요해 해당 항공편은 취소되었다. 이 사례는 조류충돌이 즉각적인 재앙으로 이어지지 않더라도 상당한 경제적 손실과 운항 지장을 일으킬 수 있으며, 숙련된 승무원의 침착한 판단과 표준 절차 준수가 사고를 조기에 수습하는 데 결정적임을 보여 준다.

나. 스카이마크 항공 조류충돌 (2020. 8. 29.)

2020년 8월 29일, 스카이마크 항공 21편이 후쿠오카를 출발해 하네다로 향하던 중 17시 34분경 하네다 동북동 약 17km 상공 고도 약 2,590m에서 조류충돌을 겪었다. 일본 교통안전위원회는 이를 항공기 사고로 분류해 공식 조사했다(JTSB, 2022). 항공기는 충돌로 즉각적인 구조 손상이 있었으나 비행 자체에는 심각한 영향이 없었고, 항공사는 민간항공국에 충돌 사건을 보고했다. 이는 일본에서 조류충돌 보고 의무 시스템이 작동하고 있음을 보여 주는 사례이며, 8,500피트 고도 충돌은 고고도 비행 패턴에 대한 추가 연구의 필요성을 제기했다.

다. 티웨이항공 216편 (2024. 1. 10.)

2024년 1월 10일 나리타를 출발해 인천으로 향하던 티웨이항공 여객기가 인천 착륙 직전 엔진 흡입 조류충돌을 겪은 사례는 한·일 노선에서 발생해 양국 대응 체계에 모두 시사점을 준다. 항공기는 인천공항에 안전하게 착륙했으나 엔진 수리가 필요해 운항에 차질이 생겼다.

3. 일본의 조류충돌 대응 체계

일본의 대응 체계는 일본 운수성 항공국의 지도 아래 공항 운영자, 항공사, 학계, 민간 기업이 협력하는 다층 구조이다. 2014년 JCAB는 '일본의 조류충돌 예방 및 감소(Bird Strike Control and Reduction in JAPAN)' 보고서(JCAB, 2014)를 펴내 현황·예방 조치·정보 공유 체계를 정리했다.

주요 예방 방법은 다음과 같다. 첫째, 서식지 관리이다. 공항 주변의 나무·관목·풀처럼 새의 먹이·쉼터·번식지가 되는 식생을 관리하고, 습지·늪지를 개량하며, 살충 작업으로 먹이원을 줄인다. 둘째, 음향 퇴치이다. 전통적인 공포탄·가스 캐논을 넘어, 새가 싫어하는 고주파음을 무작위로 내보내는 첨단 장치가 도입되고 있다. 야마나시현의 TM Works社가 개발하고 오카야마 이과대학이 검증한 음향을 이용한 조류퇴치(Bird Sonic)는 150~200m 범위에서 효과를 내며, 간사이 공항 그룹이 2024년부터 간사이·이타미·고베 공항에서 시험 적용을 시작했다.

셋째, 레이저 퇴치이다. 무해한 레이저 빔으로 새의 방향 감각을 흐트러뜨리는 기술로 야간·원거리 퇴치에 효과적이며, 인체에 해롭지 않은 파장을 쓰는 것이 핵심이다. 넷째, 맹금류 활용이다. 훈련된 매나 독수리를 공항에 풀어 소형 조류를 자연스럽게 쫓는 방식으로 나리타 등에서 시도되었으나, 날씨에 따른 효과 편차와 높은 유지 비용이 한계로 지적된다.

일본은 정보 공유에서도 앞선 모습을 보인다. 일본 운수성 항공국은 공항 운영자와 항공사 간 조류충돌 정보 공유 웹사이트를 운영해 위험 조류 현황을 실시간으로 공유하고, 공항별 새 이동 데이터베이스를 구축해 계절별·시간대별 위험 예측 체계를 발전시키고 있다.

일본 대응 체계의 강점은 '현장 적용'과 '협력'에 있다. Bird Sonic처럼 산학이 함께 개발하고 검증한 기술을 실제 공항에 시험 적용하고, 그 결과를 다시 개선에 반영하는 선순환이 작동한다. 또한 규제 기관과 공항·항공사·학계·기업이 다층적으로 협력하여, 어느 한 주체에 의존하지 않고 여러 방법을 조합한다. 다만 일본 역시 미국만큼 방대한 공개 데이터베이스를 갖추지는 못했고, 회전익 항공기에 대한 별도 대응은 상대적으로 두드러지지 않는다. 그럼에도 철새 경로 상의 섬나라이자 해상·매립 공항이 많은

한국과 지리적 여건이 비슷하다는 점에서, 일본의 기술 적용과 정보 공유 방식은 한국에 특히 참고가 된다.

제 3 절 한국

1. 한국 조류충돌 통계 현황

대한민국은 동아시아–대양주 철새 이동 경로 상의 중요한 경유지로, 매년 수백만 마리의 철새가 번식지와 월동지 사이를 오가며 한반도를 지난다. 그래서 국내 공항들은 특히 봄·가을 철새 이동기와 겨울 월동기에 높은 조류충돌 위험에 노출된다.

국토교통부 자료에 따르면 2019년부터 2024년 상반기까지 약 5년 6개월 동안 국내 공항에서 보고된 조류충돌은 모두 623건이다. 그 이전을 보면 1990년부터 2000년까지 10년간 약 400건, 2007년부터 2011년까지 5년간 469건이 보고되었다. 코로나19 시기의 일시적 감소를 빼면 운항 횟수 증가와 함께 전반적으로 늘어나는 추세이며, 이는 국제적 흐름과 같다.[1)]

공항별 현황에서 특히 주목할 곳은 무안국제공항이다. 무안공항은 2019년 이후 조류충돌이 10건 기록되었는데, 운항 횟수 대비 충돌 발생률이 0.09%로 국내 14개 지방공항 중 가장 높다. 이는 김포공항(0.018%)이나 제주공항(0.013%)과 비교하면 현저히 높은 수치이다. 무안공항이 영산호와 남서쪽 해안 갯벌 같은 주요 새 서식지·먹이터 가까이에 지어진 것이 핵심 원인으로 분석된다. 한강 변과 도심에 가까운 김포공항은 충돌률 자체는 낮지만 운항이 많아 절대 건수가 높고, 해안에 가까운 제주공항은 갈매기·물새류가 위험 조류이다. 해상 매립지에 지어진 인천국제공항은 갈매기·철새류가 많고, 낙동강 하구 근처의 김해공항은 철새 이동 경로에 가깝다.[2)]

계절적으로는 봄(3~5월)과 가을(9~11월) 철새 이동기, 그리고 겨울 월동기(12~2월)에 충돌이 집중된다. 특히 겨울에는 시베리아 등 북방에

1) 국토교통부 발표 자료 (2024).

2) 국토교통부; 위키백과 '제주항공 2216편 사고' 항목; 언론 보도 종합.

서 내려오는 기러기·두루미·오리류 같은 큰 물새가 서해안 일대에 몰리면서, 무안·군산·원주 등 서해안과 강변 공항의 위험이 크게 높아진다.

한국이 구조적으로 높은 조류충돌 위험을 안고 있는 근본 이유는 지리적 위치에 있다. 한반도는 시베리아·알래스카에서 동남아시아·호주에 이르는 세계 주요 철새 이동 경로 중 하나인 '동아시아–대양주 철새 이동 경로'의 핵심 중간 기착지에 자리한다. 이 경로를 따라 매년 수천만 마리의 도요새·물떼새·기러기·오리류가 한반도의 갯벌과 강 하구에서 쉬며 먹이를 보충한다. 특히 서해안 갯벌은 국제적으로 중요한 철새 서식지로, 새만금·천수만·금강하구·영산강하구 등은 겨울철 수많은 물새가 모이는 곳이다. 공교롭게도 군산·무안·여수 등 여러 공항이 이런 철새 밀집 지역 인근에 위치해, 한국의 조류충돌 문제는 단순한 공항 관리의 문제를 넘어 한반도 전체의 생태 지리와 맞물려 있다.

한국의 통계 현황에서 가장 두드러진 한계는 미국 국가 야생동물 충돌 데이터베이스나 국제민간항공기구의 조류충돌 정보시스템 같은 전국 통합 공개 데이터베이스가 아직 없다는 점이다. 충돌 사례가 국토교통부와 공항공사, 군 등으로 흩어져 관리되어 종별·고도별·부위별 정밀 분석이 어렵고, 연구자가 활용할 수 있는 원 데이터의 접근성도 낮다. 무안공항의 충돌률이 다른 공항보다 현저히 높다는 사실이 사고 이전부터 데이터로 확인되었음에도 충분한 선제 조치로 이어지지 못한 점은, 데이터의 '수집'만이 아니라 '분석과 활용, 그리고 행동으로의 연결'이 중요함을 일깨운다. 따라서 미국과 일본의 사례를 참고하여 통합 공개 데이터베이스를 구축하고, 위험도가 높은 공항을 자동으로 식별해 자원을 우선 배분하는 체계를 갖추는 것이 한국의 시급한 과제이다.

2. 한국 주요 조류충돌 사례 분석

가. 제주항공 2216편 활주로 이탈 사고 (2024. 12. 29.)

2024년 12월 29일 오전 8시 57분(한국시간), 태국 방콕을 출발해 무안국제공항에 착륙하던 제주항공 2216편(보잉 737-800)은 관제탑으로부터 조류 이동 주의 조언을 받았다. 2분 뒤인 8시 59분 조종사가 메이데이(긴

급) 선언을 했고, 9시 3분 최종 사고가 났다(항공철도사고조사위원회, 2025).[3)]

항공기는 조류충돌로 추정되는 엔진 이상이 생긴 뒤 복행(착륙을 멈추고 다시 상승하는 것)을 한 다음 반대 방향으로 재착륙을 시도했다. 그러나 착륙 바퀴가 펴지지 않은 상태로 동체착륙을 하면서 속도를 충분히 줄이지 못했고, 활주로를 벗어나 끝단에 설치된 계기착륙장치 콘크리트 둔덕과 부딪친 뒤 폭발했다. 탑승객 175명과 승무원 6명 등 모두 181명 중 179명이 숨지고 단 2명만 살아남는 참사였다.

사고 개요를 정리하면, 시각은 2024년 12월 29일 9시 3분, 기종은 보잉 737-800, 노선은 방콕 수완나품→무안이었다. 탑승은 승객 175명·승무원 6명(총 181명), 사망 179명(생존 2명)이었다. 조류충돌 경고는 사고 6분 전(8:57), 구조요청은 사고 4분 전(8:59)이었고, 충돌 지점은 활주로 끝단의 콘크리트 ILS 구조물이었다. 추정 원인은 '조류충돌→엔진 이상→랜딩기어 미작동→동체착륙→활주로 이탈'로 이어지는 연쇄였으며, 조사기관은 국토교통부 항공철도사고조사위원회이다.

사조위는 2025년 1월 27일 예비보고서를 내며 사고기가 활주로로부터 약 2km 지점에서 블랙박스 기록이 멈춘 점을 확인했다. 조사는 손상이 더 심한 오른쪽(2번) 엔진 대신 상대적으로 멀쩡한 왼쪽(1번) 엔진을 잘못 차단했을 가능성에 무게를 두고 있는 것으로 알려졌으며, 최종 보고서 초안은 2026년 4월 발간 예정으로 조사가 진행 중이다. 이 사고는 다음과 같은 교훈을 준다. 첫째, 공항 입지 선정 때 주변 새 서식 환경에 대한 면밀한 사전 조사가 필수적이다. 둘째, 활주로 종단 안전구역의 구조물 설치 기준과 충격 흡수 설계를 개선해야 한다. 셋째, 착륙 단계 조류충돌 시 표준 비상 대응 절차 수립과 조종사 훈련 강화가 시급하다. 넷째, 조종사가 충분히 대응할 시간을 확보하도록 조기 경보 체계를 개선해야 한다.

나. 티웨이항공 216편 조류충돌 (2024. 1. 10.)

2024년 1월 10일, 일본 나리타 공항을 출발해 인천으로 향하던 티웨이

3) 국토교통부 항공철도사고조사위원회, 제주항공 2216편 사고 예비조사보고서 (2025).

항공 216편이 인천 착륙 직전 엔진에 새가 빨려 들어가는 조류충돌을 겪었다. 엔진에 화재가 발생하는 위급 상황이었으나 승무원의 신속한 대처와 관제탑 지원으로 인천공항에 안전하게 착륙했다. 다만 이 사례는 조종사가 표준 매뉴얼 없이 판단해야 했던 상황으로, 착륙 단계 조류충돌에 대한 표준 대응 매뉴얼의 부재 문제를 다시 드러냈다.[4)]

다. 과거 주요 국내 사례

이 밖에도 국내에서는 대한항공·아시아나항공 같은 대형 항공사부터 저비용 항공사까지 크고 작은 조류충돌 준사고가 다수 보고되었다. 시기별로 보면 1990~2000년대에 약 400건, 2007~2011년에 469건, 2019~2024년 상반기에 623건이 보고되어 증가 추세가 이어졌다. 국토교통부 항공철도사고조사위원회는 공식 접수된 준사고를 조사하고 보고서를 발간해 유사 사고 예방에 활용한다.

3. 한국의 조류충돌 대응 체계

한국의 대응 체계는 국토교통부 항공안전정책관 주도 아래 공항공사, 항공사, 군(공군·해군 항공대)이 협력하는 구조이다. 항공안전법과 관련 고시에 따라 공항 운영자는 조류충돌 예방 계획을 세우고 이행해야 한다(국토교통부, 2020).

현장에서는 조류 퇴치 전담 인력이 차량으로 활주로 주변을 순찰하며 새 떼를 쫓는 방식이 기본이다. 인천국제공항은 10년 넘게 주변 새 활동을 데이터베이스로 쌓아 관리하는 시스템을 운영한다. 공군과 해군 항공대는 BAT반(Bird Alert Team)을 운영해 산탄총, 폭음통 등으로 비행장 주변 새를 쫓고, 산림청은 공군 비행장과 공동으로 새의 먹이가 되는 해충을 없애 새 밀도를 낮추는 데 기여한다.

제도 측면에서 국토교통부는 충돌 사례를 수집·관리하고 항공철도사고조사위원회가 공식 조사를 맡는다. 다만 미국 국가 야생동물 충돌 데이터베이스 같은 전국 통합 공개 데이터베이스가 아직 없어 데이터의 체계적

4) 국내 언론 보도 (2024. 1.) 종합.

관리·공유 측면에서 개선이 필요하다. 제주항공 2216편 사고 이후 국토교통부는 활주로 종단안전구역 내 콘크리트 둔덕 등 위험 구조물 제거 추진, 착륙 단계 조류충돌 표준 비상 대응 절차 연구 착수, 위험 공항에 대한 조류 위험 평가 재실시, 조종사·관제사 교육 강화 등을 검토·시행하였다.

한국 대응 체계의 특징을 평가하면, 현장 퇴치 역량과 군의 BAT반 운영 등 '사람 중심의 즉각 대응'에는 강점이 있으나, 데이터에 기반한 '예방 중심의 과학적 관리'로는 아직 충분히 발전하지 못했다. 무안공항처럼 충돌률이 높은 공항이 데이터로 식별되고 있었음에도 선제적 환경 개선이나 구조물 정비로 이어지지 못한 점은, 데이터를 '행동'으로 옮기는 거버넌스가 약했음을 보여 준다. 또한 인천공항이 축적해 온 조류 데이터베이스를 전국으로 확대하고 공개하여, 모든 공항이 표준화된 방식으로 위험을 평가·관리하도록 하는 일이 시급하다.

제주항공 2216편 사고는 한국 항공 안전 체계에 '사후 대응에서 사전 예방으로'의 전환을 요구한다. 구체적으로는 첫째, 미국·일본을 참고한 통합 공개 데이터베이스 구축, 둘째, 공항 입지와 주변 토지 이용에 대한 조류 위험 평가의 제도화, 셋째, 착륙 단계 조류충돌에 대한 표준 비상 절차의 정립과 시뮬레이터 훈련 의무화, 넷째, 활주로 종단안전구역 등 활주로 안전 구역 기준의 국제 권고 수준 부합 여부 전면 점검이 필요하다.

4. 한·미·일 조류충돌 대응 비교 종합

세 나라의 현황과 대응 체계를 비교하면 공통점과 차이점이 분명하게 드러난다. 공통점은 첫째, 세 나라 모두 운항 증가와 함께 조류충돌 보고 건수가 늘어나는 추세라는 점이고, 둘째, 이착륙 단계와 철새 이동기에 위험이 집중된다는 점이며, 셋째, 어느 한 가지 방법이 아니라 환경 관리·기술·제도·교육을 결합한 통합적 접근으로 나아가고 있다는 점이다.

차이점은 각국의 여건에서 비롯된다. 미국은 1990년부터 축적된 세계 최대의 공개 데이터베이스와 야생동물관리국과의 협력을 토대로 '데이터와 과학에 기반한 관리'가 가장 큰 강점이다. 방대한 데이터 덕분에 종별 위험도 분석, 고도 분포 분석 같은 정량 연구가 가능하고, 이것이 다시 정책

과 인증 기준 개선으로 이어진다. 일본은 철새 이동 경로 상의 섬나라이자 해상·매립 공항이 많은 지리적 특성에 맞추어, 고주파 음향 퇴치(Bird Sonic)·레이저·맹금류 활용 같은 '다양한 기술의 현장 적용과 정보 공유'가 돋보인다. 한국은 동아시아 철새 경로의 핵심 경유지이면서도 통합 공개 데이터베이스가 아직 없어 데이터 기반 측면에서 상대적으로 취약하며, 제주항공 2216편 사고를 계기로 활주로 종단안전구역 구조물 개선·표준 비상 대응 절차 마련·데이터베이스 구축 등 '사고 이후의 제도 정비'가 진행 중인 단계이다.

이러한 비교는 한국이 나아갈 방향에 분명한 시사점을 준다. 미국의 통합 공개 데이터베이스와 과학 기반 위험도 평가, 일본의 현장 기술 적용과 실시간 정보 공유는 모두 한국이 단기간에 도입을 검토할 수 있는 모범 사례이다. 동시에 세 나라 모두 회전익 항공기에 대한 데이터와 대응이 상대적으로 부족하다는 공통의 약점을 안고 있어, 이 부분은 국제 협력을 통한 공동 과제로 남는다.

세 나라의 발전 경로를 시간의 흐름으로 보면 흥미로운 패턴이 드러난다. 미국은 1960년 이스턴 375편, 1975년 JFK DC-10, 2009년 US Airways 1549편 같은 충격적 사고를 겪을 때마다 데이터베이스 구축, 인증 기준 강화, 관리 프로그램 의무화로 제도를 발전시켜 왔다. 즉 '사고 → 조사 → 제도 개선'의 학습 순환이 수십 년에 걸쳐 누적된 것이다. 일본 역시 사고와 경험을 바탕으로 산학 협력과 현장 기술을 발전시켰다. 한국은 제주항공 2216편이라는 뼈아픈 사고를 통해 이제 그 학습 순환의 중요한 분기점에 서 있다. 중요한 것은 이 사고의 교훈을 일회적 대책에 그치지 않고, 미국·일본이 수십 년에 걸쳐 만든 '사고에서 배우는 체계' 자체를 제도화하는 것이다.

또한 세 나라의 비교는 '선진 제도의 단순 이식'이 능사가 아님을 보여준다. 미국의 방대한 데이터베이스는 넓은 국토와 야생동물관리국이라는 전문 기관, 오랜 축적이 있었기에 가능했고, 일본의 기술은 자국의 지리·산학 여건에 맞춘 것이다. 한국은 이들을 참고하되 동아시아 철새 경로 상의 지리적 특성, 해안·매립 공항이 많은 여건, 상대적으로 짧은 데이터 축

적이라는 자국 현실에 맞게 ‘한국형 통합 관리 모델’을 설계해야 한다.

HANSUNG UNIVERSITY

제 4 장 비행장 조류충돌 저감 방안

제 1 절 조류 유입 요인 저감 방안

조류충돌을 줄이는 가장 근본적인 방법은 '새가 부딪치면 어떻게 하느냐'가 아니라 '애초에 새가 비행장에 모이지 않게 하는 것'이다. 새가 비행장에 모이는 데는 분명한 이유가 있다. 새도 동물이기 때문에 먹이가 있고, 마실 물이 있으며, 쉴 곳과 둥지를 틀 곳이 있는 장소에 모인다. 따라서 이 장에서는 비행장과 그 주변에서 새를 끌어들이는 다양한 요소를 하나씩 살펴보고, 각 요소를 줄여 새의 유입 자체를 막는 방안을 정리한다.

1. 새가 비행장에 모이는 이유와 유인 요소

넓고 평평한 비행장은 사람에게는 비행기를 띄우는 공간이지만, 새에게는 천적이 적고 시야가 트인 매력적인 서식지가 될 수 있다. 새가 특정 장소에 모이는 이유는 크게 네 가지로 정리할 수 있다. 첫째는 먹이(곤충, 벌레, 쥐 같은 작은 동물, 풀씨와 열매 등)이고, 둘째는 물(웅덩이·연못·배수로 등 마시고 씻을 수 있는 곳)이며, 셋째는 쉼터와 은신처(키 큰 풀, 관목, 건물 구조물)이고, 넷째는 번식지(안전하게 둥지를 틀 수 있는 곳)이다. 이 네 가지 중 하나라도 풍부하면 새가 모여들고, 모인 새가 항공기와 부딪칠 위험이 커진다.

가. 먹이 요인

가장 강력한 유인 요인은 먹이다. 비행장 잔디밭에는 메뚜기·딱정벌레 같은 곤충과 지렁이가 많아 찌르레기·갈매기·황새류를 끌어들인다. 풀씨와 잡초 씨앗은 비둘기·참새 같은 작은 새의 먹이가 되고, 공항 주변에 과일나무나 장과류(베리류)가 있으면 그 열매를 노리는 새가 모인다. 또 비행장 풀밭에 들쥐 같은 설치류가 늘면 이를 잡아먹으려는 매·말똥가리 같은 맹금류와 백로류가 찾아온다. 빗물이 고인 곳이나 물가에 물고기·개구리가

있으면 왜가리·가마우지 같은 물새가 모이며, 청소가 부실해 음식물 쓰레기가 남으면 갈매기와 까마귀가 떼로 몰린다.

나. 물 요인

물은 새에게 마실 거리이자 목욕 장소이며 먹이가 사는 곳이기도 하다. 활주로 주변 배수로, 인공 연못, 빗물이 잘 빠지지 않아 생기는 웅덩이는 모두 새를 끌어들인다. 특히 비가 온 뒤 활주로 옆에 잠깐 생기는 물웅덩이도 새가 모이기에 충분하다. 공항이 갯벌, 강 하구, 저수지, 습지 가까이에 있으면 대규모 물새와 철새가 상시 머무르게 된다. 무안국제공항의 높은 충돌률이 인근 갯벌·영산호와 관련된 것이 대표적인 예이다.

다. 쉼터·번식 요인

키가 큰 풀밭, 관목 덤불, 나무는 새가 몸을 숨기고 쉬거나 둥지를 트는 장소가 된다. 격납고나 터미널 건물의 처마·옥상·구조물 틈도 비둘기·참새가 둥지를 트는 곳이다. 비행장 안팎의 빈 공터나 방치된 자재 더미도 새가 모이는 장소가 될 수 있다.

라. 주변 토지이용 요인

공항 울타리 안쪽뿐 아니라 주변 토지의 쓰임도 매우 중요하다. 쓰레기 매립지는 갈매기와 까마귀를 대량으로 끌어들이는 대표적 유인 시설이고, 하수·폐수 처리장의 침전지, 양어장과 양식장, 곡물을 다루는 농경지·사료 공장·도축장도 강력한 먹이원이 된다. 이런 시설이 공항에서 가까울수록 새가 공항과 시설 사이를 오가며 활주로 위를 가로지를 위험이 커진다.

2. 조류 종류별·계절별 유입 패턴

같은 비행장이라도 어떤 새가, 언제 모이는지는 새의 종류와 계절에 따라 다르다. 효과적인 관리를 위해서는 이 패턴을 이해해야 한다. 갈매기류는 해안·매립지 공항에 연중 머물며 음식물 쓰레기와 곤충에 강하게 끌린다. 기러기·오리 같은 물새는 겨울 월동기에 갯벌·저수지 주변 공항에 대

규모로 모이며, 몸집이 커서 가장 위험하다. 왜가리·백로류는 물웅덩이와 배수로의 물고기·개구리를 노려 봄·여름에 늘어난다. 찌르레기·참새 같은 작은 새는 풀씨와 곤충을 따라 무리를 이루며, 한 마리는 작아도 떼로 엔진에 빨려 들면 위험하다. 매·말똥가리 같은 맹금류는 풀밭의 설치류를 노려 사냥하다가 활주로 상공을 가로지른다.

계절적으로 보면, 봄(3~5월)에는 번식기를 맞은 텃새와 북상하는 철새가 늘고, 여름(6~8월)에는 둥지를 떠난 어린 새와 곤충을 노리는 새가 활동적이며, 가을(9~11월)에는 남하하는 철새 무리가 절정을 이루고, 겨울(12~2월)에는 월동하는 대형 물새가 강·갯벌 주변 공항에 집중된다. 따라서 관리 자원도 계절에 따라 탄력적으로 배분해야 한다. 예컨대 서해안 공항은 겨울철 대형 물새 관리에, 내륙 농경지 공항은 가을 철새 이동기 관리에 역량을 집중하는 식이다. 이처럼 '우리 공항에 언제 어떤 새가 왜 오는가'를 데이터로 파악하는 것이 모든 맞춤형 관리의 출발점이다.

3. 조류 유입을 줄이는 방안

유인 요소를 알았다면, 그 요소를 하나씩 없애거나 줄이는 것이 핵심이다. 방안은 환경을 바꾸는 '근본 대책', 새가 들어오지 못하게 막는 '물리적 대책', 모인 새를 쫓는 '퇴치 대책', 그리고 위험을 미리 파악하는 '감시 대책'으로 나눌 수 있다. 이들을 함께 쓰는 것이 가장 효과적이다.

가. 환경을 바꾸는 근본 대책

잔디 높이 조절 : 비행장 잔디를 7~14cm 사이로 유지하면 큰 새가 먹이를 찾기 어려워진다. 너무 짧게(3cm 이하) 깎으면 오히려 찌르레기 같은 작은 새의 먹이터가 되므로, 적정 높이를 지키는 것이 관건이다.

열매·씨앗 식물 제거 : 과일나무, 장과류, 씨앗을 많이 맺는 잡초를 공항 구역에서 없애 먹이원을 줄인다.

곤충·설치류 방제 : 살충·방제로 곤충과 들쥐를 줄이면 이를 먹이로 삼는 새와 맹금류의 유입이 함께 줄어든다.

물 관리 : 배수를 개선해 웅덩이가 생기지 않게 하고, 연못·배수로는 매

립하거나 그물·덮개로 덮는다. 비 온 뒤 생기는 물웅덩이는 신속히 제거한다.

나. 새가 들어오지 못하게 막는 물리적 대책

연못이나 침전지처럼 없애기 어려운 수체에는 위에 그물이나 와이어를 쳐서 새가 내려앉지 못하게 한다. 건물 처마·구조물에는 스파이크(뾰족한 돌기)나 그물을 설치해 둥지를 막고, 공항 경계에는 울타리를 둘러 지상 동물의 침입을 막는다. 이런 물리적 배제는 효과가 오래가지만 설치 범위가 제한되고 유지·보수가 필요하다는 한계가 있다.

다. 모인 새를 쫓는 퇴치 대책

환경을 바꿔도 새가 모이면 직접 쫓아야 한다. 퇴치 방법은 소리로 쫓는 음향 퇴치(공포탄, 가스 캐논, 새가 싫어하는 고주파음을 내는 Bird Sonic 등), 빛과 모습으로 쫓는 시각 퇴치(레이저, 반사 물체, 맹금류 모형, 천적 눈 모양), 살아 있는 천적을 이용하는 생물적 퇴치(훈련된 매·독수리, 보더콜리 같은 추격견)로 나뉜다. 음향·시각 퇴치는 즉각적이지만 새가 익숙해지면 효과가 떨어지므로, 여러 방법을 번갈아 쓰고 무작위로 작동시켜 '습관화'를 막는 것이 중요하다.

라. 위험을 미리 파악하는 감시 대책

조류 탐지 레이더는 반경 수 km의 새 움직임을 실시간으로 잡아내 관제탑과 관리팀에 경보를 준다. 최근에는 카메라 영상을 인공지능(AI)으로 분석해 새의 종류·수·이동 방향을 자동으로 식별하는 시스템도 개발되고 있다. 여기에 더해 야생동물 관리팀의 정기 순찰과 충돌 사례의 꼼꼼한 보고가 쌓이면, 어느 계절·어느 시간대에 어떤 새가 위험한지를 예측해 선제적으로 대응할 수 있다.

마. 공항 주변 토지이용 관리

공항 울타리 밖의 유인 시설도 관리해야 한다. FAA는 쓰레기 매립지처

럼 새를 끌어들이는 시설이 공항으로부터 최소 5마일(약 8km) 이상 떨어지도록 권고하며, 공항 반경 13km 이내 토지 이용 변경 시에는 조류 위험 요소를 환경 영향 평가에 반드시 포함하도록 하는 제도적 장치가 필요하다. 농경지·양식장·하수처리장 운영자와 협력 관계를 맺어 새를 끌어들이는 요인을 함께 줄여 나가는 노력도 중요하다.

바. 통합적 접근의 필요성

이상의 방안들은 어느 하나만으로는 충분하지 않다. 먹이를 줄이고, 물을 없애고, 들어오지 못하게 막고, 들어온 새는 쫓고, 동시에 감시하는 여러 방법을 함께 운영하는 '통합 야생동물 관리'가 가장 효과적이다. 이러한 통합 관리가 잘 이루어지는 공항에서는 조류충돌을 최대 60~80%까지 줄일 수 있는 것으로 보고된다.

4. 공항 입지와 저감 방안의 우선순위

조류 유입을 줄이는 가장 근본적인 단계는 사실 공항을 짓기 '전'에 있다. 일단 철새 도래지나 갯벌, 큰 강 하구 가까이에 공항이 들어서면, 이후 아무리 퇴치와 관리에 힘써도 위험을 완전히 없애기 어렵다. 무안국제공항이 영산호와 갯벌 인근에 건설된 뒤 국내 최고 수준의 충돌률을 기록한 사실은 입지 선정의 중요성을 비극적으로 보여 준다. 따라서 신규 공항을 계획할 때는 주변의 조류 서식 환경과 철새 이동 경로에 대한 면밀한 사전 조사와 위험도 평가가 반드시 선행되어야 한다.

이미 운영 중인 공항이라면 주변 토지의 변화를 관리하는 것이 핵심이다. 공항 인근에 새로운 쓰레기 매립지, 하수처리장, 양식장, 대규모 농경지가 들어서면 새를 끌어들여 위험을 키운다. 그러므로 공항 반경 일정 범위(미국은 약 8~13km) 안에서 토지 이용을 바꿀 때는 조류 위험을 반드시 검토하도록 제도화하고, 지방자치단체·환경 당국·공항 운영자가 협력하는 거버넌스를 갖추어야 한다. 이는 항공 당국만의 문제가 아니라 도시·지역 계획 전체의 과제이다.

입지와 토지 이용을 관리하더라도, 한정된 자원을 어디에 먼저 쓸지는

또 다른 문제다. 자원이 한정된 현실에서는 모든 방안을 동시에 최고 수준으로 시행하기 어렵다. 따라서 '효과 대비 비용'을 고려한 우선순위가 필요하다. 일반적으로 식생 관리와 수체 제거 같은 환경 근본 대책은 비용이 비교적 낮으면서 효과가 오래가므로 모든 공항이 우선 시행해야 한다. 음향·시각 퇴치는 비용이 중간 수준이고 즉각적인 효과가 있으나 습관화 문제로 단독 의존은 곤란하다. 조류 탐지 레이더와 AI 시스템은 효과가 크지만 비용도 높아, 충돌 위험과 운항량이 많은 대형 공항부터 단계적으로 도입하는 것이 현실적이다. 맹금류 활용 같은 생물적 방법은 효과적이지만 유지 비용과 날씨 의존성이 커 보조적으로 쓰는 것이 적절하다. 이처럼 공항의 규모·위험도·예산에 맞추어 방법을 조합하되, 어떤 경우에도 '유인 요인 제거'라는 근본 대책을 토대로 삼는 것이 핵심 원칙이다.

5. 시간대·기상 조건을 고려한 운영

조류 유입 저감은 '공간'의 문제일 뿐 아니라 '시간'의 문제이기도 하다. 새는 해 뜰 무렵과 해 질 무렵에 먹이 활동과 이동이 활발하므로, 이 시간대에 퇴치 순찰과 감시를 집중하고 위험이 높은 시간의 이착륙 계획을 탄력적으로 조정하는 것이 효과적이다. 야간에는 새를 눈으로 확인하기 어려워 레이더 같은 탐지 기술의 가치가 커지며, 야간 운항이 많은 공항일수록 탐지 체계의 중요성이 높아진다.

기상 조건에 따른 대응도 필요하다. 비가 온 직후에는 활주로 주변에 지렁이가 올라오고 물웅덩이가 생겨 새가 모이기 쉬우므로, 강우 후 신속한 물 제거와 집중 순찰이 요구된다. 안개나 낮은 구름으로 시야가 나쁜 날에는 조종사와 새 모두 서로를 피하기 어려우므로 경계 수준을 높여야 한다. 강풍은 새의 비행 고도와 경로를 바꾸어 평소와 다른 위험을 만들 수 있다. 이처럼 '언제, 어떤 날씨에 위험이 커지는가'를 데이터로 파악해 인력과 장비 운용을 조정하면, 같은 자원으로도 더 큰 효과를 낼 수 있다. 결국 공간 관리(환경·물리적 대책)와 시간 관리(시간대·기상 대응)를 결합할 때 비행장의 조류 위험을 가장 효과적으로 낮출 수 있다.

제 2 절 조류충돌 종합 대응 방안

1. 공항 환경 관리 방안

앞 장에서 살펴본 유입 요인 저감과 맞닿아 있는 공항 환경 관리는 모든 대응 전략의 기본 토대이다. 국제민간항공기구와 미국 연방항공청 야생동물 위험 관리 매뉴얼은 환경 관리가 단기 퇴치보다 장기적으로 훨씬 큰 효과를 내며 다른 방법의 효과도 높여 준다고 강조한다. 핵심은 식생 관리(잔디 높이 7~14cm 유지, 열매·씨앗 식물 제거), 수체 관리(웅덩이·연못 제거와 배수 개선), 그리고 공항 5마일(약 8km) 반경 내 토지 이용 관리 세 가지이다. 이 세 가지는 비용이 비교적 낮으면서도 효과가 커서 모든 공항에 적용할 수 있다.

환경 관리가 효과적인 이유는 '새가 모일 이유 자체'를 없애기 때문이다. 퇴치는 이미 모인 새를 쫓는 대증요법이지만, 환경 관리는 새가 애초에 찾아오지 않게 만드는 근본 대책이다. 클리어리와 돌비어의 매뉴얼이 정리한 것처럼, 통합 관리에서 환경 관리는 다른 모든 수단이 효과를 내도록 받쳐 주는 토대 역할을 한다. 예컨대 먹이가 풍부한 공항에서는 아무리 쫓아도 새가 곧 돌아오지만, 먹이를 없앤 공항에서는 적은 퇴치 노력으로도 큰 효과를 볼 수 있다.

구체적 기법으로는 첫째, 잔디 관리가 있다. 잔디를 일정 높이(약 7~14cm)로 유지하면 키 큰 풀에 가려 천적을 경계해야 하는 새가 불안을 느껴 머무르기 꺼리고, 동시에 너무 짧게 깎았을 때 드러나는 곤충·씨앗 먹이도 가려진다. 둘째, '덜 매력적인 식생'으로의 전환이다. 씨앗과 열매를 적게 맺고 곤충을 덜 끌어들이는 식물로 공항 녹지를 조성하면 먹이원이 근본적으로 줄어든다. 셋째, 수체 제거와 배수 개선으로 물새의 유인을 차단하고, 넷째, 설치류·곤충 방제로 맹금류와 식충성 조류의 먹이 사슬을 끊는다.

이러한 환경 관리의 효과는 여러 연구와 현장 경험으로 뒷받침된다. 통합 야생동물 관리를 충실히 적용한 공항에서 조류충돌이 크게 감소했다는 보고가 이어지며, 핵심은 '한 번의 조치'가 아니라 '지속적인 유지 관리'라

는 점이다. 잔디는 계속 자라고, 물웅덩이는 비가 오면 다시 생기며, 식생은 시간이 지나면 변하기 때문이다. 따라서 환경 관리는 전담 인력과 예산을 갖춘 상시 업무로 운영되어야 하며, 그 효과를 정기적으로 측정해 방법을 조정하는 적응적 관리가 함께 이루어져야 한다.

2. 기술적 대응 방안

기술적 대응은 새를 찾아내는 '탐지 기술'과 새를 쫓는 '퇴치 기술'로 나뉜다. 표로 비교되던 내용을 문장으로 풀면 다음과 같다.

탐지 기술의 대표는 조류 탐지 레이더로, 전파 반사를 이용해 수 km 범위의 새를 실시간으로 추적한다. 유효성이 높지만 비용이 크고 기상의 영향을 받는다. 또 카메라 영상을 분석하는 AI 조류 식별 시스템은 수백 m 범위에서 새의 종·수·이동을 자동으로 파악하며, 레이더·음향 센서와 결합하면 정확도가 더 높아진다. 아직 초기 개발 단계이지만 빅데이터로 새 이동 패턴을 예측하는 데까지 발전하고 있다.

다만 레이더의 실효성에 대해서는 신중한 평가가 필요하다. 필립스 등이 시카고 오헤어 공항에서 수행한 연구는, 레이더가 큰 새와 가까운 표적은 잘 추적하지만 작은 새나 멀리·낮게 나는 표적은 놓칠 수 있음을 보였다. 게린저 등의 연구도 레이더의 잠재력을 인정하면서 '지상 검증'의 필요성을 강조하였다. 즉 레이더는 새의 존재를 알려 주지만, 그것이 어떤 종이고 얼마나 위험한지까지 자동으로 판단해 주지는 못한다. 따라서 레이더는 사람의 판단과 다른 관리 수단을 보완하는 도구로 활용해야 하며, 도입에 앞서 해당 공항 환경에서의 검증이 선행되어야 한다.

퇴치 기술로는, 새가 싫어하는 고주파음을 내보내는 Bird Sonic이 150~200m 범위에서 중간~높은 효과를 내며 새가 익숙해지는 것을 막도록 설계된다. 무해한 레이저를 쏘는 레이저 퇴치기는 수백 m 범위에서 효과적이지만 야간·안개에 제한이 있고, 가스포 같은 음향 경보기는 즉각적이나 새가 빨리 익숙해진다. 드론을 이용해 새를 쫓는 시스템도 연구되고 있으나 비행 규제의 제약이 있다.

가. 음향 퇴치의 종류와 한계

음향 퇴치는 가장 오래되고 널리 쓰이는 방법으로, 크게 '위협음'과 '경계음'으로 나뉜다. 위협음은 폭음통·가스 캐논·산탄총처럼 큰 소리로 새를 놀라게 하는 방식이고, 경계음은 그 새의 동족이 위험에 처했을 때 내는 울음소리를 녹음해 들려주어 무리를 흩어지게 하는 방식이다. 경계음은 종 특이적이어서 대상 새에게는 효과가 크지만 다른 종에는 잘 듣지 않는다는 특징이 있다. 클리어리와 돌비어의 매뉴얼은 음향 퇴치가 즉각적이고 비용이 낮은 장점이 있으나, 새가 '소리는 나지만 실제 위협은 없다'는 것을 학습하는 습관화가 가장 큰 약점이라고 지적한다.

습관화를 늦추려면 소리의 종류·세기·발생 위치·시점을 무작위로 바꾸고, 음향만 단독으로 쓰기보다 실제 위협(차량 접근, 산탄총 사격, 맹금류 출현)과 결합해 '소리 뒤에 진짜 위험이 따른다'는 학습을 유지시켜야 한다. 일본의 Bird Sonic이 고주파를 무작위로 송출하도록 설계된 것도 바로 이 습관화를 늦추기 위한 것이다.

나. 시각 퇴치와 화학 기피제

시각 퇴치에는 회전 거울·반짝이 테이프·연(鳶) 모양 맹금류 모형·눈알 무늬 풍선 등이 쓰인다. 비용은 낮지만 역시 습관화가 빠르다는 한계가 있다. 화학 기피제로는 포도에 들어 있는 성분인 메틸안트라닐레이트(methyl anthranilate)가 대표적인데, 새의 점막을 자극해 특정 구역의 잔디나 물웅덩이에 접근하지 못하게 한다. 사람과 환경에 비교적 안전하다는 장점이 있으나, 넓은 면적에 지속적으로 살포해야 해 비용과 잔류 관리가 과제이다.

다. 생물적 방법: 맹금류와 목양견

생물적 방법은 실제 천적을 이용해 새가 '이곳은 위험하다'고 인식하게 만드는 방식이다. 훈련된 매·송골매를 날려 소형 조류를 쫓는 매사냥은 습관화가 거의 없다는 점에서 효과가 크지만, 매를 훈련·관리할 전문 인력과

비용이 필요하고 악천후에는 운용이 어렵다. 보더콜리 같은 목양견을 활용해 잔디밭의 기러기·물새를 쫓는 방법도 북미 공항에서 효과가 보고되었다. 생물적 방법은 환경 친화적이고 지속 효과가 크지만, 단독으로 넓은 공항 전체를 감당하기는 어려워 다른 방법과 함께 보조적으로 운용된다.

라. 통합 운용의 원칙

어떤 단일 기술도 만능이 아니라는 점은 거의 모든 연구가 공통으로 강조한다. 드볼트·블랙웰·벨란트가 엮은 단행본은, 탐지·음향·시각·화학·생물적 방법을 '서식지 관리라는 토대 위에서' 조합하고, 효과를 지속적으로 측정해 방법을 교체·갱신하는 적응적 관리가 핵심이라고 정리한다. 즉 기술은 도구일 뿐이며, 그 도구를 언제 어떻게 조합해 쓸지를 데이터에 기반해 끊임없이 조정하는 운용 체계가 성패를 가른다.

항공기 자체의 기술 개선도 중요하다. 전방의 새 떼를 조종사에게 미리 알려 주는 탐지 시스템, 새가 빨려 들어가도 손상을 줄이도록 엔진 팬 블레이드의 재료와 형상을 최적화하는 연구, 그리고 티타늄 합금이나 탄소섬유 강화 복합재료 같은 신소재로 새 충돌 내성을 높이는 연구가 진행되고 있다.

3. 제도적·운영적 대응 방안

가. 보고 체계의 의무화와 표준화

데이터를 체계적으로 모으려면 보고 의무화가 먼저다. 미국도 Part 139 공항에는 보고 의무가 있으나 모든 운항 환경에 완전히 적용되지는 않으며, 특히 헬리콥터 운항자의 보고율이 낮아 정책 수립에 필요한 데이터가 부족하다. 따라서 모든 항공기 유형에 보고를 의무화하고 절차를 간소화해야 한다. 나아가 미국 연방항공청의 국가 야생동물 충돌 데이터베이스, 국제민간항공기구의 조류충돌 정보시스템, 각국 데이터베이스가 따로 운영되는 현실을 넘어, 전 세계가 실시간으로 정보를 공유하는 글로벌 통합 플랫폼이 필요하다.

나. 야생동물 위험 관리 계획의 내실화

미국 연방항공청이 공항에 야생동물 위험 관리 계획의 내실화를 의무화하고 있으나, 계획의 실제 이행과 효과 평가에 대한 감독이 강화되어야 한다. 전문 인력 확충, 정기적 위험 평가, 평가 결과에 따른 계획의 주기적 갱신이 필요하며, 공항 반경 13km 이내 토지 이용 변경 시 조류 위험 요소를 환경 영향 평가에 반드시 포함해야 한다.

다. 조종사 교육 및 대응 절차 표준화

조류충돌 후 조종사의 신속·정확한 대응은 사고 결과를 크게 좌우한다. 초기·정기 훈련에 조류충돌 대응 절차를 포함하되, 위험 조류 식별, 충돌 후 즉각적인 엔진 상태 점검, 관제사와의 신속한 소통, 그리고 양쪽 엔진 정지 같은 최악의 상황에서의 비상 착수·착륙 절차를 시뮬레이터로 반복 훈련하는 것이 중요하다. 제주항공 2216편 사례에서 드러난 것처럼, 착륙 단계 조류충돌에 대한 표준 비상 대응 절차의 마련이 특히 시급하다.

교육은 조종사에 그쳐서는 안 된다. 관제사는 조류 활동을 조종사에게 적시에 알리고 이착륙 순서를 조정하는 핵심 역할을 하므로, 조류 정보 전달 절차와 용어를 표준화한 교육이 필요하다. 야생동물 관리 요원에게는 종 식별, 위험도 평가, 퇴치 장비 운용, 데이터 기록의 전문 교육이 요구된다. 정비사는 충돌 후 손상을 정확히 진단하고 숨은 손상(특히 복합재 내부 손상)을 놓치지 않도록 훈련되어야 한다. 이처럼 조종사·관제사·관리 요원·정비사가 각자의 역할에서 조류충돌에 대비할 때, 한 사람의 실수가 사고로 번지는 것을 여러 단계에서 막을 수 있다. US Airways 1549편의 성공적 대응이 조종사 개인의 역량만이 아니라 승무원·관제·구조 체계가 함께 작동한 결과였음을 기억할 필요가 있다.

라. 인증 기준 강화 및 최신화

US Airways 1549편 사고 이후 미국 연방 교통안전위원회는 하강 단계 엔진의 새 충돌 내성 기준 강화를 권고했고 유럽 항공안전청이 2017년 이를 검토하기 시작했다. 다음과 같은 기준 강화가 필요하다.

– 소형 회전익 항공기 조종석 창의 새 충돌 내성 기준 수립

– 헬리콥터 메인로터 블레이드의 대형 조류 충돌 내성 검증 기준 마련

– 상업용 소형 고정익 항공기에 대한 새 충돌 방호 요건 확대 적용

– 하강 단계 엔진의 새 충돌 내성 기준 강화

마. 국제 협력 체계 강화

조류충돌은 국경을 넘는 철새 이동과 밀접하므로 국제 협력이 필수적이다. 국제민간항공기구의 조류충돌 정보시스템을 통한 데이터 공유를 강화하고, 철새 이동 경로를 공유하는 나라들 사이에 정보 교환 협정을 맺으며, 인접국 공동 연구로 새 이동 패턴과 공항 위험도를 함께 분석하는 체계를 갖추어야 한다.

4. 항공기 유형별 특화 대응 방안

가. 고정익 항공기

고정익 항공기는 조류충돌의 약 97%가 이착륙 단계에 몰리고 엔진 흡입이 가장 심각하다. 운항 측면에서는 관제탑과 야생동물 관리팀의 실시간 정보 공유를 강화해 새 활동이 활발한 시간대·계절에 이착륙 경로나 활주로 사용 순서를 유연하게 바꾸고, 철새 이동기에는 특별 경보 프로토콜을 운영하며, 충돌 시 즉각적인 엔진 점검과 신속한 정비 지원 체계를 갖추어야 한다. 설계·정비 측면에서는 엔진 흡입구 설계를 최적화해 대형 조류 충돌 시 팬 블레이드 파손을 줄이고, 조종석 유리의 새 충돌 내성을 정기적으로 점검해 노화에 따른 내충격성 저하를 조기에 발견해야 한다.

나. 회전익 항공기

회전익 항공기는 낮은 고도 운항 탓에 모든 비행 단계에서 위험하며 단 한 마리의 큰 새와의 충돌도 치명적일 수 있다. 최우선 과제는 조종석 창 강화이다. 헬리콥터 조종석 창의 인증 기준을 강화해 일정 무게 이상의 새와 부딪쳐도 창이 뚫리지 않도록 요구사항을 명문화하고, 폴리카보네이트

나 적층 아크릴 소재 적용을 확대하며 창틀 구조를 보강해야 한다. 또한 민간 헬리콥터 PHI S-76 사고에서 드러난 것처럼 충격으로 인한 T-핸들의 의도치 않은 작동을 막는 잠금 장치 도입이 시급하고, 메인로터 마스트 전방의 제어 장치에 충격 방호 설계를 검토해야 한다. 운항 측면에서는 새가 밀집한 저고도 체류 시간을 줄이고, 철새 경로와 겹치는 구간의 비행 시간대를 조정하며, 해상·습지·농경지 상공 통과 시 특별히 주의하는 절차를 두어야 한다.

다. 유형별 대응 전략 비교 정리

두 유형의 차이를 문장으로 비교하면 다음과 같다. 주요 위험 부위는 고정익이 엔진 흡입구·조종석 유리·날개 앞전인 반면, 회전익은 메인로터 블레이드·조종석 창·테일로터이다. 고위험 비행 단계는 고정익이 이착륙 단계(약 97%)이고 회전익은 모든 단계(특히 순항 약 2/3)이다. 항공기 설계 개선의 초점은 고정익이 엔진 흡입 내성 강화와 새 방호 격자라면, 회전익은 조종석 창 강화·T-핸들 방호·로터 강화이다. 운항 절차는 고정익이 이착륙 단계 강화 경보와 활주로 우회, 회전익은 저고도 비행 최소화와 조류 밀집 구역 회피에 초점을 둔다. 조종사 훈련도 고정익은 엔진 고장과 불시착 훈련, 회전익은 단일·이중 엔진 고장 시 자동회전과 창 파손 대응 훈련으로 달라야 한다. 인증 기준은 고정익이 하강 단계 엔진 내성 강화, 회전익은 조종석 창 내성 의무화와 소형기 적용 확대가 과제이다.

라. 유형을 아우르는 공통 과제

고정익과 회전익은 위험의 양상이 다르지만, 공통으로 추구해야 할 과제도 있다. 첫째, 두 유형 모두 '충돌을 줄이는 예방'과 '충돌을 견디는 설계'가 함께 가야 한다. 둘째, 두 유형 모두 정확한 데이터에 기반한 위험 평가가 관리의 출발점이다. 셋째, 두 유형 모두 조종사·관제사·관리요원의 협력과 훈련이 사고 결과를 좌우한다. 차이가 큰 만큼 차별화된 대응이 필요하지만, 그 차별화는 '공통의 통합 관리 틀' 위에서 이루어져야 한다. 즉 같은 원칙(예방-탐지-내충격-대응)을 각 유형의 특성에 맞게 다르게 적

용하는 것이지, 전혀 다른 두 체계를 따로 운영하는 것이 아니다. 특히 회전익은 그동안 데이터와 기준이 부족했던 만큼, 고정익에서 축적된 관리 경험과 통합 틀을 회전익으로 확장하는 노력이 필요하다.

5. 안전 문화와 비용·효과 전략

기술과 제도를 아무리 잘 갖추어도, 그것을 운영하는 사람과 조직의 '안전 문화'가 받쳐 주지 않으면 효과를 내기 어렵다. 조류충돌 대응에서 안전 문화란, 경미한 충돌이라도 빠짐없이 보고하고, 그 데이터를 숨기지 않고 공유하며, 위험 신호가 포착되면 즉시 행동으로 옮기는 조직의 태도를 말한다. 무안공항의 높은 충돌률이 데이터로 드러나 있었음에도 선제 조치로 이어지지 못한 사례는, 데이터를 '수집'하는 것과 그것을 '행동'으로 옮기는 것 사이에 큰 간극이 있음을 보여 준다. 따라서 보고를 처벌이 아닌 개선의 기회로 받아들이는 비처벌적 보고 문화를 정착시키는 일이 중요하다.

데이터 거버넌스도 핵심 과제이다. 누가 데이터를 수집·관리하고, 어떻게 분석하며, 그 결과를 누구에게 어떤 권한으로 전달해 행동하게 할 것인지가 명확히 정해져야 한다. 미국의 국가 야생동물 충돌 데이터베이스가 강력한 까닭은 단순히 데이터가 많아서가 아니라, 데이터의 수집·식별·분석·환류 과정이 제도적으로 연결되어 있기 때문이다. 한국이 통합 데이터베이스를 구축할 때에도, 데이터를 '쌓는' 데 그치지 않고 위험 공항을 자동으로 식별해 자원을 배분하고 책임 주체가 행동하도록 하는 거버넌스를 함께 설계해야 한다. 결국 사람·조직·데이터가 유기적으로 맞물릴 때 비로소 기술과 제도가 제 역할을 한다.

안전 문화와 거버넌스가 갖춰져도, 모든 대책에는 비용이 따른다.

모든 대응에는 비용이 따르므로, 한정된 예산을 어떻게 배분할지가 현실적인 관건이다. 앞서 살펴본 앨런(Allan)의 경제 분석이 보여 주듯, 조류충돌의 손실(특히 간접 비용과 대형 사고의 잠재 손실)을 고려하면 예방 투자는 장기적으로 경제적 타당성을 갖는다. 그러나 모든 공항이 동시에 최고 수준의 레이더와 AI를 도입할 수는 없으므로, 비용 대비 효과가 높

은 것부터 단계적으로 도입하는 전략이 필요하다.

단계적 도입의 일반 원칙은 다음과 같다. 1단계로는 비용이 낮고 효과가 오래가는 환경 관리(잔디·수체·식생·토지 이용)를 모든 공항이 기본으로 시행한다. 2단계로는 음향·시각 퇴치와 전담 인력의 정기 순찰 등 운영 대책을 갖춘다. 3단계로는 충돌 위험과 운항량이 큰 공항부터 조류 탐지 레이더와 AI 식별 시스템을 도입해 검증한다. 4단계로는 검증된 기술을 단계적으로 확대하고 예측 시스템과 연계한다. 이처럼 '근본 대책 → 운영 대책 → 첨단 기술'의 순서로 투자하면, 적은 비용으로도 큰 위험을 먼저 줄이면서 자원을 효율적으로 쓸 수 있다.

중요한 것은 비용을 '지출'이 아니라 '투자'로 보는 관점이다. 단 한 건의 대형 사고가 가져오는 인명·경제·사회·신뢰의 손실은 수년간의 예방 투자 비용을 압도한다. 제주항공 2216편 사고가 한국 사회 전체에 남긴 충격과 비용을 떠올리면, 예방에 대한 선제적 투자가 결코 비싸지 않다는 점이 분명해진다. 안전은 비용이 아니라 가장 확실한 투자라는 인식의 전환이 통합 대응의 바탕이 되어야 한다.

제 3 절 미래 신기술 활용 방안

조류충돌 대응은 전통적인 환경 관리와 퇴치에서 한 걸음 더 나아가, 인공지능·빅데이터·무인 비행체 같은 첨단 기술과 결합하는 방향으로 빠르게 변화하고 있다. 이 장에서는 최근 연구가 주목하는 신기술의 흐름과 앞으로의 과제를 살펴본다.

1. 인공지능 기반 탐지·예측

최근 체계적 문헌 고찰들은 조류 이동 예측과 인공지능 기반 탐지를 가장 유망한 연구 방향으로 꼽는다. 사브지얀 바르누스파데라니와 시하브는 2025년 검토에서, 시계열 분석 기법으로 미국의 조류충돌 추세를 예측한 사례를 소개하며, 과거 데이터로 미래 위험을 예보하는 연구가 늘고 있음을 보고하였다. 카메라 영상을 딥러닝으로 분석해 새의 종·수·이동 방향을

자동으로 식별하는 시스템은, 사람이 일일이 관찰하던 방식을 대체하거나 보완할 수 있어 특히 주목받는다.

인공지능의 진정한 가치는 여러 센서의 정보를 합쳐 '예측'으로 나아갈 때 드러난다. 조류 레이더가 주는 위치 정보, 카메라가 주는 종 정보, 그리고 과거 충돌 기록과 기상·계절 데이터를 함께 학습하면, '오늘 오후 이 활주로에 큰 새 떼가 나타날 확률이 높다'는 식의 예측이 가능해진다. 이러한 예측은 관제탑이 이착륙 순서나 활주로 사용을 미리 조정하도록 돕는다. 다만 인공지능은 학습한 데이터의 양과 질에 좌우되므로, 신뢰할 수 있는 통합 데이터베이스의 구축이 선행되어야 한다.

최근에는 기상 레이더와 위성 자료를 활용해 광역 조류 이동을 관측하는 '레이더 조류학'에서도 발전하고 있다. 도플러 기상 레이더에 잡히는 새 떼의 신호를 분석하면 야간 철새 이동의 규모와 방향을 대륙 단위로 파악할 수 있고, 이를 공항 단위 예보와 결합하면 며칠 앞선 '조류 이동 예보'가 가능해진다. 미국에서는 이러한 광역 이동 예보가 시범적으로 제공되고 있으며, 항공뿐 아니라 풍력 발전 등 다른 분야의 조류 보호에도 활용된다. 인공지능은 이처럼 흩어진 관측을 통합해 '사후 대응'을 '사전 예측'으로 바꾸는 핵심 도구가 되고 있다.

2. 항공기 탑재형 회피 시스템과 능동 대응

지금까지의 대응이 주로 '공항에서 새를 쫓는' 방식이었다면, 최근에는 '항공기 쪽에서 충돌을 피하는' 능동적 접근이 연구되고 있다. 블랙웰 등은 새의 시각 특성에 맞추어 항공기 조명을 조절하면 새가 더 일찍 항공기를 인지하고 회피 행동을 보인다는 점을 실험으로 확인하였다. 이는 항공기에 특수 조명이나 전방 탐지 장치를 달아 새에게 미리 '경고'하거나 조종사에게 위험을 알리는 시스템으로 발전할 가능성을 보여 준다.

나아가 새가 항공기를 위협으로 인식하는 거리와 반응 시간을 정량적으로 분석하여, 어떤 신호(빛·소리·형상)가 회피를 가장 효과적으로 유도하는지를 밝히는 연구도 이어지고 있다. 이러한 '감각 생태학' 기반 접근은, 새를 해치지 않으면서도 충돌을 줄일 수 있다는 점에서 동물 복지와 안전

을 함께 고려하는 미래형 대안으로 평가된다.

3. 도심 항공 모빌리티(UAM)와 드론 시대의 새 과제

조류충돌 연구가 새롭게 직면한 과제는 도심 항공 교통체계와 드론의 확산이다. 최근 체계적 검토들은 이 분야를 중요한 미래 연구 주제로 명시한다. 도심을 낮게 비행하는 전기 수직이착륙기와 배송 드론은, 새가 가장 밀집한 저고도 공역을 공유하게 되므로 회전익 항공기와 비슷하거나 더 큰 조류충돌 위험에 놓인다.

게다가 이들 무인·소형 비행체는 기존 여객기만큼 엄격한 새 충돌 내성 기준이 적용되기 어렵고, 수가 폭발적으로 늘어날 경우 충돌 빈도 자체가 크게 증가할 수 있다. 따라서 도심 저고도 공역의 조류 분포를 실시간으로 파악하고, 비행 경로를 새가 적은 시간·고도로 자동 조정하는 '조류 회피 항공 교통 관리'가 필요하다. 이는 조류 이동 예보 시스템과 무인기 교통 관리 시스템을 통합하는 연구로 이어지고 있다.

흥미롭게도 드론은 위험 요인인 동시에 '해결 도구'이기도 하다. 앞 장에서 살펴본 것처럼 드론을 이용해 새 떼를 안전하게 쫓거나, 공항 주변 조류 분포를 항공 촬영으로 조사하는 활용이 연구되고 있다. 또한 새의 비행을 모방한 '로봇 매' 드론은 실제 맹금류처럼 보여 습관화가 적은 퇴치 수단으로 주목받는다. 결국 무인 비행체 시대의 조류충돌 문제는 '새로운 위험의 관리'와 '새로운 도구의 활용'이라는 양면을 함께 안고 있으며, 이를 통합적으로 다루는 제도와 연구가 필요하다.

4. 데이터 통합과 국제 표준화

앞선 장들에서 거듭 확인했듯이, 모든 신기술의 토대는 데이터이다. 현재 미국 국가 야생동물 충돌 데이터베이스, 국제민간항공기구의 조류충돌 정보시스템, 각국 데이터베이스가 따로 운영되어 국제적 비교와 학습이 제한적이다. 향후 과제는 보고 양식과 종 식별 기준을 국제적으로 표준화하고, 실시간으로 정보를 공유하는 글로벌 플랫폼을 구축하는 것이다. 특히 회전익 항공기와 무인기에 대한 데이터는 아직 부족하므로, 이 영역의

보고를 의무화하고 데이터를 축적하는 일이 시급하다.

5. 기후 변화라는 장기 변수

끝으로, 기후 변화는 조류충돌 위험의 장기적 변수로 떠오르고 있다. 기온 상승은 철새의 이동 시기와 경로, 번식 시기, 그리고 개체 수에 영향을 주어, 지금까지 쌓아 온 '언제·어디서 위험한가'에 대한 지식을 흔들 수 있다. 예컨대 겨울이 따뜻해지면 일부 철새가 이동을 멈추고 텃새화하면서 특정 공항의 위험이 사시사철 높아질 수 있다. 따라서 기후 변화가 조류 분포와 충돌 위험에 미치는 영향을 추적하는 장기 연구가 필요하며, 이는 단순한 항공 안전을 넘어 생태계 변화의 관점에서도 중요한 과제이다.

제 4 절 통합 위험 관리 모델의 제안

앞의 여러 장에서 통계와 사례, 충돌 역학, 비행장 유입 요인, 대응 방안, 신기술을 차례로 살펴보았다. 이 장에서는 이들을 하나로 묶어, 조류충돌을 '우연한 사고'가 아니라 '체계적으로 관리할 수 있는 위험'으로 다루는 통합 모델을 제시한다.

1. 위험 평가에 기반한 관리

효과적인 관리의 출발점은 '모든 새를 똑같이 다루지 않는 것'이다. 드볼트(DeVault) 등이 제시한 상대 위험도 개념처럼, 새의 종류마다 위험도가 크게 다르므로 한정된 자원을 위험이 큰 종에 우선 배분해야 한다. 위험도는 대체로 세 요소의 조합으로 결정된다. 첫째는 충돌 빈도(그 새가 얼마나 자주 부딪치는가), 둘째는 손상 유발률(부딪쳤을 때 실제 손상으로 이어지는 비율), 셋째는 노출 정도(그 새가 공항 주변에 얼마나 많이, 자주 나타나는가)이다.

이 세 요소를 결합하면 '위험 지수'를 만들 수 있다. 예컨대 애도비둘기는 자주 부딪치지만 작아서 손상 유발률이 낮아 위험 지수가 낮고, 캐나다기러기는 상대적으로 덜 부딪치지만 몸집이 크고 무리를 지어 손상 유발

률이 높아 위험 지수가 매우 높다. 이런 방식으로 공항별로 '위험 조류 순위'를 만들면, 어떤 새를 가장 먼저 관리해야 하는지가 분명해진다. 단순히 충돌 건수만 보는 관리에서 벗어나, 위험의 크기에 따라 자원을 배분하는 과학적 관리로 나아가는 것이다.

2. 위험 매트릭스와 우선순위 결정

항공 안전 분야에서 널리 쓰이는 '위험 매트릭스'를 조류충돌에도 적용할 수 있다. 위험 매트릭스는 어떤 위험을 '발생 가능성'과 '심각도' 두 축으로 평가해, 둘을 곱한 값으로 우선순위를 정하는 도구이다. 발생 가능성은 그 종이 공항에 나타나 충돌할 확률로, 심각도는 충돌 시 예상되는 피해 규모로 평가한다. 가능성도 높고 심각도도 큰 위험(예: 겨울철 서해안 공항의 기러기 떼)은 '즉시 강력 관리' 대상이 되고, 가능성은 높지만 심각도가 낮은 위험(작은 새)은 '일상 관리', 가능성은 낮지만 심각도가 큰 위험(드물게 나타나는 대형 맹금류)은 '대비 태세 유지' 대상으로 분류된다.

이러한 평가는 한 번으로 끝나지 않는다. 계절과 환경이 바뀌면 위험도 변하므로, 정기적으로 데이터를 갱신하며 평가를 반복해야 한다. 국제민간항공기구와 미국 연방항공청이 공항에 요구하는 야생동물 위험 평가도 본질적으로 이러한 반복적 위험 평가이며, 그 결과가 야생동물 위험 관리 계획으로 이어진다. 결국 '평가–계획–실행–점검'의 순환이 작동할 때 비로소 관리가 실효성을 가진다.

3. 4중 방어선: 통합 대응 모델

본 연구가 제안하는 통합 모델의 핵심은, 조류충돌 대응을 서로 다른 네 개의 '방어선'이 겹겹이 작동하는 다층 체계로 보는 것이다. 첫 번째 방어선은 '예방'으로, 공항 입지 선정과 환경 관리로 새가 애초에 모이지 않게 하는 가장 근본적인 단계이다. 두 번째 방어선은 '탐지와 회피'로, 레이더·AI·관측으로 위험을 미리 파악해 이착륙을 조정하거나 새를 쫓는 단계이다. 세 번째 방어선은 '내충격'으로, 충돌이 일어나도 항공기가 견디도록

하는 공학적 설계이다. 네 번째 방어선은 '비상 대응'으로, 충돌 후 조종사와 시스템이 피해를 최소화하는 단계이다.

이 네 방어선은 어느 하나가 뚫려도 다음 방어선이 막아 주도록 설계된다는 점에서 '심층 방어'의 원리를 따른다. US Airways 1549편은 첫째·둘째 방어선이 뚫렸지만(기러기 무리 흡입) 셋째 방어선(기체 구조)과 넷째 방어선(조종사 대응·구조 체계)이 작동해 인명을 지켰다. 반대로 제주항공 2216편은 여러 방어선이 연쇄적으로 무너지며 참사로 이어졌다. 따라서 어느 한 방어선에만 의존하지 않고 네 방어선을 모두 튼튼히 하는 것이 통합 관리의 핵심이다.

4. 항공기·공항 유형별 적용

통합 모델은 획일적으로 적용되지 않고, 항공기 유형과 공항 특성에 맞추어 조정되어야 한다. 고정익 위주의 대형 공항은 둘째 방어선(레이더·AI 탐지)과 셋째 방어선(엔진 내성)에 투자 여력이 크므로 이를 강화하고, 회전익이 많은 운항 환경에서는 셋째 방어선 중 조종석 창 강화와 넷째 방어선의 비상 절차에 집중해야 한다. 철새 경로 상의 해안·강변 공항(무안·간사이 등)은 첫째 방어선(입지·환경 관리)이 무엇보다 중요하고, 도심 공항은 주변 토지 이용 관리가 관건이다. 이처럼 '우리 공항은 어떤 위험에 노출되어 있고, 어떤 방어선이 약한가'를 진단해 그에 맞게 자원을 배분하는 것이 통합 모델의 실천 방법이다.

5. 함의

이 통합 모델을 한국에 적용하면, 우선순위는 비교적 분명해진다. 한국은 동아시아 철새 경로 상에 있어 첫째 방어선(입지·환경 관리)의 중요성이 매우 크지만, 이미 운영 중인 공항이 많으므로 주변 토지 이용 관리와 환경 개선에 집중해야 한다. 둘째 방어선에서는 미국·일본을 참고한 통합 데이터베이스와 탐지 체계 구축이 시급하다. 셋째 방어선에서는 회전익 조종석 창 기준 강화가, 넷째 방어선에서는 제주항공 사고가 드러낸 착륙 단계 비상 절차의 정립이 핵심 과제이다. 무엇보다, 위험 평가 결과를 실제 행동으로 옮기는 데이터 거버넌스와 안전 문화가 네가지 방어선 전체

를 떠받쳐야 한다.

HANSUNG UNIVERSITY

제 5 장 결 론

제 1 절 연구결과 요약

본 연구는 고정익 및 회전익 항공기에 대한 조류충돌의 현황·원인·주요 사례·대응 방안을 체계적으로 분석하였다. 한국·미국·일본의 사례를 중심으로 살펴본 결과 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

첫째, 조류충돌은 전 세계적으로 증가 추세이며 항공 안전의 만성적 위협으로 자리 잡았다. 미국은 1990년 약 1,800건에서 2023년 약 1만 9,700건으로 약 10배 늘었고, 일본은 매년 약 1,000건, 한국은 2019~2024년 상반기에 623건이 보고되었다. 34년간 미국에서만 경제적 손실이 약 14억 8천만 달러, 인명 피해가 357명에 달하며, 2024년 한국의 제주항공 2216편 사고(179명 사망)처럼 대형 참사가 여전히 발생하고 있어 보다 적극적인 대응이 시급하다.

둘째, 고정익과 회전익 항공기는 취약성과 피해 모습이 크게 다르다. 고정익은 이착륙 단계에 충돌의 약 97%가 몰리고 엔진 흡입·조종석 유리 파손이 주된 피해인 반면, 회전익은 모든 단계에서 위험하며 특히 순항 단계에서 2/3 이상이 발생한다. 민간 헬리콥터 PHI S-76 사고(8명 사망)와 호주 Bell 206 L-1 사고(조종사 사망)는 단 한 마리의 새가 헬리콥터에 치명적일 수 있음을 분명히 보여 준다.

셋째, 세 나라는 각기 다른 특성에 기반한 대응 체계를 발전시켜 왔다. 미국은 세계 최대 데이터베이스인 국가 야생동물 충돌 데이터베이스와 체계적인 공항 관리 프로그램, 미국 연방항공청-농무부 협력을 중심으로 한 과학·데이터 기반 대응이 강점이다. 일본은 음향 퇴치(Bird Sonic)·레이저·맹금류 활용 등 다양한 방법을 결합한 통합적 대응과 정보 공유 체계가 돋보인다. 한국은 제주항공 2216편 사고를 계기로 활주로 종단안전구역 구조물 개선, 표준 비상 대응 절차 마련, 통합 공개 데이터베이스 구축 등

제도 정비가 진행 중이다.

넷째, 효과적인 대응을 위해서는 공항 환경 관리, 기술적 대응, 제도적 개선, 조종사 교육, 국제 협력이 통합적으로 이루어져야 한다. 어떤 단일 방법도 조류충돌을 완전히 막을 수 없으며, 여러 방법을 결합한 통합 야생동물 관리가 가장 효과적임으로 확인되었다. 특히 비행장의 먹이·물·쉼터·번식지라는 유입 요인을 근본적으로 줄이는 것이 모든 대응의 출발점이며, 이를 잘 운영하는 공항에서는 충돌을 최대 60~80%까지 줄일 수 있다.

다섯째, 충돌을 막지 못한 경우를 대비한 항공기의 내충격 설계 또한 중요하다. 새가 연성체로 거동한다는 물리적 이해를 바탕으로 한 SPH-FEM 시뮬레이션과 실제 충돌 시험은 엔진·조종석 창·날개 앞전의 내충격 성능을 끌어올려 왔으며, 이는 US Airways 1549편이 양쪽 엔진 정지에도 안전하게 착수할 수 있었던 토대가 되었다. 다만 회전익 항공기의 조종석 창 인증 기준에는 여전히 공백이 있어 보완이 시급하다.

여섯째, 인공지능 기반 탐지·예측, 항공기 탑재형 회피 시스템, 그리고 도심 항공 교통체계와 드론 시대에 대비한 새로운 공역 관리가 미래의 핵심 과제로 떠오르고 있다. 이 모든 신기술의 토대는 신뢰할 수 있는 통합 데이터이며, 기후 변화가 새의 이동과 분포에 미치는 영향까지 고려한 장기적 관점이 요구된다.

제 2 절 정책적 제언

본 연구의 분석 결과를 토대로, 조류충돌 대응 정책은 시급성과 실현 가능성을 함께 고려하여 단기·중기·장기의 세 단계로 나누어 추진할 필요가 있다. 세 단계의 과제는 서로 독립적인 것이 아니라, 앞 단계에서 축적된 데이터와 제도적 기반 위에서 다음 단계가 작동하는 연속적 구조를 이룬다. 따라서 각 단계를 순차적으로 밟아 나가되, 후속 단계를 염두에 두고 초기 과제를 설계하는 것이 중요하다.

먼저 단기적으로는 제도의 사각지대를 메우고 현장의 대응 역량을 끌어

올리는 데 초점을 맞추어야 한다. 무엇보다 모든 항공기 유형에 대한 조류 충돌 보고를 의무화하되, 현장의 부담을 줄이기 위해 간소화된 전자 보고 시스템을 함께 도입하여 데이터의 양과 질을 동시에 확보해야 한다. 이렇게 축적된 데이터는 이후 모든 정책의 근거가 된다는 점에서 가장 우선순위가 높다. 아울러 그동안 상대적으로 소홀히 다루어진 소형 헬리콥터 조종석 창의 새 충돌 내성 인증 기준을 마련하고, 조종사 훈련 과정에 조류 충돌 대응 시뮬레이터 훈련을 필수적으로 포함하여 사고 발생 시의 초기 대응 능력을 강화할 필요가 있다. 또한 공항 반경 약 5마일(8km) 이내의 조류 유인 시설에 대해서는 환경 영향 평가를 의무화하여 위험 요인을 사전에 통제하고, 주요 공항을 대상으로 조류 탐지 레이더를 시범 도입해 그 효과를 검증함으로써 중기 단계의 전면 확대를 위한 근거를 축적해야 한다.

중기적으로는 단기 단계에서 확보한 데이터와 검증 결과를 바탕으로 대응 체계를 기술적·국제적으로 고도화하는 데 주력해야 한다. 조류충돌은 철새의 이동 경로를 따라 국경을 넘어 발생하는 초국가적 위험이므로, 다국간 협력 협정을 통해 국제 조류충돌 정보 통합 플랫폼을 구축하는 일이 핵심 과제가 된다. 국내적으로는 시범 운용을 거친 인공지능 기반 조류 탐지·예측 시스템을 대형 공항에 전면 도입하고, 철새 이동 경로 예보를 항공 교통 관리 체계와 통합하여 위험을 실시간으로 회피할 수 있는 운영 기반을 갖추어야 한다. 나아가 회전익 항공기 전용 조류충돌 대응 지침서를 발간하고 야생동물 위험 관리 계획의 수립을 의무화함으로써, 그동안 고정익 항공기 중심으로 편중되어 있던 대응 체계의 공백을 보완할 필요가 있다.

끝으로 장기적으로는 조류와 항공 운항이 공존할 수 있는 구조적 전환을 지향해야 한다. 이를 위해 조류의 이동과 서식 특성을 반영한 도시·지역 토지 이용 계획을 항공 안전의 관점에서 통합적으로 재설계하고, 공항 주변 환경 관리라는 소극적 대응을 넘어 위험의 근원을 관리하는 방향으로 나아가야 한다. 기술적으로는 항공기 탑재용 조류 탐지·회피 시스템을 개발·상용화하여 회피의 주체를 지상에서 항공기 자체로 확장하고, 엔진과

기체 구조의 충돌 내성을 획기적으로 높일 수 있는 신소재 기술을 개발하여 충돌이 발생하더라도 피해를 최소화할 수 있어야 한다. 이러한 노력이 궁극적으로 하나의 글로벌 조류 이동 예보 시스템으로 수렴될 때, 항공 안전은 사후적 대응에서 벗어나 위험을 미리 예측하고 통제하는 선제적 관리의 단계로 도약하게 될 것이다.

제 3 절 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구는 공개된 문헌과 통계에 기반한 이론적 분석에 주로 의존하여, 공항 현장 인터뷰나 원 데이터 심층 분석을 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 또한 한국·미국·일본을 주요 대상으로 삼아, 유럽·호주·중국 등 다른 선진 항공 안전 체계와의 비교 분석은 후속 연구로 남는다. 향후 과제로는 인공지능·빅데이터를 활용한 조류충돌 예측 모델 개발, 회전익 항공기 충돌 데이터의 체계적 수집·분석, 신소재의 충돌 내성 향상 효과에 대한 실험적 연구, 기후 변화가 새 이동과 충돌 위험에 미치는 영향 연구 등을 제안한다. 조류충돌은 항공 안전의 핵심 과제로서, 지속적인 연구와 기술 개발, 국제 협력을 통해 그 위험을 최소화하려는 노력이 계속되어야 한다.

본 연구는 공개된 문헌과 통계에 기반한 이론적 분석에 주로 의존하여, 공항 현장 인터뷰나 원 데이터 심층 분석을 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 또한 한국·미국·일본을 주요 대상으로 삼아, 유럽·호주·중국 등 다른 선진 항공 안전 체계와의 비교 분석은 후속 연구로 남는다. 향후 과제로는 인공지능·빅데이터를 활용한 조류충돌 예측 모델 개발, 회전익 항공기 충돌 데이터의 체계적 수집·분석, 신소재의 충돌 내성 향상 효과에 대한 실험적 연구, 기후 변화가 새 이동과 충돌 위험에 미치는 영향 연구 등을 제안한다. 조류충돌은 항공 안전의 핵심 과제로서, 지속적인 연구와 기술 개발, 국제 협력을 통해 그 위험을 최소화하려는 노력이 계속되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

국토교통부. (2020). 항공안전법 시행규칙. 세종: 국토교통부.

국토교통부 항공철도사고조사위원회. (2025). 제주항공 2216편 사고 예비조사보고서. 세종: 국토교통부.

김건웅, 정용만. (2015). 버드 스트라이크 예방을 위한 공항 야생동물 관리 방안에 관한 연구. 한국항공운항학회지, 23(4), 45-53.

김도현. (2018). 조류충돌(버드 스트라이크) 방지 기술 현황 및 발전 방향. 한국항공우주학회지, 46(8), 691-702.

박상준, 이재용. (2021). 회전익 항공기의 조류충돌 위험 분석 및 대응 방안 연구. 항공우주기술, 20(2), 15-28.

이현주. (2017). 조류충돌 예방을 위한 공항 환경 관리 방안 연구. 한국항공대학교 대학원 석사학위논문.

정유진, 최재훈. (2019). 항공기 조류충돌의 경제적 피해 분석 및 저감 방안. 한국항공운항학회지, 27(3), 77-85.

조현주. (2016). 공항 조류 위험 관리를 위한 법·제도 개선 방안 연구. 항공우주법학회지, 31(2), 203-228.

2. 국외문헌

Allan, J. R. (2002). The costs of bird strikes and bird strike prevention. In L. Clark (Ed.), Human Conflicts with Wildlife: Economic Considerations (pp. 147-153). USDA NWRC.

Blackwell, B. F., & Wright, S. E. (2006). Collisions of red-tailed hawks (Buteo jamaicensis), turkey vultures (Cathartes aura), and black vultures (Coragyps atratus) with aircraft. Journal of

Raptor Research, 40(1), 76–80.

Blackwell, B. F., DeVault, T. L., Seamans, T. W., Lima, S. L., Baumhardt, P., & Fernandez–Juricic, E. (2012). Exploiting avian vision with aircraft lighting to reduce bird strikes. Journal of Applied Ecology, 49, 758–766.

Cleary, E. C., & Dolbeer, R. A. (2005). Wildlife hazard management at airports: A manual for airport personnel (2nd ed.). Washington, D.C.: FAA.

DeVault, T. L., Belant, J. L., Blackwell, B. F., & Seamans, T. W. (2011). Interspecific variation in wildlife hazards to aircraft. Wildlife Society Bulletin, 35, 394–402.

DeVault, T. L., Blackwell, B. F., & Belant, J. L. (Eds.). (2013). Wildlife in airport environments: Preventing animal–aircraft collisions through science–based management. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Dolbeer, R. A. (2006). Height distribution of birds recorded by collisions with civil aircraft. Journal of Wildlife Management, 70(5), 1345–1350.

Dolbeer, R. A., Begier, M. J., Miller, P. R., Weller, J. R., & Anderson, A. L. (2021). Wildlife strikes to civil aircraft in the United States, 1990–2020 (DOT/FAA/TC–21/41). FAA.

El–Sayed, A. F. (2019). Bird strike in aviation: Statistics, analysis and management. Hoboken, NJ: Wiley–Blackwell.

European Aviation Safety Agency (EASA). (2009). Bird population trends and their impact on aviation safety 1999–2008. Cologne: EASA.

Federal Aviation Administration (FAA). (2005). Wildlife hazard management at airports. Washington, D.C.: FAA.

Federal Aviation Administration (FAA). (2010). AC 150/5220-25: Airport avian radar systems. Washington, D.C.: FAA.

Federal Aviation Administration (FAA). (2023). Special Airworthiness Information Bulletin (SAIB) AIR-21-17R1: Rotorcraft bird strikes. FAA.

Federal Aviation Administration (FAA). (2024). Wildlife strikes to civil aircraft in the United States 1990-2023. FAA National Wildlife Strike Database.

Gerringer, M. B., Lima, S. L., & DeVault, T. L. (2016). Evaluation of an avian radar system in a midwestern landscape. Wildlife Society Bulletin, 40(1), 150-159.

Heimbs, S. (2011). Computational methods for bird strike simulations: A review. Computers & Structures, 89(23-24), 2093-2112.

Japan Civil Aviation Bureau (JCAB). (2014). Bird strike control and reduction in JAPAN. Tokyo: MLIT.

Japan Transport Safety Board (JTSB). (2022). Aircraft accident investigation report: Skymark Airlines. Tokyo: JTSB.

Letellier, A., Bung, H., Galon, P., & Berthillier, M. (1997). Bird impact on fan blade analysis using SPH coupled with finite elements. ASME PVP, 351, 191-195.

Liu, J., & Li, Y. L. (2013). Numerical simulation of a rotary engine primary compressor impacted by bird. Chinese Journal of Aeronautics, 26(4), 926-934.

Marra, P. P., Dove, C. J., Dolbeer, R., Dahlan, N. F., Heacker, M.,

Whatton, J. F., Diggs, N. E., France, C., & Henkes, G. A. (2009). Migratory Canada geese cause crash of US Airways Flight 1549. Frontiers in Ecology and the Environment, 7(6), 297–301.

McKee, J., Shaw, P., Dekker, A., & Patrick, K. (2016). Approaches to wildlife management in aviation. In F. M. Angelici (Ed.), Problematic Wildlife (Ch. 22, pp. 465–488). Cham: Springer.

Metz, I. C., Ellerbroek, J., Mühlhausen, T., Kügler, D., & Hoekstra, J. M. (2020). The bird strike challenge. Aerospace, 7(3), 26.

National Transportation Safety Board (NTSB). (2010). Loss of thrust in both engines after encountering a flock of birds and subsequent ditching on the Hudson River (NTSB/AAR-10/03). Washington, D.C.: NTSB.

Phillips, A. C., Majumdar, S., Washburn, B. E., Mayer, D., Swearingin, R. M., Herricks, E. E., Guerrant, T. L., Beckerman, S. F., & Pullins, C. K. (2018). Efficacy of avian radar systems for tracking birds on the airfield of a large international airport. Wildlife Society Bulletin, 42(3), 467–477.

Sabziyan Varnousfaderani, E., & Shihab, S. A. M. (2025). Bird strikes in aviation: A systematic review for informing future directions. SSRN Working Paper.

Sodhi, N. S. (2002). Competition in the air: Birds versus aircraft. The Auk, 119(3), 587–595.

Thorpe, J. (2003). Fatalities and destroyed aircraft due to bird strikes, 1912–2002. Proc. 26th IBSC, Warsaw.

Transport Safety Board of Australia (ATSB). (2023). Final

investigation report: Bell 206 L-1, Cattai, NSW (AO-2022-033). Canberra: ATSB.

Travel and Tour World. (2025, November 15). JAL Flight JL646 bird strike: Emergency landing after departure from Kagoshima.

Wilbeck, J. S. (1978). Impact behavior of low strength projectiles (AFML-TR-77-134). Air Force Materials Laboratory.

HANSUNG UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on Bird Strike Countermeasures for Aircraft: Focusing on Cases in Korea, the United States, and Japan

Yeom Seoung Yoon

Major in Social Disaster and Safety Management

Dept. of Social Disaster and Safety

Graduate School of Public Administration

Hansung University

Bird strikes represent one of the most persistent and escalating threats to aviation safety worldwide. This study systematically analyzes the current state of bird strikes on fixed-wing and rotary-wing aircraft, focusing on cases and statistics from Korea, the United States, and Japan, in order to propose effective countermeasures tailored to each aircraft type.

The research employs a multi-method approach encompassing systematic literature review, statistical analysis, and case study analysis. Primary data sources include the FAA National Wildlife Strike Database (NWSD), reports published by the Japan Civil Aviation Bureau (JCAB), ICAO standards, NTSB and ATSB accident

investigation reports, the preliminary report of Korea's ARAIB, and peer-reviewed academic literature.

Key findings reveal that approximately 292,000 wildlife strikes were reported in the United States between 1990 and 2023. Japan reports approximately 1,000 bird strikes annually, while Korea reported 623 strikes between 2019 and mid-2024, including the catastrophic Jeju Air Flight 2216 accident (179 fatalities) at Muan International Airport in December 2024. Fixed-wing aircraft are most vulnerable during takeoff and landing, whereas rotary-wing aircraft face risks throughout all phases of flight due to their low-altitude profiles below 3,500 feet.

Beyond conventional countermeasures, this study dedicates particular attention to the factors that attract birds to aerodromes – food, water, shelter, and nesting sites – and to practical measures for reducing each of these attractants. The study concludes that no single countermeasure is sufficient, and an integrated wildlife management approach combining habitat modification, physical exclusion, active deterrence, and surveillance is essential, capable of reducing strikes by up to 60-80 percent at well-managed airports.

【Keywords】 Bird Strike, Wildlife Strike, Fixed-Wing Aircraft, Rotary-Wing Aircraft, Aviation Safety, Wildlife Management, Bird Attractants, Avian Radar, FAA, JCAB, ICAO, Integrated Wildlife Management