

석사학위논문

그리스 충전 공정의 기포 저감을
위한 원심 탈포 시간별 탈포율
산출 및 부피 변화 분석

2026년

한성대학교 지식서비스&컨설팅대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트팩토리컨설팅전공

김 이 현

석사학위논문
지도교수 윤주일

그리스 충전 공정의 기포 저감을
위한 원심 탈포 시간별 탈포율
산출 및 부피 변화 분석

Analysis of Deaeration Rate and Volumetric Change
According to Centrifugal Deaeration Time for Bubble
Reduction in Grease Filling Processes

2025년 12월 일

한성대학교 지식서비스&컨설팅대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트팩토리컨설팅전공

김 이 현

석사학위논문
지도교수 윤주일

그리스 충전 공정의 기포 저감을
위한 원심 탈포 시간별 탈포율
산출 및 부피 변화 분석

Analysis of Deaeration Rate and Volumetric Change
According to Centrifugal Deaeration Time for Bubble
Reduction in Grease Filling Processes

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2025년 12월 일

한성대학교 지식서비스&컨설팅대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트팩토리컨설팅전공

김 이 현

김이현의 공학 석사학위 논문을 인준함

2025년 12월 일

심사위원장 이선표 (인)

심사위원 정준 (인)

심사위원 윤주일 (인)

국 문 초 록

그리스 충전 공정 중 발생하는 기포 저감에 관한
연구 : 압력 및 탈포시간의 영향 분석

한성대학교 지식서비스&건설링대학원
스 마 트 용 합 컨 설 텅 학 과
스 마 트 팩 토 리 컨 설 텅 전 공
김 이 현

자동 그리스 주유기의 충전 공정 중 발생하는 기포는 토출 불균일, 내부 압력 저하 및 제품 신뢰성 저하의 주요 원인으로 작용한다. 특히 충전 과정에서 혼입된 공기는 공정 완료 후에도 그리스 내부에 남아 있어 장기적인 작동 안정성에 부정적인 영향을 미친다. 이에 본 연구는 그리스 충전 공정에서의 기포 저감을 목적으로, 원심 탈포 시간에 따른 탈포율 산출 및 부피 변화를 정량적으로 분석하고자 하였다.

본 연구에서는 물성이 다른 복수의 그리스를 대상으로 일정한 충전 조건에서 원심 탈포 공정을 적용하였다. 탈포 시간은 단계적으로 변화시켜 실험을 수행하였으며, 탈포 전·후 500 mL 비이커 내 그리스의 높이 및 부피 변화를 측정하여 탈포율을 정량적으로 산출하였다. 또한 촬영된 이미지를 기반으로 기포 분포 변화를 분석하여 탈포 거동을 보조적으로 검증하였다.

실험 결과, 원심 탈포 초기 구간에서는 탈포 시간 증가에 따라 탈포율이 유의미하게 증가하였으나, 일정 시간 이후에는 탈포율 증가가 둔화하는 포화 거동이 나타났다. 이는 초기 단계에서는 기포의 부상 및 이탈이 상대적으로 활발하게 이루어지지만, 임계 탈포 시간 이후에는 잔존 기포 제거가 물성적·공정적 한계에 의해 제한되기 때문으로 해석된다. 또한 그리스의 비중 및 점도 차이에 따라 탈포율과 부피 변화 경향에 차이가 발생함을 확인하였다.

본 연구 결과를 통해 원심 탈포 공정에서 탈포 시간의 과도한 증가는 탈포율 향상 측면에서 실질적인 개선 효과가 제한적임을 확인하였으며, 품질 안정성과 생산성을 동시에 고려한 최적 탈포 시간 범위를 제안하였다. 본 연구는 자동 그리스 주유기 충전 공정에서의 기포 저감 및 공정 조건 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

【주요어】 그리스 충전 공정, 탈포 공정, 탈포율, 그리스 비중, 임계 탈포 시간

목 차

I. 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	2
II. 이론적 배경	3
2.1 그리스 충전 공정	3
2.2 원심 탈포 공정	5
III. 실험 방법	7
3.1 실험 시편 및 장치	7
3.1.1 실험 대상 그리스 특성	7
3.1.2 그리스 충전 및 원심 탈포 실험 장치	9
3.2 실험 조건 및 절차	12
3.2.1 실험 설계 및 실험 조건	12
3.2.2 그리스 충전 및 원심 탈포 실험 절차	13
3.3 측정 및 분석 방법	15
3.3.1 탈포율 정의 및 산출 방법	15

IV. 실험 결과	16
4.1 그리스 비중별 실험 결과	16
4.1.1 저비중 그리스 실험 결과	16
4.1.2 중비중 그리스 실험 결과	20
4.1.3 고비중 그리스 실험 결과	25
4.2 탈포 시간에 따른 탈포 특성	31
4.2.1 탈포 시간에 따른 탈포율 변화	32
4.3 그리스 비중별에 따른 탈포 특성	34
4.3.1 그리스 비중별 부피 변화	34
V. 결론	36
참 고 문 헌	37
ABSTRACT	39

표 목 차

[표 3-1] 그리스 시료 비중 및 용도	8
[표 3-2] 충전 장비 사양	9
[표 3-3] 탈포 장비 사양	11
[표 3-4] 실험 조건 요약	12
[표 4-1] 저비중 탈포시간 조건별 탈포율	19
[표 4-2] 중비중 탈포시간 조건별 탈포율	24
[표 4-3] 고비중 탈포시간 조건별 탈포율	30
[표 4-4] 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 평균 탈포율	32
[표 4-5] 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 부피 변화	34

그림 목 차

[그림 2-1] 그리스 충전 공정 모식도	4
[그림 2-2] 원심 탈포 공정 모식도	6
[그림 3-1] 실험 대상 그리스 이미지	8
[그림 3-2] 그리스 충전 장비	10
[그림 3-3] 그리스 탈포 장비	11
[그림 3-4] 그리스 충전 공정	13
[그림 3-5] 그리스 탈포 공정	14
[그림 3-6] 충전 촬영 구성도	15
[그림 3-7] 탈포 촬영 구성도	15
[그림 4-1] 저비중 그리스 탈포율 그래프(1)	16
[그림 4-2] 저비중 그리스 탈포율 이미지(1)	16
[그림 4-3] 저비중 그리스 탈포율 그래프(2)	17
[그림 4-4] 저비중 그리스 탈포율 이미지(2)	17
[그림 4-5] 저비중 그리스 탈포율 그래프(3)	18
[그림 4-6] 저비중 그리스 탈포율 이미지(3)	18
[그림 4-7] 저비중 그리스 시간에 따른 탈포율 분포	20
[그림 4-8] 중비중 그리스 탈포율 그래프(1)	20
[그림 4-9] 중비중 그리스 탈포율 이미지(1)	21
[그림 4-10] 중비중 그리스 탈포율 그래프(2)	22
[그림 4-11] 중비중 그리스 탈포율 이미지(2)	22
[그림 4-12] 중비중 그리스 탈포율 그래프(3)	23
[그림 4-13] 중비중 그리스 탈포율 이미지(3)	23
[그림 4-14] 중비중 그리스 탈포율 분포	25
[그림 4-15] 고비중 그리스 탈포율 그래프(1)	26

[그림 4-16] 고비중 그리스 탈포율 이미지(1)	28
[그림 4-17] 고비중 그리스 탈포율 그래프(2)	27
[그림 4-18] 고비중 그리스 탈포율 이미지(2)	27
[그림 4-19] 고비중 그리스 탈포율 그래프(3)	29
[그림 4-20] 고비중 그리스 탈포율 이미지(3)	29
[그림 4-21] 고비중 그리스 탈포율 분포	31
[그림 4-22] 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 탈포율 변화	33

I. 서론

1.1 연구의 배경

자동 그리스 주유기는 산업 설비의 마찰부에 일정량의 윤활제를 지속적으로 공급함으로써 설비의 마모 저감과 수명 연장에 기여하는 핵심 장치이다. 이러한 자동 그리스 주유기의 성능과 신뢰성은 내부에 충전된 그리스의 물성 균일성과 주입 안정성에 크게 의존한다. 특히 충전 공정 중 혼입되는 기포는 그리스 내부 압축성 증가, 토출량 불균일, 초기 작동 지연 등의 문제를 유발할 수 있으며, 이는 장기적인 운전 안정성 저하로 이어질 가능성이 있다.

일반적인 그리스 충전 공정에서는 충전 과정에서 불가피하게 공기가 혼입되며, 충전 완료 이후에도 일부 기포가 그리스 내부에 잔존하는 경우가 많다. 이러한 잔존 기포를 제거하기 위해 산업 현장에서는 원심력을 이용한 탈포 공정이 적용되고 있으나, 탈포 시간 및 그리스 물성에 따른 기포 제거 특성에 대해서는 경험적 기준에 의존하는 경우가 대부분이다. 특히 그리스의 비중과 같은 물성 차이가 탈포 과정에 미치는 영향에 대해서는 체계적인 실험적 검증이 충분히 이루어지지 않은 실정이다.

기존 연구들은 주로 윤활 성능, 마찰·마모 특성 또는 그리스의 화학적 조성에 초점을 맞추고 있으며, 충전 이후 탈포 공정에서의 기포 제거 거동을 정량적으로 분석한 연구는 제한적이다. 또한 탈포 효과를 단일 조건 또는 단시간 비교에 국한하여 평가하는 경우가 많아, 탈포 시간이 증가함에 따라 나타나는 기포 제거 경향 및 한계 특성을 종합적으로 이해하는데에는 한계가 있다. 따라서 자동 그리스 주유기의 품질 안정성과 공정 신뢰성 확보를 위해서는 탈포 시간과 그리스 물성 변화에 따른 탈포 특성을 체계적으로 분석할 필요가 있다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 자동 그리스 주유기 충전 공정 이후 적용되는 원심 탈포 공정에서, 탈포 시간과 그리스 비중(물성)의 차이가 기포 제거 특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하는 데 있다. 이를 위해 비중(물성)이 상이한 저비중, 중비중, 고비중의 3종 그리스를 대상으로 탈포 시간을 단계적으로 변화시키며 원심 탈포 실험을 수행하였다.

각 실험 조건에 대해 동일 조건에서 반복 실험을 수행함으로써 탈포 과정에서 나타나는 기포 제거 경향의 일관성을 확인하고, 탈포 시간 증가에 따른 탈포율 변화 양상을 분석하였다. 특히 탈포 시간이 일정 수준 이상 증가할 경우 기포 제거 효과가 완화되거나 포화되는 현상에 주목하여, 탈포 공정의 물리적 한계 특성을 해석하고자 하였다.

궁극적으로 본 연구는 탈포 시간과 그리스 비중이라는 두 핵심 변수를 중심으로 원심 탈포 거동을 체계적으로 분석함으로써, 자동 그리스 주유기 충전 공정에서의 탈포 조건 설정에 대한 기초 자료를 제공하고, 공정 최적화 및 품질 안정성 확보에 기여하는 것을 목적으로 한다.

Ⅱ. 이론적 배경

2.1 그리스 충전 공정

자동 그리스 주유기의 충전 공정은 그리스 이송을 위한 압력 형성 단계, 유동 제어 단계, 용기와의 결합 단계, 그리고 실제 충전 단계로 구분될 수 있다. 이러한 공정의 단계별 구성과 흐름은 [그림 2-1]에 나타내었다. 먼저, [a] 단계에서는 그리스 저장 용기와 펌프를 연결하고 설정 압력 하에서 그리스를 이송하는 과정이 수행된다. 이 단계는 충전 공정 전반의 유동 조건을 결정하는 기초 단계로서, 적용 압력은 그리스의 점도 및 비중 특성과 밀접한 관련을 가지며, 이후 충전 과정에서의 유동 안정성에 영향을 미친다. 다음으로 [b] 단계에서는 노즐의 위치를 용기 중심축에 대해 고정함으로써 그리스 토출 방향과 유동 경로를 일정하게 유지한다. 노즐 위치의 안정성은 충전 시 그리스가 용기 내부로 유입되는 방식에 영향을 주며, 유입 과정에서 발생할 수 있는 난류나 비대칭 유동을 최소화하는 역할을 한다. [c] 단계에서는 노즐과 측정 용기를 결합하여 충진을 위한 구조적 구성을 완성한다.

마지막으로 [d] 단계에서는 설정된 압력 조건 하에서 그리스가 용기 내부로 주입된다. 이때 그리스의 유동 특성에 따라 내부 체적이 점진적으로 증가하며, 충전 과정 중 공기 혼입 가능성이 내재적으로 존재한다.

이와 같이 그리스 충전 공정은 단순한 충전 행위가 아니라, 압력 조건, 유동 제어, 구조적 안정성, 물성 특성이 단계적으로 작용하는 공정으로 구성되어 있으며, 각 단계에서의 공정 특성은 이후 탈포 거동을 해석하기 위한 기초적인 이해 요소로 작용한다.



[a]



[b]



[c]



[d]

[그림 2-1] 그리스 충전 공정 모식도

[a] 그리스 펌프 연결 및 압력 설정, [b] 노즐 위치 고정
 [c] 지그 설치 및 용기 결착, [d] 그리스 충전

2.2 원심 탈포 공정

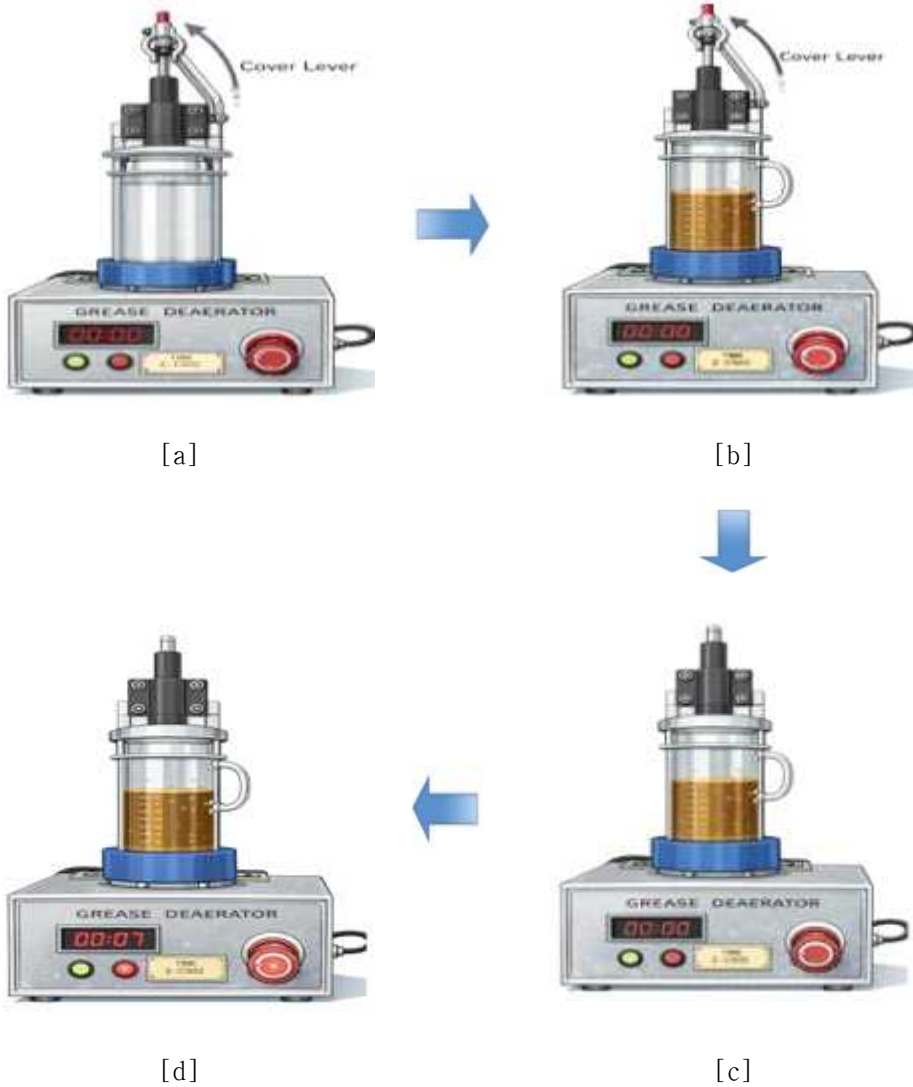
그리스 충전 이후 적용되는 원심 탈포 공정은 회전 운동에 의해 발생하는 원심력을 이용하여 그리스 내부에 혼입된 기포를 제거하는 공정으로, 회전 구동, 시편 고정, 원심력 작용, 그리고 기포 분리 거동의 단계로 구분될 수 있다. 이러한 공정의 개략적인 구성과 흐름은 [그림 2-2]에 나타내었다.

먼저 [a] 단계에서는 그리스가 충전된 용기를 원심 탈포 장치에 장착하고, 회전 운동을 발생시키기 위한 구동 조건을 형성한다. 이 단계는 탈포 공정 전반에서 작용하는 원심력의 크기와 방향을 결정하는 기초 단계로서, 이후 기포 이동 거동에 직접적인 영향을 미친다.

다음으로 [b] 단계에서는 회전 중 시편의 위치가 안정적으로 유지되도록 고정 구조를 형성한다. 시편 고정의 안정성은 회전 불균형에 따른 진동이나 비대칭 원심력 발생을 방지하며, 원심 탈포 과정에서 재현성 있는 거동을 확보하는 데 중요한 역할을 한다.

[c] 단계에서는 회전 운동에 의해 그리스 내부에 원심력이 작용하며, 밀도 차이에 의해 기포와 그리스 사이에 상대적인 이동이 유도된다.

마지막으로 [d] 단계에서는 이러한 원심력 작용이 지속되면서 그리스 내부에 분포하던 기포가 점진적으로 분리·집적되는 거동을 보인다. 이때 기포 제거 효율은 그리스의 점도 및 비중과 같은 물성 특성에 의해 영향을 받으며, 일정 조건 이상에서는 기포 이동이 제한되는 특성이 나타날 수 있다. 이와 같이 원심 탈포 공정은 단순한 회전 동작이 아니라, 원심력의 형성, 시편 고정 안정성, 물성 차이에 따른 상대 이동, 그리고 기포 분리 거동이 단계적으로 작용하는 공정으로 이해될 수 있으며, 이러한 이론적 고찰은 탈포 시간에 따른 기포 제거 거동을 해석하기 위한 기초적 배경을 제공한다.



[그림 2-2] 원심 탈포 공정 모식도

[a] 탈포기 커버 레버 해제, [b] 비이커 고정 지그 결착
 [c] 탈포기 커버 레버 고정, [d] 탈포기 작동

Ⅲ. 실험 방법

3.1 실험 시편 및 장치

본 장에서는 자동 그리스 충전 공정 장비와 원심 탈포 공정에 사용된 실험 시편과 장치의 구성에 대해 기술한다. 실험은 동일한 충전 및 탈포 조건 하에서 그리스 종류에 따른 탈포 거동을 비교·분석하기 위한 목적으로 수행하였다. .

3.1.1 실험 대상 그리스 특성

본 연구에서는 자동 그리스 주유기 충전 공정에서 사용되는 그리스의 비중(물성) 차이가 원심 탈포 공정에서의 기포 제거 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 서로 다른 비중(물성)을 갖는 3종의 그리스를 실험 대상 시료로 선정하였다. 시료는 실제 산업 현장에서 적용 사례가 있는 제품을 기준으로 하였다.

[표 3-1]은 본 연구에 사용된 그리스 시편의 비중 특성 및 적용 용도를 정리한 것이다. 실험 시편으로는 S2 V220 00, BE 71-461(P), XS 80의 총 3종 그리스를 선정하였으며, 이들은 0.899(저비중), 0.926(중비중), 1.051(고비중)의 비중 값을 갖는다. 또한 각 그리스는 적용 분야 및 인증 기준에서 차이를 보인다. S2 V220 00은 베어링 및 기어용 산업용 그리스로서 한국표준협회의 인증을 받은 제품이며, BE 71-461(P)는 고속 장비에 적용되는 산업용 그리스로 동일 기관의 인증을 획득하였다. XS 80은 식품용 설비에 적용되는 그리스로서 NSF 인증을 만족하는 제품이다.

이러한 구성은 실제 산업 현장에서 사용되는 다양한 그리스 조건을 반영하기 위한 것이다.

[표 3-1] 그리스 시편 비중 및 용도

구분	저비중	중비중	고비중
그리스명	S2 V220 00	BE 71-461(P)	XS 80
비중(물성)	0.899	0.926	1.051
인증번호	제2464호	제6503호	147140
인증기관	한국표준협회	한국표준협회	NSF
용도	베어링, 기어	고속용 장비	식품용 설비

실험에 사용된 그리스는 외부 오염을 방지하기 위해 밀폐 용기에 보관하였으며, 실험 전 동일한 환경 조건에서 안정화 과정을 거친 후 사용하였다. 실험 시에는 동일한 비이커 용기 및 충전 절차를 적용하여 시료 간 조건 차이를 최소화하였다.

[그림 3-1]은 본 연구에서 사용된 실험 대상 그리스 시편의 형상 및 표기 특성을 시각적으로 제시한 것이다. 각 시편은 동일한 용량 단위로 준비되었으며, 이후 원심 탈포 공정 실험에서 동일한 조건 하에 적용되었다. 이를 통해 그리스 종류에 따른 탈포 거동을 비교할 수 있도록 실험 조건을 구성하였다.



[a]



[b]



[c]

[그림 3-1] 실험 대상 그리스 이미지

[a] S2 V220 00그리스, [b] BE 71-461(P)그리스, [c] XS 80그리스

3.1.2 그리스 충전 및 원심 탈포 실험 장치

본 연구에서는 자동 그리스 주유기의 충전 공정을 모사하기 위하여 전용 그리스 충전 장비를 사용하였다. 해당 장비는 실제 산업 현장에서 사용되는 자동 그리스 주유기 충전 공정과 유사한 조건을 구현할 수 있도록 구성되었으며, 실험 시편의 충전 조건을 일정하게 유지하기 위한 목적으로 활용되었다.

충전 장비는 AC 100-120 V, 60 Hz 전원을 사용하며, 소비전력은 0.8 kW이다. 공기압은 2-5 bar 범위에서 공급되도록 설계되어 있으며, 장비의 본체 크기는 850(D) × 600(W) × 1,500(H) mm이다. 본 연구에서는 동일한 장비 사양 및 설정 조건 하에서 모든 실험을 수행하여 장비 요인에 따른 변수를 최소화하였다. 장비의 사양은 [표 3-2]에 정리하였다.

[표 3-2] 충전 장비 사양

구분	사양
전원	AC 100V - 120V 1P 60Hz
소비전력	0.8Kw
공기압원	2bar - 5bar
본체크기	850(D)*600(W)*1500(H)

[그림 3-2]는 본 연구에 사용된 그리스 충전 장비를 나타낸 것이다. 장비는 크게 충전부, 구동부 및 제어부로 구성된다. 충전부에는 그리스가 이송되는 노즐 및 실린더 구조가 포함되어 있으며, 해당 부위는 그리스의 주입이 이루어지는 주요 영역이다. 하부에는 충전 대상 시편을 고정하기 위한 지그가 설치되어 있어, 실험 중 시편 위치가 일정하게 유지되도록 하였다. 제어부는 충전 조건의 설정 및 작동 제어를 위한 패널로 구성되어 있으며, 실험 조건을 반복적으로 적용할 수 있도록 설계되었다.



[그림 3-2] 그리스 충전 장비

본 연구에서는 자동 그리스 주유기의 충전 공정 이후 적용되는 탈포 공정을 구현하기 위하여 원심 탈포 장치를 사용하였다. 해당 장치는 회전 운동에 의해 유체 내부에 혼입된 기포를 제거하는 구조로 설계되었다.

원심 탈포 장치는 AC 100 V 전원을 사용하며, 구동부 제어를 위해 24 VDC 모터 전원이 적용되었다. 비이커 고정 지그는 500 mL 용량의 비이커를 장착할 수 있도록 구성되었다.

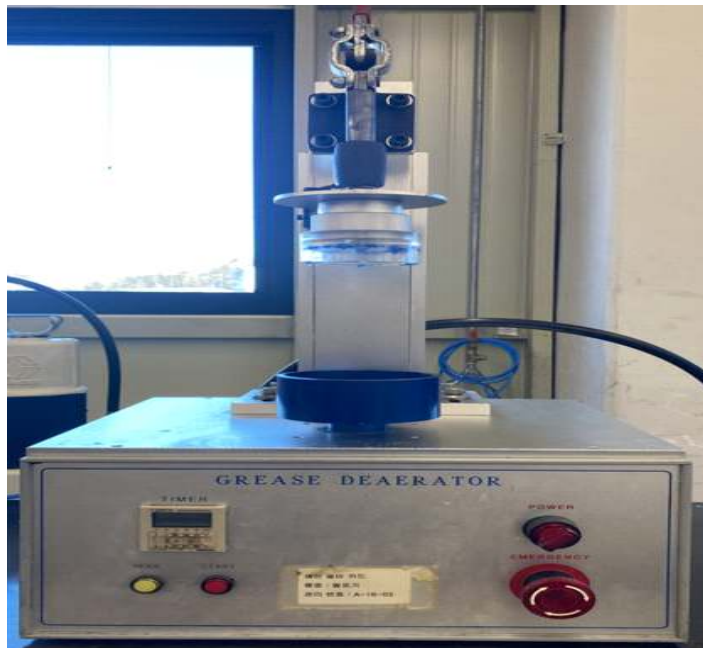
장치의 본체 크기는 280(D)×420(W)×560(H)mm이다. 탈포 장치의 주요 사양은 [표 3-3]에 정리하였다.

[표 3-3] 탈포 장비 사양

구분	사양
전원	AC 100V
모터 VLOT	24VDC
지그용량	60ml, 125ml, 250ml, 500ml
본체크기	280(D)*420(W)*560(H)

[그림 3-3]은 본 연구에 사용된 원심 탈포 장치의 전체 구성을 나타낸 것이다. 장치 상부에는 회전축 및 커버 레버가 설치되어 있으며, 커버 레버는 탈포 대상 비이커의 상부를 고정하기 위한 구조로 구성되어 있다.

중앙부에는 비이커가 장착되는 고정 지그가 위치하며, 탈포 공정 동안 시편의 위치를 일정하게 유지하도록 설계되었다. 장치 측면에는 전원 및 구동부 연결을 위한 케이블이 배치되어 있으며, 전면부에는 탈포 시간 설정 및 장치 작동을 제어하기 위한 조작 패널이 설치되어 있다.



[그림 3-3] 그리스 탈포 장비

3.2 실험 조건 및 절차

3.2.1 실험 설계 및 실험 조건

본 실험은 자동 그리스 주유기의 충전 공정에서 발생하는 기포를 정량적으로 평가하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 그리스 물성, 충전 압력 및 원심 탈포 시간을 주요 실험 조건으로 설정하고, 각 조건 조합에 따른 탈포 거동을 비교·분석하고자 하였다.

그리스 물성 조건으로는 비중이 상이한 3종의 그리스를 실험 대상으로 선정하였다. 사용된 그리스의 비중은 각각 0.899, 0.926, 1.051이며, 각 시료는 동일한 충전 절차를 통해 준비하였다. 충전 압력은 실제 생산 공정을 고려하여 3.0 bar의 단일 조건으로 고정하여 적용하였다.

원심 탈포 시간은 탈포 공정에서의 기포 제거 거동을 단계적으로 관찰하기 위하여 7 s, 10 s, 15 s, 20 s, 30 s, 60 s, 90 s의 7수준으로 설정하였다. 각 탈포 시간 조건은 동일한 충전 조건 하에서 적용되었으며, 시간 조건 외의 모든 변수는 일정하게 유지하였다.

본 연구에서는 [표 3-4]에 제시된 실험 조건 조합에 따라 각 조건별로 3회의 반복 실험을 수행하였으며, 이를 통해 총 63개의 실험 데이터를 확보하였다. 수집된 데이터는 원심 탈포 시간 변화에 따른 탈포율 및 부피 변화의 정량적 분석에 활용하였다.

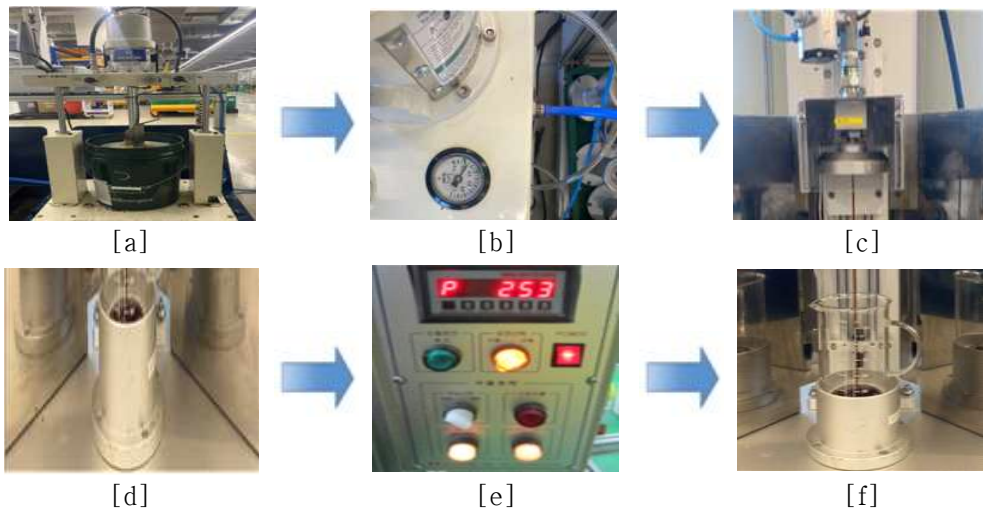
[표 3-4] 실험 조건 요약

그리스명	비중	압력	탈포 시간
S2 V220 00	0.899	3bar	7s, 10s, 15s, 20s, 30s, 60s 90s
BE 71-461(P)	0.926	3bar	7s, 10s, 15s, 20s, 30s, 60s 90s
XS 80	1.051	3bar	7s, 10s, 15s, 20s, 30s, 60s 90s

3.2.2 그리스 충전 및 원심 탈포 실험 절차

본 절에서는 자동 그리스 주유기의 충전 공정을 모사하기 위해 수행된 그리스 충전 절차 및 충전이 완료된 그리스 시료를 대상으로 수행된 원심 탈포 실험 절차를 기술한다. 충전 공정은 [a]단계에서는 그리스 충전 장비와 그리스 저장 용기를 연결하여 충진을 위한 기본 구성을 형성한다.

[b]단계에서는 압력 조절 장치를 통해 충전 압력을 설정한다. 본 공정에서의 압력 설정은 그리스의 유동 특성을 안정적으로 유지하기 위한 조건이다. 다음으로 [c]단계에서는 노즐의 위치를 고정하여 그리스가 용기 내부로 일정한 방향과 경로를 따라 유입되도록 한다. [d]단계에서는 충전 대상 용기를 지그에 장착하여 공정 중 위치 변동이 발생하지 않도록 한다. [그림 3-4]는 본 실험에서 적용한 그리스 충전 공정의 단계별 구성을 나타낸 것이다.

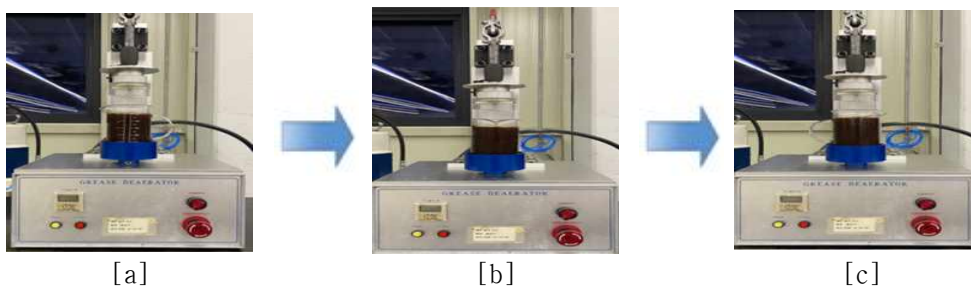


[그림 3-4] 그리스 충전 공정

- [a] 그리스 시료 충전 장비 연결, [b] 압력 설정 (3bar)
- [c] 노즐 위치 조정, [d] 비이커 고정 지그 설치, [e]주입량 설정
- [f] 충전 시작

원심 탈포 공정은 시편 장착, 시편 고정, 그리고 탈포 수행 단계로 구성되며, 원심력 작용을 통해 그리스 내부에 혼입된 기포의 이동 및 분리를 유도하는 것을 목적으로 한다.

먼저 [a]단계에서는 그리스가 충전된 비이커를 원심 탈포 장치에 장착하였다. 이 단계는 탈포 공정 수행을 위한 기본적인 시편 배치를 형성하는 과정이다. [b]단계에서는 커버 레버를 이용하여 시편의 상부를 고정하였다. 시편 고정은 탈포 과정 중 발생할 수 있는 위치 편차나 외부 진동의 영향을 최소화하기 위한 조치로, 원심 탈포 공정의 안정성을 확보하는 데 목적이 있다. [c] 단계에서는 장치 중앙부에 시편이 위치하도록 정렬 상태를 확인한 후 원심 탈포 공정을 수행하였다. 탈포 시간은 사전에 설정된 조건에 따라 제어부를 통해 설정되었다. 원심 탈포 공정은 [그림 3-5]에 나타난 단계적 구성에 따라 수행되었다.



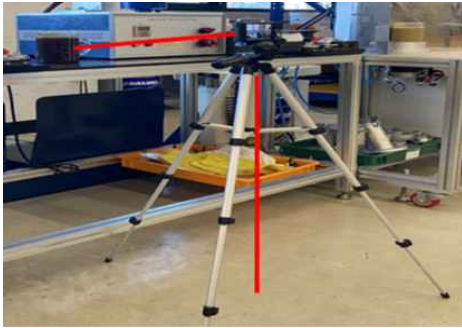
[그림 3-5] 그리스 탈포 공정

[a] 비이커 장착, [b] 커버레버 고정, [c] 탈포 시작

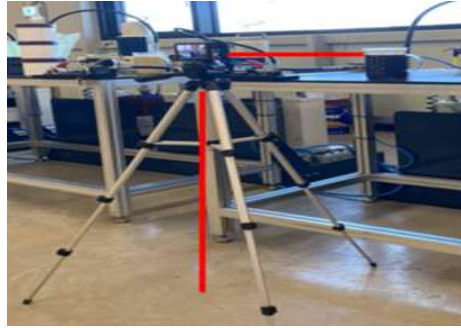
본 실험에서는 충전 직후 및 원심 탈포 공정 후 비이커 내 그리스의 유효 액면 높이 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, [그림 3-6] 및 [그림 3-7]에 나타난 바와 같이 고정식 카메라 촬영 시스템을 구축하였다.

카메라는 촬영 중 위치 변동에 따른 오차를 방지하기 위하여 삼각대에

견고하게 고정하였으며, 설치 조건은 바닥 기준 높이 80 cm, 카메라와 비이커 간 거리 35 cm로 설정하였으며, 이는 비이커 전체 높이(12.8 cm) 및 눈금 영역이 프레임 왜곡 없이 포함되도록 고려한 값이다. 또한 원근 왜곡을 최소화하기 위해 카메라 렌즈 중심축이 비이커 눈금면의 중앙을 향하도록 조정하였고, 카메라의 좌·우 기울어짐 및 상·하 각도를 조절하여 비이커의 축과 카메라의 광축이 최대한 직교하도록 설정하였다.



[그림 3-6] 충전 촬영 구성도



[그림 3-7] 탈포 촬영 구성도

3.3 측정 및 분석 방법

3.3.1 탈포율 정의 및 산출 방법

본 연구에서 탈포율은 탈포 전·후 동일 용적의 비이커 내 그리스의 부피 변화를 기반으로 산출되며, 이는 기포 제거에 따른 유효 체적 감소를 반영하는 지표이다. 탈포율은 (1)과 같이 정의 된다.

$$\text{탈포율}(\%) = \frac{H_o - H_f}{H_o} \times 100 \quad \text{-----}(1)$$

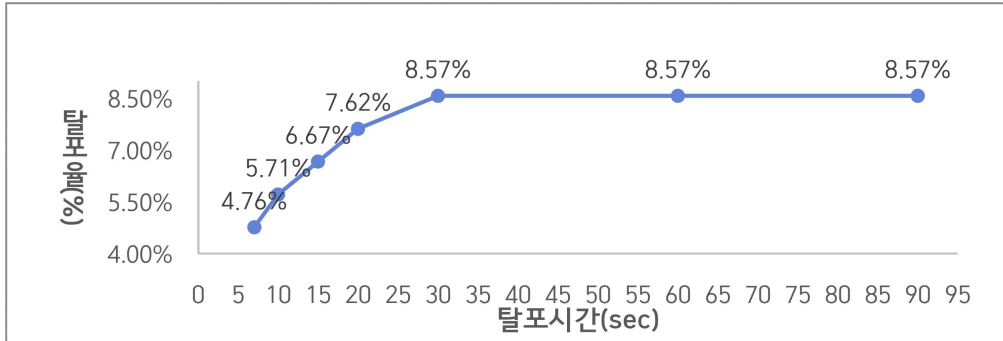
여기서, H_o 는 탈포 공정 이전 비이커 내 그리스의 초기 부피(ml), H_f 는 탈포 공정 완료 후의 그리스 부피(ml)를 의미한다. 본 연구에서 제안한 탈포율 정의는 실험 재현성과 측정 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 합리적인 정량 지표라 할 수 있다.

IV. 실험 결과

4.1 그리스 비중별 실험 결과

4.1.1 저비중 그리스 실험 결과

4.1.1.1 저비중 그리스 실험 결과(1)



[그림 4-1] 저비중 그리스 탈포율 그래프(1)



[a] 0초/525ml



[b] 7초/500ml



[c] 10초/495ml



[d] 15초/490ml



[e] 20초/485ml



[f] 30초/480ml



[g] 60초/480ml

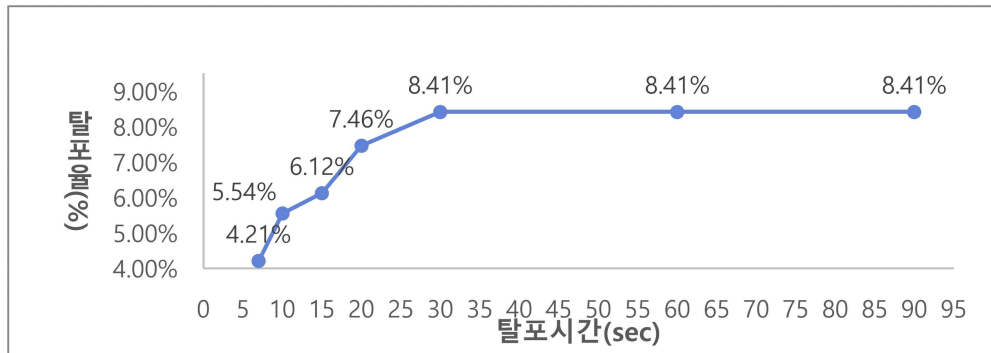


[h] 90초/480ml

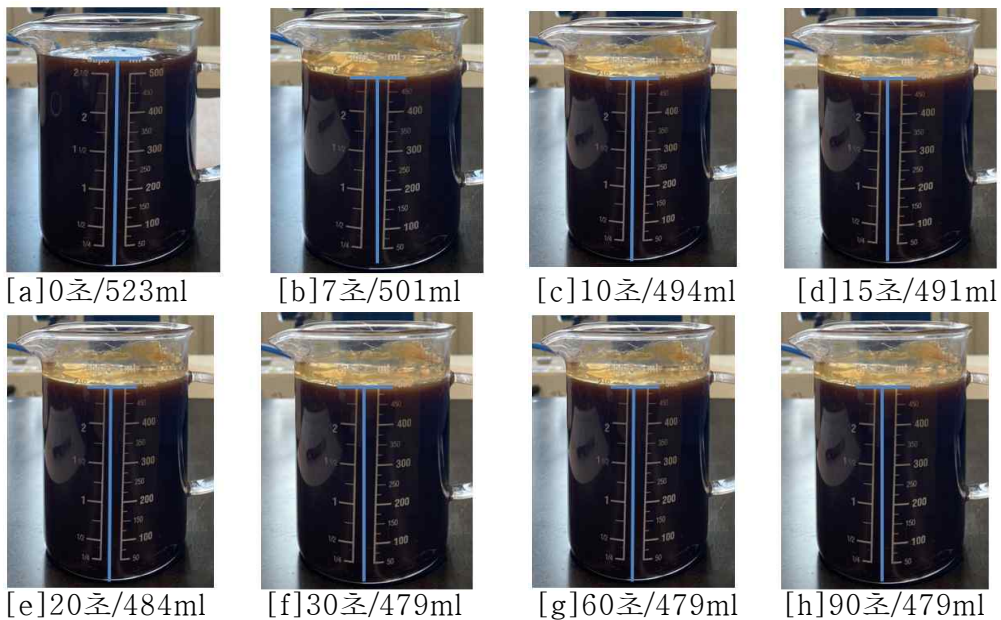
[그림 4-2] 저비중 그리스 탈포율 이미지(1)

[그림 4-1]은 3회 반복 실험 중 1차 실험 결과로, 저비중 그리스의 탈포 시간 증가에 따른 탈포율 변화를 나타낸 것이다. 탈포율은 7s에서 4.76%, 30s 이후에는 약 8.57% 수준으로 나타났다. [그림 4-2]는 동일 실험에서 탈포 시간별 시편의 부피 변화를 나타낸 것이다. 탈포 시간에 따라 부피는 525 mL에서 약 480 mL 수준으로 감소하였다.

4.1.1.2 저비중 그리스 실험 결과(2)



[그림 4-3] 저비중 그리스 탈포율 그래프(2)

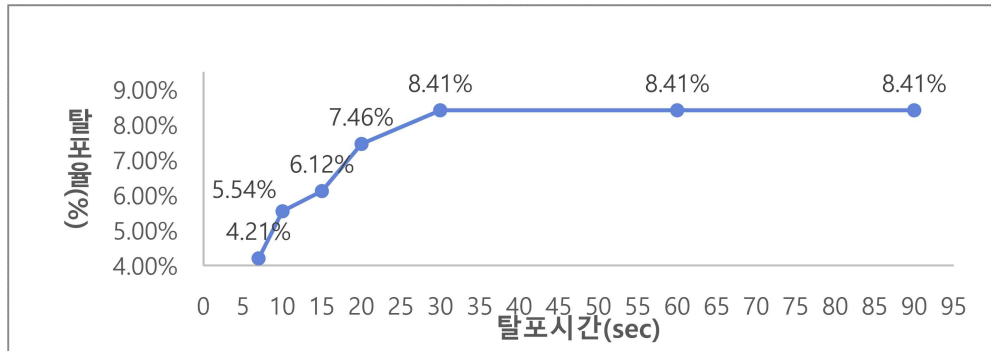


[그림 4-4] 저비중 그리스 탈포율 이미지(2)

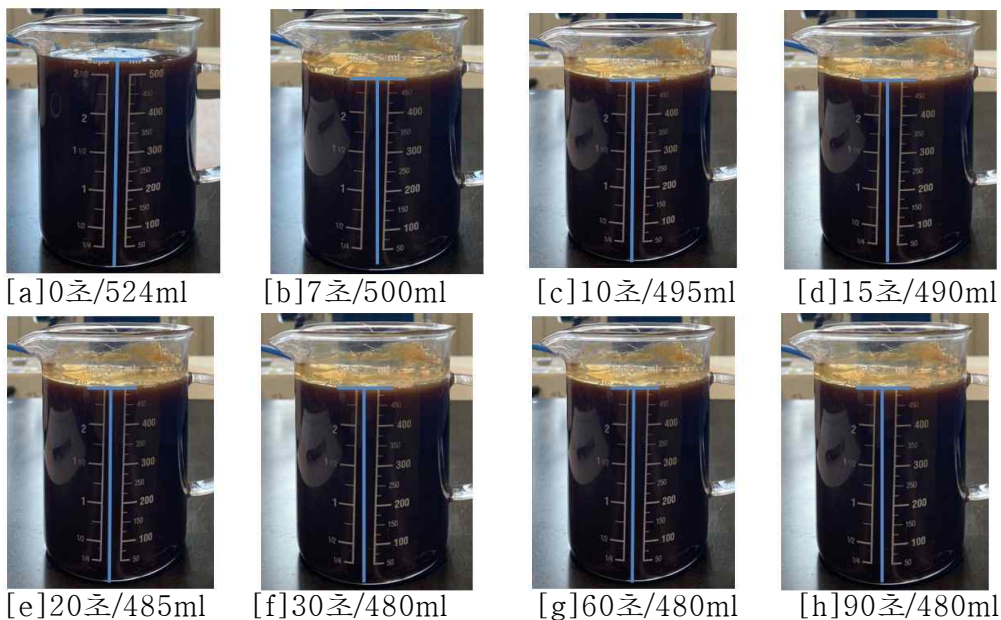
[그림 4-3]은 3회 반복 실험 중 2차 실험 결과로, 탈포율은 7s에서 4.76 %, 30s 이후에는 약 8.57 % 수준으로 나타났다.

[그림 4-4]는 동일 실험에서 탈포 시간별 시편의 부피 변화를 나타낸 것이다. 탈포 시간 증가에 따라 부피는 525 mL에서 약 480 mL 수준으로 감소하였다.

4.1.1.3 저비중 그리스 실험 결과(3)



[그림 4-5] 저비중 그리스 탈포율 그래프(3)



[그림 4-6] 저비중 그리스 탈포율 이미지(3)

[그림 4-5]는 3회 반복 실험 중 3차 실험 결과로, 탈포 시간 7s에서 5.54 %로 나타났으며, 30s 이상에서는 탈포율이 약 8.41 % 수준으로 유지되었다.

[그림 4-6]은 동일 실험에서 탈포 시간 조건별 시편의 부피 변화를 시각적으로 제시한 것이다. 초기 524 mL에서 탈포 시간 증가에 따라 20 s에서는 약 485 mL, 30 s 이후에는 약 480 mL로 감소하였다.

4.1.1.4 저비중 그리스 실험 결과(3회 반복 실험)

[표 4-1] 저비중 탈포시간 조건별 탈포율

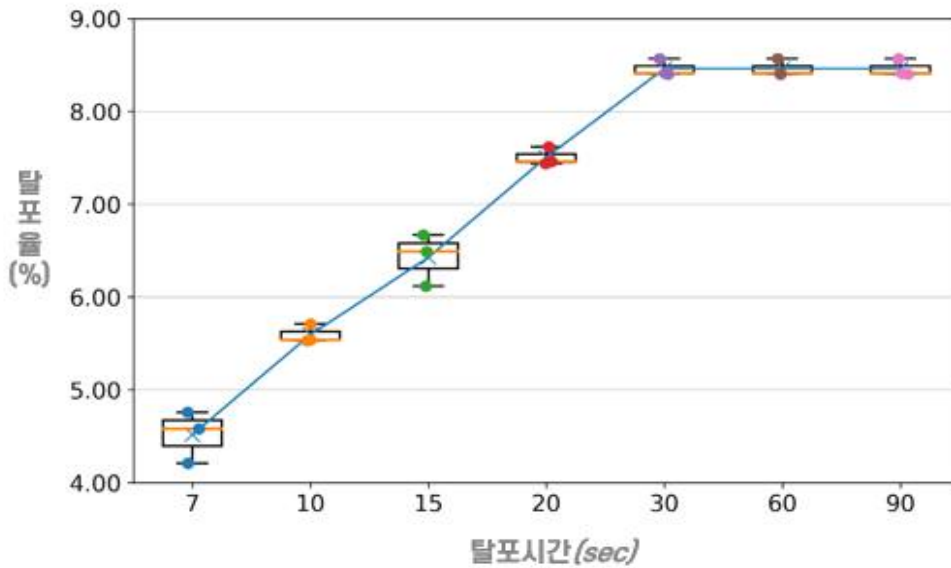
탈포시간(s)	실험1	실험2	실험3	평균
7	4.76%	4.21%	4.58%	4.52%
10	5.71%	5.54%	5.53%	5.60%
15	6.67%	6.12%	6.49%	6.42%
20	7.62%	7.46%	7.44%	7.51%
30	8.57%	8.41%	8.40%	8.46%
60	8.57%	8.41%	8.40%	8.46%
90	8.57%	8.41%	8.40%	8.46%

[표 4-1]은 저비중 그리스를 대상으로 동일 조건에서 3회 반복 수행한 탈포 실험 결과를 탈포 시간 조건별로 정리한 것이다. 탈포 시간 7 s에서는 평균 탈포율이 4.52 %로 나타났으며, 10 s와 15 s에서는 각각 5.60 %, 6.42 %로 증가하였다. 이후 20 s에서는 평균 7.51 %, 30 s 이상에서는 8.46 % 수준으로 나타나, 탈포 시간 증가에 따라 평균 탈포율이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다.

탈포 시간 30 s 이후에서는 평균 탈포율의 증가 폭이 미미하게 나타나, 본 실험 조건에서는 약 30 s 전후에서 탈포 효과가 더 이상 유의하게 증가하지 않는 임계 탈포 시간의 존재를 확인할 수 있었다.

[그림 4-7]은 [표 4-1]에 제시된 3회 반복 실험 결과를 종합하여, 탈포 시간에 따른 탈포율 분포를 시각적으로 나타낸 것이다. 탈포 시간 증

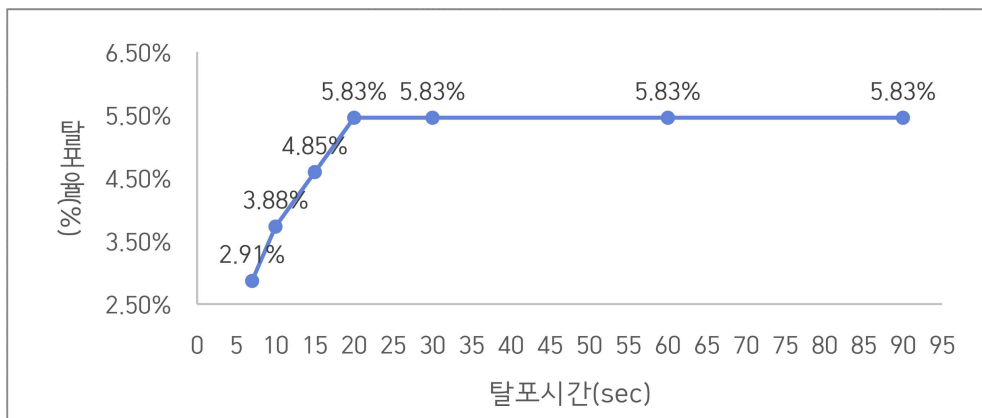
가에 따라 탈포율 분포의 중앙값이 상승하는 경향을 보였으며, 30 s 이후 구간에서는 분포 범위의 변화가 상대적으로 제한적으로 나타났다.



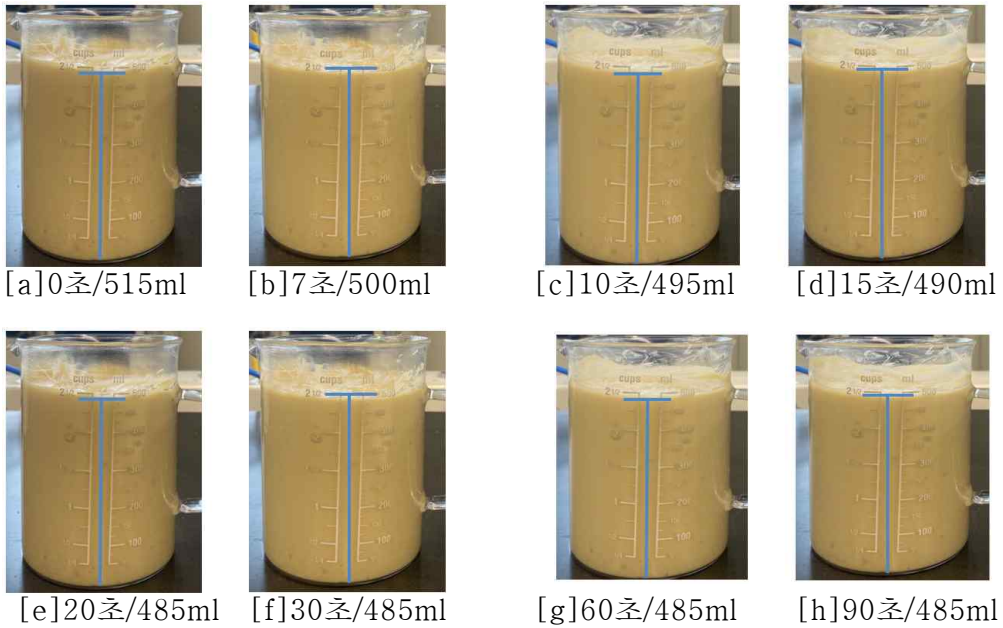
[그림 4-7] 저비중 그리스 시간에 따른 탈포율 분포

4.1.2 중비중 그리스 실험 결과

4.1.2.1 중비중 그리스 실험 결과(1)



[그림 4-8] 중비중 그리스 탈포율 그래프(1)



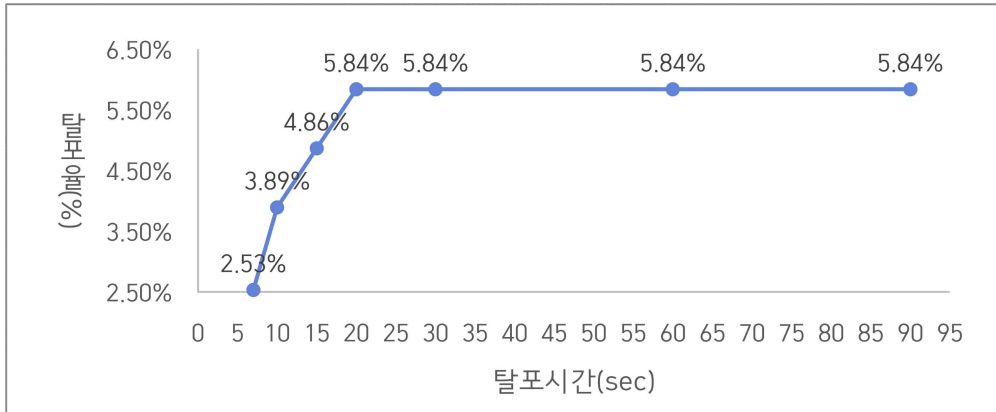
[그림 4-9] 중비중 그리스 탈포울 이미지(1)

[그림 4-8]은 3회 반복 실험 중 1차 실험에서 중비중 그리스를 대상으로 탈포 시간에 따른 탈포율 변화를 나타낸 것이다. 탈포 시간 7 s에서 탈포율은 약 2.91%로 나타났으며, 10 s와 15 s에서는 각각 3.88%, 4.85%로 증가하였다. 이후 20 s 이상에서는 탈포율이 약 5.83% 수준으로 유지되었다.

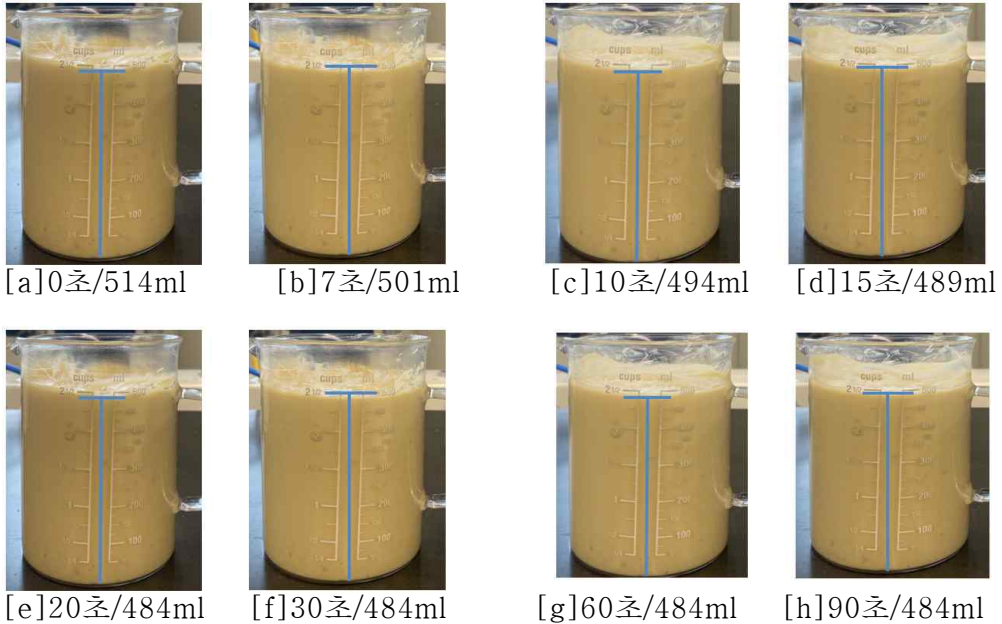
[그림 4-9]은 동일한 1차 실험에서 탈포 시간 조건별 시편의 부피 변화를 시각적으로 제시한 것이다. 초기 515 mL에서 탈포 시간 증가에 따라 15 s에서는 약 490 mL, 20 s 이후에는 약 485 mL로 감소하는 양상이 관찰되었다.

4.1.2.2 중비중 그리스 실험 결과(2)

[그림 4-10]은 3회 반복 실험 중 2차 실험에서 중비중 그리스를 대상으로 탈포 시간에 따른 탈포율 변화를 나타낸 것이다



[그림 4-10] 중비중 그리스 탈포율 그래프(2)

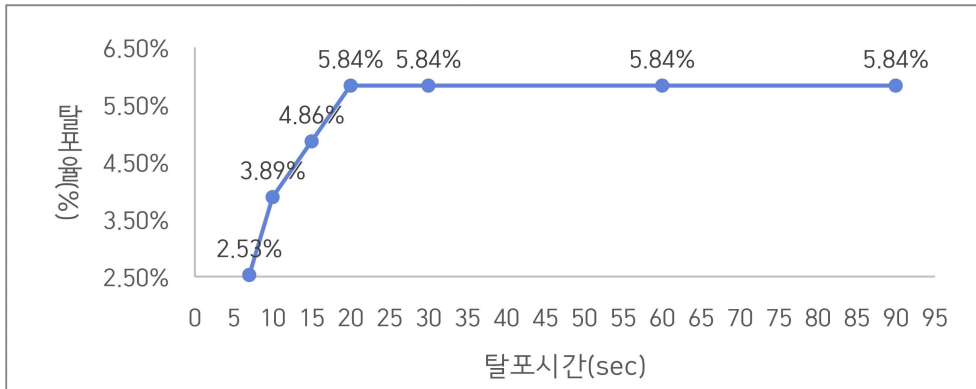


[그림 4-11] 중비중 그리스 탈포율 이미지(2)

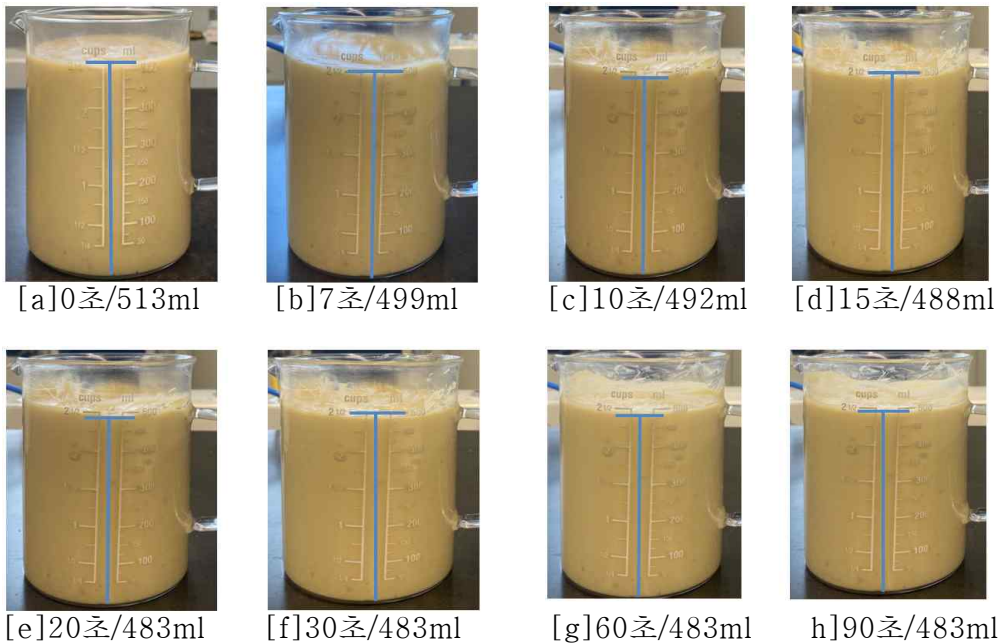
탈포 시간 7s에서 탈포율은 약 2.53%로 나타났으며, 10s와 15s에서는 각각 3.89%, 4.86%로 증가하였다. 이후 20s 이상에서는 탈포율이 약 5.84% 수준으로 유지되었다. [그림 4-11]은 동일한 2차 실험에서 탈포 시간 조건별 시편의 부피 변화를 시각적으로 제시한 것이다. 초기 514

mL에서 탈포 시간 증가에 따라 15s에서는 약 489 mL, 20s 이후에는 약 484 mL로 감소하는 양상이 관찰되었다.

4.1.2.3 중비중 그리스 실험 결과(3)



[그림 4-12] 중비중 그리스 탈포율 그래프(3)



[

[그림 4-13] 중비중 그리스 탈포율 이미지(3)

[그림 4-12]는 3회 반복 실험 중 3차 실험에서 중비중 그리스를 대상으

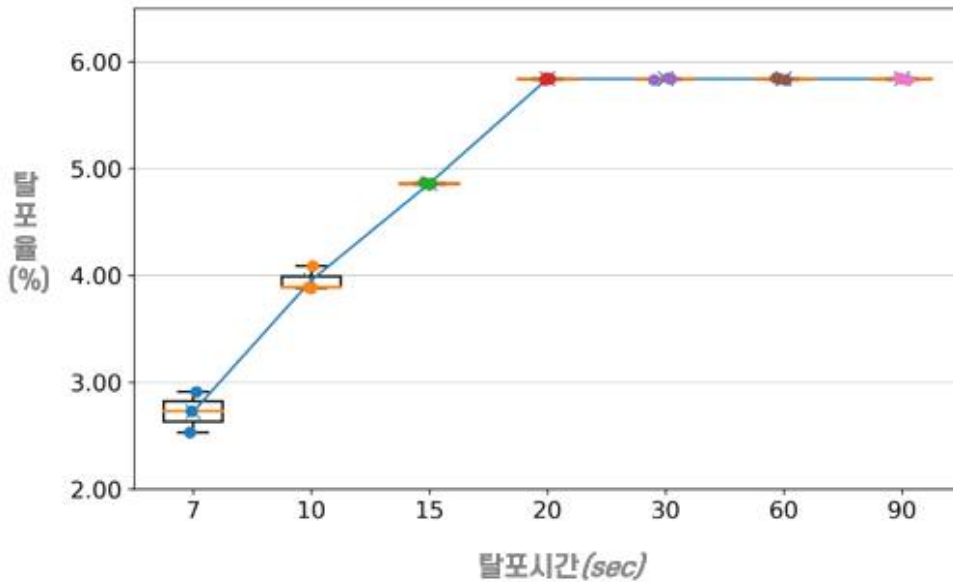
로 탈포 시간에 따른 탈포율 변화를 나타낸 것이다. 탈포 시간 7s에서 탈포율은 약 2.57%로 나타났으며, 10s와 15s에서는 각각 3.89%, 4.86%로 증가하였다. 이후 20s 이상에서는 탈포율이 약 5.84% 수준으로 유지되었다. [그림 4-13]은 동일한 3차 실험에서 탈포 시간 조건별 시편의 부피 변화를 시각적으로 제시한 것이다. 초기 513 mL에서 탈포 시간 증가에 따라 15s에서는 약 488 mL, 20s 이후에는 약 483 mL로 감소하는 양상이 관찰되었다.

4.1.2.4 중비중 그리스 실험 결과(3회 반복 실험)

[표 4-2] 중비중 탈포시간 조건별 탈포율

탈포시간(s)	실험1	실험2	실험3	평균
7	2.91%	2.53%	2.73%	2.72%
10	3.88%	3.89%	4.09%	3.96%
15	4.85%	4.86%	4.87%	4.86%
20	5.83%	5.84%	5.85%	5.84%
30	5.83%	5.84%	5.85%	5.84%
60	5.83%	5.84%	5.85%	5.84%
90	5.83%	5.84%	5.85%	5.84%

[표 4-2]는 중비중 그리스를 대상으로 동일 조건에서 3회 반복 수행한 탈포 실험 결과를 탈포 시간 조건별로 정리한 것이다. 탈포 시간 7s에서는 평균 탈포율이 2.72%로 나타났으며, 10s와 15s에서는 각각 3.96%, 4.86%로 증가하였다. 이후 20s에서는 평균 5.84%로 나타났고, 30s 이상에서는 평균 탈포율이 5.84% 수준으로 유지되었다. 탈포 시간 증가에 따라 평균 탈포율은 초기 구간에서 증가하는 경향을 보였으나, 30s 이후 구간에서는 탈포율 변화가 제한적으로 나타나 본 실험 조건에서 중비중 그리스의 임계 탈포 시간이 약 30s 전후임을 확인할 수 있었다.



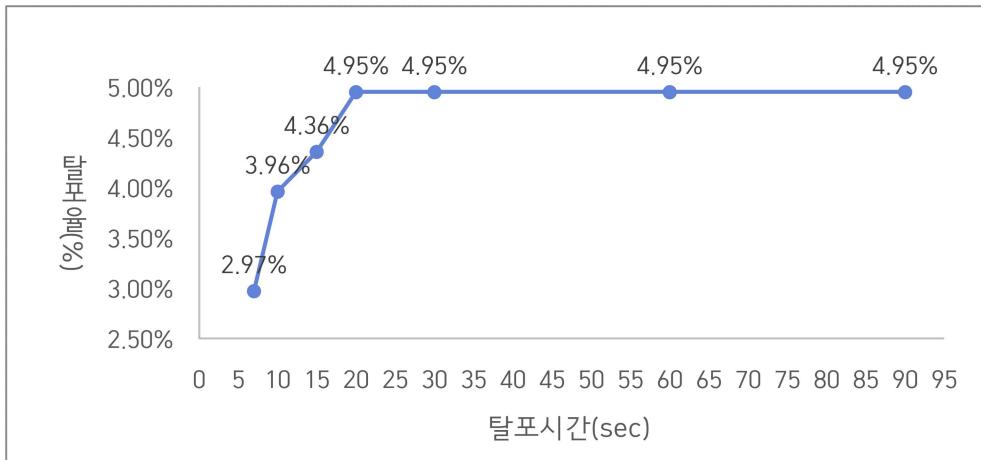
[그림 4-14] 중비중 그리스 탈포율 분포

[그림 4-14]는 중비중 그리스를 대상으로 수행한 3회 반복 실험 결과를 종합하여, 탈포 시간에 따른 탈포율 분포를 나타낸 것이다. 탈포 시간 7s에서는 탈포율이 약 2.5-2.9% 범위로 분포하였으며, 10s와 15s에서는 각각 약 3.8-4.1%, 4.8-5.0% 범위로 증가하는 경향을 보였다. 이후 20s 이상에서는 탈포율이 약 5.8-6.0% 수준으로 분포하며, 탈포 시간 증가에 따른 변화 폭이 점차 감소하는 양상을 나타냈다.

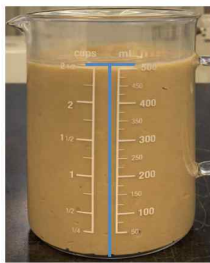
4.1.3 고비중 그리스 실험 결과

4.1.3.1 고비중 그리스 실험 결과(1)

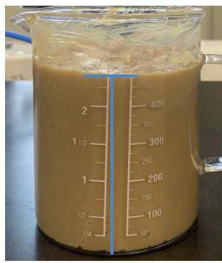
[그림 4-15]은 고비중 그리스 원심 탈포 3회 실험 중 1차 실험 결과에 대한 그래프를 나타낸 것이다. 20초에서 약 4.95% 수준에 도달하였다. 20초 이후에는 30-90초까지 탈포율 변화가 거의 나타나지 않아, 약 20초 전후가 임계 탈포 시간으로 판단된다.



[그림 4-15] 고비중 그리스 탈포율 그래프(1)



[a]0초/505ml



[b]7초/490ml



[c]10초/485ml



[d]15초/483ml



[e]20초/480ml



[f]30초/480ml



[g]60초/480ml



[h]90초/480ml

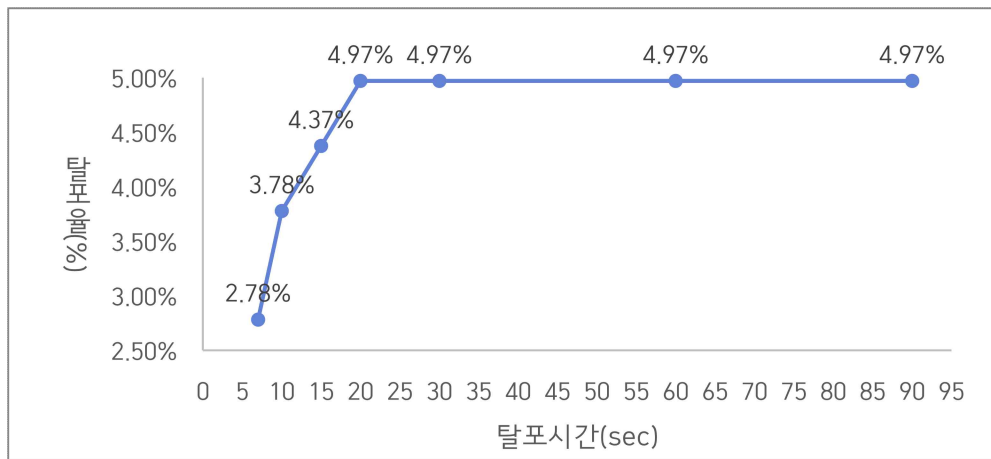
[그림 4-16] 고비중 그리스 탈포율 이미지(1)

[그림 4-16]은 고비중 그리스 원심 탈포 3회 실험 중 1차 실험에 대해 탈포 시간 변화에 따른 부피 변화를 단계별 이미지로 나타낸 것이다. 5-

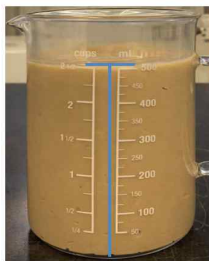
15초 구간에서는 탈포 시간이 증가함에 따라 그리스 상부 기포가 감소하면서 높이가 점진적으로 낮아지는 경향을 보였다. 20초 이후에는 부피가 약 480 mL 수준에서 유지되어, 추가적인 탈포 시간 증가에도 변화가 거의 나타나지 않았다.

4.1.3.2 고비중 그리스 실험 결과(2)

[그림 4-17]는 고비중 그리스 원심 탈포 3회 실험 중 2차 실험 결과에 대한 그래프를 나타낸 것이다.



[그림 4-17] 고비중 그리스 탈포율 그래프(2)



[a] 0초/503ml



[b] 7초/489ml



[c] 10초/484ml



[d] 15초/471ml



[e]20초/478ml



[f]30초/478ml



[g]60초/478ml



[h]90초/478ml

[그림 4-18] 고비중 그리스 탈포율 이미지(2)

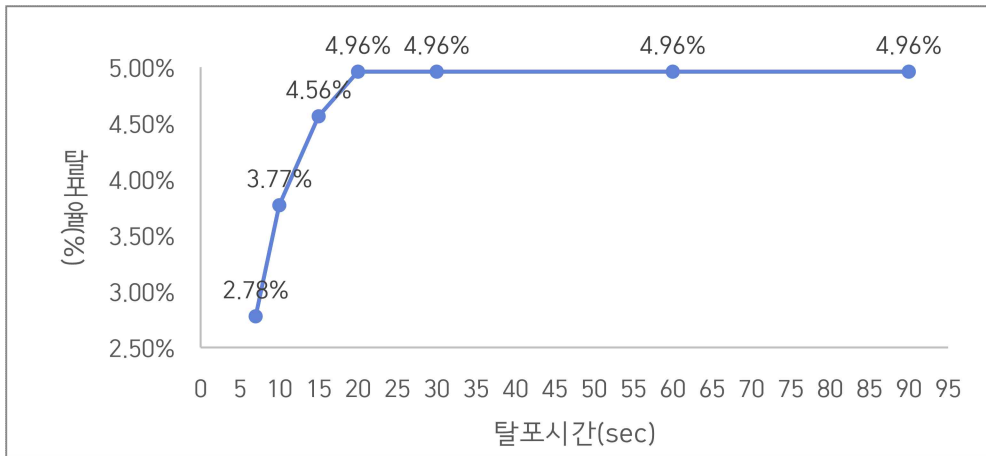
탈포율은 5-15초 구간에서 탈포 시간 증가에 따라 점진적으로 증가하여, 20초에서 약 4.97% 수준에 도달하였다. 이후 30-90초 구간에서는 탈포율이 거의 변화하지 않아, 약 20초 전후에서 탈포 효과가 포화되는 임계 탈포 시간이 형성됨을 확인할 수 있다.

[그림 4-18]은 0-15초 구간에서는 탈포 시간 증가에 따라 상부 기포가 감소하면서 그리스 높이가 단계적으로 낮아지는 경향을 보였다. 반면, 20초 이후에는 약 478 mL 수준에서 높이가 유지되어, 추가적인 탈포 시간 증가에도 외형적 변화가 거의 나타나지 않았다.

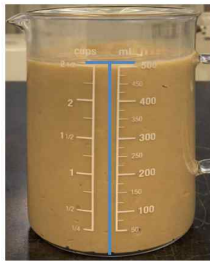
4.1.3.3 고비중 그리스 실험 결과(3)

[그림 4-19]은 고비중 그리스 원심 탈포 3회 실험 중 3차 실험 결과에 대한 그래프를 나타낸 것이다.

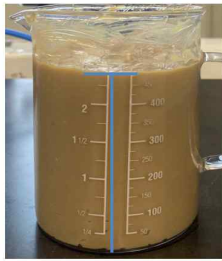
탈포율은 5-15초 구간에서 탈포 시간 증가에 따라 점진적으로 상승하여, 20초에서 약 4.96% 수준에 도달하였다. 이후 30-90초 구간에서는 탈포율이 거의 변화하지 않아, 약 20초 전후에서 탈포 효과가 포화되는 임계 탈포 시간이 형성됨을 확인할 수 있다.



[그림 4-19] 고비중 그리스 탈포율 그래프(3)



[a]0초/504ml



[b]7초/490ml



[c]10초/485ml



[d]15초/481ml



[e]20초/479ml



[f]30초/479ml



[g]60초/479ml



[h]90초/479ml

[그림 4-20] 고비중 그리스 탈포율 이미지(3)

[그림4-20]은 0-15초 구간에서는 탈포 시간이 증가함에 따라 상부 기포가 점차 감소하면서 그리스 높이가 단계적으로 낮아지는 경향을 보였다. 20초 이후에는 약 479 mL 수준에서 높이가 유지되어, 추가적인 탈포 시간 증가에도 외형적 변화가 거의 나타나지 않았다.

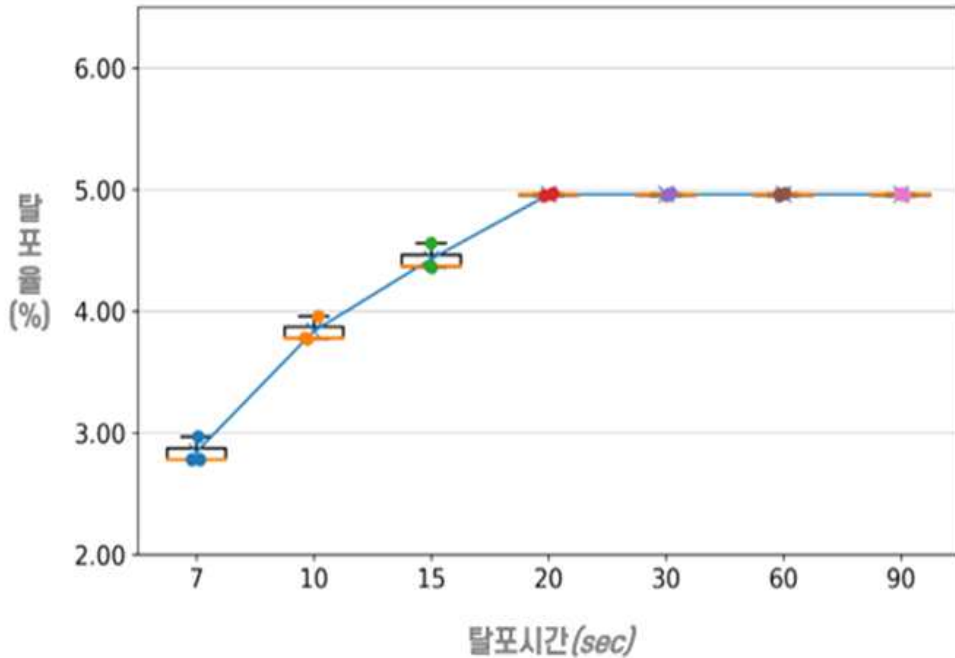
4.1.3.4 고비중 그리스 실험 결과(3회 반복 실험)

[표 4-3] 고비중 탈포시간 조건별 탈포율

탈포시간(s)	실험1	실험2	실험3	평균
7	2.97%	2.78%	2.78%	2.84%
10	3.96%	3.78%	3.77%	3.84%
15	4.36%	4.37%	4.56%	4.43%
20	4.95%	4.97%	4.96%	4.96%
30	4.95%	4.97%	4.96%	4.96%
60	4.95%	4.97%	4.96%	4.96%
90	4.95%	4.97%	4.96%	4.96%

[표 4-3]은 고비중 그리스를 대상으로 탈포 시간 조건별 3회 반복 실험 결과와 평균 탈포율을 정리한 것이다.

탈포 시간 7 - 15초 구간에서는 평균 탈포율이 2.84%에서 4.43%로 증가하는 경향을 보였으며, 20초에서 4.96% 수준에 도달하였다. 이후 30 - 90초 구간에서는 평균 탈포율이 약 4.96%로 거의 동일하게 유지되어, 약 20초 전후에서 탈포 효과가 포화되는 임계 탈포 시간이 형성됨을 확인할 수 있다.



[그림 4-21] 고비중 그리스 탈포율 분포

[그림 4-21]은 고비중 그리스를 대상으로 탈포 시간에 따른 탈포율 분포를 나타낸 것이다. 7-15초 구간에서는 탈포 시간이 증가함에 따라 탈포율 분포가 상향 이동하며 평균값 또한 증가하는 경향을 보였다.

20초 이후에는 탈포율이 약 5.0% 수준에서 분포가 집중되어, 추가적인 탈포 시간 증가에도 분포의 변화가 거의 나타나지 않았다.

4.2 탈포 시간에 따른 탈포 특성

본 절에서는 탈포 시간 변화가 탈포 거동에 미치는 영향을 우선적으로 분석하였다. 탈포 시간은 원심 탈포 공정에서 기포 제거 효과를 직접적으로 제어하는 핵심 공정 변수로 판단되므로, 본 연구에서는 탈포 시간을 7단계 조건으로 설정하고 각 조건에서 반복 실험을 수행하였다. 이를 통해 탈포 시간 증가에 따른 탈포율 변화와 탈포 거동의 전반적인 경향을 파악

하고자 하였다.

4.2.1 탈포 시간에 따른 탈포율 변화

탈포 시간에 따른 탈포율 변화를 분석하기 위하여, 각 탈포 시간 조건에서 측정된 탈포율을 비교하였다. 탈포율은 탈포 전·후 액면 부피 변화를 기반으로 산출된 상대적 지표로, 탈포 시간 증가에 따른 기포 제거 거동을 비교하기 위한 지표로 활용하였다.

[표 4-1]은 탈포 시간 조건별 그리스 비중에 따른 평균 탈포율을 나타낸 것이다. 각 값은 동일 조건에서 3회 반복 실험한 결과의 평균값이다.

[표 4-4] 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 평균 탈포율

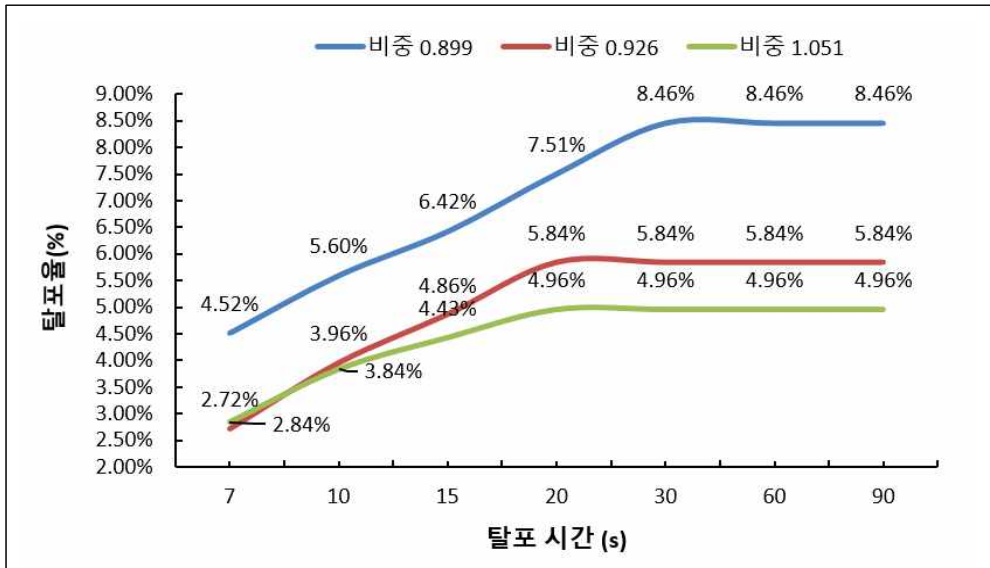
탈포시간(S)	저비중	중비중	고비중
7	4.52%	2.72%	2.84%
10	5.60%	3.96%	3.84%
15	6.42%	4.86%	4.43%
20	7.51%	5.84%	4.96%
30	8.46%	5.84%	4.96%
60	8.46%	5.84%	4.96%
90	8.46%	5.84%	4.96%

[표 4-4]는 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 평균 탈포율을 비교한 결과이다. 모든 비중 조건에서 탈포 시간 증가에 따라 7-20초 구간에서는 평균 탈포율이 점진적으로 증가하였으며, 20초 이후에는 각 비중별로 일정 수준에서 유지되는 경향을 보였다.

특히 고비중은 약 30초 이후 8.46%, 중비중은 약 20초 이후 5.84%, 고비중은 약 20초 이후 4.96% 수준에서 포화되어, 비중에 따라 임계 탈포 시간이 다르게 형성됨을 확인할 수 있다.

[표 4-4]의 결과를 기반으로 탈포 시간에 따른 탈포율 변화 경향을 보다 직관적으로 확인하기 위하여, [그림 4-22]에 그리스 비중별 탈포율

변화를 그래프로 나타내었다.



[그림 4-22] 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 탈포율 변화

[그림 4-22]는 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 평균 탈포율 변화를 나타낸 것이다. 탈포 시간 7초에서는 비중 0.899가 4.52%, 비중 0.926이 2.72%, 비중 1.051이 2.84%로, 동일한 탈포 시간에서도 비중에 따라 탈포율에 차이가 나타났다.

10초에서는 각각 5.60%, 3.96%, 3.84%로 증가하였으며, 15초에서는 6.42%, 4.86%, 4.43%로 탈포 시간이 늘어날수록 모든 비중 조건에서 탈포율이 상승하는 경향을 보였다. 20초에서는 비중 0.899가 7.51%, 비중 0.926이 5.84%, 비중 1.051이 4.96%로 나타나, 15초 대비 증가 폭은 유지되었으나 증가율은 점차 완만해졌다.

30초 이후에는 비중 0.899가 8.46%, 비중 0.926이 5.84%, 비중 1.051이 4.96%로 각각 포화 수준에 도달하였으며, 60초와 90초에서도 동일한 수치를 유지하였다.

이를 통해 탈포 시간은 7-20초 구간에서 탈포율에 유의한 영향을 미치며, 약 20-30초 이후에는 추가적인 탈포 시간 증가가 탈포율 향상으로 이어지지 않음을 수치적으로 확인할 수 있다.

4.3 그리스 비중에 따른 탈포 특성

4.3.1 그리스 비중별 부피 변화

[표 4-5] 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 부피 변화

구분		0초	7초	10초	15초	20초	30초	60초	90초
실험1	저비중 (0.899)	525	500	495	490	485	480	480	480
실험2		523	501	494	491	484	479	479	479
실험3		524	500	495	490	485	480	480	480
실험1	중비중 (0.926)	515	500	495	490	485	485	485	485
실험2		514	501	494	489	484	484	484	484
실험3		513	499	492	488	483	483	483	483
실험1	고비중 (1.051)	505	490	485	483	480	480	480	480
실험2		503	489	484	471	478	478	478	478
실험3		504	490	485	481	479	479	479	479

[표 4-5]는 탈포 시간에 따른 그리스 비중별 부피(높이) 변화를 3회 반복 실험 결과로 정리한 것이다.

저비중(0.899)의 경우, 0초에서 523-525 mL 수준이었으며, 7초에는 약 500-501 mL, 10초에는 494-495 mL, 15초에는 490-491 mL로 감소하였다. 이후 20초에서 484-485 mL로 낮아졌으며, 30초 이후에는 479-480 mL 수준에서 유지되어, 약 20-30초 구간에서 부피 변화가 포화되는 경향을 보였다.

중비중(0.926)은 0초에서 513-515 mL 범위였으며, 7초에 499-501

mL, 10초에 492-495 mL, 15초에 488-489 mL로 점진적으로 감소하였다. 20초에는 483-484 mL로 감소한 이후, 30-90초 구간에서는 483-485 mL 범위에서 거의 동일하게 유지되었다.

고비중(1.051)은 0초에서 503-505 mL 수준이었으며, 7초에는 489-490 mL, 10초에는 484-485 mL, 15초에는 471-483 mL로 감소하였다. 20초에는 478-480 mL 수준에 도달하였고, 이후 30-90초 구간에서도 478-480 mL 범위로 큰 변화가 나타나지 않았다.

이를 통해 비중이 낮을수록 탈포 초기 구간에서 부피 감소 폭이 크고, 최대 부피 감소량 또한 크게 나타났으며, 비중이 높아질수록 부피 감소 폭과 최종 감소량이 상대적으로 작아지는 경향을 수치적으로 확인할 수 있다.

V. 결 론

5.1 연구 결과

탈포 시간 증가에 따라 모든 비중 조건에서 7-20초 구간 동안 탈포율이 지속적으로 증가하였다. 저비중은 7초 4.52%에서 20초 7.51%로 증가하였고, 중비중은 2.72%에서 5.84%, 고비중은 2.84%에서 4.96%로 각각 상승하였다.

이후 각 비중 조건별로 탈포율이 더 이상 증가하지 않는 임계 탈포 시간이 명확하게 형성되었다. 저비중은 30초 이후 8.46%로 포화되었고, 중비중과 고비중은 모두 20초 이후 각각 5.84%, 4.96%로 더 이상 변화가 나타나지 않았다. 이를 통해 저비중의 임계 탈포 시간은 약 30초, 중비중과 고비중의 임계 탈포 시간은 약 20초로 확인할 수 있었다.

동일한 탈포 시간 조건에서도 비중에 따른 차이는 유지되었다. 예를 들어 20초 기준 탈포율은 저비중이 7.51%, 중비중이 5.84%, 고비중이 4.96%로 나타났으며, 이는 비중이 낮을수록 동일한 탈포 시간에서 더 높은 탈포 효율을 확보할 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구는 탈포 시간의 설정뿐 아니라, 그리스 비중에 따라 서로 다른 임계 탈포 시간이 존재함을 수치적으로 확인하였다는 점에서 의의가 있다.

5.2 향후 과제

본 연구는 일정한 충전 압력과 제한된 비중 범위의 그리스를 대상으로 수행되었으므로, 도출된 임계탈포 시간 개념을 모든 그리스 조건에 일반화하는 데에는 한계가 있다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 지정빈. (2024). 건식 및 그리스 윤활 조건에서 nylon과 LCP의 트라이볼로 지적 특성 및 마모 매커니즘 연구. 연세대학교 대학원.
- 차지웅 (2017). 격차 볼츠만법을 이용한 2차 단일 기포 시뮬레이션. 울산대학교 대학원. 국내 석사.
- 이경호 (2017) 그리스 윤활환경에서의 PTFE 코팅의 마멸특성에 대한 연구. 성균관대학교 대학원. 국내 석사.
- 백성미 (2019) 나노 서멀 그리스의 열 특성에 관한 연구. 경상대학교.
- 정현호 (2022) 대용량 그리스 자동주입장치의 개발. 신라대학교.
- 김동욱 (2019) 복합 환경 하에서의 볼 베어링용 그리스 내구성 평가. 고려대학교 대학원. 국내 석사.
- 김광태 (2022) Calium Sulfonate 그리스의 합성 및 트라이볼로지 특성 연구. 계명대학교 대학원. 국내 박사.
- 김태욱 (2005) 주유시간 조절이 가능한 기어 펌프 방식의 자동 그리스 주유기 개발. 경남대학교 대학원. 국내 석사.
- 전인식 (2007) 증주제와 기유점도에 따른 그리스 윤활특성에 관한 연구. 홍익대학교 대학원. 국내 석사.
- 조영식 (2008) 초음파를 이용한 콘크리트 보강재의 박리 영상화 기법개발. 연세대학교 대학원. 국내 석사.
- 손석범 (2022) 탈포기 최적 조건을 설정으로 기포 최소화에 관한 연구. 한국교통대학교 글로벌융합대학원. 국내 석사.
- 최재훈 (2019) 하수슬러지와 유분폐기물의 전처리 및 병합 혐기성소화에 관한 연구. 경기대학교 대학원. 국내 석사.

2. 국외문헌

- ASTM (2023) ASTM D892 - Foaming Characteristics of Lubricating Oils - ASTM Standard.
- Chen, S. et al. (2014) Viscosity effect on regular bubble entrapment during drop impact - Chemical Eng. Sci.
- Delgado, M.A. et al. (2005) Experimental study of grease flow in pipelines: wall slip and air entrainment effects - Chemical Eng. & Processing.
- Edling, C. & Śliwiński, P. (2024) Problems of Measuring Gas Content in Oil in a Two-Phase Flow - Energies.
- Jacob, K.H. et al. (2023) Analytical Photo-Centrifuge and DIN 51817 - Lubricants (MDPI).
- Fang, Z. et al. (2024) Bubble Defect Generation Mechanism in Slot Die Coating of High-Viscosity Fluids - ACS Appl. Mater. Interfaces.
- K-Petro (2024) Lubricant - Grease Quality Standards - kpetro.or.kr.
- Li, A. et al. (2024) Imaging Algorithms for Gas-Water Two-Phase Flow - Sensors.
- Ren, C. et al. (2023) Antifoaming Agent for Lubricating Oil: Mechanism and Application - Molecules.
- Wang, J. et al. (2024) Gas-Liquid Two-Phase Flow Measurement via Optical Flow - Applied Sciences.

ABSTRACT

Study on the Reduction of Air Bubbles in the Grease Filling Process: An Analysis of the Effects of Pressure and Deaeration Time

Kim, Yi-Hyun

Major in Smart Factory Consulting

Dept. of Smart Convergence Consulting

Graduate School of Knowledge

Service & Consulting

Hansung University

Air bubbles generated during the grease filling process of automatic lubricators are a major cause of dispensing non-uniformity, internal pressure loss, and reduced product reliability. In particular, air entrapped during the filling process can remain within the grease even after process completion, adversely affecting long-term operational stability. Therefore, this study aims to quantitatively analyze the deaeration rate and volumetric change according to centrifugal deaeration time in order to reduce air bubbles in grease filling processes. In this study, a centrifugal deaeration process was applied

to multiple types of grease with different physical properties under controlled filling conditions. Deaeration time was varied stepwise, and the deaeration rate was quantitatively calculated by measuring changes in grease height and volume in a standardized 500 ml beaker before and after deaeration. In addition, image-based analysis was conducted to examine changes in bubble distribution and to support the evaluation of deaeration behavior.

The experimental results showed that the deaeration rate increased significantly with increasing deaeration time in the initial stage of the centrifugal deaeration process; however, beyond a certain point, the increase in the deaeration rate gradually diminished, exhibiting a saturation behavior. This phenomenon can be attributed to the fact that bubble rise and release are relatively active during the early stage, whereas further removal of residual bubbles is limited by material properties and process constraints after reaching a critical deaeration time. Furthermore, differences in grease density and viscosity were found to influence both the deaeration rate and volumetric change trends.

Based on these results, it was confirmed that excessive extension of deaeration time in the centrifugal deaeration process provides limited improvement in terms of deaeration rate enhancement. Accordingly, an optimal deaeration time range that considers both quality stability and productivity was proposed. The findings of this study are expected to serve as fundamental data for bubble reduction and process condition optimization in the grease filling processes of automatic lubricators.

【Key words】 Grease filling process, Deaeration process, Deaeration rate, Grease density, Critical deaeration time