

석사학위논문

셀렉티브 솔더링 공정을 통한
브릿징 억제 및 홀 충전 품질
향상 방안 연구
: 고다층 PCB를 중심으로

2026년

한성대학교 지식서비스&컨설팅대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트팩토리컨설팅전공

이 재 근

석사학위논문
지도교수 윤주일

선택티브 솔더링 공정을 통한
브릿징 억제 및 홀 충전 품질
향상 방안 연구

: 고다층 PCB를 중심으로

Study on the Improvement of Hole-Filling
Quality and Suppression of Bridging through the
Selective Soldering Process:
Focused on High Multi-Layers PCBs

2025년 12월 일

한성대학교 지식서비스&컨설팅대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트팩토리컨설팅전공

이 재 근

석사학위논문
지도교수 윤주일

선택티브 솔더링 공정을 통한
브릿징 억제 및 홀 충전 품질
향상 방안 연구

: 고다층 PCB를 중심으로

Study on the Improvement of Hole-Filling
Quality and Suppression of Bridging through the
Selective Soldering Process:
Focused on High Multi-Layers PCBs

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2025년 12월 일

한성대학교 지식서비스&컨설팅대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트팩토리컨설팅전공

이 재 근

이재근의 공학 석사학위 논문을 인준함

2025년 12월 일

심사위원장 이선표 (인)

심사위원 정준 (인)

심사위원 윤주일 (인)

국 문 초 록

선택티브 솔더링 공정을 통한 브릿징 억제 및
홀 충전 품질 향상 방안 연구
: 고다층 PCB를 중심으로

한성대학교 지식서비스&컨설팅대학원
스 마 트 융 합 컨 설 팅 학 과
스 마 트 팩 토 리 컨 설 팅 전 공
이 재 근

최근 전자제품의 고집적화와 소형화가 가속화되면서, 높은 전기적 신뢰성과 열 안정성을 동시에 확보할 수 있는 고다층(High Multi-Layer) 인쇄회로기판(PCB)의 수요가 급격히 증가하고 있다.

그러나 고다층 PCB는 열용량이 크고 열전달이 비균일하여, 납땜 과정에서 충분한 열이 공급되지 못할 경우 솔더의 유동성이 저하되고 홀 내부 충진이 불안정하게 이루어지는 문제가 발생한다. 또한 플럭스 분사량이 부족하거나 불균일할 경우, 산화막 제거가 충분히 이루어지지 않아 젖음성이 저하되고 브릿징(Bridging) 결함이 발생하기 쉽다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 고다층(high Multi-Layer) 인쇄회로기판(PCB)의 선택티브 솔더링(Selective Soldering) 공정에서 발생하는 브릿징(Bridging) 결함을 최소화하고, 홀충진 공정 조건 최적화 방안을 제

시하였다.

이를 개선하기 위해 플럭스 분사량(3, 5, 7, 10, 15 ml/cycle)과 솔더 온도(230, 240, 250, 260, 270 °C)를 주요 제어 변수로 설정하고, 프리히터 온도는 150 °C, 무연솔더 SAC305(Sn-3.0Ag-0.5Cu) 사용 조건하에서 총 250개의 시료를 대상으로 실험을 수행하였다.

그 결과, 플럭스 7 ml/cycle - 솔더온도 260 °C 조합에서 가장 안정적인 젖음성과 유동성이 확보되었으며, 평균 홀 충진율 96% 이상, 브릿징 발생률 0%의 품질을 달성하였다.

이러한 결과는 플럭스의 적정량과 솔더의 충분한 열 에너지가 모세관 작용(capillary action)을 극대화 하고 산화막 제거를 촉진하여 납의 상승 유동성을 향상시킨 데 기인하는 것으로 판단된다.

본 연구는 선택티브 솔더링 공정에서 플럭스와 솔더 온도의 최적 조합을 규명함으로써, 고다층 PCB의 품질 신뢰성 향상에 기여하였다. 이를 통해 브릿징 결함을 억제하고 안정적인 홀충진 품질을 확보할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 따라서 본 연구 결과는 향후 선택티브 솔더링 공정의 표준화 및 생산성 향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

【주요어】 선택티브 솔더링, 브릿징, 홀 충진, 플럭스, 솔더 온도, PCB

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구의 배경 및 필요성	1
제 2 장 이론적 배경 및 선행 연구	2
제 1 절 고다층 PCB의 이론적 배경	2
제 2 절 선택티브 솔더링의 이론적 배경	6
제 3 절 홀 충전 및 브릿징 품질 평가 기준	11
1. 홀 충전 품질 기준(Hole Filling Criteria)	11
2. 브릿징 품질 기준(Bridging Defect Criteria)	12
3. 종합 논의	13
제 4 절 선택티브 솔더링 관련 기준 선행 연구 고찰	14
제 3 장 연구 방법	15
제 1 절 실험 방법	15
1. 실험 목표	15
2. 실험 방법	15
3. 실험 시료 및 측정장비	16
제 4 장 연구 결과	19

제 1 절 실험 데이터 결과	19
1. 시료별 측정 데이터 결과	20
2. 홀 충진율 및 브릿징 발생률 실험 결과	24
3. 조건별 평균 홀 충진율 및 브릿징 발생률 결과 요약	30
제 2 절 실험 그래프 결과	32
1. 플렉스 분사량에 따른 홀 충진율 분석	32
2. 플렉스 분사량에 따른 평균 브릿징률 분석	34
3. 플렉스·솔더 온도 조합에 따른 홀 충진율 변화 분석	36
4. 플렉스·솔더 온도 변화에 따른 평균 홀 충진율 분석	37
5. 플렉스·솔더 온도 변화에 따른 평균 브릿징 발생률 분석	38
6. 플렉스·솔더 온도 변화 홀 충진율 분포 분석	39
제 3 절 결과 해석 및 논의	41
제 5 장 결론	42
참 고 문 헌	43
ABSTRACT	47

표 목 차

[표 2-1] 고다층 PCB의 주요 구성요소 및 기능	4
[표 2-2] 선택티브 솔더링 장비 주요 사양표	6
[표 2-3] 국제 “IPC-A-610” 홀 충전 표준 품질 기준표	11
[표 2-4] 국제 “IPC-A-610” 브릿징 표준 품질 기준표	12
[표 3-1] 실험 조건 요약 및 변수 설정	16
[표 3-2] 솔더 합금의 구성 성분 및 물리적 특성	18
[표 4-1] 선택티브 솔더링 공정 실험 데이터 (시료 #1-#84)	20
[표 4-2] 선택티브 솔더링 공정 실험 데이터 (시료 #85-#168)	21
[표 4-3] 선택티브 솔더링 공정 실험 데이터 (시료 #169-#250)	22
[표 4-4] 플럭스 분사량에 따른 평균 홀 충진율 요약표	30
[표 4-5] 솔더 온도에 따른 평균 홀 충진율 요약표	30
[표 4-6] 이원 분산분석 결과에 따른 홀 충진율 요약표	30
[표 4-7] 플럭스 분사량에 따른 평균 브릿징 발생률 요약표	31
[표 4-8] 솔더 온도에 따른 평균 브릿징 발생률 요약표	31
[표 4-9] 이원 분산분석 결과에 따른 브릿징 발생률 요약표	31

그림 목 차

[그림 2-1] 고다층 PCB의 응용 분야별 대표 제품 예시	2
[그림 2-2] 고다층 PCB의 적층구조도	3
[그림 2-3] 선택티브 솔더링 장비(AF-4050A) 및 주요 구성부	7
[그림 2-4] 선택티브 솔더링(Selective Soldering) 공정 개요 모식도	10
[그림 2-5] IPC-A-610 기준에 따른 홀 충전 양호 단면 예시	12
[그림 2-6] IPC-A-610 기준에 따른 브릿징 발생 사례 예시	13
[그림 3-1] 선택티브 솔더링 실험 공정 흐름도	15
[그림 3-2] 시험 시료 (Iot Gas Meter Module)	16
[그림 3-3] 측정 장비 (SEC社 X-eye 5100 X-ray)	17
[그림 3-4] SEC社 X-eye 5100 X-ray 측정 절차 모식도	18
[그림 4-1] PCB 홀 충진을 모식도	23
[그림 4-2] X-RAY 충진을 사진 (플럭스 3ml/cycle 조건)	24
[그림 4-3] X-RAY 충진을 사진 (플럭스 5ml/cycle 조건)	25
[그림 4-4] X-RAY 충진을 사진 (플럭스 7ml/cycle 조건)	26
[그림 4-5] X-RAY 충진을 사진 (플럭스 10ml/cycle 조건)	27
[그림 4-6] X-RAY 충진을 사진 (플럭스 15ml/cycle 조건)	28
[그림 4-7] 브릿징 발생 시료 비교사진	29
[그림 4-8] 플럭스 분사량 조건별 홀 충진을 분포도	33
[그림 4-9] 플럭스 분사량 조건별 평균 브릿징률 변화 그래프	35
[그림 4-10] 플럭스·솔더 온도 조합에 따른 평균 홀 충진을 그래프	36
[그림 4-11] 플럭스·솔더 온도 변화에 따른 평균 홀 충진을 그래프	37
[그림 4-12] 플럭스·솔더 온도변화에 따른 평균 브릿징 발생률 그래프	38
[그림 4-13] 플럭스·솔더온도 변화에 따른 홀 충진을 분포도	40

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 필요성

최근 전자제품의 고집적화와 소형화가 가속화되면서, 높은 전기적 신뢰성과 열 안정성을 동시에 확보할 수 있는 고다층(High Multi-Layer) 인쇄회로기판(PCB)의 수요가 급격히 증가하고 있다. 그러나 고다층 PCB는 열용량이 크고 열전달이 비균일하여, 납땜 과정에서 충분한 열이 공급되지 못할 경우 솔더의 유동성이 저하되고 홀 내부 충전이 불완전하게 이루어지는 문제가 발생한다.

특히 셀렉티브 솔더링(Selective Soldering) 공정에서는 플럭스 분사량이 부족하거나 분사 균일도가 낮을 경우 산화막 제거가 불완전해지고, 젖음성이 저하되어 브릿징(Bridging) 불량 발생 가능성이 높다. 반면, 플럭스 분사량이 과도할 경우에도 잔류 플럭스가 기판 표면에 남아 품질 저하를 유발할 수 있으므로, 최적의 공정 조건 설정이 매우 중요하다.

기존 선행연구(Diepstraten, 2013; Tolla, 2016 등)에서는 플럭스 활성화도나 예열조건이 품질에 미치는 영향을 부분적으로 분석하였으나, 대부분 단층 또는 저다층 기판을 대상으로 수행되어 고다층 PCB의 열적 특성과 유동 특성을 반영한 연구는 제한적이었다. 또한 플럭스 분사량과 솔더 온도의 상호작용(Interaction Effect)을 동시에 고려한 체계적 연구는 거의 보고되지 않았다.

이에 본 연구에서는 고다층 PCB의 셀렉티브 솔더링 공정을 대상으로, 플럭스 분사량과 솔더 온도를 주요 제어변수로 설정하여 홀 충전율과 브릿징 발생률에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 고다층 PCB의 품질 신뢰성과 생산 안정성을 향상시킬 수 있는 최적 공정 조건을 제시하는 것을 목표로 한다.

제 2 장 이론적 배경 및 선행 연구

제 1 절 고다층 PCB의 이론적 배경

현대 전자산업은 제품의 고기능화와 소형화가 동시에 요구되는 방향으로 발전하고 있다. 이러한 변화에 따라 인쇄회로기판¹⁾(Printed Circuit Board, PCB)은 고속 신호 전송과 전원 분배 효율을 높이기 위해 점차 다층화(Multilayer)구조로 발전하였다. 고다층(High-Multi-Layer) PCB는 4층 이상의 도체층(Copper Layer)과 절연층(Dielectric Layer)을 교대로 적층한 구조로, 신호선, 전원층, 그라운드층을 입체적으로 배치하여 회로 간 간섭을 최소화하고 고밀도 회로 구현이 가능하도록 설계된다. 이와 같은 구조적 장점으로 고다층 PCB는 [그림 2-1]과 같이 반도체, 스마트폰, 컴퓨터, 자동차, 의료기기, 방위산업 장비 등 다양한 분야에서 핵심 부품으로 사용되고 있다.

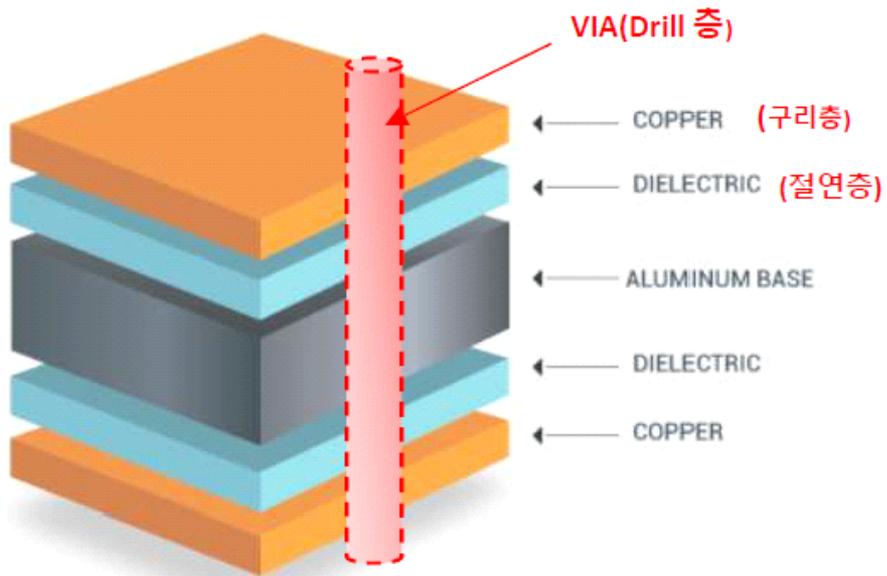


[그림 2-1] 고다층 PCB의 응용 분야별 대표 제품 예시

고다층 PCB의 기본 구성은 코어(BASE), 절연층(Dielectric), 구리층

1) 인쇄회로기판 : Printed Circuit Board(PCB)은 절연체 표면에 구리 도체 패턴을 형성하여 전자 부품간의 전기적 연결을 가능하게 하는 기판입니다.

(Copper), 드릴층(VIA) 그리고 표면 도금층(Plating Layer)으로 이루어지며, [그림 2-2]와 같다. 코어는 유리섬유(Glass Fiber)와 에폭시 수지(Epoxy Resin)를 적층하여 절연성과 기계적 강도를 확보하고, 프리프레그는 반경화 상태의 절연 수지층으로 각 층을 접착시키는 매개 역할을 수행한다. 도체층은 회로 신호와 전류를 전달하는 층으로, 일반적으로 12~35 μm 두께의 전해 동박(Electrolytic Copper Foil)을 사용한다. 또한 표면에는 솔더 마스크가 도포되어 납땜 과정에서 발생할 수 있는 브릿징(Bridging)을 방지하며, 표면 도금층은 산화 방지 및 납땜성 향상을 위해 적용된다.



[그림 2-2] 고다층 PCB의 적층구조도(CBS PCB, “PCB Stackups”, 2025)

[표 2-1] 고다층 PCB의 주요 구성요소 및 기능

구성요소	주요 기능	공정상 의미
코어(Core)	기계적지지, 절연층 역할	기판 강도 및 열팽창 안정성
프리프레그(Prepreg)	층간 접착	적층 안정성
도체층(Cu Foil)	신호/전류 전달	열흡수, 열용량 증가 요인
솔더마스크(Solder Mask)	단락 방지, 표면 보호	납땜시 불필요한 패드 접합
도금층(Plating)	산화 방지, 젖음성 향상	솔더링 품질 개선

[표 2-1]에 나타낸 바와 같이, 고다층 PCB는 코어(Core), 프리프레그(Prepreg), 도체층(Copper Foil), 솔더 마스크(Solder Mask), 그리고 도금층(Plating Layer)으로 구성된다. 이러한 다층 구조는 회로의 전기적 성능과 집적도를 향상시키는 반면, 열용량(Heat Capacity) 증가와 열전달 경로의 복잡화라는 문제를 수반한다.

고다층 PCB 내부에는 열전도율이 상이한 구리, 절연수지, 유리섬유 등이 혼재하므로 예열(Preheating) 단계에서 층간 온도 불균형이 발생한다. 구리층(Cu Layer)은 약 400 W/m·K의 높은 열전도율을 갖는 반면, 절연층은 약 0.3 W/m·K 수준으로 낮아 열이 기판 전체에 균일하게 확산되지 못한다. 이로 인해 하부층은 과도하게 가열되고 상부층은 상대적으로 저온 상태로 남아, 선택티브 솔더링 공정 중 모세관 작용(Capillary Action)이 약화되어 홀 상단까지 납이 충분히 상승하지 못하는 부분 충전(Partial Fill)현상이 나타난다.

반대로, 과도한 열공급은 에폭시 수지의 열화(Thermal Degradation)와 층간 박리(Delamination)를 유발할 수 있다. 따라서 예열 단계에서는 충분한 열흡수와 열 과잉 방지의 균형이 중요하며, 이는 솔더링 품질을 결정짓는 핵심 요인으로 작용한다.

한편, 층간 전기적 연결을 담당하는 비아(Via) 및 쓰루홀(Through-hole) 구조는 열전달뿐 아니라 납 유동 경로로도 작용한다. 홀 직경, 리드 간격, 도금

두께의 균일성 등 미세 구조적 차이가 모세관 유동성을 좌우하며, 이는 곧 홀 충전율(Hole Fill Rate)과 브릿징(Bridging) 발생률에 직접적인 영향을 미친다. 특히 고다층 기판은 홀 깊이가 크고 내부 도금층의 열흡수 차이가 존재하기 때문에, 동일한 공정 조건에서도 상부와 하부의 충전 결과가 상이하게 나타난다.

이러한 열적·구조적 복잡성은 셀렉티브 솔더링 공정에서 품질 불균일을 초래하는 주요 원인으로 지적된다. 플럭스 도포량이 부족하면 산화막 제거가 불충분하여 젖음성이 저하되고, 반대로 과도한 플럭스는 납 표면의 표면장력 균형을 변화시켜 브릿징 결함을 유발한다. 따라서 플럭스 분사량(Flux Volume)과 솔더 온도(Solder Temperature)를 균형 있게 제어하는 것이 고다층 PCB의 솔더링 품질 확보에 필수적이다.

국외 연구인 Diepstraten(2013, 2015)은 다층 기판에서 플럭스 분사량, 예열 온도, 노즐 형상이 납 충전율에 영향을 미친다고 보고하였으며, Tolla(2016)는 솔더 온도와 플럭스 분사량의 상호작용이 브릿징 결함 발생률에 영향을 준다고 언급하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 4층 이하의 기판을 대상으로 수행되어, 고다층 구조에서의 열전달 불균일성과 납의 내부 유입 특성을 충분히 반영하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 실제 생산 환경과 동일한 조건에서 플럭스 분사량(3, 5, 7, 10, 15 ml/cycle)과 솔더 온도(230, 240, 250, 260, 270 ° C)를 주요 변수로 설정하고, 고다층 PCB의 홀 충전율과 브릿징 발생률을 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 플럭스와 온도 조건이 납의 유동성, 젖음성, 열흡수 균형에 미치는 영향을 규명하고, IPC-A-610 Class 2 기준(홀 충전율 75 % 이상)을 안정적으로 만족시킬 수 있는 최적 공정을 제시하고자 한다.

제 2 절 셀렉티브 솔더링의 이론적 배경

본 연구에 사용된 셀렉티브 솔더링(Selective Soldering) 장비는 Apollo Robotics社 AF-4050A 모델로, 플럭스 분사-예열-솔더링의 세 공정을 하나의 자동화 시스템 내에서 정밀하게 제어할 수 있는 장비이다.

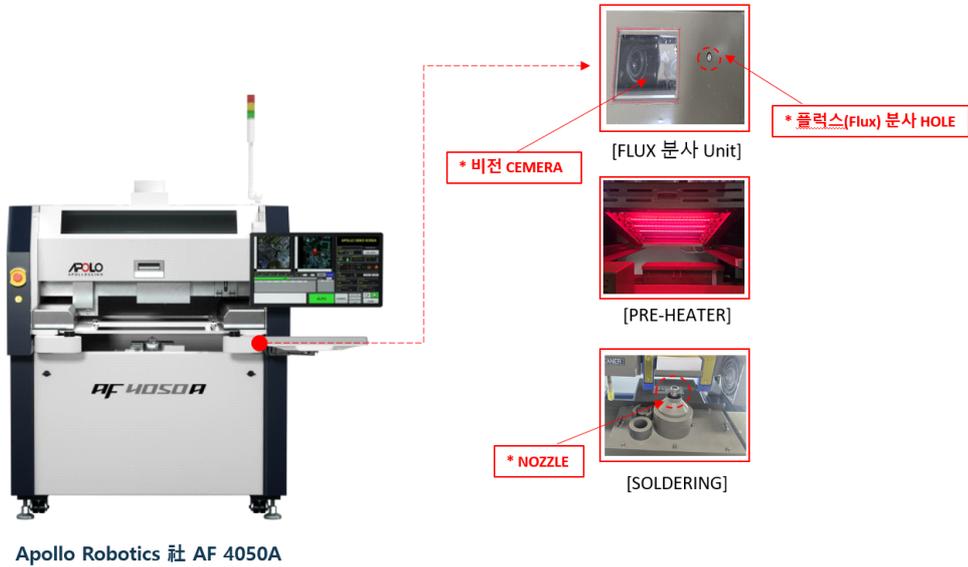
본 장비는 X.Y.Z 3축 로봇 제어 시스템을 기반으로 하여, 플럭스 분사 유닛(Flux Spray Unit), 적외선 프리히터(IR Pre-heater), 솔더링 노즐(Soldering Nozzle)로 구성되어 있다.

플럭스 유닛은 압력식 분사 제어 방식을 사용하여 플럭스의 분사량과 분사 패턴을 정밀하게 조절하며, 산화막 제거 효율과 도포 균일도를 확보한다. 프리히터는 기판 전체를 가열하여 플럭스 활성화를 완료하고, 솔더링 단계에서의 열 불균형을 최소화한다. 솔더링 노즐은 용융 납을 국부 공급하여 리드-패드 간 금속 접합을 형성하며, 불필요한 납 번짐을 억제한다.

장비의 주요 사양은 [표 2-2]에 나타내었으며, 전체 외형 구성은 [그림 2-3]에 도시하였다.

[표 2-2] 셀렉티브 솔더링 장비 주요 사양표

구분	사양
작업영역	500 mm x 400 mm
소비전력	11KW
본체크기	1200 (W) × 1930 (L) × 1527 (H) mm, 750kg
전원	AC 200 ~ 240V, 50 ~ 60Hz, 3상
시스템 구성	Flux 도포 Unit, Pre-Heater, Auto Solder Spot X·Y·Z 로봇 제어, 자동 납 공급 Unit



[그림 2-3] 선택티브 솔더링 장비(AF-4050A) 및 주요 구성부

선택티브 솔더링(Selective Soldering)은 SMT²⁾/THT³⁾ 복합기판의 등장과 함께 발전한 국부 납땜 기술로, 전체 기판을 일괄적으로 납땜하는 웨이브 솔더링(Wave Soldering) 공정의 한계를 보완하기 위해 고안되었다. 특히 고다층 PCB나 열흡수량이 큰 고전력 기판에서는 전체 가열 시 과열(Overheating), 뒤틀림(Warping), 플럭스 손상(Flux degradation) 등의 문제가 발생하기 때문에, 특정 부품 부위만 정밀하게 가열·접합할 수 있는 선택티브 솔더링 공정이 필수적으로 사용된다.

이 공정은 플럭스 도포(Fluxing), 예열(Preheating), 솔더링(Soldering), 냉각(Cooling)의 네 단계로 구성되며((B. Tolla et al.,2016), 각 단계는 서로 긴밀하게 연관되어 공정 전체의 품질에 영향을 미친다.

플럭스 도포 단계는 금속 표면의 산화막을 제거하고 젖음성을 향상시켜 납이 패드와 리드에 안정적으로 퍼지도록 하는 공정이다. 플럭스는 금속 표면의

2) SMT(Surface Mount Technology) : 부품을 PCB 표면에 직접 실장하는 방식.

3) THT(Through Hole Technology) : 부품 리드를 PCB HOLE에 삽입하여 납땜하는 방식.

산화막을 화학적으로 제거하여 젖음성을 향상시키고, 납의 모세관 유동(capillary flow)을 안정화시킨다. 플럭스의 도포량은 분사량(Flux Volume)과 분사 압력에 의해 제어되는데, 부족할 경우 산화막이 완전히 제거되지 않아 납이 홀 내부로 충분히 유입되지 못하고 부분충진(Partial Fill)이나 냉납(Incomplete solder Joint)이 발생한다.

예열은 플럭스의 활성화를 완성하고, 기판 온도를 일정하게 맞추어 열충격(Thermal shock)을 방지하기 위한 과정이다. 이 단계에서의 핵심은 층간 온도 불균형(Interlayer temperature imbalance)을 최소화하는 것이다. 고다층 PCB는 내부 구리층이 많은 만큼 열흡수량이 크기 때문에, 하부층과 상부층의 온도 편차가 쉽게 발생한다. 이러한 온도 불균형은 납의 점도(Viscosity)와 표면장력(Surface tension)에 영향을 주어, 용융 납의 유동성을 저하시킨다. 따라서 예열 과정은 보통 150 ± 10 °C 범위로 설정하며, 적외선(IR) 히터 또는 열풍(Hot Air) 방식으로 점진적으로 가열하여 층간 온도차를 줄이는 것이 중요하다. 예열이 과도하면 수지층의 열화나 박리(Delamination)가 일어나고, 부족하면 납의 상승 유동이 약화되어 홀 상단이 채워지지 않기 때문에, 열공급 균형 제어는 선택티브 솔더링의 핵심 안정화 단계라 할 수 있다.

솔더링 단계에서는 노즐을 통해 용융 납이 국부적으로 공급되어 패드와 리드가 금속 접합을 이루게 된다. 솔더링 품질은 솔더 온도(Solder Temperature), 노즐 직경(Nozzle diameter), 체류 시간(Dwell time), 질소 농도(N₂ purity) 등 다양한 변수의 영향을 받는다. 용융 납의 점도와 표면장력은 온도에 따라 크게 달라지는데, 온도가 낮을 경우 납이 점성이 높아 홀 내부로 유입되지 못하고, 온도가 과도하면 납의 표면장력이 급격히 낮아져 인접 리드로 퍼지며 브릿징을 유발한다.

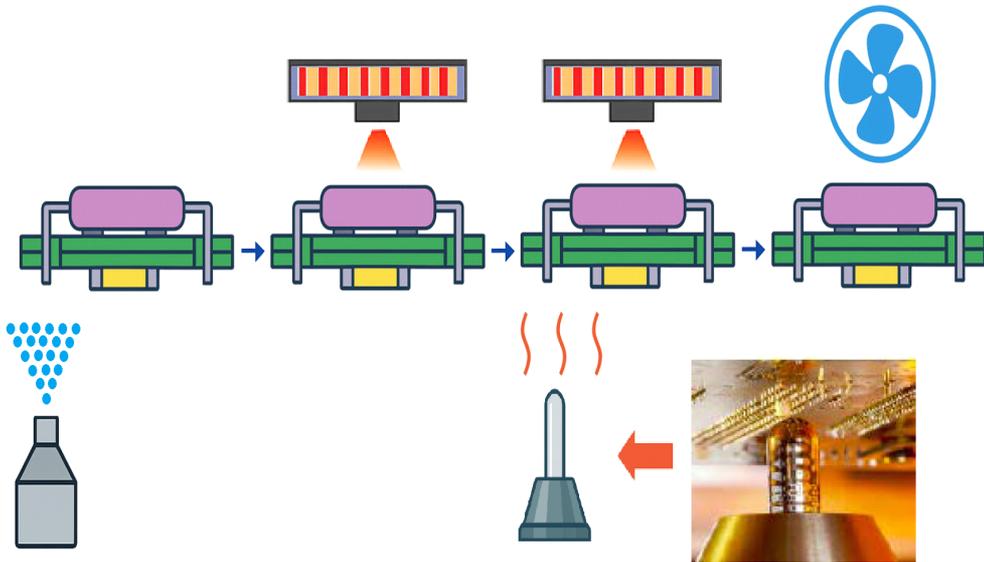
냉각 단계에서는 용융 납이 응고되며 금속간화합물(IMC, Intermetallic Compound)이 형성된다. 냉각 속도는 IMC의 성장 두께와 접합부의 기계적 안정성에 영향을 미치므로, 과도한 급속 냉각이나 과도한 완만 냉각은 모두

바람직하지 않다. 일반적으로 균일한 냉각 제어를 통해 일정한 IMC형성과 필렛 품질을 유지하는 것이 권장된다.

이와 같이 플렉스 도포, 예열, 솔더링, 냉각의 각 단계는 독립적이지만 상호보완적으로 작용한다. 플렉스가 과소 도포된 상태에서 온도를 높이면 산화막이 완전히 제거되지 않아 젖음성이 떨어지고, 반대로 플렉스가 과다한 상태에서 온도를 높이면 납의 표면장력이 약화되어 브릿징이 발생한다. 이러한 변수 간의 복합적인 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 다구찌 실험법(Taguchi Method)과 이원분산분석(ANOVA)을 적용하여 각 인자의 주효과(Main effect)와 상호작용(Interaction effect)을 정량적으로 평가하였다.

셀렉티브 솔더링 공정의 품질은 IPC-A-610 Class 2 기준에 따라 홀 충전율(Hole Fill %)과 브릿징 발생률(%)로 평가된다. Class 2 규격에서는 홀 충전율이 75% 이상이면 양호로 판정되며, 브릿징은 모든 Class에서 불량으로 간주된다. 따라서 플렉스 활성화, 열공급 균형, 납의 유동성 확보는 이 기준을 만족시키기 위한 필수 요건이다.

셀렉티브 솔더링은 플렉스의 화학적 활성화, 기관의 열전달, 용융 납의 모세관 유동(capillary Flow)이 동시에 작용하는 복합 공정이다. 이러한 상호 물리작용은 단계별 조건에 따라 납의 유동성, 젖음성, 그리고 충전율에 직접적인 영향을 미치며, 결국 공정 전체의 품질을 결정한다. 따라서 각 공정 단계의 조건을 정량적으로 설정하고 유지하는 것이 고품질 솔더링의 핵심 과제이며, 이를 보다 명확히 보이기 위해 [그림 2-4]에 셀렉티브 솔더링 공정의 전체 흐름을 도식화하였다.



[그림 2-4] 셀렉티브 솔더링(Selective Soldering) 공정 개요 모식도

제 3 절 홀 충전 및 브릿징 품질 평가 기준

선택티브 솔더링(Selective Soldering) 공정의 품질은 납의 유동성, 젖음성, 열전달 조건 등 복합적인 변수의 상호작용에 의해 결정된다.

대표적인 평가 항목은 홀 충전(Hole Filling) 과 브릿징(Bridging) 으로, 이는 국제 표준 IPC-A-610에서 명확한 수용 기준(Acceptability Criteria)으로 정의되어 있다. 본 연구에서는 산업용 전자제품 등급에 해당하는 Class 2 규격을 기준으로 평가하였다.

1. 홀 충전 품질 기준(Hole Filling Criteria)

홀 충전(Hole Filling)은 관통형 리드(THT Lead)와 PCB 홀 사이가 납으로 얼마나 균일하게 채워졌는지를 나타내는 지표이다.

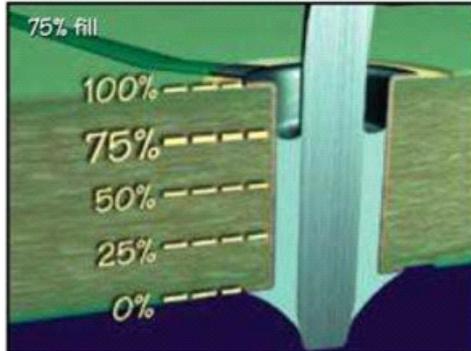
[표 2-3], [그림 2-5]와 같이, IPC-A-610 Class 2 기준에 따르면, 홀 단면의 납 충전율이 75% 이상일때 양품으로 판정한다. 이 충전율은 플럭스 활성화 정도, 기판 예열 온도, 솔더 온도, 그리고 층간 열전달 균일도에 영향을 받는다.

충전율이 낮으면 전기적,기계적 접속 저항이 증가하고, 열 피로에 의한 균열이 발생할 가능성이 높아진다. 고다층 PCB에서는 내부 구리층의 열흡수 효과로 인해 상부 충전 부족(Top-Side Void)이 자주 발생하므로, 예열과 플럭스 도포 조건의 정밀 제어가 필수적이다.

[표 2-3] 국제 “IPC-A-610” 홀 충전 표준 품질 기준표

구분	적용 제품	홀 충전율 기준	비고
Class 1	일반 전자제품	약 75%이상 권장	기능문제 없을시 일부 미충진 허용
Class 2	산업, 상업용 (고신뢰성요구)	75% 이상 필수	솔더가 패드 상부까지 도달 필요
Class 3	항공, 의료, 군수 (최고신뢰성)	90% 이상 필수	엄격제한

(IPC-A-610: Acceptability of Electronic Assemblies, Revision J, 2024)



[그림 2-5] IPC-A-610 기준에 따른 홀 충 양호 단면 예시

(PC, Through Hole Solder Joint Evaluation Training and Reference Guide, IPC Training, 2014)

2. 브릿징 품질 기준(Bridging Defect Criteria)

브릿징(Bridging)은 인정합 리드 또는 패드 사이에 용융 납이 다리 형태로 연결되어 전기적 단락을 유발하는 현상이다. 이는 플럭스 도포 불균일, 과도한 분사, 과열 조건으로 발생한다.

아래 [표 2-4]와 같이, IPC-A-610 모든 Class에서 브릿징은 즉시 불량(Reject)으로 분류된다.

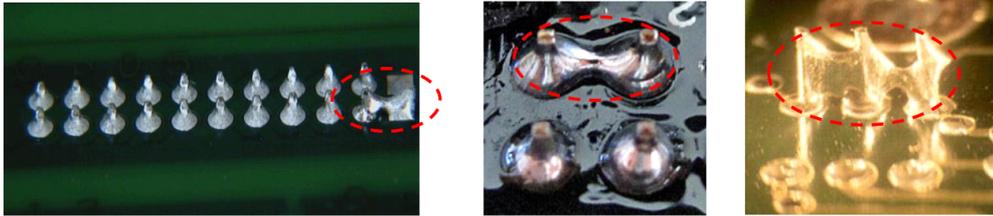
브릿징은 납의 표면장력 저하로 인해 발생하므로, 플럭스 도포량, 솔더 온도, 공급 속도 등의 변수 균형을 정밀하게 관리해야 한다.

[표 2-4] 국제 “IPC-A-610” 브릿징 품질 기준표

구분	수용 기준	불량 판정 기준	비고
브릿징 발생	없음 (0 EA)	1 EA 이상 발생시 불량	전수 검사 기준
납 흐름 형상	리드 개별 분리	납 Bridge 형성	광학 / X-ray 검사
패드 포면	청결 및 균일	납 넘침 또는 연결	육안 검사 병행

(IPC-A-610: Acceptability of Electronic Assemblies, Revision J, 2024)

아래 [그림 2-6]은 IPC-A-610 기준에 따른 브릿징(Bridging) 발생 사례를 나타낸 것이다. 브릿징은 인접한 리드(Lead) 사이에 과도한 솔더가 잔류하여 전기적 단락을 유발하는 대표적인 불량으로, 선택티브 솔더링 공정의 주요 결함 유형 중 하나이다.



[그림 2-6] IPC-A-610 기준에 따른 브릿징 발생 사례 예시

(Selective Solder Fine Pitch Components on High Thermal Mass Assembly, Figure 8.)

3. 종합 논의

브릿징과 홀 충전은 선택티브 솔더링 공정의 대표적인 품질 지표로서 상호 보완적인 관계를 갖는다. 브릿징을 억제하기 위해 납의 유동성을 과도하게 제한하면 충전율이 저하되고, 반대로 충전율을 향상시키기 위해 유동성을 증가시키면 브릿징 위험이 증가한다. 따라서 플럭스 분사량, 예열 온도, 솔더 온도의 균형을 유지하여 충분한 충전과 안정된 표면장력 유지사이의 공정 지표를 설정하는 것이 핵심이다.

제 4 절 셀렉티브 솔더링 관련 기존 선행연구 고찰

셀렉티브 솔더링은 웨이브 솔더링의 단점을 보완하는 기술로 발전하면서, 2000년대 이후 플럭스 반응, 열전달 제어, 납의 유동 해석 등 다양한 관점에서 연구가 진행되어 왔다. 해외에서는 Anson(2004)이 솔더 온도와 노즐 조건에 따른 필렛 형상 변화를 분석하였고, Terry Munson(2006)은 플럭스 활성화 제 조성과 농도가 젖음성 및 잔류물 형상에 미치는 영향을 규명하였다.

Diepstraten(2015)은 고다층 PCB에서 열용량 증가로 인한 온도 불균형이 홀 충전 품질 저하의 주요 원인을 제시했으며, Tolla(2016)는 다구찌 실험법(DOE)을 적용하여 플럭스 분사량, 솔더 온도, 질소 농도 간의 상호작용이 품질에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

국내에서는 문기주 외(2003)가 자동화 솔더링 공정 변수와 품질 상관관계를 연구하였으며, 윤만중(2010)은 비접촉식 셀렉티브 솔더링 장비의 제어 기술을 개발하였다. 또한 이근원(2021)은 다층 PCB의 열전달 불균형 문제를 개선하기 위한 프리히터 제어 및 공정 안정화 방안을 제안하였다.

이상의 연구들은 플럭스 반응, 열전달, 납 유동성 등 개별 인자의 영향에 대한 기초 자료를 제공하였으나, 플럭스 분사량과 솔더 온도의 상호작용이 브릿징 및 홀 충전 품질에 미치는 복합적 영향을 실험적으로 규명한 연구는 제한적이었다.

따라서 본 연구는 선행연구의 이론적 토대를 바탕으로 플럭스와 솔더 온도의 상호작용 분석을 중심으로 셀렉티브 솔더링 공정을 실험적으로 평가하고, 브릿징 억제 및 홀 충전 품질 향상 기준을 정립하는 것을 목표로 한다.

제 3 장 연구 방법

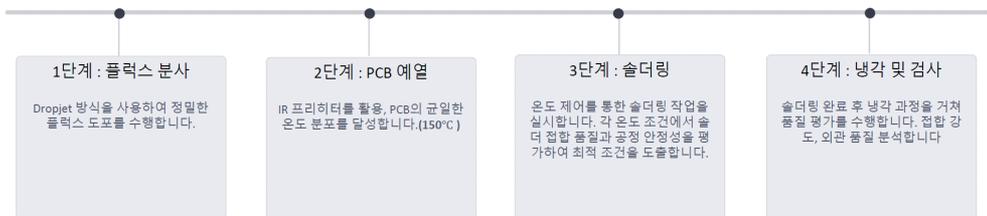
제 1 절 실험 방법

1. 실험 목표

본 연구의 목적은 고다층(High Multi-Layer) PCB에서 선택티브 솔더링 공정의 품질을 최적화하기 위해, 주요 공정 변수인 플럭스 분사량(Flux Volume)과 솔더 온도(Solder Temperature)의 상호작용이 브릿징 발생률(Bridging Rate)과 홀 충전율(Hole Fill Rate)에 미치는 영향을 정량적으로 규명하는 것이다. 이를 통해 IPC-A-610 Class 2 기준을 만족하는 최적 공정 조건을 도출하고, 고다층 PCB에 적합한 선택티브 솔더링 공정 표준화 지침(Selective Soldering Standard)을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

본 실험은 Apollo Robotics AF-4050A 선택티브 솔더링 장비를 이용하여 수행하였다. 전체 실험은 [그림 3-1]과 같이, 플럭스 분사(Fluxing), 예열(Preheating), 솔더링(Soldering), 냉각(Cooling) 및 검사의 4단계로 구성된다.



[그림 3-1] 선택티브 솔더링 실험 공정 흐름도

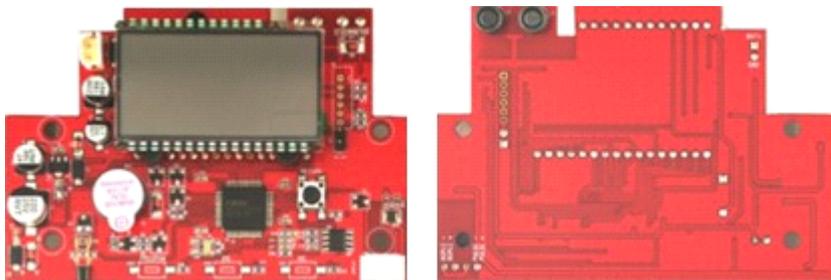
본 연구에서는 아래의 [표 3-1] 실험 조건을 조합하여, 각 조건별로 10개의 시료를 측정하였으며, 총 250개의 데이터를 확보하였다, 이를 바탕으로 플렉스 분사량과 솔더링 온도 간의 상호작용 효과를 정량적으로 평가하고 최적 공정 조건을 도출하였다.

[표 3-1] 실험 조건 요약 및 변수 설정

구분	플렉스 분사량 (ml/cycle)	솔더 온도(°C)	에열온도(°C)	평가 항목
1	3	230	150	홀 충전율(%) / 브릿징 발생률(%)
2	5	240	150	
3	7	250	150	
4	10	260	150	
5	15	270	150	

3. 실험시료 및 측정 장비

본 연구에서는 IoT Gas Meter Module(가스 검침기용 PCB)를 시험 시료로 사용하였다. 해당 PCB는 10-Layer 고다층 구조를 가지며, 내부 구리층의 열 흡수율이 높아 열전달 불균형에 따른 홀 충전 불량 발생하기 쉬운 구조적 특성을 지닌다[그림 3-2].



[그림 3-2] 시험 시료 (Iot Gas Meter Module)

[그림 3-3]은 본 연구에서 사용된 SEC社 X-eye 5100 X-ray 검사 장비를 나타낸 것이다.

본 장비는 비파괴 검사 방식으로 시료 내부의 납 충전 상태 및 브릿징 결함을 정밀하게 관찰할 수 있으며, 약 10 μ m 수준의 해상도와 다축(Tilt) 제어 기능을 갖추고 있다.



[그림 3-3] 측정 장비 (SEC社 X-eye 5100 X-ray)

실제 측정 절차는 [그림 3-4]와 같이 ①테이블 원점이동 → ②X-ray 워밍업 및 포커싱 → ③테이블 원점 복귀 → ④시료 장착 → ⑤X-ray 투과 촬영 → ⑥홀 충진율 및 결함 분석의 순서로 진행된다.

각 시료는 동일한 배율과 노출 조건에서 촬영하였으며, 촬영된 영상은 전용 소프트웨어(X-eye Analyzer)를 이용해 홀 내부의 납 충전율과 브릿징 결함을 정량적으로 평가하였다. 이러한 측정 절차는 동일 시료 간 측정 오차를 최소화하고, 공정 변수(플럭스 분사량 및 슬더 온도)에 따른 품질 특성 변화를 객관적으로 비교할 수 있도록 분석하였다.



[그림 3-4] SEC社 X-eye 5100 X-ray 측정 절차 모식도

본 실험에 사용된 솔더는 [표 3-2]와 같이, SAC305 (Sn-3.0Ag-0.5Cu) 무연 합금으로, 전자기기 및 고다층 PCB용 납땜 공정에서 가장 널리 사용되는 솔더이다. SAC305는 우수한 젖음성(Wettability), 적절한 기계적 강도, 그리고 장기 신뢰성(Long-term Reliability)을 확보할 수 있는 대표적인 무연 솔더이다.

[표 3-2] 솔더 합금의 구성 성분 및 물리적 특성

구분	성분 (wt%)	물리적 특성	비고
Sn(주성분)	96.5	용점 217°C/비중 7.4g/cm ³	무연 솔더 기반 금속
Ag(은)	3.0	젖음성 향상, 전도율 증가	고급 무연 합금에 사용
Cu(구리)	0.5	합금 강도 및 피로 저항 향상	접합 신뢰성 강화

(IPC J-STD-006C, 'Requirements for Electronic Grade Solder Alloys', 2023)

제 4 장 연구 결과

제 1 절 실험 데이터 결과

본 절에서는 선택티브 솔더링 공정에서 수행한 총 250개의 시료 데이터를 분석하였다. 모든 실험은 예열온도 150 °C, SAC305(Sn-3.0Ag-0.5Cu) 솔더 조건에서 수행되었으며, 주요 변수는 플럭스 분사량(Flux Volume)과 솔더링 온도(Solder Temperature)로 설정하였다. 플럭스 분사량은(3 / 5 / 7 / 10 / 15 ml/cycle), 솔더 온도는(230 / 240 / 250 / 260 / 270 °C)로 설정하였으며, 각 조합별로 10회 반복 측정을 수행하여 총 25개의 조건(5 x 5)에서 250개의 데이터를 확보하였다.

평가 항목은 홀 충전율(Hole Fill Rate) 및 브릿징 발생률(Bridging Rate)이며, 모든 시료는 동일한 예열 조건(150 °C)하에서 실험하여 열공급의 균일성을 확보하였다.

각 조합별 시료는 X-ray 검사를 통해 납의 충전 상태와 브릿징 결함을 정량화하였으며, 이를 통해 개별 변수의 주효과(Main Effect)와 상호작용 효과(Interaction Effect)를 동시에 평가하였다.

각 실험 조건에서 측정된 홀 충전율과 브릿징 발생률의 수치는 [표 4-1], [표 4-2] 및 [표 4-3]에 정리하였다. 또한, 각 표의 결과를 시각적으로 비교하기 위해 플럭스 분사량 및 솔더 온도 변화에 따른 홀 충전율 그래프를 함께 제시하였다.

1. 시료별 측정 데이터 결과

[표 4-1] 셀렉티브 솔더링 공정 실험 데이터 (시료 #1-#84)

SPL No.	Flux 분사량	Solder Temp.	홀 충전율	브릿징 발생률	SPL No.	Flux 분사량	Solder Temp.	홀 충전율	브릿징 발생률
1	3	230	88.5	1	43	3	270	55.4	0
2	3	230	73.8	1	44	3	270	62.1	0
3	3	230	71.1	0	45	3	270	68.5	0
4	3	230	68.9	0	46	3	270	62.2	0
5	3	230	54.2	0	47	3	270	69.5	0
6	3	230	49.8	0	48	3	270	86.3	0
7	3	230	47.5	0	49	3	270	98.5	0
8	3	230	42.1	0	50	3	270	93.3	0
9	3	230	42.0	0	51	5	230	98.3	0
10	3	230	42.2	0	52	5	230	97.1	0
11	3	240	91.1	0	53	5	230	89.3	0
12	3	240	73.2	1	54	5	230	88.1	0
13	3	240	71.1	1	55	5	230	93.2	0
14	3	240	68.8	0	56	5	230	79.3	0
15	3	240	45.3	0	57	5	230	68.6	0
16	3	240	45.0	0	58	5	230	73.3	0
17	3	240	42.1	0	59	5	230	74.5	0
18	3	240	49.0	0	60	5	230	75.1	0
19	3	240	51.0	0	61	5	240	84.3	0
20	3	240	53.3	0	62	5	240	94.0	0
21	3	250	96.2	0	63	5	240	78.8	0
22	3	250	96.4	0	64	5	240	91.3	0
23	3	250	66.0	0	65	5	240	94.8	0
24	3	250	61.0	0	66	5	240	96.0	0
25	3	250	39.8	0	67	5	240	88.8	0
26	3	250	42.4	0	68	5	240	73.3	0
27	3	250	42.1	0	69	5	240	64.5	0
28	3	250	44.6	0	70	5	240	66.2	0
29	3	250	52.3	0	71	5	250	98.1	0
30	3	250	49.8	0	72	5	250	98.2	0
31	3	260	96.3	0	73	5	250	98.3	0
32	3	260	88.9	0	74	5	250	97.9	0
33	3	260	94.5	0	75	5	250	96.3	0
34	3	260	78.8	0	76	5	250	91.1	0
35	3	260	91.1	0	77	5	250	92.3	0
36	3	260	92.2	0	78	5	250	86.2	0
37	3	260	96.3	0	79	5	250	88.9	1
38	3	260	84.2	0	80	5	250	92.5	1
39	3	260	78.5	0	81	5	260	78.8	0
40	3	260	66.3	0	82	5	260	84.5	0
41	3	270	61.2	0	83	5	260	98.2	0
42	3	270	66.3	0	84	5	260	97.3	0

[표 4-2] 셀렉티브 솔더링 공정 실험 데이터 (시료 #85-#168)

SPL No.	Flux 분사량	Solder Temp.	홀 충전율	브릿징 발생률	SPL No.	Flux 분사량	Solder Temp.	홀 충전율	브릿징 발생률
85	5	260	98.1	0	127	7	250	99.4	0
86	5	260	79.9	0	128	7	250	100.0	0
87	5	260	98.4	0	129	7	250	99.1	0
88	5	260	88.9	0	130	7	250	100.0	0
89	5	260	97.2	0	131	7	260	100.0	0
90	5	260	98.1	0	132	7	260	100.0	0
91	5	270	98.1	0	133	7	260	100.0	0
92	5	270	97.2	0	134	7	260	100.0	0
93	5	270	91.1	0	135	7	260	100.0	0
94	5	270	98.0	0	136	7	260	100.0	0
95	5	270	91.1	0	137	7	260	100.0	0
96	5	270	90.3	0	138	7	260	100.0	0
97	5	270	89.8	0	139	7	260	100.0	0
98	5	270	93.0	0	140	7	260	100.0	0
99	5	270	79.1	0	141	7	270	100.0	0
100	5	270	68.9	0	142	7	270	100.0	0
101	7	230	98.1	0	143	7	270	100.0	0
102	7	230	97.8	0	144	7	270	100.0	0
103	7	230	93.4	0	145	7	270	100.0	0
104	7	230	92.1	0	146	7	270	98.8	0
105	7	230	93.0	0	147	7	270	97.3	0
106	7	230	88.1	0	148	7	270	99.1	0
107	7	230	79.1	0	149	7	270	100.0	0
108	7	230	82.3	0	150	7	270	100.0	0
109	7	230	86.4	0	151	10	230	91.1	0
110	7	230	79.8	0	152	10	230	96.3	0
111	7	240	98.0	0	153	10	230	91.1	0
112	7	240	97.7	0	154	10	230	88.3	0
113	7	240	98.1	0	155	10	230	91.1	0
114	7	240	98.6	0	156	10	230	89.6	0
115	7	240	98.4	0	157	10	230	94.0	0
116	7	240	89.8	0	158	10	230	97.7	0
117	7	240	92.3	0	159	10	230	51.1	0
118	7	240	96.3	0	160	10	230	63.3	0
119	7	240	98.2	0	161	10	240	98.0	0
120	7	240	98.1	0	162	10	240	98.1	0
121	7	250	100.0	0	163	10	240	98.1	0
122	7	250	100.0	0	164	10	240	97.7	0
123	7	250	100.0	0	165	10	240	94.2	0
124	7	250	100.0	0	166	10	240	98.0	0
125	7	250	98.4	0	167	10	240	98.4	0
126	7	250	97.1	0	168	10	240	97.0	0

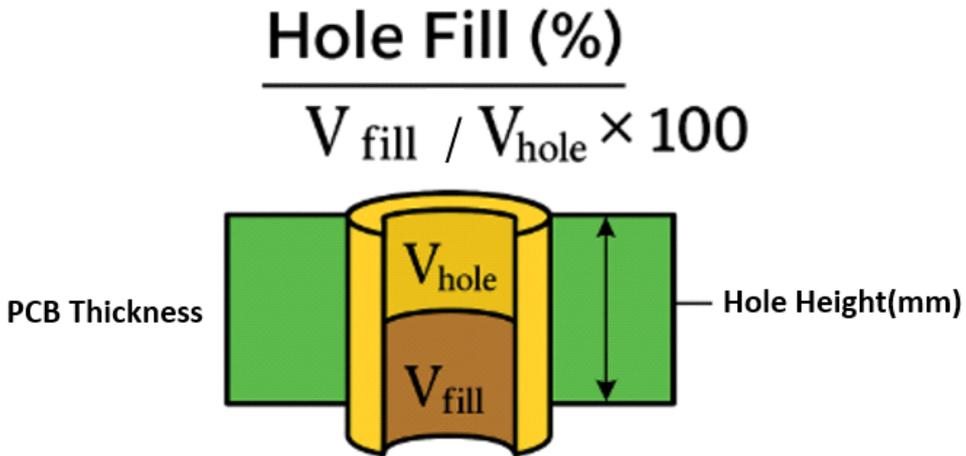
[표 4-3] 셀렉티브 솔더링 공정 실험 데이터 (시료 #169-#250)

SPL No.	Flux 분사량	Solder Temp.	홀 충전율	브릿징 발생률	SPL No.	Flux 분사량	Solder Temp.	홀 충전율	브릿징 발생률
169	10	240	97.7	0	211	15	240	98.0	0
170	10	240	89.9	0	212	15	240	98.4	0
171	10	250	100.0	0	213	15	240	98.3	0
172	10	250	100.0	0	214	15	240	98.6	0
173	10	250	99.9	0	215	15	240	84.1	0
174	10	250	98.7	0	216	15	240	98.1	0
175	10	250	91.1	0	217	15	240	98.5	0
176	10	250	96.7	0	218	15	240	98.6	0
177	10	250	98.0	0	219	15	240	99.1	0
178	10	250	98.1	0	220	15	240	94.2	0
179	10	250	98.1	0	221	15	250	100.0	0
180	10	250	99.7	0	222	15	250	99.4	0
181	10	260	100.0	0	223	15	250	94.1	0
182	10	260	100.0	0	224	15	250	93.3	0
183	10	260	99.3	0	225	15	250	89.9	0
184	10	260	97.7	0	226	15	250	88.1	0
185	10	260	98.1	0	227	15	250	89.4	0
186	10	260	99.3	0	228	15	250	86.1	0
187	10	260	98.1	0	229	15	250	84.3	0
188	10	260	99.1	0	230	15	250	81.1	0
189	10	260	100.0	0	231	15	260	100.0	0
190	10	260	100.0	0	232	15	260	100.0	0
191	10	270	93.0	0	233	15	260	100.0	0
192	10	270	92.4	0	234	15	260	100.0	0
193	10	270	92.1	0	235	15	260	100.0	0
194	10	270	92.3	0	236	15	260	100.0	0
195	10	270	89.1	0	237	15	260	100.0	0
196	10	270	90.1	0	238	15	260	100.0	0
197	10	270	90.3	0	239	15	260	100.0	0
198	10	270	90.4	0	240	15	260	100.0	0
199	10	270	91.1	0	241	15	270	100.0	0
200	10	270	87.6	0	242	15	270	99.8	0
201	15	230	52.3	0	243	15	270	100.0	0
202	15	230	54.1	0	244	15	270	98.3	0
203	15	230	79.9	0	245	15	270	97.0	0
204	15	230	83.1	0	246	15	270	91.1	0
205	15	230	86.0	0	247	15	270	96.5	0
206	15	230	85.5	0	248	15	270	97.0	0
207	15	230	89.1	0	249	15	270	97.1	0
208	15	230	74.2	0	250	15	270	100.0	0
209	15	230	96.0	0					
210	15	230	91.1	0					

실험은 플럭스 분사량(3 / 5 / 7 / 10 / 15 ml/cycle)과 솔더 온도(230 / 240 / 250 / 260 / 270 °C)의 조합으로 수행되었으며, 각 조합별로 10 개의 시료를 대상으로 홀 충전 상태를 고해상도로 관찰하였다.

X-ray 영상은 비파괴 검사 방식으로, 납의 내부 충전 형태, 브릿징 등의 결함 여부를 정밀하게 확인하기 위해 활용되었다. 모든 영상은 동일한 배율과 조명 조건에서 촬영되었으며, 솔더 온도 상승에 따른 홀 충전율의 변화를 직접적으로 비교할 수 있도록 배열하였다.

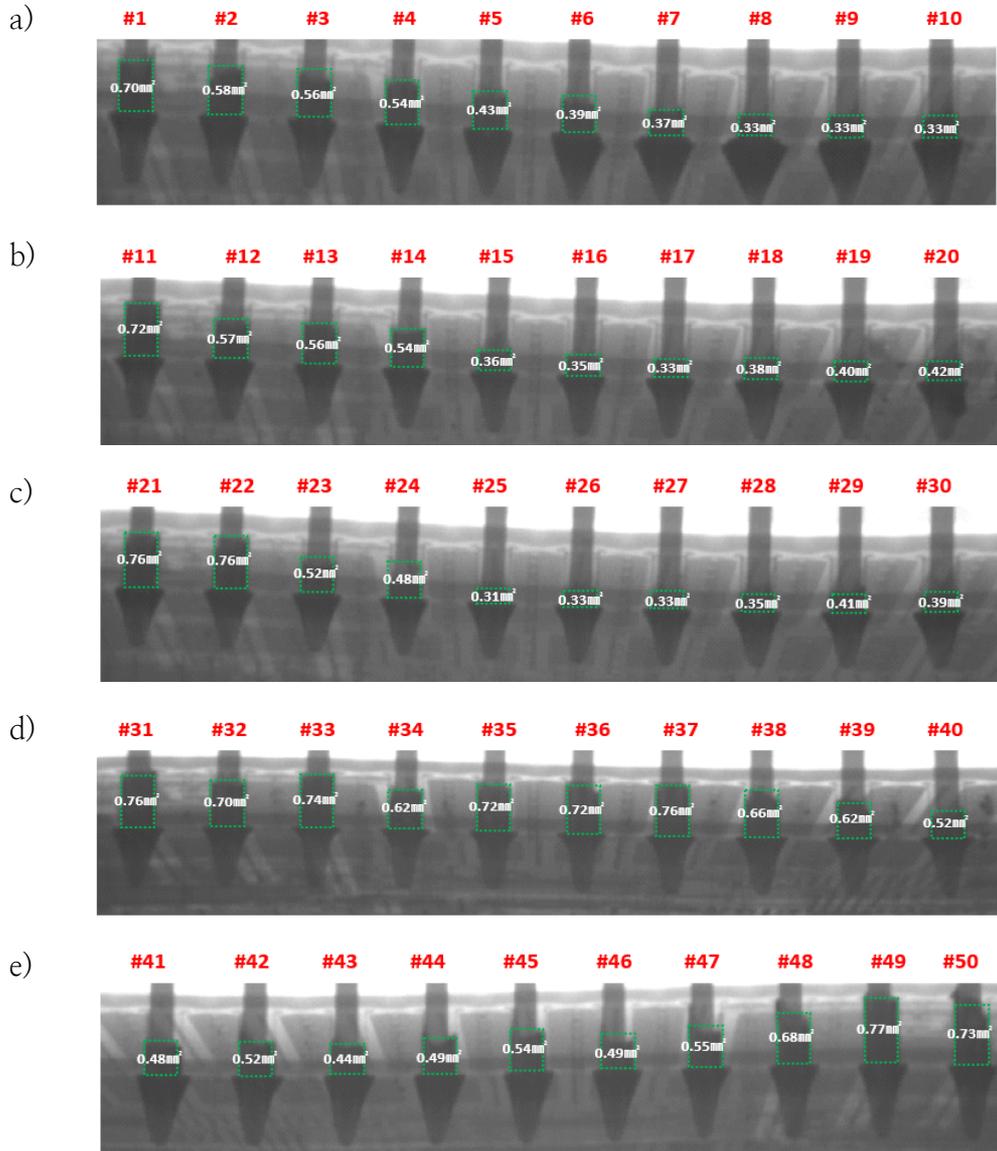
이러한 시각적 결과를 바탕으로, 다음 장에서는 플럭스 분사량 및 솔더 온도 변화가 홀 충전 품질에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 그래프 결과를 제시하였다. 이어지는 [그림 4-1]은 홀 충전율 계산의 근거가 되는 산출식으로, X-ray 영상에서 측정된 납 충전 부피를 기반으로 홀 내부의 충전율을 정량화하는 방법을 나타낸 것이다.



[그림 4-1] PCB 홀 충전율 모식도

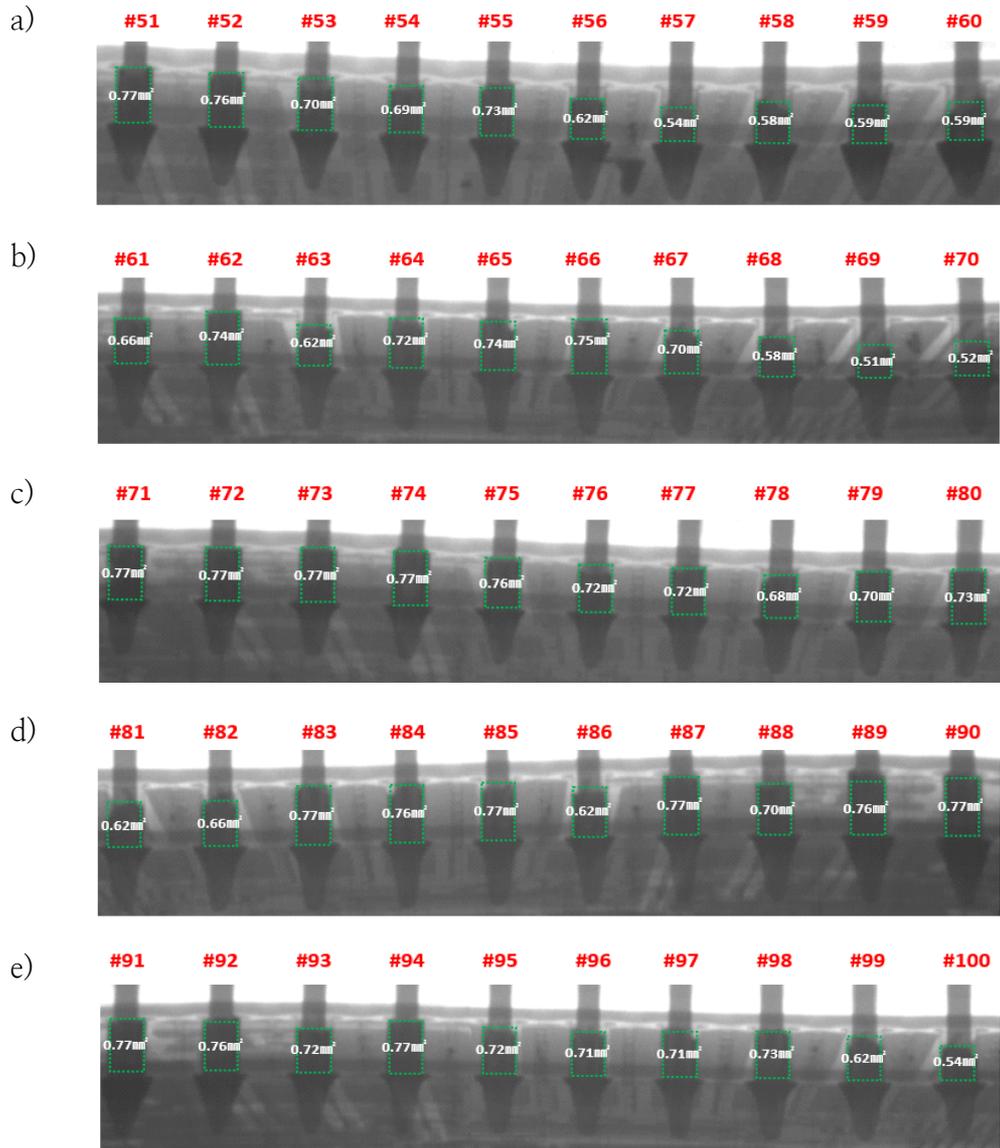
다음 [그림 4-2], [그림 4-3], [그림 4-4], [그림 4-5], [그림 4-6]은 선택 티브 솔더링 공정에서 수행한 총 250개의 시료에 대한 X-ray 측정 결과 이미지를 나타낸 것이다.

2. 홀 충전율 및 브릿징 발생률 실험 결과



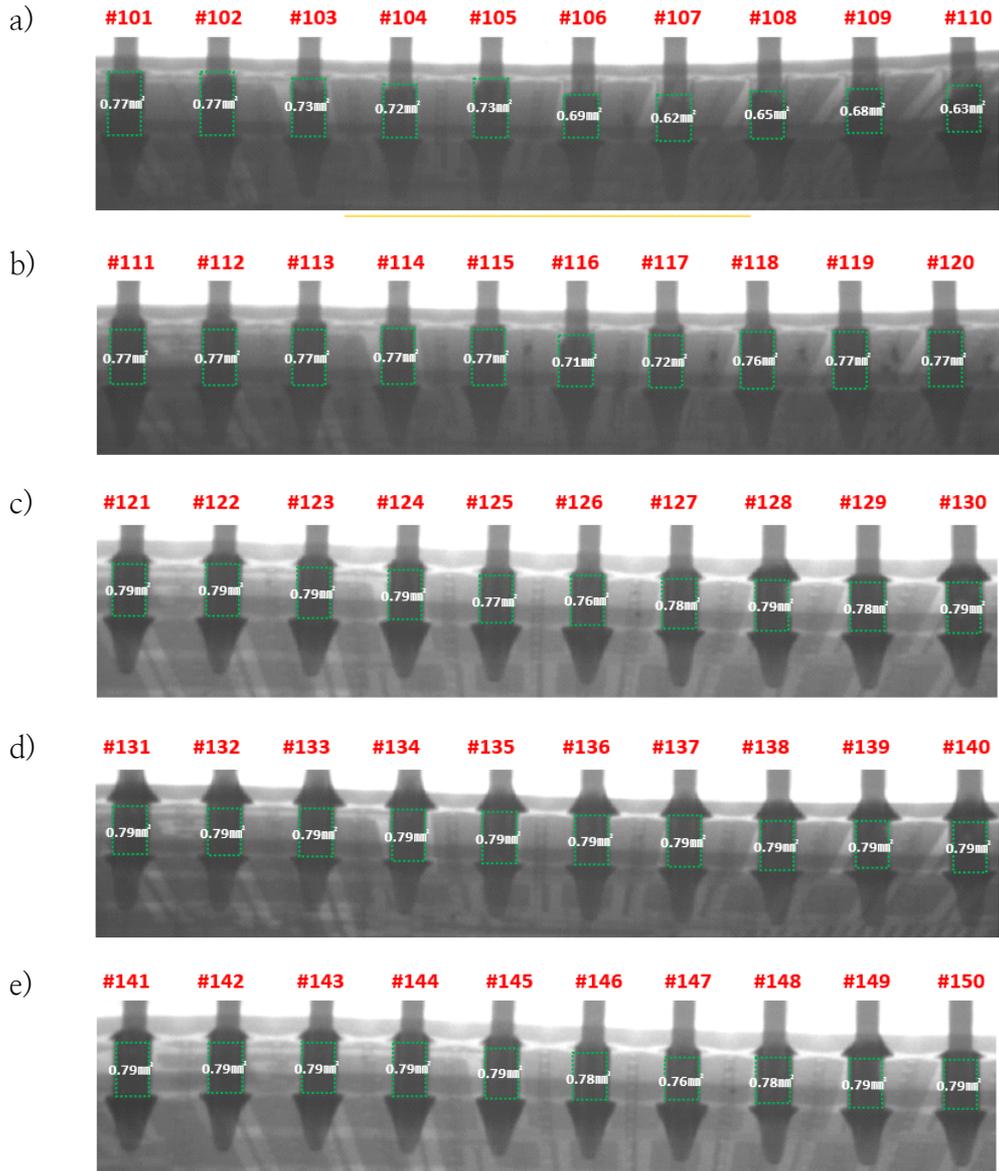
[그림 4-2] X-RAY 충전율 사진 (플릭스 3ml/cycle 조건)

- a) 솔더 온도 230 °C 조건
- b) 솔더 온도 240 °C 조건
- c) 솔더 온도 250 °C 조건
- d) 솔더 온도 260 °C 조건
- e) 솔더 온도 270 °C 조건



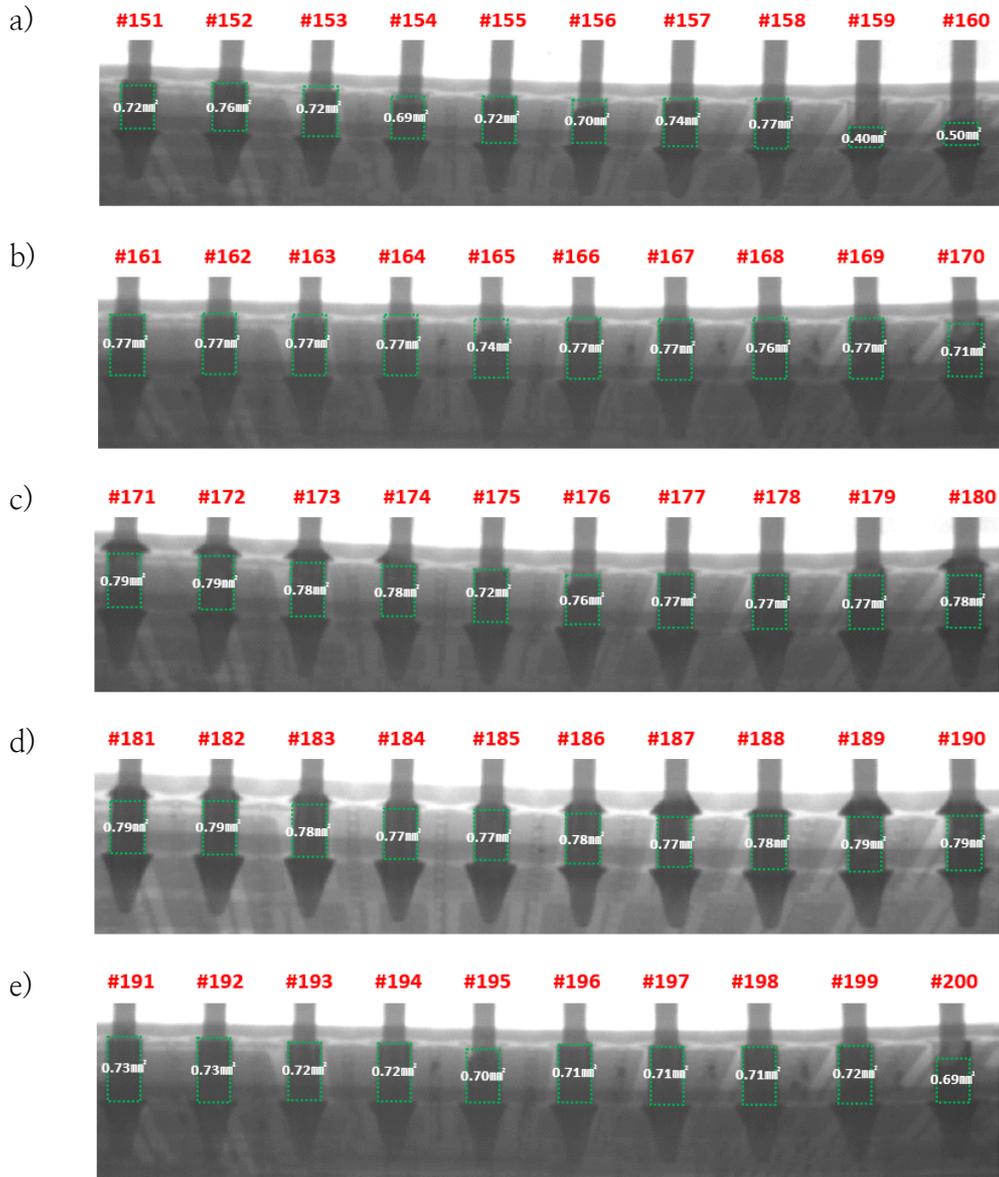
[그림 4-3] X-RAY 충전율 사진 (플럭스 5ml/cycle 조건)

- a) 솔더 온도 230 °C 조건
- b) 솔더 온도 240 °C 조건
- c) 솔더 온도 250 °C 조건
- d) 솔더 온도 260 °C 조건
- e) 솔더 온도 270 °C 조건



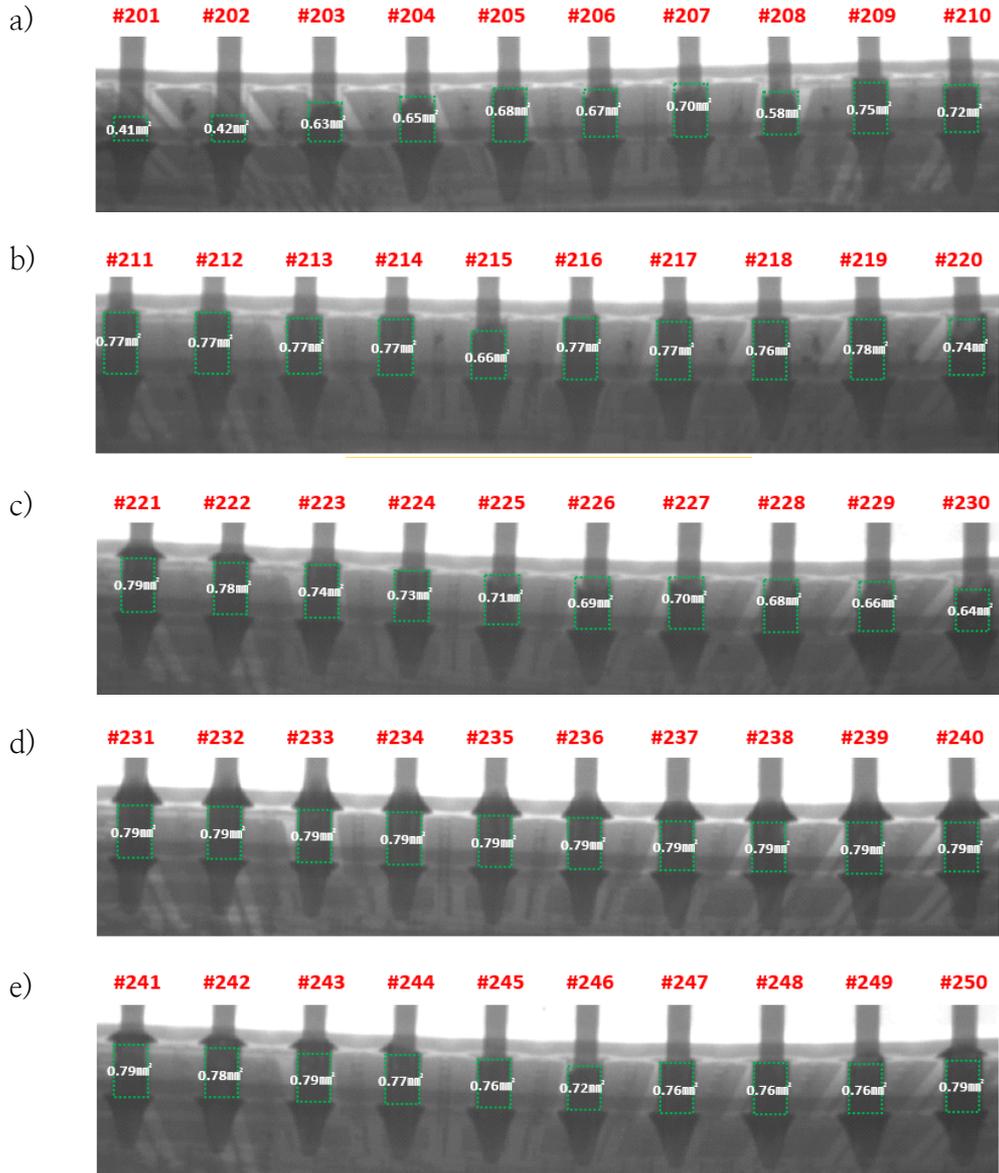
[그림 4-4] X-RAY 충전율 사진 (플럭스 7ml/cycle 조건)

- a) 솔더 온도 230 °C 조건
- b) 솔더 온도 240 °C 조건
- c) 솔더 온도 250 °C 조건
- d) 솔더 온도 260 °C 조건
- e) 솔더 온도 270 °C 조건



[그림 4-5] X-RAY 충진율 사진 (플릭스 10ml/cycle 조건)

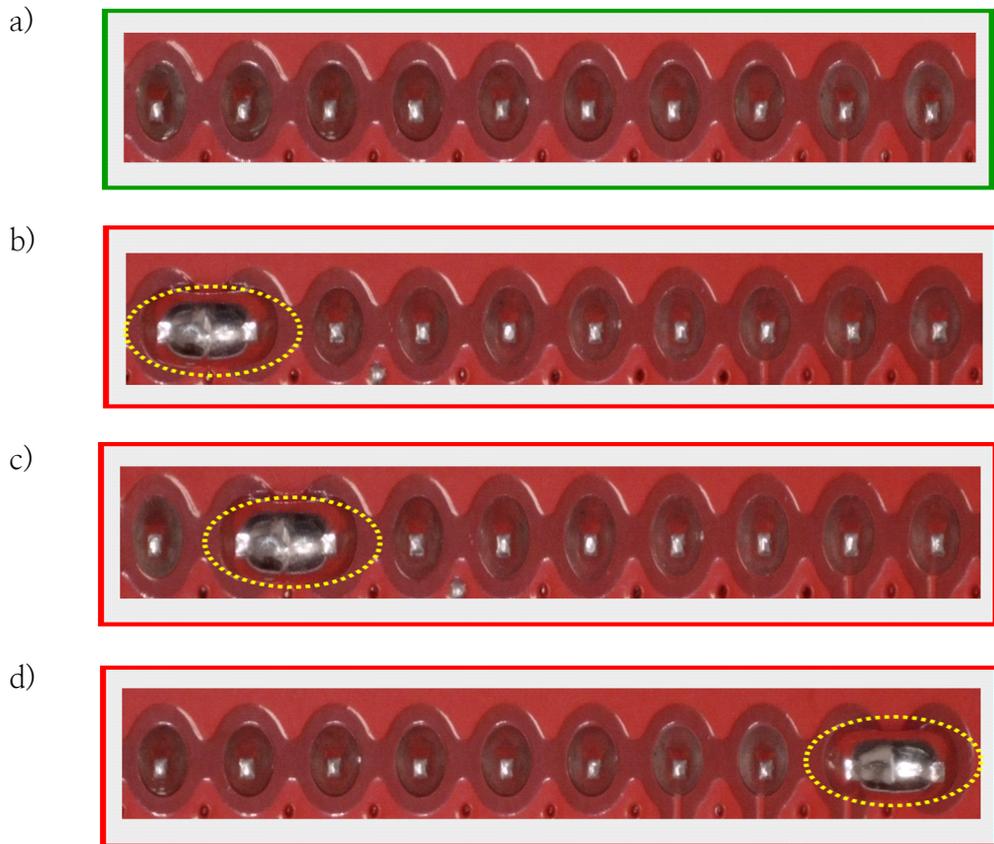
- a) 솔더 온도 230 °C 조건
- b) 솔더 온도 240 °C 조건
- c) 솔더 온도 250 °C 조건
- d) 솔더 온도 260 °C 조건
- e) 솔더 온도 270 °C 조건



[그림 4-6] X-RAY 충진율 사진 (플럭스 15ml/cycle 조건)

- a) 솔더 온도 230 °C 조건
- b) 솔더 온도 240 °C 조건
- c) 솔더 온도 250 °C 조건
- d) 솔더 온도 260 °C 조건
- e) 솔더 온도 270 °C 조건

[그림 4-7]은 선택티브 솔더링 공정 중 일부 조건에서 발생한 브릿징 (Bridging) 불량 시료의 대표 예시를 나타낸 것이다. 대부분의 시료는 양호한 충진 품질을 보였으나, 플럭스 분사량이 3 ml/cycle 조건에서는 240 °C 이하 및 250 °C 조건에서도 부분적인 브릿징 결함이 관찰되었다. 이에 따라 본 절에서는 정상 시료와 브릿징 불량 시료를 비교하여 결함 발생 경향과 형상적 차이를 분석하였다.



[그림 4-7] 브릿징 발생 시료 비교사진

a) 표준시료

b) 플럭스 3ml/cycle, 솔더온도 230 °C 조건

c) 플럭스 3ml/cycle, 솔더온도 240 °C 조건

d) 플럭스 5ml/cycle, 솔더온도 250 °C 조건

3. 조건별 평균 홀 충진율 및 브릿징 발생률 결과 요약

본 절에서는 플릭스 분사량과 솔더 온도의 변화가 홀 충진율과 브릿징 발생률에 미치는 전반적인 경향을 비교·요약하였다.

각 조건별 평균값을 정리하여 플릭스 분사량에 따른 품질 변화, 솔더 온도에 따른 영향, 그리고 두 인자의 상호작용 효과를 분석하기 위한 기초 데이터를 나타내었다. 아래 [표 4-4], [표 4-5], [표 4-6], [표 4-7], [표 4-8], [표 4-9]는 플릭스 분사량 및 솔더 온도 조건별 평균 홀 충진율과 브릿징 발생률을 요약한 것이다.

[표 4-4] 플릭스 분사량에 따른 평균 홀 충진율 요약표

구분	플릭스 분사량(ml/cycle)	평균 홀 충진율(%)
1	3	67.02
2	5	88.49
2	7	96.89
4	10	94.02
5	15	92.79

[표 4-5] 솔더 온도에 따른 평균 홀 충진율 요약표

구분	솔더 온도(°C)	평균 홀 충진율(%)
1	230	79.03
2	240	86.40
2	250	88.20
4	260	95.56
5	270	90.00

[표 4-6] 이원 분산분석 결과에 따른 홀 충진율 요약표

솔더 온도 \ 플릭스분사	3ml/cycle	5ml/cycle	7ml/cycle	10ml/cycle	15ml/cycle
	230°C	58.01 %	83.68 %	89.01 %	85.36 %
240°C	58.99 %	83.20 %	96.55 %	96.71 %	96.59 %
250°C	59.06 %	93.98 %	99.40 %	98.03 %	90.57 %
260°C	86.71 %	91.94 %	100.0 %	99.16 %	100.0 %
270°C	72.33 %	89.66 %	99.52 %	90.84 %	97.68 %

[표 4-7] 플렉스 분사량에 따른 평균 브릿징 발생률 요약표

구분	플렉스 분사량(ml/cycle)	평균 브릿징 발생률(%)
1	3	0.18
2	5	0.10
2	7	0.00
4	10	0.00
5	15	0.00

[표 4-8] 솔더 온도에 따른 평균 브릿징 발생률 요약표

구분	솔더 온도(°C)	평균 브릿징 발생률(%)
1	230	0.15
2	240	0.12
2	250	0.08
4	260	0.00
5	270	0.00

[표 4-9] 이원 분산분석 결과에 따른 브릿징 발생률 요약표

솔더 온도 \ 플렉스분사	3ml/cycle	5ml/cycle	7ml/cycle	10ml/cycle	15ml/cycle
	230°C	0.20 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
240°C	0.20 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
250°C	0.00 %	0.20 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
260°C	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
270°C	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

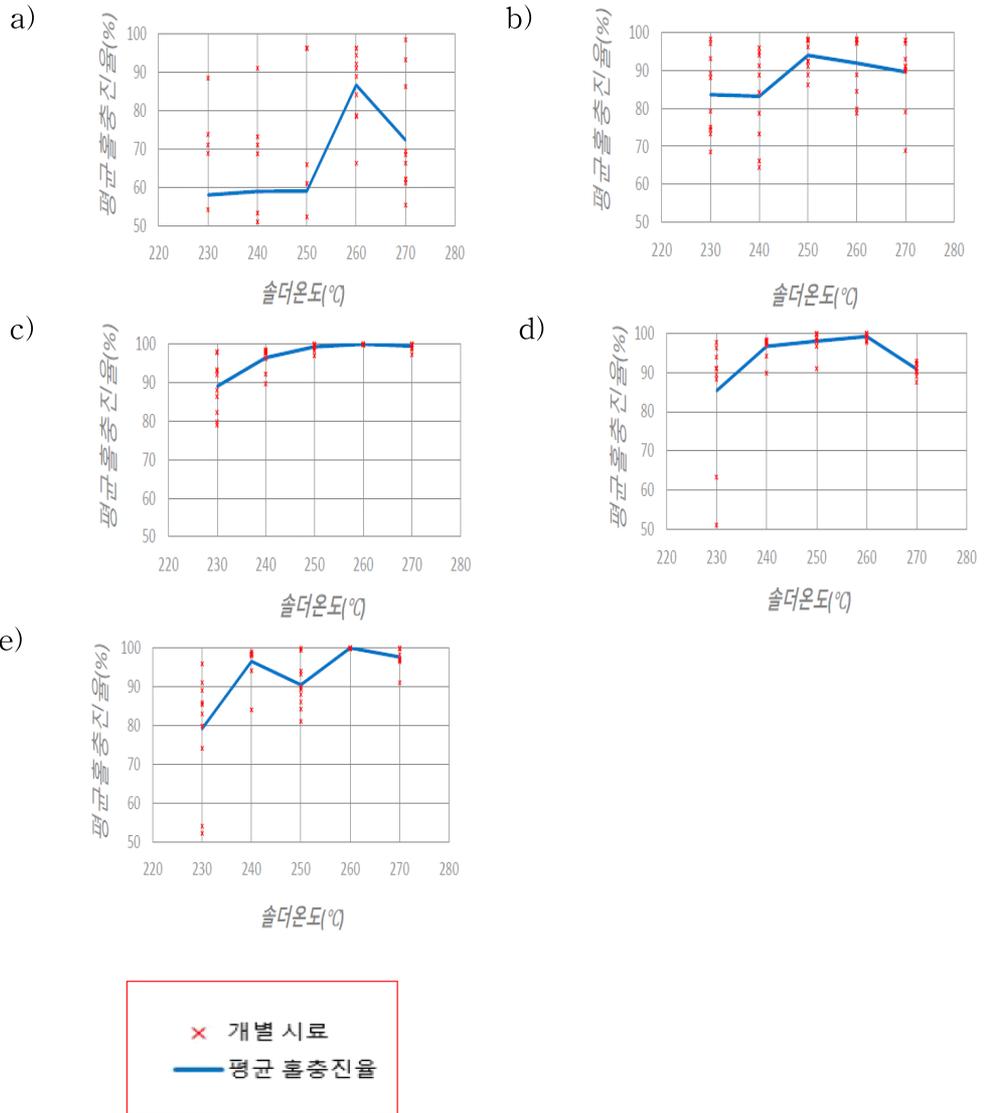
제 2 절 실험 그래프 결과

본 절에서는 앞서 제시한 [표 4-4], [표 4-5], [표 4-6], [표 4-7], [표 4-8], [표 4-9]의 실험 데이터를 기반으로, 플럭스 분사량과 솔더 온도 변화에 따른 홀 충전율 및 브릿징 발생률의 변화를 그래프로 시각화하였다. 각 그래프는 변수별 평균값의 추세를 비교하여, 공정 조건 변화가 품질 특성(충진율, 브릿징률)에 미치는 영향을 직관적으로 확인할 수 있도록 구성하였다. 이를 통해 플럭스 분사량이 증가할 때의 충전율 향상 경향, 솔더 온도 변화에 따른 최적 온도 범위, 그리고 두 인자 간 상호작용 효과를 시각적으로 분석하였다.

1. 플럭스 분사량에 따른 홀 충전율 분석

[그림 4-8]은 플럭스 분사량을 3 ~ 15 ml/cycle으로 변화시키며, 솔더 온도 조건별로 측정된 홀 충전율의 분포를 나타낸 것이다. 각 그래프는 동일한 예열 조건(150 °C)에서 수행된 실험 결과로, 온도 상승에 따른 충전율 변화 추세를 직관적으로 비교할 수 있도록 구성되었다.

플럭스 분사량이 7 ml/cycle 이상일 때, 대부분의 조건에서 95% 이상의 안정적인 충전율을 보였으며, 3 ml/cycle 조건에서는 저온(230 °C ~ 240 °C) 구간에서 충전율이 크게 저하되는 경향을 확인하였다.



[그림 4-8] 플릭스 분사량 조건별 흘 충진율 분포도

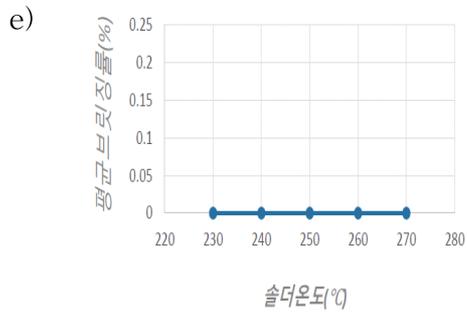
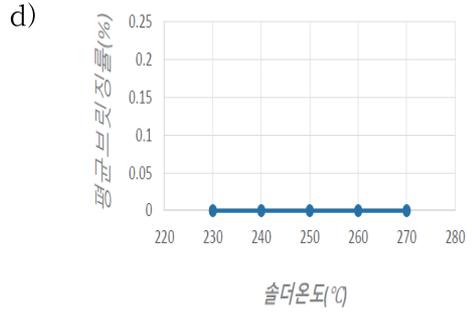
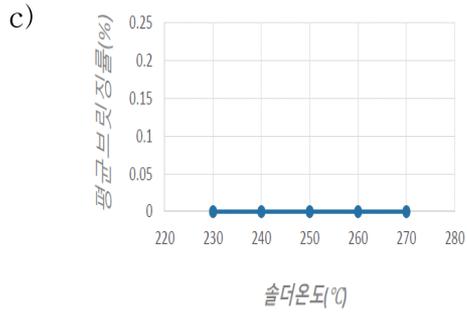
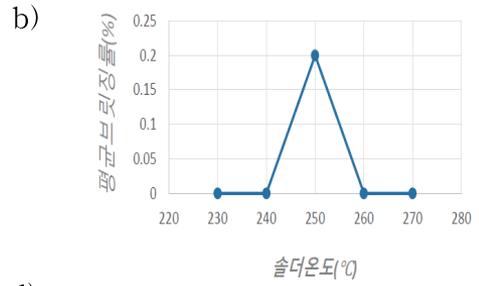
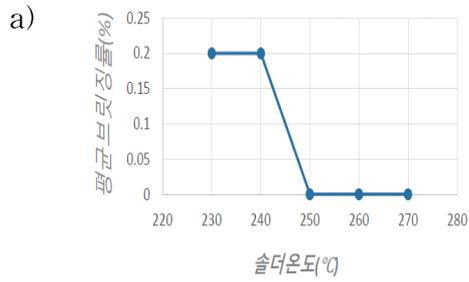
- a) 플릭스 3ml/cycle 조건
- b) 플릭스 5ml/cycle 조건
- c) 플릭스 7ml/cycle 조건
- d) 플릭스 10ml/cycle 조건
- e) 플릭스 15ml/cycle 조건

2. 플렉스 분사량에 따른 평균 브릿징률 분석

본 절에서는 플렉스 분사량 변화에 따른 브릿징 발생률의 변화를 분석하였다. 플렉스는 금속 표면의 산화막을 제거하고 젖음성을 향상시키는 역할을 하지만, 분사량이 과소할 경우 산화막이 완전히 제거되지 않아 납의 유동성이 저하되고, 이에 따라 리드와 패드 사이에 브릿징 결함이 발생할 수 있다.

실험 결과, 브릿징은 플렉스 분사량 3 ml/cycle 조건에서 일부 온도 구간(230 °C ~ 250 °C)에서만 부분적으로 확인되었으며, 5 ml/cycle 이상의 조건에서는 모든 온도 구간(230 °C ~ 270 °C)에서 브릿징이 발생하지 않았다. 이는 일정 수준 이상의 플렉스가 산화막 제거에 충분히 기여하여, 납의 표면장력 안정화와 젖음성 확보가 동시에 이루어졌기 때문으로 판단된다.

이러한 결과를 시각적으로 비교하기 위해, 플렉스 분사량에 따른 평균 브릿징률 변화를 [그림 4-9]에 그래프로 나타내었다.



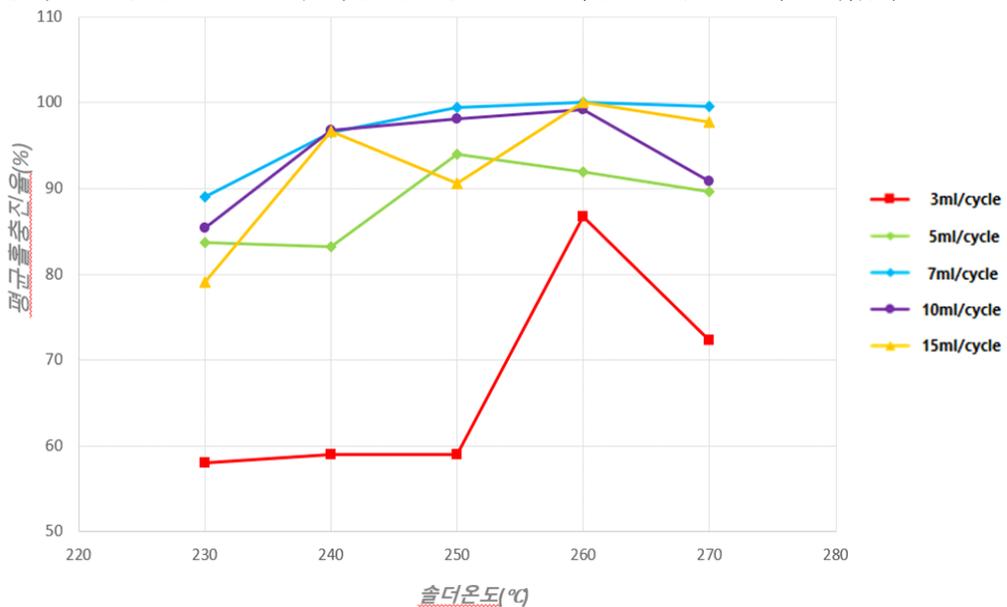
[그림 4-9] 플렉스 분사량 조건별 평균 브릿징률 변화 그래프

- a) 플렉스 3ml/cycle 조건
- b) 플렉스 5ml/cycle 조건
- c) 플렉스 7ml/cycle 조건
- d) 플렉스 10ml/cycle 조건
- e) 플렉스 15ml/cycle 조건

3. 플렉스·슬더 온도 조합에 따른 홀 충전율 변화 분석

본 절에서는 플렉스 분사량과 슬더 온도 간의 상호작용이 홀 충전율에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 플렉스 분사량이 증가할수록 평균 홀 충전율은 전반적으로 향상되는 경향을 보였으며, 특히 7 ml/cycle 이상에서는 모든 온도 구간에서 90% 이상의 안정적인 충전 품질을 확보하였다. 반면, 3 ml/cycle 조건에서는 플렉스 부족으로 인한 산화막 제거 불충분으로 240 °C ~ 250 °C 구간에서 낮은 충전율을 나타냈다. 또한, 250 °C ~ 260 °C 범위에서는 대부분의 조건에서 충전율이 최고점을 기록하여, 본 연구의 최적 온도 조건으로 확인되었다.

이와 같이 플렉스의 분사량이 일정 수준 이상 확보되고, 슬더 온도가 적정 범위(250 °C ~ 260 °C)로 유지될 때, 납의 모세관 상승력과 젖음성이 동시에 향상되어 홀 내부까지 완전한 충전이 이루어지는 것으로 분석된다. 이러한 상호작용 효과를 시각적으로 확인하기 위해, 아래 [그림 4-10]에 플렉스 분사량 및 슬더 온도 조합에 따른 홀 충전율 변화를 그래프로 나타내었다.



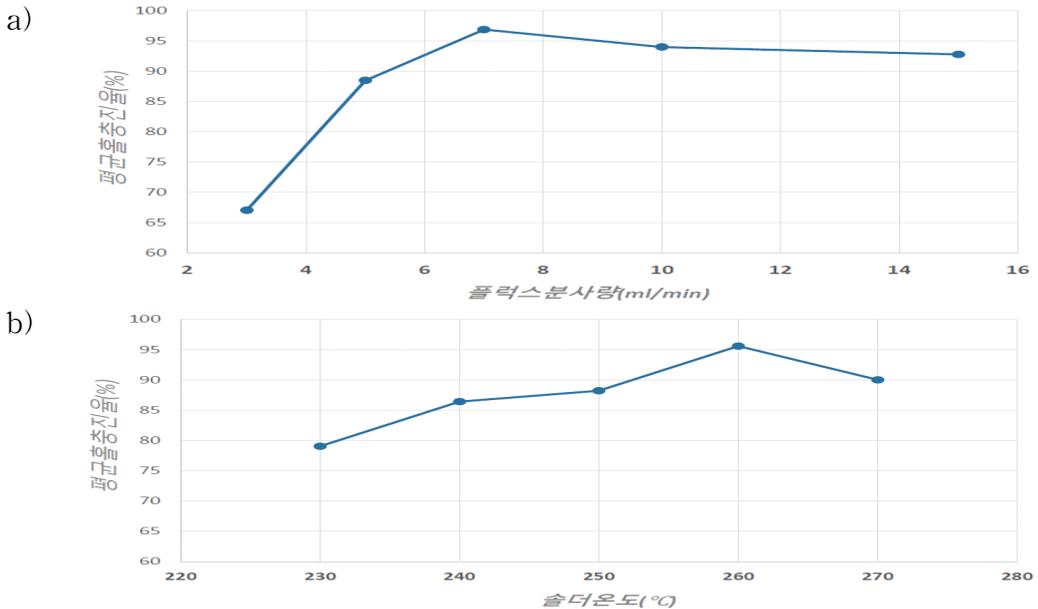
[그림 4-10] 플렉스·슬더 온도 조합에 따른 평균 홀 충전율 그래프

4. 플렉스·솔더 온도 변화에 따른 평균 홀 충전율 분석

본 절에서는 플렉스 분사량과 솔더 온도의 단일 변수 변화가 홀 충전율에 미치는 영향을 각각 독립적으로 분석하였다.

실험 결과, 플렉스 분사량이 증가할수록 충전율이 향상되는 경향을 보였으며, 7 ml/cycle 조건에서 약 96%로 최고 충전율을 기록하였다. 이는 플렉스 분사량 증가에 따라 산화막 제거가 충분히 이루어지고, 납의 젖음성과 모세관 유동성이 개선된 결과로 판단된다. 또한 솔더 온도 상승에 따라 충전율이 증가하여 260 °C 부근에서 최고치를 보였으나, 270 °C 이상에서는 과열로 인해 충전율이 다소 저하되었다. 따라서 본 연구에서는 플렉스 7 ml/cycle, 솔더 온도 260 °C 조건이 최적 조합으로 확인되었다.

이러한 결과를 바탕으로, 두 변수의 상호 작용을 시각적으로 통합하여 평균 홀 충전율 변화를 [그림 4-11]에 나타내었다.



[그림 4-11] 플렉스·솔더 온도 변화에 따른 평균 홀 충전율 그래프

a) 플렉스 분사량에 따른 평균 홀 충전율 그래프

b) 솔더 온도에 따른 평균 홀 충전율 그래프

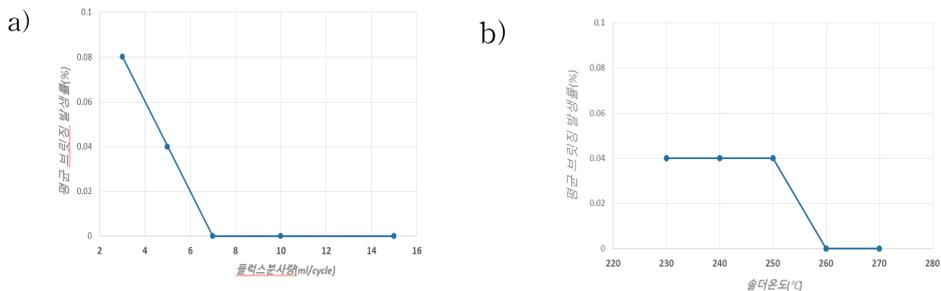
5. 플릭스·슬더 온도 변화에 따른 평균 브릿징 발생률 분석

본 절에서는 플릭스 분사량과 슬더 온도가 브릿징 결함 발생률에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 플릭스 분사량이 증가할수록 브릿징 발생률은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 3 ml/cycle 조건에서만 일부 결함이 확인되었으며, 5 ml/cycle 이상에서는 모든 온도 구간에서 브릿징이 발생하지 않았다.

이는 충분한 플릭스 도포로 인해 산화막이 안정적으로 제거되고, 납의 표면 장력과 젖음성이 균형을 이루어 결함이 안정화된 결과로 해석된다.

또한 슬더 온도 역시 250 °C ~ 260°C 범위에서 결함이 현저히 감소하였으며, 온도가 너무 낮은 230 °C ~ 240 °C 구간에서는 납의 점성이 높아져 리드 간 연결이 불안정해지는 경향이 나타났다. 이로써 플릭스와 온도 조건이 적절히 조합할 경우, 브릿징 발생률을 실질적으로 “0% 수준”까지 억제할 수 있음이 확인되었다.

이러한 결과를 종합적으로 비교한 그래프는 아래 [그림 4-12]에 나타내었다.



[그림 4-12] 플릭스·슬더 온도 변화에 따른 평균 브릿징 발생률 그래프

a) 플릭스 분사량에 따른 평균 브릿징 발생률 그래프

b) 슬더 온도 변화에 따른 평균 브릿징 발생률 그래프

6. 플렉스·솔더 온도 변화 홀 충전율 분포 분석

본 절에서는 총 250개의 시료 데이터를 기반으로, 플렉스 분사량과 솔더 온도 변화가 홀 충전 품질에 미치는 영향을 분포 형태로 비교·분석하였다.

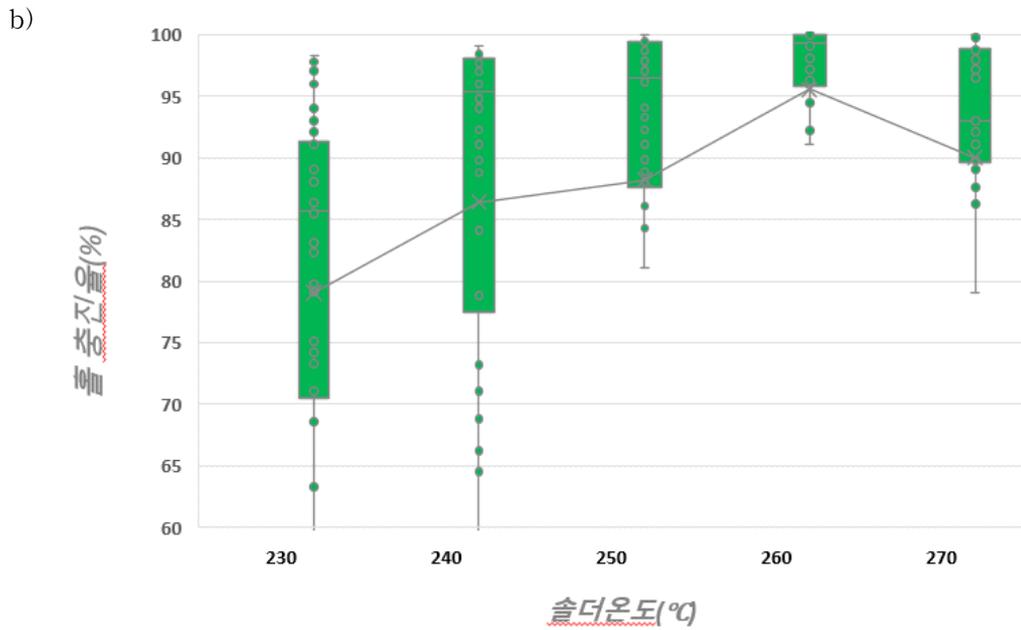
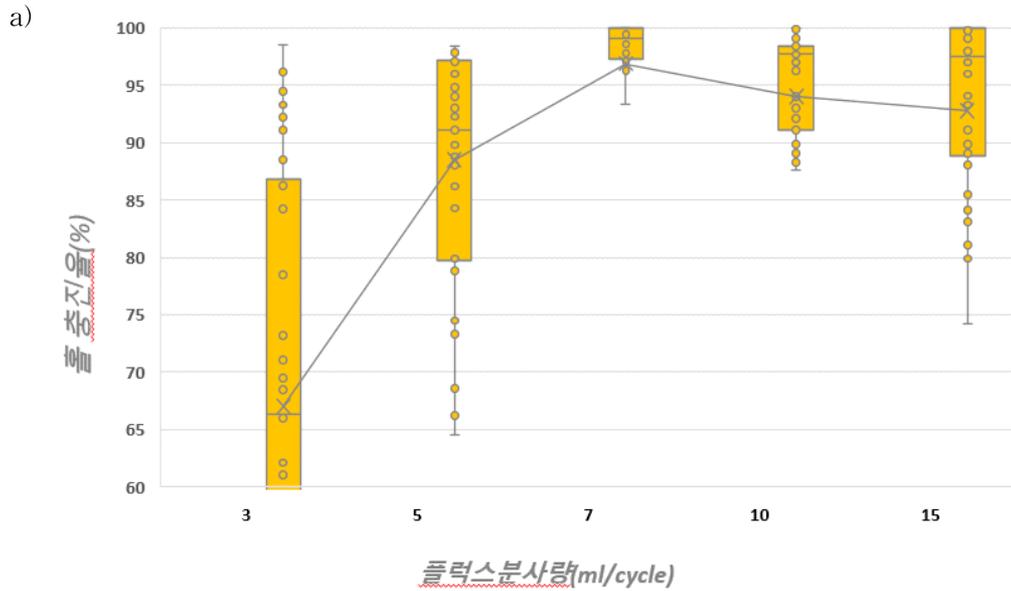
앞선 평균 그래프가 각 조건의 경향성을 나타냈다면, 본 절의 Box Plot 그래프는 개별 시료 간 편차와 분포 특성을 시각적으로 보여준다.

왼쪽 그래프는 플렉스 분사량 변화에 따른 홀 충전율 분포를 나타내며, 분사량이 증가할수록 충전율의 중앙값이 상승하고 데이터 분산이 감소하는 경향을 보였다.

특히 7 ml/cycle 이상의 구간에서는 95% 이상의 충전율이 안정적으로 유지되었으며, 3 ml/cycle 조건에서는 충전 불균일과 저충진 시료가 다수 확인되었다. 오른쪽 그래프는 솔더 온도 변화에 따른 홀 충전율 분포를 보여준다. 온도 상승에 따라 충전율이 개선되며, 250 °C ~ 260°C 구간에서 최고 품질 수준을 기록하였다.

반면, 230 °C 이하에서는 납의 점도가 높아 충전 불량, 270 °C 이상에서는 과열로 인한 일부 시료의 품질 저하가 관찰되었다. 이러한 결과는 플렉스의 적정 분사량과 솔더 온도의 균형이 충전 품질의 안정성을 확보하는 핵심 요인임을 입증한다.

따라서 플렉스 7 ml/cycle - 솔더 온도 260 °C 조건이 품질 및 공정 안정성 측면에서 최적 조건으로 판단되었다.



[그림 4-13] 플렉스·숄더 온도 변화에 따른 호흡진출율 분포도(Box Plot)

a) 플렉스 분사량에 따른 시료 250개 기반 호흡진출율 변화

b) 숄더 온도에 따른 시료 250개 기반 호흡진출율 변화

제 3 절 결과 해석 및 논의

본 연구에서는 플럭스 분사량과 솔더 온도를 주요 공정 변수로 설정하여, 셀렉티브 솔더링 시 홀 충전율(Hole Fill Rate)향상과 브릿징(Bridging)억제에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였다.

실험 결과, 두 변수 모두 솔더의 젖음성(Wettability)및 유동성(Fluidity)향상에 밀접하게 작용하였으며, 공정 안정성과 품질 균일도 향상에 결정적인 역할을 하는 것으로 확인되었다.

플럭스 분사량이 증가함에 따라 솔더 표면의 산화막이 효과적으로 제거되어 젖음성이 개선되었고, 이에 따라 납이 홀 내부로 원활하게 유입되어 충전율이 크게 향상되었다. 특히 7 ml/cycle - 260 °C 조건에서 가장 높은 충전 품질(평균 96 % 이상)이 확보되었으며, 이 구간이 품질 안정성과 공정 효율 측면에서 최적 조건으로 판단된다. 반면, 270 °C 이상에서는 과열로 인한 산화막 재형성과 점도 저하로 인해 납의 모세관 상승력이 감소하여 충전 품질이 다소 저하되는 경향을 보였다.

한편, 브릿징 결함은 플럭스 공급이 부족하거나 열에너지가 불충분할 때 주로 발생하였다. 3 ~ 5 ml/cycle, 230 ~ 250 °C 조건에서 일부 시료에서 결함이 관찰되었으나, 충분한 플럭스 공급과 적정 온도(260 °C 이상)에서는 납이 균일하게 분리되어 브릿징이 거의 발생하지 않았다. 이는 플럭스의 화학적 활성화로 솔더의 젖음성과 표면장력이 안정화되면서, 납이 리드·패드 간에 다리 형태로 잔류하지 않게 된 결과로 해석된다.

종합적으로, 플럭스는 솔더의 화학적 활성화를 통해 표면 산화막을 제거하고, 솔더 온도는 물리적 유동성을 제어함으로써 두 변수의 조합이 브릿징 억제와 홀 충전율 향상에 상호보완적으로 작용하였다. 따라서 플럭스 7 ml/cycle과 솔더 온도 260 °C의 조합이 공정 안정성과 품질 신뢰성 측면에서 최적 조건(Optimal Condition)으로 확인되었다.

제 5 장 결 론

본 연구는 고다층(High Multi-Layer) PCB의 선택티브 솔더링(Selective Soldering)공정에서 플럭스 분사량과 솔더 온도가 홀 충전율(Hole Fill Rate) 및 브릿징(Bridging) 결함에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

실험 결과, 플럭스 분사량이 증가할수록 솔더의 젖음성(Wettability)과 유동성(Fluidity)이 향상되어, 납이 홀 내부로 원활히 유입되었으며 그 결과 홀 충전율이 유의하게 증가하였다. 반면, 산화막 제거가 불충분한 저유량(3 ml/cycle 이하) 조건에서는 부분적인 충전 불량과 브릿징 결함이 관찰되었다.

또한 솔더 온도 상승은 솔더의 점도 저하 및 모세관 작용 강화를 유도하여 충전 품질을 향상시켰으나, 270 °C 이상에서는 과열로 인한 산화 재형성 및 납 유동 불안정성이 증가하여 품질이 다소 저하되었다.

이를 종합하면, 플럭스 7 ml/cycle - 솔더 온도 260 °C 조합에서 최고 수준의 충전 품질(평균 96 % 이상)과 브릿징 결함 억제(0 % 수준)가 동시에 달성되었다. 이 조건은 공정 안정성과 품질 신뢰성 측면에서 최적 공정 조건(Optimal Condition)으로 확인되었다.

본 연구 결과는 선택티브 솔더링 공정의 품질 향상 및 생산 안정성 확보에 기여할 수 있는 실험적 근거를 제시하며, 향후 연구에서는 다양한 PCB 층수별 공정 반응 특성비교, 플럭스 종류별 특성 비교 실험과 솔더 히팅 시간(Solder Heating Time)등의 추가 변수에 대한 확장 검증등을 포함한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 문성기, 강구삼, 조영봉, 문욱. (2022). 범용 웨이브 솔더링장비를 위한 PCB 지그 최적화 설계. 한국자동차공학회 춘계학술대회.
- 강문식, 권대일. (2021). 산업인공지능 기반 제조 생산성을 고려한 솔더링 공정 조건 분석. 대한기계학회 논문집 성균관대학교 대학원.
- 나승천, 최한영. (2024). 웨이브 솔더링공정 개선을 위한 팔레트 도입 사례. 실천공학교육 논문지. 학국기술교육대학원.
- 김영도, 최정식, 김민수, 김동진. (2024). 저 내열 기판소자 전자부품 실장을 위한 자기유도 솔더링. 석사학위논문. 한국공학대학원.
- 이근원. (2021). 열풍을 활용한 적층 어셈블리 PCB의 리플로우 솔더링 가능성에 관한 연구. 석사학위논문. 아주대학원.
- 권병윤. (2010). 국부 자동차 솔더링장치 개발. 석사학위논문. 경북대학원.
- 이성균, 박범 (2010). PCB Soldering 공정의 작업 인터페이스 변경에 따른 작업난이도 및 생산성 향상. 석사학위논문. 아주대학교 산업공학과.
- 최명기, 이창열, 정재필, 서창제, 신영의 (1998). 저잔사 플렉스를 사용한 플로우 솔더링부의 젖음성 및 결함거동에 관한 연구. 학사학위논문. 성균관대학교 재료공학과.
- 장인철, 옥정환, 신영의, 정재필, 최명기, 서창제 저잔사 플렉스를 사용한 wave soldering 연구
- 문기주, 정현철, 허지희 (2003). PCB의 효율적 조립 방법에 관한 연구, 한국경영과학회 춘계학술대회

- 문영준. (2009). 모바일 제품의 소형화로 가속화 되고 있는 미세 피치 부품실장. 월간 표면실장기술
- 윤만중. (2010). 로봇을 이용한 비접촉변위센서의 솔더링공정 자동화. 석사학위논문. 부산대학교 대학원.

2. 국외문헌

- Terry Munson. (2006). The Downside of Selective Soldering. Circuits Assembly.
- Scott J. Anson. (2004). Wave Solder Process Optimization for Complex Electronic Assemblies : A Design of Experiments Approach. IPCPrinted Circuits Expo.
- Albrecht Beck. (2013). Best Practices for Evaluating Selective Soldering System. Global SMT & Packaging.
- Bruno Tolla, Denis Jean, Xiang Wei. (2016). How to use the right flux for the selective soldering application. APEX / Kester Inc. Technical Paper.
- M. Ingall, G. Jimenez, P. Michela, M. Taylor, and N. Sasson. (1999). Critical Parameters in Wave Solder Optimization. Circuits-Assembly.
- G. Diepstraten. (2015). Achieving repeatable, consistent control over the selective production process, SMTA International
- X. Wei, K. Loomis, J. Allen, B. Tolla. (2015). Partially-Activated Flux Residue Influence on surface insulation resistance of electronic assemblies, SMTA International
- B. Tolla, Y. Shi, X. Wei, H. Bhavsar. (2015). Chemical Influences on the reliability of complex assemblies, SMTA Southeast Asia.
- Gerjan Diepstraten, Vitronics SoltecBV. (2014). Position accuracy machines for selective soldering fine pitch components. APEX 2014.
- M. Miyaki, M. Kanai, S. Ogata. (1999). Soldering properties for

lead-free solders of Sn-Ag-Cu system solders. Proc. 3rd IEMT/IMC Symp., Tokyo, Japan

- A. Forsten, H. Steen, I. Wilding, J. Friedrich. (2000). Development of lead-free wave soldering process. Solder Surface Mount Technol., vol. 12, no. 3
- M. R. Harrison, J. H. Vincent, H. A. H. Steen. (2001). Lead-free reflow soldering for electronics assembly. Solder Surface Mount Technol., vol. 13, no. 3

ABSTRACT

Study on the Improvement of Hole-Filling Quality and Suppression of Bridging through the Selective Soldering Process: Focused on High Multi-Layers PCBs

Lee, Jae-Keun

Major in Smart Factory Consulting

Dept. of Smart Convergence Consulting

Graduate School of Knowledge

Service & Consulting

Hansung University

With the ongoing trend of miniaturization and high integration in the electronics industry, the demand for high multi-layer printed circuit boards (PCBs) capable of ensuring both high electrical reliability and thermal stability has rapidly increased. However, due to their high thermal capacity and non-uniform heat transfer, insufficient thermal energy during the soldering process often leads to decreased solder fluidity and incomplete hole filling. In addition, when the amount of flux applied is insufficient or uneven, the removal of oxides becomes inadequate, causing poor wettability and an increased likelihood of bridging defects.

To address these issues, this study proposes process optimization methods to minimize bridging defects and improve hole-filling quality in

the selective soldering process of high multi-layer PCBs. Experiments were conducted using flux spray rates of 3, 5, 7, 10, and 15 ml/cycle and solder temperatures of 230, 240, 250, 260, and 270 ° C as the main control parameters, with a preheater temperature of 150 ° C under a lead-free SAC305 (Sn-3.0Ag-0.5Cu) condition. A total of 250 samples were tested.

The results showed that the combination of a flux rate of 7 ml/cycle and a solder temperature of 260 ° C achieved the most stable wettability and fluidity, resulting in an average hole-fill rate above 96 % and a bridging defect rate of 0 %. These findings indicate that an appropriate flux supply combined with sufficient soldering heat energy enhances capillary action and oxide removal, thereby improving solder flow and filling performance.

This study identifies the optimal combination of flux and solder temperature for selective soldering, contributing to improved quality reliability in high multi-layer PCB manufacturing. Furthermore, it experimentally demonstrates that bridging defects can be effectively suppressed while maintaining stable hole-filling quality. Therefore, the results of this study can serve as foundational data for the standardization and productivity improvement of future selective soldering processes.

【Key words】 Selective Soldering, Bridging, Hole Filling, Flux, Solder Temperature, PCB