

# 애플리케이션 노트

## AN1801

Revision:	KOR-01
발행일:	2023-08-31
작성자:	Paul Drexhage, Grady
결재자:	Peter Beckedahl, Kendric

키워드: 열 인터페이스 재료, TIM, 열 페이스트, 열 그리스

# 열 페이스트 애플리케이션

- 1. 서론..... 2
- 2. 열 인터페이스 재료(TIM)의 목적..... 2
- 3. 열 페이스트 선택 ..... 3
  - 3.1 페이스트 속성 ..... 311
  - 3.2 캐리어와 충전제..... 4
- 4. 열 페이스트 애플리케이션..... 4
  - 4.1 일반..... 4
    - 4.1.1 권장 페이스트 두께..... 4
    - 4.1.2 방열판 사양..... 5
    - 4.1.3 모듈에 적용 vs. 방열판에 적용..... 5
    - 4.1.4 페이스트 준비..... 5
  - 4.2 롤러..... 5
    - 4.2.1 공정 ..... 6
  - 4.3 스크린 프린팅 ..... 7
    - 4.3.1 재료 ..... 7
    - 4.3.2 메시 수와 나사산 크기..... 7
    - 4.3.3 공정(수동)..... 8
  - 4.4 스텐실 프린팅 ..... 9
    - 4.4.1 스텐실 설계..... 10
    - 4.4.2 공정(수동)..... 10
  - 4.5 스크린 vs. 스텐실 애플리케이션..... 11
  - 4.6 스크린 및 스텐실 마모 ..... 11
  - 4.7 재작업 및 청소..... 11
  - 4.8 페이스트 보관 및 취급 ..... 12
- 5. 측정..... 12
  - 5.1 습도막 두께 측정기 ..... 12
    - 5.1.1 빗(Comb) 타입 ..... 13
    - 5.1.2 롤러 타입 ..... 14
  - 5.2 광학 검사..... 14
  - 5.3 무게..... 14
- 6. 평가..... 15
  - 6.1 기판 균열 검사..... 15
  - 6.2 열 주기 ..... 15

6.3 Rth 측정.....	16
6.4 육안 검사.....	16
7. 수명.....	16
7.1 펌프아웃.....	16
7.2 방열판 변색.....	18
8. 고장 모드.....	18
8.1 가열.....	18
8.2 세라믹 기판의 균열.....	18

## 1. 서론

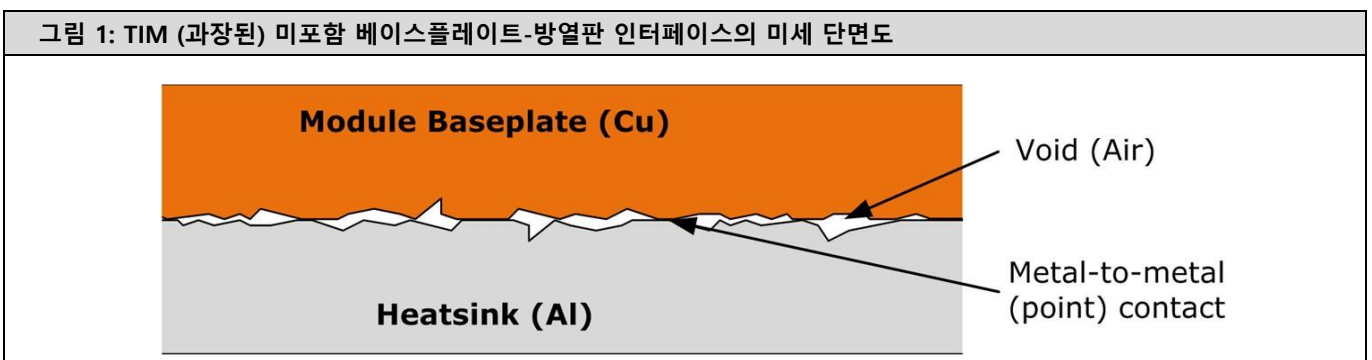
이 문서는 전력 반도체 모듈과 방열판 사이에 열 인터페이스 재료(TIM)로 사용되는 열 페이스트(그리스) 적용에 대해 설명합니다. 상변화 물질(PCM), 코팅된 호일 기판 또는 열 패드와 같은 다른 TIM은 포함되지 않습니다. SEMIKRON 제품에 미리 적용된 TIM 관련 정보는 [3] 및 모듈별 기술 설명 자료를 참조하시기 바랍니다. 이 애플리케이션 노트는 [6]을 대체합니다.

## 2. 열 인터페이스 재료(TIM)의 목적

반도체에 의해 생성된 열은 시스템 내에서 여러 가지 다양한 물질과 계면을 통해 냉각제(공기 또는 액체)에 도달하게 됩니다. 이러한 물질들은 각각 아래 정의된 속성을 갖고 있습니다.

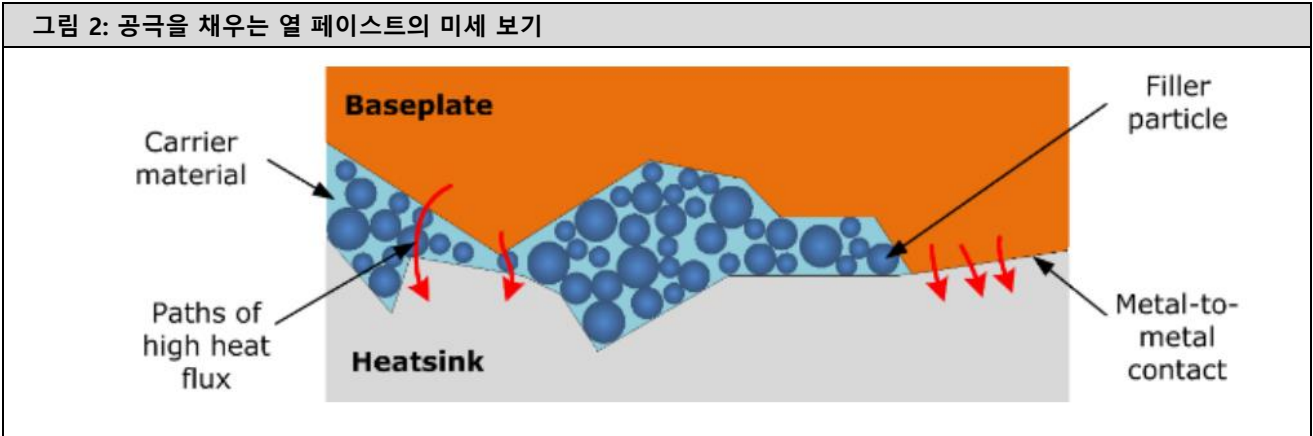
**열 전도율,  $\lambda$ :** 미터-켈빈 당 와트로 측정하는 물질의 열전도율 척도[W/(m·K)]

전력 반도체 시스템의 경우, 높은 열전도율로 인해 구리( $\lambda_{Cu} \approx 390 \text{ W/(m·K)}$ )나 알루미늄( $\lambda_{Al} \approx 200 \text{ W/(m·K)}$ )과 같은 금속을 선택합니다. 이상적인 환경에서는 이러한 물질이 만나는 곳은 항상 완벽한 금속 간 접촉이 일어나는 균일한 표면이 있어야 합니다. 그러나 현실에서는 전력 반도체 모듈이 방열판에 장착되는 경우와 같이 이러한 계면은 균일하지 않습니다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 미세 수준에서 보면 이러한 접촉면에는 다수의 공극이 있습니다. 이러한 공극들은 비교적 열전도율이 낮은 공기로 채워집니다( $\lambda_{air} \approx 0.03 \text{ W/(m·K)}$ ). TIM의 목적은 이러한 공극을 열전도율이 높은 물질로 대체하는 한편( $\lambda_{paste} \approx 0.5\text{--}6 \text{ W/(m·K)}$ ) 가능한 경우 금속 간 접촉을 유지시키는 것입니다.



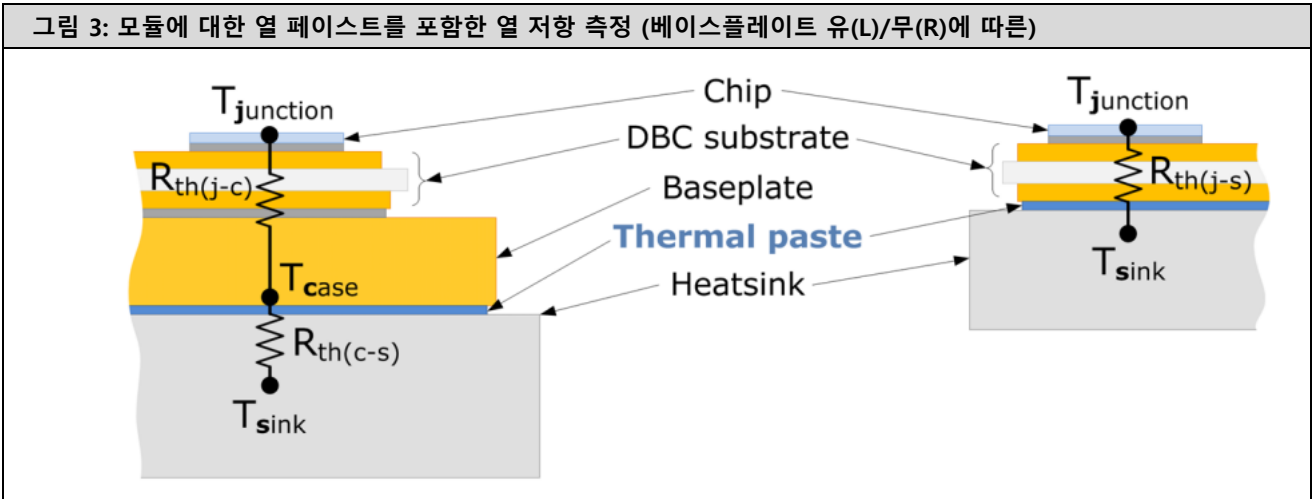
열 페이스트는 캐리어 매체에 떠있는 열전도율 입자로 이루어져 있습니다(그림 2). 이러한 입자들이 공극을 채워 열 브릿지를 형성합니다. 이 그림은 확실히 입자 크기, 입자 크기의 변화 및 입자 분포가 페이스트가 접촉면의 공극을 얼마나 잘 채우는지에 있어서 커다란 역할을 한다는 것을 보여줍니다.

그림 2: 공극을 채우는 열 페이스트의 미세 보기



열전도율은 물질의 특성을 기술하는 반면, 접촉면의 전반적인 성능은 정선과 방열판 사이의 열저항( $R_{th}$ )으로 정의됩니다. 모듈 구조에 따라(그림 3), 열 페이스트의 효과는  $R_{th(case-sink)}$  또는  $R_{th(junction-sink)}$ 에 포함됩니다. 열저항에 대한 자세한 내용은 [4]를 참조하십시오.

그림 3: 모듈에 대한 열 페이스트를 포함한 열 저항 측정 (베이스플레이트 유(L)/무(R)에 따른)



열저항은 페이스트 만의 열전도율 이상으로 결정됩니다. 아래 각 항목이 최종  $R_{th(c-s)} / R_{th(j-s)}$  값에 영향을 미칩니다.

- a. 방열판의 표면 마감처리
- b. 적용된 열 페이스트 두께
- c. 장착 후 열주기
- d. 방열판에 대한 모듈 장착 압력
- e. 모듈 설계(베이스플레이트 형상, 칩 레이아웃, 베이스플레이트 재질, 등)

### 3. 열 페이스트 선택

#### 3.1 페이스트 속성

이 애플리케이션 노트에서 알 수 있듯이 열 페이스트 선택 시 고려해야 할 사항이 많습니다. 그 중에서 가장 중요한 특성을 표 1에 정리하였습니다.

표 1: 열 페이스트 선택 시 고려사항		
속성	고려사항	평가 방법
열 전도성→ 열 저항	데이터시트에 제공된 체적열전도율은 최종 유효 $R_{th(j-s)}$ 만큼 중요하지는 않습니다.	전력 전자 어셈블리의 정적 열시험
점도	점도가 높은 페이스트는 베이스 플레이트가 없는 모듈에서 기판 균열을 유발할 수 있으며 스크린 프린팅이 어렵습니다.	어셈블리 시험, 생산 라인 적합성 평가
고객 요구 사항과의 적합성	특정 산업 분야에서는 특정 물질(예: 실리콘)의 사용을 제한합니다.	페이스트 데이터시트 검사
펌프아웃 복원력	특정 페이스트 및 모듈 타입(베이스플레이트)은 모듈 아래에서 "펌핑아웃"되기가 쉽습니다.	전력 주기
건조 복원력	특정 페이스트는 시간이 지나면서 더 쉽게 건조되는 경향이 있습니다.	열/환경 주기

### 3.2 캐리어와 충전제

페이스트의 캐리어 재질은 일반적으로 실리콘 또는 비실리콘 타입으로 분류합니다. 일반적으로 SEMİKRON 은 우수한 안정성, 저비용, 고성능 및 안정성을 갖추고 있어 실리콘 기반 페이스트 사용을 권장합니다. 그러나 현대식 제조설비(특히 도장이나 기타 화학적으로 민감한 공정과 관련된 시설)에는 실리콘이 없어야 합니다. 이 경우 캐리어가 합성 유체의 혼합물로 구성됩니다.

대부분의 페이스트에서 충전제 소재는 금속 산화물( $ZnO$ ,  $BN$ ,  $Al_2O_3$ ), 은 또는 흑연입니다. 충전제 소재가 중요하긴 하지만 캐리어와 충전제 사이의 비율과 입자 크기(위에서 언급한 대로)도 마찬가지로 중요합니다. 고성능 페이스트는 일반적으로 비교적 큰 입자(예:  $\sim 50\mu m$ )를 사용하여 최소 페이스트 두께를 제한할 수 있습니다. 또한 금속 충전제 함량이 높은 페이스트는 점성이 매우 높아 모듈과 방열판 사이에서 페이스트가 압축되면 "유동성"이 줄어들기 때문에 베이스플레이트가 없는 모듈의 경우 문제가 발생할 수 있습니다(세라믹 기판의 균열참조). 일부 페이스트는 도포 과정에서 점도를 낮추기 위해 증발할 수 있는 용매를 아주 소량(예: 1%) 함유하고 있습니다. 이러한 페이스트는 용매가 캐리어 물질에 비해 안정성이 떨어져 보관 및 취급 요구 사항에 더 민감합니다. 용매가 증발하면 페이스트를 도포하기가 더 어려워지고 원하는 대로 공극을 채울 가능성이 줄어듭니다.

## 4. 열 페이스트 애플리케이션

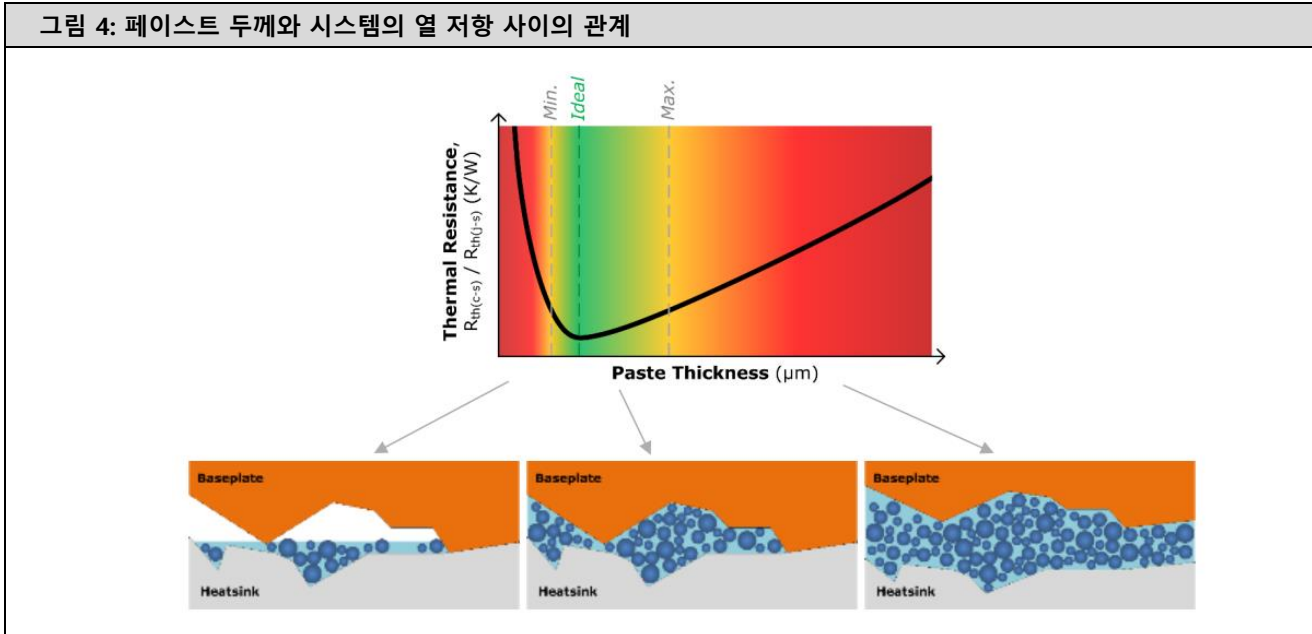
### 4.1 일반

#### 4.1.1 권장 페이스트 두께

열 저항에 영향을 주는 다양한 매개변수를 고려할 때 목표 페이스트 두께는 모듈 유형에 따라 달라집니다. 전력 모듈 제조사는 산업 표준 열 페이스트를 사용하여 모듈을 검증한 다음 두께를 지정해야 합니다. SEMİKRON 의 경우, 이러한 페이스트에는 전통적으로 Wacker P12 가 사용되었으며 목표 두께는 해당 제품군에 대한 기술 설명/장착 지침에 나와 있습니다(예: MiniSKiiP, SEMITOP 등). 이러한 두께는 Wacker P12 와 물리적 특성이 유사한 열 페이스트(즉,  $\sim 2.1g/cm^3$ 의 산화막 및 밀도를 가진 실리콘 페이스트)에 유효하며 보통 5-20 $\mu m$  범위에서 지정됩니다.

앞서 설명한 대로 공기로 채워진 공극을 채우려면 충분한 페이스트를 도포해야 함을 알 수 있습니다. 페이스트 레이어를 얇게 도포하면 시스템의 열 저항이 빠르게 감소하지만, 이 위에 페이스트를 추가하면 페이스트의 열전도율이 인터페이스의 두 금속보다 낮기 때문에 열 저항이 천천히 증가합니다(그림 4).

그림 4: 페이스트 두께와 시스템의 열 저항 사이의 관계



#### 4.1.2 방열판 사양

방열판의 표면 마감은 인터페이스에서 중요한 부분입니다. 다양한 모듈 유형(베이스플레이트 또는 베이스플레이트 없는)에 대해 거칠기(Rz), 거리에 대한 불균일도 및 허용 가능한 "단계"에 대한 사양이 제공됩니다. SEMİKRON 제품의 경우 방열판 표면 마감처리 요구 사항은 해당 제품 라인의 "장착 지침" 문서에 명시되어 있습니다(예: SEMiX, SEMITOP 등). 이러한 사양을 방열판 가공을 위한 도면에 표시해야 하며, 사용 전에 완성된 방열판에 대해 유효성을 확인해야 합니다. 광학 검사 방법을 통해 이를 수행할 수 있습니다.

#### 4.1.3 모듈에 적용 vs. 방열판에 적용

페이스트를 모듈에 먼저 적용할지 아니면 방열판에 먼저 적용할지 여부는 제품의 기계적 설계와 생산 공정 중 조립 순서를 기준으로 결정됩니다. 일반적으로, 스크린/스텐실은 물리적으로 더 쉽고 스크린/스텐실은 한 번에 여러 모듈의 패턴을 지원할 수 있으므로 방열판에 페이스트를 도포하는 데 사용됩니다. 이 이유로 다음 스크린/스텐실 예에서는 방열판에 페이스트를 도포하는 방법을 보여줄 것입니다. 하지만 이 과정은 직접 모듈에 도포하는 데에도 적용할 수 있습니다.

#### 4.1.4 페이스트 준비

대부분의 페이스트는 적용하기 전에 기본적인 혼합을 통해 캐리어와 충전재 재료의 균질화 여부를 확인하고 보관된 페이스트의 일관성에 심각한 문제가 발생했는지 여부를 작업자에게 알릴 수 있습니다. 이는 생산 라인에서 분배하기 전에 페이스트를 그 배송 용기 내에서 저어주는 것처럼 간단할 수도 있고, 완전 자동화된 스크린 인쇄에 사용되는 것처럼 재료를 자동 혼합기에 통과시키는 것처럼 복잡할 수도 있습니다. 잘 혼합된 페이스트는 균일한 색상과 일관성을 보여야 하며, 아무런 잔류 캐리어 재료(예: 오일)가 없어야 합니다. 용매가 포함된 페이스트는 제조업체의 지침에 따라 혼합해야 용매가 고르게 분포되도록 할 수 있습니다.

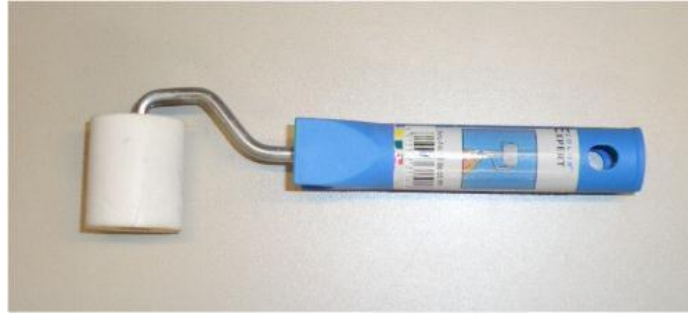
### 4.2 롤러

프로토타입 제작 및 소량 생산의 경우 롤러를 사용하여 모듈 하부에 직접 열 페이스트를 적용할 수 있습니다(그림 5). 이 방법은 저비용이긴 하나 두께가 일정하지 않고 지지불합입니다. 모듈을 장착하기 전에 열 페이스트 레이어의 두께를 바로 측정할 수 있다는 장점이 있습니다.

중간 경도(쇼어 경도 50A - 70A)의 고무가 장착된 롤러(미술/인쇄 산업에서는 "손으로 미는 롤러"라고도 함)의 사용을 권장합니다. 이 고무는 충분히 단단해서 이물질 입자가 쉽게 들어가지 않습니다. 롤러는 페이스트 세척제와 호환되어야

하며 묽은 페이스트나 먼지가 쌓일 수 있는 기계적 특성이 없어야 합니다. 롤러의 폭은 베이스플레이트가 돌출되지 않고 잘 맞을 정도로 좁고 페이스트 레이어가 일정할 수 있는 정도의 넓이면 충분합니다.

그림 5: 롤러 예시



#### 4.2.1 공정

1. 페이스트가 유리판이나 하드 플라스틱 트레이와 같이 깨끗하고 단단하며 평평한 표면에 분사됩니다.
2. 롤러를 앞뒤로 움직여 얇은 레이어가 전체적으로 고르게 퍼지도록 합니다(그림 6). 이 때 롤러가 페이스트를 위로 당기면 페이스트 표면 장력이 깨지면서 고음의 딱딱거리는 소리가 들리게 됩니다.

그림 6: 하드 플라스틱 트레이를 사용하여 페이스트를 롤러에 장착하는 공정



3. 롤러를 모듈의 베이스플레이트에 가벼운 압력으로 앞뒤로 움직입니다. 먼저 방향으로(그림 7) 그 다음에는 수직방향으로(즉, X축과 Y축) 움직이면서 베이스플레이트 전체에 균일한 얇은 층이 형성될 때까지 작업을 진행합니다.

그림 7: MiniSKiiP 모듈에 페이스트 도포



4. 레이어 두께를 검사합니다( 측정 참조).
5. 롤러에 너무 많은 페이스트가 있는 경우, 유리 시트의 "마른" 부분에 대고 롤러를 움직여 페이스트를 제거할 수 있습니다.

### 4.3 스크린 프린팅

스크린 프린팅은 패브릭 및 인쇄 산업에서 자리가 잡힌 잉크 인쇄 방법이며 페이스트 애플리케이션에 적합합니다. 패브릭 메시가 프레임과 직사각형 개구부까지 확장되고 모듈 베이스플레이트의 사이즈가 포토레지스트 잉크를 사용하여 메시에 인쇄됩니다. 그런 다음 페이스트가 미리 스크린을 적십니다("만액식"). 마지막으로 스크린을 방열판 또는 모듈 위로 약간 거리를 두고 배치하고 미리 설정된 각도와 압력으로 합성 고무 스크레이퍼("스크레이지")를 스크린에 그림니다. 스크린이 인쇄될 표면과 접촉하면 페이스트가 매쉬로 유입되어 쌓입니다. 그 결과 형성된 페이스트 레이어가 균일하므로(패턴 없이), 페이스트 두께를 직접 측정할 수 있습니다.

스크린의 높이와 위치 및 스크레이퍼에 가해지는 압력을 제어하는 반자동 장비를 사용할 수 있습니다.

#### 4.3.1 재료

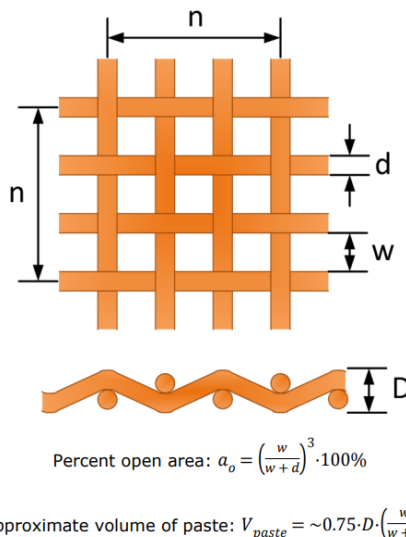
전통적으로 "실크스크린"으로 알려져 있지만, 최신 고성능 스크린 소재는 폴리아미드 원사("나일론"), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 또는 기타 폴리에스터 및 단섬유사 등과 같은 플라스틱으로 만듭니다. 스크린 수명을 더 늘리려면 스테인레스 스틸 메시를 사용할 수 있습니다.

스크레이퍼는 압출 알루미늄 핸들로 구성되며 여기에 중경도(쇼어 경도 60A~80A) 고무 블레이드를 볼트로 고정시킵니다. 점도가 높은 페이스트에는 단단한 고무(80A)가 사용됩니다.

#### 4.3.2 메시 수와 나사산 크기

메시를 정의하는 가장 일반적인 매개변수는 단위 면적당 나사산과 나사산의 지름입니다(그림 8). 명칭은 측정 단위(cm vs. 인치)와 소재 구조(단섬유사 vs. 다섬유사)에 따라 달라지므로 지역(미국 vs 유럽)에 따라 메시 수를 지정할 때는 주의해야 합니다. 일반적으로 열 페이스트 프린트를 위한 메시는 소재 두께가 더 크고 세부사항에 대한 관심이 덜해 인쇄용에 비해 훨씬 "두껍습니다."

그림 8: 메시 파라미터 정의



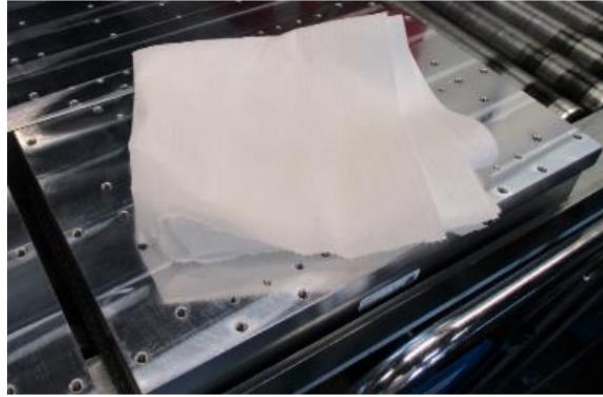
SEMİKRON은 PET 메시와 Wacker P12 열 페이스트를 사용하여 몇 가지 모범 시험을 실시했습니다(표 2).

표 2: 실험 결과			
지정(DIN 표준)	77-55	43-80	27-140
메시 수, n	77 threads/cm <sup>2</sup>	43 threads/cm <sup>2</sup>	27 threads/cm <sup>2</sup>
나사산 지름, d	55µm	80µm	140µm
페이스트 두께 결과값	20-30µm	40-50µm	70-80µm

### 4.3.3 공정(수동)

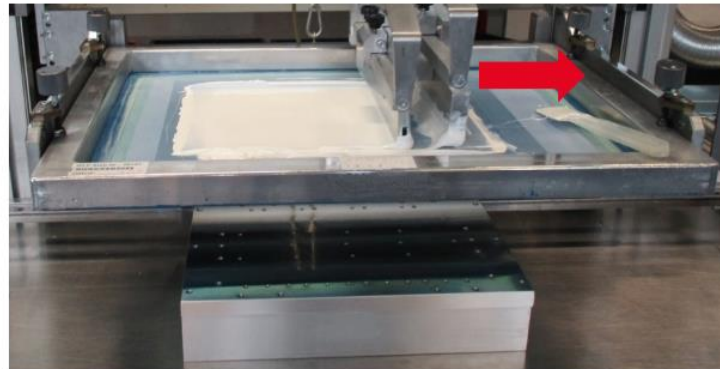
1. 청소한 방열판을 스크린 아래 장착합니다. 기계 가공 공정의 일부로 방열판의 그리스를 제거하는 한편, 스크린 프린팅 공정 직전에 이소프로필 알코올과 같은 마일드한 용매로 보풀 없는 천을 사용하여 지문, 먼지 또는 기타 잔류물을 제거하는 것이 중요합니다.

그림 9: 탈기된 방열판 및 보풀이 없는 천



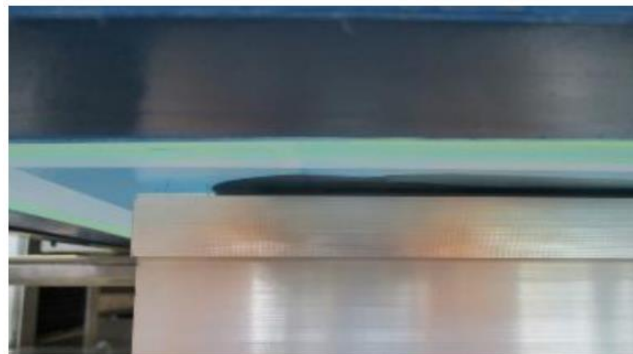
2. 스페츨라를 사용하여 스텐실 말단부에 두꺼운 페이스트 라인을 부착합니다. (방열판에 접촉하지 않고) 광압으로 스크레퍼를 스크린에 그리면 스크린이 "젖게" 됩니다.

그림 10: 스크린 습윤(왼쪽에서 오른쪽으로)



3. 스크린이 최종 프린팅 위치로 내려갑니다(보통 스크린 장력에 따라 방열판 표면 위로 보통 4-7mm).

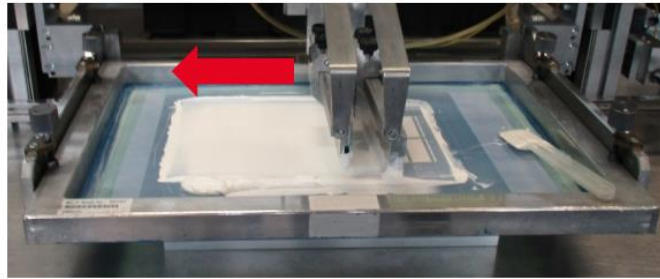
그림 11: 갭을 보여주는 스크린 하부



4. 스크레퍼를 고압으로 한 번 스크린에 그리고, 스크린을 방열판 위로 누르면서 페이스트 레이어를 적용합니다.

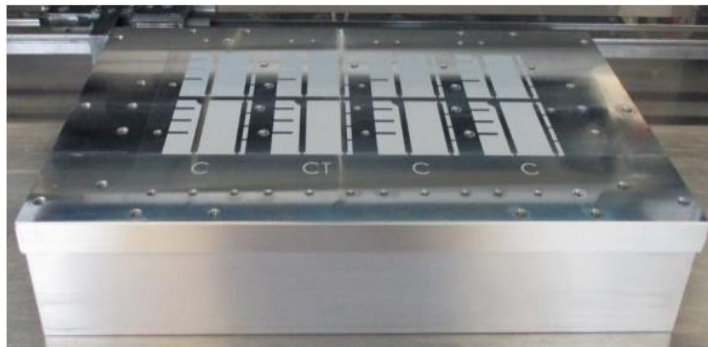


그림 12: 페이스트 적용(오른쪽에서 왼쪽으로)



5. 스크린을 들어 올려 방열판 제거후 검사합니다.

그림 13: 완성된 페이스트 패턴

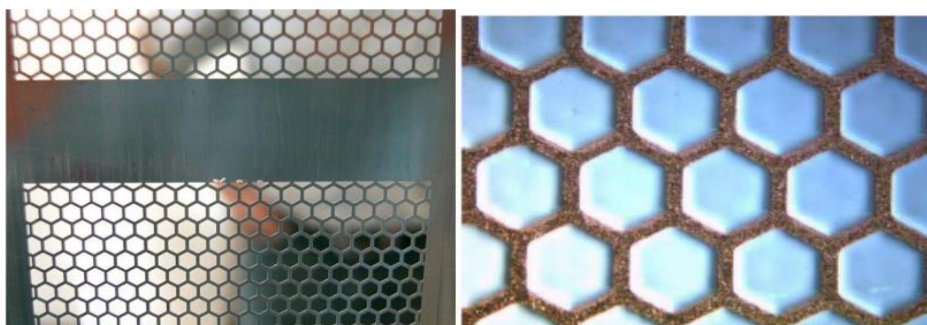


#### 4.4 스텐실 프린팅

스텐실 방법을 통한 페이스트 적용은 스크린 프린팅 방법과 매우 유사합니다. 다만, 패브릭 스크린을 강철 스텐실로 대체하고, 이때 패턴을 잘라 냅니다(그림 14). 스크레퍼는 페이스트를 스텐실 부분에 눌러 넣는 데 사용되며 패턴을 사용하면 스크레퍼가 모든 지점에서 방열판과 병렬 상태가 됩니다. 모듈을 아래로 누르고 온도 주기까지 패턴을 표면에 남고 이 시점에 페이스트가 흘러가 공극을 채우게 됩니다. 스텐실 두께에 따른 구멍의 형상, 크기 및 간격은 일단 모듈이 장착되면 페이스트의 두께를 결정합니다. 따라서 모듈을 장착하기 전에 적용된 페이스트 두께를 직접 측정할 수 없습니다. 스텐실 프린팅 방법은 다음과 같은 몇 가지 이점이 있습니다.

- a. 스크린 프린팅 산업에 익숙하지 않은 사용자를 위한 스텐실의 설계 용이성 및 사양
- b. 칩 위치와 베이스플레이트 곡률에 최적화된 복잡한 열 페이스트 분포의 사용 허용(보통 사전 적용된 TIM을 공급할 때 모듈 제조사만 실시)
- c. 보통 스텐실이 패브릭 스크린보다 내마모성이 높다는 점에서 장비 수명

그림 14: 스테인레스강 스텐실 및 모듈 하단에 생성되는 페이스트 패턴

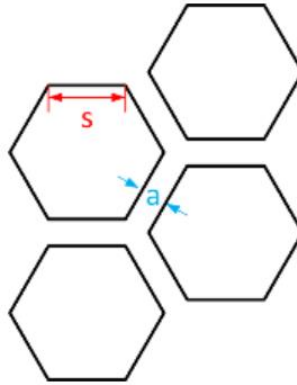


#### 4.4.1 스텐실 설계

그 강도와 용매 저항성으로 인해 스텐실 재질은 보통 스테인레스강이 사용됩니다. 스텐실 지오메트리의 가장자리가 청결하게 되는 레이저 또는 기타 공정을 통해 강철에 패턴을 컷팅합니다. 스탬핑과 같은 공정은 가장자리가 롤링되거나 날카로운 부분이 생겨 스텐실이 평평하지 않거나 방열판 표면에 스크래치가 생길 수 있으므로 피해야 합니다.

스텐실의 피치 크기는 스크레퍼 가장자리의 직선도가 페이스트 두께에 영향을 미치지 않을 정도로 작아야 합니다(즉, 넓은 개구부는 피할 것). 벌집 패턴은 분포가 고르고 2차원으로 도면에 쉽게 적시할 수 있으므로 가장 일반적입니다(그림 15).

그림 15: 벌집 패턴 사양



목표 페이스트 두께를 얻기 위한 "올바른" 벌집 패턴은 스텐실 두께, 페이스트 타입 및 모듈 크기에 따라 달라집니다(표 3).

표 3: MiniSKiiP 모듈에 대한 벌집 매개변수의 예

모듈 타입	벌집 에지 길이, "s" (mm)	벌집 피치, "a" (mm)	스텐실 두께(μm)	공칭 페이스트 두께, Wacker P12 (μm)
MiniSKiiP 1	0.75	0.7	75	30
MiniSKiiP 2	1.1	0.5	100	55
MiniSKiiP 3	0.85	0.55	100	40

#### 4.4.2 공정(수동)

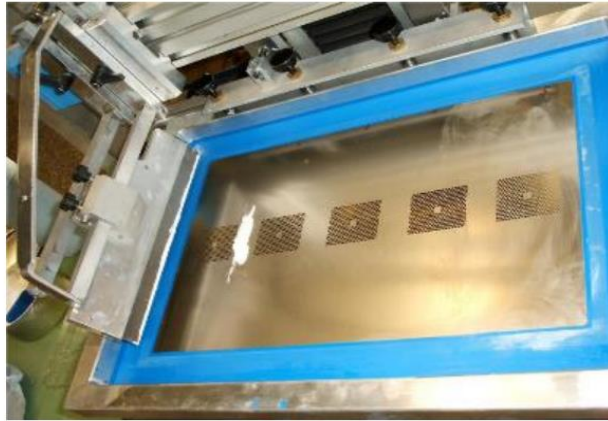
전체 스텐실 프린팅 공정은 스크린 프린팅 공정과 매우 유사하지만 두 가지 주목해야 할 차이점이 있습니다.

- a. 스텐실은 스텐실을 적용할 표면과 접촉합니다.
- b. 패턴을 스크레퍼로 한 번에 인쇄합니다(스텐실을 "플러딩(flooding)"할 필요가 없음).

일반적으로 스텐실 프린팅의 단계는 다음과 같습니다.

1. 청소한 방열판을 스텐실 아래에 장착합니다.
2. 스텐실을 내려 방열판과 접촉하도록 위치를 조정합니다. 스페츨라를 이용하여 굽어 낸 부분 앞의 스텐실 한쪽 끝에 페이스트를 한 줄 도포합니다.
3. 페이스트를 스텐실 부위로 누르면서 고압으로 스크레퍼를 스텐실을 가로질러 한 번 굽어 줍니다.
4. 스텐실을 들어 올려 방열판을 제거 및 검사합니다.

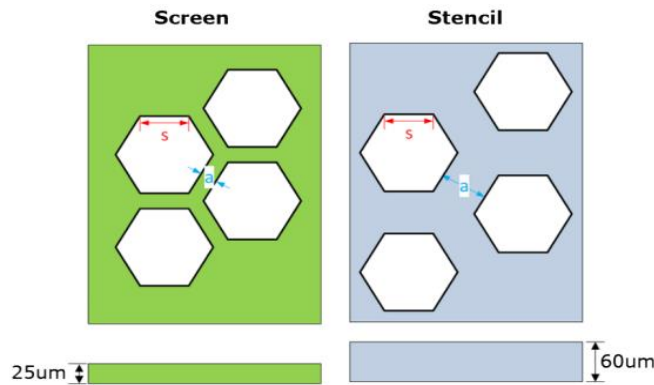
그림 16: 스텐실에 스크레퍼로 그리기 전 적용된 페이스트 라인



#### 4.5 스크린 vs. 스텐실 애플리케이션

스텐실 혹은 스크린을 사용할지 여부는 필요한 페이스트의 두께에 따라 달라집니다. 60 $\mu$ m 보다 얇은 금속 스텐실은 일반적이지 않으므로 두께가 얇은 페이스트의 경우에는 스크린이 더 적합할 수 있습니다. 예를 들어, 20 $\mu$ m 미만의 유효 두께를 확보하려면 얇은 스크린으로 가능한 두께와 동일한 두께를 위해서는 개구부 간 거리 "a"를 늘려야 합니다. 이렇게 하면 비균질 페이스트 분포의 리스크가 커집니다. 그림 17 은 벌집 패턴을 실크스크린에 적용하고 해당 스텐실 패턴과 비교하여 목표 두께를 얻는 가상의 비교를 보여 줍니다. 앞서 설명한 대로 스크린 프린팅에는 보통 이러한 패턴이 필요하지 않습니다.

그림 17: 동일한 페이스트 두께를 얻기 위해 필요한 스크린 및 스텐실 패턴의 가상 비교



또한, 모듈에서 (기계적 설계로 인해) 페이스트를 프린팅하기 위해 유연한 소재가 필요한 경우 스크린이 더 선호됩니다.

#### 4.6 스크린 및 스텐실 마모

여타 공구와 마찬가지로, 스크린과 스텐실 모두 반복된 마모로 인해 시간이 지나면서 마모가 발생합니다. 생산 공정에서 통계적 공정 관리(SPC)의 일환으로 결과 붙여넣기 두께를 정기적으로 평가하고 기록해야 합니다(측정 참조). 최종적인 페이스트 두께가 변하거나 페이스트 패턴이 더 이상 선명하지 않을 경우 스크린/스텐실의 마모 여부를 검사하여 필요한 경우 교체해야 합니다.

#### 4.7 재작업 및 청소

잘못 적용된 페이스트는 다시 적용하기에 앞서 완전히 제거해야 합니다. 대부분의 페이스트는 석유 유래 용매(예: 흰색 증류주, 톨루엔, 등유 등)에 용해됩니다. 단, 정확한 권장 용매는 제조사의 데이터시트를 참고합니다. 하지만 독성이 적고 잔류물이 거의 남지 않아 일반적으로 이소프로필 알코올이 사용됩니다. 이미 전자 산업에서 널리 사용되고 있으므로

설치 전 방열판 청소와 열 페이스트 제거 시 사용을 권장합니다.

모듈과 방열판 사이에 입자가 유입되지 않도록 보풀 없는 일회용 천을 사용할 것을 강력히 권장합니다.

스크린 및 스텐실의 경우 자동 세탁기를 사용할 수 있습니다. 손 세척 시, 패턴이 구부러지거나 왜곡되지 않도록 주의해야 합니다. 스크린/스텐실은 대개 용매를 사용하여 가볍게 문질러 닦고 압축 공기로 세척합니다.

#### 4.8 페이스트 보관 및 취급

열 페이스트에는 유효기간이 있으며, 이 기간이 지나면 충전제와 캐리어 재료가 분리되어 애플리케이션에 맞게 효과적인 재혼합이 불가능할 수 있습니다. 다른 제품과 마찬가지로 유효기간은 보관 조건(예: 온도, 습도)에도 영향을 받습니다. 페이스트 제조사는 유효기간(예: 표준 실리콘 타입 페이스트의 경우 5년) 및 보관 조건(즉, 온도 및 상대 습도)을 제공해야 합니다.

페이스트가 조립 라인에 투입되면 이물질(먼지, 오물, 입자)로 인해 페이스트가 오염될 우려가 있습니다. 따라서 페이스트를 정기적으로(즉, 생산 또는 교대 시마다) 교체하는 계획을 세우고 권장 용매를 사용하여 공구를 철저히 세척하는 것이 좋습니다.

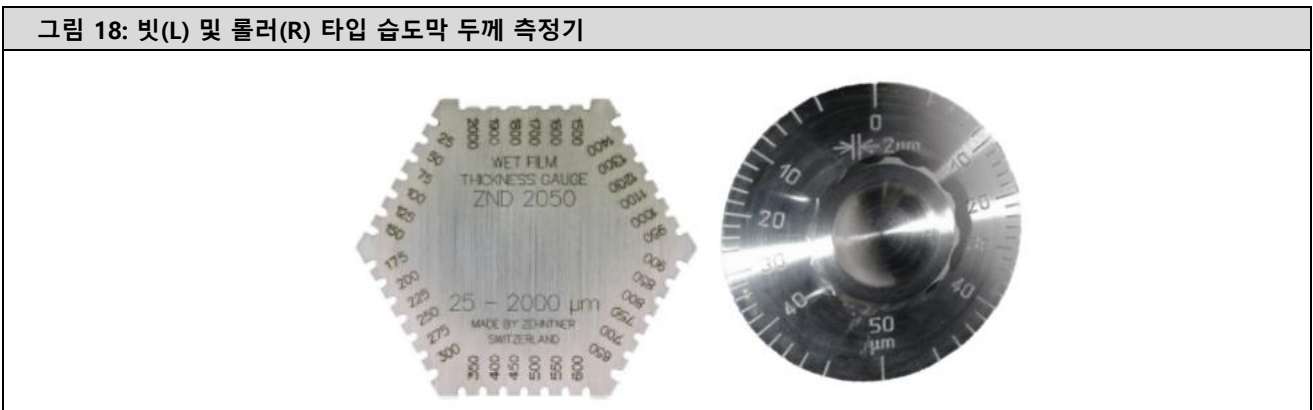
### 5. 측정

SEMİKRON 제품에 대한 기술 설명 자료에 제시된 권장 두께는 장착하기 전 모듈이나 방열판에 도포된 균일한 페이스트 층에 대해 유효합니다.

#### 5.1 습도막 두께 측정기

열 페이스트의 두께는 "습도막 두께 측정기"를 사용하여 직접 측정이 가능합니다. 롤러와 빗(comb) 등 두 가지 휴대용 타입 측정기가 가장 저렴하고 가장 일반적입니다.

그림 18: 빗(L) 및 롤러(R) 타입 습도막 두께 측정기



### 5.1.1 빗 타입

빗 타입 측정기는 금속 또는 플라스틱 판으로 구성되며 여기서 다양한 길이의 측정 타인(갈래)을 절단합니다. 타인(갈래)은 방열판 표면에서 일정한 거리에 있습니다. 측정기는 측정 표면과 수직으로 위치하며 페이스트 사이를 이동합니다(그림 19). 페이스트 두께는 최소한 페이스트와 접촉하는 타인(갈래)과 같습니다.

그림 19: 콤 측정기 작동(측면도)

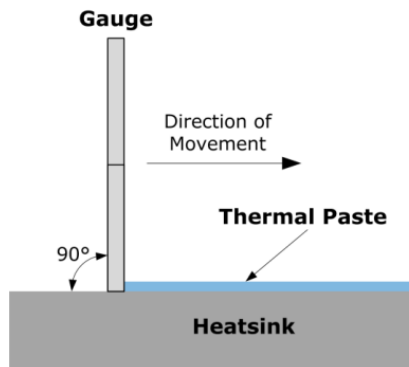
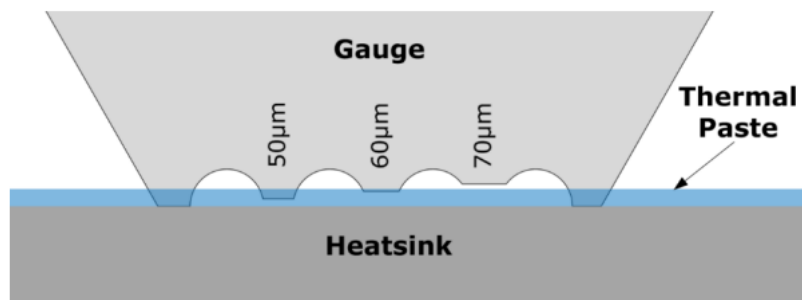


그림 20: 빗형 측정기 사용 예 이 그림에서 페이스트 두께는 60 ~ 70 $\mu\text{m}$  입니다(페이스트 두께가 균일하다고 가정할 때).



가격은 낮지만 빗형 측정기는 다음과 같은 단점이 있습니다.

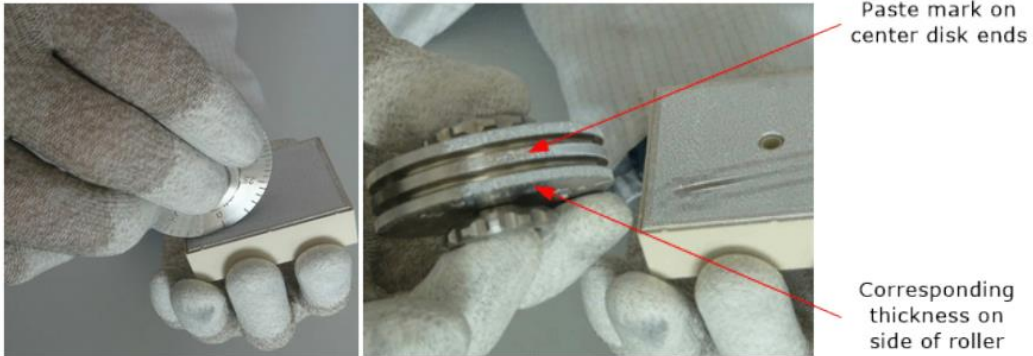
- a. 빗타입 측정기를 표면에 정확히 90°(수직)의 각도로 유지해야 합니다.
- b. 페이스트 두께가 균일하다고 가정하며, 따라서 페이스트 내의 높거나 낮은 부분이 있으면 측정이 왜곡될 수 있습니다.

이러한 단점 때문에 페이스트 두께가 좁은 범위에 있어야 하는 애플리케이션(베이스플레이트가 없는 모듈과 같은)에서는 빗타입 측정기의 사용을 권장하지 않습니다.

### 5.1.2 롤러 타입

롤러 타입 측정기는 직경이 같은 디스크 2개로 구성되며, 그 사이에 반경이 점차 줄어드는 편심 디스크가 부착되어 있습니다. 디스크들이 엄지와 검지 사이에 있는 축을 중심으로 회전합니다. 측정기를 균일한 페이스트 층을 통과해 한번 롤링 후 검사합니다. 페이스트 표시가 끝나는 중앙 디스크의 지점이 측정된 두께와 일치합니다. 측정 빔과 마찬가지로 페이스트 두께가 균일하지 않은 경우 측정이 왜곡될 수 있습니다. 일반적으로 2개의 바깥쪽 바퀴가 측정 가장자리를 측정면과 수직이 되도록 유지하므로 롤러 타입 측정기가 빗타입에 비해 더 정확합니다.

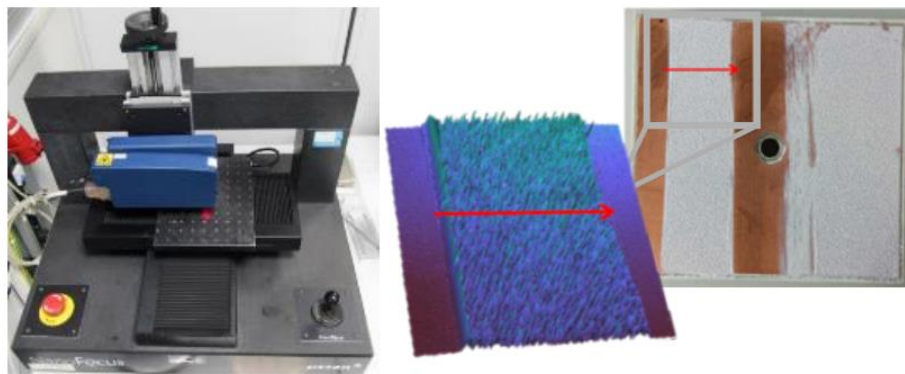
그림 21: MiniSKiiP 모듈에서 롤러 측정기를 이용한 페이스트 두께 측정



### 5.2 광학 검사

광학 3D 표면형상 측정법은 필름 두께를 평가하는 가장 고도화된 방법입니다. 일단 시료에 페이스트를 적용 후 페이스트의 일부를 제거하여 스캐닝 시스템에 기준점을 제공합니다. 시료를 기계에 올린 다음 레이저로 시료 위를 스캔하면서 표면 형상을 측정합니다(그림 22). 평균 페이스트 두께를 추정할 수 있는 페이스트 표면의 상세 형상 정보가 생성됩니다. 페이스트 표면 전체를 평가하려면 시간이 많이 소요되는 풀3D 스캔이 필요하므로 이 방법은 일반적으로 자격 검증 및 학술 연구용으로 사용됩니다.

그림 22: 벤치탑 조면계 시스템(L) 및 MiniSKiiP 모듈(R)의 스캔 결과



### 5.3 무게

페이스트 패턴의 경우 유효 두께를 직접 측정할 수는 없습니다. 하지만 페이스트 무게를 측정하여 올바른 양이 도포되었는지 여부를 알 수 있습니다. 소형 모듈은 디지털 스케일에 올리면 0으로 초기화됩니다(그림 23L). 페이스트 적용 후 무게를 다시 측정합니다(그림 23R). 페이스트의 유효 두께(균등한 분포를 가정할 때)는 다음과 같이 추정할 수 있습니다.

$$\text{Effective Paste Thickness} = \frac{(\text{Weight of paste})}{(\text{Density of paste}) \cdot (\text{Printed Area})}$$

그림 23: 페이스트 전(L)과 후(R) 모듈 무게 측정



## 6. 평가

### 6.1 기판 균열 검사

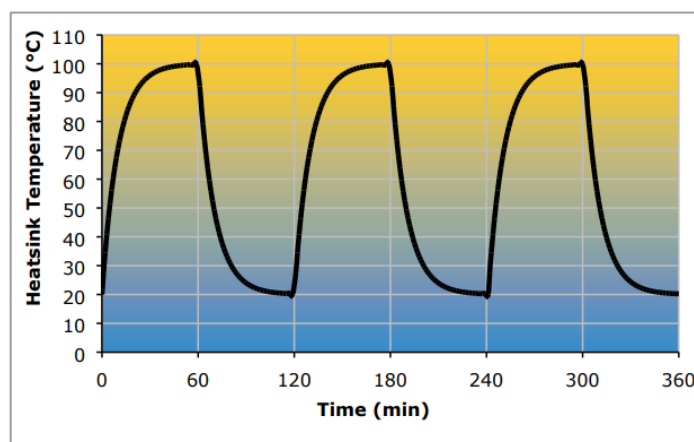
장착 오류에 민감한 모듈의 경우 내전압 시험을 통해 직접 본딩 구리(DBC) 기판의 세라믹이 페이스트의 양이 너무 많아(혹은 장착 공정의 다른 문제로 인해) 균열이 발생했는지 확인합니다. 전력 단자와 방열판 사이에 고전압을 가하면 작은 균열이 생겨 DBC 기판의 상단에서 방열판으로 전류가 흐르는지 확인할 수 있습니다. 이 같은 고전압 시험은 보통 기관 표준(예: UI)을 준수하는 제품에 대한 생산 시험의 일부로 필요합니다. [5]의 "루틴시험"을 참조하십시오.

### 6.2 열 주기

열전도 페이스트는 장착 후 바로 최적 분포(및 성능)에 도달하지 않습니다. 가열과 냉각은 방열판과 베이스플레이트 금속의 팽창 및 수축을 유발하고 이로 인해 모듈 아래로 페이스트가 이동하게 됩니다. 따라서 모듈을 장착했다면 열사이클링 실시 후 페이스트의 분포 및 열 성능을 점검해야 합니다.

열사이클링은 방열판 온도를 실온(~20°C)에서 약 100°C로 높인 후 다시 실온으로 하는 과정을 3회 반복합니다. 가열/냉각 시간은 보통 시스템 시간이 열평형 상태에 이르는 1시간입니다.

그림 24: 열주기(3 개 주기)에 대한 방열판 온도 프로파일



### 6.3 R<sub>th</sub> 측정

그림 3에서 알 수 있듯이, 열 페이스트의 효과를 가장 직접적으로 평가하는 것은 열저항에 얼마나 기여하느냐입니다. 베이스플레이트가 있는 모듈의 경우, 이때 준비된 방열판의 표준 모듈이 포함될 수 있으며 여기서 케이스(베이스플레이트) 온도를 방열판의 적절한 기준점과 함께 측정할 수 있습니다. 전력 손실량을 알고 있다면,  $R_{th(c-s)}$  /  $R_{th(j-s)}$  을 계산하여 시뮬레이션 결과나 다양한 페이스트를 비교할 수 있습니다.

베이스플레이트가 없는 모듈의 경우 모듈 내부의 기준점(정선 또는 서미스터)을 알고 있어야 하기 때문에 이것이 더욱더 관련됩니다. 여기에는 서미스터가 장착되어 있고 센서에서 기준점까지의 R<sub>th</sub>을 알고 있는 모듈이나 혹은 열전대가 칩에 들어 있거나 적외선 카메라(예 FLIR)에 접근할 수 있는 특별히 제작된 모듈이 포함됩니다. 두 가지 모듈 타입에 대한 적절한 기준점은 [4]에 설명되어 있습니다.

### 6.4 육안 검사

모듈의 열 사이클이 끝나면 모듈을 분리하여 페이스트의 분포가 제대로 되어 있는지 확인할 수 있습니다. 모듈을 재사용하거나 전기적으로 평가해야 하는 상황과는 달리, 이 경우에는 페이스트 패턴을 보존하기 위해 모듈을 똑바로 들어 올려도 됩니다. 이 공정의 경우 예리한 플라스틱 스페출라를 사용할 것을 권장합니다. 스페출라를 모듈 가장자리 약간 아래에 끼워 넣은 다음 가볍게 힘을 가합니다. 그리스의 표면 장력이 깨질 때까지 시간이 흐르면 이 때 스페출라를 비틀어 모듈을 방열판 표면에서 똑바로 들어 올리면 됩니다.

모듈의 주요 영역에 페이스트의 색이 고르고 공극이 없으면 제대로 분포되었다는 표시입니다(그림 25L). 장착 구멍 근처나 모듈 모서리 주변의 페이스트는 보통 두께가 더 얇습니다. 제대로 분포가 되지 않은 경우 공극이 생기고 고농도의 페이스트가 있는 독특한 패턴이 생성됩니다(그림 25R). 모듈 가장자리 주변에 과도한 페이스트가 있거나 장착 구멍에 끼여 있을 수도 있습니다. 허용 가능한 페이스트 패턴과 그렇지 않은 페이스트 패턴에 대한 추가 사진은 [3]을 참조하십시오.

그림 25: 페이스트의 분포(L) 및 과도한 페이스트(R)



## 7. 수명

### 7.1 펌프아웃

페이스트의 안정화를 위한 가열과 냉각으로 펌핑 동작이 발생하여 열 페이스트가 모듈 아래에서 빠져 나올 수 있습니다. 베이스플레이트 금속의 온도에 의한 팽창 결과 상하 움직임이 발생합니다(그림 26의 간단한 다이어그램 참조). 온도 주기 동안 베이스플레이트가 더 많이 움직이므로 이 효과는 베이스플레이트가 없는 모듈에 비해 베이스 플레이트가 있는 모듈에서 더 두드러집니다. 이는 또한 주로 베이스플레이트가 상당한 온도 변화( $\Delta T$ )를 보이며 가열 및 냉각되는 오래 지속되는 고부하 사이클과도 관련이 있습니다.



그림 26: 펌프 아웃을 유발하는 열 유도 베이스 플레이트 이동에 대한 확대 다이어그램

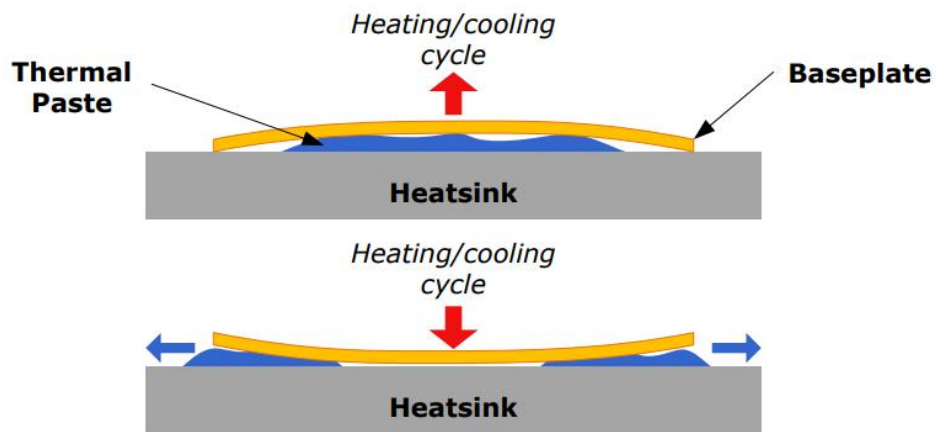


그림 27: 열 사이클 반복 후 펌프아웃 징후를 보이는 SEMITRANS 모듈의 장착 위치



펌프아웃은 페이스트에서 캐리어와 충전제 재질이 분리되는 현상과 관련이 있습니다. 페이스트 내에서 개별 충전제 입자가 코팅 물질로 둘러싸여 캐리어 오일에 바인딩 되어 있습니다. 고온 및 습도가 높으면 이러한 코팅이 깨져 충전제와 캐리어가 분리될 수 있습니다. 그러면 앞서 설명한 펌프아웃 공정으로 인해 충전제가 이동합니다. 그림 28에 따르면 모듈 하부의 광택은 충전제가 떨어져 나가 모듈 외부로 이동한 후 모듈 하부에 남아 있는 실리콘 오일 캐리어입니다. 특정 페이스트 구성은 여타 구성 요소에 비해 이러한 영향에 더 취약합니다. 장기 전력 사이클링 시험이 유일한 성능 평가 방법입니다.

그림 28: 현장 내 고온 작동 후 캐리어 오일과 충전제의 분리를 보여 주는 SEMITRANS 모듈의 하부



## 7.2 방열판 변색

열사이클링에 따른 반복된 기계적 움직임으로 인해 방열판과 모듈 사이의 금속 간 접촉 부위에 마찰이 유발됩니다. 알루미늄 방열판의 경우 결과적으로 종종 검정 자국 또는 그을음 색을 띤 입자가 형성됩니다. 그림 29 는 SEMITRANS 모듈의 모서리 장착 구멍 4개 주위에 이러한 자국이 발생한 모습을 보여줍니다. 그 위치는 스크류 결속에 따라 금속 간 접촉이 가장 강한 곳입니다. 이러한 자국이 있다는 것 자체가 나쁜 것은 아니나 강한 열사이클링의 표시일 수 있습니다.

그림 29: 과도한 열사이클로 인한 방열판의 검정 자국

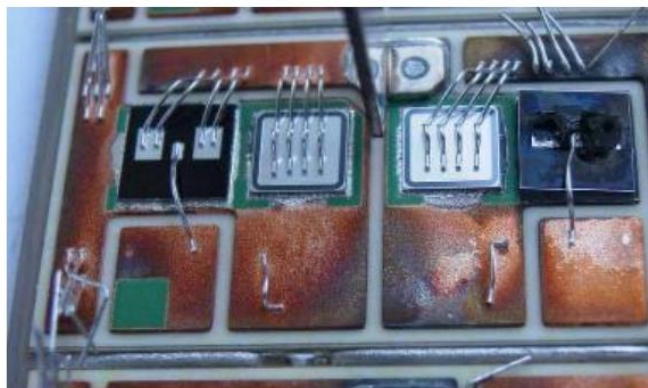


## 8. 고장 모드

### 8.1 가열

열 인터페이스 물질이 잘못 도포된 경우, 기계적 손상 외에 가장 흔한 증상은 모듈이 과열되는 것입니다. 모듈에 온도 센서가 내장된 경우에는 작동 중에 이를 경고할 수 있지만, 종종 반도체 칩이 손상된 후에야 가열 징후가 보일 수 있습니다. 일단 손상된 모듈을 분해한 후, 장기적인 과열은 변색된 구리(그림 30)와 부분적으로 녹아 굳어진("리플로") 납땜의 형태에서 알 수 있습니다.

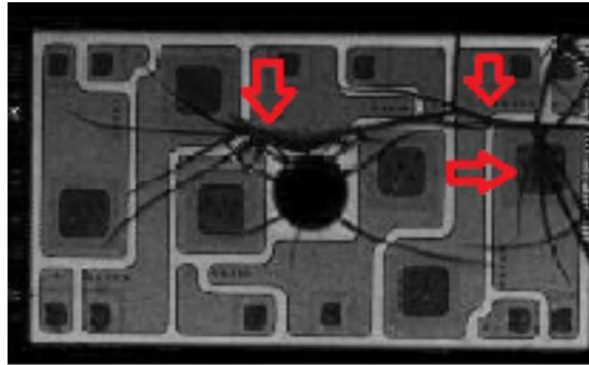
그림 30: 장시간 과열로 인한 DBC 기판의 구리 변색



### 8.2 세라믹 기판의 균열

페이스트의 과도한 사용은 열 성능이 저하될 뿐 아니라 전력 모듈에 물리적 손상을 유발할 수도 있습니다. 페이스트를 "압착하는" 데 필요한 힘은 종종 모듈의 적절한 설계 장착력보다 큰 경우가 많습니다. 그림 31 은 모듈을 장착하기 전에 방열판에 열 페이스트를 너무 과도하게 적용한 결과를 보여줍니다. 과도한 페이스트가 모듈 하부에서 빠져나오지 못할 경우 비교적 압축이 불가능하기 때문에 엄청난 압력이 축적될 수 있습니다. 두껍고 고르게 분포되지 않은 페이스트에서 생길 수 있는 에어 포켓 역시 마찬가지입니다.

그림 31: 과도한 열 페이스트 및 비조정형 나사체결 공정으로 인한 세라믹 기판의 균열을 보여주는 SEMITOP 3 모듈의 초음파현미경(SAM) 이미지



페이스트의 점도가 나사로 체결되는 모듈의 속도와 결합되면 모듈 기판에 어느 정도의 응력이 가해지는 지에 영향을 줍니다. 두꺼운 페이스트(혼합이 잘 안됐거나 충전제 함량이 높은)는 압축 상태에서 점도가 낮은 페이스트처럼 빠르게 움직이지 않습니다. 따라서 충전제 함량이 높은 "고성능" 페이스트를 고려할 때 주의를 기울여야 합니다. 아울러 자동 스크류 드라이버 속도 규칙(모듈 장착 지침 참조)을 따라야 합니다. 스크류 드라이버 속도가 빠를수록 페이스트가 흐를 시간이 줄어 모듈의 응력이 증가합니다(그림 32).

그림 32: 너무 두꺼운/점도가 너무 강한 페이스트로 인해 베이스플레이트가 없는 모듈의 응력 지점(빨간색 화살표)

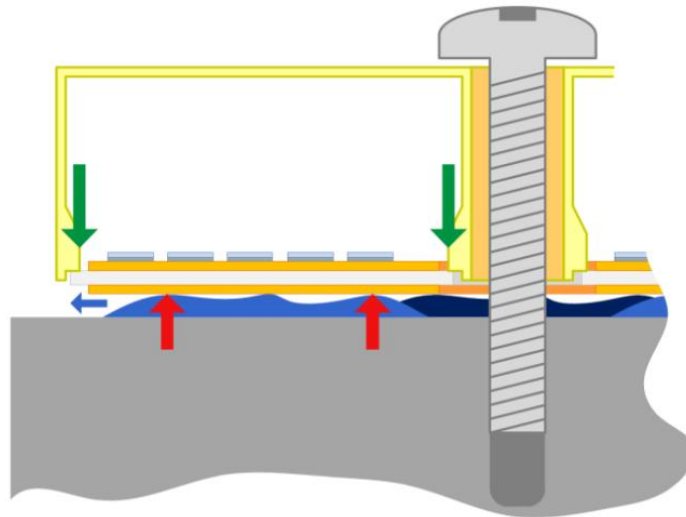


그림 1: TIM 미포함 베이스플레이트-방열판 인터페이스의 미세 단면도(확대).....	2
그림 2: 공극을 채우는 열 페이스트의 미세 보기 .....	3
그림 3: 베이스플레이트 유(L)/무(R)에 따른 모듈에 대한 열 페이스트 포함 열 저항 측정.....	3
그림 4: 페이스트 두께와 시스템의 열 저항 사이의 관계.....	5
그림 5: 롤러 예시 .....	6
그림 6: 하드 플라스틱 트레이를 사용하여 페이스트를 롤러에 장착하는 공정.....	6
그림 7: MiniSKiiP 모듈에 페이스트 도포.....	7
그림 8: 메시 파라미터 정의.....	8
그림 9: 디그리스 방열판 및 보풀 없는 천 .....	9
그림 10: 스크린 습윤(왼쪽에서 오른쪽으로).....	9
그림 11: 갭을 보여주는 스크린 하부.....	10
그림 12: 페이스트 적용(오른쪽에서 왼쪽으로).....	10
그림 13: 완성된 페이스트 패턴.....	10
그림 14: 스테인레스강 스텐실 및 모듈 하단에 생성되는 페이스트 패턴 .....	11
그림 15: 벌집 패턴 사양.....	11
그림 16: 스텐실에 스크레퍼로 그리기 전 적용된 페이스트 라인.....	12
그림 17: 동일한 페이스트 두께를 얻기 위해 필요한 스크린 및 스텐실 패턴의 가상 비교.....	13
그림 18: 콤(L) 및 롤러(R) 타입 습도막 두께 측정기.....	14
그림 19: 콤 측정기 작동(측면도).....	14
그림 20: 빗 타입 측정기 사용 예. 이 그림에서 페이스트 두께는 60~ 70 $\mu$ m 입니다(페이스트 두께가 균일하다고 가정할 때).....	15
그림 21: MiniSKiiP 모듈에서 롤러 측정기를 이용한 페이스트 두께 측정.....	15
그림 22: 벤치탑 조면계 시스템(L) 및 MiniSKiiP 모듈(R)의 스캔 결과 .....	16
그림 23: 페이스트 적용 전(L)과 후(R) 모듈 무게 측정 .....	16
그림 24: 열사이클링(3회 사이클)에 대한 방열판 온도 프로파일.....	17
그림 25: 페이스트의 분포(L) 및 과도한 페이스트(R) .....	18
그림 26: 프 아웃을 유발하는 열 유도 베이스 플레이트 이동에 대한 확대 다이어그램 .....	18
그림 27: 열 사이클 반복 후 펌프아웃 징후를 보이는 SEMITRANS 모듈의 장착 위치 .....	19
그림 28: 현장 내 고온 작동 후 캐리어 오일과 충전제의 분리를 보여 주는 SEMITRANS 모듈의 하부 .....	19
그림 29: 과도한 열사이클로 인한 방열판의 검정 자국 .....	20
그림 30: 장시간 과열로 인한 DBC 기판의 구리 변색.....	20
그림 31: 과도한 열 페이스트 및 비조절형 나사체결 공정으로 인한 세라믹 기판의 균열을 보여주는 SEMITOP 3 모듈의 초음파현미경(SAM) 이미지.....	21
그림 32: 너무 두꺼운/점도가 너무 강한 페이스트로 인해 베이스플레이트가 없는 모듈의 응력 지점(빨간색 화살표).....	21
표 1: 열 페이스트 선택 시 고려사항.....	4
표 2: 실험 결과.....	8
표 3: MiniSKiiP 모듈에 대한 벌집 매개변수의 예.....	12

## 기호 및 용어

문자 기호	용어
$\lambda$	열 전도율
$R_{th}(x-y)$	열저항, x 지점에서 y지점까지 측정

용어 및 기호에 대한 자세한 설명은 "애플리케이션 매뉴얼 전력 반도체"[2] 참고.

## 참고자료

- [1] [www.semikron-danfoss.com](http://www.semikron-danfoss.com)
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3
- [3] S. Hopfe, "Technical Explanation Thermal Interface Materials", Rev. 01, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2016
- [4] A. Wintrich, "Thermal resistance of IGBT Modules – specification and modelling", AN-1404, Rev. 01, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2014
- [5] R. Weiss, "High voltage testing", AN 16-002, Rev. 00, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2016
- [6] D. Esau, "Thermal Paste Application", AN-10-001, Rev. 0, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2010

### 중요 정보 및 주의 사항

이 문서의 정보는 제품 특성에 대한 보증 또는 보장으로 간주되지 않을 수 있습니다("품질 보증"). 이 문서는 특정 애플리케이션에 따라 달라질 수 있는 일반적인 애플리케이션에서 예상되는 제품의 통상적인 특성만을 설명합니다. 따라서 사전에 각 애플리케이션에 대해 제품을 테스트해야 합니다. 애플리케이션 조정이 필요할 수 있습니다. SEMİKRON 제품의 사용자는 SEMİKRON 제품을 포함하는 애플리케이션의 안전에 대한 책임을 지며 특정 SEMİKRON 제품의 결함으로 인해 애플리케이션이 신체적 상해, 화재 또는 기타 문제를 초래하지 않도록 적절한 안전 조치를 취해야 합니다. 사용자는 애플리케이션 설계가 모든 관련 법률, 규정, 규범 및 표준을 준수하는지 확인할 책임이 있습니다. SEMİKRON의 공인 대리인이 서명한 서면 문서를 통해 SEMİKRON이 달리 명시적으로 승인한 경우를 제외하고, SEMİKRON 제품은 당해 제품의 고장 또는 그 제품 사용의 결과로 인해 인명 피해가 초래될 수 있음을 합리적으로 예상할 수 있는 애플리케이션에 사용할 수 없습니다. 제 3자의 지적 재산권 미침해에 대한 보증을 포함하되 이에 국한되지 않는 이 문서에 제공된 정보의 정확성, 완전성 및/또는 그 이용과 관련하여 어떠한 확약이나 보증도 제공되지 않으며 어떠한 책임도 지지 않습니다. SEMİKRON은 애플리케이션 또는 제품의 사용으로 인해 발생하는 어떠한 책임도 지지 않으며 특허권, 저작권, 영업 비밀 또는 여타 지적 재산권이나 타인의 권리에 따른 라이선스를 양도하지 않습니다. SEMİKRON은 애플리케이션으로 인해 발생할 수 있는 제 3자의 지적 재산권 미침해 또는 주장된 미침해에 대해 어떠한 확약이나 보증도 하지 않습니다. 이 문서는 이전에 제공된 모든 정보를 대체 및 대신하며 업데이트로 대체될 수 있습니다. SEMİKRON은 변경할 권리가 있습니다.

SEMİKRON-DANFOSS KOR

경기도 광명시 새빛공원로 67 광명역자이타워 A 동 1207~1212 호

• Tel: +82-2-6370-4799 • Fax: +49 911-65 59-262

[sales.skkor@semikron-danfoss.com](mailto:sales.skkor@semikron-danfoss.com)