

Revision:	KOR-01
발행일:	2015-10-16
작성자:	Marion Kind, Grady
결재자:	Prof. Dr. Uwe Scheuermann

키워드: 열 임피던스, 측정, 방열판, 수냉식

다양한 작동 조건에서 수냉식 방열판의 성능 추정

- 1. 서론 1
- 2. 열 임피던스 2
 - 2.1 $Z_{th(s-a)}$ 의 정의 2
 - 2.2 측정/계산 2
- 3. 다양한 냉각조건에 대한 측정 및 계산 결과 3
 - 3.1 유량 V 의 함수로서 $R_{th(s-a)}$ 4
 - 3.2 글리콜 농도 G 의 함수로서 $R_{th(s-a)}$ 4
 - 3.3 유체 온도 T_a 의 함수로서 $R_{th(s-a)}$ 5
- 4. 모든 영향 요인의 조합 6
 - 4.1 $R_{th(s-a)}$ 의 계산 6
 - 4.2 $Z_{th(s-a)}$ 의 계산 8
- 5. 계산 예시 9
 - 5.1 $R_{th(s-a)}$ 의 계산 9
 - 5.2 $Z_{th(s-a)}$ 의 계산 9
- 6. 결론 10

1. 서론

이 애플리케이션 노트의 목적은 물-글리콜 혼합물에 대한 유량, 글리콜 농도 및 유체 온도의 함수로 열 임피던스 $Z_{th(s-a)}$ (방열판 성능)를 추정하는 데 있습니다.

전력 반도체는 동작 시 열이 발생합니다. 높은 전력출력 밀도의 경우 강제 냉각이 필요합니다. 애플리케이션 요구 사항에 따라 강제 공기 냉각(forced air cooling) 또는 강제 액체 냉각(forced fluid cooling)을 적용할 수 있습니다. 공기 냉각은 특히 낮은 냉각 요구 애플리케이션에 사용되며 외부 냉각 시스템이 없는 경우 특히 사용되며, 액체 냉각 시스템의 장점은 방열판의 높은 열 성능입니다. 액체 냉각 시스템을 사용하면 열이 더 많이 방출되므로 더 높은 열 손실에서도 사용이 가능합니다.

이 애플리케이션 노트에서는 다양한 유량, 글리콜 농도 및 유체 온도가 열 임피던스 $Z_{th(s-a)}$ (s : 방열판, a : 주변)에 미치는 영향을 설명합니다. 먼저 $Z_{th(s-a)}$ 를 정의하고 Semikron의 $Z_{th(s-a)}$ 평가 방법을 소개합니다. 이 애플리케이션 노트에서는 또한 데이터 시트 값을 사용하여 다양한 냉각 조건을 계산하는 방법을 설명합니다. $Z_{th(s-a)}$ 에 대한 Semikron 표준 데이터

시트 값은 정의된 유량, 정의된 글리콜 농도 및 정의된 유체 온도에 기초합니다. Semikron 표준 냉각수 액체는 물과 글리콜을 각각 50% 비율로 혼합한 것입니다(BASF 의 Glystantin G48). 유체 온도와 유량은 제품 유형에 따라 달라집니다.

2. 열 임피던스

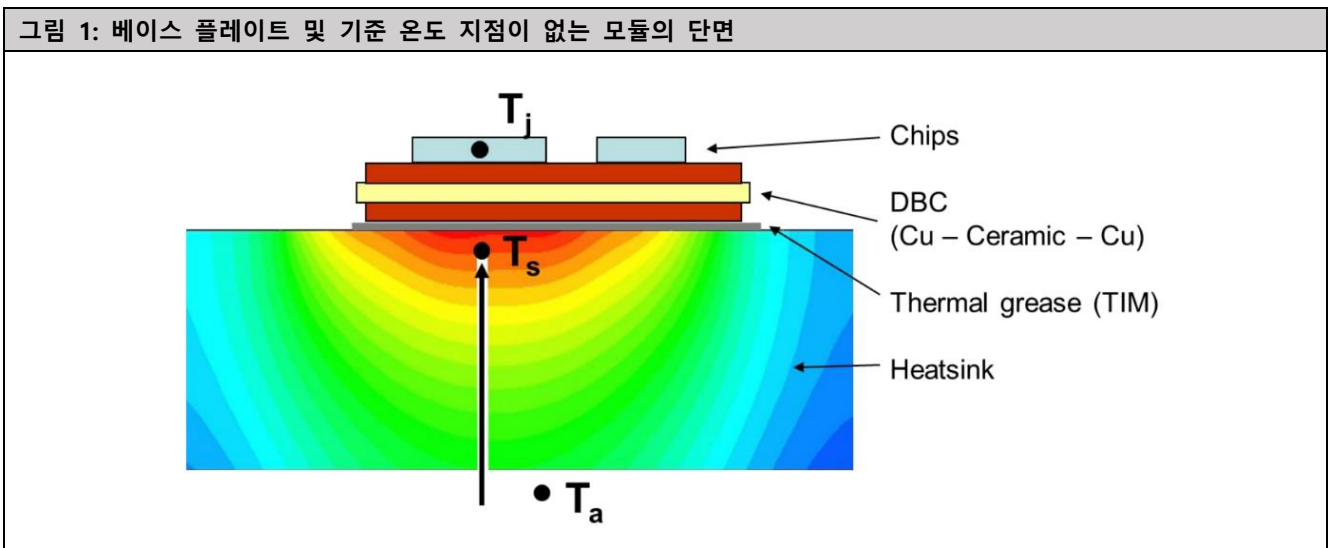
열 임피던스 Z_{th} 는 일정시간 동안 내부 가상 온도와 특정 외부 기준점의 온도의 차이를 비율 및 또 다른 한편으로는 이러한 기간 시작 시 발생하는 전력 손실의 계단 함수적 변화(이 같은 온도 변화를 유발함)로 정의합니다. 이러한 계단 함수적 변화 직전에 온도 분포가 변화가 없어야 합니다.

열 저항 R_{th} 은 열 임피던스의 정류값입니다. 고객 시스템의 열 설계에 이 같은 사양이 필요합니다. 전력 반도체는 최대 칩 온도 $T_{j,max}(J)$ (정선)의 제한을 받습니다. 열 임피던스를 통해 각종 전력 손실 프로파일에 대해 시간 종속 정선 온도를 계산할 수 있습니다.

2.1 $Z_{th(s-a)}$ 의 정의

$Z_{th(x-y)}$ 는 전력 손실의 계단 함수적 변화 크기로 나눈 시간의 함수로서 참조 지점 x 온도(T_x)와 참조 지점 y 온도(T_y) 사이의 차이로 정의됩니다. 베이스 플레이트가 없는 모듈의 경우, $R_{th(j-s)}$ 와 $Z_{th(j-s)}$ 는 Semikron 모듈에 대한 데이터 시트에서 일반값으로 정의됩니다. 베이스 플레이트가 있는 모듈의 경우 $R_{th(j-c)}$ 와 $Z_{th(j-c)}$ 는 최대값으로 지정되고 $R_{th(c-s)}$ 는 Semikron 데이터 시트에서 일반값으로 지정됩니다. 완전 시스템(방열판 포함)의 경우, 다양한 유량에 대한 $R_{th(s-a)}$ 와 특정 유속의 $Z_{th(s-a)}$ 도 데이터 시트에 포함됩니다(하나의 특정 글리콜 농도 및 유체 온도에만 해당).

이 애플리케이션 노트는 베이스 플레이트가 없는 액체 냉각 시스템에 집중합니다. T_j , T_s 및 T_a 를 측정하기 위한 기준점의 위치는 그림 1 과 같습니다. 정선 온도는 칩의 영역 관련 평균 표면 온도 또는 여러 병렬 칩의 영역 관련 평균 온도로 정의됩니다. 일반적으로 정선 온도는 고정된 참조점의 온도가 아닙니다. T_s 는 방열판 표면 아래 2mm 의 블라인드 구멍으로 측정 대상 스위치의 각 칩의 중앙 아래에서 측정합니다[2]. T_a 는 주변 온도로, 수냉식 방열판의 경우 방열판 흡입구의 유체 온도입니다. $R_{th(j-s)}$ 는 가장 뜨거운 스위치의 모든 칩의 영역 관련 평균 온도 차이 및 가장 뜨거운 스위치의 각 칩 아래의 평균 방열판 온도 사이의 고정 온도 차이를 이 스위치의 고정 전력 손실로 나눈 값으로 정의합니다(AN14-04 참조).[3]



2.2 측정/계산

Semikron 의 R_j 에 대한 표준 측정 방법은 $V_{CE-}(T)$ 방법입니다. $V_{CE-}(T)$ 방법은 pn-접합에서 순방향 전압과 온도 사이의 물리적 관계를 이용하는 센서리스 방식입니다. 작은 전류에서 순방향 전압과 칩 온도 사이에는 선형 상관관계가 있습니다. 보정 곡선을 측정하기 위해 장치를 열 안정성에 도달할 때까지 외부에서 다른 온도로 가열하여 합니다.

그런 다음 정의된 작은 감지 전류에 대해 해당되는 온도와 순방향 전압을 측정할 수 있습니다. 보정 곡선을 사용하여 R_{th}/Z_{th} 측정 시 전압 강하 측정값을 정선 온도로 변환할 수 있습니다. R_{th}/Z_{th} 는 장치에 부하 전류를 인가하여 측정합니다. 부하 전류가 열 평형 상태에 도달할 때까지 장치를 가열하고 부하 전류를 신속히 차단한 후 감지 전류에 대해 전압 강하를 기록할 수 있습니다(냉각 곡선). 이 방법은 IGBT 또는 다이오드 칩의 측정에만 사용할 수 있습니다. IGBT 측정의 경우 일반적으로 15V의 V_{GE} 가 적용됩니다.

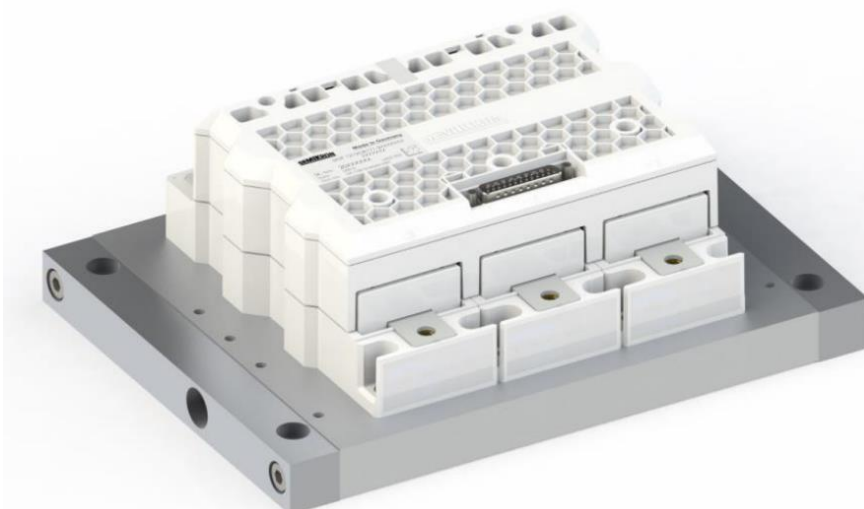
안타깝게도 $Z_{th(s-a)}$ 를 직접 측정하기는 힘듭니다. 고정 방열판 온도 T_s 는 열전대를 사용하여 측정합니다. 열전대의 응답 지연 때문에 과도상태의 방열판 온도를 제대로 정확하게 측정할 수 없습니다. 따라서 $Z_{th(s-a)}$ 는 측정 가능한 $Z_{th(j-a)}$ 와 직접 측정 불가능한 $Z_{th(j-s)}$ 의 차이로 계산할 수 있습니다(아래 식 참조). $Z_{th(j-a)}$ 측정 시 $V_{CE}(T)$ 방법을 사용합니다. 확립된 Semikron의 $Z_{th(j-s)}$ 결정은 $R_{th(j-s)}$ 를 측정하고 FEM 시뮬레이션 또는 이 해석의 마지막 부분에서 설명한 근사치를 사용하여 과도 곡선을 생성하는 것입니다. $R_{th(j-s)}$ 및 $Z_{th(j-a)}$ 측정 결과를 통해 FEM 시뮬레이션 모델을 검증한 다음 $Z_{th(j-s)}$ 시뮬레이션에 사용할 수 있습니다. $Z_{th(j-s)}$ 평가를 위한 근사치 계산 방법은 측정된 $Z_{th(j-a)}$ 의 시간 응답을 기반으로 하고 $R_{th(j-s)}$ 의 값에 맞도록 $Z_{th(j-a)}$ 의 곡선을 조정합니다. 이제 하나 이상의 냉각 조건에 대해 측정된 $Z_{th(j-a)}$ 와 시뮬레이션 혹은 계산한 냉각 독립 $Z_{th(j-s)}$ 를 사용하여 $Z_{th(j-s)}$ 를 계산할 수 있습니다(아래 공식 참조).

$$Z_{th(s-a)}(V, G, T_a) = Z_{th(j-a)}(V, G, T_a) - Z_{th(j-s)}$$

3. 다양한 냉각 조건에 대한 측정 및 계산 결과

이를 위해 다양한 냉각 조건에서 SKiiP1814GB17E4(액체 냉각기 NHC 에 장착, 그림 2)에 대한 측정을 실시합니다. 이 제품을 선택한 이유는 액체 냉각 방열판을 포함하는 Semikron 표준 시스템이기 때문입니다. 이 장치는 하프 브리지 3 개로 구성됩니다. 각 하프 브리지는 상단 스위치와 하단 스위치로 이루어집니다. 각 스위치는 내부에 칩 8 개를 병렬 연결하여 구현합니다. 시험을 위해 스위치 6 개를 모두 직렬로 연결하여 모든 스위치에 동일한 전류를 인가합니다. 기존 드라이버 전자 장치는 제거해야 합니다. 부하 전류 소스를 통해 직렬 연결된 6 개 스위치 전체에 일정한 DC 전류를 공급합니다. 가장 뜨거운 스위치의 전압 강하만 측정합니다. 즉, 측정된 T_j 값은 8 개의 병렬 칩의 영역 관련 평균 온도입니다. 방열판 온도는 가장 뜨거운 스위치의 이 8 개 칩 전체에서 측정합니다. $R_{th(j-s)}/Z_{th(j-s)}$ 계산에는 측정대상 스위치의 평균 방열판 온도 T_s 가 사용됩니다.

그림 2: SKiiP1814GB17E4, 수냉식(NHC)

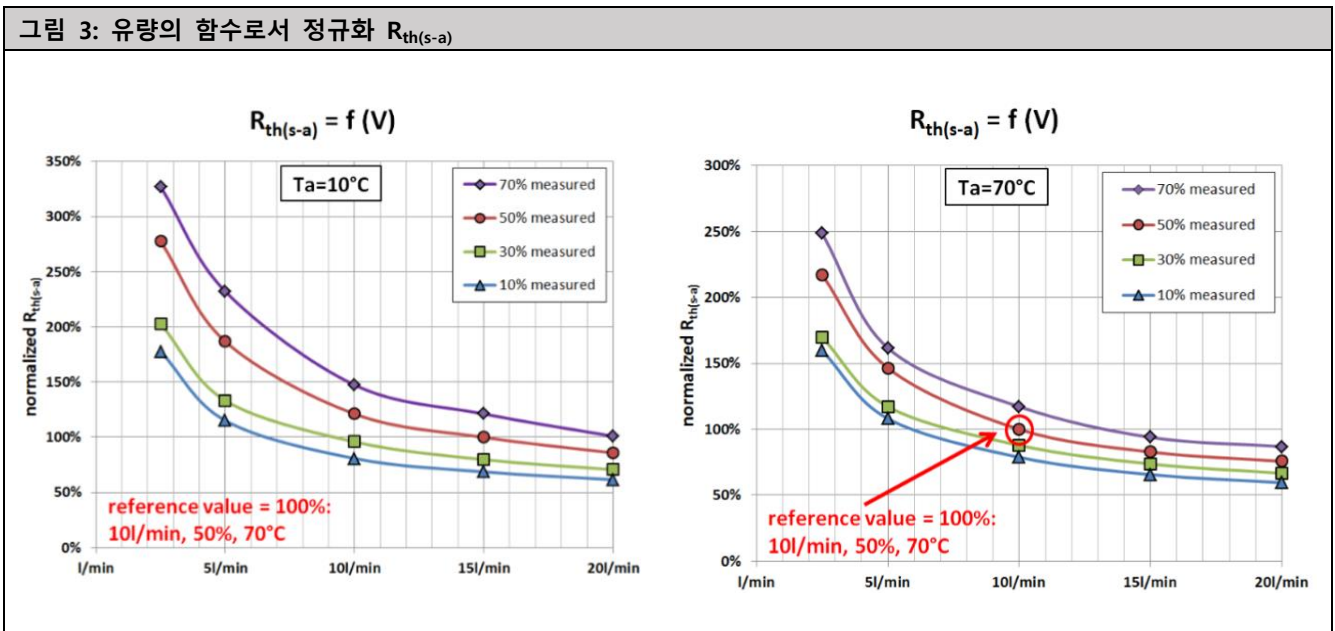


다음 표는 측정을 통해 확인한 다양한 냉각 조건을 정리한 것입니다.

표 1: 측정된 냉각 상태		
유량 V	글리콜 농도 G	유체 온도 T _a
2.5l/min	10%	10°C
5l/min	30%	70°C
10l/min	50%	
15l/min	70%	
20l/min		

3.1 유량 V의 함수로서 R_{th(s-a)}

방열판의 열 성능 개선이 필요한 경우 보통 증가시키기에 가장 간단한 냉각 매개변수가 유량입니다. 유량이 증가하면 유속이 증가하고 난류 유동이 확대되거나 층류에서 난류 유동으로 바뀔 수 있습니다. 아래 그림은 다양한 글리콜 농도와 유체 온도에 대한 유량의 함수로서 R_{th(s-a)}를 보여줍니다. 이 곡선은 쌍곡선 함수에 해당합니다. 따라서 유량이 클수록 R_{th(s-a)}가 더 낮고 개선됩니다. 유량이 매우 큰 경우 열 저항 향상도는 그림 3과 같이 점점 작아집니다.



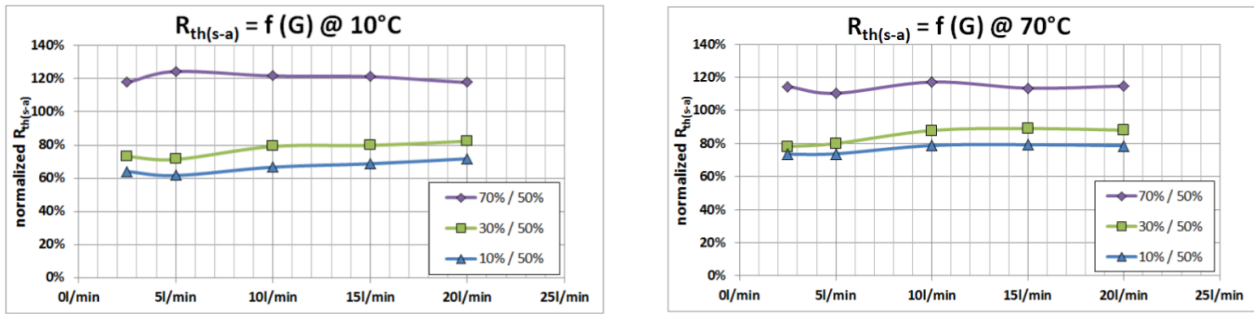
3.2 글리콜 농도 G의 함수로서 R_{th(s-a)}

우선, 대부분의 애플리케이션에서 서리와 부식의 위험이 있어 순수한 물로 방열판을 구동하는 것은 불가능합니다. 최적의 글리콜 농도는 애플리케이션에 따라 다릅니다. 부식을 방지하기 위해 개별 글리콜 제품에 들어 있는 관련 억제제가 필요합니다. 글리콜 농도의 주요 요인은 서리 방지입니다. 글리콜 농도를 결정하려면 칠러에 있는 냉각수의 최저 온도를 반드시 확인해야 합니다. 냉각수는 작동 시간 동안 전자 구성 요소로 가열하고 칠러를 통해 냉각해야 합니다. 칠러 출구(= 방열판 입구)의 유체 온도를 일정하게 유지하기 위해 칠러의 유체 온도를 정의된 유체 온도 T_a보다 낮게 할 수 있습니다. 글리콜 농도를 결정할 때 이 점을 고려해야 합니다. 열적 관점에서 보면 글리콜이 액체의 냉각 성능을 낮추므로 글리콜 함량을 가능하면 작게 함으로써 방열판의 열 성능을 최상으로 끌어 올릴 수 있습니다. 글리콜의 동적 점도가 물보다 더 높습니다. 동적 점도는 난류 유동의 특성 매개변수인 레이놀즈(Reynolds) 수에 반비례합니다(높은 Re 번호 = 강한 난류 = 열전달 계수 증가).

또한 열전달 계수에 정비례하는 열전도율과 프란틀(Prandtl) 수에 정비례하므로 열전달 계수에 정비례하는 비열용량도 글리콜이 물에 비해 더 나쁩니다.

아래 그림 4 는 50%의 글리콜 농도와 관련하여 $R_{th(s-a)}$ 에 대한 다양한 글리콜 농도의 영향을 나타낸 것입니다. 글리콜 농도의 영향이 거의 일정하므로 유량 및 유체 온도와 별개임을 알 수 있습니다.

그림 4: 글리콜 농도의 함수로서 정규화 $R_{th(s-a)}$

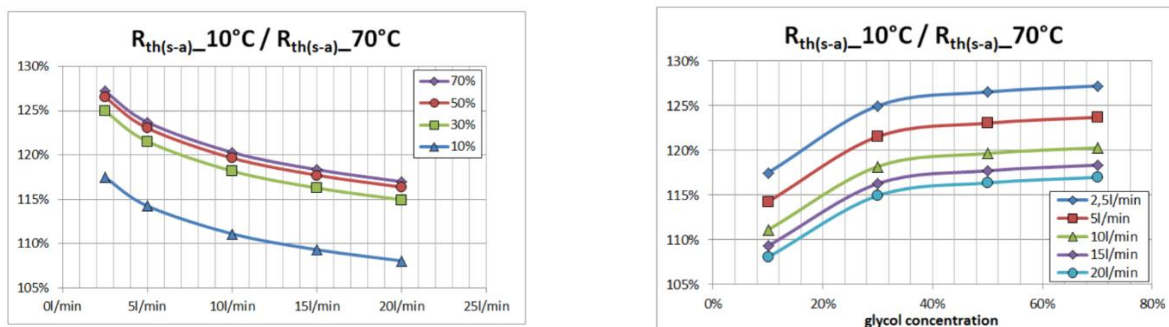


3.3 유체온도 T_a 의 함수로서 $R_{th(s-a)}$

유체 온도가 냉각에 미치는 영향, 즉 $R_{th(s-a)}$ 에 미치는 영향은 유체의 재질 속성에 따른 온도로 설명합니다. 물의 열전도율은 온도가 높을수록 증가하고 글리콜의 열전도율은 온도가 높아지면 감소합니다(온도 범위 $0^{\circ}C \sim 100^{\circ}C$). 글리콜 40%와 물 60%의 혼합물의 열전도율은 온도에 거의 영향을 받지 않습니다($0^{\circ}C-100^{\circ}C$). 순수한 물의 비열 용량은 거의 일정합니다. 물/글리콜 50% 혼합물의 경우 온도가 높아지면 비열 용량이 증가하지만 항상 순수한 물에 비해 그 값은 낮습니다. 또 다른 중요한 냉각 재료의 속성은 동적 점도입니다. 순수한 물의 동적 점도는 글리콜보다 작습니다. 또한 동적 점도는 온도에 종속됩니다. 온도가 높아지면 점도가 감소하여 레이놀즈 수가 증가하므로 열전달 계수가 개선됩니다.

다음 그림은 두 가지 차트를 보여 줍니다. 서로 다른 유체 온도($10^{\circ}C/70^{\circ}C$) 및 유량에 대해 $R_{th(s-a)}$ 상관관계가 왼쪽 차트에 표시되어 있습니다. 유량이 높을수록 $10^{\circ}C$ 와 $70^{\circ}C$ 의 유체 온도 사이의 비율이 감소하므로 유량이 클수록 유체 온도의 영향도 작아집니다. 이는 유량이 증가하면 유체 온도 $10^{\circ}C$ 와 $70^{\circ}C$ 사이의 $R_{th(s-a)}$ -비율이 작아진다는 의미입니다. 오른쪽 차트는 $10^{\circ}C$ 와 $70^{\circ}C$ 유체 온도와 글리콜 농도 사이의 관계를 설명합니다. 글리콜 농도가 증가하면 유체 온도 $10^{\circ}C$ 와 $70^{\circ}C$ 사이의 $R_{th(s-a)}$ 의 영향도 증가합니다.

그림 5: 유체 온도의 함수로서 정규화 $R_{th(s-a)}$



4. 모든 영향 요인의 조합

개별 냉각 매개변수가 $R_{th(s-a)}$ 에 미치는 영향은 앞서 설명한 바 있습니다. 일반적으로 모든 영향을 조합하게 되면 다양한 매개변수 세트에 대해 지정된 값과 관련한 매개변수 세트에 대해 열저항 $R_{th(s-a)}$ 을 추정할 수 있습니다.

4.1 $R_{th(s-a)}$ 의 계산

설명한 대로 $R_{th(s-a)}$ 는 유량, 글리콜 농도 및 유체 온도에 따라 달라집니다. 또한 유량은 글리콜 농도와 유체 온도에 따라 달라집니다. 한편, 글리콜 농도는 유량 및 유체 온도와 관련하여 일정합니다. 또한 유체 온도는 유량과 글리콜 농도의 영향을 받습니다. 아래 설명은 모든 영향 요소의 상관 관계를 요약한 것입니다.

표 2: $R_{th(s-a)}$ 에 대한 V, G 및 T_a 의 영향			
	유량 V	글리콜 농도 G	유체 온도 T_a
V	/	++	++
G	0	/	0
T_a	+	++	/

Semikron 의 "Application Manual Power Semiconductors"[2]에서 다양한 유량에 대한 $R_{th(s-a)}$ 계산을 위해 다음 식을 제시합니다.

$$R_{th(s-a)_{V_2}} = R_{th(s-a)_{V_1}} \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^K ; K=0.3...0.5[2]$$

이는 다양한 유량에 대한 $R_{th(s-a)}$ 추정을 위한 단순 근사값입니다. 계수 K 의 지정된 범위에서 선택한 값(0.3...0.5)에 따라 R_{th} 이 상당히 변동을 보입니다. 이 연구의 목표는 유량을 보다 효과적으로 추정하고 글리콜 농도와 유체 온도의 영향을 포함시키기 위해 이 근사값을 개선하는 것입니다. 아래 그림 6 은 Semikron Application Manual 공식을 사용하여 측정 및 계산된 값과 비교한 정규화 $R_{th(s-a)}$ 를 나타낸 것입니다(위 공식 참조, K = 0.4). 각 글리콜 농도와 유체 온도에 대해 10l/min 의 측정값을 기준 유량으로 사용합니다. 비교 결과 특히 유량이 작은 경우 서로 다른 유량에 대해 계산된 곡선이 항상 측정된 지점에 맞는 것은 아닌 것으로 나타났습니다. 또한 서로 다른 글리콜 농도 또는 유체 온도의 영향은 포함되지 않습니다. 그림 7 에서 측정된 값과 비교하여 유량, 글리콜 농도 및 유체 온도와 관련하여 여기에서 제시한 새로운 공식을 토대로 계산된 값을 확인할 수 있습니다. 이 새로운 공식을 사용하여 모든 도식화 곡선을 만들 때 단 하나의 측정값(10l/min, 50%, 70°C)만 필요합니다.

그림 6: 정규화 $R_{th(s-a)} = f(V)$, 측정 vs. 계산(기존 공식, $K = 0.4$)

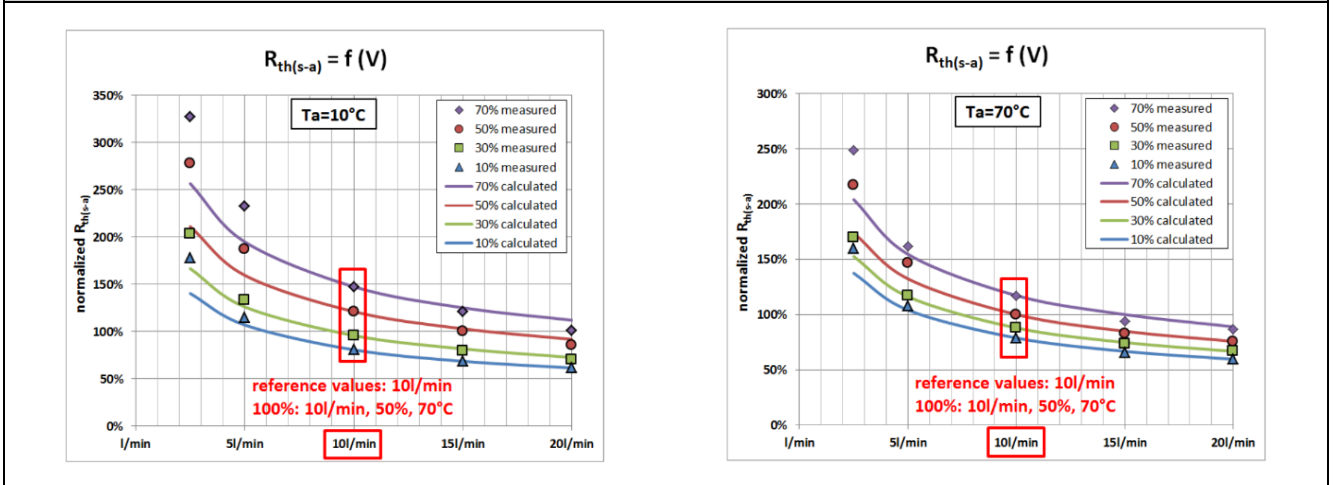
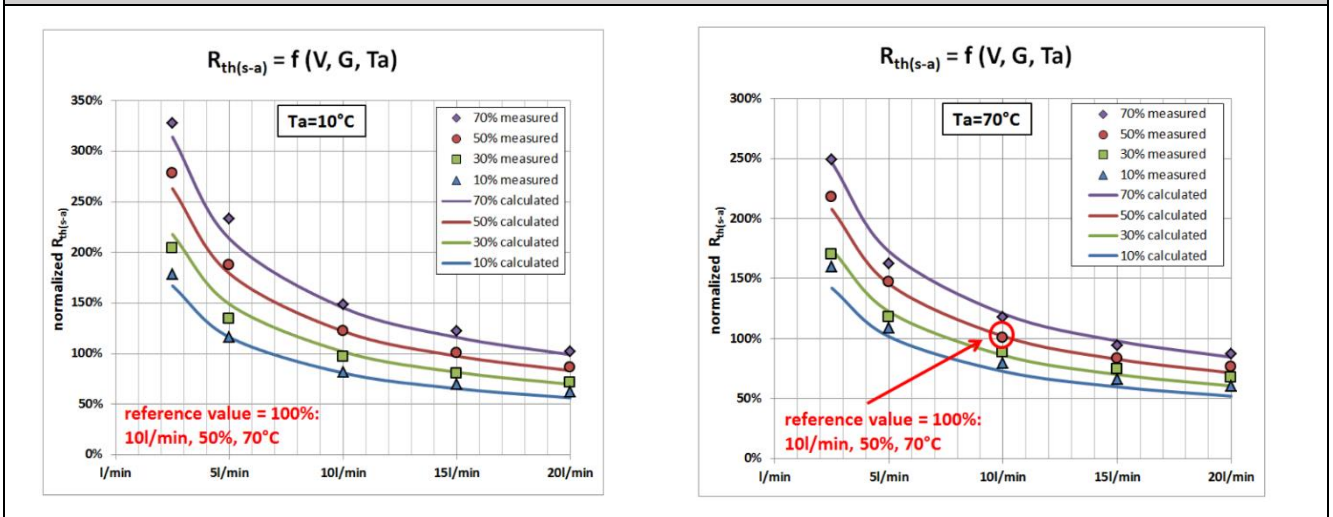


그림 7: 정규화 $R_{th(s-a)} = f(V, G, T_a)$; 측정 vs. 계산(새로운 공식)



다양한 냉각 조건에 대해 $R_{th(s-a)}$ 를 계산하기 위한 유량, 글리콜 농도 및 유체 온도와 관련된 새로운 공식은 아래와 같습니다. 이 공식의 범위는 다음과 같이 제한됩니다.

표 3: 새로운 공식의 한계

유량 V	글리콜 농도 G	유체 온도 T_a
2l/min ... 30l/min	10% ... 90%	10°C ... 90°C

$$R_{th(s-a)}(V, G, T_a) = SF \cdot R_{th(s-a)}(V_{ref}, G_{ref}, T_{a,ref}) \cdot \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{Exp(v)} \cdot 0.92 \frac{G_{ref}[\%]-G[\%]}{10\%} \cdot \left(\frac{T_{a,ref}}{T_a}\right)^{Exp(T)}$$

SF=1...1.1(safety factor)

$$Exp(v) = 0.51 + 0.0085 \cdot \left(1 - \frac{G_{ref}[\%]}{G[\%]}\right) - 0.0067 \cdot \left(1 - \frac{T_{a,ref}}{T_a}\right)$$

$$Exp(T) = 0.092 + 0.0085 \cdot \left(1 - \frac{G_{ref}[\%]}{G[\%]}\right)$$

안전 마진(safety margin)을 설명하기 위해 안전 계수(SF, 이 공식의 첫 번째 요소)가 도입되었습니다. 기준점 $R_{th(s-a)}$ 이 필수 작동 지점에서 멀리 떨어져 있는 경우 안전계수 1.1 을 사용하면 근사값이 개선됩니다. $R_{th(s-a)}(V_{ref}, G_{ref}, T_{a,ref})$ (공식의 두번째 파트)는 Semikron 데이터 시트에서 측정된 참조값입니다. 이 공식의 세 번째 요소는 유량의 영향을 설명합니다. 이 공식에서 이 요소는 Semikron Application Manual 의 기존 공식과 비교가 가능합니다. 지수는 더 이상 0.3 ... 0.5 의 상수 값이 아니라 글리콜 농도와 유체 온도의 함수입니다. 이 공식의 네 번째 요소는 글리콜 농도의 영향을 나타냅니다. 이 공식의 마지막 요소는 $R_{th(s-a)}$ 에 대한 유체 온도 영향을 설명합니다. 이 요소의 지수는 글리콜 농도의 함수입니다. 유량의 영향은 온도 지수에서는 무시할 수 있습니다.

참조점과 관련하여 하나의 냉각 매개변수(V, G, T_a)가 변경되지 않은 경우, 이 공식의 해당 부분은 $R_{th(s-a)}$ 계산값에 영향을 주지 않습니다.

4.2 $Z_{th(s-a)}$ 의 계산

열 과도 동작은 일반적으로 Semikron 데이터 시트의 Foster 모델로 설명됩니다(자세한 설명은 Semikron 의 "Application Manual Power Semiconductors"[2] 참조). Foster 모델은 수학적 접근 방식이며 다음과 같이 계산할 수 있습니다.

$$Z_{th(x-y)} = R_{th_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th1}}}\right) + R_{th_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th2}}}\right) + \dots = \sum_{i=1}^n R_{th_i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{thi}}}\right)$$

τ_{th} = 시간 상수[s]

$n=R_{th}/\tau_{th}$ 쌍의 수

Semikron 데이터 시트에서 $Z_{th(s-a)}$ 는 하나의 특정 냉각 조건에 대한 여러 쌍의 R_{thi} 와 τ_{thi} 로 정의됩니다. 다음 계산에서 참조값 $R_{th_ref_i}$ 및 $\tau_{th_ref_i}$ 입니다. 서로 다른 냉각 조건에 대한 $Z_{th(s-a)}$ 를 결정하기 위하여 매개변수 R_{thi} 과 τ_{thi} 의 값을 변경시킬 필요가 있습니다. 냉각 매개변수를 수정하면 열 임피던스($R_{th(s-a)}$)의 고정값이 변경되지만 시간 응답도 변경됩니다.

다음 공식은 다양한 냉각 조건에서 $Z_{th(s-a)}$ 매개변수 R_{thi} 과 τ_{thi} 를 계산하는 방법을 나타냅니다.

시간 상수를 증가시키기 위하여 $R_{th_ref_i}$ 과 $\tau_{th_ref_i}$ 쌍을 정렬해야 합니다($\tau_{th_ref_i} < \tau_{th_ref_i+1}$, $i=1 \dots n$).

$$R_{th(s-a)}(V, G, T_a) = SF \cdot R_{th(s-a)}(V_{ref}, G_{ref}, T_{a,ref}) \cdot \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{Exp(V)} \cdot 0.92^{\frac{G_{ref}[\%]-G[\%]}{10\%}} \cdot \left(\frac{T_{a,ref}}{T_a}\right)^{Exp(T)} \quad (\text{see chapter 4.1})$$

$$R_{th_1} = R_{th_ref_1} \quad ; \text{ if } R_{th_ref_1} \cdot \frac{R_{th(s-a)}}{R_{th(s-a)}_{ref}} < 0.5 \cdot R_{th(s-a)}$$

$$R_{th_i} = R_{th_ref_i} \quad ; \text{ if } \sum_1^i R_{th_i} = \sum_1^i R_{th_ref_i} \cdot \frac{R_{th(s-a)} - \sum_1^{i-1} R_{th_i}}{R_{th(s-a)}_{ref} - \sum_1^{i-1} R_{th_ref_i}} < 0.5 \cdot R_{th(s-a)} \quad ; i > 1$$

$$R_{th_1} = R_{th_ref_1} \cdot \frac{R_{th(s-a)}}{R_{th(s-a)}_{ref}} \quad ; R_{th_1} \neq R_{th_ref_1}$$

$$R_{th_i} = R_{th_ref_i} \cdot \frac{R_{th(s-a)} - \sum_1^{i-1} R_{th_i}}{R_{th(s-a)}_{ref} - \sum_1^{i-1} R_{th_ref_i}} \quad ; R_{th_i} \neq R_{th_ref_i} \quad ; i > 1$$

$$R_{th(s-a)} = \sum_{i=1}^n R_{th_i}$$

R_{thi} 매개변수의 변경은 단일 쌍의 가중치에 따라 달라집니다. $R_{th(s-a)}$ 값의 절반이 달성된 경우에만, 개별 쌍이 새 $R_{th(s-a)}$ 에 맞게 조정됩니다. R_{thi} 값이 변경되면 τ_{thi} 값도 그에 따라 조정됩니다.

$$\begin{aligned} \tau_{th_i} &= \tau_{th_{ref_i}} && ; \text{ if } R_{th_i} = R_{th_{ref_i}} \\ \tau_{th_i} &= \tau_{th_{ref_i}} \cdot \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{0.7} \cdot 0.92^{\frac{G_{ref}[\%]-G[\%]}{10\%}} \cdot \left(\frac{T_{a_{ref}}}{T_a}\right)^{0.2} && ; \text{ if } R_{th_i} \neq R_{th_{ref_i}} \end{aligned}$$

5. 계산 예시

제시된 수식이 어떻게 적용되는지 설명하기 위한 예시가 아래에 있습니다. 기준점으로 SKiiP1814GB17E4-3DUW (Rev.0 – 31.10.2013)의 데이터 시트 값을 선택합니다.

다음 표는 $R_{th(s-a)}$ 와 $Z_{th(s-a)}$ 의 데이터 시트 값과 참조 및 필수 냉각 조건의 매개변수를 정리한 것입니다.

표 4: 냉각 조건 및 $R_{th(s-a)}$ 의 참조 및 필수 매개 변수				
	V	G	T_a	$R_{th(s-a)}$
참조	15l/min	50%	40°C	0.0087K/W
필수	5l/min	30%	70°C	?

표 5: $Z_{th(s-a)}$: 참조 냉각 조건의 데이터 시트 값(Foster 요소)		
i^*	$R_{th_{ref_i}}$	$\tau_{th_{ref_i}}$
1	0.0065K/W	5.27s
2	0.0022K/W	17.9s

$$* \tau_{th_{ref_i}} < \tau_{th_{ref_{i+1}}}$$

i 와 관련된 $R_{th_{ref_i}}$ 과 $\tau_{th_{ref_i}}$ 의 데이터 시트 값은 종종 다르게 정렬됨에 유의해야 합니다.

5.1 $R_{th(s-a)}$ 의 계산

정의: SF=1

$$R_{th(s-a)}(5l/min, 30\%, 70^\circ C) = 1 \cdot \frac{0.0087K}{W} \cdot \left(\frac{15l/min}{5l/min}\right)^{0.501} \cdot 0.92^{\frac{50\%-30\%}{10\%}} \cdot \left(\frac{40^\circ C}{70^\circ C}\right)^{0.086} = 0.0122K/W$$

$$Exp_{(V)} = 0.51 + 0.0085 \cdot \left(1 - \frac{50\%}{30\%}\right) - 0.0067 \cdot \left(1 - \frac{40^\circ C}{70^\circ C}\right) = 0.501$$

$$Exp_{(T)} = 0.092 + 0.0085 \cdot \left(1 - \frac{50\%}{30\%}\right) = 0.086$$

5.2 $Z_{th(s-a)}$ 의 계산

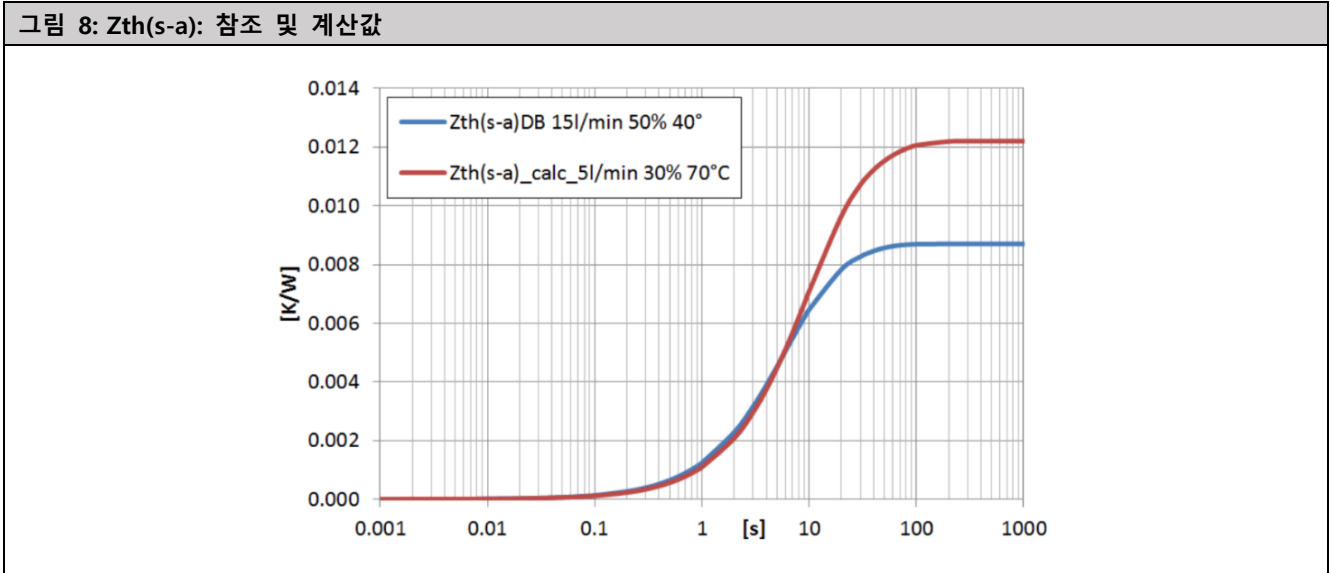
$$R_{th_1} = 0.0065K/W \cdot \frac{0.0122K/W}{0.0087K/W} = 0.00911K/W \quad (> 0.5 \cdot 0.0122K/W = 0.0061K/W)$$

$$R_{th_2} = 0.0022K/W \cdot \frac{0.0122K/W - 0.00911K/W}{0.0087K/W - 0.0065K/W} = 0.0031K/W$$

$$\tau_{th_1} = 5.27s \cdot \left(\frac{15l/min}{5l/min}\right)^{0.7} \cdot 0.92^{\frac{50\%-30\%}{10\%}} \cdot \left(\frac{40^\circ C}{70^\circ C}\right)^{0.2} = 8.6$$

$$\tau_{th_2} = 17.9s \cdot \left(\frac{15l/min}{5l/min}\right)^{0.7} \cdot 0.92^{\frac{50\%-30\%}{10\%}} \cdot \left(\frac{40^\circ C}{70^\circ C}\right)^{0.2} = 32$$

표 6: 계산 예시 필수 냉각 조건의 $Z_{th(s-a)}$		
i	R_{thi}	τ_{thi}
1	0.0091 K/W	8.6s
2	0.0031 K/W	32s



6. 결론

$R_{th(s-a)}$ 과 $Z_{th(s-a)}$ 의 추정을 위해 제시된 공식을 사용하면 지정된 냉각 조건과 관련하여 다양한 냉각 매개변수(유량, 글리콜 농도 및 유체 온도)의 영향을 계산할 수 있습니다. 이 기능은 다양한 냉각 조건을 반영하도록 Semikron 시뮬레이션 도구 Semisel 에 구현될 예정이며 현재 버전에서는 가능하지 않습니다. 다른 수냉식 방열판 설계에 대한 이 근사값의 검증을 앞으로 계획하고 있습니다.

강조할 점은 제시된 공식은 다양한 냉각 조건이 냉각 시스템의 정적 및 과도 열 특성에 미치는 영향을 추정하기 위한 근사값이라는 것입니다. 이러한 설계 단계에서, 즉 시제품을 측정에 사용하기에 앞서 이를 통해 시스템의 냉각 성능을 예측할 수 있습니다. 다만, 최초 가용 하드웨어 시스템에 대한 열 측정을 통해 이러한 예측치를 반드시 검증해야 합니다.

기호 및 용어

문자 기호	용어
DBC	직접 본딩 구리(세라믹 기판)
G	글리콜 농도[%]
NHC	Semikron 수냉식 표준 방열판 프로파일
$R_{th(x-y)}$	참조점 x 와 y 사이의 열 저항[K/W]
R_{thi}	Foster 네트워크 쌍 i의 부분 열 저항[K/W]
SF	안전 계수
τ	시간 상수[s]
T_a	주변 온도 = 유체 온도[°C]
T_j	가상 정션 온도[°C]
T_s	방열판 온도[°C]
τ_{thi}	Foster 네트워크 쌍 i의 시간 상수[s]
V	유량[l/min]
V_{CE}	컬렉터-이미터 순방향 전압, 여기서는 pn-정션을 사용하는 반도체 순방향 전압에 예시로 사용됨
V_{GE}	게이트-이미터 전압
$Z_{th(x-y)}$	참조점 x 와 y 사이의 열 임피던스[K/W]

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

참고자료

- [1] www.SEMİKRON.com
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", ISLE Verlag 2011, ISBN 978-3-938843-666
- [3] A. Wintrich: "AN1404: Thermal resistance of IGBT Modules – specification and modelling", www.SEMİKRON.com

변경 이력

SEMİKRON-DANFOSS 는 추가 통지 없이 변경할 수 있는 권리를 가집니다.

면책조항

SEMİKRON-DANFOSS 는 추가 통지 없이 신뢰성, 기능 또는 설계를 개선하기 위해 변경할 수 있는 권리를 가집니다. 이 문서에 제공된 정보는 정확하고 신뢰할 수 있는 것으로 간주됩니다. 그러나 이러한 정보의 정확성 또는 사용과 관련하여 어떠한 약속이나 보증도 제공하지 않으며 어떠한 책임도 지지 않습니다. SEMİKRON-DANFOSS 는 이 문서에 기술된 제품이나 회로의 응용 또는 사용으로 인해 발생하는 어떠한 책임도 지지 않습니다. 아울러 이 기술 정보는 부품 특성에 대한 보증으로 간주되지 않을 수 있습니다. 배송, 성능 또는 적합성과 관련하여 일체의 명시적 혹은 암묵적 보증이나 보장도 하지 않습니다. 이 문서는 이전에 제공된 모든 정보를 대체 및 대신하며 추가 통지 없이 업데이트로 대체될 수 있습니다.

SEMİKRON-DANFOSS 제품은 SEMİKRON-DANFOSS 의 명시적인 서면 승인 없이 생명 유지 장치 및 시스템에 사용할 수 없습니다.

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