

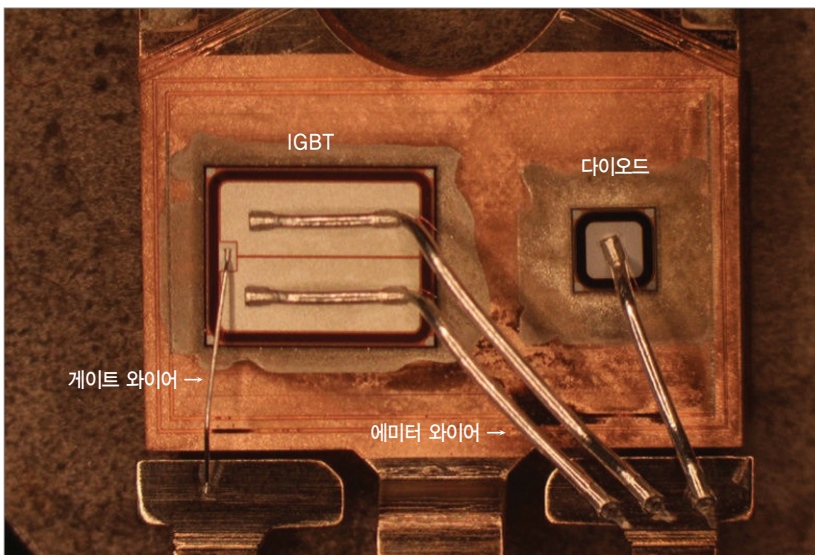
# IGBT 열 계산을 통한 전력 설계 효과 극대화

대부분의 반도체 소자 접합 온도 계산은 잘 알려진 프로세스이다. 이 방법은 통상 케이스나 케이스, 리드 온도가 알려졌으며 다이의 전력 손실을 측정하여 다이로부터 패키지까지의 세타와 곱해 케이스로부터 접합에 이르는 온도 상승을 계산한다. 이 글에서는 단일 및 복수의 다이 요소의 전력 손실을 측정하는 방법과 IGBT 및 다이오드의 세타를 활용해 평균 및 피크 접합 온도를 계산하는 방법을 설명한다.



글 | 앨런 볼(Alan Ball)  
온 세미컨덕터

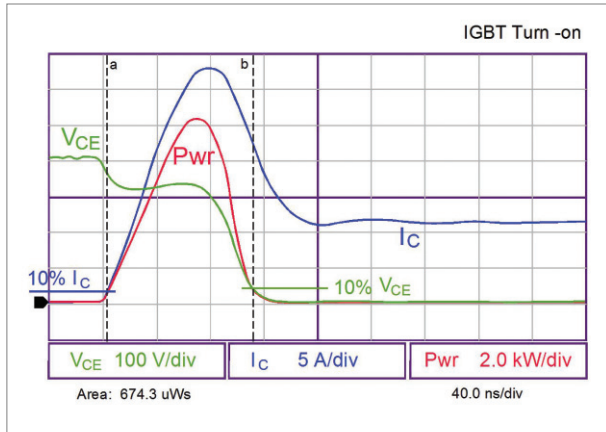
반도체 소자 접합 온도 계산법은 BJT와 MOSFETS, 다이오드 및 사이리스터를 포함한 모든 다이 패키지에 적용되는 반면, 여러 개의 다이 IGBT에는 적합하지 않다. 어떤 IGBT는 일체형 다이오드나 다이오드가 없는 단일 다이 구조 소자이지만, 대부분의 경우 함께 패키징화된 다이오드와 같이 제공된다. 또한 대부분 제조사는 접합부에서 케이스에 이르는 열 저항을 계산하기 위해 단일 세타를 제공한다. 이는 다이 온도 계산을 위해 간소화된 접근법으로 두 접합 온도의 분석 오차를 초래하기도 한다. 복수의 다이 소자는 통상적으로 세타가 다르고 두 다이의 전력 손실값도 달라 각각 별도의 계산이 요구된다. 특히 각각의 다이는 서로 다른 다이에 열에너지를 제공하므로 상호작용을 반드시 고려해야 한다.



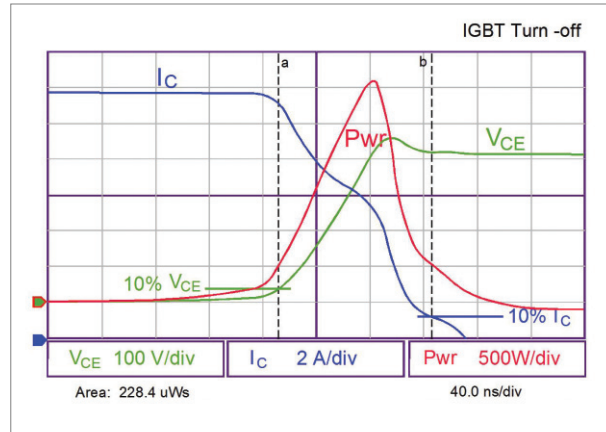
[그림 1] TO-247 패키지 리드 프레임에 탑재된 IGBT와 다이오드

## 전력 계산

전압과 전류 파형을 곱한 후 통합해 전력을 측정해야 한다. 전압과 전류의 단순 곱셈으로도 순간 전력을 구할 수 있지만, 이를 통해 평균 전력을 도출하는 것은 단순한 일이 아니다. 따라서 적분을 활용하여 이것을 에너지로 변환시켜야 한다. 그 후 다양한 손실 에



[그림 2] IGBT turn-on 파형



[그림 3] IGBT turn-off 파형

너지의 합계를 활용하여 파형에 걸친 평균 전력을 계산해야 한다.

파형의 일부 구역이 빠지거나 일부 구역이 중복될 경우 오류가 발생할 수 있으므로 시작 전에 turn-on, 전도 및 turn-off 손실의 경계를 정해야 한다. 이 분석을 위해 10% 포인트를 활용한다. 이는 공통적인 방법이지만, 모든 손실 요소에 적용되는 한 5%나 20% 등 다른 레벨도 활용될 수 있다.

통상적으로 파형은 형성되는 사인파의 정점에서 취해지며 이것이 피크 전력 손실이다. 평균 전력은 이 값의 50%이다(전압의 경우  $\sqrt{2}$ , 전류는  $\sqrt{2}$

로 인수 분해).

일반적으로 전압 파형이 정점에 오르면 경우 IGBT는 전도되지만, 다이오드는 전도되지 않는다. 다이오드 손실을 측정하려면 전류가 무효 상태에 있을 때 무효 부하를 포착해야 한다.

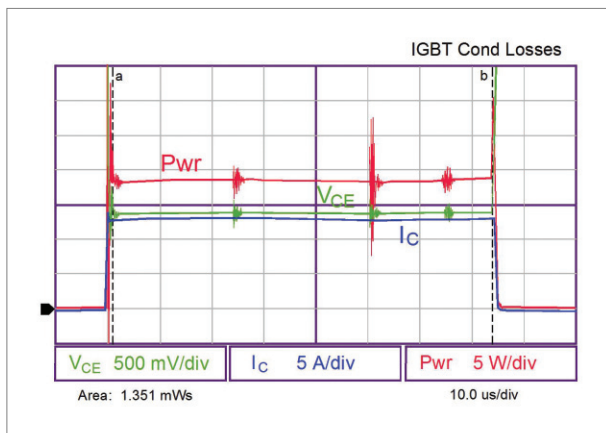
turn-on 상태에서는 10% IC 레벨에서 손실 값 측정을 시작해 10% VCE 지점에서 끝내야 한다. 이들 레벨은 다소 임의적이지만, 상당히 표준화된 것으로 필요에 따라 다른 지점을 활용할 수도 있다. 다양한 인터벌을 측정하기 위해 어떠한 레벨을 선택하든지 같은 기준으로 다양한 장치를 비교할 수 있도

록 일관적인 데이터를 취하는 것이 중요하다.

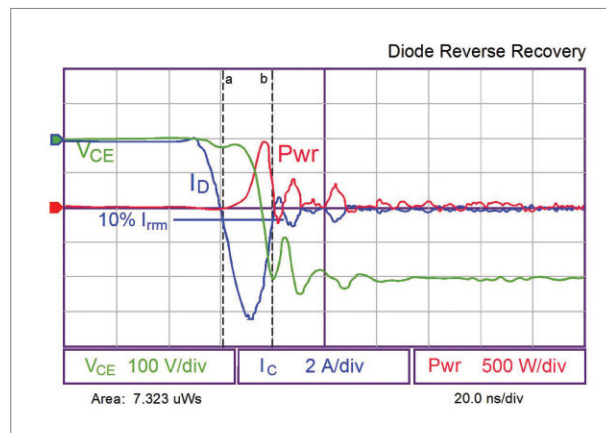
오실로스코프 파형을 통해 전력을 계산하지만, 이 값이 일정하지 않아 평균 전력이 필요해 전력 파형의 적분을 반드시 계산해야 한다. 그 방법이 아래의 궤적 하단에 나와 있으며 이 경우 값은 674.3  $\mu$ Ws(또는 줄)이다.

이와 마찬가지로 turn-off 손실은 아래와 같이 측정된다.

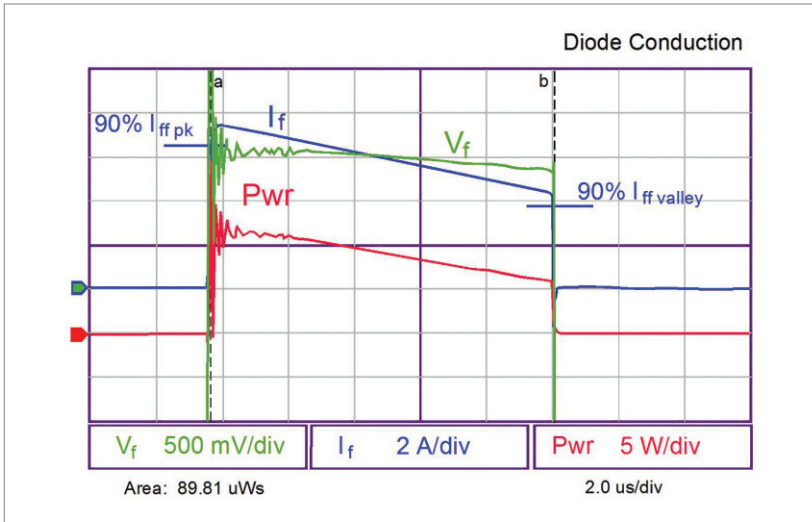
전도 손실 역시 유사한 방법으로 측정된다. turn-on 손실 종착점에서 시작하여 turn-off 손실 출발점에서 끝나야 한다. 전도 손실의 시간 척도가



[그림 4] IGBT 전도 손실 파형



[그림 5] 다이오드 turn-off 파형



[그림 6] 다이오드 전도 손실 파형

스위칭 손실보다 훨씬 길어서 정확히 측정하기는 어렵다.

다이오드 turn-on 손실 데이터는 다이오드가 전도되도록 전류가 리액턴스 모드에 있는 사이클 부분 중에 획득해야 한다. 통상 피크, 네거티브, 역전도 전류의 10% 지점에서 측정된다.

다이오드 전도 손실은 IGBT 패키지의 총 손실을 계산하는데 필요한 마지막 손실 요소이다. 모든 손실이 측정되

면 해당 작동 모드 기간을 토대로 전체 파형에 적용하는데 이 내용은 온 세미컨덕터의 애플리케이션 노트 AND9140에 설명됐다. 에너지가 추가되어 인수 분해되면 그 값도 함께 더한 후 스위칭 주파수와 곱해 다이오드 및 IGBT의 전력 손실을 구할 수 있다.

### 다이 온도 계산

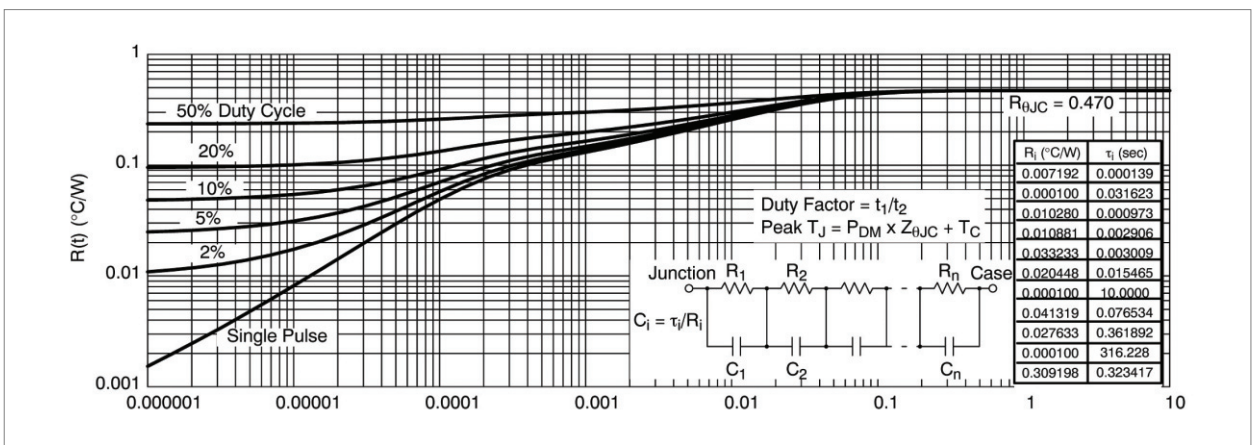
패키지의 두 다이 온도를 정확히 계

산하려면 둘 사이의 자체 발열 열 상호작용을 고려하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 세 개의 상수(다이오드 세타, IGBT 세타 및 다이 상호작용 Psi)가 필요하다. 일부 제조사들은 패키지에 대하여 단일 세타를 발표하는데, 이 경우 다이 온도는 사실 하나의 추정치일 뿐이어서 실질적인 정확도에는 큰 차이가 있을 수 있다.

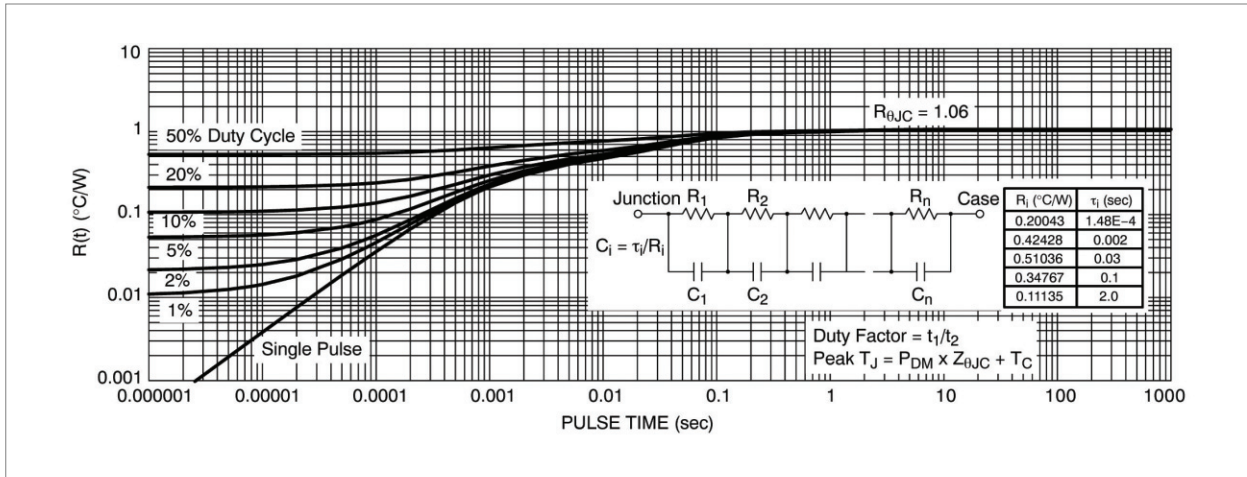
온 세미컨덕터 소자의 데이터시트는 IGBT와 다이오드 세타 차트가 포함된다. 그림 7, 8의 차트에 정상 상태 세타가 제시됐다. IGBT의 경우 0.470 °C/W이고 다이오드는 1.06 °C/W이다. 계산에 필요한 다른 열 계수가 하나 있으며 두 다이 간의 열 상호작용 정수인 Psi가 바로 그것이다. 테스트 결과 TO-247, TO-220 및 유사 패키지의 경우 아래 예시에서 사용될 약 0.15 °C/W인 것으로 나타났다.

아래 등식을 활용하여 IGBT의 다이 온도를 계산할 수 있다:

$$T_{J-IGBT} = (P_{IGBT} \cdot R_{\theta_{IGBT}}) + (P_{DIODE} \cdot \Psi) + T_{CASE}$$



[그림 7] IGBT 과도 열 임피던스



[그림 8] IGBT 다이 온도

아래의 조건을 가정하면:

- $T_c = 82 \text{ }^\circ\text{C}$
- $R\theta_{JC-IGBT} = 0.470 \text{ }^\circ\text{C/W}$
- $P_{D-IGBT} = 65 \text{ W}$
- $P_{D-DIODE} = 35 \text{ W}$
- $\Psi_{\text{interaction}} = 0.15 \text{ }^\circ\text{C/W}$

IGBT 다이 온도는 다음과 같다:

$$T_{J-IGBT} = (65 \text{ W} \cdot 0.470 \text{ }^\circ\text{C/W}) + (35 \text{ W} \cdot 0.15 \text{ }^\circ\text{C/W}) + 82 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{J-IGBT} = 118 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 다이오드 다이 온도

$$R\theta_{JC-diode} = 1.06 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$T_{J-DIODE} = (P_{DIODE} \cdot R\theta_{DIODE}) + (P_{IGBT} \cdot \Psi_{\text{interaction}}) + T_{CASE}$$

다이오드 다이의 온도는 다음과 같다:

$$T_{J-DIODE} = (35 \text{ W} \cdot 1.06 \text{ }^\circ\text{C/W}) + (65 \text{ W} \cdot 0.15 \text{ }^\circ\text{C/W}) + 82 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{J-DIODE} = 129 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 피크 다이 온도

위의 분석에서 계산된 온도는 평균 다이 온도이다. 이는 사이클 전반에 걸쳐 변동하며 그림 7, 8의 열 과도 곡선을 활용하여 피크 온도를 계산할 수 있다. 이를 위해 곡선을 통해 과도 정보를 판독해야 한다. 라인 주파수가 60 Hz일 경우, 반주기 기간은 8.3 ms가 돼야 한다. 따라서 8.3 ms 기간의 50% 주기 곡선을 사용하면 Psi 값은 다음과 같다:

$$IGBT = 0.36 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$Diode = 0.70 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$T_{Jpk-IGBT} = T_{J-IGBT} + (P_{IGBT} \cdot R_{IGBT})$$

IGBT 다이의 피크 온도는 아래와 같다:

$$T_{Jpk-IGBT} = 118 \text{ }^\circ\text{C} + (65 \text{ W} \cdot 0.36 \text{ }^\circ\text{C/W})$$

$$T_{Jpk-IGBT} = 141 \text{ }^\circ\text{C}$$

또한 피크 다이오드 다이 온도는 아래와 같아질 것이다:

$$T_{Jpk-DIODE} = T_{J-DIODE} + (P_{DIODE} \cdot R_{DIODE})$$

$$T_{Jpk-DIODE} = 129 \text{ }^\circ\text{C} + (35 \text{ W} \cdot 0.70 \text{ }^\circ\text{C/W})$$

$$T_{Jpk-DIODE} = 154 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 결론

멀티 다이 패키지에서 반도체 다이의 온도를 평가하는 데는 단일 다이 장치보다 추가적인 분석 기법이 필요하다. 다이 온도를 정확히 계산하려면 두 다이로부터 DC 및 과도 열 정보를 모두 얻을 수 있어야 한다. 또한 두 소자의 전력 손실을 모두 측정하고 1/2 사인 파형 전체에 걸쳐 해당 손실을 분석해야 한다. 이 분석을 통해 시스템의 반도체가 최적의 시스템 성능을 위해 안전하고 확실한 온도에서 작동할 것임을 확신할 수 있다. **ES**