

# 써멀 매니지먼트(Thermal Management)에 의한 3상 전압형 인버터 최적화에 관한 연구

조수억\*, 강필순\*\*, 박성준\*\*\* 김철우\*  
부산대학교\*, 한밭대학교\*\*, 전남대학교\*\*\*

## Optimal Design of 3 Phase Voltage Source Inverter by using Thermal Management

Su-Eog Cho, Feel-Soon Kang, Sung-Jun Pa가, Cheul-U Kim  
Pusan Nat'l Univ, Hanbat Nat'l Univ, Chonnam Nat'l Univ

### ABSTRACT

본 연구의 내용은 전력 반도체의 파워 싸이클링 수명을 시스템의 요구 수명에 맞추어 최적화하는 것이다. 파워 싸이클링 수명은 전력 반도체의 정선과 방열판 간의 온도 상승에 의한 수명 싸이클으로 정선과 방열판간의 온도 변화가 클수록 수명은 단축된다. 따라서, 전력 반도체의 정선과 케이스간의 온도 상승을 최소화하기 위하여 시스템에 최적화된 구동 방식을 찾는다. 정격 속도에 도달하는 가속 시간의 제한이 필요 없는 시스템의 경우는 가속도 및 가가속도를 낮추는 방법을 사용하였다. 정격 속도에 도달하는 가속 시간이 제한되는 경우는 가속 스위칭 주파수를 시스템이 허용하는 한 낮추는 방법을 사용하였다. 본 논문에서는 엘리베이터를 모델로 사용하여 전력 반도체의 손실 및 수명을 최적화 하였다.

### 1. 서론

3상 인버터의 사용이 보편화됨에 따라 각종 부가되는 문제에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있는데 본 논문에서 다루는 주제는 전력 변환 장치에서 사용되는 스위칭 소자 중에서 IGBT의 전력 손실의 최적화 및 수명에 관한 것이다. 현대 사회는 산업 사회의 빠른 발전으로 전력 변환 장치의 소형화 및 저렴한 공급 원가를 요구하고 있다. 전력 변환 장치 중에서 가장 많은 원가를 차지하고 있는 부분이 전력 반도체 IGBT이다. 전력 반도체를 시스템에 최적화 하여 저렴한 공급 원가로 제공하기 위해서는 전력 반도체의 수명에 대한 연구가 필수적이다. 전력 반도체의 수명은 전력 반도체 정선과 방열판 사이의 온도 상승 치에 지수 함수로 반비례 한다. 전력 반도체의 정선과 방열판사이의 온도 상승의 주요한 요인으로는 스위칭 주파수, 부하 전류의 크기, 주파수, 역률 등이다. 스위칭 주파수를 줄이거나 부하 전류의 크기를 줄여서 전력 반도체의 손실로 인한 온도 상승을 줄이는 것은 가능하다. 그러나 전력 변환 장치가 적용되는

현장이 다양하고 시스템이 요구하는 사양도 다양하다. 예를 들면, 소음에 민감한 곳은 가청 주파수 대역을 벗어나기 위하여 높은 스위칭 주파수를 요구한다. 부하가 일정한 시스템은 열 손실이 작으므로 작은 정격의 전력 반도체를 필요로 한다. 부하가 급변하는 엘리베이터 시스템의 경우는 가속 시 높은 전류가 흐르므로 정격이 높은 전력 반도체를 필요로 한다. 이와 같이 전력 반도체를 적용하는 현장의 요구 사양이 다양하므로 전력 변환 장치를 적용하는 시스템에 최적화 하는 것이 손실을 최소로 하면서 수명을 만족하는 방법이 된다.

### 2. 전력 반도체 열 손실 시뮬레이션

#### 2.1 시뮬레이션 구조 및 조건

엘리베이터용 전력 변환 장치를 최적화하기위해 전력 손실 및 온도 상승에 의한 수명을 매트랩으로 시뮬레이션 하였다.

이동거리와 가속도 및 가가속도에 의한 속도가 주어지면, 시브 크기에 따라 시브 속도가 계산되어진다. 로프 무게, 케이지 무게, 인승에 의해서 필요 토크가 계산되어지면, 모터 함수에 의해 요구 속도에 맞는 주파수 및 전압과 전류를 계산한다. 인버터 함수에서는 속도 및 필요 토크에 해당하는 전력 손실이 계산되어지고, 적용된 전력 반도체(IGBT) 모델의 파라미터에 의해 전력 반도체 정선과 방열판 사이의 온도 상승이 계산되어진다. 이때 전력 반도체의 전도(conduction) 손실 및 스위칭 손실에 영향을 주는 전력 반도체의 파라미터들이 전압과 전류에 비 선형적으로 증가 혹은 감소하기 때문에 좀더 정확한 시뮬레이션을 위하여 각 파라미터 별로 커브 피팅을 실시하여 함수화 하였으며 이를 시뮬레이션에 적용하였다.

그림 1은 시뮬레이션시 적용된 엘리베이터의 시스템 개략도를 나타낸 것이다. 표 1 및 2는 시뮬레이션시에 적용된 엘리베이터 인승 및 전동기 사양을 나타내었다.

엘리베이터용 전력 변환 장치 최적화시에는 보통 엘리베이터 인승 및 모터가 결정되고 여기에 전력 변환 장치를 최적화한다. 최적화 요소로는 적용 전력 반도체의 수명이 고객의 요구 사양을 만족하는지를 시뮬레이션하고 검증한다. 엘리베이터는 통상 승객이 탑승하는 케이지와 전력 저감을 위해 연결된 균형추로 구성되어 있으며, 균형추는 케이지의 무게에 승차인원의 50[%]의 무게로 만들어진다.

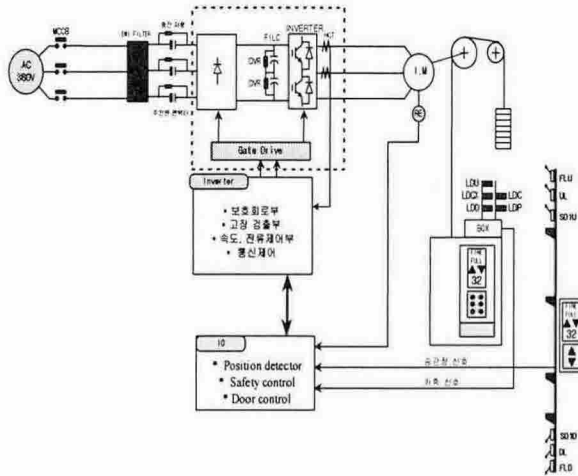


그림 1 IPM이 적용된 엘리베이터 시스템 개략도  
Fig. 1 Configuration of Elevator system equipped with IPM

표 1 엘리베이터 시스템 사양  
Table 1 Elevator system specification

인승	11
속도 [m/min]	60
정격 하중 [kg]	750
전동기 [kW]	5
엘리베이터 무게 [kW]	1174
균형추 무게 [kW]	1530
로핑	2

표 2 9 [kW] 동기기 사양  
Table 2 Specification of 9.2[kW] PMSM

출력[kW]	9.2	Rs[Ω]	0.42
극수	10	Lq[mH]	0.010
주파수[Hz]	9.62	Ld[mH]	0.008
전압[V]	400	Kemf	0.27
정격 전류[Arms]	23	rotor inertia	0.1092
Ktorq(토포크 상수)	7.15	효율	0.87
정격 토크[kgf*m]	16.83	gear ratio	1

## 2.2 일반적인 경우의 전력 반도체 손실 및 온도 상승

약 5[kw]의 부하에 전력 반도체를 정격 50[A] IPM으로 적용한 경우이며, 일반적으로 적용하는 예이다. 표 1 및 3의 조건으로 시뮬레이션 결과 정션 과 방열판 사이의 온도 상승은 약 24.6 °C로 되었으며 이 경우 전류 평균치는 16.672[A], 평균 손실은 173.74[W]이다. 시뮬레이션 결과는 그림 2에 잘 나타나 있다. 시뮬레이션 조건인 이동 거리 10[m] 및 속도 그리고 가속도와 가가속도 조건의 결과는 그림 3에 나타내었다.

표 3 시뮬레이션 조건  
Table 3 simulation of condition

스위칭 주파수	8[kHz]
이동 거리	10[m]
부하 조건	전부하
방향	상승
가속도	0.8[m/s²]
가가속도	1.4[m/s³]

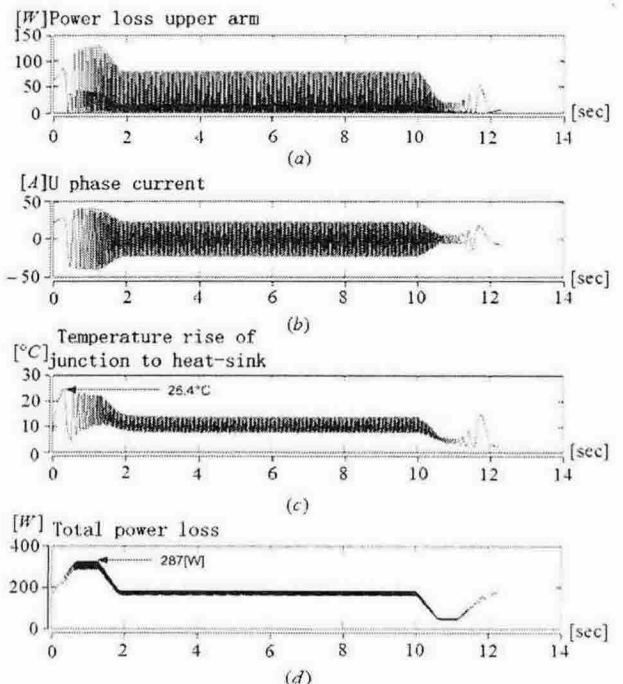


그림 2 일반적인 경우 시뮬레이션 결과  
(a) 윗상 전력 손실 (b) U상 전류  
(c) 정션과 방열판사이의 온도 상승(d) 전력 손실  
Fig. 2 Results of simulation, general case  
(a)Power loss of upper arm (b)U phase current  
(c)Temperature rise of junction to heat-sink (d)Total power loss

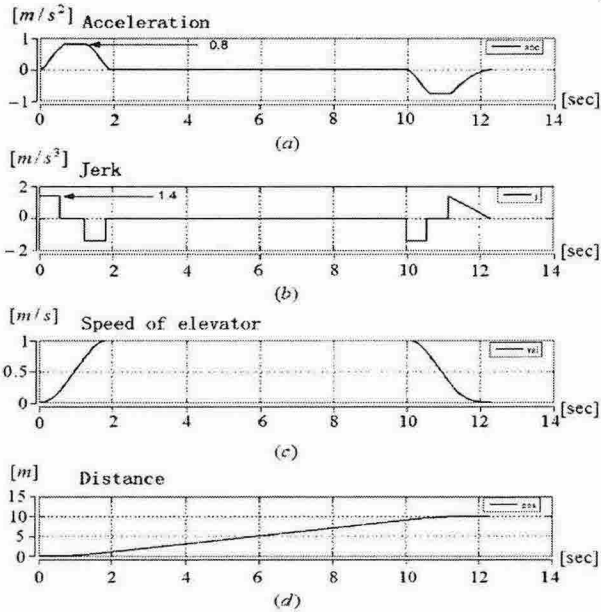


그림 3 일반적인 경우 시뮬레이션 결과  
(a)가속도 (b)가가속도 (c)엘리베이터 속도  
(d)이동한 거리

Fig. 3 Results of simulation, general case  
(a)Acceleration (b)Jerk (c)Speed of elevator (d)Distance

### 2.3 9.2[kW] 모터에 50[A] IPM 적용시 손실 및 온도 상승

약 9[kW]의 부하에 전력 반도체를 정격 50[A] IPM으로 적용한 경우이며, 일반적으로 사용하지 못하는 예이다. 표 3 및 4의 시뮬레이션 조건으로 계산한 결과 정선과 방열판 사이의 온도 상승은 약 30°C로 되었으며 이 경우 전류 평균치는 20.355[A], 평균 손실은 216.41[W]이다. 시뮬레이션 결과는 그림 4 및 5에 잘 나타나 있다. 수명에 영향을 주는 정선과 방열판간의 온도 상승이 30°C에 도달하여 수명을 만족하지 못한다. 수명에 관한 사항은 다음 절에서 설명하였다.

표 4 엘리베이터 시스템 사양

Table 4 Elevator system specification

인승		13
속도	[m/min]	90
정격 하중	[kg]	900
전동기	[kW]	9.2
엘리베이터 무게	[kg]	1325
균형추 무게	[kg]	1752
로핑		2

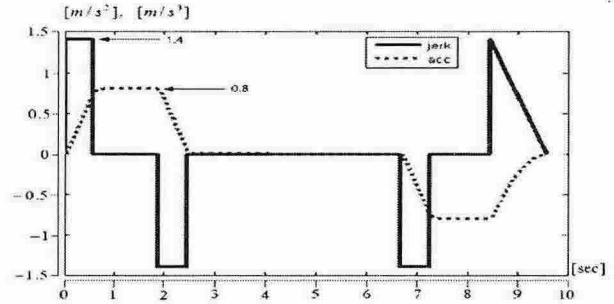


그림 4 시뮬레이션 결과, 가속도(acc) 와 가가속도  
Fig. 4 Results of simulation, Acceleration and Jerk

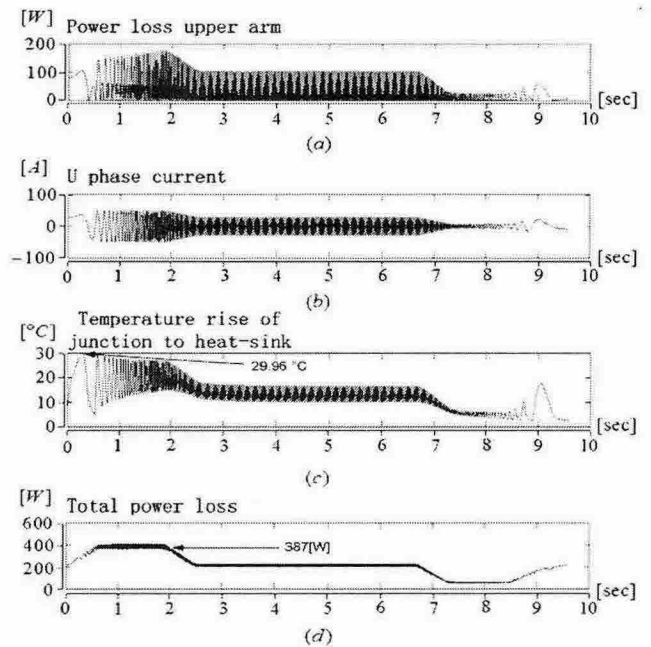


그림 5 시뮬레이션 결과  
(a) 윗상 전력 손실 (b) U상 전류  
(c) 정선과 방열판사이의 온도 상승 (d) 전력 손실  
Fig. 5 Results of simulation  
(a) Power loss of upper arm (b) U phase current  
(c) Temperature rise of junction to heat-sink  
(d) Total power loss

### 2.4 가가속도 및 가속도를 변경하는 경우 손실 및 온도 상승

속도 프로파일의 가속도를 0.8[m/s²]에서 0.6[m/s²]로 조정하고, 가가속도를 1.4[m/s³]에서 0.6[m/s³]로 변경하는 경우, 2.3절의 조건으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 한 결과 정선과 방열판 사이의 온도 상승은 약 28.659°C로 되었으며 이 경우 전류 평균치는 20.351[A], 평균 손실은 214.11[W]이다. 시뮬레이션 결과는 그림 6에 잘 나타나 있다. 시뮬레이션 조건인 가속도와 가가속도 조건의 결과는 그림 7에 나타내었다. 수명에 영향을 주는 정선과 방열판간의 온도 상승이 28.659°C에 도달하여 가가속도와 가속도를 감소하였을 경우 효과는 약 1.3°C 저감되었다.

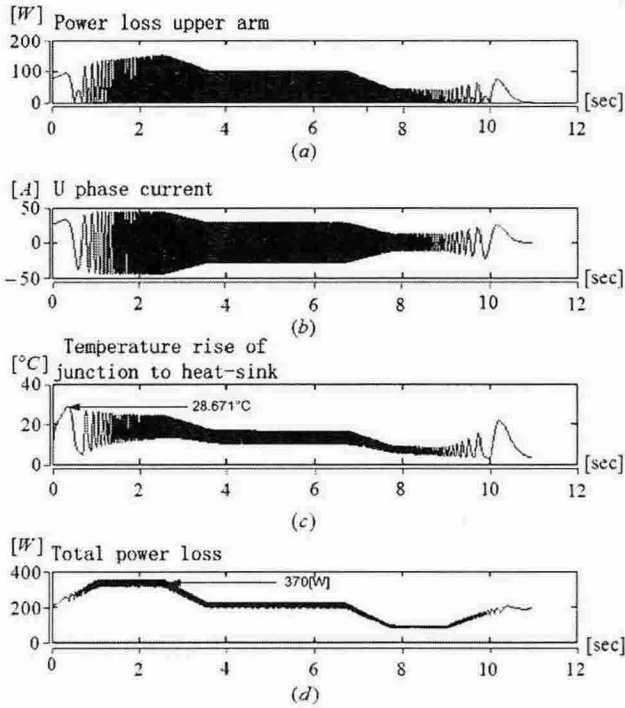


그림 6 시뮬레이션 결과  
 (a) 윗상 전력 손실 (b) U상 전류  
 (c) 정선과 방열판사이의 온도 상승 (d) 전력 손실

Fig. 6 Results of simulation  
 (a) Power loss of upper arm (b) U phase current  
 (c) Temperature rise of junction to heat-sink  
 (d) Total power loss

### 2.5 가속 전류 구간에서 스위칭 주파수를 변경하는 경우 손실 및 온도 상승

가속도 및 가속도를 조정하는 경우, 정선 과 케이스간의 온도 상승을 약 1.3℃ 저감하였으나 가속도 및 가속도를 감소 변경하는 경우 10[m] 주행 시간이 9.7[sec]에서 11[sec]로 증가되어 서비스 효율의 저하를 가져왔다.

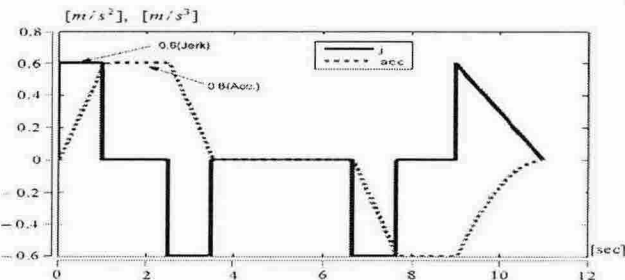


그림 7 시뮬레이션 결과, 가속도(acc) 와 가가속도  
 Fig. 7 Results of simulation, Acceleration and Jerk

그래서 가속도 및 가가속도는 일정하게하고, 가속구간에서 스위칭 주파수를 8[kHz]에서 4[kHz]로 감소하는 경우의 손실 및 온도 상승에 대해 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 정선 과 방열판 사이의 온도 상승은 약

26.33℃ 로 되었으며 이 경우 전류 평균치는 20.355[A], 평균 손실은 195.57[W]이다. 시뮬레이션 결과는 그림 8에 나타나 있다. 수명에 영향을 주는 정선과 방열판간의 온도 상승이 26.33℃ 로 일정 스위칭 주파수 8[kHz]구동시 30℃ 보다 3.67℃ 감소하였다. 정선 과 케이스간의 온도 상승치가 약 12[%]의 저감을 가져왔다.

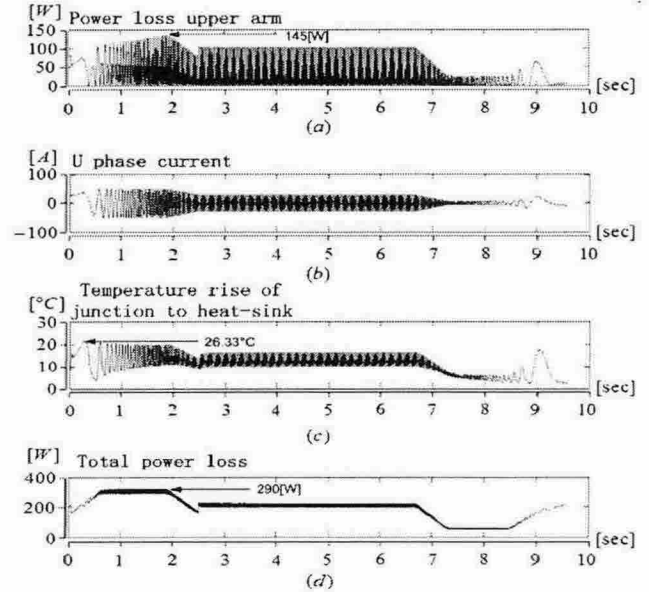


그림 8 시뮬레이션 결과  
 (a) 윗상 전력 손실 (b) U상 전류  
 (c) 정선과 방열판사이의 온도 상승 (d) 전력 손실

Fig. 8 Results of simulation  
 (a) Power loss of upper arm (b) U phase current  
 (c) Temperature rise of junction to heat-sink

### 3. 전력 반도체 수명 분석

파워 사이클링 수명은 전력 반도체의 케이스의 온도가 작게 변하고, 전력 반도체의 정선의 온도가 자주 바뀌는 경우에 적용한다.

$$Nf = C1 \times \Delta T_j^{-n1} \quad (1)$$

여기서, C1, n1 : 상수

$$\Delta T_j = \Delta T_{j-c} + \Delta T_c$$

$\Delta T_{j-c}$  : 전력 반도체의 정선 과 케이스간의 온도 상승

$\Delta T_c$  : 전력 반도체의 케이스의 온도 상승

소손 모드는 전력 반도체의 정선의 온도가 바뀌었을 경우 알루미늄 와이어 와 실리콘 칩 사이의 선형 확장 계수(Coefficient of linear expansion)가 다르므로 해서 두 재질 사이에는 인장 스트레스가 인가된다. 이 스트레스가 반복적으로 인가되는 경우 소손 모드로 이어진다 [13]. 즉 파워 사이클링 수명이란 정선과 케이스 간의 온도 변화에 대한 전력 반도체의 온 오프 횟수를 의미한

다. 미쯔비쉬(Mitsubishi)사에서 제공된 PM50RSE120 S- 시리즈 전력 반도체에 대한 파워 사이클링 수명 데이터는 그림 10과 같다. 파워 사이클링 수명에 대한 C1과 n1의 상수 값은 다음과 같다. 고장률1[%]에 대한 C1 값은  $10^{12.065}$ 이며, n1 값은 3.978이다. 고장률 10[%]에 대한 C1 값은  $10^{12.35}$ 이며, n1 값은 3.978이다. 엘리베이터용 전력 변환 장치를 최적화 하기위해 시뮬레이션 한 전력 반도체의 정션 과 방열판 간의 온도 상승 값을 파워 사이클링 수명으로 환산 하면 표 5와 같다. 시뮬레이션 한 결과를 종합해 보면, 가속도나 가가속도를 감소시킨 경우는 수명에 미치는 영향이 크지 않고 스위칭 주파수를 가속 구간에서 감소시킨 경우 가장 많은 영향을 미친다. 항목 6항의 경우 일반적으로 5[kW]의 부하에 50[A] 정격의 IPM을 사용하는 예이며, 항목 4의 경우, 9[kW]의 부하에 통상 100[A] 정격을 사용하나, 가속 구간에서 스위칭 변경을 하는 경우 50[A] IPM 적용도 가능 하리라고 생각된다. 통상 전력 반도체의 정격을 산정하는 경우 가속 전류의 크기에 맞추어 산정하나, 가속 구간에서 스위칭 주파수를 감소할 시킬 수 있는 시스템의 경우, 가속시 스위칭 변경 방법은 전력 반도체의 최적화시에 전력 반도체의 정격을 감소시킬 수 있는 좋은 방법이라고 생각한다. 하지만 스위칭 주파수를 감소시키는 경우 소음에 취약할 수 있고, 전력 변환 장치 성능에 영향을 줄 수 있으므로 적용하고자하는 시스템의 특성에 맞게 최소 스위칭 주파수를 산정하여야 하며 이러한 스위칭 주파수 변경 방법은 인버터에만 적용 가능하고 컨버터의 경우 전원 주파수가 고정되어 있으므로 전력 손실이 인버터보다 작으며, 전원측 리액터의 소음 때문에 가속시 스위칭 주파수 변경 방법은 적당하지 않다.

표 5 파워 사이클링 수명  
Table. 5 Power cycling life

항목	가속도 [%]	가가속도 [m/s <sup>3</sup> ]	주파수 (가속) [kHz]	주파수 (정속) [kHz]	평균 전류 [A]	평균 손실 [W]	온도 상승 [°C]	수명(횟수) (고장률 1[%])
1	0.8	1.4	8	8	20.355	216.41	29.96	1,563,500
2	0.8	0.8	8	8	20.35	214.13	28.985	1,783,300
3	0.6	0.6	8	8	20.351	213.12	28.671	1,862,300
4	0.8	1.4	4	8	20.355	197.25	26.33	2,612,900
5	1.0	1.4	8	8	20.352	214.64	29.984	1,558,500
6	0.8	1.4	8	8	16.6	184.05	24.6	3,423,500

### 참고 문헌

- [1] H.De Lambilly, H.Keser, "Failure Analysis of Power modules: A Look at the Packaging and Reliability of large IGBT's," Thirteenth IEEE/CHMT International. Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1992. September 28-30, 1992, pp.366-370.
- [2] V.A.Sankaran, C.Chen, C.S.Avant, X.Xu, "Power Cycling Reliability of IGBT Power modules," IAS '97., Industry Applications Conference. Vol.2, Oct. 1997, pp.1222-1227.
- [3] F.Auerbach, A.Lenniger "Power-Cycling-Stability of IGBT-Modules," IAS '97. Industry Applications Conference, IEEE Conference Record. Vol.2, pp.1248-1252, Oct. 1997

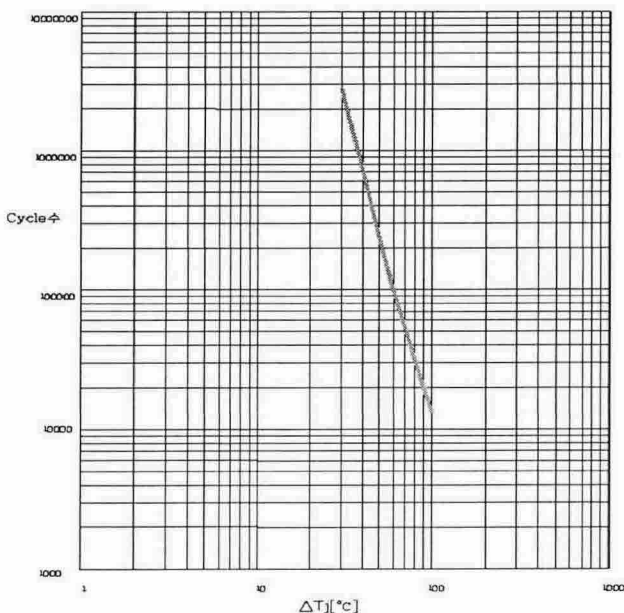


그림 10 파워 사이클링 수명  
Fig. 10 Power cycling life