

## 승강기용 전력변환장치의 IGBT 전력손실에 관한 연구

(A Study on the Power Loss Simulation of Inverter and Converter for Elevator)

조수억\*

(Su-Eog Cho)

### Abstract

In case of power electronics, the power loss and EMI noise of IGBT is different depends on a adopting technology with the same power rating. To reduce the EMI noise, we could increase the resistance of gate. But in this case, the power loss of IGBT is increased, In this paper, we simulated the power loss of IGBT with the speed profile of elevator by the changing IGBT type, the voltage between gate and emitter, the resistance of gate in converter and inverter for elevator. To optimize the power electronics with the satisfied life time, It is necessary that we calculate the power loss and the rise of temperature in IGBT with the adopting technology type, the resistance of gate, the voltage between gate and emitter.

Key Words : Elevator, Power Loss, Inverter, Converter, Temperature Rise

### 1. 서 론

전력용 반도체 소자의 발전과 더불어 DSP와 같은 고성능 디지털 마이크로프로세서의 발달은 첨단 디지털 제어기법을 전력전자 응용분야로 적용 가능케 하였으며 제어기 및 전력 변환기기 자체의 부피와 무게, 그리고 가격의 감소는 각종 전력 변환기기를 보편화 시켰다. 전력용 반도체소자의 단위 스위칭 당 스위칭 에너지 손실은 감소 추세에 있지만 스위칭 주파수가

증가됨에 따라 단위 시간당 스위칭 손실은 감소되지 않았음을 의미한다. 따라서 인버터의 스위칭 손실을 감소시키는 일은 여전히 중대한 관심사이다. 또한, 반도체 기술의 발전으로 반도체 전력 소자의 크기는 점점 작아지고 있기 때문에 전력 소자에 부착되는 방열판의 용량이 전체 인버터 시스템의 크기를 결정짓고 있는 추세이다. 전력변환장치의 손실, 즉 전력 소자의 손실 으로부터 방열판의 크기가 결정되므로, 이는 전력변환장치 제작에 있어서 중요한 요소가 되었다 [1-3]. 유도 전동기를 가변속 운전시, 인버터의 스위칭 작용으로 인하여 많은 고조파가 포함된다. 이로 인해 전동기의 고조파 손실, 토크 맥동, 전자기적 소음 및 진동 등을 초래한다. 이를 개선하기 위하여 정현 펄스 폭 변조방식을 적용하기도 한다[7]. 전력용반도체(IGBT)의 경우 적용된 기술에 따라 같은 정격에서도

\* 주저자 : 서일대학교 전기과 부교수  
\* Main author : Associate Professor, Dept. of  
Electrical engineering, Seoil University  
Tel : 02-490-7240, Fax : 02-490-7803  
E-mail : secho@seoil.ac.kr  
접수일자 : 2014년 10월 22일  
1차심사 : 2014년 10월 25일  
심사완료 : 2014년 11월 20일

전력 손실과 EMI 노이즈가 다르다. EMI 노이즈를 줄이기 위해서 게이트 저항을 메이커에서 제공하는 표준 저항보다 크게 사용하기도 한다. 하지만 이 경우 전력 손실은 증가한다. 본 논문에서는 승강기 속도 프로파일에 따라 전력변환장치 스위칭 소자(IGBT)의 전력 손실을 IGBT type별, 게이트-에미터 간 전압, 게이트 저항 가변에 따라 승강기용 인버터 및 컨버터의 전력 손실을 시뮬레이션하였다. 전력변환장치의 전력 손실은 온도상승을 초래한다. 이는 수명과 반비례하므로 최적의 IGBT 수명을 산출하기 위하여 적용 IGBT type, 게이트-에미터 간 전압, 게이트 저항시의 전력 손실 계산 작업은 필수적이다.

## 2. 승강기용 전력변환장치의 전력손실

그림 1은 시뮬레이션 시 적용된 엘리베이터의 시스템 개략도를 나타낸 것이다. 엘리베이터용 전력 변환장치 최적화시에는 엘리베이터 인승 및 모터가 결정되고, 여기에 전력 변환 장치를 최적화한다. 엘리베이터는 통상 승객이 탑승하는 케이지와 전력 저감을 위해 연결된 균형추로 구성되며, 균형추는 케이지의 무게에 승차인원의 50%의 무게로 만들어진다.

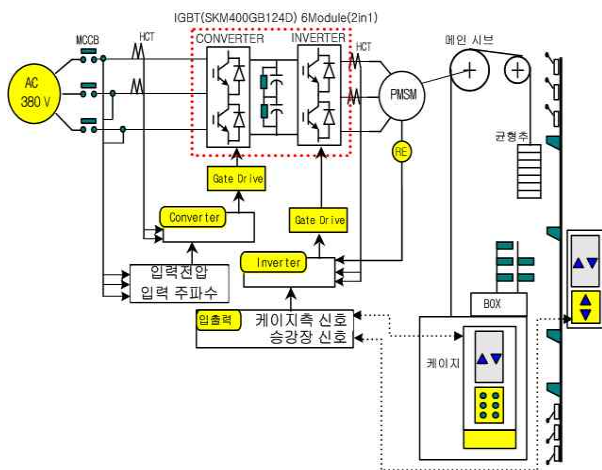


그림 1. 승강기 시스템 다이어그램  
Fig. 1. Elevator system diagram

전력 반도체의 전도(conduction) 손실 및 스위칭 손실에 영향을 주는 전력용반도체의 파라미터[4]들이 전

압 과 전류에 비선형적으로 증가 혹은 감소하기 때문에 좀 더 정확한 시뮬레이션을 위하여 각 파라미터별로 커브 피팅을 실시하여 함수화하였으며 이를 시뮬레이션에 적용하였다. 그림 2는 게이트 에미터 간 전압이 증가할수록 컬렉터 에미터 간 포화 전압이 감소함을 보여준다. 이 컬렉터 에미터 간 포화전압은 전력 손실중 전도 손실과 관계가 있다[5].

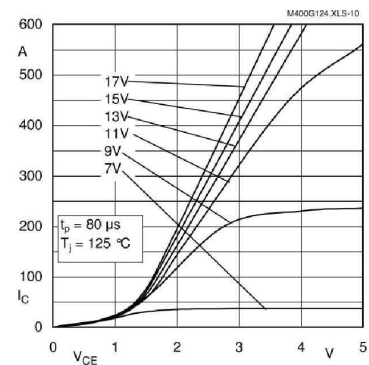


그림 2. 게이트 에미터 전압( $V_{GE}$ )에 따른 컬렉터 에미터 포화 전압( $V_{CE}$ )  
Fig. 2. Gate Emitter Voltage( $V_{GE}$ ) VS. Collector Emitter Voltage( $V_{CE}$ )

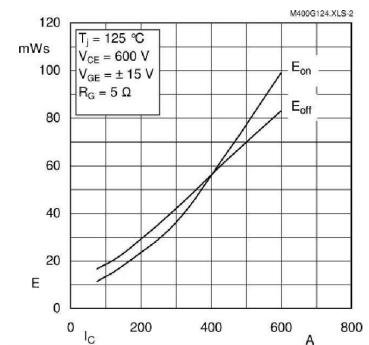


그림 3. 전류( $I_C$ )에 따른 턴 온 에너지( $E_{ON}$ ), 턴 오프 에너지( $E_{OFF}$ )  
Fig. 3. Turn-on( $E_{ON}$ )/off( $E_{OFF}$ ) energy in proportion to current( $I_C$ )

그림 3은 전류가 증가할수록 턴-온 에너지 및 턴-오프 에너지가 증가함을 보여주는 전력용반도체 파라미터이다. 그림 4는 게이트 저항이 증가할수록 턴-온 에너지 및 턴-오프 에너지가 증가함을 보여주는 전력용반도체 파라미터이다. 그림 5는 온 펄스가 유지 시간

에 따라 달라지는 IGBT 과도상태 열 임피던스를 보여 준다[4].

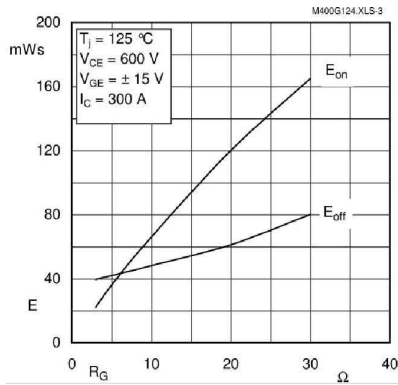


그림 4. 게이트 저항( $R_G$ )에 따른 턴 온 에너지( $E_{ON}$ ), 턴 오프 에너지( $E_{OFF}$ )  
 Fig. 4. Turn-on( $E_{ON}$ )/off( $E_{OFF}$ ) energy in proportion to gate resistance( $R_G$ )

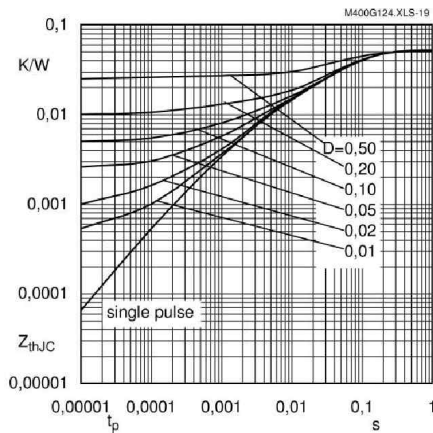


그림 5. IGBT 과도상태 열 임피던스  
 Fig. 5. Transient thermal impedance of IGBT

## 2.1 적용 승강기 시스템 및 모터 사양

표 1은 적용된 승강기의 시스템 사양을 표현하였다. 표 2는 적용된 승강기용 모터의 파라미터 값이다. 그림 5는 시뮬레이션에 사용한 속도 프로파일을 나타내었다.

적용된 jerk  $0.8m/s^3$ , Acceleration  $0.8m/s^2$ , Velocity  $4m/s$ 이다. 시뮬레이션 조건은 정격하중(24인승)이 탑승하여 상승 방향으로 주행한 경우이다.

표 1. 엘리베이터 시스템 사양  
 Table 1. Specification of the elevator system

인승		24
속도	(m/min)	240
정격 하중	(kg)	1600
전동기	(kW)	43
sheve 직경	(m)	0.55
엘리베이터 무게	(kg)	3820
균형추 무게	(kg)	4540
로핑		2

표 2. 모터 파라미터  
 Table 2. Specification of 43kW PMSM

출력(kW)	43	$R_s(\Omega)$	0.08
극수	24	$L_q(mH)$	0.002029
주파수(Hz)	9.62	$L_d(mH)$	0.002029
전압(V)	400	Kemf	0.67
정격 전류(Arms)	83	rotor inertia	2.775
Ktorq(토크 상수)	11.9	효율	0.94
정격 토크(kgf*m)	1400	gear ratio	1

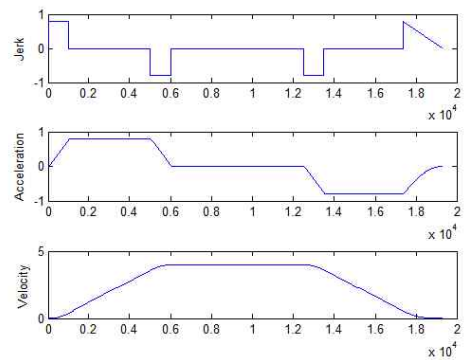


그림 6. 엘리베이터의 가가속도, 가속도, 속도 프로파일  
 Fig. 6. Jerk, Acceleration, Velocity of Elevator

## 2.2 IGBT 모델별, 게이트 저항 가변, 게이트 전압 가변 시 전력 손실 시뮬레이션

엘리베이터용 전력 변환 장치를 최적화하기 위해 전력 손실 및 온도 상승을 MatLab으로 시뮬레이션하였다[5].

그림 1의 엘리베이터 모델에서 입력으로 승강기의 이동거리와 가속도 그리고 방향 및 탑승인원에 의한 부하가 주어지면, 출력으로 승강기 시브 크기에 의한 시브 속도, 그리고 로프 및 케이지 무게, 인승에 의해서 모터의 필요 토크가 계산되어진다. 드라이브 및 모터 모델에서는 드라이브 및 전동기 특성에 의해 요구 속도 및 토오크에 맞는 모터 전력 및 전압과 전류를 계산한다. 인버터 및 컨버터 모델에서는 부하에 따른 각 상의 듀티 사이클 및 각 상의 전류, 전압 그리고 스위칭 주파수를 계산한다. 전력 반도체의 수명은 전력 반도체 정션 과 방열판 사이의 온도 상승 치에 지수 함수로 반비례한다. 전력 반도체의 정션 과 방열판 사이의 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 것이 가능하다. IGBT의 정션 온도는 식 1, 2, 3에 따른다[5].

$$dT_{jc} = P_{transistor} \times Z_{jc} \quad (1)$$

$$dT_{cs} = (P_{transistor} + P_{diode}) \times Z_{cs} \quad (2)$$

$$dT_{js} = dT_{jc} + dT_{cs} \quad (3)$$

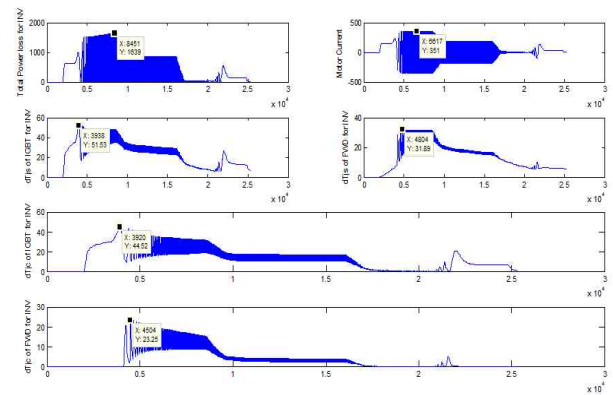
여기서  $dT_{jc}$ (케이스에 대한 정션의 온도 상승),  $dT_{cs}$ (방열판에 대한 케이스의 온도 상승),  $dT_{js}$ (방열판에 대한 정션의 온도 상승)이며,  $Z_{cs}$ (방열판에 대한 케이스의 임피던스) 및  $Z_{jc}$ (케이스에 대한 정션의 임피던스)의 값은 메이커에서 제공한다[4]. 표 1과 2는 승강기용 인버터 및 컨버터를 열해석하기 위하여 적용한 승강기 사양 및 모터 사양이다.

승강기용 전력변환장치(Converter와 Inverter)의 전력용반도체(IGBT)는 세미크론사의 IGBT를 적용하였다.

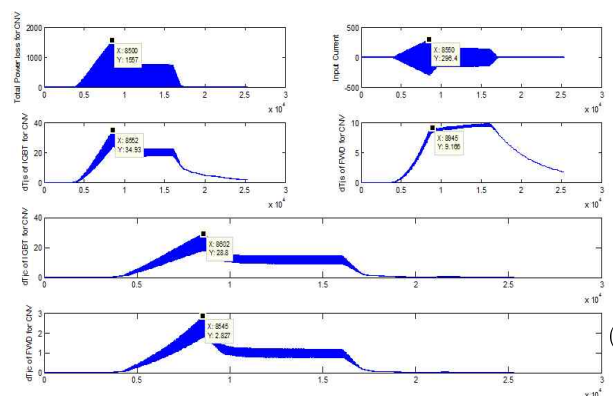
SKM400GB124D모델은 Non-Punch-Through type IGBT이며, SKM400GB128D 모델은 Soft-Punch-Through type의 IGBT이다. IGBT의 게이트 저항을 가변하였을 경우, 전력용 반도체 구동 전압( $V_{GE}$ )을 가변하였을 경우를 각각 전력 손실을 시뮬레이션하였

다. 그림 4는 게이트 저항에 따른 턴-온/오프 에너지를 나타낸 것이다. 일반적으로 게이트 저항이 증가할수록 턴-온/오프 시간이 증가하여 턴-온/오프 에너지가 증가하여 전력용반도체의 전력 손실은 증가한다. 이 경우 전력 손실이 시스템에서 요구하는 수명을 만족하는지를 검증하여야 한다. 또한 게이트 저항이 증가할수록 턴-온/오프 시간이 증가하여 EMI Noise가 감소하므로 게이트 저항에 따른 전력손실과 노이즈 특성을 시스템에 최적화하여야 한다.

게이트 저항이 6Ω인 경우는 메이커에서 제공하는 표준 저항이며, 10Ω의 경우는 노이즈 특성을 완화하기 위하여 증가한 경우이다.



(a) Inverter



(b) Converter

그림 7. SKM400GB124D,  $R_G(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션  
Fig. 7. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB124D,  $R_G(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$

승강기용 전력변환장치의 IGBT 전력손실에 관한 연구

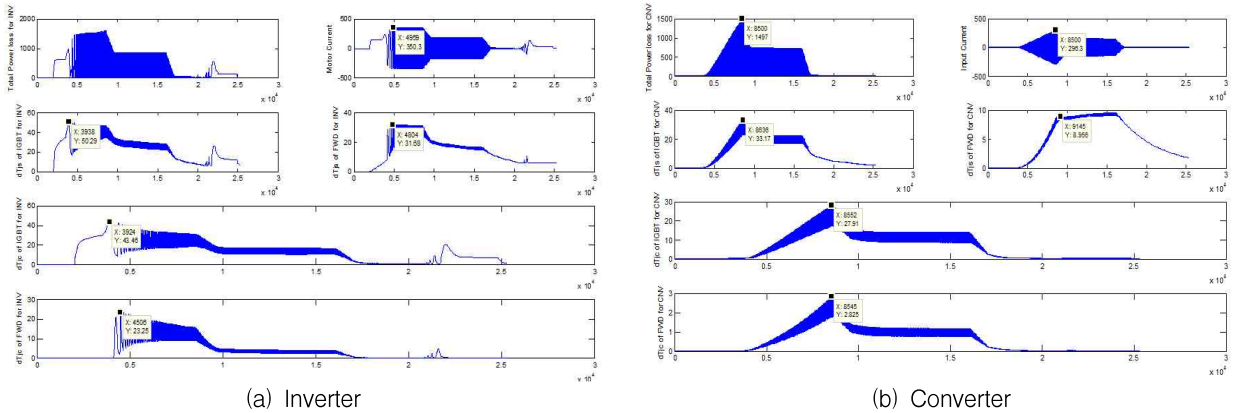


그림 8. SKM400GB124D,  $R_G(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션  
 Fig. 8. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB124D,  $R_G(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$

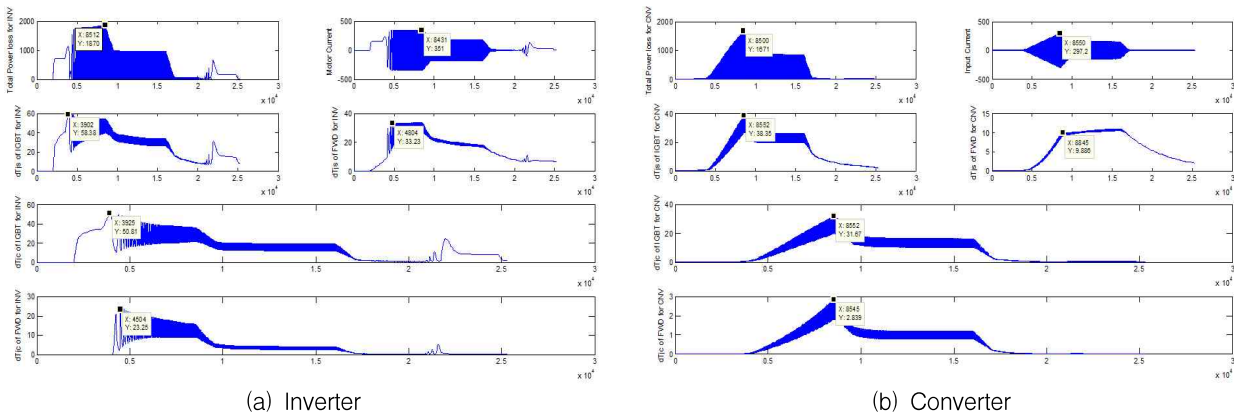


그림 9. SKM400GB124D,  $R_G(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션  
 Fig. 9. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB124D,  $R_G(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$

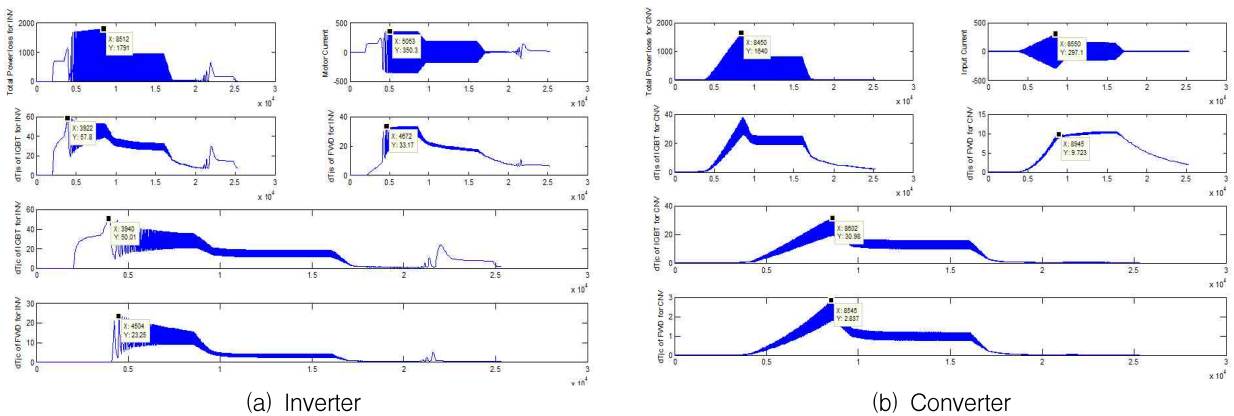


그림 10. SKM400GB124D,  $R_G(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션  
 Fig. 10. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB124D,  $R_G(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$



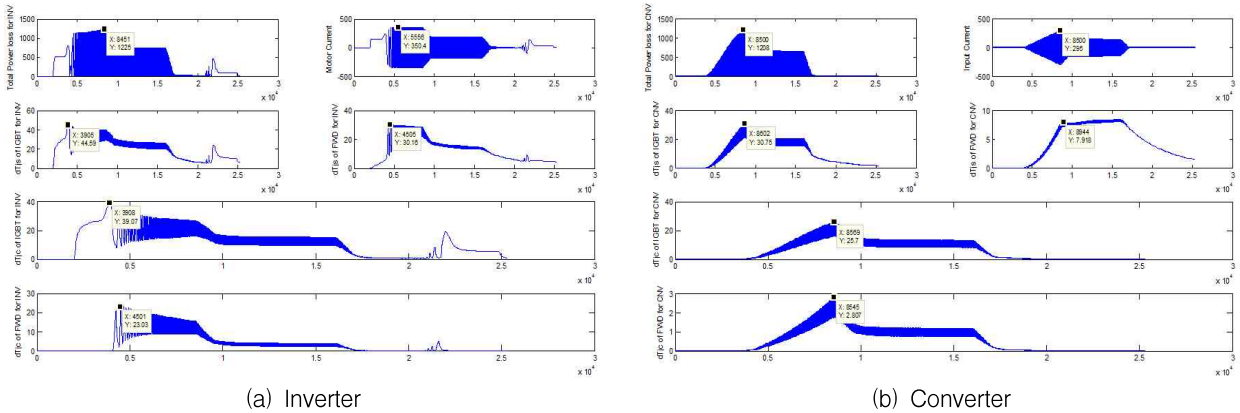


그림 11. SKM400GB128D,  $R_C(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션  
 Fig. 11. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB128D,  $R_C(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$

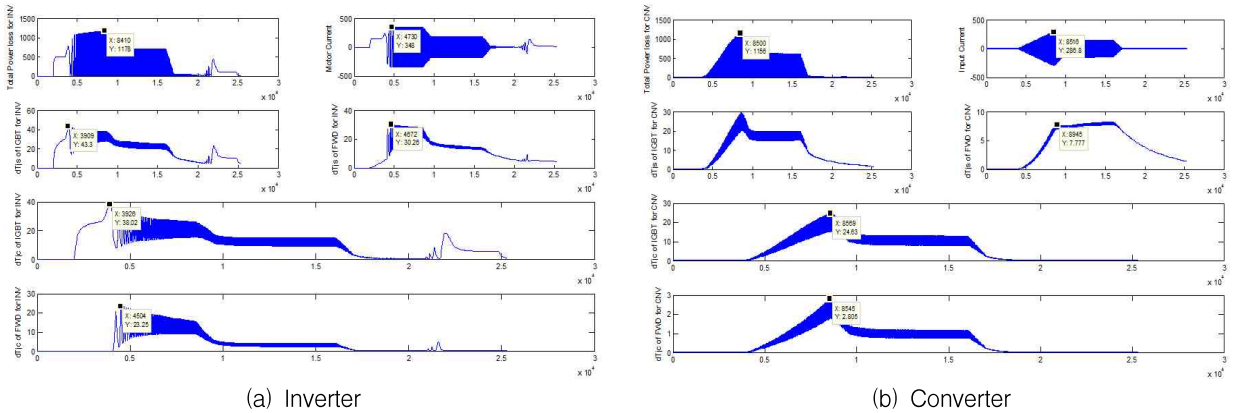


그림 12. SKM400GB128D,  $R_C(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션  
 Fig. 12. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB128D,  $R_C(6\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$

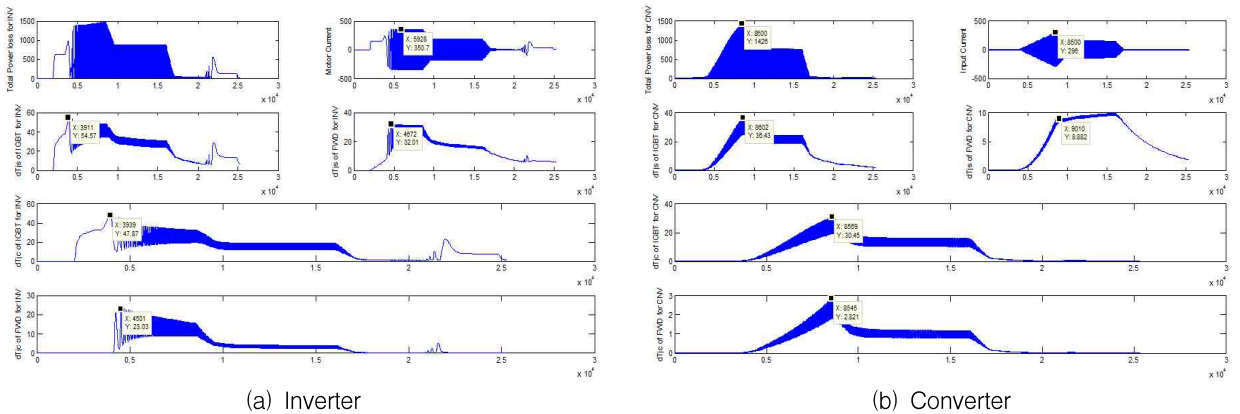


그림 13. SKM400GB128D,  $R_C(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션  
 Fig. 13. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB128D,  $R_C(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(13.5V)$

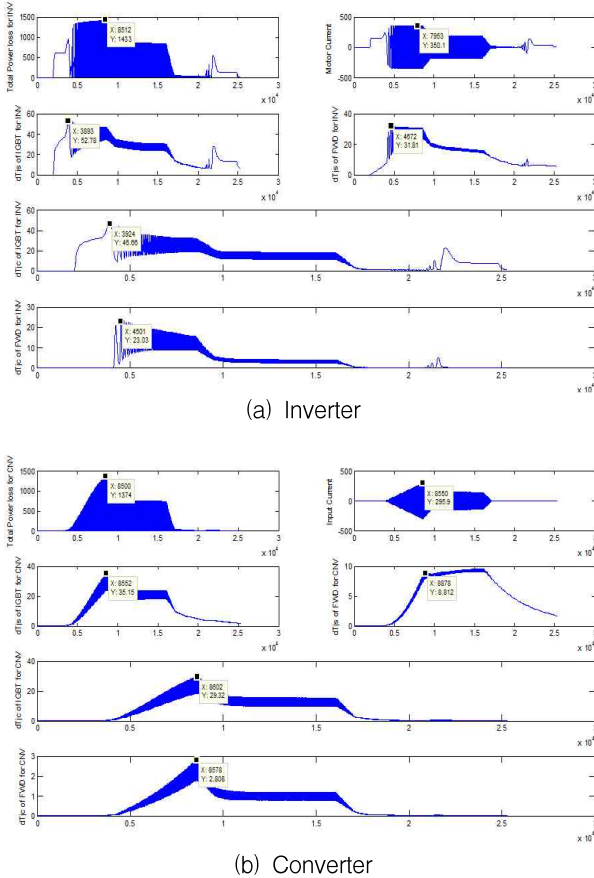


그림 14. SKM400GB128D,  $R_G(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$  Power Loss 및 온도 시뮬레이션

Fig. 14. Power loss and Temp. Rise Simulation for INV. and CNV. at SKM400GB128D,  $R_G(10\Omega)$ ,  $V_{GE}(15V)$

표 4는 그림 7에서 14까지를 요약한 도표이다.

124D-6-13.5(그림 7)는 게이트 에미트간 전압을 13.5V로 가변하였을 경우 124D-6-15(그림 8)보다 약 인버터 및 컨버터의 전력손실은 약 2.2% 및 3.2% 증가하여 인버터 및 컨버터 온도 상승이 약 1.3도 및 1.2도 증가하였다.

124D-10-15(그림 10)는 게이트 저항을 6Ω에서 10Ω으로 증가하였을 경우 124D-6-15(그림 8)보다 약 인버터 및 컨버터의 전력손실은 약 12% 및 11.8% 증가하여 인버터 및 컨버터 온도 상승이 약 7.7도 및 3.9도 증가하였다.

128D-6-15(그림 12)에서 적용된 IGBT(SK400-

GB124D)는 Soft-Punch-Through(SPT) 기술을 적용하였다. 표 3에서 SPT기술은 ABB 세미컨덕터 회사에서 개발한 새로운 플래너 IGBT로써 기존의 NPT 기술과 비교하여 온-상태 손실을 20% 저감하였으며, 열 저항 증가 없이 스위칭 손실을 20% 저감하였다[6]. 128D-6-15(그림 8)에서 적용된 IGBT(SK400-GB128D)는 Non-Punch-Through(NPT) type의 IGBT이다 같은 정격 같은 조건에서 SPT 기술을 적용한 IGBT가 NPT type의 IGBT보다 인버터 및 컨버터의 전력손실은 약 17.6% 및 16.8% 감소하여 인버터 및 컨버터 온도 상승이 약 6.8도 및 4.2도 감소하였다. EMI 노이즈 저감을 위하여 게이트 저항을 증가하더라도 124D-6-15(그림 8)보다 128D-10-15(그림 14)에서 인버터 및 컨버터의 전력손실은 약 2.2% 및 0.4% 감소하여 인버터 및 컨버터 온도 상승이 약 3도 및 1도 감소하였다.

표 3. NPT 와 SPT기술 비교

Table 3. Comparison of NPT and SPT Technology

	SKM400GB124D	SKM400GB128D
Vce(sat)	2.1V	1.9V
E(on)	36mJ	32mJ
E(off)	42mJ	31mJ
Rth(j-c)	0.05K/W per IGBT	0.055K/W per IGBT
Rth(j-c)D	0.125K/W per inverse Diode	0.125K/W per inverse Diode
Rth(c-c)	0.038K/W	0.038K/W
Technology	Non-Punch-Through(NPT)	Soft-Punch-Through(SPT)

표 4. 전력손실 및 온도 상승 요약표

Table 4. Summary of power loss and temp. rise

IGBT Type	Inverter Power Loss [W]	Converter Power Loss [W]	Inverter 온도 [degree]	Converter 온도 [degree]
124D-6-13.5	1533.49	763.05	51.70	34.95
124D-6-15	1499.54	739.57	50.43	33.71
124D-10-13.5	1723.20	858.54	58.90	38.37
124D-10-15	1683.57	826.96	58.11	37.62
128D-6-13.5	1268.15	638.93	44.92	30.77
128D-6-15	1234.48	614.66	43.55	29.49
128D-10-13.5	1499.75	760.85	54.85	36.45
128D-10-15	1466.08	736.33	53.47	35.17

### 3. 결 론

본 논문은 승강기용 인버터 스위칭 소자(IGBT)의 전력 손실 시뮬레이션 및 온도 상승에 관한 것이다. 승강기 속도 프로파일에 따라 전력변환장치 스위칭 소자(IGBT)의 전력 손실을 IGBT type별, 게이트-에미터 간 전압, 게이트 저항 가변에 따라 승강기용 인버터 및 컨버터의 전력 손실을 시뮬레이션하였다. SPT 기술을 적용한 IGBT는 NPT기술을 적용한 IGBT보다 같은 조건에서 인버터에서 전력손실이 약 17.8% 저감된다. 게이트 저항을 6Ω에서 10Ω으로 증가하면, 전력손실은 최대 약 12% 증가한다. 전력 반도체(IGBT)를 사용 수명에 최적화하기 위해서는 적용 소자의 type, 게이트 저항 및 게이트 에미터간 전압에 따라 전력 손실을 계산하고 온도 상승에 따른 수명 계산이 필수적이다. 향후 본 연구에서 시뮬레이션으로 진행된 전력손실을 전력용반도체(IGBT) 내부에 온도센서를 장착하여 검증하도록 하겠습니다.

#### 감사의 글

본 논문은 2014년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

### References

- [1] William W. Sheng and Ronald P. Colino, "Power Electronics Modules Design and Manufacture," CRC PRESS.
- [2] Jerry E. Sergeant and Al Krum, "Thermal Management Handbook for Electronics Assemblies," Mc Graw Hill.
- [3] Hefner, A.R., Jr; "A dynamic electro-thermal model for the IGBT" Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 30, Issue 2, March-April 1994 Page(s):394 - 405.
- [4] www.semikron.com/datasheet SKM400GB123D/SKM400GB128D.
- [5] Su-Eog Cho et al, "Optimal design of power loss for 3 phase voltage source inverter by using thermal management", Trans. KIEE. Vol. 56. No. 10. OCT. 2007.
- [6] S. Dewar et al., "Soft Punch Through (SPT) - Setting new Standards in 1200V IGBT" PCM Nuremberg June 2000.
- [7] Ki Young Suh, et al., "The Experimental Consideration about Loss of Three-phase Voltage-fed Inverter using Auxiliary Resonant DC Link" Journal of KIEE, Vol.17, No.4, July 2003.

#### ◇ 저자소개 ◇



#### 조수억(曹洙億)

1966년 9월 15일생. 1993년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년1월 LG 산전 입사 ~2004년 11월 OTIS\_LG Engineering Center Power Electronics팀 Senior Engineer. 2002년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2005년 8월 ~2006년 2월 전남대 전기공학과 겸임교수. 2006년 3월 ~현재 서일대 전기과 부교수.