

# 전력소자의 기술개발 현황 및 전망



| 노영환 |

우송대학교  
철도전기시스템학과  
교수

## 1. 서론

오늘날 모든 에너지의 약 40%는 전기에너지, 즉 전력에너지를 발생시키는데 사용되고 있다. 일반적으로 전력은 발전소에 생산되어 60 Hz 혹은 50 Hz 주파수의 교류 고전압(15만 4천 V 이상)으로 송압하여 송전되고, 일반 사용자에게 다시 저 전압으로 변환 공급되어, 최종적으로 부하에서 열, 동력, 빛, 혹은 정보를 갖는 신호 등으로 변환되어 소모된다. 이러한 과정은 필요에 따라 전기에너지의 흐름을 제어하고 전류나 전압의 크기, 전류 및 전압의 형태에 직류나 교류의 위상 등으로 변환하여 사용된다.

일반적으로 전력전자는 여러 분야의 융합분야로 구성되는데 영역은 크게 전력분야, 제어분야, 그리고 전자분야로 크게 3분야로 나누어진다. 전력분야는 전력의 발전, 송전, 배전 및 전력을 소비하는 각종 부하장치 및 시스템 등을 취급하며 전력전자 시스템의 응용의 기반이 된다. 제어분야는 컴퓨터 장치를 이용하거나 펄프시스템 등을 이용하여 원하는 임무를 수행하기 위해 신호를 제어하거나 시스템의 안정화와 성능을 향상시키는데 있다. 전자분야는 시스템, 모듈, 보드 레벨에서 소프트웨어 및 하드웨어를 활용하여 각종 신호처리를 위한 저전력의 아날로그 또는 디지털 회로의 설계와 구성

을 포함한다.

전력 전자분야의 산업 제품들에서 전력을 공급하기 위해서 스위칭 기능을 가지는 전력소자를 필요로 한다. MOSFET(metal oxide semiconductor field effect transistor(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터)), IGBT(insulated gate bipolar transistor(절연 게이트 바이폴라 트랜지스터)) 및 다양한 유형들의 사이리스터(thyristor)들을 포함하는 소자들이 개발되어 왔다. 전력소자의 전기적 특성 중에 온-저항(on-resistance), 항복전압(breakdown voltage), 문턱전압(threshold voltage), 그리고 스위칭 속도 등이 있다. 고전압(400 V 이상) 경우 IGBT는 전력 MOSFET에 비해 낮은 온-저항을 보이지만, 스위칭 속도는 느린 턴 오프(turn off) 특성으로 인하여 느리다. 일반적으로 전력 MOSFET는 상대적으로 높은 주파수가 요구되는 제품에 선택되고, 낮은 온-저항을 요구하는 낮은 스위칭 주파수들을 갖는 400 V 이상의 제품에서는 IGBT를 선호한다.

전력전자공학분야가 계속 발전하기 위해서는 전력처리시스템의 부품산업이 발전되어야 한다. 전력처리시스템의 용량에 따라 대체적으로 다음과 같이 응용된다. 소형 인버터나 소형 스위치모드 파워서플라이 같은 저전력 응용에는 MOSFET가 주로 사용되고, 500 KW 미만의 중간 전력규모에서는 전력용 바이폴라 트랜지스터(BJT)나 IGBT가 주로 쓰이고, 수천 volt 이상의 고전압과 수 MVA

표 1. 부품별 전력공급 능력 및 스위칭 속도

Device	Power Capability	Switching Speed
BJT/MD	Medium	Medium
MOSFET	Low	Fast
GTO	High	Slow
IGBT	Medium	Medium
MCT	Medium	Medium

규모의 응용에서는 GTO 사이리스터, SCR 사이리스터, 혹은 IGBT를 사용되고 있다. SCR 사이리스터가 1957년 말에 소개되어 1970년까지 전력소자로 사용되었고 1970년 이후 여러 종류의 전력소자가 개발되어 사용되는데 GTO 사이리스터는 최대용량 4,500 V, 3,500 A까지 상용화되어 고전압 대용량 응용분야에까지 사용이 되다가 최근들어 IGBT로 대체되는 추세이다. 반도체 기술의 발전은 고전력, 빠른 스위칭 속도, 저렴한 가격을 가진 소자를 개발하는데 목표를 두고 있다. 표 1은 부품간의 제어전력량과 스위칭 속도를 보여주고 있다.

## 2. 전력소자의 분류 및 응용

그림 1은 실리콘 기반으로 제조되는 전력반도체소자의 분류를 보여주는데 전력다이오드(power diode), 사이리스터, 전력 바이폴라 트랜지스터, MOSFET, 그리고 IGBT로 구성되었으며, 음영으로 표시되는 소자는 시장의 수요가 줄어드는 추세이다. 그림 2는 최근 전력소자의 개발에 적용되는 주파수별 전력분포와 항복전압 및 전류별 응용분야를 나타내는데 IGBT는 고전압 및 고전류용으로 철도차량과 모터 등에 적용되고 있음을 보여주고 있다.

### 2.1 전력다이오드

다이오드는 저항기처럼 두 개의 단자인 케소드(cathode)와 에노드(anode)로 구성되는데 그것의 양단에 걸리는 전압과 그것을 통해 흐르는 전류 사이에 비선형 관계를 가진다. 전력다이오드는 일반용, 고속용, 그리고 쇼트키(Schottky)로 나눈다. 일반용 경우 6,000 V, 4,500 A 범위까지 가능하고 고속용은 6,000 V, 1,100 A 까지 역회복시간(reverse recovery time) 0.1에서 5 $\mu$ A 범위에서 사용되며, 쇼트키다이오드는 낮은 온-상태의 전압과 소수 반송자에 지

연이 없어 빠른 회복시간을 갖는 회로에 적용된다.

### 2.2 사이리스터

사이리스터는 에노드, 케소드, 게이트로 세단자를 가지고 있다. 적은 전류가 게이트단자를 거쳐 케소드로 통과될 때 에노드단자가 케소드단자보다 전위가 높을 때 사이리스터는 동작된다. 사이리스터는 크게 선-정류 사이리스터(line-commutated thyristor), GTO(gate-turn-off thyristor), IGCT(integrated gate-commutated thyristor), MCT(MOS-controlled thyristors), MTO(MOS turn-off thyristor) 등으로 나누어진다. 일단 사이리스터가 동작모드로 되면 순방향전압은 0.5 V에서 2 V 전압강하가 발생되며 게이트회로는 조정될 수 없고 계속해서 동작된다. 도통된 사이리스터는 에노드 단자가 케소드 단자 전위 이하로 될 때 동작이 중지된다. 사이리스터는 6,000 V, 4,500 A 까지 상용화되었으며 고속의 역-차단 사이리스터의 턴-오프(turn-off)시간이 3,000 V, 3,600 A에서 10에서 20 $\mu$ s 범위내에서 이루어진다. GTO는 어떤 정류회로(commutation

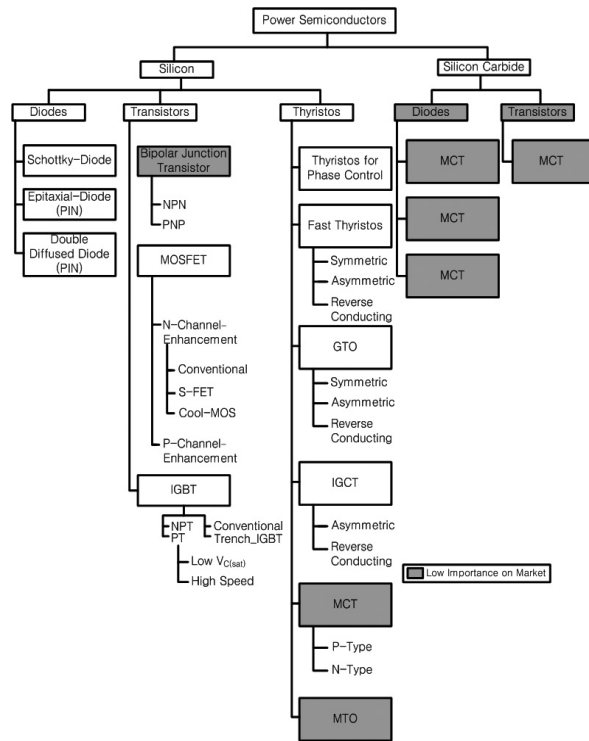


그림 1. 전력소자의 분류

circuit)를 필요로 하지 않고 컨버터에 많이 사용되고 6,000 V, 6,000 A 범위에서 적용되며 게이트에 짧은 양(+)의 펄스를 인가하여 턴-온되고 게이트에 음(-)의 펄스를 인가하여 턴-오프된다. IGCT는 GCT(gate-commutated thyristor)를 다중기판 게이트 드라이브(gate drive)와 결합된 소자로서 게이트에 전류를 인가하여 턴-온(turn-on)되고 빠른 상승 펄스를 가진 다중 게이트 구동회로로 턴-오프되는데 턴-오프시간이 짧은 1 $\mu$ s 정도이다. MCT는 턴-오프이득이 매우 높을 때를 제외하고 GTO와 같은데 MOS 게이트에서 적은 음의 전압펄스에서 턴-온시킬 수 있고 양의 전압펄스에서 턴-오프 될 수 있다.

### 2.3 전력트랜지스터

전력전자분야의 산업 제품들에서 전력을 공급하기 위해서 스위칭 기능을 가지는 전력소자를 필요로 한다. 전력트랜지스터는 BJT, 전력 MOSFET, 그리고 SIT 4가지 종류로 나누어진다. BJT는 베이스(base), 에미터(emitter), 콜렉터(collector)를 가지는데 일반적으로 에미터를 접지로 하여 스위칭기능(NPN 트랜지스터의 베이스가 에미터보다 높은 전위를 가지고 베이스전류가 트랜지스터를 포하영역에서 동작되도록 충분히 크면 트랜지스터는 턴-온상태)을 유지한다. 고전력용 트랜지스터는 10 KHz 이하에서 전력용 컨버터에서 1,200 V, 400 A 범위에서 일반적으로 사용된다.

전력 MOSFET는 고속용 전력 컨버터에 사용되는데 수십 KHz의 범위에서 1,000 V, 100 A 급은 상대적으로 저전력 용에 적합하다. 고전압(400 V 이상) 경우 IGBT는 전력 MOSFET에 비하여 낮은 온-저항을 보이지만, 스위칭 속도는 느린 턴-오프(turn-off) 특성을 가진다. 일반적으로 전

력 MOSFET는 상대적으로 높은 주파수가 요구되는 제품에 선택된다.

### 3. 국내외 기술 동향

전력 MOSFET는 항복전압을 기준으로 200 V 이상의 고 전압에서는 planar 형태의 DMOS 구조를 갖고, 이하에서는 트랜치(trench) MOS 구조로 설계되어 있다. 전력 MOSFET 소자 기술은 수직구조(vertical)에서 트랜치 게이트 구조와 SJ(super-junction) MOSFET으로 동일한 항복전압을 유지하면서 온-저항을 낮추는 경향으로 발전하고 있다. 세계 반도체 시장을 선도하는 독일 Infineon, 미국 Freescale은 다양한 종류의 전력반도체 제품을 양산하고 있으며, 특히 차량용 30~600 V 급 planar 및 트랜치 디스크 파워 MOSFET을 양산하고 있고, Fairchild Korea는 각종 전원장비에 응용하고 있다. 저 전압 MOS의 경우 채널 영역의 트랜치 MOS 구조와 드리프트 영역에 SJ 구조를 접목해서 사용한다. Infineon은 1998년 600 V 급 COOLMOS S5를 개발하였고 2005년에는 COOLMOS CP를 상용화하였다.

그리고 Mitsubishi은 2000년 270V 급 Super Trench MOSFET의 9 m $\Omega$  · cm<sup>2</sup>를 성공적으로 개발하였다.

또한, Toshiba에서 DMOS와 SJMOS 중간 온-저항인 600 V 급 semi SJ MOSFET 개발을 2003년에 발표하였으며, Philips에서 VPD(vapor phase doping) SJ MOS 473 V 급 9.8 m · cm<sup>2</sup>개발을 2005년에 발표하였다. 그리고, Toyota에서 VL MOS (Vertical LOCOS MOS) 개발을 2004년에 발표하였다.

전력 반도체 소자는 반도체층의 깊이 방향으로 연결된 서로 다른 도전형 불순물 영역들을 포함한다. 서로 다른 불순물 영역들은 서로 교번하여 접합함으로써 SJ을 형성한다. N-pillar의 N 형과 P-pillar의 P 형이 있고 거꾸로 P-pillar의 P 형과 제 N-pillar의 N 형이 있다. 단위 SJ은 인접하는 하나의 불순물 영역들이 서로 마주보는 각각의 영역과 그 사이에 개재되는 다른 불순물 영역으로 구성된다.

많은 전력 반도체 소자들은 반도체층의 상부 표면과 하부 표면이 소오스 및 드레인 기능을 수행하는 수직형 구조를 갖는다. 수직형 전력반도체 소자경우는 전력 금속-산화물 전계효과 트랜지스터 또는 절연 게이트 바이폴라 트랜

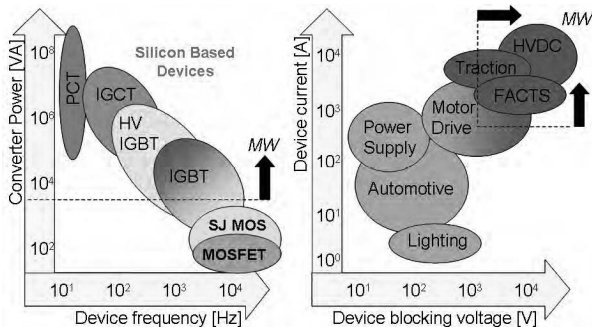


그림 2. 전력소자의 주파수별 전력분포와 항복전압 및 전류별 응용분야

지스터 등이 있다. 이들 전력 반도체 소자의 반도체층은 턴-온 상태에서 드레인과 소오스 사이에 흐르는 드리프트 전류에 대하여 도통 경로를 제공할 뿐만 아니라, 턴-오프 상태에서는 인가되는 역방향 전압에 의해 수직 방향으로 확장되는 공핍영역을 갖는다. 반도체층의 불순물 농도에 의해 턴-온 상태의 온-저항이 결정되며, 이의 공핍층 특성에 의하여 전력 반도체 소자의 절연 내압이 결정된다. 이때 전력 반도체 소자의 온-저항과 절연 내압을 최적화시키기 위해 제안된 기술이 SJ 기술이다.

우리나라의 경우 현재 산업체에서 사용하는 저 전류용 power MOSFET는 개발되었으나 미국, 독일 등 선진국은 SJ Trench MOSFET의 설계기술 개발(그림3~그림6)에 적극적인 투자를 하고 있는 실정으로 SJ Trench MOSFET 경우 낮은 온-저항을 가진 고 전류용(수십A 급) 기술개발을 하고 있으며, 설계된 100V 급 SJ Trench MOSFET 설계기법을 고 전압용 설계기법에 확장 및 적용을 하고 있다.

전력 SJ MOSFET 구조는 이상적인 PN 접합구조의 저항 값 이하로 게이트와 드레인 사이의 캐패시턴스와 게이트 전하를 줄일 수 있다. 이상적인 1차원 PN 접합구조보다 2차원적인 전하의 결합효과(charge coupling)에 의한 항복전압은 크게 증가한다. 선진국에서는 상용화된 전력 SJ MOSFET의 구조를 600V급 모터 제어 응용에 최초로 적용되었다. 획기적으로 온-저항을 감소시키기 위해 새로운 공정의 연구를 진행하고 있는데, 현재까지 항복전압이 1,000V 미만을 가진 제품이 상용화 되었다.

IGBT는 전압제어 전력 트랜지스터로서 고전압용으로 적합하고 20 KHz 범위의 주파수에서 MOSFET의 빠른 스위칭 특성과 BJT의 고전류 구동 능력을 결합시킨 소자로 MOS 게이트를 사용하여 구동하기 때문에 전력용 바이폴라

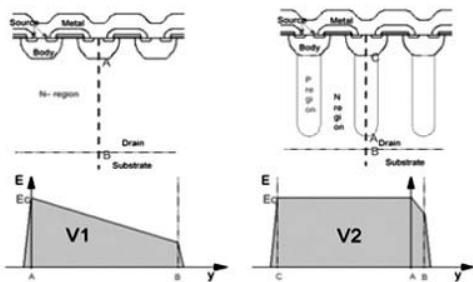


그림 3. Planar 구조와 super-junction 구조

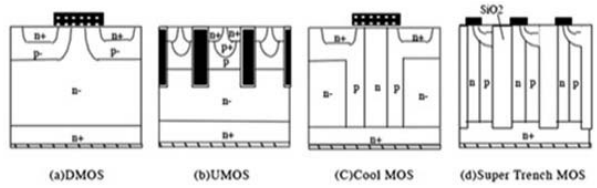


그림 4. Power MOSFET의 단면도

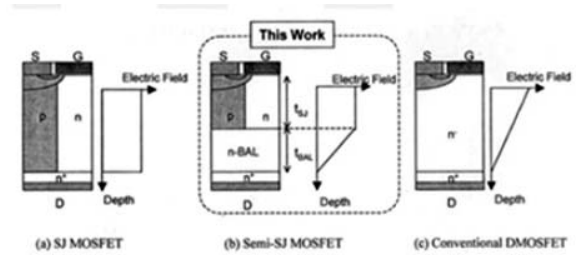


그림 5. Semi SJ MOSFET

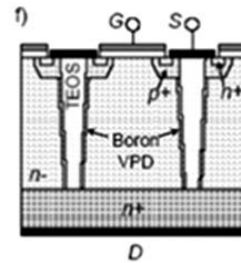


그림 6. VPD SJ MOS

라 트랜지스터와 비교할 때 구동회로가 간단하고, 전력용량도 커서 최근에서 고 전력 시스템에서 바이폴라 트랜지스터를 대체하는 소자로 많은 각광을 받고 있다. 그리고 IGBT는 턴-온 상태에서 낮은 전도 손실과 큰 항복전압을 가지고 있는 BJT와 빠른 스위칭 속도와 저 전력 손실을 가지는 MOSFET의 장점을 이용하여 결합시킨 전력소자로서 입력단은 MOSFET의 게이트이고 출력단은 트랜지스터의 콜렉터단자로 구성된다. 그림 7은 전력소자의 전력분포를 보여주는데 IGBT는 최근들어 전동차 구동용, DC 송전 등에 2,500~6,000 V를 많이 적용되고 있다.

그림 8은 안정적인 동작을 고려해서 기판 부분에 buffer layer를 포함하여 SOA(safe operating area)를 확장한 구조의 IGBT 단면을 보여주고 있다.

그림 9는 초 접합 트랜치(super-junction trench) MOSFET 구조를 나타내는데 100 V, 100 A 급 MOSFET, 온-

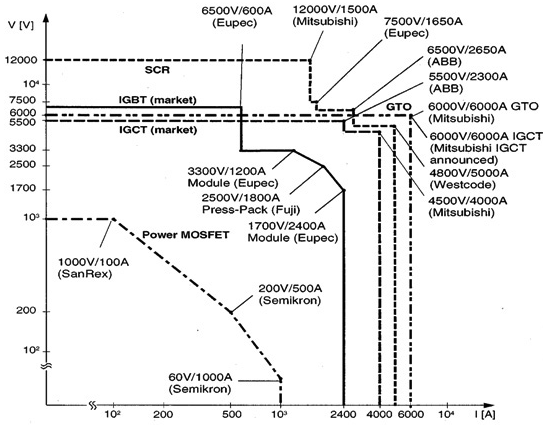


그림 7. 전력소자의 전력 분포

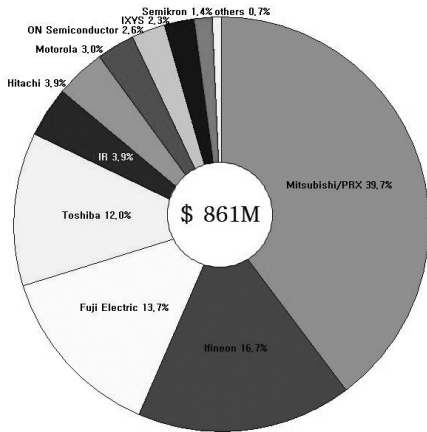


그림 10. IGBT 제조사의 세계시장 점유율 및 시장규모

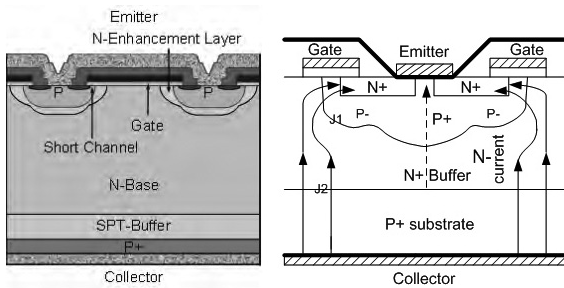


그림 8. IGBT의 단면구조 및 전류 흐름도

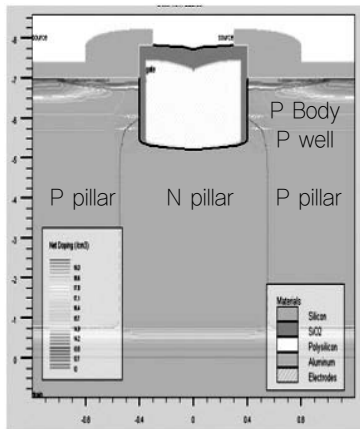


그림 9. Super-junction Trench MOSFET의 기본구조

저항이 약  $1 [m\Omega \cdot cm^2]$ 를 ETRI에서 성공적으로 최적화하였으며, BLDC 모터용으로 개발을 완료할 예정이다.

21세기에 들어와서 IGBT의 세계시장규모는 그림 10에

서 보여주듯이 년 8억 6천 1백만불(약 1조 원)로서 Mitsubishi 사 39.7%, Infineon 사가 16.7%, Fuji Electric 13.7%, Toshiba 12.0% 순으로 시장을 점유하고 있으며 일본의 회사들이 약 70%를 차지하고 있다. 유럽시장에서는 Infineon 사가 유럽시장의 범용, 산업용, 민생용으로 53.1%를 차지하며 북미와 아시아 지역에서 10%대를 점유하고 있다.

#### 4. 결론

우리나라 경우 항복전압이 낮은 1200V 까지 민생용 전력용 소자를 Fairchild Korea에서 개발하여 일부 시장을 확보하고 있으며 철도시스템(고속철, 지하철 차량 등)에 적용되는 고 전력용 IGBT는 외국에서 전량 수입하여 사용하고 있는데 국가적으로 전략적인 차원에서 추진되어야 할 과제이다. 전력용 반도체는 고집적화를 필요로 하는 SOC(system on chip)과 달리 반도체 공정의 최신 design rule을 적용할 필요가 없다. Life cycle이 길고, old Fab을 활용할 수 있는 제품으로 국내 개발이 가능하며, 고 신뢰성이 요구되는 제품으로 설계기술, 재료기술 및 평가기술의 접목을 통하여 구현가능하다. 21세기 전력소자의 국산화는 세계 무한 경쟁시대에 국내에서 개발된 부품이 국내에서만 아니라 세계시장에서 인정받는다면 우리나라의 부품산업을 한 단계 높여 철도 차량을 공동으로 개발할 때 보다 유

리한 조건에서 진행할 수 있으며, 또한 IGBT 부품은 고가이므로 관련 산업분야에 실용화를 추진하여 부가가치를 높일 수 있는 좋은 기회로 본다. 철도차량용 IGBT의 부품 국산화 없이는 장기적으로 철도차량을 개발하는데 부품을 선진국으로부터 계속 구입할 경우 많은 예산이 소용될 것이며, 만약 구입할 수 없는 경우에는 계획을 추진하려는데 막대한 지장을 초래 할 것으로 예상되나 부품국산화를 함으로써 국가예산 절감과 사업을 계획대로 추진할 수 있다고 본다. 고전력용 IGBT의 국산화추진은 유관분야의 기술발전에도 큰 기여를 하리라 본다. S

#### ♣ 참고 문헌

1. Steffen Bernet, "Recent Developments of High Power Converters for Industry and Traction Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15, No. November 2000
2. Munaf Rahimo, and Sven Klaka, "High Voltage Semiconductor Technologies", Technical Report, 2010
3. Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, "Power Electronics", *John Willey & Sons, Inc.*, 2009
4. Thomas M. Hahns, "Recent Advances in Power Electronics Technology for Industrial and Traction Machine Drives", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, No. 6, June 2001
5. Young Hwan Lho, et al, "A report on Study for Design of Super-junction Trench MOSFET", *ETRI*, Jan. 2011 (in Korean)