

## 극박 방향성 3%규소강판의 개발 및 초절전 변압기 적용



허 남 회  
(한전전력연구원 선임연구원)

### 1. 서 론

철심재료 중 가장 많이 사용되고 있는 3%규소강판(0.3mm)은 1930년 대 미국 Armco 사의 N. P. Goss에 의하여 처음 개발되었다. 그런데, 이 Armco 사로부터 방향성 규소강판의 제조기술을 도입한 신일본 제철은 이의 개선을 위한 연구를 지속하던 중 방향성 규소강판의 2차 재결정을 일으키는데 인히비터로 사용되는 원소로 기존의 MnS 외에 AlN의 효과가 매우 큼을 보고하였다. 이들은 기존의 방향성 규소강판에 비하여 자속밀도도 높고 철손도 매우 낮은 고배향성 방향성 규소강판의 개발에 성공하였으며, 1968년부터 Hi-B라는 상품명으로 생산하기 시작하여 방향성 규소강판에서는 세계에서 선도적인 위치를 점하게 되었다. 이 Hi-B는 기존의 방향성 규소강판에 비하여 2차 재결정립의 방위가 이상적인  $\{110\}\langle 001 \rangle$  Goss 방위로부터 평균  $\sim 3^\circ$  이내로 배향되어 있어 재래식 방향성 규소강판의 배향도  $\sim 7^\circ$  보다 결정배향성이 높아서 일정한 여자력에 대한 자속밀도가 높다. 즉  $B_{10}$  값이 대표적인 재래식 방향성 규소강판( $Z_0$ )인 경우 1.79 Tesla인데 비하여 Hi-B의 경우는 1.89 Tesla 이상이다. 이처럼 자속밀도가 높아지면 변압기 제작 및 설계 시 동선의 권수가 Hi-B의 경우 재래식 방향성 규소강판에 비하여 5% 정도 적어지며, 이에 따라 동선에 의한 손실도 5% 가량 적어지

게 된다. 또 Hi-B는 재래식 방향성 규소강판에 비하여 결정배향도가 높아서 이력손실(hysteresis loss)이 낮으며, 결정립의 조대화에 의한 손실 증가를 장력코팅법, 스크래치(scratch)법 등의 방법으로 자구미세화에 성공함으로써 철손을 대폭 저감하였는데 대표적인 Hi-B(3Z6H)의 철손  $W_{17/50}$ 이 1.02 W/kg으로 재래식 방향성 규소강판의 철손치 1.33 W/kg 보다 약 30% 가량 낮다.

이러한 신일본 제철의 고배향성 방향성 규소강판의 개발에 자극 받아 일본 가와사키 제철도 분산상 계재물로 MnSe와 Sb를 첨가하여 고배향성 방향성 규소강판을 개발하여 RG-H라는 상품명으로 생산하기 시작하였고, 미국에서도 제네랄 일렉트릭사(GE Electric Co.)와 알레게니 러드럼사(Allegheny Ludlum Co.)가 공동으로 분산상 계재물로 B와 N을 사용해서 고배향성 방향성 규소강판인 Silectperm의 개발에 성공하였으나 그 특성이나 생산성 면에서 Hi-B에는 미치지 못하는 것으로 평가되고 있다. 따라서, 기술 선진국에서는 좀 더 우수한 자기적 특성을 갖는 철심재료 개발에 대한 노력을 기울여 왔으며, 이에 따라 개발된 철심재료로 비정질 재료 및 극박 방향성 3%규소강판을 들 수 있다.

발전소에서 생산된 전기가 여러 번의 변압을 통하여 소비자 인 공장이나 가정까지 전송되는 과정에서 손실이 발생하게 되는데, 1998년 기준 국내 총 발전량(2,372억kWh)중 총 손실

이 약 4.9%(99억6천kWh)에 해당하며 이중 변압기 손실은 총 손실의 약 35%에 해당된다. 이러한 변압기 손실은 철심재료의 특성에 크게 좌우되므로 철심 두께(철손  $\propto t^2$ )를 얇게 함으로써, 손실을 현저히 줄일수 있는 우수한 철심재료의 개발은 전기 에너지 손실 저감에 필수적인 전제 조건이라고 볼 수 있다. 따라서, 급격한 수요증가에 따른 손실 증가로 초절전형 변압기를 위한 극박 3%규소강판(0.1mm이하)개발은 절실하다고 판단되며, 전력 공급자 측면에서는 효율향상에 의한 신규 발전설비 건설 투자비의 절감 등으로 막대한 경제적 효과를 얻을 수 있을 것이다. 따라서, 기술 선진국에서는 자기적 특성이 우수한 철심재료를 개발하기 위한 연구가 지속되어 왔다. 표 1은 철심재의 종류와 특성을 비교하고 있다.

1992년의 "지구환경 보전 및 온난화 방지를 위한 리우 선언"과 1997년 교토기후협약은 선진국 또는 개도국 여부에 따라 이산화탄소 등 온실가스 3종에 대한 선진국의 배출량을 2012년까지 90년 기준으로 평균 5~10%를 감축시키도록 되어 있는 등, 리우 선언 이후 환경보전을 위한 보다 구체적인 실천 방안들이 마련되고 있다.

또한 2000년 1월 5일에 확정된 장기전력수급 계획은 저항 연료의 사용 확대, 첨단 환경설비 설치, 장기 CO<sub>2</sub> 배출량 안정화 목표 설정(90년 일본 9개 전력사 평균인 0.11 kg-C/kWh 수준) 등을 포함하는 등 환경친화적인 면이 강조되고 있다. 이러한 온실가스 배출의 감축은 바로 화석연료를 사용하고 있는 기존 산업시설을 환경 친화적으로 만들기 위한 부가적인 장비의 설치 또는 공정개선을 필요로 하기 때문에 상당한 경제적인 부담을 발생시킨다. 그러나, 전력생산 부문에서 화석연료 의존도가 상당부분을 차지하고 있고 또한 에너지 파소비 형태의 산업구조를 갖고 있는 우리의 경우에 온실가스 배출량의 감축 및 동결은 바로 산업활동의 위축을 가져오기에 따라 환경을 국가의 산업 생산활동과 연계시키고자 하는 선진국과의 경쟁에서 많은 어려움이 따를 것으로 예상되고 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서는 변동하는 전력수요에

유연하게 대응하고 고효율 전기설비를 개발, 활용함으로써 발전된 전기 이용을 최대화하고 원가절감 및 생산성 향상을 추구하는 것이 시급하다고 판단된다.

## 2. 극박 규소강판의 발전 추이

### 2.1 국외

방향성 규소강판의 두께를 줄임으로서 그 자기적 특성을 향상시킬 수 있다는 것은 상당히 오래 전부터 알려져 온 것으로 특히 미국의 알레게니 러드럼사에서는 2차 재결정립의 배향성을 향상시키는 방법보다는 강판의 두께를 얇게 하여 철손을 줄이려는 시도를 많이 하였다. 그러나, 규소강판의 두께를 얇게 하면 최종 소둔 시 인히비터가 결정립의 성장을 억제하는 힘이 약해져서 2차 재결정이 불균일하게 일어나고 배향성도 나쁘게 되는 것으로 알려져 있어서 그 두께 한도는 현재 0.23mm로 알려져 있다. 그런데, 1989년 신일본제철과 일본 동북대학의 Arai 팀은 기존의 인히비터를 이용한 2차 재결정 방법 대신 표면 에너지를 이용한 3차 재결정법으로 0.1mm 이하의 고배향성 방향성 규소강판을 제조할 수 있다고 발표함으로써 극박 방향성 규소강판 제조에 있어서 획기적인 전기를 마련하였다. 극박 방향성 규소강판은 그 두께를 0.1mm 이하로 낮출 수 있어서 철손(W13/50)이 0.19Watt/kg로 매우 작을 뿐만 아니라 그 결정립의 배향성도 매우 우수하여 B10 값이 1.95 Tesla 이상에 이르고 있다. 따라서, 3차 재결정 법으로 제조한 극박 방향성 규소강판은 기존의 상용 주파수 영역에서 사용되는 변압기에도 그대로 적용될 수 있다는 장점과 아울러 손실을 저감할 수 있는 고 부가 가치성 재료이다.

성분의 측면에서도 기존의 Hi-B 규소강판과 Arai 극박 규소강판은 상당히 다름을 알 수 있다. 즉, 규소강판의 전기저항을 높이기 위하여 약 3%의 실리콘이 첨가된 것을 제외하고는 Arai 박판의 경우 불순물이 거의없는 극 청정강에 가까우나 Hi-B의 경우는 탄소, 알루미늄, 망간, 황, 질소 등이 일정한 범위로 첨가되어 있다. 이들 첨가물은 주로 2차 재결정을 일으키는 인히비터인 AlN나 MnS를 이루는 원소로 고배향성 규소강판의 제조에 필수 불가결한 원소이다. 이에 비하여, Arai 박판의 경우는 이러한 첨가물이 전혀 포함되어 있지 않아서, 결정립 성장이 기존의 고배향성 규소강판의 2차 재결정과는 전혀 다른 표면에너지 차이로 유기되는 3차 재결정에 의한다고 제시되어 왔다. 냉간압연은 Hi-B 규소강판의 경우는 1단 냉간압연이 주종을 이루고 있으나, Arai 박판은 2단 또는 3단 압연에 의하여 최종두께 0.05 ~ 0.1 mm 까지 압연하고 있다.

소둔은 Hi-B 규소강판의 경우는 1차 재결정, 탈탄소둔과 2차 재결정을 위한 본소둔이 있으며 중간에 소둔분리와 유리질 피막형성을 위한 MgO 도포 공정이 있으나, Arai 박판의 경우는 3차 재결정을 위한 1, 2차 소둔 (경우에 따라서는 3차

표 1. 철심재의 종류와 특성 비교.

구 분	기존 방향성 3%규소강 (Hi-B)	비정질 합금	극박 방향성 3%규소강판
두께(mm)	0.23-0.3	0.02-0.04	0.05-0.15
B <sub>10</sub> (T)	1.89	1.5-1.6	1.90 이상
철손 <sub>13/50</sub> (Watts/kg)	0.6	0.15-0.3	0.19
철손 <sub>17/50</sub> (Watts/kg)	1.02	-	0.37

소둔)을 행하고 있다. 특히, 3차 소둔에서는 소둔 분위기가 매우 중요해서 진공분위기를 사용하는데, 이것은 3차 재결정의 구동력인 표면에너지와 밀접한 관계가 있기 때문으로 생각된다. 그런데, Arai 등은 3차 재결정의 속도론을 조사함으로써 재결정 구동력의 구성요소를 정밀 분석할 수 있음을 밝히고는 있으나 아직 충분한 데이터의 축적이 없어서 표면 에너지 외의 구동력에 대한 정확한 실체를 제시하지 못하고 있기 때문에 극박 규소강판의 상품화를 위해서는 이에 대한 보다 조직적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 2.2 국내

본 연구팀의 최근까지 연구결과에 의하면, 자성특성을 결정하는 인히비터가 없는 극박 규소강판의 재결정 집합조직은 5요소와 결정립들의 표면에너지 차이에 의한 선택적 결정 성장 현상에 의해 자유롭게 조절이 가능하다. 여기서, 5요소는 표면 편석량을 결정하는 박판 내의 불순물 농도, 냉간 소성가공도, 재결정온도, 시간, 분위기(진공, 수소, 알곤)들이며, 이들은 원하는 재결정 집합조직에 대하여 각각 독립변수가 아닌 서로가 긴밀한 연관성을 가지는 종속변수들이다. 즉, 박판내의 불순물 농도가 정해지면 재결정온도에서의 불순물의 표면편석량 및 최저 표면에너지면이 결정되기 때문에 냉간소성가공도, 재결정온도, 시간, 분위기가 종속적으로 결정되어, 최종소둔 후 표면에너지가 가장 낮은 결정면 성장에 의하여 재결정 집합조직이 얻어진다. 결국, 본 연구팀은 인히비터가 없는 극박 규소강판에서 일어나는 결정성장현상을 Arai등의 3차 재결정 현상으로 막연히 해석하기보다는 좀 더 물리적 의미를 포함하는 표면 에너지 유기 선택적 결정성장 현상으로 해석하였다.

그림 1은 본 연구팀의 대표적인 연구결과로서 인히비터를 포함하지 않은 극박 3%규소강판에 있어서 최종 소둔시 불순물 편석거동과 자성특성의 상호연관성에 대한 결정적 증거를 제시하고 있다. 즉, 표면 또는 계면에 편석된 황의 농도는 최종

소둔시간에 따라 증가하다가 어떤 최대점을 고비로 계속 감소하는데, 이러한 편석량은 모상으로부터의 확산량과 진공 분위기 속으로의 증발현상 사이의 상호 경쟁속에서 결정된다. 결국, 표면방향으로의 확산량보다는 진공중으로의 증발에 의한 손실이 커지면서 표면 편석량은 최대점을 형성하면서 감소한다.

한편, 자성특성은 황편석과 상반적인 거동을 나타내면서 최종소둔후에는 1.9Tesla이상의 높은 자성특성을 나타내었다. 체심입방격자(BCC)를 대표하는 철계합금에 있어서 표면에너지는 쌍결합 모델을 바탕으로 할 때 (110)면이 가장 낮고, (100), (111)의 순으로 높아진다.

본 연구팀의 결과(그림 1 참조)를 보면 황 편석이 관찰되지 않는 최종 소둔시간 범위에서는 역시 시스템의 에너지 준위를 낮추기 위해서 (110) 결정립들이 성장하지만, 어느 정도의 황 편석이 표면에 나타나는 경우 (100) 결정립이 성장하며, 다량의 황이 편석되면 (111) 결정립들이 성장한다. 이것은 황의 편석량에 따라 표면 에너지 준위가 달라진다는 것을 의미한다. 이러한 황편석과 깊게 연관되어 있는 표면 에너지 유기 선택적 결정 성장속도  $G$ 는 식 (1)과 같이 표시된다.

$$G(t) = M(t) \left[ \frac{2\gamma_G}{r(t)} + \frac{2\Delta r_s}{d} + C(t) \right] \quad (1)$$

식 (1)에서  $M$ 은 입계 이동도,  $\gamma$ 는 입계에너지,  $r$ 은 시간  $t$ 에서의 평균 결정립 크기,  $\Delta\gamma$ 는 선택적 결정성장을 하는 결정립과 잠식당하는 결정립 사이의 평균 표면 에너지 차,  $d$ 는 박판 두께,  $C$ 는 황의 편석농도로서 결정립의 이동을 방해한다.

여기에서  $\Delta\gamma/\gamma$ 가 0.03에 불과하기 때문에 선택적 결정성장속도는 주로 평균 결정립과 결정립 이동을 방해하는 황 편석농도에 의해 결정된다. 따라서, 최종적인 (110)[001] Goss 집합조직을 얻기 위해서는 황이 상당량 편석된 범위에서

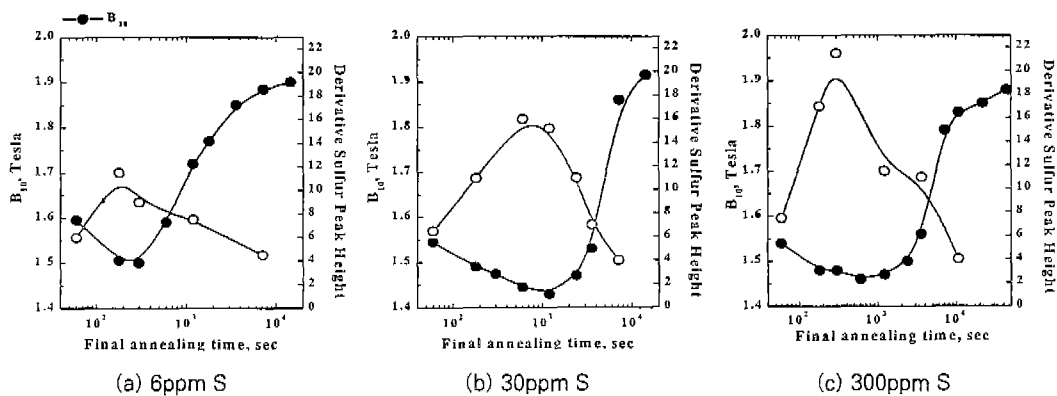


그림 1. 1200℃ 진공 분위기하에서 최종 소둔시간에 따르는 자성특성과 황의 표면 편석량과의 상호 연관성.

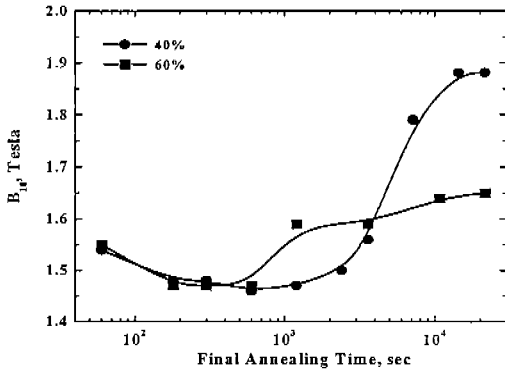


그림 2. 1200℃ 진공분위기 하에서 300ppm S를 함유한 박판에서 소성가공도에 따르는 자성특성 변화.

Goss 결정립들이 살아남도록 소성가공도를 적절히 조절하여야 한다. 그림 2는 이러한 소성가공도의 영향을 보여주는 것으로서 소성가공도가 클수록 최종적인 자성특성치는 상당히 낮았다.

한편, 그림 3은 같은 소성가공 조건에서 알곤 및 수소 분위기로 할 경우의 황 편석 농도와 자성치 변화를 보여준다. 대기압 하인 알곤 분위기에서 열처리시 황의 증발에 의한 손실량이 미약하기 때문에 표면 또는 결정립계의 황의 편석농도는 시간에 따라 포화되는 경향을 보이고 있으며 자성치는 계속 감소하여 1.5 Tesla 이하의 값을 나타내었다. 이러한 현상은 대부분의 열처리 시간에 있어서 황 편석 농도가 높음으로 인하여 자성특성에 해가 되는 (111) 결정립들의 성장에 기인한다. 그림 3(b)의 수소 분위기 하에서의 황의 편석거동은 진공 열처리에서와 유사하나, 편석량의 최대치가 나타나는 것은 편석된 황이 열처리 분위기인 수소와 반응하여 황화수소(H<sub>2</sub>S)로 소실되기 때문이다. 따라서, 높은 자성치를 나타내는

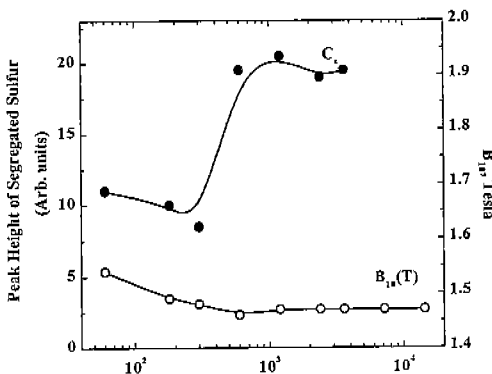
(110)[001] Goss 집합조직을 얻기 위해서는 규소강내의 황의 함유량에 따라 소성변형비를 달리하여야 하며 알곤 분위기가 아닌 진공이나 수소에서 최종 소둔하여야 한다.

현재, 일본의 경우, 황을 3ppm 까지 줄이는 극청정 제강공정과 진공 열처리 공정으로 인한 규소강판의 고 가격을 초래하고 있는 반면, 본 연구팀은 재결정시 표면에너지 차이를 유발하는 불순물의 편석거동의 이해를 바탕으로 재결정 이론과 나아가서 3차 재결정 현상, 좀더 정확히 표현하면 표면 에너지 유기 선택적 결정 성장 거동을 명확히 함으로써 300ppm의 황을 함유하는 규소강에서도 완전한 (110)[001] 고스 집합조직으로 구성된 고 효율 극박 규소강판을 개발함으로써, 산업화시 제강공정 및 열처리 공정의 용이성을 확보하였다.

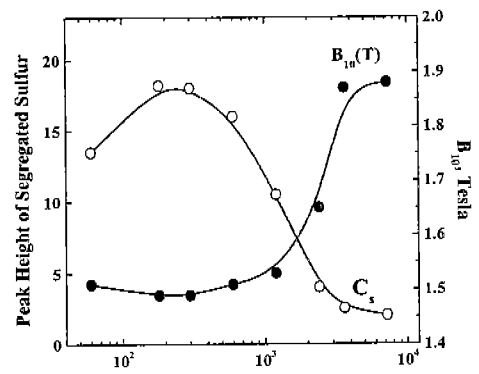
### 3. 국내외의 극박 3%규소강판의 제조 공정상 비교

표 2는 극박 3%규소강판의 개발 추이를 나타내고 있고, 표 3은 기존 추상 변압기용 철심으로 사용되는 상용 3%규소강판과 극박 방향성 3%규소강판의 성분을 비교하였으며, 표 4와 5는 변압기 철심재의 종류와 제조공법을 나타내고 있다.

상용 3%규소강판(0.3mm)은 Batch형 열처리 방법에 의해 MgO 절연코팅과 동시에 최종 소둔하며 이후 철손을 더욱 줄이기 위해서 장력인가 코팅을 하나, 표 2~5에서 알 수 있듯이, 일본의 극박 3%규소강판(0.1mm) 제조공정은 극청정강을 이용하여, 기존 Batch형 열처리 방법이 사용되는 것이 아니라, 풀고 감는 형태로 최종 등온 진공 열처리한 후 절연코팅하고 있기 때문에 경제성 측면에서는 극히 불리하다. 그러나, 본 연구기관의 극박 3%규소강판 제조공정은 표에서 보듯이, 상당량의 불순물을 포함한 극박 규소강판을 이용하고, 진공이 아닌 수소분위기에서 선택적 결정성장법에 의한 극박 방향성 3%규소강판을 제조하고 있기 때문에 경제성에 있어서는 일본



(a) 알곤



(b) 수소

그림 3. 1200℃ 알곤 및 수소분위기 하에서 최종소둔시 30ppm S를 함유한 박판에서 황의 계면편석과 자성특성사이의 상호연관성

표 2. 극박 3%규소강판의 개발 추이.

	1990년대 초	2000년대 초 정부사업 재개	2001년
용도	전력전자 기기용 고주파 코어	주상 변압기(?)	?
특징	3 ppm S 이하 극청정강	?	?

일본

	1999년	2000년	2001년
용도	전력전자 기기용 고주파 코어	주상 변압기	주상 변압기
특징	6 ppm S 극청정강	30, 300 ppm S	상용 3%규소강판

표 3. 상용, 극박 3%규소강판의 성분 비교.


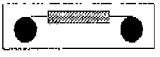

구분	C	Si	Mn	S	Al	Fe
Hi-B	≤0.01	2.8-3.4	≤0.1	≤0.03	≤0.04	Bal.
Japan	0.0012	2.92	0.01	0.0003	0.01	Bal.
K1 (전력 연구원)	0.0030	2.97	-	0.0006, 0.003, 0.03	-	Bal.
K2 (전력 연구원)	≤0.01	2.97	≤0.1	≤0.03	-	Bal.

에 비해 훨씬 앞선다고 판단된다. 그러나, 제강공정상 0.05% 이하로 낮출수 없는 Mn을 첨가하지 않고는, 아직도 원료의 고순도화에 따른 가격 상승 및 대량 생산의 제약 등이 수반되므로, 약 0.1%의 Mn을 포함하고 있는 상용 3%규소강판을 이용한 극박방향성 규소강판의 개발이 시급한 실정에 있으며, 표 2와 3에서 보는 바와 같이 최근에, 100 $\mu$ m급 두께(K2)로 1.9Tesla의 자성특성을 얻음으로써 일부 그 개발 가능성을 확인한 바 있다.

표 4. 변압기 철심재의 종류와 제조공법.

	기존 방향성 규소강판 (G6)	아몰퍼스 합금 (Fe-Si-B 화합물)	초절전 극박 방향성 규소강판	초절전 극박 방향성 규소강판
개발 시기 및 국가	1930년 초(미국)	1980년 초(미국)	1990년 초(일본)	1999년 초(한국)
불순물 농도	~300ppm (제강공정 용이)	-	3ppm이하 (제강공정 난해)	300ppm이하 (제강공정 용이)
제조공법	1단 냉간 압연 후 최종 열처리	초당 100만도로 급속냉각	3단 냉간 압연 후 최종 열처리	2단 냉간 압연 후 최종 열처리
최종 열처리 분위기	수소	-	10 <sup>-4</sup> Torr 고진공 (생산량 제한)	진공 또는 수소
두께	0.3mm	0.02 ~ 0.04mm	0.15mm 이하	0.15mm 이하
무부하 손(W/kg)	0.60	0.15 ~ 0.30	0.19	0.19
자성특성 (B <sub>10</sub> , Tesla)	1.85 ~1.89	1.5 ~ 1.6	~ 1.70	1.90이상
가격/kg	1\$	9\$	8-20\$	약 2\$
적용범위	변압기	변압기 (O) 및 고주파 코어(O)	변압기 (x) 및 고주파 코어(O)	변압기 (O) 및 고주파 코어(O)

표 5. 최종 열처리 공정.

상용 3%규소강판 (0.3mm, 일본, 한국)		수소 열처리 적제철 (1\$/kg)
극박 3%규소강판 (0.1mm, 일본)		진공열처리 Winding 법 (8\$/kg)
극박 3%규소강판 (0.1mm 한국)		수소 열처리, 적제철 (2\$/kg)

#### 4. 극박 3%규소강판을 적용한 초절전 변압기의 경제효과

1996년도 경영통계 자료에 의하면 95년 총발전량은 184,661 GWh이다. 박 규소강판 개발에 의한 초절전 변압기 성공시, 철손의 65%, 동손의 5%를 줄일 수 있어 이것을 발전량으로 환산하면 표 6에서 보는 바와 같이, 총 1,649GWh의 손실을 줄일 수 있다. 이는 105MW GT 3대(건설비 약 3조)와 158 MW ST 1대(건설비 약 0.8조)로 구성된 시설용량 473 MW급 부천 복합의 1년 발전량인 1,834 GWh와 맞먹는 양이다. 이는 결국 새로운 부천 복합화력을 건설하기 위한 비용인 약 4조를 매년 절감할 수 있는 효과를 나타낸다.

한편, 한국전력의 주상변압기는 전국에 걸쳐 약 130만대(평균 약 45kVA급)가 설치되어 있으며, 매년 10%가 교체되고 있다. 따라서, 표 7과 100kVA(100만원/대당)을 기준으로, 극박 규소강을 이용한 초절전 변압기로 대체될 경우, 부가적으로,

표 6. 손실과 발전량 관계.

줄일수 있는 손실	부천복합의 1년 발전량(96년 기준)
1,649GWh	1,834GWh

표 7. 변압기 종류별 비교.

	초절전변압기	아몰퍼스변압기	기준변압기
무부하손 (W)	140이하	124 (150kVA)	275
부하손 (W)	1400이하	2500 (150kVA)	1650
크기	15% 감소	10% 증가	850×860 ×1350(mm)
중량	20% 감소	15% 증가	650kg
전압변동율 (%)	1.4	1.4	1.4
효율 (%)	98.8	98.6	98.5
절연유	광유	광유	광유
절연지	E종(다이아몬드지)	E종(다이아몬드지)	E종(다이아몬드지)
패킹류	NBR	NBR	NBR
가격	70%	130%	100%

년간 약 300억의 생산원가 절감을 예상 할 수 있다. 이러한 초절전 극박 규소강 변압기는 40조에 달하는 세계시장을 독과점할 수 있는 가공할 만한 품목이다. 90년대 초, 개발에 성공한 일본은 실제 생산시, 낮은 지속밀도와 고가의 생산원가로 인해 주로 고주파 코아시장에 한정하여 생산하여 왔다가, 최근, 본 연구팀의 결과들에 자극을 받아, 2000년 초 정부 주도사업으로 변압기 철심재를 목표로 추격에 박차를 가하고 있다.

#### 5. 결 론

결국, 기존 강판에 비해 1/3로 얇고 (110)[001] Goss 집합조직에 의해 자성특성이 우수한 극박 방향성 규소강판을 기존 방향성 규소강판에 의해 Batch형으로 개발하기 위해서는 인히비터의 분포와 크기, 가열속도, 고용된 황의 농도, 소성변형비, 황의 편석거동에 결정적 영향을 미치는 수소분위기, MgO와 SiO<sub>2</sub>에 의한 유리질 피막 형성기구 등을 종합적으로 고찰하는 것이 극박 방향성 규소강판 개발의 관건이다. 한편, 상용 3%규소강판의 박형화는 0.23mm로 그 한계성이 제시되어 왔으나, 본 연구팀에서는 최근 기존 3%규소강판을 이용하여 1.9Tesla 이상의 자성특성을 갖는 고배향성 극박 3%규소강판(0.1mm) 제조에 성공하였으며, 조직적인 연구를 바탕으로 한다면, 향후 수년 내에 기술축적에 따른 대량 생산이 가능하리라 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] N. H. Heo, Y. J. Kim, J. G. Na and et al., "Effects of Pre-annealing and Rolling Conditions on Magnetic Property of Thin-gauged 3%Si Steel", Scripta Mater, vol. 37, 279 (1997).
- [2] Y. Lee, A. R. Koymenn, N. H. Heo, J. G. Na and J. S. Woo, "Study on Surface Magnetic Domain Structure of Thin-gauged 3%Si-Fe Sheets using Scanning Electron Microscope with Polarization Analyzer", Scripta Mater., vol. 38, 1365 (1998).
- [3] N. H. Heo, M. T. Kim, K. H. Chai, J. G. Na, C. S. Lee and J. S. Woo, "Sulfur Evaporation and Magnetic Induction in Thin-gauged 3%Si-Fe Sheets", Scripta Mater., vol. 40, 999 (1999).
- [4] J. C. Kim, N. H. Heo, K. H. Chai, J. G. Na, J. S. Woo and G. M. Kim, "Effects of Rolling Condition on Grain Orientation and Magnetic Properties of Thin-gauged 3% Si-Fe Sheets", Scripta Mater., vol. 38, 1405 (1998).

- [5] N. H. Heo, K. H. Chai, J. G. Na and J. S. Woo, "Magnetic Induction and Surface Segregation in Thin-gauged 3% Si Steel", J. Appl. Phys., vol. 83, 6480 (1998).
- [6] Y. Lee, A. R. Koymenn, N. H. Heo, J. G. Na and J. S. Woo, "Surface Domain Observation on Thin-gauged 3% Si-Fe Sheets using Scanning Electron Microscopy with Polarization Analysis (SEMPA)", IEEE Trans. Magn., vol. 34, 1165 (1998).
- [7] J. G. Na, C. H. Park, J. Kim, N. H. Heo, S. R. Lee, C. S. Lee and J. S. Woo, "New method to predict the Magnetic Properties of Thin-gauged Si-Fe Sheets", J. Appl. Phys., vol. 83, 6483 (1998).
- [8] N. H. Heo, K. H. Chai, J. G. Na, J. Kim and J. S. Woo, "Effect of Surface Segregation of Sulfur on Recrystallization Kinetics in 3% Si-Fe alloy Strip", J. Appl. Phys., vol. 85, 6025 (1999).
- [9] N. H. Heo, K. H. Chai, J. G. Na, J. Kim and J. S. Woo, "Nucleation and Development of Goss Texture and Magnetic Induction in Thin-gauged 3% Si-Fe Alloy", J. Appl. Phys., vol. 85, 6022 (1999).
- [10] N. H. Heo, K. H. Chai, J. H. Shin, J. G. Na and J. S. Woo, "Cold Rolling Condition and Magnetic Induction in Thin-gauged 3% Si-Fe Strip", J. Korean Phys. Soc., vol. 35, 245 (1999).
- [11] K. H. Chai, N. H. Heo, J. G. Na and J. S. Woo, "Goss Texture Formation and Magnetic Induction in Thin-gauged 3% Si-Fe Strip", J. Korean Phys. Soc., vol. 35, 466 (1999).
- [12] K. H. Chai, N. H. Heo, J. G. Na, H.-T. Jeong, and S. R. Lee, "Effect of segregated sulfur on recrystallization texture and magnetic induction in thin-gauged 3% silicon steel", IEEE Trans. Magn. 35, 3373 (1999).
- [13] N. H. Heo, K. H. Chai, and J. G. Na, "Effects of heating rate and surface oxidation on magnetic induction of 3% Si-Fe strip", J. Appl. Phys. 87, 5236 (2000).
- [14] K. H. Chai, N. H. Heo, and J. G. Na, "Tertiary recrystallization and magnetic induction in 3% Si-Fe strip", J. Appl. Phys. 87, 5233 (2000).
- [15] N. H. Heo, K. H. Chai, and J. G. Na, "Correlation between interfacial segregation and surface-energy-induced selective grain growth in 3% silicon-iron alloy", Acta Mater. 48, 2901 (2000).
- [16] K. H. Chai, N. H. Heo, J. G. Na, S. R. Lee and J. S. Woo, "Study on Surface Domain Structure of Thin-gauged 3% Si-Fe Strips using Scanning Electron Microscopy with Polarization Analysis", J. Magnetism 3(2), 999 (1998).
- [17] K. H. Chai, J. G. Na, N. H. Heo, J. C. Kim, S. R. Lee and J. S. Woo, "Effects of sulfur segregation on tertiary recrystallization kinetics in thin-gauged 3%Si-Fe electrical strip", J. Magnetism 4, 5 (1999).

## 저 자 약 력

**성명 : 허남희**

**❖학력**

1979년 3월-1983년 2월 서울대 금속공학과(학사)  
 1983년 3월-1985년 2월 서울대학원 금속공학과(석사)  
 1989년 3월-1993년 2월 서울대학원 금속공학과(박사)

**❖경력**

1993년 10월-1996년 7월 Dept. of Materials Science and Eng., MIT(Post-doc-tor)  
 1997년 2월-현재 한전전력연구원