

아몰퍼스 메탈과 이를 이용한 아몰퍼스 변압기

손학식, 김재철, 김인수, 박승윤  
에너지관리공단 효율기술처, Sungshil Univ, "에너지관리공단 DSM사업처, "재흥산업

Amorphous Metal and Amorphous Transformer

Hak-Sik Son, Jea-Cheol Kim, In-Soo Kim, Seung-Youn Park  
Dept. of Finance Management, KEMCO, Sungshil Univ, Dept. of DSM, KEMCO, Cheryong Industrial Co.

**Abstract** - On the side of that necessity, it is known that the development of Amorphous metal take effects on lowering eddy current loss in a core system. If a amorphous transformer and a motor to which "Amorphous Metal" is applied be widespread, electricity saving should be enormous with the several hundreds billion won of economic effects like cutting the cost of Power Plants and the unhealthy gases. This paper carried out general evaluation about the characters of Amorphous metal, the expected energy saving effects of a amorphous transformer, the environmental contribution, the increasement of electricity quality, and the features of harmonic

일반적으로, 아몰퍼스 메탈은 몇 가지 금속을 용융한 상태에서 약 100만°C/초의 속도로 급냉하므로 금속의 원자가 규칙적으로 배열하여 결정화할 시간이 없이 액상에서 무질서한 원자 배열 상태를 고체로 가져와 비정질 합금으로 응고하게 된다. 이러한 상태의 비정질 금속은 같은 결정질 금속에 비하여 우수한 전기기계적 특성을 나타내어 부품소재인 전기강판, Permalloy 및 Ferrite에 비하여 소형화와 고주파화가 가능하다.

1. 서 론

1967년 Duwez와 Lin은 급냉법에 의해 Fe-P-C계의 아몰퍼스 메탈을 발명하였다. 이것은 아몰퍼스 연자성체의 새로운 혁신이었다. 1970년대에 접어들면서, Oil-Shock는 효율이 높고 경제적인 기기설계에 관심을 기울이게 했고, 이 때부터 변압기 기기에 있어서도 예외는 아니었다. 철심 계통에 있어서는 와전류손을 낮추기 위해 더 얇은 규소강판의 개발이 이루어졌고, 변압기 설계에서는 컴퓨터를 이용한 설계에 눈을 돌리게 되었다. 그러나, 컴팩트하고 고효율의 기기를 제조하는 데에는 한계에 도달하여, 새로운 방법이 필요했다.

1980년대 초 GE社와 AlliedSignal社의 25μm의 고경도 아몰퍼스 리본을 이용한 아몰퍼스 변압기의 Field Test를 시작으로 하여, 지금까지 지속적으로 아몰퍼스 변압기의 사용이 증가하고 있다.

또한 최근 전자, 정보통신 산업의 비약적인 발전에 따라 컴퓨터, 개인 휴대통신, 노트북 컴퓨터, VTR 등의 가정용 및 업무용 전자기기 뿐만 아니라 전자교환기, NC장비, 로봇 등의 산업용 전자장비들이 크게 실용화됨으로써 이러한 전자기기에 아몰퍼스 금속을 사용한 전원공급장치의 사용이 급속하게 증가하고 있다.

본 논문에서는 아몰퍼스 금속의 특성과 이를 응용한 아몰퍼스 변압기의 에너지 절감성 및 환경에 기여하는 부분 및 나아가 전기품질의 향상과 고조파에 대한 특성을 설명하였다.

2. 본 론

2.1 Amorphous Metal

Amorphous는 말 그대로 비결정질이란 의미를 가진다.

비정질 합금의 개발은 주로 미국의 AlliedSignal社가 1970년경부터 개발에 착수하여 최초 'Metglas' 비정질합금을 상품화(폭: 2mm, 길이 : 수m)하였다. 그 후, 1980년대 Narasima에 의해 PFC(Planar Flow Casting ; 그림 1)공정이 개발되었고 1980년대 폭 2inch ribbon, 1982년 폭 6.7inch, 1987년에 8 inch의 개발에 성공하여, 1989년에 Conway에 비정질 대량생산을 위한 60,000 Metric Ton/Year 공장을 설립하였다. 그 외에 독일에 Vacuum Schemeltz, 일본의 Toshiba, 신일본, 가와사키 제철, 러시아의 Asah 제철에서도 개발을 하여 생산기술을 확보하고 있다.

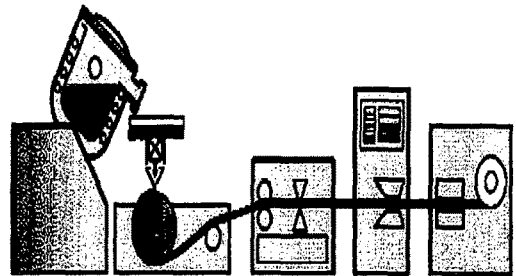
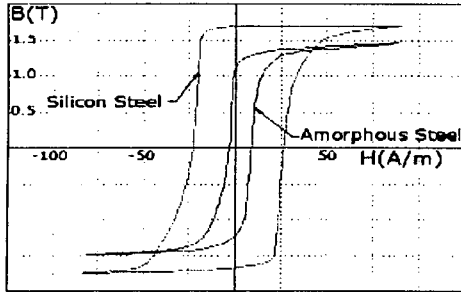


그림 1. Planer Flow Casting 개요

2.1.1 변압기용 아몰퍼스 메탈의 특성

그림 2 및 그림 3은 현 아몰퍼스 변압기에 사용되는 Metglas 2605SA1의 특성을 자기 및 주파수별 특성을 나타낸 것으로서 규소강판에 비하여 히스테리시스 Loop의 면적이 작고 고주파수에서의 특성이 우수한 것을 알 수 있다.



Fe-base amorphous alloy and silicone steel

그림 2. Amorphous vs. SiFe B-H Curve

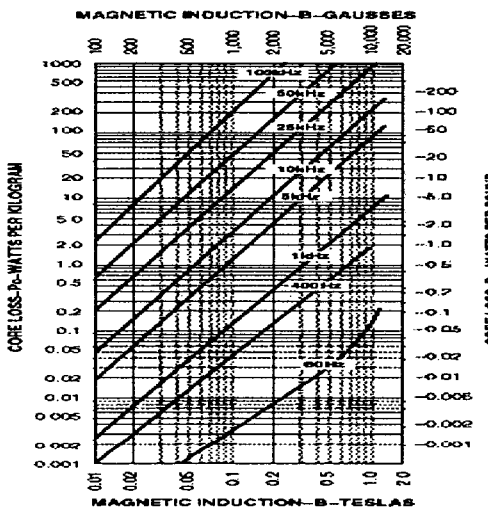


그림 3. 2605SA1의 주파수별 특성표

또한 Fe계의 아몰퍼스 금속(2605SA1)과 0.3t의 방향성 규소강판(PG172)의 전자기적, 물리적 특성은 표 1과 같다.

표 2. Metglas Alloy-2605SA1의 전자기적 및 물리적 특성

구분	특성 항목	아몰퍼스 금속 (2605SA1)	규소강판 (PG172)
전자기적 특성	포화자속밀도(Tesla)	1.56	2.02
	직류최대 열처리 후 투자율(열처리 전)	600,000	-
	투자율(열처리 전)	45,000	1,900
	포화자왜(ppm)	27	~100
	전기저항( $\mu\text{-}\Omega\text{-Cm}$ )	137	47
물리적 특성	결정화 온도( $^{\circ}\text{C}$ )	507	-
	밀도(g/cc)	7.19	7.65
	Curie온도( $^{\circ}\text{C}$ )	392	780
	경도(Hv)	900	190
	인장강도(GPa)	0.69	-
	열팽창(ppm/ $^{\circ}\text{C}$ )	2~7	-
연속사용온도( $^{\circ}\text{C}$ )	150	-	

표 1.에서 포화자속밀도는 규소강판에 비하여 낮지만, 투자율과 전기저항이 높아 히스테리시스 손 및 와전류 손

실이 규소강판에 비하여 현저히 작아 대략 무부하손실은 상용주파수(50~60Hz)하에서 규소강판의 약 1/4-1/5 정도 된다.

## 2.2 전력손실 절감 및 경제성 측면에서의 아몰퍼스 변압기

### 2.2.1 전력손실 절감

국내에서는 현재 배전계통 22.9kV급 용량 3000kVA이하급의 아몰퍼스 변압기의 제작이 가능하며, 현재 설치 중인 중인 22.9kV급 3000kVA이하급 배전용 변압기의 용량의 분포는 표 2와 같다.

표 3. 국내 22.9kV 3000kVA급 이하 변압기의 설치 현황

구분	대표용량 (kVA)	설치용량 (MVA)	예상설치 대수(대)	비고
가공 변압기	50	53,922	1,078,440	한전 자료 이용
지중 변압기	500	3,257	6,514	
민수 변압기	500	75,134	150,268	
합계		132,313	1,235,222	

표 2는 국내 3000kVA급 이하의 가공, 지중 및 민수 변압기의 용량을 산출한 후, 대표용량을 50kVA와 500kVA로 정하여 설치대수를 결정하였다. 비교 대상은 국내에서 생산하는 PG-172 0.3t의 규소강판으로 제작한 규소강판 변압기와 비교를 하였다. 이들 대표용량의 무부하 손실 및 효율의 특성은 표 3과 같으며, 상기의 모든 배전용 변압기를 아몰퍼스 변압기로 대체하는 경우의 전력손실 절감 및 효율의 특성은 <표 4>와 같다.

표 4. 아몰퍼스 변압기와 규소강판 변압기의 특성비교

구분	무부하손실 (W)			효율 (%)		
	아몰퍼스	규소강판	손실 절감	아몰퍼스	규소강판 차이	
용량(kVA)						
50	38	149	111	99.1	98.6	0.5
500	270	1,400	1,130	98.5	98.3	0.2

표 5. 아몰퍼스 변압기에 의한 전력손실 절감

구분	무부하손실 절감량/대 (Watt)	예상설치 대수 (대)	무부하손실 절감량 (kW)	비고
가공 50kVA	111	1,078,440	119,707	한전 자료 이용
지중 500kVA	1,130	6,514	7,361	
민수 500kVA	1,130	150,268	169,803	
합계			1,235,222	

따라서 무부하손에 의한 연간 전력손실 절감량은  $296,871 \text{ kW} \times 24 \text{ hr} \times 365 \text{ days} = 2,600,590 \text{ MWhr}$  이를 2000년도 한국전력공사의 평균발전단가(59원

(kWhr)를 기준으로 하면, 약 1,534억원의 발전비용 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한, 아몰퍼스 변압기로 대체 사용함으로써 국내 전력산업에 미치는 기대효과는 표 5와 같다.

표 6. 기대효과

내 용	기대효과	비 고
총 발전량	266,400GWh	2000년 기준
최대 수요 전력	41,007MW	"
예상 발전소 증설용량	1,281MW	2001년 기준
연간 예상전력손실 절감량	2,600GWh	2000년 총발전량의 1.0%
연간 발전비용 절감액	1,534억원	평균발전단가(ED)(kWh)기준
최대수요전력 감소량	296MW	2000년 최대수요전력의 0.72%
발전소 건설비용 예상 절감액	2,960억원	2001년 발전소 증설용량의 231%
		발전소 건설단가 1,000천원/kW 기준

참고로 미국을 위시한 세계 각국의 전력사용 현황 및 이 가운데 배전용변압기를 아몰퍼스 변압기로 대체했을 경우의 전력손실 절감량은 표 6과 같다.

표 6. 아몰퍼스 변압기 대체시 전력손실 절감량

구 분	전력 소모 1994 (TWh)	코아 손실 1994 (배전용 :TWh)	연 성장률 (%)	코아 손실 2000 (배전용 :TWh)	연간 잠정 절감량 2000 (TWh)	연간 잠정 절감액 2000 (백만US\$)
미 국	3,280	52	2	59	47	3525
유 럽	2,960	31	1	33	26	1950
일 본	930	15	2	17	14	1050
중 국	840	15	8	24	19	1425
브라질	275	5	5	7	6	450
인디아	245	4	7	6	5	375
한 국	147	3	10	5	4	300
대 만	106	2	8	3	2.5	188
타 일	60	1	11	2	1.5	113
인 도	43	0.7	11	1.3	1	75
태	40	0.7	10	1.2	1	75
미	26	0.5	14	1.1	0.9	68

\*TWh = 10<sup>12</sup>Wh  
 \*US\$ 0.75/kWh 기준  
 \*자료인용 : AlliedSignal Brochure

### 2.3 경제성 평가

아몰퍼스변압기의 변압기별 전력손실 절감에 따른 경제성 평가는 표 7 및 표 8과 같다.

표 8. 가공용 변압기

구 분	일단접지 50kVA 주상변압기	아몰퍼스 50kVA 주상변압기	차
단 가 (원)	931,100	1,243,200	312,100
무부하손실 (Watt)	149	38	111
연간무부하손실(kWh)	1,305.24	333.88	971.36
연간무부하손실액(원)	97,893	25,041	72,852
비 고	2000년 전기요금수준 : 75.00원/kWh *한전자료인용		

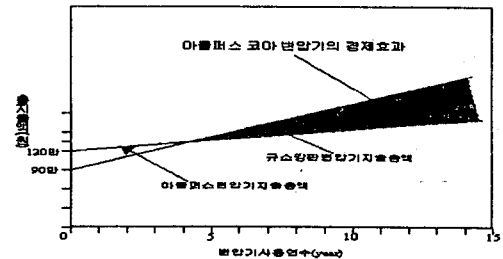


그림 4. 연도별 경제성(50kVA)

표 9. 지중 및 민수용 변압기

구 분	3상 500kVA 지중 및 민수변압기	3상500kVA 아몰퍼스변압기	차
단 가 (원)	5,200,000	7,800,000	2,600,000
무부하손실 (Watt)	1,400	270	1,130
연간무부하손실(kWh)	12,264.00	2,365.20	9,898.80
연간무부하손실액(원)	919,800	177,390	742,410
비 고	2000년 전기요금수준 : 75.00원/kWh *한전자료인용		

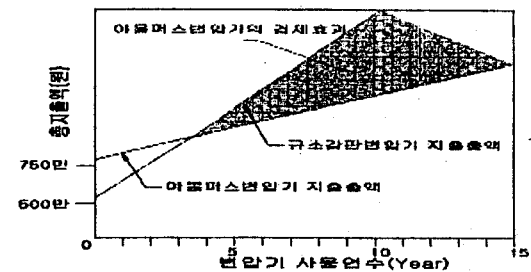


그림 5. 연도별 경제성(500kVA)

$$\text{초기투자비용회수기간} = \frac{\text{변압기프리미엄가격}}{\text{연간에너지절감액}} \quad (1)$$

따라서 변압기의 수명을 약 25년으로 가정할 때, 초기비용투자 후 3~4년 후부터는 전력손실절감에 따라 상당한 경제적 이익이 발생함을 알 수 있다.

### 2.3.1 국내 아몰퍼스 변압기 보급현황

국내에서는 아몰퍼스 변압기가 1997년 한국전력공사에서 처음으로 시사용으로 도입한 이후, 현재에는 정식 구매품목으로서 지정이 되어 현장에 보급되고 있으며, 2000년도에는 아몰퍼스 변압기를 고효율에너지기자재 품목으로 지정하여 다음과 같은 법령및정부지원으로 산업계 전반에 적극적인 보급, 확대에 힘쓰고 있다.

- 근거법령
  - 에너지이용 합리화법 제13조
  - “고효율에너지기자재 보급 촉진에 관한 규정”(산업자원부 고시 제 2000-40호, 2000.4.11)
- 정부지원
  - 조달청 훈령 제 1106호(2000.5.12) “에너지소비제품 구매운용기준”에 의거, 조달청 우선구매
  - 국무총리지시 2001-5호(2001.1.30) “공공기관 에너지 절약 추진지침”에 의거, 공공기관 사용 의무화
  - 조세특례제한법 시행규칙 중 개정령안(재정경제부령 제184호, 2000.3.28)에 의거, 에너지절약시설에 대한 세제지원
  - 건설교통부 고시 제2001-118호(2001.5.11) “건축물의 에너지절약 설계기준”에 공동주택 등 건축물 용도별 8종의 건축물 설계시 전기설비부문에 고효율에너지기자재 품목 사용 의무화

### 2.4 고조파에 대한 영향

파워 전자부품, 조명장치, 파워 서플라이 등의 사용의 증가로 인하여, 상용주파수의 전류 및 전압의 파형은 상당히 왜곡된다. 이것은 배전시스템에 상당한 고조파를 발생시키게 되어 코어손실을 증가시킨다. Hysteresis 손실과 Eddy current 손실은 각각  $f$ 와  $f^2$ 에 따라 변하는데,  $f$ 는 상용주파수이고 ‘ $m$ ’은 코어재질에 따른 상수로 1.5~2.0사이의 값을 가진 것으로 아몰퍼스 메탈을 변압기에 사용하였을 경우보다 규소강판을 변압기 철심으로 사용하였을 경우에 더욱 심한 손실이 발생하게 된다. 변압기에서의 고조파 현상을 파악하기 위하여 현장시험을 실시한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

#### 2.4.1 산업용 500kVA 변압기의 현장운전

3상 500kVA의 아몰퍼스 변압기와 규소강판 변압기를 자동차공장에 설치하여 운전하였다. 두 종류의 변압기에 대한 예상손실은 고조파를 전혀 포함하지 않은 60Hz의 정현파 여기에 근거를 두었다. 설계상의 무부하 손실과 부하손실이 각각 160W와 4,484W인 아몰퍼스 변압기의 실제 손실은 설계치의 약200%를 나타내었고, 반면에 설계상 무부하손실과 부하손실이 각각 1,280W와 7,367W인 규소강판 변압기에 대한 손실증가량은 약 400%에 가까

웠다(그림 6참조). 공장에서의 주된 부하는 Arc-Furnace로서 부하의 비선형성 때문에 변압기에는 상당한 양의 고조파 전류가 함유되었다. 운전 결과, 아몰퍼스 메탈을 사용한 변압기보다 규소강판 변압기가 설계치 보다 상당한 양의 손실증가를 나타내는 것을 단적으로 보여주었다. 그리고, Hysteresis 손실에 대한 와전류 손실의 비는 규소강판 변압기가 2/3이고 아몰퍼스 변압기가 1/4이었다.

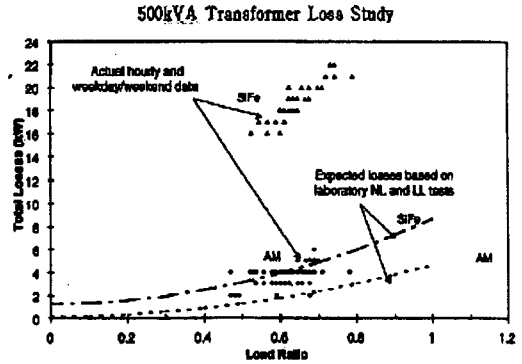


그림 6. 아몰퍼스 변압기(AM)와 주상 변압기(SiFe)의 실부하 상태에서의 손실비교

### 2.4.2 ERDA(Electrical Research & Development Association) Test

고조파 조건에서의 변압기의 성능시험이 India의 ERDA에서 아몰퍼스 변압기와 규소강판 변압기를 실험 대상으로 하여 이루어졌다. 2대의 250kVA급 변압기는 동일한 사양을 갖는 코일을 사용하여 제작되었으며, 단지 철심의 재질만 아몰퍼스와 규소강판으로 차이를 두었다. 속도가변용 모터와 파워 디바이스의 등의 부하들이 사용되는 표준 산업현장에서 측정된 ERDA의 실험결과 는 표 9, 표 10 및 표 11과 같다.

표 9. 고조파가 함유되지 않은 상태

손실(Watt)	아몰퍼스 변압기	규소강판 변압기
히스테리시스	99	155
와전류	33	311
총코어손실	132	466
코일손실 (평균부하전류)	966	1,084
부하율	55%	58%
총변압기 손실	1,098	1,550

표 11. 전류의 왜형률

고조파	1	3	5	7	9	11	13	15	17
왜형률 (%)	100	1	20	10	1	9	6	1	5

표 10. 고조파 왜형률 26%에서의 상태

손실(Watt)	아몰퍼스 변압기	규소강판 변압기
히스테리시스	99	155
와전류	74	698
총코아손실	173	853
코일손실 (평균부하전류)	1,553	1,671
부하율	55%	58%
총변압기 손실	1,726	2,524

상기의 현장시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

- a) 코아와코일에서 발생하는 고조파 와전류는 전체변압기 손실을 증가시키며,
- b) 아몰퍼스 메탈 철심의 경우, 히스테리시스손실에 대한 와전류손실의 비율이 작으면 작을수록 전체적인 코아손실 증가가 더 작아지며,
- c) 상기 두 가지 종류의 변압기에 있어서 변압기손실 차이는 두께가 두꺼운 규소강판을 코아의 재질로 사용하였을 때, 더욱 증가한다는 것이며,
- d) 고조파 왜형률로 인한 온도상승으로 변압기의 손실이 증가되면 변압기의 사용수명이 단축된다는 것이다.

철심에서 발생하는 자기적 손실, M은 식 (2)와 같다.

$$M = k_1 f + \frac{k_2 d^l f^m B^n}{\rho} \quad (2)$$

$k_1$ 과  $k_2$ 는 상수이고,  $d$ 는 재질의 두께,  $\rho$ 는 재료의 전기저항이고  $l$ ,  $m$  및  $n$ 은 각각 재질에 따른 상수로 범위는 다음과 같다.

$$l = 1 \sim 2, \quad m = 1.5 \sim 2.0, \quad n = \sim 2$$

철심재질로서 아몰퍼스 메탈과 규소강판 사이의 중요한 차이점은 식 (2)에서 각각 전자와 후자에 있어서 적용되는 'm'의 범위가 각각 '1.5'와 '2'라는 것이다. 따라서, 이 차이는, 철심 재질에 있어서 고조파가 점점 높아짐에 따라, 더욱 현저히 나타나게 된다. 재질의 두께는 아몰퍼스 금속이 25 $\mu$ m이고, 규소강판이 250 $\mu$ m로서 식 (2)의 d의 계수에 있어서는 약 10배의 차이를 나타낸다. 전기저항성은 아몰퍼스 메탈이 130 $\mu\Omega$ -cm이고 규소강판이 50 $\mu\Omega$ -cm으로서 아몰퍼스 메탈이 자기손실을 줄이는데 있어 더욱더 유리하고, 특히 와전류 손실에 있어서는 더욱더 민감하게 작용하고 있다. 이러한 물리적 특성의 차이점은 표 12와 같다.

표 12. 아몰퍼스 메탈과 규소강판의 자기특성 상수 비교

특성	아몰퍼스 메탈	규소강판
$\rho$	$\sim 130 \mu\Omega$ -cm	$\sim 50 \mu\Omega$ -cm
d	$\sim 25 \mu$ m	$\sim 250 \mu$ m
m	$\sim 1.5$	$\sim 2.0$
n	$\sim 2$	$\sim 2$

### 2.4.3 고조파 문제점에 대한 해결방법

전력계통에 있어서 고조파 왜곡과 관련된 문제점은 역률 저감과 고조파 노이즈, 변압기의 과열, 손실증가로 인한 운용 용량의 감소 등과 같은 전기품질의 저하를 들 수 있다. 아몰퍼스 금속을 사용한 변압기를 사용하면 고조파에 대한 대비책으로 사용되는 절연변압기, 고조파 필터와 같은 기기들을 별도로 설치, 운영하지 않아도 되는 잇점이 있다. 또한, 그림 6에서 도시한 바와 같이 고조파가 함유되지 않은 부하상태에서는 연간 20,000kWh를, 고조파가 함유된 부하상태에서는 연간 130,000kWh의 전력손실을 절감할 수 있다.

### 2.5 환경파급 효과

지구환경문제가 대두되고 각국의 환경파괴가 심각한 수준까지 도달함에 따라 전세계적으로 환경규제기준이 강화되고 있다. OECD, WTO를 중심으로 환경과 관련된 국제규범인 그린라운드를 진행중에 있으며 우리나라도 OECD가입에 따라 유해가스 배출량 감축에 있어 개도국 혜택을 받기가 어려워졌으며 이는 국내산업에도 커다란 부담으로 작용할 것으로 보인다.

국내에서 화석연료의 사용에 따라 매년 배출되는 CO<sub>2</sub>는 약 1.45억톤으로 국민 1인당 약 3.15톤에 해당된다. 따라서 국내의 배전급 변압기를 아몰퍼스 금속을 사용한 아몰퍼스 변압기로 대체 사용하는 경우 연간 약 2,600GWh의 전력절감으로 296MW의 발전설비용량의 발전소 건설을 억제할 수 있어, 이로 인한 화석연료의 사용을 줄일 수 있어 표 13과 같이 연간 약 410,800톤의 이산화탄소 가스를 포함한 여러 유해가스의 배출감소가 기대되어 환경오염 및 지구온난화 방지에도 크게 기여할 수가 있다.

표 13. 유해가스 감소량

종류	연간 유해가스 배출 감소량 (Metric Ton)	배출원 단위 (g-c/kWh)
CO <sub>2</sub>	410,800	158
SO <sub>2</sub>	65,000	25
NO <sub>2</sub>	6,500	2.5

### 3. 결론

세계적으로 에너지를 효율적으로 사용하고 절약하려는 부단한 노력이 끊임없이 진행되어 왔으며 선진국에서는 에너지 효율이 낮은 제품에 대하여는 여러 가지 규제를 통하여 이의 사용을 억제하고 있으며, 앞으로는 더욱 강화될 것으로 예상된다.

더욱이 에너지 수입의존도가 97% 이상을 차지하고 있는 우리나라의 경우에는 더욱 고효율제품의 개발 및 보급이 절실히 요구된다 하겠다.

따라서 아몰퍼스 금속을 응용한 아몰퍼스 변압기를 널리 보급·확대한다면, 막대한 양의 전력질감과 그에 따른 발전소 증설 및 이산화탄소 등 유해가스 발생 억제 등으로 수천억원의 경제적 효과가 기대되며, 또한 전자 부품 소재로 응용되면 전력질감 뿐만 아니라 제품의 고효율 및 소형, 경량화가 실현되어 국내 산업의 기술경쟁력을 한단계 높일 수 있을 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] R. Hasegawa, Fellow, IEEE, and D.C. Pruess, "Impact of Amorphous Metal Based Transformers on Efficiency and Quality of Electric Power Distribution"
- [2] Ryusuke Hasegawa, "Present status of amorphous soft magnetic alloys", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215-216(2000) 240-245
- [3] Barry W. Kennedy, "Energy Efficient Transformers", MacGraw-Hill
- [4] ERDA, "Transformer (Core Loss) Performance Under Harmonic Conditions, ERDA Report
- [5] 최정식, 황시율, "아몰퍼스 코어형 변압기 개발동향", 한전 기술연구원, 한전전력연구원