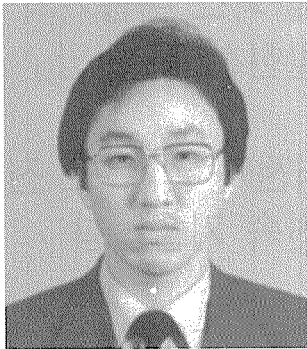


「아몰퍼스 변압기의 개발현황 및 전망」



한국전기연구소
자성재료연구실장
공학박사 홍진완

1. 서론

아몰퍼스(amorphous, 비정질) 자성재료는 변압기의 철손을 현재의 1/3~1/4 정도로 줄일 수 있어 세계적으로 각광을 받고 있으며 미국과 일본에서는 아몰퍼스 합금을 상업적으로 공급 가능할 수 있을 뿐만 아니라 변압기에의 적용평가, 상업적인 대량생산시의 문제점에 관한 연구검토가 완료되었으며 현재 경년열화 연구를 진행중에 있다. 일본의 경우에도 신기술 개발사업단을 중심으로 아몰퍼스 재료 개발이 진행중에 있으며 변압기 메이커에서도 주상 변압기의 대량 생산체제를 이미 준비하고 있다.

아몰퍼스 합금 제조 기술은 미국의 Allied사가 특허권을 소유하고 있어 특허료 지불등으로 소재가격이 비교적 높으나 관련된 주요 특허가 해제되는 1993년 이후에는 소재 가격이 급강하하여 단기적으로는 규소강판의 약 3배 이내의 가격, 장기적으로는 약 1.5배 이내의 가격이 형성될 것으로 보인다.

그리고 현재 한국전기연구소, 한국전력공사 기술연구원과 효성중공업(주)에서 소재 및 변압기 개발

에 참여하고 있다. 또 공업기반기술로서 도출하고 있어 이 분야의 실용화는 짧은 시간내에 이룩될 것이라 생각한다.

이 글에서는 최근의 세계적인 소재 및 아몰퍼스 변압기의 기술개발 동향 및 전망에 대하여 언급하고자 한다.

2. 아몰퍼스 변압기 개발의 필요성

현재 아몰퍼스 합금은 미국 Allied사에서 개발되어 상품화되고 있으며 일본에서도 Pilot Plant 건설 등 상업화를 서두르고 있어 주요 특허가 해제되는 1993년경 부터는 본격적인 상업화가 이루어져 기존의 자성재료를 대체할 것으로 예상된다.

아몰퍼스 변압기로 기존의 규소강판 변압기를 대체할 경우 약 79%의 철손(80W → 17W)을 줄일 수 있으며, Hi-B 규소강판 변압기를 대체하면 약 50%의 철손(34W → 17W)을 줄일 수 있다.

아몰퍼스 변압기로 대체할 경우 예상되는 손실절감량은 1988년 기준 약 5억2천만kwh로 추정되며 이를 기름으로 전량 발전할 경우 석유 절감량은 85만 배럴로 추정된다.

변압기의 철손은 부하에 관계없이 계속 발생하는 손실인데 반하여 송전손실 및 변압기의 동손은 부하에 따라 변하는 손실이므로 철손 1watt당 손실평가액은 동손의 약 10배에 해당되는 3,100원/watt에 달한다.

따라서 송배전 손실율의 감소를 위하여 배전용 변압기를 고효율 변압기로 대체하는 것은 필연적이라 할수 있으며 아몰퍼스 변압기가 보급될 경우 가격은 기존 변압기보다 25% 정도 비쌀 것으로 추정되나, 변압기의 내용연수(15년) 동안 에너지 절약효과, 환경적인 효과, 추가 전력 생산에 필요한 발전소 및 송배전 계통의 비용증가등을 고려할 때 아몰퍼스 변압기에 들어가는 초기 투자액은 회수되고도 남을 것이다.

3. 아몰퍼스 변압기 제작기술

가. 제조공정

1) 설계

Amorphous Metal을 이용한 변압기가 기존 Si강판 변압기와 비교하여 무부하손이 약 1/3~1/4정도 이므로 우선 배전용 소형변압기에 Amorphous Metal을 적용하여 상당한 효과를 볼 수 있다. 그러나 이러한 이점을 실제 제품에 이용하는 데는 Amorphous Metal의 독특한 성질을 고려한 변압기 설계 방법이 강구되어야 한다.

즉, Amorphous Metal의 제조 특성상 두께가 얇을 뿐만 아니라 경도가 높아 기존 제작방법을 이용할 시 많은 문제점을 야기시킬 뿐만 아니라 충분한 특성을 발휘할 수가 없다.

먼저 Amorphous Metal의 적철심 변압기에의 적용에 대하여 검토하여 보면 Amorphous Metal의 얇은 두께는 적층시 core의 적층매수를 증가시켜 Core 성형 과정을 어렵게 하는 등 공정상에 많은 문제점이 생길 뿐만 아니라 Amorphous Metal의 높은 경도(11v : 900)로 인하여 Cutting이 어렵고 Cutting으로 인한 철손 증가현상은 피할 수 없게 된다.

현재 선진각국에서도 적철심 변압기 시작결과가 발표되고 있으나 가장 핵심기술은 Core Cutting에 따른 제반 문제점, 즉 Cutting으로 인한 철손증가, 공구의 수명등에 대하여 집중연구하고 있는 것으로 알려지고 있으며, 제조선인 미국의 Allied사는 적철심용 Amorphous core로써 "Power Core"라는 상품명으로 시판하고 있으므로 앞으로의 기대가 주목된다.

한편, 권철심 변압기의 적용에 대하여 살펴보면 Core의 Cutting이 없는 Non-Cutting Core 방식을 채택하여야 하나, Non-Cutting Type은 기존 Si강판 변압기 공정에서 제조공정상 경쟁력이 떨어지는 방식이라고 알려지는 것과 같이 Amorphous Metal 변압기에서도 제조공정상 문제점으로 대두되고 있다.

일부 선진 Maker에서도 Cutting Core 방식을 제작하였으나 Non-Cutting Type에 비하여 제반 특성이 떨어지고 재료의 Loss율이 상당히 높은 것이 문제점인 것으로 발표하였다. 그러므로, 현재의 재료특성상 및 제조기술 수준으로서는 Non-Cutting Type 방식이 절대적이나 Amorphous core 자체가 얇은 박판의 적층으로 이루어져 있으므로 Core 자체의 성형유지에 대하여 집중 연구가 필요하다.

즉, Amorphous Metal로 제작된 Core는 Core 성형유지를 위하여 Core에 Stress를 주지 않고 지지할

수 있는 보의 구조방식이 강구되어야 할 것이다.

변압기의 외형치수에 크게 관련있는 점적율에 대하여 살펴보면 Amorphous Metal은 순간적으로 주조상태에서 만들어질 뿐만 아니라 현재 상품화되어 있는 제조공법이 단 Roll법인 관계로 표면 조도가 $25 \pm 5 \mu m$ 정도로서 압연공정으로 제조되는 기존 Si 강판의 균일한 표면조도에 비하여 폭에 따라 두께변화가 심하고 표면조도가 높다.

그러므로 Amorphous Metal의 심한 두께변화, 표면조도, 얇은 성질이 조합되어 점적율에 영향을 미치고 있다. 즉, 기존 Si 강판의 점적율은 95% 이상인데 반하여 약 80%로써 훨씬 낮은 값을 가지고 있다.

결과적으로 Amorphous Metal을 이용하여 Core를 제작시 기존 Si 강판과 같은 정도의 유효 단면적을 얻기 위해서는 약 18% 증가된 단면적을 가져야 하므로 변압기의 외형치수가 커질 요소가 많아지며 점적율이 낮음으로 인하여 Core층간의 미끄럼 성질이 크게 되어 Core 전체를 지지할 수 있는 구조가 필요하게 된다.

다음은 열처리 공정에 대하여 살펴보면 기존 Si 강판의 경우 역시 권철심 형상의 변압기 제조 공정에서 받은 Stress를 제거하기 위하여 열처리를 하나 이때의 열처리 공정은 단지 제조공정중에 받은 응력을 제거시키기 위한 방법으로 행하여진다.

그러나, Amorphous Metal은 변압기 제조 공정상 받은 응력 뿐만 아니라 Metal 주조공정시에 받은 높은 잔류 응력을 가지고 있다. 이러한 이유로 Amorphous Metal의 변압기 제작 공정상 전혀 부가적인 응력을 받지 않았더라도 Amorphous Metal을 최상의 자기적 성질을 갖도록 하기 위해서는 열처리를 하여야 하나 자장중에서 열처리 하므로 제조공정상 많은 문제점이 되고 있다.

Amorphous Metal의 최적 열처리를 위한 온도-시간 상관관계는 매우 중요하며 변압기 특성을 좌우하는 요소이다. 열처리 온도는 가능한한 모든 응력을 제거시키기 위하여 될 수 있는 한 높아야 하나 이로 인한 Amorphous Metal의 결정화가 이루어져서는 안된다.

2) 제작방법

Amorphous 자성재료는 규소강판과는 성질이 다르기 때문에 변압기에 조립할 경우에도 몇 가지 특징이 있다. 아래 그 주된 점을 든다.

가) 철심형상

아몰퍼스 자성재료는 박대때문에 권철심이 적용되고 있다. 권철심의 형상에는 그림1과 같이 노컷 방식(No-Cut Type)과 트로이달 방식(Troidal Type)이 주된 방식이다. 아몰퍼스 변압기의 개발 당초에는 노컷 방식으로 제작되고 있지만 그후 다른 2가지

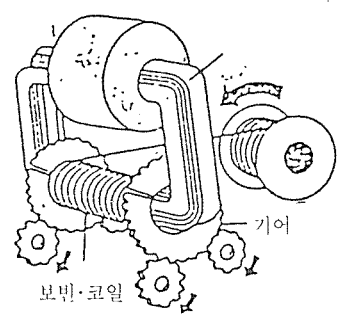
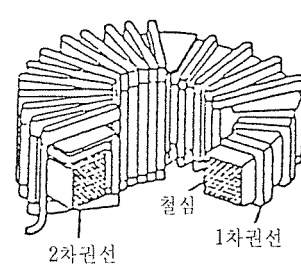
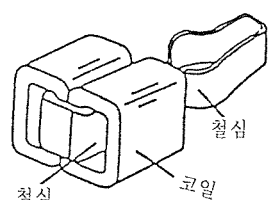
	노컷 방식	트로이달 방식	컷 방식
형상 및 조립법			
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 철심제작은 간단 · 권선기가 필요 · 대형 	<ul style="list-style-type: none"> · 자로 길이를 유효하게 사용 · 특성이 우수함 · 권선작업이 특수(특수 권선기 필요) 	<ul style="list-style-type: none"> · 양산에 적합하다 · 기존변압기 방식 · 1매마다 절단이 필요 · 소형

그림1 철심의 형상과 특징

방식이 사용되었다. 특히 컷방식(윈터 컷 방식)은 현재의 규소강판 변압기에서 사용되고 있는 방식이기 때문에 기존 제조 라인을 효과적으로 활용할 수 있는 이점이 크고, 더욱이 노컷방식에 비해 소형화, 저손실화가 가능하고 현재 한전기술연구원에서도 이 방식으로 설계를 하고 있다.

나) 변압기 구조

아몰퍼스 자성재료는 기계적 응력을 받으면 자기 특성이 저하되는 성질을 지닌다. 한 예로서 철심중량이 걸리는 구조로 되면 철손은 10%, 여자전류는 30%까지 증가되는 경우도 있다. 때문에 철심 자체의 중량이나 코일 중량이 철심에 걸리지 않게 되는 지지물이 필요하게 된다.

3) 변압기용 비정질 철심 재료

변압기 철심 재료로서 널리 사용되고 있는 규소강판은 오랜 연구결과로 좋은 소재가 대량 생산되고 있으며 세계적으로 연간 약 500만톤 이상이 생산되고 있다. 규소강판의 주 용도는 전력용 변압기, 주상 변압기, 전동기용 자심 등이다. 현재 사용되고 있는 고급 방향성 규소강판은 포화자속밀도가 20kg, 철손이 1w/kg정도이다. 그러나 에너지 절약차원에서 철손을 더욱 낮출 필요가 있으며, 이에 각광을 받고 있

는 것이 비정질 합금이다.

비정질 합금은 포화자속밀도가 대체로 16~17kg으로 규소강판보다 작지만 철손은 규소강판의 최소치보다 1/3~1/5정도로 아주 작은 특징이 있다. 1978년 G.E.사의 Luborsky는 Fe₈₀B₂₀비정질 합금이 1.5T, 60Hz의 조건에서 0.44W/Kg의 철손값을 지닌 것을 알아냈고 이를 근거로 미국 전체의 배전용 변압기를 이 재료로 대체할 경우 전력의 절약량은 그 당시 연간 2억\$에 달함을 보여주었다. 현재까지 개발된 비정질 합금중 변압기 철심으로 가장 적당한 것으로 알려진 Metglass 2605 SC와 2605S2의 자기적 특성을 방향성 규소강판과 비교하여 (표1)에 나타내었다.

이러한 철심재료의 개발과 동시에 비정질 박판 제조기술도 향상되어 일본과 미국에서 각각 100mm, 300mm의 폭까지 생산이 가능하게 되었고 제조단가가 1978년 300\$/kg이었던 것이 1983년에는 20\$/kg으로 되어 20μm두께의 방향성 규소강판 가격이었으나 최근 비정질 재료의 가격은 3~5\$/kg으로 기존 규소강판의 2배정도의 가격으로 생산 시판되고 있다.

(표1) 각종 철심재료의 특성 비교

구 분		Metglass 2605SC	Metglass 2605S2	방 향 성 규소강판
조 성 (%)		Fe ₈₁ B _{13.5} Si _{3.5} C ₂	Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉	Fe _{96.5} Si _{3.5}
자기 특성	포화 자속 밀도	1.61T	1.56T	2.03T
	철손(W/kg)	0.22	0.17	0.72
	여자VA(VA/kg)	0.30	0.18	0.28
	Curie온도(°C)	370	415	745
	밀도(g/cm ³)	7.32	7.18	7.65
점 적 율(%)		75	75	97
저 항(Ω-cm)		125 × 10 ⁻⁶	130 × 10 ⁻⁶	45 × 10 ⁻⁶
크기 (mm)	최대폭	150	150	1.000
	두께	<50E 10 ⁻³	50E 10 ⁻²	0.27~0.35

전력용 변압기 철심재료로서 비정질 합금을 사용하기 위해서는 현재 사용하고 있는 규소강판과 비교하여 충분한 장점이 있어야 한다. 규소강과 비교하

여 요구되는 조건들은 다음 사항들이다.

- 가) 자기특성의 측면
- (1) 포화자속밀도가 높을 것

- (2) 철손이 적을 것
 - (3) 투자율이 높고 여자전류가 작을 것
 - (4) 자왜가 적을 것
 - (5) 수명이 길고(약20년 이상) 자기적 열화가 적을 것
- 나) 재료 특성의 측면
- (1) 점적율이 클 것
 - (2) 연성이 있고 가공이 용이할 것
 - (3) 층간 절연성이 좋을 것
 - (4) 내식성이 크고 재료특성의 열화가 적을 것
 - (5) 물질의 신뢰도와 균일성이 좋을 것

이상의 사항들 이외에 공업적으로 가격이나 생산성이 문제가 되는 것은 말할 나위가 없다. 현재 비정질 합금이 규소강판보다 유리하다고 하는 점은 위의 가)의 (2), (3)항에 있고 특히 손실이 적다는 것이 최대의 장점이다. 그리고 결점으로는 낮은 자속밀도, 높은 자왜, 열적 안정성 등이 있다. 그러나 B_s가 낮은 결점은 에너지 사정에 의하여 점차 둔화되고 있으며, 규소강판에 있어서도 손실을 줄이기 위하여 동작자속밀도를 종래보다 낮추어서 설계하는 경우가 많은 실정이다. 높은 지왜에 의한 소음이 분쇄되었으나 실제 조업시 기존 규소강판과 거의 동일한 것으로 밝혀졌으며, 열적 안정성도 큰 문제가 없는 것으로 밝혀졌다.

그리고 이밖에도 결점이 있으나 비정질 합금이 주목되고 있는 것은 에너지 절약의 관점에서 유리하다고 판단되었기 때문이다. 그것은 철손의 경감이라는 점과 제조공정의 간략한 생산성등의 점이다.

비정질 합금의 낮은 철손 특성을 살리면서 배전용 변압기의 고효율화를 목표로 한 비정질 변압기의 개발동향을 살펴보면 아래와 같다.

1985년 이후 비정질 변압기의 개발이 가속화되어 현재 미국내에 약 2만대의 비정질 변압기가 사용되고 있으며 비정질 변압기의 제작기술도 개발되어 Cutting Core로 제작되고 있으며, GE., Westinghouse 사에는 비정질 변압기 자동생산라인을 설치 완료하였다.

변압기의 철손 중요성을 강조하여 철손이 낮은 변압기를 정량적으로 평가하는 제도를 철손평가 제도라 하며 그 정의는 다음과 같다. 즉 전력회사가 지불하는 Total Cost는 Initial cost(변압기 구입가격)에 무부하손(철손)과 평균 부하손을 가미한 것이며 손실 Cost는 변압기의 수명에 걸쳐서 누계한 것이다.

압기의 가격이 기존 변압기 가격 보다 20% 정도 비싼 가격으로 비정밀 변압기를 구입하여 사용하고 있다. 그러므로 비정질 변압기의 경우 철손이 매우 낮으므로 재료 Cost가 높아 변압기 가격이 높게 되어도 Total Cost는 떨어질 가능성이 있어 기존 규소강판 변압기에 대하여 경쟁력이 있다고 본다. 그러나 비정질 변압기의 기존 규소 강판 변압기에 대한 경쟁성 여부는 비정질 소재가격에 크게 좌우되며 이 분기점은 비정질 재료가격이 규소강판 가격의 약 2배라고 보아진다.

비정질 합금 생산기업인 Allied Signal Co.의 자료에 따르면 1991년 비정질 철심재료의 가격이 기존 규소강판의 1.5~2배 수준으로 될 것으로 예상된다. 현재 미국에서는 손실평가제가 도입되어 비정질 변

4. 결론

이 글은 최근 각광을 받고 있는 첨단재료의 하나인 아몰퍼스 코어 소재를 이용한 변압기에 대하여 우리나라를 포함한 각국의 개발동향과 보급전망에 대하여 언급한 것이다.

아몰퍼스 합금을 변압기용 철심재료로서 응용한 것은 겨우 10년밖에 되지 않았지만 그동안 기초와 응용 양면에서 활발한 연구개발이 진행되어 이제 새로운 변압기용 철심재료로 규소강판과 어깨를 나란히 하여 실용화될 전망이다.

현재 미국에서는 개발 진행속도가 매우 빨라서 약 25,000대의 배전용 아몰퍼스 코어 주상 변압기가 운전되고 있으며 앞으로 2,000만대까지는 가동될 것으로 추정되어 매년 100만대가 신설될 예정이다. 전 미국의 배전용 변압기 수량에 대해서는 미미한 숫자이지만 General Electric사를 비롯한 여러 메이커에서 차례로 양산체제를 갖추고 있어 앞으로 점차 보급이 늘어나게 될 것이다.

변압기의 철손 저감화는 새로운 자성재료가 출현될 때마다 획기적으로 진보되어 왔으나 신재료가 등장했다고 해서 바로 보급된 경우는 아직 없었다. 꾸준한 연구노력, 국가적인 정책지원 및 업체의 개발의지가 조화를 이루었을 때 비로소 좋은 결실을 맺을 수 있으며 끝으로 이 글이 본 분야에 관심을 가진 분들에게 많은 도움이 되기를 바라마지 않는다.