

# 비정질 철심 변압기의 개발 동향

o조익춘 홍기돈 하영식 노철용  
효성중공업 주식회사

The development trends in amorphous core transformer

I.C.Cho K.D.Hong Y.S.Ha C.W.Noh  
Hyosung Industries Co., Ltd.

- Abstract -

The need for more efficient transformer core material, due to increased recognition by the loss reduction of electric utilities, has spurred the development of amorphous metal usage in transformer. The loss of amorphous core is one third to one fourth that of silicon steel at equivalent inductions 15KG and below. Thus, the substitution of amorphous metal for conventional silicon steel in a transformer core can reduce core loss by 75%.

This paper describes the development trend, the manufacturing processes of amorphous core transformer and the characteristics of amorphous core transformer in comparison with those of silicon core transformer.

## 1. 서론

산업 전반에 걸쳐 저손실, 고효율 기기에 대한 수요자의 요구가 점점증하고 있는 가운데, 전력 수송설비의 고효율화 방안의 하나로써 변압기의 저손실화를 고려할수 있다. 특히 변압기 손실 중 무부하손(철손)은 부하의 유무와 관계없이 항상 발생하는 손실이어서 이의 저감화가 강하게 요구되는데, 비정질 금속의 등장으로 이러한 수요자의 요구에 부응할 수 있게 되었다.

비정질변압기란 변압기 철심으로 비정질금속을 사용한 변압기로서, 이 변압기는 기존의 규소강판 철심형 변압기에 비해 철손을 1/3 ~ 1/4 수준으로 낮출 수 있다. 효성중공업에서는 이와 같은 비정질변압기의 저손실 특성에 주목, 1984년 한전과 공동으로 비정질변압기 개발에 착수하여 1986년 시제품 개발을 완료하였으며, 이후 1990년에는 18대의 비정질변압기를 선로실증시험용으로 한전에 납품하기도 하였다.

여기서는 비정질금속의 특징 및 비정질변압기의 주요 제작공정과 비정질변압기와 규소강판변압기간의 특성비교 결과등을 서술하고자 한다.

## 2. 국내의 개발 동향

1973년 미국의 Allied Signal사에서 비정질 합금을 개발한 이래, 변압기 제작사로서는 처음 이 금속을 변압기 철심에 응용한 미국의 G.E사는 1981년 시제품을 개발하여 현재는 1Φ 100KVA, 3Φ 750KVA 비정질 변압기까지 상품화를 완료하였다. 일본에서는 DATHEIN사가 1981년 ALLIED SIGNAL사의 기술지원을 받아 비정질변압기 시제품을 개발한 이후, 1990년 TAKAOKA사에서는 월 500대 생산규모의 양산설비를 구축했다. 현재 미국과 일본에는 상기 업체들을 위시한 10여개의 정도의 비정질변압기 제작사가 있다.

국내에서는 효성중공업이 1984년 부터 한전의 위탁 연구과제로서 주상용 비정질 변압기 개발에 착수, 1986년 시제품 개발에 성공하였다. (개발품 : 1Φ 20KVA 12600/460-230V, 6대)  
이때 개발한 철심은 Non-Cutting 방식 이었으나, 변압기의 소형, 경량화를 위하여는 Cutting 방식의 철심이 요구되는 바, 1989년에는 Cutting 철심방식의 주상용 비정질변압기 개발에 착수, 성공하였다. (개발품 : 1Φ 50KVA 12600/460-230V 1대).

이후 효성중공업은 한전에 선로 실증시험용으로 Cutting 철심방식의 20KVA, 30KVA, 50KVA 비정질 변압기 총 18대를 납품하였고, 이들 변압기는 현재까지 이상없이 시운전중에 있다.

아직 국내에는 효성중공업 외에 비정질 변압기 개발 경험을 가진 회사가 없으나, 1991년 부터 이천전기, 삼정전기, 범한전연 등에서 개발을 추진중에 있다.

## 3. 비정질금속의 특징

### (1) 비정질 금속 (Amorphous Metal)

액체를 원자가 재배열할 시간이 없을 정도로 초급냉시림에 따라 내부평형을 유지하지 못하고 동결된 상태를 비정질 상태라 말하며, 이러한 상태를 갖는 금속을 비정질금속이라 한다. 그림 1과 2는 결정질 상태와 비정질 상태의 원자배열 및 위치에너지 분포를 보여주는 개념도이다. 이러한 비정질금속은 무질서한 원자배열 구조에 따라 結晶磁氣異方性이 없고 자벽의 이동을 방해하는 結晶粒系가 없으

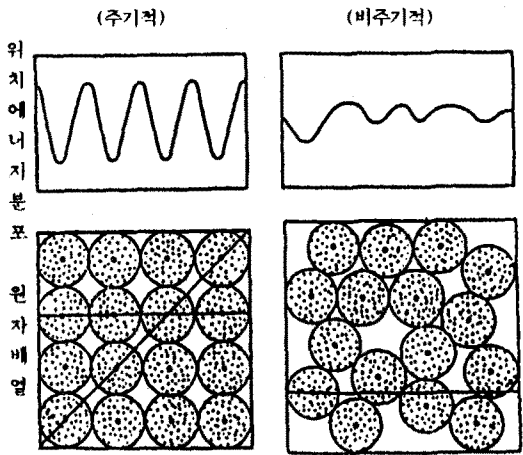


그림 1. 결정질 구조                      그림 2. 비정질 구조

므로 철심재료로 사용시 히스테리시스 손실이 감소하게 된다. 변압기 철심으로 사용하는 비정질 금속은 80%의 전이금속과 그 밖에 유리를 구성하는 성분으로 조성되는데, 현재 가장 널리 사용되는 것은 ALLIED SIGNAL사의 METGLAS 2605S-2로서 이것은  $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 의 조성으로 이루어 진다.

(2) 비정질금속의 변압기에의 응용

표 1은 비정질금속과 방향성 규소강판의 재료특성을 보여주고 있다. 비정질금속을 변압기 철심재료로 사용하는 이유는 비정질 금속이 낮은 철손특성을 갖기 때문이지만 (비정질금속은 히스테리시스 손실이 적고, 얇은 두께, 높은 전기저항 때문에 와전류손이 감소함), 한편으로 이러한 좋은 특성을 얻기 위해서는 변압기 제작시 여러 문제점들이 해결되어야 함을 알 수 있다.

표 1. 비정질 금속과 방향성 규소강판의 특성 비교, 검토

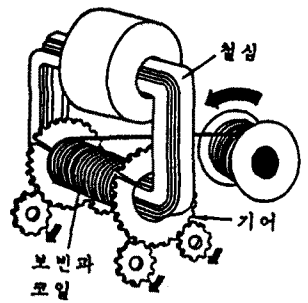
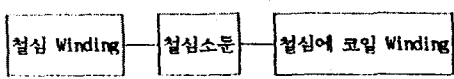
특성 구분	규소강판 (Z-6H)	비정질금속 (2605S-2)	비정질철심의 특성 검토	
전기자기적 특성	철손 [W/kg] at 1.4T/60Hz	0.90	0.21	규소강판에 비해 철손은 1/4, 여자전류류는 1/3 정도임. ⇒ 우수한 철심재료
	여자특성 [VA/Kg] at 1.4T/60Hz	0.94	0.37	
특성	포화자속밀도 [T] at 25°C	2.03	1.55	포화 자속밀도가 낮아 철심 크기가 증가.
	at 100°C	2.03	1.49	
물리	고유저항 [ $\mu\Omega \cdot cm$ ]	45	130	고유저항이 크고, 두께가 얇아 와전류손이 감소.
	두께 [mm]	300	30	
기계적	접착율 [%]	97	80 ~ 90	크기 증가 요인
	결정화온도 [°C]	-	550	
특성	Curie Point [°C]	746	414	결정화온도가 낮은 만큼 재료 가공시 온도상승에 주의.
	경도 [HV]	210	900	
압력	위성	-	크다	부스러짐에 주의
	응력 감수성	-	크다	
열처리 조건	온도 [°C]	780~820	400	열처리 온도 범위가 좁으므로 열처리시 온도분포가 고를 것
	열처리시간 [h]	2	2	
분위기	자장조건 [Oe]	-	10	자장중의 열처리
	분위기 가스	$N_2$	$N_2$	

4. 제작공정

변압기 철심은 그 제작방법에 따라 권철심형 (Wound Core Type)과 적철심형 (Stacked Core Type)으로 나뉘어지는데, 일반적으로 권철심형은 소용량 배전변압기 및 주상변압기에, 적철심형은 대용량 배전변압기 및 전력용 변압기에 적용된다. 비정질 철심 변압기에 있어 현재 주상용 비정질 변압기는 세계적으로 권철심형을 채용하고 있고 배전용 비정질 변압기도 권철심형으로 제작하는 추세에 있으므로 여기서는 권철심형 비정질 변압기에 대해서만 기술한다.

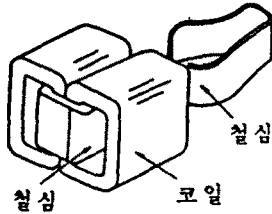
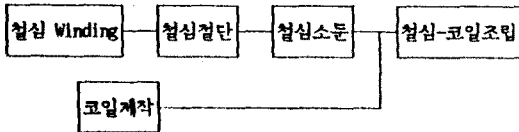
(적철심용 소재인 적층 비정질금속(amorphous metal lamination)은 권철심용 소재인 비정질 리본에 비해 보다 취성이 크고 Handling이 곤란하며 가격도 비싸다)

비정질 권철심의 구조는 절단부 없는 철심에 직접 코일을 권선하는 Non-Cut철심과, 1매 마다 절단부가 있는 철심을 제작하여 별도 공정에서 제작된 코일과 조립하는 One turn-Cut 철심으로 구별되는데, 그림 3의 방식이 Non-Cut 철심이고, 그림 4의 방식이 One turn-Cut 철심이다.



(보빈을 기어로 구동시켜 코일을 감는다.)

그림 3. Non-Cut 철심의 코일 Winding



(소둔 후의 One turn-Cut 철심을 코일에 차례로 끼운다)

그림 4. Cut-Core 방식의 철심-코일 조립

Non-Cut 방식은 비정질 변압기 초기 개발시 여러 회사에서 시제품 변압기에 많이 채용한 방식으로서 철심을 구형으로 감아서 소둔 후, 그림 3에서와 같이 철심 각 (Leg)에 분할 가능한 보빈을 설치하여 이것을 구동기어로 회전시켜 코일을 감는다. 이 방식은 철심 절단부가 없어 철손 특성은 우수하나, 코일을 감기 위한 전용 권선기가 필요하며 Space Factor가 낮아 변압기 전체 크기가 커지게 된다.

One turn-Cut 철심 방식은 현행의 배전용 변압기에 널리 채용되는 방식으로서 대량 생산에 적합하고, Non-Cut 철심 방식에 비해 소형, 경량화가 가능하다. 다만 소둔 후에는 철심의 취성이 보다 커져 철심 - 코일 조립시 철심이 파손되기 쉬우나 최근에는 재료특성의 개선에 의해 열화의 영향도 많이 경감되었다.

5. 주요 제작 기술

Non-Cut 철심 방식은 대량 생산 및 변압기의 소형, 경량화에 부적합하여 여기서는 One turn-cut 철심에 대해서만 서술하기로 한다.

비정질 변압기의 제작 공정은 규소강판 변압기의 제작 공정보다 크게 다를 바 없는데, 다만 철심재료로 규소강판 대신 비정질 금속을 사용하는 만큼 Core Winding, Cutting, Annealing 등에 있어 재질특성에 적합한 기술이 필요하며, 또한 비정질 금속은 압축응력을 받으면 철손이 증가하므로 조립시 응력을 받지 않는 구조로 해야 한다. 당사의 비정질 변압기 개발경험에 근거한 제작 공정별 주요 내용은 표 2와 같다.

6. 비정질 변압기와 규소강판 변압기의 비교

효율중공업이 지금까지 개발한 비정질 변압기는 미국 및 일본에서 지금까지 개발된 변압기에 비해 결코 뒤지지 않는 손실특성을 보여 주었는데, 이들 변압기 중 20KVA급의 중요 데이터를 비교하면 표 3과 같다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 비정질 철심의 낮은 철손특성에 힘입어 비정질 변압기의 철손은 규소강판 변압기의 1/4 수준 이하이다.

표 2. 비정질 철심 변압기 제작 기술

제작 공정	주요 기술
Core Winding	1. 적정 Tension 유지 2. 최적 Winding Speed 선정 및 Winding Speed Control 3. 다수의 Core Mandrel 구동으로 작업능률 향상
Core Cutting	1. 경도가 높은 비정질 금속(Hv=900)을 절단할 수 있는 기술이 필요 2. 절단후 초기형태 유지 ⇒ Jig 사용 3. Step당 절단 매수 선정 및 Step 형성법 결정
Core Annealing	1. 자장중의 열처리를 위한 자장인가법 및 인가자장의 세기 결정 2. 적정 Heat cycle 선정
철심-코일 조립	1. 철심이 압축응력을 받으면 철손 증가 ⇒ 압축 응력을 최소화 할 수 있는 철심지지 구조 채택

표 3. 비정질 변압기와 규소강판 변압기의 비교

구 분	규소강판 변압기	비정질 변압기 (Non-cut 철심 방식)	비정질 변압기 (Cut 철심 방식)
철심 재료	G-10	METGALS 2605 S-2	METGLAS 2605 S-2
자속밀도[T]	1.3	1.3	1.3
무부하손[W]	59	16	19
부하손[W]	358	358	358

\* 변압기 정격 : 1Φ, 20KVA, 12600/450-230V, 60Hz

7. 경제성 검토

변압기의 손실 중요성을 강조하기 위하여 변압기의 손실을 금액으로 환산, 평가하여 변압기 구입시 소요되는 총 비용을 변압기 구입가격과 손실으로 인해 발생하는 비용의 합으로 보는 제도를 손실 평가제도라 하는데, 미국에서는 이를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$TC = P + (A \times N_L) + (B \times L_L)$$

TC : 구입변압기에 지불되는 총비용 (\$)

P : 변압기 구입가 (\$)

A : 무부하손의 가치 환산 계수 (\$/W)

N<sub>L</sub> : 무부하손 (W)

B : 부하손의 가치 환산 계수 (\$/W)

L<sub>L</sub> : 부하손 (W)

일반적으로 무부하손은 항상 발생하는 손실이기 때문에 상기 식에서 A는 B보다 높게 산정한다. 이와 같이 상기 식을 적용할 경우 비정질 변압기는 무부하손이 매우 낮아 변압기 가격이 다소 높더라도 TC는 떨어질 수 있어 기존의 규소강판 변압기에 대하여 경쟁력을 가질 수 있게 된다.

## 8. 결 론

전 세계적으로 에너지 절감형 기기에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 출현한 비정질 변압기는 이미 실용상 충분한 성능을 가지고 있다고 말할 수 있으며, 아직 수년의 운전 경험 밖에는 없지만, 가속 열화 시험 등을 통해 장기 신뢰성 면에서도 문제가 없다는 연구 결과가 나오고 있다.

다만 문제가 되는 것은 비정질 철심의 가격이 높아 아직 충분한 가격 경쟁력을 갖추지 못한 점이지만, 이 문제도 조만간 가격 경쟁력을 가질 수 있는 가격(규소강판의 2배 가격)까지 낮아질 것으로 전망됨에 따라 그 해결은 시간 문제인 것으로 보인다.

이미 일본 및 미국에서는 비정질 변압기의 상용화가 이루어져 있음을 볼 때, 국내에서도 곧 비정질 변압기 수요가 있게 되리라 예상된다. 이를 감안하여 호성중공업은 지금까지의 개발 경험을 바탕으로 향후 배전급의 대용량 비정질 변압기를 개발하는 한편 주상급 비정질 변압기의 양산화 공정도 확립하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Mahesh P. Sempat, Larry A. Lowdermilk, "Amorphous Metal Distribution Transformer Technology Development at General Electric Co., U.S.A.", Indian Transformer Manufacturers Association, Nov. 25 - 26, 1988
- [2] Takahiro Kawasaki, Tatsuo Ito, Takeshi Yagisawa, Kazuo Yamada, "아몰프러스 鐵心 變壓器", 東芝 Review, Vol.41, No.2 1986
- [3] Harry W. Ng, Ryusuke Hasegawa, Albert C. Lee, Larry A. Lowdermilk, "Amorphous Alloy Core Distribution Transformers", PROCEEDINGS OF THE IEEE, Vol. 79, No. 11, Nov. 1991
- [4] Peter A. Manos, "The Progress of Amorphous Core Transformers in the Utility Industry", IEEE/PES T & D Conference, Sep. 25, 1991
- [5] Allied Signal Publication, "Moving to Metglas", Vol. 3, No.2, Fall, 1991
- [6] 深川裕正, 佐藤正彦, "Amorphous 지성 재료의 전력용 변압기에의 응용", 전기기술, 1990년 3월호
- [7] 金潤東 外, "아몰퍼스 코어를 이용한 저손실형 변압기 개발 유도 최종 보고서", 한국전력공사 기술연구원, 1986