

경량화 변압기 개발

김종옥, 윤자홍, 김세창, 서영우, 송기동*, 오연호*,
현대중공업 (주), 한국전기연구소*

The Development of Light Weight Transformer

J.O.KIM, J.H.YOON, S.C.KIM, Y.W.SEO, K.D.SONG*, Y.H.OH*,
HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD, KOREA ELECTROTECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE*,

Abstract

This paper describes a study for the development of light weight transformer with hybrid insulation system consists of A class insulation material and H class insulation material.

1. 서 론

1) 기술개발 배경

20세기에 들어서 전력의 소모는 급증하고 있으나 전력 예비율은 극히 낮은 실정이고 이로 인하여 전력사고가 많이 발생하게 되었다. 이는 셀룰로스와 광유를 사용하는 종래 절연방식의 열적, 기계적, 전기적 특성에서 많은 제약이 있기 때문이다. 최근 10여년 동안 이러한 단점을 극복하기 위해 새로운 절연방식을 도입한 유입변압기 개발이 연구되어져 왔다.

이 새로운 방식이 온도상승이 높은 부분을 셀룰로스 대신 아라미이드 계열을 사용한 복합절연방식인데 현재 IEEE에서도 규격이 거의 확정된 상태이며 세계적인 추세도 종래의 셀룰로스를 사용한 지절연방식에서 복합절연방식으로 변경되는 추세이다.

이러한 고체 고온절연물(아라미이드 계열)을 이용하여, 오늘날 전력용 변압기는 점차적으로 소형, 경량화 되어가고 있는 추세이며, 근래 세계시장에서도 부피가 크고 무거운 제품은 점점 고객의 외면으로 그 경쟁력을 잃어가고 있는 실정이다. 더군다나 최근 국내에서도 육로 수송중량의 최대허용치를 40톤으로 제한하므로써 기존의 25MVA 용량 이상의 변압기는 더 이상 육로수송이 어렵게 되었다.

이와같은 변압기의 중량과 부피에 관한 문제 뿐만이 아니라 고온절연물을 사용하여 제작된 변압기의 경우, 절연물의 내열성이 우수하고 기계적 특성이 향상되어 절연물의 열화 기간이 증가하므로 변압기의 사용 수명이 기존 변압기에 비해 크게 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 변압기 구매자들은 이 경량화변압기를 구매할 경우, 장기적으로는 변압기를 구매하는데 소요되는 설비 투자비를 대폭적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이 외에도 변압기의 무게를 경량화하고 부피 치수가 감소되므로 운송비가 절감되는 효과도 뒤따른다.

이와같은 이유 등으로 고온 복합절연을 이용한 경량화 변압기의 개발은 현시점에서 필수적으로 요구되고 있다고 할 수 있겠다.

2) 개발품 사양

본 개발 변압기의 사양은 다음과 같다.

항 목		사 양
상수 및 주파수		3φ 60Hz
정격용량(1차, 2차)		60 MVA
정격전압(1차, 2차)		154kV / 23kV
탭 전 압(1차)		154kV ± 12.5%
백분율 임피던스(1-2차)		30 %(at 60MVA)
온도상승	권 선	95 K 이하
	오 일	65 K 이하
냉 각 방 식		강제송유 풍냉식(ODAF)
충격전압 절연강도 (BIL)	1차	650 KV
	1차 중성점	350 KV
	2차, 중성점	150 KV
	3차	60 KV
상용주파 내전압	1차	275 KV
	1차 중성점	140 KV
	2차, 중성점	50 KV
	3차	22 KV

< 표 1. 개발변압기 사양 >

2. 본 론

1) 철 심

변압기 철심은 자기회로를 구성하는 변압기의 핵심적인 요소 중의 하나로 자속의 흐름을 양호하게 하기 위하여 입자의 결정구조가 압연방향으로 배열된 투자율이 높고, 히스테리시스 손실(Hysteresis Loss)이 적은 방향성 규소강판을 사용하여 권선을 지지하기에 충분한 기계적 강도를 갖도록 제작된다.

또한 경년변화가 없는 고투자율의 고급 방향성 규소강판을 사용하여 무부하 전류 및 손실을 줄이기 위한 정밀 절단 방법으로 가공하여 운전시 진동, 소음을 최소한으로 줄이도록 설계되었다.

경량화변압기의 가장 큰 개발 목적이 이름 그대로 전체 중량을 최소화 하는데 있는 것이므로, 본 개발변압기 철심의 자속밀도를 결정하는데 있어서도 가장 긴밀히 고려된 점은 철심의 물량을 얼마나 적게 투입할 수 있으나 하는 부분이었다.

두께	0.3 mm
밀도	7.65 kg/cm ³
체적고유저항	47 $\mu\Omega$ ~cm
포화자속밀도	20,300 gauss
점적율	94% 이상

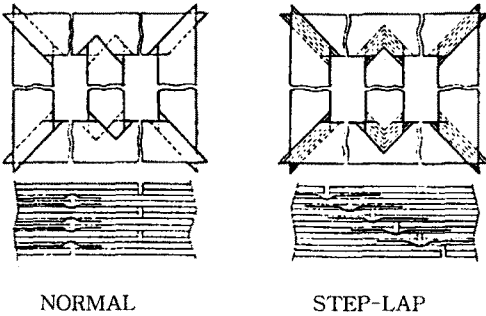
< 표 2. 철심의 물리적 특성 >

철심의 물량을 줄이기 위해서 자속밀도를 110% 여자시 1.95 Tesla가 넘지 않는 범위 내에서 최대한으로 높게 설계하였고 그로 인해 상승되는 철심의 온도는 냉각 덕트를 적절히 배치하여 해결할 수 있었다.

또한 높은 자속밀도로 인해 야기되는 높은 소음치는 철심을 Step-Lap Joint 방식으로 적층하므로 해서 극복할 수 있었다.

Step-Lap Joint 방식이란 철심의 자재인 규소강판을 Computer-Controlled Cutting Machine을 이용하여 그 크기를 일정한 차이가 나도록 절단한 후 6단으로 교차하여 적층하는 방식으로 소음뿐만 아니라 무부하 손실과 무부하 전류 또한 극소화 할 수 있다.

[그림 1]에서 Normal Joint 방식과 Step-Lap Joint 방식을 비교해서 나타내어 보았다.



[그림 1]

그림에서 보듯이 규소강판의 이음새 부분에서 1단씩 서로 교차하며 적층하는 일반 방식과 달리 Step-Lap 적층방식은 6단으로 조금씩 일렬로 엇갈리게 배치하여 교차시키는 방식으로서 철심의 이음새 부분의 Gap때문에 발생하는 Flux의 손실을 감소시킴으로써 무부하 손실 및 소음을 줄일 수 있다.

하지만 이방식은 공수가 많이 소모되는 단점이 있기도 하다.

본 개발변압기 철심의 설계 특성치는 다음과 같다.

- 철심구조 : 3상 3각 구조
- 철심규격 : 30G140
- 적층방식 : STEP-LAP LAMINATION
- 자속밀도 : 17,600 Gauss
- 철심온도상승 : 17.3K

2) 권선

본 경량화변압기의 권선은도상승 제한치는 95K로서, 일반 변압기의 65K에 비해 30K가 높은 고온변압기이다. 따라서 일반 변압기에서는 전류밀도를 3.0 ~ 3.5A/mm² 정도의 범위에서 설계하지만, 본 경량화변압기는 전류밀도를 5.3 ~ 5.4A/mm² 정도로 높게 설계하여 투입되는 동량을 줄이고자 했다.

그러나 그에따라 높아지는 권선온도값을 감안하여 그에 적합한, 열적 특성이 뛰어난 고온절연물이 사용되어야 하는데 본 개발변압기에서는 H종절연물인 ARAMID계열의 절연물을 사용하였다.

다음 <표3>에서 일반 A종 절연물과 H종인 ARAMID계열 절연물의 몇가지 특성을 비교하였다

항목	A종 절연물	H종 절연물 (ARAMID계열)
연속사용 허용온도	105 ℃	180 ℃
밀도 (g/cm ²)	0.6 ~ 0.85	0.7 ~ 1.2
비유전율	3.2	3.2 ~ 3.4
수축율	4 ~ 6 %	0.5% 이하
절연특성 (%)	내전압	100
	충격전압	100
		120 ~ 125

< 표 3. 절연물 특성 비교 >

<표 3>에서 알 수 있듯이, H종 고온 절연물이 열적, 기계적 특성에 있어 모두 우수함을 알 수 있다.

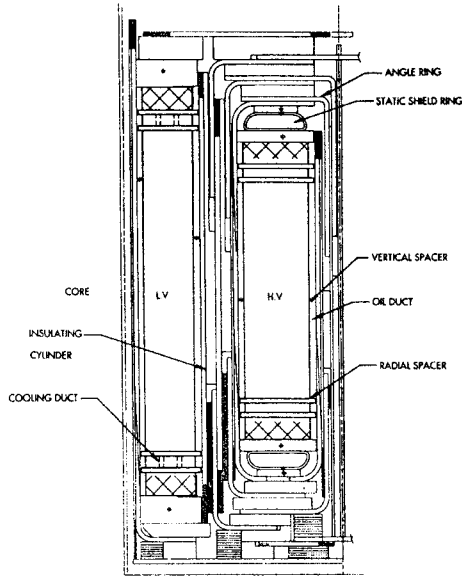
그러나 H종 절연물의 가격이 일반 A종 절연물에 비해 약 30배나 비싼 현실이므로 변압기 내에 들어가는 모든 절연물을 H종으로 사용하기에는 경제적 측면에서 바람직하지 못하다.

그러므로 권선 절연물, 스페이서, 냉각덕트 등과같이 권선에 직접 접촉하거나 권선주위에 있으므로서 열적상승이 수반되는 부분은 H종 고온 절연물인 ARAMID계열 절연물을 사용하였고 권선에 인접하지 않고 주로 절연유의 온도에 의해서만 열화되는 부분의 절연물은 일반 A종 절연물을 사용한 Hybrid 절연 System을 적용하였다.

[그림2]에서 *표시가 되어 있는 부분이 ARAMID계열 절연물을 사용한 부분이며 나머지 부분은 일반 A종 절연물을 사용했다.

이와 같은 Hybrid 절연방식은 이미 세계시장에서 실용화 되어 경량화변압기 뿐만 아니라 변압기 수리와 용량 Up-grade를 위하여 적용하고 있으며, 국제 규격인 IEEE에서도 고온절연물에 관한 임시규격으로 나와있으며 곧 정식 규격화(High Temperature Insulation for Liquid-Immersed Power Transformers) 하기 위하여 준비중에 있다.

다음 <그림>은 Hybrid 절연 System을 보여주는 권선 구조도이다.



[그림 2]

3) 냉각설계

본 변압기의 유온도상승 제한치는 일반변압기와 동일한 수준인 65K이다. 그러나 권선온도상승 제한치는 30K 만큼이나 차이가 생기므로 냉각설계에 있어 충분한 검토가 이루어져야 했다.

본 개발변압기의 냉각방식은 ODAF 방식으로 하여 Radiator방식에 비해 작은 부피로 큰 냉각효과를 얻고자 했으며, 또한 냉각기의 상하부의 유온차는 6.5K를 유지할 수 있도록 Pump의 양정을 적절히 선정하였다.

Cooler는 요구 냉각용량을 충분히 만족시키는 조건하에서 중량을 최소화 할 수 있도록 냉각표면의 형상을 적절히 설계하였으며 기계적 강도도 충분히 고려되어 설계, 제작되었다.

4) 탱크

철심과 권선의 무게는 고온 절연물의 사용으로 많은 물량을 줄일 수 있었으며 탱크는 Steel Plate의 두께를 줄이므로 해서 중량을 줄일 수 있었다. 그러나 그에 따른 인장강도의 약화는 일반적으로 사용되는 'SS400'보다 인장강도가 뛰어난 'SWS490C'를 사용함으로써 해서 보상할 수 있었다.

본 경량화변압기의 탱크는 가장 가혹한 조건의 단락사고시 내부에서 발생할 수 있는 압력을 5kg/cm²으로 가정하고 그 압력까지 견딜 수 있도록 강도보강형으로 제작되었다.

<표 4>에서 두종류 Steel에 관해 간단히 비교하였다.

종류	재질	Yield Strength (kg/mm ²)	인장강도 (kg/mm ²)
SWS490C	Steel	32.4	49
SS400	Steel	25	41

<표 4. Steel 비교표>

탱크의 무게를 줄이기 위하여 내압강도 허용범위 내에서 탱크 Steel Plate의 두께를 일반적인 경우에 비해 부분별로 2 ~ 4t정도 작게 설계, 제작하였다.

설계 후 이에대한 내압강도 허용여부를 ANSYS 프로그램을 사용하여 해석한 결과 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

[그림 3]은 사고시 내부압력이 5.0kg/cm²라고 설정한 상태에서 변압기 외함에 발생하는 응력분포를 해석한 결과를 보여준다.

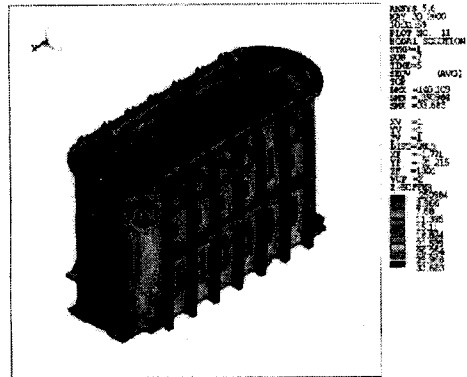


그림 3 Stress distribution (Pressure : 5.0 kg/cm²)

[그림3. Stress Distribution(5.0kg/cm²)]

[그림3]에서 각 부분의 Stress 분포를 확인할 수 있다.

최대 응력은 Tank Wall의 Stiffener에서 발생하였으며 그 값은 33.683 kg/mm²으로 계산되었다. 그 다음으로 높은 응력분포를 가지는 부분이 Tank Wall인데 이곳의 응력은 32.8 kg/mm²으로 나타났다.

그 외에 비교적 높은 응력분포를 보이는 부분은 Cover, Bottom, Manhole 등과 Tank Wall 간의 용접부임을 알 수 있다.

최대 응력치가 33.683 kg/mm²이고 SWS490C의 인장강도가 49 kg/mm²이므로 일반적인 경우에 비해 2 ~ 4t 적은 Steel Plate를 사용했어도 탱크의 내압강도가 충분하도록 설계되었다고 볼 수 있겠다.

또한 탱크의 양측면을 원형으로 제작하므로 해서 응력분포를 분산시키고 전체의 부피도 감소시키는 효과를 가져왔다

4) 중량 및 부피

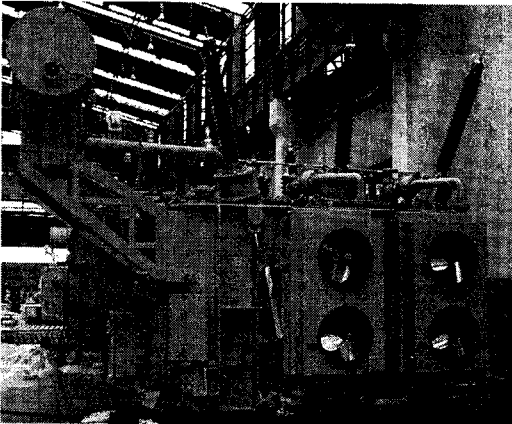
다음 표에서 본 경량화 개발변압기와 당사에서 96년도에 한전/양지변전소에 납품한 동일사양 변압기와의 중량 및 몇가지 면에서 간단한 비교를 해 보았다.

기존 변압기의 중량, 부피, 손실 등을 100으로 설정했을 때 본 경량화 개발변압기의 각 비교치는 <표5>와 같다.

항 목		일반 변압기 (3상 60MVA)	경량화변압기 (3상 60MVA)
Temp. Rise (Oil/Winding)		55/65	65/95
탱 크	Length	100	77
	Width	100	92
	Height	100	93
운송치수	Length	100	71
	Width	100	88
	Height	100	92
총 손 실		100	220
Core&Coil 중량		100	59
운송중량		100	63
총 중 량		100	67

<표 5. 중량 및 부피비교>

<표 5>에서 볼 수 있듯이 중량과 부피는 기존의 변압기에 비해 상당히 소형, 경량화 되었다고 할 수 있으나, 총손실값이 2배이상 증가되는 단점이 있음을 알 수 있다.



<그림 4. 개발변압기 정면모습>

5) 개발효과

항 목	기존변압기 (1상 20MVA×3)	경량화개발변압기 (3상 60MVA)
제 작 비	100	120
설 치 비	100	60
운 반 비	100	80
건 축 비	100	86
유 지보수비	100	33
사고발생빈도	100	33
생산성향상	100	300
변압기 수명	100	53700

☞ 변압기 수명계산은 IEEE 1276-1997 참조

<표 6. 개발효과 측면 비교>

3. 결 론

복합절연방식을 적용하여 고온으로 설계, 제작한 경량화 변압기의 총중량을 기존 동급 용량 변압기의 총중량에 비하여 67%까지 현저히 낮추는 성과를 올렸다.

또한 수송, 운전, 보수유지 측면에서의 비용을 크게 절감하는 효과도 가져왔다.

그러나 중량을 줄이는 대신 손실치가 2.2배로 높아져 동손을 낮출 수 있는 방안을 마련키 위한 연구개발이 계속적으로 수행되어야 할 것으로 생각된다.

또한 향후 풀어야 할 과제중의 하나는 OIL의 온도상승 제한치를 더욱 높여 냉각용량을 줄여야 할 필요가 있다. 그러나 현재 사용하고 있는 일반 광유는 120℃ 부근에서 산가가 급격히 증가하므로 온도를 더이상 높이기 곤란한 실정이다.

그러므로 고온에서도 물성의 변화가 적고 발화점이 높은 난연성 절연유를 사용하는 방안이 추진되어야 할 것이며 그러기 위해서는 난연성 절연유의 여러가지 냉각특성을 연구해 나갈 필요가 있겠다.

References

1. IEEE 1276, "IEEE Trial-Use Guide for the Application of High-Temperature Insulation Materials in Liquid-Immersed Power Transformers" (1997)
2. K.Karsai D et al., "Large Power Transformers" Oxford N.Y., (1987)
3. Norris E.T., "Thermal rating of transformers - Application of the multiflow principle to naturally cooled transformers" (1971, pp.1625-1629)
4. IEC 354, "Loading guide for oil-immersed power transformers" Draft 14(Centual Office)71-I (1987)