전력용 변압기 철심소음 저감기술에 관한 연구

論 文
57-11-11

A Study on the Core Noise Reduction Techniques of Power Transformers

權 東 震* · 具 敎 善† · 趙 翼 春** · 金 唯 賢*** · 金 隆 植§
(Dong-Jin Kweon · Kyo-Sun Koo · Ik-Choon Cho · Yoo-Hyun Kim · Yung-Sig Kim)

Abstract – According to the increase of power demand and expansion of downtown, it is necessary to install transformers additionally in operating substations and construct substations in residential area. But the public complaint is increased due to the transformer noise of the substation. KEPCO has used a vibration preventing pad, various soundproof walls and an encloser to transformers in outdoor substations, and a soundproof door, shutter and wind-path soundproof equipment in indoor substations to block the sound propagation of the transformers. But these noise reduction methods are not satisfied. It should be considered to reduce transformer noise itself. In this paper, we investigated core noise reduction techniques to develope a low noise transformer. The techniques to reduce core noise of the transformer are application of high permeability grain oriented silicon sheets, decrease of magnetic flux density of core, application of 6step-lap core stacking method, improvement of core binding method(binding addition, band fixing) and application of rubber damper in oder to reduce transmission of core vibration, etc.

Key Words : Transformer, Core, Noise, Vibration, Step lap

1. 서 론

지구 온난화와 이상기후 등 환경영향이 전 세계에 걸쳐 파급되면서 환경보전에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이러한 시대적 상황을 배경으로 전력설비 또한 친환경화를 요구받고 있다. 전력수요의 증가와 도심지역의 확대로 도심지의 기존 변전소에 변압기를 증설하거나, 주거지역에 새로운 변전소의 건설이 필요하다. 그러나 도심지 변전소는 변압기의 소음에 대한 불만이 증가하고 있어 원활한 변전소 건설과 전력공급에 많은 문제점을 제기하고 있다.[1-2]

지금까지 변압기의 소음민원에 따라 운전중인 변압기를 대상으로 옥외 변전소의 경우에는 방진패드 설치, 방음벽(일반 방음벽, 흡음형 방음벽, 공명형 방음벽, 투명 방음벽) 설치, 변압기 본체 밀폐 등의 외부대책을 시행하여 왔으며, 옥내 변전소의 경우에는 방음문, 방음셔터 및 풍도형 방음장치 설치 등을 시행하여 왔다.[3] 그러나 현재의 소음 저감대책은 민원에 대하여 운전중인 변압기에 국한해 시행하고 있으므로, 근본적인 소음 저감대책을 적용하기 곤란하고, 소음 저감대책의 효과도 만족할 정도에 이르지 못하는 실정이다.[4] 따라서 변압기의 소음발생 억제와 소음전달 차단에 대한 근본적인 대책이 요구되고 있다.

† 교신저자, 正會員 : 韓電 電力硏究院 先任硏究員 · 工博
E-mail : kskoo@kepri.re.kr
* 正 會 員 : 韓電 電力硏究院 責任硏究員
** 正 會 員 : (주)효성 중공업연구소
*** 正 會 員 : 현대중공업
§ 正 會 員 : 일진중공업
接受日字 : 2008年 5月 2日
最終完了 : 2008年 9月 22日

변압기의 소음규제는 환경정책기본법과 소음 · 진동규제법에서 명확히 변압기라고 명시된 것은 없으나, 소음 · 진동규제법 시행규칙의 건설 및 생활소음 · 진동 규제기준에 준하는 것으로 볼 수 있으며, 공장 · 사업장 또는 건축설비에서 발생하는 소음의 허용기준은 주간 55dB(A), 야간 45dB(A)로 규제하고 있다.[5] 그러나 국내의 154kV 전력용 변압기 소음레벨 기준치는 79dB(A)로 되어 있어,[6] 소음 허용기준에 크게 미달하는 실정이다.

일본의 경우에 1970년대 소음배출 허용기준을 부지경계에서 최저 45dB(A)로 정하면서부터 변압기의 소음저감 기술을 개발하여 도심 중심부터 설치하여 왔다.[7-8] 일례로 Hitachi의 변압기 소음저감에 관련된 연구는 철심기립장치(1968), 고배향성강판(Hi-B Core)(1972), G7철판(1977), G6철판(1981), D형요크(1983), 고효율 차음판(1984) 등의 기술을 꾸준히 개발하여 왔다.[9] 일본의 변압기 구매사양을 보면 3상 154kV 250MVA의 경우에 표준사양은 89dB(A)이나, 저소음 변압기는 50~70dB(A)를 적용하고 있다. 미국 및 유럽의 국가에서도 1980년대 중반부터 저소음 변압기에 관련된 기술을 꾸준히 개발하여 왔으며,[10-11] 변압기 구매사양은 3상 230kV 250MVA의 경우에 표준사양은 87dB(A)이나, 저소음 변압기는 66~73dB(A)를 적용하고 있다.

국내 전력용 변압기 제작사에서는 변압기 소음저감과 관련하여 일부 기술에 대해서는 이론적인 검토가 이루어져 있으나, 저소음 변압기의 연구 실적이 거의 없고, 제작에 대한 검증이 이루어져 있지 않는 등 변압기의 소음저감에 대한 기술이 취약한 실정이다.

본 연구에서는 변압기의 소음발생 억제 및 차단에 대한 근본적인 대책을 강구하기 위하여, 철심재료, 자속밀도, 적층 및 결합방식 등 변압기 철심의 소음저감 기술을 검토하고,

저소음 변압기 개발시에 적용할 세부기술을 선정하였다. 이러한 소음저감 기술에 대하여 시뮬레이션, 축소형 변압기 모델시험 및 실제 변압기를 통해 소음저감 효과를 파악하였다.

2. 고배향성 방향성 규소강판 적용

변압기에서 발생되는 소음의 원인은 전압을 인가할 때 철심내부에 형성되는 자속의 자기변형으로 인하여 규소강판이 수축, 팽창하면서 발생하는 자왜(Magnetostriction) 현상이다. 자왜현상에 의해서 발생한 철심의 변형은 자성체를 진동시키고, 이 진동이 반복되면서 소음을 발생시킨다.

철심에 자속이 통하면 자왜로 인해 철심의 길이 l이 $\triangle l$ 만큼 신축하게 되며, 이러한 철심의 자왜는 다음과 같이 된다.

$$\lambda = \frac{\triangle l}{l} \approx B(t)^2 \tag{1}$$

여기서 λ는 철심의 자기변형이며, B는 자속밀도이다. 이때 자속의 변화를 정현파로 바꾸면 다음과 같이 된다.

$$\lambda = B^2_{max} \sin^2 \omega t$$

$$= \frac{1}{2} B^2_{max}(1 - \cos 2\omega t) \tag{2}$$

이와 같이 철심의 자기변형은 자속밀도의 제곱에 비례하며, 진동주파수도 인가전원 주파수의 2배라는 것을 알 수 있다. 그림 1은 변압기의 소음을 측정하여 주파수 분석한 것이다.

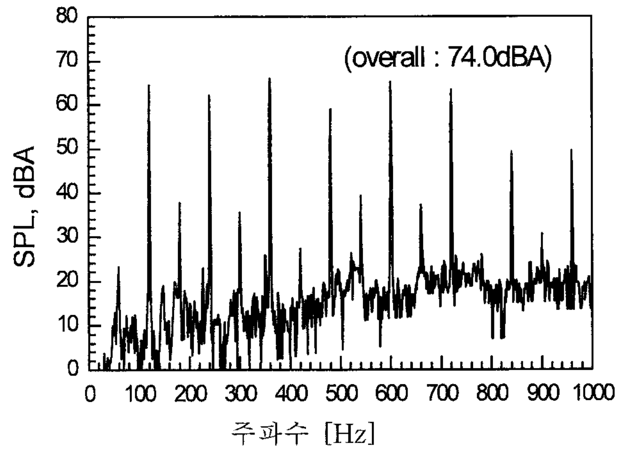


그림 1 변압기 소음 스펙트럼
Fig. 1 Spectrum of a transformer noise

그림 1과 같이 변압기 소음 스펙트럼의 특징을 보면 여자주파수의 2배인 120Hz와 자기응력의 비선형으로 인한 고조파 성분(120, 240, 360, 480…Hz)이 발생한다. 이와 같은 변압기 소음을 줄이기 위해서는 일반 방향성 규소강판 대신에 압연방향으로 배향성을 강화시킨 고배향성 방향성 규소강판을 사용하여 철심의 자왜현상을 줄이면 높은 자속밀도에서도 진동을 적게 할 수 있다.

변압기 철심으로 사용되고 있는 방향성 규소강판은 1930년대 미국 Armco사에 의하여 처음 개발되었으며, 1968년에 신일본제철(NSC)에서 방향성 규소강판에 비하여 자속밀도가 높고, 철손이 낮은 고배향성 방향성 규소강판(Hi-B Core)을 개발하였다. 현재 국내의 154kV 변압기에 적용되고 철심은 POSCO에서 생산되는 일반 방향성 규소강판인 CGO (Conventional Grain Oriented)를 사용하고 있으며, 고배향성 방향성 규소강판은 HGO(High Permeability Grain Oriented)라는 명칭으로 생산되고 있다. 현재 국내외에서 생산되는 고배향성 방향성 규소강판은 POSCO에서 생산되는 23PH125 (0.23t), 27PH125(0.27t), 30PH105(0.3t), 35PH152(0.35t), 일본의 신일본제철에서 생산되는 23ZDKH85(0.23t) 및 미국의 AK Steel에서 생산되는 TRAN-COR H-1(0.3t) 또는 TRAN-COR H-0(0.23t) 등이 있다.[12]

표 1과 표 2는 POSCO에서 생산하고 있는 PG-Core(일반 방향성 규소강판)와 PH-Core(고배향성 방향성 규소강판)의 종류와 특징을 나타낸 것이다.

표 1 PG-Core의 특성
Table 1 Characteristics of the PG-Core

규 격	두 께 (mm)	밀 도 (g/㎤)	철손 w/kg (w17/50)	자속 밀도 T(B8)	점적율 (%)
27PG110	0.27	7.65	1.10 이하	1.80 이상	95.0 이상
27PG120			1.20 이하		
27PG130			1.30 이하		
30PG110	0.30		1.10 이하	1.80 이상	95.5 이상
30PG120			1.20 이하		
30PG130			1.30 이하		
30PG140			1.40 이하		
35PG145	0.35		1.45 이하	1.80 이상	96.0 이상
35PG155			1.55 이하		

표 2 PH-Core의 특성
Table 2 Characteristics of the PH-Core

규 격	두 께 (mm)	밀 도 (g/㎤)	철손 W/kg (W17/50)	자속밀도 T(B8)	점적율 (%)
23PH090	0.23	7.65	0.90 이하	1.88 이상	94.5 이상
23PH095			0.95 이하		
23PH100			1.00 이하		
27PH095	0.27		0.95 이하	1.88 이상	95.0 이상
37PH100			1.00 이하		
30PH100	0.30		1.00 이하	1.88 이상	95.5 이상
30PH105			1.05 이하		
35PH115	0.35		1.15 이하	1.88 이상	96.0 이상
35PH125			1.25 이하		
35PH135			1.35 이하		

표 1과 같이 고배향성 방향성 규소강판은 같은 두께의 일반 방향성 규소강판에 비하여 철손이 적음을 알 수 있다. 예로써 30PH105의 철손은 1.05W/kg으로 30PG140의 철손 1.40W/kg에 비하여 약 25%의 손실이 저감됨을 알 수 있다. 또한 고배향성 방향성 규소강판 중에서도 두께가 얇은 23PH090 강판이 23PH100 강판보다 철손이 적음을 알 수 있다. 철손이 적으면 자기적 특성이 향상되고 이로 인해서 소음이 줄어들게 된다.

고배향성 방향성 규소강판의 소음저감 효과를 검증하기 위하여 154kV 표준 변압기와 동일 사양의 변압기에 고배향성 방향성 규소강판(TRAN-COR H-0)을 적용하여 소음을 측정하였다. 변압기 소음의 측정위치는 총 18곳에서 변압기 높이 1/3지점과 2/3지점에서 2회 반복하여 측정하였고, 45MVA와 60MVA로 나누어 측정하였다.

표 3 일반 방향성 규소강판 변압기의 소음
Table 3 Noise of the PG-Core Transformer

45MVA (자냉식 - 냉각팬 작동 않음)																			
높이	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	평균치
1/3h	65	69	71	71	70	68	67	68	68	72	71	69	67	69	68	69	70	64	68.7
2/3h	69	69	71	68	71	67	66	69	71	72	71	70	69	66	68	68	65	66	68.7
60MVA (풍냉식 - 냉각팬 작동)																			
높이	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	평균치
1/3h	69	69	71	71	73	71	72	71	70	73	71	70	69	71	71	71	69	70	70.7
2/3h	69	69	72	71	72	70	71	70	71	72	71	70	68	70	72	70	68	70	70.3

표 4 고배향성 방향성 규소강판 변압기의 소음
Table 4 Noise of the PH-Core Transformer

45MVA (자냉식 - 냉각팬 작동 않음)																			
높이	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	평균치
1/3h	64	64	66	66	66	63	63	65	66	65	65	63	64	62	62	62	63	63	63.9
2/3h	66	65	64	65	66	64	64	64	64	64	64	63	64	63	63	63	64	64	64.1
60MVA (풍냉식 - 냉각팬 작동)																			
높이	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	평균치
1/3h	68	68	69	68	69	69	68	69	68	67	67	67	68	70	69	68	69	67	68.2
2/3h	69	67	68	66	70	70	69	68	69	67	68	68	69	69	69	68	69	69	68.4

표 3과 같이 45MVA일 경우에 높이 1/3위치에서 측정된 소음은 68.7dB(A)이고, 높이 2/3위치에서 측정된 소음도 68.7dB(A)를 나타내었다. 따라서 45MVA일 경우에 측정된 소음의 평균은 68.7dB(A)이다. 또한 60MVA일 경우에 높이 1/3위치에서 측정된 소음은 70.7dB(A)이고, 높이 2/3위치에서 측정된 소음은 70.3dB(A)를 나타내었다. 따라서 60MVA일 경우에 평균 소음은 70.5dB(A)로 나타났다. 소음측정시 주위소음은 측정 전 55dB(A), 측정 후 54dBv로 평균 54.5dB(A)를 나타내었다. 또한 표 4와 같이 고배향성 방향성 규소강판으로 제작된 변압기의 소음측정 결과는, 45MVA일 경우에 높이 1/3위치에서 측정된 소음은 평균 63.9dB(A)이고, 높이 2/3위치에서는 평균 64.1dB(A)를 나타내었다. 따라서 45MVA일 경우에 측정된 소음의 평균은 64.0dB(A)이다. 고배향성 방향성 규소강판으로 제작된 변압기와 일반 방향성 규소강판으로 제작된 변압기의 소음측정 결과를 비교해 보면, 높이 1/3위치에서의 소음저감은 4.8dB로 나타났고, 높이 2/3위치에서의 소음저감은 4.6dB로 나타났다. 60MVA일 경우에 높이 1/3 위치에서 측정된 소음은 68.2dB(A)였고, 높이 2/3에서는 68.4dB(A)로 나타났다. 따라서 60MVA일 경우에 측정된 소음의 평균은 68.3dB(A)이다. 일반 방향성 규소강판으로 제작된 변압기의 소음과 고배향성 방향성 규소강판으로 제작된 변압기의 소음을 비교해 보면, 높이 1/3지점에서는 2.5dB 감소되었고, 높이 2/3지점에서는 1.9dB 감소되었다. 소음측정시 주위소음은 측정 전 51.5dB(A), 측정 후 51.25dB(A)로 평균 51.4dB(A)를 나타내었다. 여기서 60MVA일 때의 소음저감 효과가 45MVA일 때보다 상대적으로 작은 이유는 기존의 일반 냉각 팬(60dB(A)급)을 사용했기 때문에 냉각 팬에서의 소음이 변압기 소음에 크게 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 따라서 냉각 팬을 저소음 냉각 팬(50dB(A)급)으로 적용하면 소음저감 효과가 비슷해 질 것으로 판단된다. 따라서 고배향성 방향성 규소강판을 사용하면 일반 방향성 규소강판을 사용했을 때보다 약 3~4dB의 소음저감 효과가 있을 것으로 판단된다.

표 5 저소음 변압기에 적용되는 규소강판
Table 5 Silicon steel adopted to transformer

제작사	기존 변압기	저소음 변압기	소음저감 효과
효성	30PG140(0.3t)	30PH105(0.3t)	-4dB
현대	30PG140(0.3t)	23PH100(0.23t)	-3dB
일진	30PG140(0.3t)	TRAN-COR H-0(0.23t)	-4dB

이와 같은 연구결과를 바탕으로, 효성과 현대는 기존 변압기에 POSCO의 일반 방향성 규소강판 30PG140(0.3t)을 사용하고 있으나, 저소음 변압기에는 POSCO의 고배향성 방향성 규소강판 30PH105(0.3t)과 23PH100(0.23t)를 선정하였다. 일진은 기존의 변압기에 적용되는 POSCO의 일반 방향성 규소강판 30PG140(0.3t) 대신에 AK Steel(USA)의 고배향성 방향성 규소강판 TRAN-COR H-0(0.23t)을 선정하였다.

3. 철심 자속밀도 저감

철심의 재질에 따라 다소 차이는 있겠으나 방향성 규소강판의 포화 자속밀도는 약 2T(Tesla) 정도이며, 정상상태의 운전상황에서 15%의 과전압에도 변압기에 이상이 없어야 되므로, 현재 국내에서는 자속밀도를 약 1.75T 정도로 설계하고 있다.

식 (1)과 같이 철심의 자기변형은 자속밀도의 제곱에 비례하므로, 철심 소음의 가장 근본적인 대책은 현재 적용되는 철심의 자속밀도보다 낮은 자속밀도로 변압기를 설계하는 것이다.

일반적으로 자속밀도를 0.1T 저감시 약 2~3dB 정도의 소음이 저하된다고 알려져 있으나, 식 (3)과 같이 모든 자속밀도 영역에서 선형적으로 소음이 감소하지 않고, 높은 자속밀도에 비하여 낮은 자속밀도의 소음저감 효과는 크지 않으므로, 적절한 운전 자속밀도를 선정하여야 한다.

$$dB(A) = 68.2 \log B + 20\log l - 117.2 \quad (3)$$

여기서 B는 자속밀도(T), l은 철심의 길이(cm)이다.

자속밀도에 따른 소음저감 효과를 확인하기 위하여 154kV 변압기에 인가전압을 조절하여 운전 자속밀도에 따른 소음을 측정하였다. 인가전압을 조절하는 방법은 변압기 소음에 영향을 미치는 다른 요소는 변화시키지 않고, 자속밀도 변화에 의한 소음저감 효과를 검증할 수 있는 방법이다.

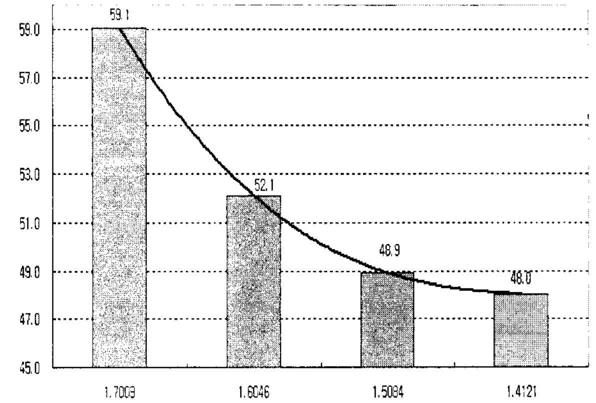


그림 2 자속밀도에 따른 소음저감 효과

Fig. 2 Noise reduction effect on core magnetic flux density

그림 2와 같이 자속밀도가 낮아질수록 소음저감 효과는 지수함수적으로 감소하였으며, 낮은 자속밀도에서는 소음저감 효과가 크지 않았다.

변압기 철심의 자속밀도를 저감시킴에 따라 변압기 소음은 감소하지만, 식 (4)와 같이 자속밀도가 낮아짐에 따라 철심의 단면적(A)이 증가하므로 철심의 부피와 중량을 증가시키게 된다. 철심의 중량 증가는 변압기 제작단가를 상승시키고 수송중량을 증가시키므로 적절한 자속밀도를 선정하는 것이 중요하다.

$$Bm = \frac{V/T \times 10^{8}}{4.44 f N \Phi A} \quad (4)$$

본 연구에서는 단상 변압기(20MVA, 154/23kV)에 대해, 자속밀도의 변경에 따른 철심의 수송중량 및 수송치수를 계산하였다.

표 6 자속밀도 저감에 따른 수송중량 및 수송치수

Table 6 Weight and volume with alteration of core magnetic flux density

제작사	중량 및 치수	기존 변압기	저소음 변압기
효성	수송중량(kg)	20,800	28,800
	수송치수(mm)	4,400×2,700×3,550	5,050×2,700×3,590
현대	수송중량(kg)	20,700	23,200
	수송치수(mm)	4,000x2,900x3,420	3,680x2,900x3,300
일진	수송중량(kg)	18,500	23,000
	수송치수(mm)	3,160×2,950×3,360	3,160×3,050×3,700

표 6은 철심의 자속밀도를 변경함에 따른 수송중량 및 수송치수를 나타낸 것이다. 현재 154kV 변압기의 수송중량 제한은 트레일러를 포함하여 40톤으로 규정되어 있다. 트레일러는 17톤과 11톤의 2종류가 있으므로, 변압기의 중량은 23톤과 29톤으로 설계가 가능하다. 또한 변압기의 수송 최대 높이는 3,700mm를 초과해서는 안된다. 그림 2의 자속밀도에 따른 소음저감 효과와 표 6의 수송중량과 수송치수를 고려할 때 철심의 자속밀도는 최대 1.4T까지 저감이 가능하다. 표 6에서 효성의 저소음 변압기 수송중량이 다른 제작사에 비해 큰 것은 변압기의 수송중량을 29톤에 맞춘 것으로, 변압기 수송시에 현지제어반 등의 부속품을 부착하여 수송하기 때문이다.

표 7 철심의 자속밀도 변경

Table 7 Alteration of core magnetic flux density

	기존 변압기	저소음 변압기	소음저감 효과
효성	1.65T	1.41T	-6dB
현대	1.75T	1.60T	-8dB
일진	1.75T	1.55T	-8dB

이와 같이 철심의 자속밀도의 저감에 따른 소음저감 효과와 변압기 수송중량과 수송치수를 고려하여, 효성에서는 기존 변압기의 자속밀도가 1.65T였으나, 저소음 변압기의 자속밀도는 1.41T로 선정하였으며, 이에 따라 약 6dB의 소음저감 효과를 산정하였다. 현대에서는 기존 변압기의 자속밀도가 1.75T였으나, 저소음 변압기의 자속밀도는 1.60T로 변경하여 약 8dB의 소음저감 효과를 산정하였다. 일진에서는 기존 변압기의 자속밀도가 1.75T였으나, 저소음 변압기의 자속밀도는 1.55T로 변경하여 약 8dB의 소음저감 효과를 산정하였다.

4. 철심적층 및 결합방법 개선

변압기에 전압을 인가하면 누설자속에 의해 히스테리시스손 및 와전류손이 발생하므로 이러한 손실을 감소시키기 위해서 규소강판을 적층하여 사용하며, 규소강판은 가능한 얇은 박판으로 제작하여 양 표면을 전기적으로 절연된 피막을 도포하여 적층한다. 이때 철심의 적층방법 및 결합의 정도에 따라 소음 발생량에 차이가 있으며, 소음의 발생부위로는 규소강판의 판과 판사이, 모서리 끝, 접합부분의 공극 등이다. 따라서 철심의 가공, 적층, 결합기술을 개선함으로써 철심의 진동을 줄일 수 있다.

철심은 설계시 계산된 치수대로 원단을 필요한 폭만큼 잘라서 드럼에 감아 놓고, 다시 필요한 길이만큼 잘라서 조립하게 된다. 이때 철심 절단기의 칼날 관리가 미흡하면 철심 절단부위에 돌출부(Burr)가 생기게 된다. 이러한 돌출부는 철심 조립시에 철심이 밀착되지 않아 철심을 적층한 높이가 설계치수에 맞지 않을 뿐 아니라, 적층내부에 공간이 생기므로 철손이 커지고 소음도 증가한다. 철심의 고정도 가공은 철심 절단기의 칼날을 고정도로 관리하여 철심의 가공

을 매끈하게 하기 위한 것으로, 이는 저소음 변압기에 대한 특별한 대책이 아니라 현재 각 제작사마다 최대한으로 절단기를 관리하고 있으므로 더 이상 개선의 여지는 없는 것으로 파악된다.

철심을 적층할 때 규소강판의 방향성과 권선 조립시의 작업성으로 인하여 철심의 각철과 계철을 따로 절단하여 접합한다. 이때 접합하는 형태에 따라 일반 적층방법(Normal joint)과 스텝-랩(Step-lap joint) 적층방법으로 구분된다. 현재 사용되는 일반 적층방법은 규소강판을 2단으로 교차하여 지그재그 형태로 적층하는 방법으로, 결합부분의 철심은 공극에 의하여 자속이 집중되어 소음이 증가한다. 이를 개선하기 위하여 철심의 결합을 여러 단으로 교차시켜, 공극을 넓게 분포시키는 것이 스텝-랩 적층방법이다. 이와 같은 스텝-랩 적층방법은 철심의 절단종류가 많아지며 적층작업의 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 또한 스텝-랩의 적층 단수가 많을수록 소음을 줄일 수 있지만, 일정 단수 이상에서는 소음저감 효과가 포화되므로, 제작공수 및 제작의 편리성 등을 고려하여 스텝-랩의 단수를 결정해야 한다.

스텝-랩 적층방법의 소음저감 효과와 적층단수를 결정하기 위하여, 일반 적층방법과 스텝-랩 적층방법에 따른 자계를 Maxwell 프로그램을 이용하여 해석하고 적층 경계면에서의 자속밀도를 계산하였다.

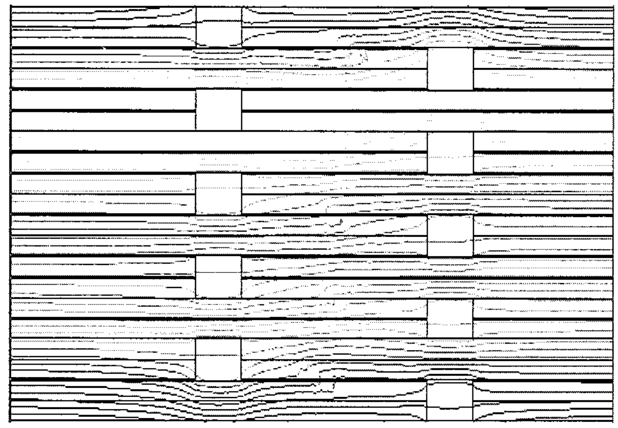


그림 3 일반 적층방법의 자계해석

Fig. 3 Magnetic flux analysis of normal joint

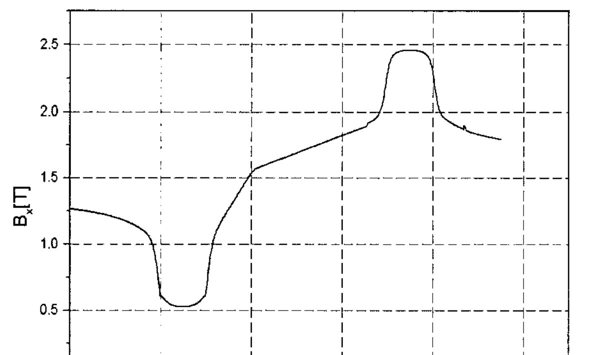


그림 4 일반 적층방법의 공극부분 자속밀도

Fig. 4 Magnetic flux at gaps of normal joint

그림 3은 1mm의 공극을 가진 일반 적층방법의 자계해석 결과를 나타낸 것이다. 여기서 철심의 자속밀도는 1.7T이다. 그림 3과 같이 공극부분에서의 자속밀도는 공극을 통과하는 것은 몇 개의 자속뿐이며, 대부분 공극을 비켜 상하의 철심을 통과하게 되므로 이 부분에서의 자속밀도가 증가하게 된다.

그림 4는 일반 적층방법에서의 공극부분의 자속밀도를 나타낸 것이다. 공극을 비켜 상하의 철심을 통과하는 자속은 약 2.46T까지 상승하는 반면에 공극을 통과하는 자속은 약 0.53T이다.

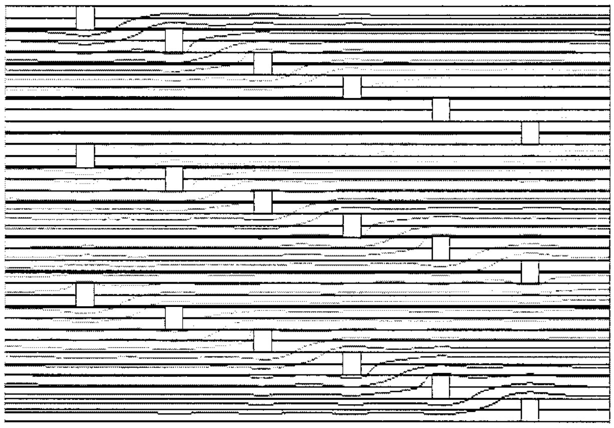


그림 5 스텝-랩 적층방법의 자계해석

Fig. 5 Magnetic flux analysis of step-lap joint

그림 5는 1mm의 공극을 가진 스텝-랩 적층방법의 자계해석 결과를 나타낸 것이다. 이때 철심의 자속밀도는 일반 적층방법과 같이 1.7T로 하였다. 그림 5와 같이 적층부분을 6스텝으로 나누어 적층함에 따라 자속의 흐름이 원활하게 분포되었음을 알 수 있다.

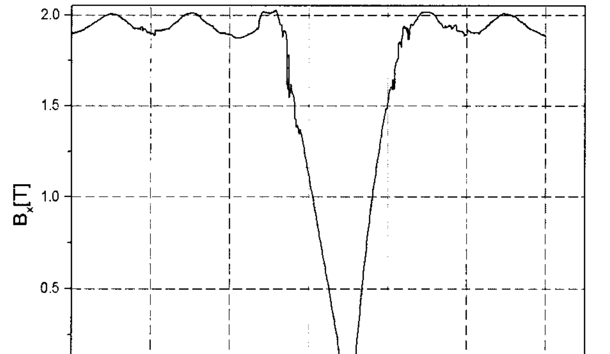


그림 6 스텝-랩 적층방법의 공극부분 자속밀도

Fig. 6 Magnetic flux at gaps of step-lap joint

그림 6은 스텝-랩 적층방법에서의 공극부분의 자속밀도를 나타낸 것이다. 그림 6과 같이 자속밀도가 공극부근에 집중되는 것이 아니라, 6개의 스텝에 골고루 분포하여 나타났다. 또한 자속밀도의 최대치는 약 2T로써 일반 적층방법에 비하여 약 19% 정도 낮아졌다. 이와 같이 스텝-랩 적층방법

으로 철심을 적층함으로써 일반 적층방법에 비하여 철손과 소음을 저감하는데 효과적임을 알 수 있다.

그림 7은 스텝 수를 증가시킬 경우의 자속밀도 변화이다. 그림 7과 같이 스텝 수가 증가함에 따라 자속밀도는 0.15승에 비례하여 감소하고, 6스텝-랩의 경우에는 3스텝 랩에 비하여 자속밀도의 최대 값은 약 12% 정도 줄었다.

일반 적층방법에 비해 스텝-랩 적층방법의 소음저감 효과를 확인하기 위하여, 변압기 5대를 스텝-랩 적층방법으로 제작하여 소음을 측정하였다. 표 8과 같이 스텝 랩 적층방법으로 제작된 변압기는 일반 적층방법에 비해 평균 약 3.9dB의 소음저감 효과가 나타났다.

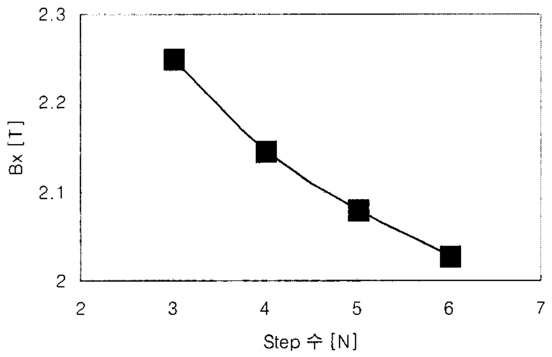


그림 7 스텝 수에 따른 자속밀도
Fig. 7 Magnetic flux with step-lap number

이상의 연구결과를 종합하여 저소음 변압기에는 각 제작사 모두 6스텝-랩 적층방법을 선정하였으며, 약 4dB의 소음저감 효과를 산정하였다.

표 8 스텝-랩 적층방법에 따른 소음저감 효과
Table 8 Noise reduction effect on step-lap joint

변압기 사양	일반적층 (dB(A))	스텝-랩 적층(dB(A))	소음저감 효과(dB)	소음저감 효과 평균(dB)
25MVA	72.0	67.7	- 4.3	- 3.9
30MVA	77.8	73.7	- 4.1	
45MVA	71.6	67.8	- 3.8	
50MVA	72.7	69.1	- 3.6	
100MVA	76.6	72.7	- 3.9	

적층된 철심을 요크 빔으로 압축하는 경우에 압축하는 힘이 약하면 판과 판 사이, 모서리 끝에서 철심의 소음이 증가하므로 적층된 철심을 강하게 압축하여야 한다. 일반적인 변압기 철심 결합방법은 Bolting을 사용하는 방법과 Binding을 사용하는 방법으로 구분된다. 그러나 철심을 Bolting으로 결합하면 Bolting 부분에서 자속밀도가 집중하므로 소음이 많이 발생한다. 따라서 자속밀도가 집중되는 영역을 줄일 수 있는 Binding 방법을 사용하면 진동을 줄일 수 있다.

표 9 철심 결합방법에 따른 소음
Table 9 Noise effect on core joint methods

[단위:dB(A)]

Type	100Hz	200Hz	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz
Bolting Core	600	200	95	34	36	10
Binding Core	460	34	4	8	2	4

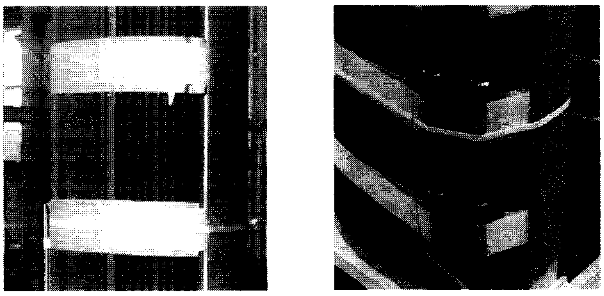
표 9는 동일사양의 변압기를 Bolting 방식과 Binding 방식으로 각각 제작하여 소음을 측정한 것이다. 표 9와 같이 철심을 Binding 방법으로 결합하면 소음이 크게 줄어들고, 특히 100Hz에서는 23%, 200Hz에서는 83%의 소음이 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 저소음 변압기에는 에폭시 계열의 Resin Tape을 활용한 Binding 방법을 적용하였으며, Binding 개소는 6~7개소로 약 1dB의 소음저감 효과를 산정하였다.

표 10 철심 Binding 개소 추가
Table 10 Addition of core binding number

	저소음 변압기	소음저감 효과
효성	Binding 7개소	-1dB
현대	Binding 6개소	-1dB
일진	Binding 6개소	-1dB

철심의 Binding을 더욱 견고히 하기 위해서 그림 8과 같이 철심 밴드 고정구를 적용하였다. 그림 8(a)는 기존의 철심 Binding이고, 그림 8(b)는 더욱 강한 체결력을 갖도록 고안한 밴드 고정구를 적용한 것이다.



(a) 철심 Binding (b) 철심 밴드 고정구

그림 8 철심 밴드 고정구
Fig. 8 Core band fixing

5. 철심 진동 저감재(고무 댐퍼) 적용

철심의 진동은 변압기 탱크에 전달되어 외부로 전파된다. 따라서 철심의 진동전달에서 구조적인 음향연결을 차단하면 소음을 저감할 수 있다. 철심의 진동전달을 저감하기 위한 방법으로는 중신과 탱크 사이나 본체와 기초 사이에 고무 댐퍼를 설치하는 방법이 있다.

표 11 중신과 탱크사이의 고무댐퍼에 의한 소음저감 효과
Table 11 Noise reduction effect on rubber damper between core and tank

위치	고무 댐퍼 비적용dB(A)	고무 댐퍼 적용dB(A)	비고
1	59	57	
2	63	59	
3	59	58	
4	61	59	
5	58	57	
6	64	58	
7	61	58	
8	59	59	
평균	60	58	-2dB

변압기 중신과 탱크 사이에 고무 댐퍼를 설치할 경우의 소음저감 효과를 측정하기 위하여, 3상 4,000kVA, 22.9kV 변압기를 대상으로 변압기 중신과 외함 사이에 고무 댐퍼를 적용하고 소음을 측정하였다.

표 11과 같이 변압기 중신과 탱크 사이에 고무 댐퍼를 삽입할 경우의 소음저감 효과는 약 2dB 정도로 나타났다. 또한 변압기 본체와 기초사이에 고무 댐퍼를 삽입할 경우의 소음저감 효과를 확인하기 위하여, 모델 변압기(3상 23/2.2kV 900kVA)를 대상으로 고무 댐퍼(두께 25mm)를 삽입하여 소음을 측정하였다.

표 12 본체와 기초사이의 고무댐퍼에 의한 소음저감 효과
Table 12 Noise reduction effect on rubber damper between tank and ground

구 분	고무 댐퍼 無	고무 댐퍼 有	소음저감효과
소음치(dB(A))	59.7	58.5	- 1.2

표 12와 같이 변압기 본체와 기초사이에 고무 댐퍼를 삽입할 경우 약 1.2dB 정도의 소음 저감효과가 나타났다.

6. 결 론

본 논문에서는 변압기의 소음발생 억제 및 차단에 대한 근본적인 대책을 강구하기 위하여, 철심의 재료, 자속밀도, 적층 및 결합방식 등 변압기 철심의 소음저감 기술을 검토하고, 시뮬레이션, 축소형 변압기 모델시험 및 실제 변압기를 통해 소음저감 효과를 파악하고 저소음 변압기 개발시에 적용할 세부기술을 선정하였다.

항 목		기존 변압기	저소음변압기	소음저감 효과(dB)
고배향성 방향성 규소강판 채용	재질	30PG140 30PG185	30PH105 23PH125 TRAN-COR H-0	-3~-4
	두께(mm)	0.3	0.3 또는 0.23	
철심 자속밀도 저감(T)		1.65~1.75	1.41~1.60	-4~-8
철심 적층(step-lap) 개선		Normal	6 Step-Lap	-4
철심 결합(Binding) 추가		5개소	6~7개소	-1
철심 밴드 고정구		-	-	
고무 댐퍼 채용		-	적용	-3
소 음(dB)		77	55	-15~-20

변전소 부지 경계선에서 소음배출 허용기준인 45dB(A)를 만족하기 위해서는 변압기와 변전소 부지 경계선까지의 거리를 감안할 때, 저소음 변압기(154kV, 45/60MVA)의 소음레벨은 약 55dB(A)로 선정하는 것이 최적으로 판단된다. 향후 변압기 외함 형상 변경, 외함 보강재 추가 및 차음판 채용 등으로 약 5dB의 소음을 저감할 것을 고려한다면, 변압기 철심에서의 소음저감은 약 17dB를 저감시키면 된다. 표에서와 같이 변압기의 철심 소음은 최소 15dB에서 최대 20dB까지 저감시킬 수 있으므로, 제작사에 따라 적용기술을 선별적으로 적용 가능하다.

참 고 문 헌

[1] 김연환, 이현, 김수형, "154kV 남광주 변전소 소음영향평가," 전력연구원, pp. 1~9, 1999.
[2] 김연환, "신마산 전력소 345kV 변압기 소음평가," 전력연구원, pp. 1~12, 2000.
[3] 이준신, "의정부변전소 소음저감방안 적용연구," 전력연구원, pp. 1~60, 2003.
[4] 권동진, "저소음 변압기 개발을 위한 기초 조사 연구 보고서," 전력연구원, pp. 1~92, 2004.
[5] "생활소음·진동의 규제," 소음·진동규제법 제39조, 1993.
[6] "변압기의 소음레벨 기준치," 한국전력 표준규격(ES 147), 2006.
[7] Hiroyuki Matsuoka, Takao Shimada, "Recent Noise Reduction Techniques for Power Transformers," 環境調和技術, pp. 41~44, 1996.
[8] Toshiaki Yanada, shunataro Munowa, Osamu Ichinokura and shinki kikuchi, "Design and Analysis of Noise-Reduction Transformer Based on Equivalent Circuit," IEEE Transaction on Magnetics, pp. 1351~1353, 1998.
[9] 권동진, "저소음 변압기 제작 및 적용실태 조사 관련 일본출장보고서," 전력연구원, pp. 1~31, 2004.
[10] Robert F.Wolff, "Drown out transformer noise (USA)," Power Delivery, pp. 83~85, 1983.
[11] B.Weiser, H.Pfützer and J.Anger, "Relevance of

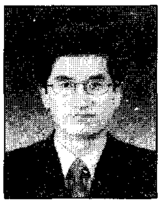
Magnetostriction and Force for the Generation of Audible Noise of Transformer Cores," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3759~3777, 2000.
[12] "AK Steel Oriented And TRAN-COR H (ELECTRICAL STEELS)," AK Steel Corporation Electrical Steels, USA, 1999.

저 자 소 개

권 동 진 (權 東 震)
1963년 1월 20일생. 1986년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1992년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전전력연구원 전력계통연구소 책임연구원
Tel : 042) 865-5862, 042-865-5804
E-mail : djkweon@kepri.re.kr

구 교 선 (具 教 善)
1974년 9월 27일생. 2001년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2005년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 연구원
Tel : 042) 865-5869, 042-865-5804
E-mail : kskoo@kepri.re.kr

조 익 춘 (趙 翼 春)
1964년 3월 25일생. 1990년 한국과학기술대학 전기및전자공학과 졸업. 1990년~현재 (주)효성 중공업연구소 전자기응용팀 팀장
Tel : 055) 268-9911
E-mail : snipe@hyosung.com



김 유 현 (金 裕 賢)
1954년 11월 3일생. 1979년 동국대학교 전기공학과 졸업(학사) 1979년~현재 현대중공업 변압기계통 책임연구원
Tel : 052) 202-8189
E-mail : yhfirst@hhi.co.kr

김 융 식 (金 隆 植)
1957년 8월 5일생. 1980~1998년 이천전기 변압기 설계실, 1999~현재 일진중공업 변압기 개발, 설계팀 팀장, 현 일진중공업 저소음 변압기 개발 연구책임자.
E-mail :