

전력용 변압기 저소음 냉각팬의 소음레벨 및 냉각성능 분석

(The Analysis on Audible Noise Level and Cooling Performance for the Low Noise Cooling Fan of Power Transformers)

구교선* · 권동진

(Kyo-Sun Koo · Dong-Jin Kweon)

요 약

최근 생활수준의 향상과 세계적인 녹색성장 정책으로 환경에 대한 관심이 고조되어, 전력분야에서도 환경친화적인 설비가 요구되어 지고 있다. 이에 따라 전력용 변압기 냉각팬도 날개형상과 배치형태를 개선한 저소음 냉각팬이 개발되었으며, 일반 전력용 변압기 및 저소음 변압기에 적용될 예정이다. 냉각팬은 낮은 소음레벨 뿐만 아니라 우수한 냉각성능의 확보가 필수적이다. 그러나 현재까지 저소음 냉각팬의 소음레벨과 냉각성능에 대한 검토가 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 소음레벨 측정과 풍량 측정 실험을 통해 저소음 냉각팬의 성능을 분석하였다. 또한 저소음 냉각팬을 적용한 전력용 변압기의 온도상승 시험을 통하여 냉각성능을 검증하였다.

Abstract

Recently, there has been a growing global interest in environmental conservation, and the field of electric power equipment has been working to become more environment-friendly. Accordingly, the low noise cooling fan of power transformers was developed through the improvement of blade shape. These are expected to apply to existing power transformers and low noise transformers. It is essential for low noise fan to possess good cooling performance as well as low audible noises. But, there was not analysis on the audible noise level and the cooling performance for low noise cooling fans until present. In this paper, we measure the audible noise level and the flow rate of low noise cooling fans to inspect the performance. Also, we confirmed that the low noise cooling fan is available to apply to power transformers through temperature rise tests of power transformers.

Key Words : Power Transformer, Fan Noise, Cooling Performance, Temperature Rise Test

1. 서 론

* 주저자 : 한전전력연구원 선임보연구원
Tel : 042-865-5894, Fax : 042-865-5809
E-mail : kskoo@kepri.re.kr
접수일자 : 2009년 6월 1일
1차심사 : 2009년 6월 3일, 2차심사 : 2009년 6월 25일
심사완료 : 2009년 7월 3일

최근 생활수준의 향상과 세계적인 녹색성장 정책으로 환경에 대한 관심이 고조되고 있으며, 전력분야에서도 환경친화적인 설비가 요구되어 지고 있다 [1~2].

전력용 변압기는 변전소를 구성하는 필수적인 전력설비로써 전력을 변환하는 과정에서 소음이 필수적으로 동반되며, 이로 인한 소음문제가 빈번히 발생하고 있다. 이를 해결하기 위해 지속적으로 전력용 변압기의 소음저감에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 최근 변압기 재료(고배향성 방향성 규소강판)의 개발, 작업공정(스텝랩 적층, 바인딩 철심결합, 고무댐퍼) 개선 및 설계기술(효율적 자속밀도 선정, 원형 외함, 고효율 차음판)의 발달로 79[dBA]인 기존 154[kV] 전력용 변압기를 55[dBA]급 저소음 변압기로 제작할 수 있는 수준에 이르렀다[3~4].

그러나 기존의 154[kV] 전력용 변압기의 냉각팬의 소음레벨은 약 67[dBA]로, 154[kV] 저소음 변압기를 정격용량 60[MVA]로 운전하기 위해 냉각팬 가동시 소음레벨이 급격히 상승하는 문제가 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 냉각팬의 날개형상과 배치형태를 개선하여 소음레벨을 감소시킨 저소음 냉각팬이 개발되었다[4]. 냉각팬은 낮은 소음발생 특성뿐만 아니라 우수한 냉각성능을 보여주는 것이 요구된다. 그러나 현재까지 전력용 변압기에 적용되는 저소음 냉각팬의 소음특성이나 냉각성능에 대한 검토가 이루어지지 않아 저소음 냉각팬의 성능에 대한 신뢰성 확보가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 55[dBA]급 저소음 변압기에 적용된 저소음 냉각팬의 소음레벨 및 풍량의 측정을 통해 성능을 분석하였다. 또한 저소음 냉각팬을 적용한 154[kV] 저소음 변압기의 온도상승 시험을 통하여 저소음 냉각팬의 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 냉각팬 이론

일반적으로 토출압력이 1,000[mmAq](10[KPa]) 이하의 것을 팬이라고 하며, 팬을 통과하는 기류의 방향에 따라 축류식, 원심식, 사류식, 횡류식으로 구분된다. 전력용 변압기에 사용되는 냉각팬은 축류식으로 구조 및 설치가 간단하고, 경량으로 값이 싼 장점이 있으나 원심식에 비하여 소음이 큰 단점이 있다[5].

축류식 냉각팬의 설계는 주어진 사양에 적합하도록 팬의 외곽형상 및 회전수를 결정하고, 팬의 각도, 시위길이, 날개수 그리고 날개의 길이방향의 요소를 결정하는 단계를 거치게 되며, 이 과정에서 효율, 발생소음 및 냉각성능 해석을 통하여 냉각팬의 최종모델이 완성된다[6].

전력용 변압기의 냉각팬과 같은 축류형 팬의 소음 발생 메커니즘은 표 1과 같이 자려소음(self noise)과 간섭소음(interaction noise)으로 분류할 수 있다.

표 1. 냉각팬의 소음발생 메커니즘 및 특성
Table 1. The Mechanism and the characteristics of cooling fan noise

분류	소음특성	메커니즘
자려 소음	B.P.F와 조화주파수 성분	압력분포의 불균일성에 기인한 양력변화
간섭 소음	광대역 중, 저주파수 성분	소규모 난류성 유동에 기인한 압력 변화
	광대역 고주파수 성분	날개 표면의 층류경계층 섭동

자려소음은 냉각팬 날개(blade)의 회전에 의해 주기적인 압력변동이 생기고 이로 인해 발생하는 소음이다. 이 소음의 주파수특성은 날개통과주파수(blade passage frequency, B.P.F)와 그 정수배의 조화 주파수대에서 뚜렷한 피크값이 나타나는데 저주파수대에서 지배적이고 중고주파수대까지 조화주파수가 분포한다. 날개통과주파수는 식 (1)과 같다[7].

$$f_{bpf} = N \times \frac{B}{60} \quad (1)$$

여기서, f_{bpf} : 날개통과 주파수
 N : 팬의 회전수[rpm]
 B : 날개수

식 (1)에서와 같이 날개의 수가 늘어날수록 팬의 회전속도가 빨라질수록 자려소음은 고주파수 성분을 나타내게 된다.

전력용 변압기 저소음 냉각팬의 소음레벨 및 냉각성능 분석

간접소음은 주로 날개의 와류진동(vortex shedding)에 의해 발생하는 것으로, 날개 후면에 공기흐름의 박리(separation)로 인한 와류에 의해 발생하는 소음, 선행 날개에서 발생한 와류가 뒤따라오는 날개에 부딪히면서 발생하는 소음, 날개 표면의 층류경계층의 섭동에 의해 발생하는 소음 등이 있다 [5,7-8].

팬소음의 예측은 Sharland에 의해 개념이 도입되고 Fukano에 의해 수정된, 날개의 후연(trailing edge)에서 방출되는 와류의 두께로 음향에너지를 계산하고 소음으로 환산하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이 방법에 의해서 팬으로부터 방출되는 소음에너지 E와 소음레벨 SPL은 식 (2)와 식 (3)으로 예측할 수 있다[8~9].

$$E = B\pi\rho_0 D_R \frac{U_t^6}{16800a_0^3} D \quad (2)$$

여기서, $D = D_t + 0.093CR_{ec}^{-0.2}$

- B : 날개의 수
- ρ_0 : 공기밀도
- D_R : 날개의 직경
- U_t : 날개선단에서 회전방향 속도
- a_0 : 음속
- D_t : 날개 후연의 두께
- C : 코드(chord) 길이
- R_{ec} : 레이놀즈수

$$SPL = 10\log_{10} \left(\frac{3\rho_0 a_0 E}{8\pi r^2 P_0^2} \right) \quad (3)$$

여기서, r : 측정거리
 P_0 : 기준음압($2 \times 10^{-5} Pa$)

식 (2)와 식 (3)에서 보는바와 같이 소음레벨은 날개의 수, 날개의 직경, 회전속도와 상관관계가 있다. 따라서 날개의 수와 직경을 줄이고, 회전속도를 낮추면 소음을 저감시키는 것이 가능하다.

그러나 표 2에 표시한 송풍기의 상사법칙(fan law)에 의하면 기타조건을 변화시키지 않았을 경우,

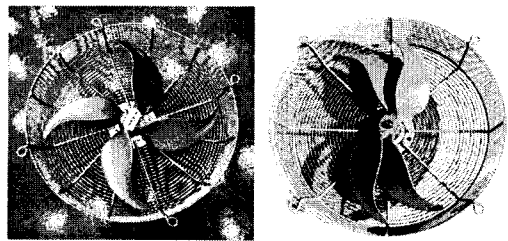
풍량은 날개크기의 3승 및 회전속도에 비례하고, 송풍압력은 날개크기의 3승 및 속도의 제곱에 비례한다. 따라서 소음을 줄이기 위해 날개의 직경 및 회전수를 줄일 경우 냉각팬 성능저하로 냉각팬의 수량을 증가해야하는 문제를 초래할 수 있으므로, 적절한 냉각팬의 치수를 선정하는 것이 중요하다.

표 2. 설계변수와 출력의 상관관계
 Table 2. A correlation between the design parameter and the output

항 목	설계변수 비례관계
풍량(flow rate)	(날개크기) ³ × (회전속도)
압력(pressure)	(날개크기) ³ × (회전속도) ²
전력(power)	(날개크기) ⁵ × (회전속도) ³

앞에서 언급한 바와 같이 냉각팬은 회전수 및 날개의 직경을 줄일수록 소음을 줄일 수 있지만, 이러한 설계변수의 변화는 냉각팬의 풍량을 감소시킬 우려가 있다.

따라서 저소음 변압기의 냉각성능의 저하를 최소한으로 유지시키기 위하여 날개형상과 배치형태만을 개선한 저소음 냉각팬에 대하여 적용을 검토하였다. 그림 1은 일반 냉각팬과 저소음 냉각팬을 나타낸 것이다.



(a) 일반 냉각팬 (b)저소음 냉각팬

그림 1. 일반 냉각팬과 저소음 냉각팬
 Fig. 1. The general cooling fan and the low noise cooling fan

그림 1에서와 같이 저소음 냉각팬은 날개의 각도를 완만하게 하여 자려소음을 저감시켰으며, 날개의 배치간격을 좁혀 선행날개에서 발생하는 와류에 의한 소음을 감소시키는 구조로 설계된 것이다.

2.2 냉각팬의 소음레벨 측정

날개의 배치형태를 개선한 형태(A type)와 날개의 개수를 줄인 형태(B type)의 저소음 냉각팬의 소음 저감 효과를 확인하기 위하여 소음레벨 측정시험을 하였다.

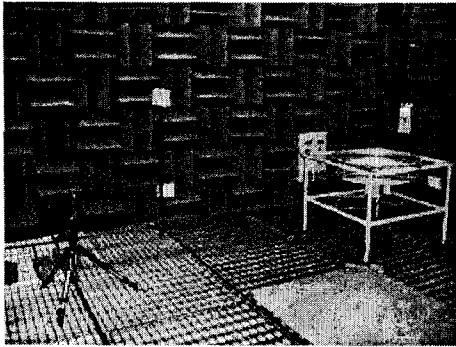


그림 2. 냉각팬의 소음레벨 측정 시험
Fig. 2. The audible noise level test of the cooling fan

반무향실 내에서 사각형의 지그에 팬을 고정시키고, 팬에서 2[m] 떨어진 4개 지점에서 소음레벨을 측정하였다. 그림 2는 반무향실에서의 소음레벨을 측정하는 모습이고, 표 3은 측정에 사용된 A, B 형태의 저소음 냉각팬 사양을 나타낸 것이다.

표 3. 저소음 냉각팬의 외형 및 사양
Table 3. The shape and the specification of low noise cooling fans

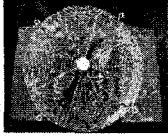
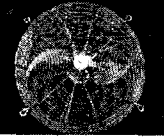
No	사 양	A Type	B Type
1	외형		
2	날개수	4개	2개
2	전 압	380[V]	
3	주파수	60[Hz]	
4	HP	1/8	
5	회전수	850[rpm]	

표 4는 반무향실에서 A, B type의 저소음 냉각팬의 소음레벨 측정 결과를 나타낸 것이다. 날개의 배치간격을 개선한 A Type 저소음 냉각팬의 소음레벨은 평균 49.7[dBA]로 일반 냉각팬의 소음레벨 67[dBA]보다 약 17[dB]감소하였으며, 날개의 개수를 줄인 B Type 저소음 냉각팬의 소음레벨은 평균 46.8[dBA]로 일반 냉각팬에 비해 약 20[dB] 감소되었다. A, B Type의 저소음 냉각팬의 평균소음 모두 약 50[dBA] 이하로 55[dBA]급 저소음 변압기에 적용할 경우에도 별도의 소음증가에 영향이 없을 것으로 예상된다.

표 4. 저소음 냉각팬의 소음측정 결과
Table 4. The result of the audible noise measurement of low noise cooling fans

종류	측정 차수	측정위치				평균값 [dBA]
		P.1	P.2	P.3	P.4	
A type	1차	49.2	49.8	49.1	50.2	49.6
	2차	49.6	50.1	50.4	50	50.0
	3차	49.2	49.7	49.5	50	49.6
	평균	49.3	49.9	49.7	50.1	49.7
B type	1차	46.1	46.8	46.4	47.3	46.7
	2차	46.5	46.7	46.9	46.8	46.7
	3차	46.3	46.5	46.6	48.1	46.9
	평균	46.3	46.7	46.6	47.4	46.8

2.3 냉각팬의 냉각성능 측정

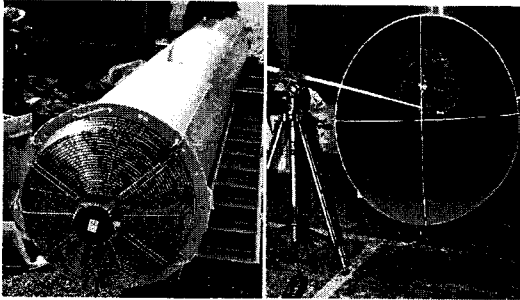
저소음 냉각팬은 발생소음의 억제뿐만 아니라 우수한 냉각성능을 지녀야한다. 따라서 저소음 냉각팬의 냉각성능을 검토하기 위하여 A, B type의 저소음 냉각팬의 풍량을 측정하였다.

풍량 측정을 위해 길이 5[m], 내경 700[mm]인 풍동관의 한쪽 끝에 팬을 고정시키고, 반대편에서 풍속을 측정하였다. 풍동관 단면을 그림 4와 같이 17등분으로 나눈 후 각 위치에서 10초간 풍속을 측정하였으며, 각 위치에서 측정된 풍속으로부터 전체면적에 대한 평균풍속을 계산하고, 풍동관의 단면적을

전력용 변압기 저소음 냉각팬의 소음레벨 및 냉각성능 분석

급하여 풍량을 산출하였다.

그림 3과 그림 4는 풍량 측정에 사용된 풍동관과 풍량 측정위치를 나타내고 있다.



(a) 팬 구동부 (b) 풍량 측정부

그림 3. 풍량 측정에 사용된 풍동관
Fig. 3. A copper pipe used the air flow measurement

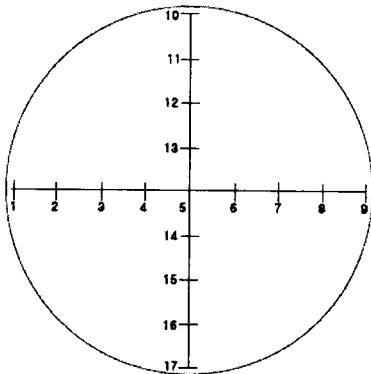


그림 4. 풍동관의 풍속측정 위치
Fig. 4. The points of the flow speed measurement in the copper pipe

표 5는 A, B Type의 저소음 냉각팬의 풍량 측정 결과를 나타낸 것이다. A Type의 풍량은 3,648 [CFM]으로 일반 냉각팬의 풍량인 4,942[CFM]에 비하여 1,294[CFM]이 감소하였고, B Type의 풍량은 2,870[CFM]으로 일반 냉각팬의 풍량에 비해 2,072[CFM]이 감소하였다. A Type 저소음 냉각팬은 B Type에 비해 상대적으로 풍량이 많지만, 일반 냉각팬에 비해서는 풍량이 적으므로 냉각성능 저하가 우려된다.

표 5. 저소음 냉각팬의 풍량 측정 결과

Table 5. The result of the air flow measurement for low noise cooling fan

측정점	A type	B type	비고	
1	4.7	2.6	풍동관 좌측	
2	4.7	3.5		
3	4.5	3.3		
4	4.3	3.7		
5	4.7	3.7	중심	
6	4.9	4.0	풍동관 우측	
7	4.7	3.8		
8	4.4	3.7		
9	4.3	3.5		
10	4.2	3.3	풍동관 상부	
11	4.2	3.6		
12	4.3	3.4		
13	4.5	3.4		
14	4.3	3.5	풍동관 하부	
15	4.5	3.6		
16	4.7	3.5		
17	4.5	3.3		
평균속도 ([m/s])	4.5	3.5	최대, 최소를 제외한 평균	
풍량	[m ³ /h]	6,198	4,877	평균면적 : 0.385[m ²] 1[CFM]= 1.699[m ³ /h]
	CFM	3,648	2,870	

2.4 온도상승 시험

앞 절에서 소음레벨 측정과 풍량 측정을 통해 A Type과 B Type의 냉각팬을 비교해 본 결과, A Type은 B Type에 비해 발생소음은 다소 높지만, 저소음 변압기에 적용시에도 소음레벨 상승의 우려가 적으며 상대적으로 냉각성능이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 A Type 저소음 냉각팬도 일반 냉각팬에 비해서는 냉각성능이 저하되었으므로, 이에 대한 검증이 필요하다. 따라서 날개의 배치형태를 개선한 A Type 저소음 냉각팬을 저소음 변압기에 적용하였고, 저소음 냉각팬의 냉각성능을 검증하기 위해 온도상승 시험을 하였다.

온도상승 시험은 저소음 냉각팬이 적용된 국내 변압기 제작사 A, B, C사의 15[kV] 저소음 변압기를 대상으로 등가부하법(단락법)을 이용하여 실시하였다.

등가부하법은 권선을 단락시키고 변압기 온도상승의 주요원인인 부하손과 무부하손의 전류를 공급함으로써, 실부하법을 이용한 정격용량에서의 온도상승시험과 유사한 결과를 도출할 수가 있다. 이와 같은 등가부하법을 이용한 60[MVA] 정격용량에서의 온도상승 시험 결과는 표 6과 같다.

표 6. 저소음 냉각팬을 적용한 저소음 변압기의 온도상승 시험 결과
Table 6. The temperature rise test of low noise transformers applied low noise cooling fans

시험 조건	측정 항목	시험 기준	시험결과[K]			비고
			A사	B사	C사	
유입 자냉식 (45[MVA])	절연유	60[K] 이하	43.5	52.0	50.4	합격
	1차권선	65[K] 이하	48.3	52.3	56.3	
	2차권선		55.8	50.9	50.8	
3차권선	49.9		50.2	39.8		
유입 풍냉식 (60[MVA])	절연유	60[K] 이하	49.4	54.1	56.4	
	1차권선	65[K] 이하	60.9	53.6	61.8	
	2차권선		61.1	51.6	55.3	
3차권선	60.2		50.8	64.4		

60[MVA] 정격으로 저소음 냉각팬을 가동했을 때, A, B, C사 절연유의 온도상승은 49.4[K], 54.1[K], 56.4[K]로 시험기준인 60[K]를 만족하는 것으로 나타났다으며, 권선온도 또한 시험기준인 65[K]를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 논문에서는 날개의 배치형태를 개선시킨 전력용 변압기의 저소음 냉각팬의 성능을 검증하기 위해 소음레벨 측정, 풍량 측정 및 온도상승 시험을 하였으며, 주요한 연구결과는 다음과 같다.

(1) 날개의 배치간격을 개선한 저소음 냉각팬(A Type)의 소음레벨은 평균 49.7[dBA]로 일반 냉각팬 소음에 비하여 약 17[dB] 감소하였으며, 날개의 수를 줄인 저소음 냉각팬(B Type)의 소음레벨은 평균 46.8[dBA]로 일반 냉각팬에 비해 약 20[dB] 감소하였다.

(2) 날개의 배치간격을 개선한 저소음 냉각팬의 풍량은 3,648[CFM]으로 일반 냉각팬에 비해 1,294[CFM] 감소하였으며, 날개의 수를 줄인 저소음 냉각팬의 풍량은 2,870[CFM]으로 2,072[CFM] 감소하였다.

(3) 날개의 배치간격을 개선한 저소음 냉각팬을 저소음 변압기에 적용한 결과 60[MVA] 정격에서의 절연유 온도상승 기준 60[K]를 만족하고, 권선온도 상승 65[K]를 만족한다.

References

- (1) 권동진 외, "전력용 변압기 철심소음 저감기술에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 11, pp.1962~1969, 2008.
- (2) 권동진 외, "전력용 변압기 외함 소음저감에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 10, pp.1759~1766, 2008.
- (3) 권동진 외, "저소음 변압기 개발을 위한 기초 조사 연구", 한전전력연구원 최종보고서, pp.1~92, 2004.
- (4) 권동진 외, "환경친화형 저소음 변압기 개발", 한전전력연구원 최종보고서, pp.1~118, 2008.
- (5) 이승배, "송풍기 소음 규격 동향 및 팬소음 이론", 대한설비공학회, 설비저널 공기조화 냉동공학, 제 26권, 제 6호, pp.481~490, 1997.
- (6) 이찬 외, "축류형 팬 설계를 위한 전산체계에 관한 연구", 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.495~498, 2002.
- (7) 김동규 외, "실험적 방법에 의한 축류형 팬의 저소음화에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp.178~184, 1993.
- (8) 최대휴 외, "축류형 팬의 소음해석에 관한 연구", 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.339~343, 1996.
- (9) 오재용 외, "저소음 축류형팬 설계에 관한 연구", 대한기계학회 춘추학술대회 논문집, 제 1권, 제 1호, pp.541~544, 1994.

◇ 저자소개 ◇

구교선 (具敎善)

1974년 9월 27일생. 2001년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 한전전력연구원 송배전연구소 선임보안연구원.
Tel : (042)865-5894
E-mail : kskoo@kepri.re.kr

권동진 (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 송배전연구소 책임연구원.
Tel : (042)865-5890
E-mail : djkwon@kepri.re.kr