

주변압기를 소음원으로 한 전동차 실내소음의 저감사례연구

Case study for noise reduction of an electric train caused by Main Transformer as a noise source

이강원*, 김원경**, 백광선***, 김진환***
K. W. Lee*, W. K. Kim**, K. S. Baik***, J. H. Kim***

ABSTRACT

Noises are defined as unwanted sound and invoke the physical harm and inconvenience. The higher the noise level is, the more damage peoples have. Low frequency noise is less harmful than high frequency one. In case of train, noises inside of train which is isolated from outer circumstances reduce the convenience of passenger very much. This paper reviewed the noise standard of train for urban subway and investigated the main transformer as the main noise source of train and suggested the method to diminish the noise resulted from main transformer of train and compared the measured results of before and after the improvement of main transformer.

1. 서론

소리는 대기중에서 압력파의 형태로 전달되는 일종의 에너지 전달이며, 이동속도는 344m/s(20℃)이다. 인간은 태어날 때부터 주위의 소리에 싸여 살아가고 있다. 이러한 소리중 단순히 시끄러운 소리만이 아니라 듣기 싫은 소리까지 포함해서 우리 감각에 불쾌감 또는 피해를 주는 소리를 소음이라 하며, 사람에게 정신적일 뿐 아니라 심리적인 악영향을 끼치는 잠행성 오염물로서 이로인한 손상은 대개 장기적이고 영구적이다. 먼저 소음의 크기를 분류하고 그에 따른 신체적 변화를 알아보았다. 소음을 측정하는 단위는 dB로 표시할 수 있으며, 간신히 들을 수 있는 소리는 10dB이고 50dB이상을 일반적으로 소음이라 하고 60dB이면 수면장애를 일으키고 식욕이 감퇴된다고 한다. 그리고 70dB이면 집중력이 저하되고 소화불량을 일으키게 되며 80dB 이상의 소음이 장기적으로 노출될 경우 영구적인 난청이 된다는 연구결과가 있으며, 또한 95dB 이상이면 두통을 유발하며 130dB 이상이면 귀에 고통을 주고 150dB 이상이면 귀의 뼈를 손상시킨다. 소음의 주파수에 대해서는 고주파 성분이 많을 때 더 크게 영향을 받으며 지속 시간이 길수록 더 많은 영향을 받는 걸로 알려져 있다.

소음이 인체에 미치는 영향은 생리적 영향, 심리적 영향, 소음성 난청으로 분류할 수 있다.

- 1) 생리적 현상으로는 심장병, 동맥 혈관 수축, 호흡 속도 감소(호흡횟수 증가, 호흡 깊이 감소), 소화 장애,(위액 산도 저하, 위수축 운동) 등을 일으킬 수 있다.
- 2) 심리적 영향으로는 집중력 방해, 대화 방해, 수면 방해, 불쾌감, 연구 활동 방해, 휴식 방해, 작업 능률 저하 등 많은 영향을 줄 수 있다.

* 한국철도기술연구원 주임연구원, 비회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

- 3) 소음성 난청으로는 소음, 진동이 심한 곳에서(80dB이상) 오랫동안 생활할 경우 청각기관이 둔화되어 난청 또는 청력 소실의 원인이 된다. 청력 소실에는 일시적 난청과 영구적 난청을 들 수 있다.

이와같이 소음저감은 매우 중요한 문제이며, 전동차의 경우, 탑승승객은 밀폐된 공간에서 수십분내지 수시간을 보내야 하므로 승객이 쾌적한 승차감을 갖도록 하기 위해서는 전동차내에서의 소음저감대책은 상당히 절실히 요구되는 사항이다. 전동차내에서의 소음원으로는 레일과 바퀴와의 마찰, 내부 승객들의 목소리, 송풍기 및 에어컨, 그리고 전력기기의 작동음등을 들 수 있다. 그러나 전동차가 정차시에는 일정대역의 자기음을 발생하는 대전력기기에 의한 소음이 지배적이라는 것을 시험을 통하여 확인되고 있으며, 이중 대표적인 전력기기로는 주변압기등을 들 수 있다. 본 연구에서는 전동차의 소음에 대한 도시철도차량성능시험기준을 살펴보고, 대전력기기 특히 주변압기의 자기음이 정차상태의 차량실내소음수준에 지배적인 영향을 미치는 경우에 있어서, 변압기소음의 대표적인 메카니즘과 변압기소음을 저감시키기 위한 대책을 수립한 후 실제 전동차에서 측정된 변압기의 수정전과 후의 소음정도에 대한 값들의 비교를 통해 변압기에 대해 적용한 소음저감방법의 실효성을 확인하였다.

2. 본론

2.1 도시철도차량성능 소음시험기준

도시철도차량성능 소음시험기준 도시철도차량의 차내·외 소음시험에 대하여 규정하고 있으며, 소음과 관련된 용어의 정의와 시험장소의 환경조건, 시험의 종류 및 목적 그리고 시험방법등에 관하여 나타내고 있다. 이 기준에 의하면, 음압을 데시벨 척도로 표시한 것을 음압레벨이라하며, dB로 나타내고, 음압과 기준량 $20 \mu\text{Pa}$ 과의 비에 상용대수를 취하여 20배한 값이다. 또한 소음계의 청감보정회로 A특성을 통하여 측정된 소음레벨을 소음도(dB(A))라 하고, 변동하는 소음의 에너지 평균레벨, 즉 임의의 측정시간동안의 변동 소음에너지를 시간적으로 평균하여 상용대수를 취해 10을 곱한 값을 등가소음도(Leq)로 정의하고 있다. 소음시험을 하기위한 환경조건으로는 공사장 소음, 바람소리등과 같은 외부 소음이 차내로 전달되어 차내소음수준에 영향을 미치지 않아야 하고, 온도, 바람, 비등의 영향이 없도록 하여야 한다. 본 시험은 형식시험으로서 실시하고, 정지시, 주행시, 운전실, 차외소음시험으로 구분하여 실시한다. 이때 시험방법으로서는 모든 시험차량은 모든 보조장치 및 주변장치를 가동하고 실시하며, 주행시 시험은 차량의 모든 장치를 가동한 상태로 최고 영업속도에서 실시하는 것으로 하며 필요에 따라 40, 60km/h중 하나이상을 선정할수 있다. 단, 속도의 허용차는 $\pm 5\%$ 로 한다. 모든 출입구, 창문 및 차량간의 통행문은 닫혀 있어야 하며, 공차상태로 시험을 위한 최소인원만 탑승하여 실시하는 것으로 되어있고, 이때 레일은 양호한 상태이고, 이음부는 틈새가 없어야 하며, 암소음도는 측정치보다 10dB(A)이하이어야 한다. 그렇지 않을 경우에는 아래 표1 과 같이 보정치를 가한다. 차내소음시험의 경우, 직선 평탄한 콘크리트도상의 지하 복선터널에서 시험하고, 차외소음시험의 경우, 소음을 대표할 수 있는 장소나 소음으로 문제를 일으킬 우려가 있는 장소로 협의에 따라 정한다.

표 23-1 암소음과의 차이에 따른 보정치

암소음과의 차이 dB(A)	≥ 10	6~9	4~5	3
수정치 dB(A)	0	-1	-2	-3

소음레벨측정기로서 원칙적으로 KSC 1502 또는 KS C1505에 규정되어 있는 소음계, 또는 이와 동등이상의 종합기능을 갖는 측정기(이하 소음계라 한다.)를 사용하고, 또한 소음 스펙트럼 측정기는 원

칙적으로 소음계, 테이프 레코더 또는 데이터 레코더, 옥타브 분석기 또는 1/3 옥타브 분석기, 고속도 레벨 레코더등의 조합으로 한다. 이들은 측정 주파수 대역 및 측정 음압레벨 범위에서 종합적으로 충분한 안전성과 직선성을 갖는 것으로 한다. 또한 소음계는 피스톤 폰등의 표준음원에 따라 측정전후에 교정한다. 소음을 측정하기위한 위치는 차내소음시험의 경우, 정지시 차내소음 및 주행시 차내소음의 측정위치는 다음의 세지점의 차량중심선, 차량바다으로부터 1.6m 높이의 위치로 한다.

- 1) 차량진행방향의 전위대차중심부 상면
- 2) 차량 정중앙부
- 3) 차량진행방향 후위대차 중심부와 차량정중앙부의 중간

또한, 운전실 소음의 측정위치는 운전실 중앙에서 바닥면으로부터 1.6m 높이의 위치 및 운 전자 귀의 옆방향으로 0.2m의 위치로 하고, 마이크로폰은 위로 향하게 하여 수직하게 고정되어야 하며, 측정 위치는 평면도로서 정확히 명기되어야 한다. 소음을 측정하는 방법으로서 소음계의 청감보정회로는 A 특성을 사용하며 동특성은 Fast를 사용한다. 측정단위는 데시벨로 하고, 시간적으로 평균한 등가소음도 dB(A) Leq로 표기한다. 차내소음측정의 경우 측정시간은 5초로 하며, 필요에 따라 10초, 15초, 20초 중 하나를 선정할수 있고, 소음값은 반올림한 값으로, 각 3회이상으로 측정하는 것으로 한다. 또한 소음 스펙트럼의 경우는 소음계의 청감보정회로로 C특성 또는 평탄을 사용하고, 소음계의 동특성은 Fast를 사용하며, 측정결과는 횡축에 중심주파수(Hz)를 취하고, 종축은 대역 및 각 옥타브 또는 1/3옥타브 대역마다의 음압레벨(dB)을 위하여 그림을 나타낸다. 이러한 소음결과는 3회이상 측정한 소음값을 산술평균한 것으로 하며, 주행시 차내소음 및 운전실 소음은 80dB(A) Leq이하 이어야 한다.

2.2 변압기소음발생의 메카니즘

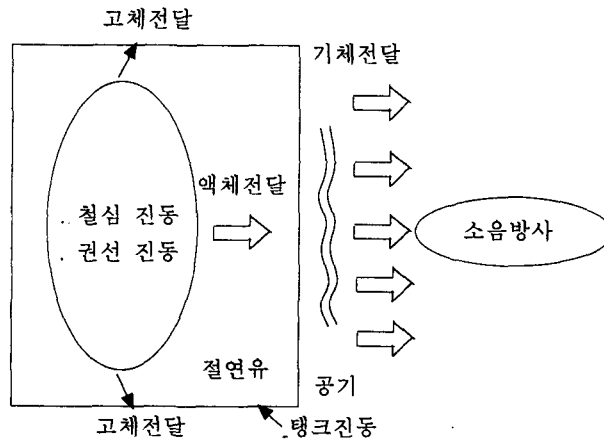


그림 1. 변압기의 진동/소음의 전파경로

(변압기의 진동 및 소음은 중심체 진동이 구조물과 절연유를 전파하는 것에 의하여 발생한다.)

변압기의 소음은 규소강판의 자왜진동에 의한 철심진동과 권선도체간에 작용하는 전자력에 의한 권선 진동등이라는 일차적 요인에 의한 것과 탱크와 방열기등의 진동에 의한 이차적 요인으로 크게 나누어 볼수 있다. 철심진동은 변압기소음의 주요한 음원으로 되어 있다. 철심진동의 원인인 자왜진동은 규소 강판을 교류로 자화시키는 경우에 강판의 형태가 변화하는 현상으로, 이때 규소강판은 주기적인 신축

운동을 행하게 된다. 이 신축운동은 자화시키는 주파수의 2배의 주파수로 진동하고, 더불어 히스테리시스현상이 있기 때문에 고조파를 포함하게 된다. 또한 철심접합부에서는 자속의 집중에 의한 전자기적 진동이 발생하게 된다. 권선진동은 권선에 전류가 흐르는 경우에 발생하는 누설자속과 권선전류와의 상호작용에 의해 발생하는 전자기력이 그 원인으로 되어 있다. 이전에는 철심진동에 비하여 그다지 큰 요인으로는 생각되지 않았지만, 저소음화가 진행됨에 따라 서서히 두각을 나타내고 있다. 그림 1에 변압기의 진동과 소음의 전파경로를 나타낸다. 철심진동과 권선진동이 음으로서 외부에 방사되기까지의 전파경로로서는 탱크등의 구조물에 의하여 전파되는 고체전파와 절연유층을 전파하는 액체전파가 있다. 고체전파는 중심부가 탱크와 접촉하고 있는 탱크 바닥과 cover등을 전파경로로 하고 있다. 액체전파는 음원주위에 존재하는 절연유층의 진동이 음파로서 전파하고, 그 음파가 탱크를 진동시키는 경로를 취한다. 이같이 하여 탱크에 도달한 진동은 탱크주위의 공기를 매체로서 외부에 소음으로서 방사된다.

2.3 변압기의 방음기술

변압기 소음의 주요한 음원으로 되어있는 철심 진동에 대해서는 규소강판의 자기왜곡의 저감과 철심 접합방식의 개량등의 기술개발에 의해 발생소음이 저감되어 오고 있다. 규소강판은 고배향성과 자구제어등에 의한 저자왜곡이 개발되어 제품에 적용되고 있다. 변압기의 진동 및 소음은 철심의 자왜특성에 의해 상용주파수의 2배의 고주파로 되므로, 탱크와 부속품등의 구조물은 이 주파수에 대해 공진하지 않는 구조이어야만 한다. 이 때문에 탱크설계에서 보강재 취부위치와 부속품 취부위치의 최적화에 의해 공진하지 않는 탱크구조를 취하고 있다. 현재로는 고유치 해석기술이 충실해짐에 따라서 공진을 피한 구조설계를 정밀하게 행할 수 있다. 소음기준치가 45dB이하인 극 저소음사양의 경우에는 탱크벽면의 보강재 사이에 탱크진동이 소음판넬에 전달되지않도록 진동절연을 실시한다. 따라서 방음 판넬 내부에는 흡음재를 부가하는것에 의해 소음감소효과를 높이고 있다. 또한 변전용 변압기에서는 음원의 에너지가 크고, 중심체와 탱크만으로는 방음에서 소음감소량이 부족하다. 이 경우, 변압기 본체를 방음벽으로 덮어 큰 소음감소량을 얻는 구조로 되어 있다.

2.4 전동차내 소음저감예

그림 2의 그래프는 실제 전동차에서 주변압기가 부착된 차량의 측정위치 세부분에서 각 3회 측정된 값들을 평균한 값을 나타낸것으로서 평균적으로 70dB을 초과 하고 있다. 시험기준과는 10dB이하의 값을 가지고 있으나 이는 변압기가 부착되지 않은 다른 차량의 측정값(50~60dB)에 비해 매우 높은 값이라는 것을 알수 있다.

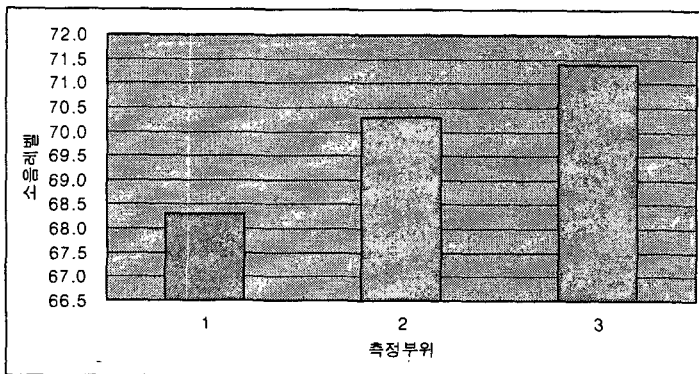


그림 2. 변압기 개선전 각 측정부위별 소음레벨
(1 : 전위대차, 2 : 차량중심, 3 : TR아래)

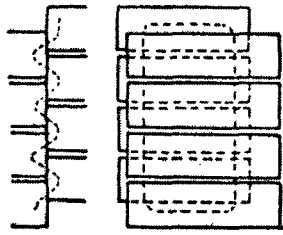


그림 3. 붙임접합법(butt joint)

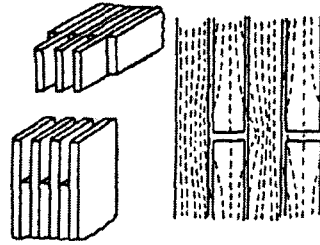


그림 4. 겹침접합법(lap joint)

이와 같이 변압기의 유무에 따라서 발생되는 소음레벨의 양에 약 10dB 정도의 차이가 발생한다는 것을 알 수 있으므로, 이러한 차이를 줄이기 위하여 변압기에 의한 소음을 저감시키는 대책이 필요하다. 앞에서도 언급된바와 같이 변압기의 소음을 저감시키기 위해서는 변압기 자체의 성능을 개선하는 것이 중요하다. 그러나 변압기의 성능은 변압기의 구조에 따라 상당히 좌우되므로, 변압기의 구조를 먼저 파악한 후 개선할 부분을 조사하여야 한다. 측정이 이루어진 전동차에 부착된 변압기는 단상외철형으로 유입변압기이며, 송풍기에 의하여 냉각시키는 방식을 사용하고 있으나, 송풍기의 경우, 차외에 부착되어 있으므로, 차내 변압기 소음에 미치는 영향은 매우 적다고 판단할 수 있다. 그러나 변압기의 철심접합방법으로서 사용된 붙임접합법(그림 3) 및 철심적층방식으로 되어 있다. 붙임접합법(butt joint)은 별도로 조립된 철심과 계철을 붙여서 접합시키는 것으로 공작은 간단하나 성층이 엇갈리면 그림과 같은 와전류의 통로가 생겨서 와전류손이 증대하고 소음이 생기기 쉬운 결점을 가지고 있으므로 변압기에서의 가장 큰 소음의 원인으로 생각할 수 있다. 그러므로 대책으로서 다른 접합법을 생각할 수 있는데 그중 하나가 겹침접합법(lap joint)을 이야기할 수 있다. 겹침접합법은 그림과 같이 철판을 한 장마다 그쪽만큼 처지게 조립시키는 것으로 자기저항이 작아서 여자전류가 적으므로 널리 사용되고 있다. 단, 단점으로는 접합부에 틈이 남으면 그림 4와 같이 자속밀도가 높은 부분이 생겨서 철손이 현저하게 커지는 경우가 있다. 그러나 새로운 접합법을 적용하기 위해서는 기존 제조과정상의 변경이 이루어져야 하므로 시간 및 비용면에서 매우 불리하다. 그러므로 기존 붙임접합법의 공정을 개선하여 소음을 낮추는 방안을 찾기 위하여 공정상의 문제점을 검토하였다.

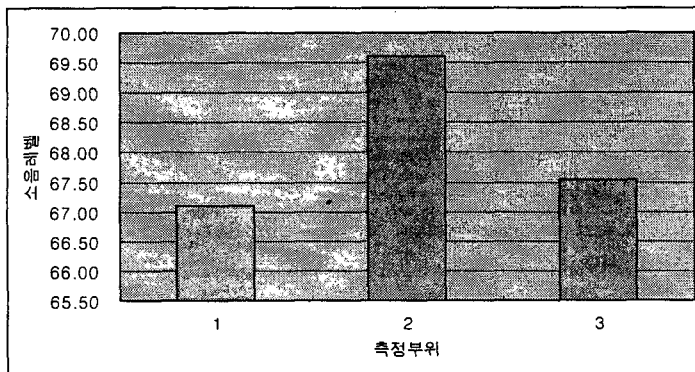


그림 5. 변압기 개선 후 각 측정부위별 소음레벨
(1 : 전위대차, 2 : 차량중심, 3 : TR아래)

검토한 결과에 의하면 변압기제조공정상의 철심과 코일의 조립시 불균인한 적층 및 불합리한 공극이 발생한다는 것을 확인하였다. 이러한 공정상의 문제는 작업자의 숙련도 또는 작업장의 환경등에 의하여 쉽게 발생할수 있으므로, 이의 방지를 위해서는 철저한 관리감독이 필요하다. 그림 은 이러한 기존의 공정상의 문제를 개선하여 불합리한 공극의 발생을 최소화 하였고, 개선된 변압기를 차량에 부착한 후 소음을 측정하였으며, 측정된 결과는 그림과 같다. 기존의 측정값에 비하여 매우 저감된 소음레벨을 보여준다는 것을 알수 있다.

3. 결론

지금까지 소음의 정의 및 측정과 관련된 기본적인 사항에 대하여 알아보았고, 도시철도차량성능 소음 시험기준에 관하여 살펴보았다. 이러한 시험기준을 만족시키고, 승객의 승차감을 보다 향상시키기위해서는 전동차내 소음레벨을 보다더 낮추는 것이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 실제로 측정된 전동차의 실내소음레벨값을 통하여 변압기가 가장 큰 소음원이라는 것을 확인하였고, 이에 대한 원인을 파악하여 변압기 소음저감방안으로서 철심적층구조 및 방법의 개선을 제시하였고, 이를 변압기에 적용하여 실제로 소음레벨이 감소하는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. Hiroshi E, Toshio S, " 변압기의 방음기술과 음장해석 ", Vol. 47 No. 3 2000.
2. "도시철도차량의 성능시험기준에 관한 기준", 건설교통부/한국철도기술연구원 2000.
3. 윤병도, " 전기기기 " 문운당, 1998