

유니텍스 구조의 차음성능 향상기술 개발

변준호* · 이종혁* · 김석현**† · 이재준*** · 기호철****

* 강원대학교 대학원 융합공학과, ** 강원대학교 기계융합공학부,
*** (주) 신일화학, **** 현대로템 응용기술연구팀

Development of Improvement Technology of Sound Insulation Performance of Unitex Structure

Jun-Ho Byeon*, Joong-Hyeok Lee*, Seockhyun Kim**†, Jae-Joon Lee*** and Ho-Cheol Ki****

* Dept. of Advanced Mechanical Engineering, Graduate School, Kangwon Nat'l Univ.

** Dept. of Advanced Mechanical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

*** Shinil Chemical co., ltd.

**** Hyundai - Rotem co.

(Received April 14, 2016 ; Revised May 25, 2016 ; Accepted May 25, 2016)

Key Words: Railway Vehicle(철도차량), Sound Transmission Loss(음 투과손실), Unitex(유니텍스)

초록: 유니텍스는 높은 강도와 우수한 단열성, 긴 수명 및 간편한 시공에 따른 저렴한 제작비 때문에 대부분의 도시철도 차량의 바닥 구조로 널리 사용되고 있다. 그러나 여러 가지 우수성에도 불구하고, 이 구조는 차량 적층재에서 중요한 차음성능 측면에서는 여전히 문제점을 갖고 있다. 기존 제품은 중량대비 차음성능의 척도인 질량법칙 투과손실치에 비해 현저히 낮은 투과손실을 보인다. 최근 차량 제작사와 시공사는 차음성능을 높이기 위하여 많은 노력을 시도하여왔으나 큰 효과가 없었다. 이에 본 산학협동 연구에서는 기존 제품 대비 5dB 이상 차음성능을 향상시키는 것을 목표로, 적층재의 구조개선 방안을 도출하고 개선효과를 실험적으로 검증한다.

Abstract: Unitex is widely used for the floor structure of urban railway vehicles because it shows good structural safety and heat insulation, has long life, and lowers the cost owing to easy installation. However, in spite of these merits, Unitex has a limit to the sound insulation performance, which is very important in vehicle structure. It shows a sound transmission loss considerably lower than the mass law value, which indicates the sound insulation performance per unit weight. Recently, railway vehicle manufacturers and Unitex supplier have tried to improve the sound insulation performance of Unitex, but meaningful results have not been achieved yet. Through the industry-university collaborative research, we propose structural improvement methods to increase the sound transmission loss by more than 5dB and we then verify the effect by performing experiments.

1. 서론

철도차량의 실내소음은 외부의 레일-휠 소음, 공력소음 및 각종 기계소음이 틈새를 통하거나 차체를 투과하여 들어오는 공기전달음과, 레일-휠 진동이 대차 마운트를 통하여 차체 바닥을 진동시켜 실내로 방사되는 고체전달음으로 구분된다. 바닥 적층재는 이 두 전달음의 가장 중요한 전달 경로이므로, 외부 소음을 효과적으로 차단하기 위해서는 차체의 기밀성을 높임과 동시에 충분한 투과손실과 우수한 제진

† Corresponding Author, seock@kangwon.ac.kr

성능을 갖는 적층구조를 만들어야 한다. 고속철도차량이 알미늄 압출재를 적층재의 주요소로 사용하는 과 달리,⁽¹⁾ 도시철도 차량에서는 Fig. 1의 유니텍스 적층구조를 바닥재로 사용하고 있다. 이 구조는 중량 대비 강도가 높고, 우수한 단열성과 긴 수명, 그리고 간편한 시공에 따른 낮은 제작 단가 때문에 대부분의 도시철도 차량의 바닥재로 사용되고 있다. 그러나 외부 소음을 차단하는 중량 대비 차음성능은 상당히 미흡하여 차량 제작사와 시공업체가 고민하는 사안이다. 고속철도 차량의 개발에서는 정부의 지원하에⁽²⁾ 차음 구조에 대한 장기적 연구가 이루어져 의미 있는 성과가 도출되었으나,^(3~5) 도시 철도 차량의 저소음화 문제는 차량 제작사와 소재 공급업체가 현장 연구를 제한적으로 수행하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존 제품 대비 5dB 이상의 차음성능을 향상시킨 유니텍스 신제품 개발을 목표로, 철도차량 제작사, 유니텍스 제작업체와 대학간의 협동연구를 수행하였다. 유니텍스 제작업체는 시제품의 화학적 조성에 대한 자료 제공과 시제품 제작을 담당하였고, 차량 제작사는 상용화 가능성 평가를, 대학에서는 차음성능 향상을 위한 구조개선 및 시제품에 대한 실험적 분석을 담당하였다. 연구 성과로서, 당초 목표치를 상회하여 차음성능을 5dB 이상 향상시킨 신제품 개발에 성공하였다. 이에 본 논문에서는 기존 유니텍스 제품의 문제점 분석, 차음성능의 개선 방법, 시험평가를 통한 신제품의 개발과정 및 성과를 소개한다.

2. 유니텍스 구조의 제원

도시철도 차량의 바닥재로 사용되는 유니텍스는 Fig. 1의 적층 구조로 되어있으며, 층별 제원을 Table 1에 보인다. Fig. 2는 철도차량 제작현장에서 유니텍스 바닥재의 시공과정을 보인다. Fig. 2(a)와 같이, 차량 바닥의 프레임 상에 외피 역할을 하는 두께 0.8mm의 스테인리스 주름강판(Corrugated steel panel)을 용접시킨 후, 중도 층과의 접착을 위하여 접착제인 에폭시 수지를 바른다. Fig. 2(b)와 같이 주름강판 위에 시공하는 중도는 이산화규소(SiO₂)를 주원료로 하는 1mm~5mm 크기의 경량입자가 에폭시수지로 결합된 다공 층으로, 적층 요소 가운데 중량이 가장 크다. 다공 구조이므로 중량대비 강도가 높고, 단열성이 우수하다. 중도위에는 Fig. 2의 (c)와 같이, 단단하면서도 잘 부스러지지 않는 상도(Flat coat) 층을 시공하여 중도의 입자를 보호하고 표면을 연마하여 편평하고 깨끗한 바닥면을 만들게 된다. 상도는 합성고무와 1mm 미만의 이산화규소 미립자에 세멘트를 섞어 내충격성을 높인 요소이다. 각 층은 적절한 온도

Table 1 Specification of Unitex structure

Specimen size (836mm x 836mm)	Mass (kg)	Thickness (mm)	Surface density (kg/m ²)
Flat coat + Floor covering	7.6	6.1	10.85
Base Coat	15.5	33.1	22.26
Corrugated panel	5.7	0.8	8.17
Floor total	28.8	40	41.28

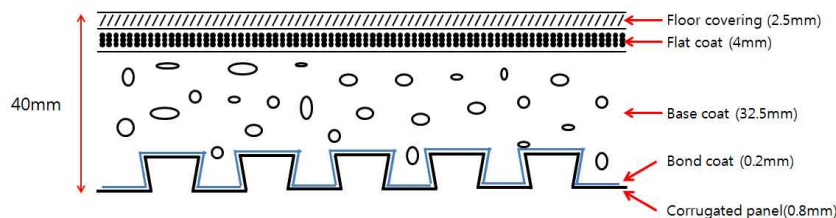


Fig. 1 Cross section of Unitex



Fig. 2 Process of Unitex construction

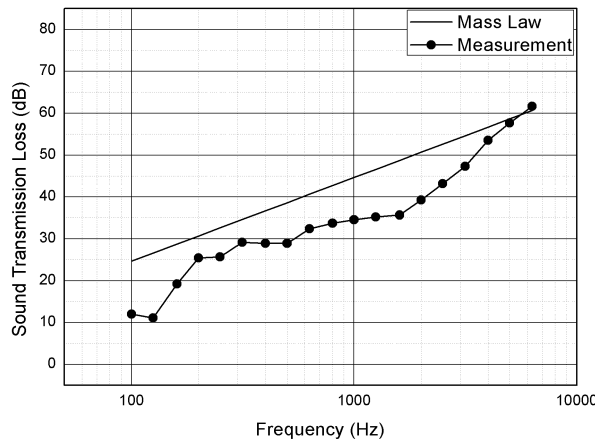


Fig. 3 Sound transmission loss of original Unitex.

환경하에서 충분한 건조과정을 거쳐 완성차의 제작 현장에서 시공되며, 최종적으로 완성된 유니텍스 상에는 고무매트를 씌어 실내 미관을 좋게 함과 동시에 유니텍스를 보호하면서 방수성, 단열성, 승차감을 더욱 높이게 된다. 이러한 유니텍스는 바깥의 주름강판과 다공성 중도층 때문에 중량대비 높은 강도를 보이며, 우수한 단열성을 갖는다. 동시에 현장에서의 시공도 복잡하지 않으므로 도시철도 차량에서 가장 경쟁력 있는 바닥재로 사용되고 있다.

3. 차음성능의 문제점

철도차량이나 자동차, 항공기와 같은 수송기계의 차체를 구성하는 판재에서는 중량을 고려한 투과손실이 차음성능의 중요한 평가인자이다. 중량대비 차음성능의 평가에는 질량법칙(Mass Law)⁽⁶⁾에 의한 투과손실을 널리 사용한다. Fig. 3은 기존 유니텍스 제품의 투과손실 측정치와 질량법칙 투과손실치를 비

교한 결과이다. 기존 제품은 철도차량의 주 소음원 대역인 2000Hz 아래에서 동일한 중량을 갖는 평판 대비 약 10dB 정도 낮은 투과손실을 보인다. 실험에서는 840mm x 840mm 의 크기로, 층별 시편과 적층 시편을 제작하여 ASTM E2249-02에 따라 인텐시티 투과손실을 측정하였다.⁽⁷⁾ 본 연구에서 사용한 측정 방법 및 장비, 잔향실 제원에 관해서는 선행연구에서 상술하였다.⁽⁸⁾

문제점 파악을 위하여 먼저 주름강판과 중도의 층별 투과손실을 개별적으로 분석하였다. Fig. 4(a)는 주름강판의 투과손실을 질량법칙치와 비교한 결과이다. 주름구조는 동일한 중량을 갖는 평판에 비해서 높은 굽힘 강성을 가지므로 차량 경량화에 유리하나, 중량 대비 차음성능은 크게 떨어지는 것으로 파악되고 있다. Windle과 Lam은 주름 단위에서의 국부공진이 투과손실을 하락시키는 주요인임을 밝힌바 있다.⁽⁹⁾ Fig. 5는 주름강판의 국부적 공진모드로, 500Hz 대역과, 1500Hz 대역에서 다수의 국부적 공진모드가 발생하며, 그 결과 Fig. 4(a)에서와 같이 이 대역에서의 투과손실이 크게 떨어지는 결과를 가져온다. 이에 대처 방안으로 선행 연구에서는⁽¹⁰⁾ 주름단위의 구조 변경과 효과적인 댐핑 처리 방안을 제시한 바 있다.

Fig. 4(b)는 중도의 투과손실을 보인다. 중도 층은 질량법칙치보다 30dB 정도의 매우 낮은 투과손실을 보여 훨씬 가벼운 주름강판보다도 차음성능이 크게 떨어진다. 실험결과 주 원인은 경량 골재 입자들이 에폭시수지로 결합되면서 입자 사이에 수많은 작은 공극이 형성되고 그 사이로 음파가 누설되기 때문인 것으로 밝혀졌다. 다공성 입자 구조가 중량대비 강도는 높일 수 있으나, 차음성능 측면에서는 매우 불리한 원인이 되고 있다. 따라서 중도 층에 대해서는 경량 입자와 결합제인 에폭시수지의 화학적 조성을 개선하여 중량과 강도를 유지하면서 투과손실을 높이는 구조개선 방안이 필요하다.

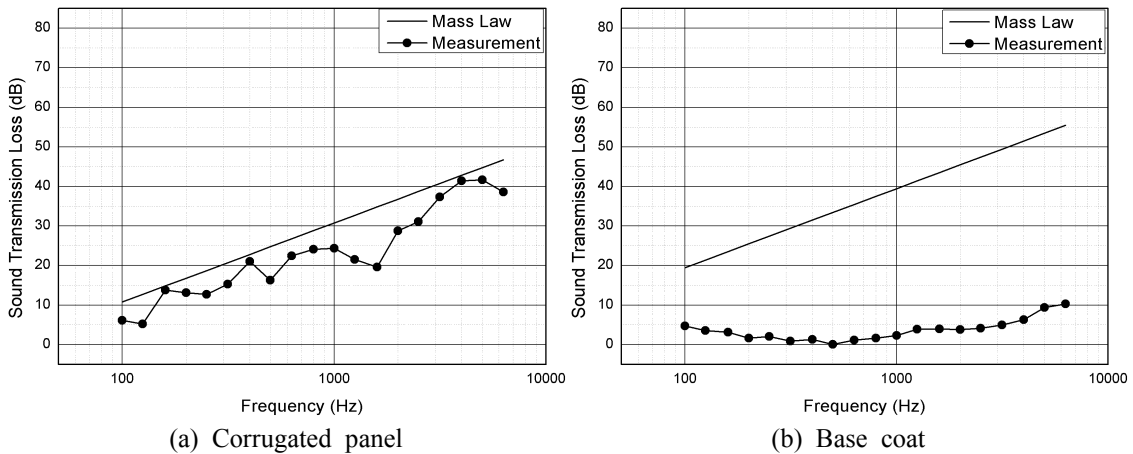


Fig. 4 Sound transmission loss of the layer

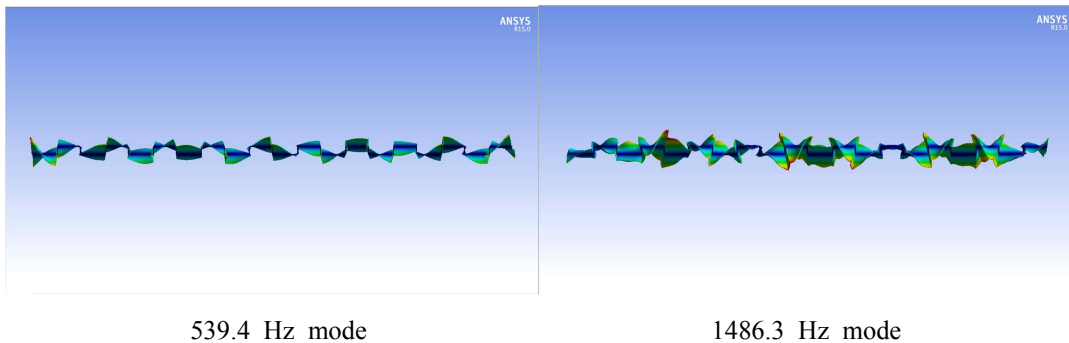


Fig. 5 Local resonance modes of the corrugated panel

4. 차음성능 개선 방안

4.1 주름강판의 개선

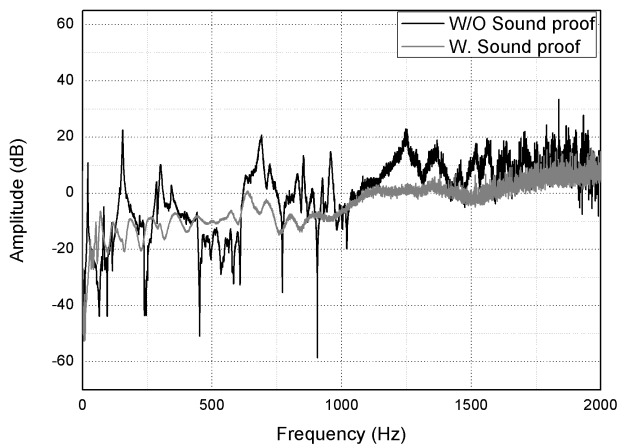
일차적으로 외부 소음이 직접 입사되는 주름강판은 스테인리스강으로 감쇠가 매우 작다. 선행연구에 따르면,⁽¹⁰⁾ 주름강판의 감쇠성능을 증가시키면 차음에 취약한 국부적 공진대역에서 진동을 크게 낮추고 차음성능도 높아지는 것으로 판명되었다. 이에 철도차량 차체에 널리 사용하는 점탄성 방음도료를 표면에 도포하고 차음효과를 분석하였다. 방음도료는 강판에 입사되는 음압을 낮춤과 동시에 강판의 감쇠성능을 증가시키는 효과를 통하여 차음성능을 높일 수 있다. 일차적으로 주름강판 단층에 대하여 방음도료의 도포량에 따른 주파수응답특성 및 투과손실을 평가하였다. 주름강판 무게의 15% 정도의 방음도료를 도포한 전후의 진동 주파수응답과 투과손실을 Fig. 6에서 비교한다. 방음도료 도포로, 공진피크 레벨은 10dB 이상 감소하고 이에 따라 투과손실도 10dB 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 다수의 국부 공진모드가 출현하는 500Hz와 1500Hz 대역에서 큰 폭의 투과손실 개선 효과를 볼 수 있다. 이로부터 철도차량에 사용되는 방음도료의 적용은 중량대비 차음성능의 향상에 큰 효과가 있음을 확인하였다.

방음도료에 의한 유니텍스의 총투과손실 증가 효과를 보기 위하여, 유니텍스 주름강판의 바깥 표면에 0.5mm 두께로 방음도료 도포하여 총투과손실을 측정하였다. Table 2에 개선된 층 구조를 보인다.

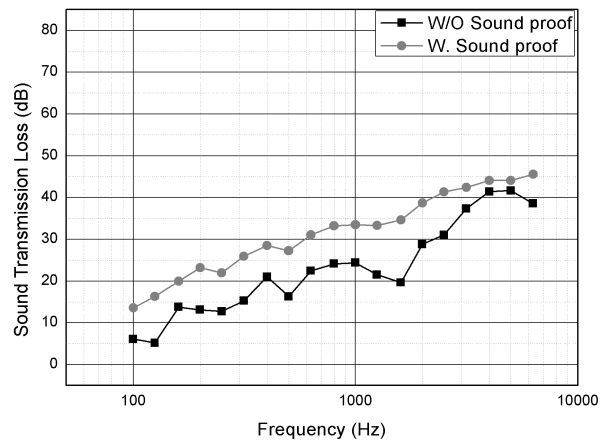
Fig. 7은 방음도료를 도포한 전후의 총투과손실을 비교한다. 0.5mm 두께 방음도료에 의한 유니텍스의 중량 증가는 거의 없음에도, 2000Hz 범위에서 3dB ~ 5dB 정도의 총투과손실 증가효과를 보이는 것은 매우 고무적이다.

Table 2 Types of floor layered panels

Type	Component	Mass [Kg]
Original	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 0.2mm + Corrugated Panel	28.8
Sound proof coating	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 0.2mm + Corrugated Panel + 0.5mm sound proof coat	29.0
Thick bond coating	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 2mm + Corrugated Panel	28.0
Finally improved	Floor Covering + Flat Coat + Hybrid Base Coat + Bond Coat 2mm + Corrugated Panel	27.3



(a) Vibration



(b) Transmission loss

Fig. 6 Sound proof coating effect

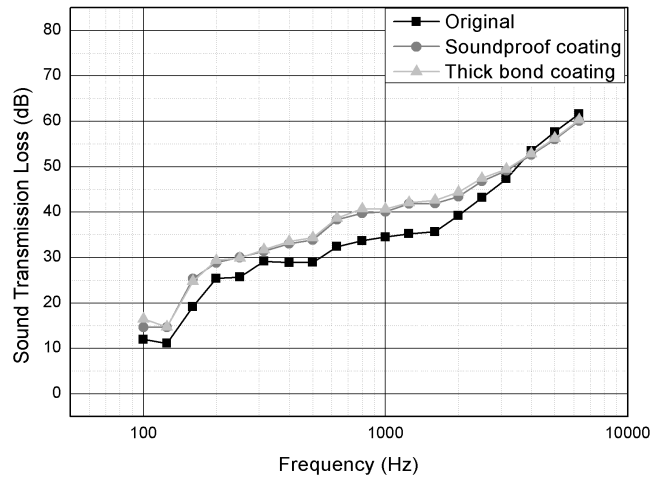


Fig. 7 Damping effect

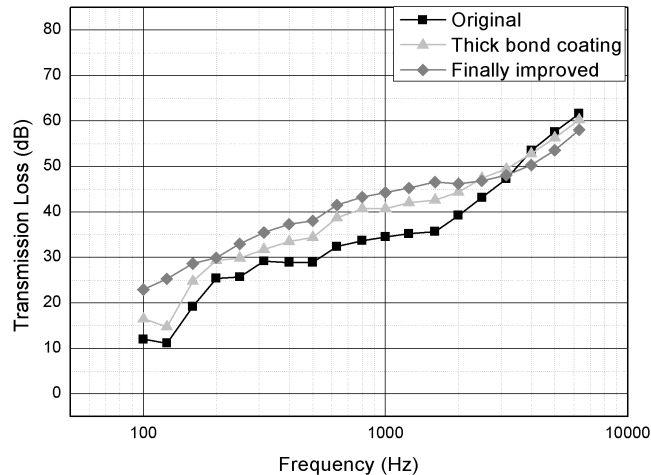


Fig. 8 Improvement effect

Fig. 6에서는 방음도료 효과와 함께 강판과 중도 사이의 접합층의 두께 증가 효과도 함께 비교한다. 주름강판의 외표면에 방음도료를 도포하는 작업은 차량의 바닥 밑에서 하는 불편한 작업이고 별도의 건조 시간을 요하는 공정이다. 이에 제진효과를 높이기 위하여 방음도료 도포하는 대신에, 주름강판과 중도 사이의 접합층(Bond coat)의 두께를 0.2mm에서 2mm로 늘리는 방안이 시도되었다. 이 방법은 차량 내에서 하는 작업으로, 기존의 공정에 따라 접합제의 양만 늘리는 간단한 작업이다. 따라서 시간과 비용 측면에서 방음도료보다 훨씬 유리하다. Fig. 7을 보면, 접착층의 두께를 증가시키는 것은 방음도료를 도포하는 것과 거의 같은 효과를 보인다. 증가된 접착층이 주름강판과 중도의 감쇠를 동시에 증가시키고, 중도의 누설 방지에도 기여함으로써 차음성능 향상을 가져온다.

4.2 중도의 개선

기존 제품의 가장 큰 문제는 입자 사이에 존재하는 많은 공극을 통하여 음파가 심하게 누설되어 차음성능이 떨어지는 것이었다. 중도 층의 개선 방안으로 입자의 크기를 줄여보았고, 중도와 상도 사이에 누설을 막는 얇은 우레탄 층을 삽입시켜 보았으나 적층재의 총투과손실에 대한 개선효과는 미흡하였다. 최종적으로, 입자의 결합제로 기존의 에폭시수지와 우레탄을 혼합시켜 이 혼합액으로 입자를 결합시킨 하이브리드 중도를 개발하였다. 혼합액은 기존의 에폭시수지보다 유동성이 좋아 경량 입자 사이의 공극을 상당 부분 채웠고, 그 결

과 입자사이의 접촉 면적을 넓혀서 강도와 댐핑을 모두 높였다. 총중량을 유지하기 위해서 에폭시와 우레탄의 배합율을 조정하여 혼합액의 밀도를 기존 에폭시수지보다 낮추었다. 최종적으로, 주름강판에 하이브리드 중도층을 적용하고 층간 접착층(Bond coat)을 2mm로 늘려 개선된 유니텍스 시제품을 만들었다. Fig. 8은 기존 유니텍스, 접착층을 2mm로 하고 기존의 중도를 사용한 유니텍스와 하이브리드 중도를 적용한 최종 신제품의 투과손실을 비교한다. 최종 신제품은 2mm 접착층에 기존 중도 적용 모델보다 중량의 증가 없이 2000Hz 아래에서 약 3dB의 투과손실 향상을 보인다. 이러한 결과는 하이브리드 중도가 기밀성이 높아진 점과, 하이브리드 결합층이 갖는 높은 댐핑 성능에 기인한다. 중량 증가 없이, 2000Hz 아래에서 최종 신제품은 기존 제품대비 5dB~10dB의 투과손실 향상을 보인다.

5. 결 론

도시철도 차량에 사용되는 유니텍스 적층재의 차음성능을 분석한 결과, 외피를 구성하는 주름강판은 주름 구조의 특성상 국부공진모드가 많이 발생하는 대역에서 차음성능이 취약하였다. 대처 방안으로, 외표면에 방음도료를 도포하거나 중도와의 사이에 접착층 두께를 증가시켰다. 그 결과, 두 경우 모두 2000Hz 아래에서 3dB ~ 5dB 정도의 총투과손실 개선효과를 보았다. 그러나 방음도료보다는 접착층 두께를 증가시키는 것이 시공시간과 비용 측면에서 훨씬 유리한 방안으로 최종 선정되었다. 한편, 중도층은 경량 입자 사이에 존재하는 많은 공극을 통하여 음파가 누설됨으로써 중량대비 차음성능이 크게 떨어지는 것으로 파악되었다. 개선 방안으로, 기존의 입자 결합체인 에폭시수지에 우레탄을 혼합한 새로운 결합제를 개발하여 중도에 적용하였다. 이 결합제는 기존의 에폭시수지에 비례 공극을 잘 채워 줌으로써 누설을 줄이고 결합력과 댐핑을 증대시켰다. 그 결과 중량 증가 없이 3dB의 투과손실이 증가하였다. 최종적으로 이 두 가지 방안을 함께 적용한 최종 신제품을 개발하였다. 시제품에 대한 실험적 검증 결과, 신제품은 기존제품대비 철도차량의 주 소음대역인 2000Hz 아래에서 5dB ~ 10dB의 총투과손실이 향상되었다.

후 기

본 연구를 위하여 시편 제작에 협조해 준 (주) 신일화학과 완성차 시공현장을 제공한 (주)로템에 감사드립니다. 산업통상자원부의 에너지인력양성사업 “풍력발전단지 차세대 핵심기술 고급트랙”(No. 20134030200240)의 지원에도 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, S. H., Seo, T. G., Kim J. T., Song D. H., 2011, "Sound Insulation Design of Aluminum Extruded Panel in a Next generation High Speed Train," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.(A)*, Vol. 35, No. 5, pp. 567~574.
- (2) <http://www.hstrain.re.kr/>
- (3) Kim, S. H., Jang, H. S., Kim, J. H., 2001, "Characteristics of Local Vibration Modes of the Aluminum Extruded Panels for Rail Road Vehicles," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 4, No. 3, pp. 87~93.
- (4) Kim, S. H., Paek, I. S., Lee, H. W., Kim, J. T., 2008, "Prediction Model of the Sound Transmission Loss of Honeycomb Panels for Railway Vehicles", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 5, pp. 465~470.
- (5) Park, J. H., Park, B., Kim D. K., Jeon, J. Y., Choi, S. H., 2010 "Sound Quality Characteristics for Interior Noise of High Speed Train," *Transactions of the The Korean Society for Noise and Vibration*

Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 774~781.

- (6) Beranek, L. L., Ver, I. L., 1992, "Noise and Vibration Control Engineering," John Wiley and Sons, INC., pp. 281~291.
- (7) ASTM E 2249 - 02, 2003, American Standards for Testing and Materials; Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Transmission Loss of Building Partitions and Elements Using Sound Intensity, American Standard Association.
- (8) Kim, S. H., Lee, H. J., and Kim, J. T., 2012, "Sound Insulation Strategy for the Tunnel Noise in a High Speed Train", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 4, pp. 315~322.
- (9) Windle, R. M., Lam, Y. W., 1993, "Prediction of the Sound Reduction of Profiled Metal Cladding," *Inter-Noise'93*, Vol. 2, pp. 999~1002.
- (10) Kim, S. H., Seo, T. G., Kim, J. T., 2010, "Improvement Effect of the Sound Insulation Performance of the Corrugated Steel Panel by Sound Absorbing and Damping Materials," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 5, pp. 476~480.