

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.12.1061>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

주름 강판의 모드 밀도에 따른 차음 성능 분석[§]

김석현^{**} · 변준호^{**} · 이중혁^{**}

* 강원대학교 메카트로닉스공학과, ** 강원대학교 대학원 기계융합공학과

Analysis Sound Insulation Performance of a Corrugated Steel Panel Through Modal Density

Seockhyun Kim^{**†}, Jun Ho Byeon^{**} and Joong Hyeok Lee^{**}

* Dept. of Mechatronics Engineering, Kangwon Nat'l Univ.,

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

(Received January 28, 2016 ; Revised July 26, 2016 ; Accepted September 2, 2016)

Key Words: Corrugated Panel(주름 강판), Sound Transmission Loss(음 투과손실), Modal Density(모드 밀도)

초록: 주름 강판의 주름은 강판의 중량당 굽힘 강성을 획기적으로 증가시킨다. 그러나 주름 강판은 같은 중량을 갖는 평판보다 낮은 차음 성능을 보인다. 특히, 특정한 주파수대역에서는 투과손실이 크게 감소한다. 이 문제의 주 요인은 주름단위에서의 국부적 공진으로 알려져 있다. 특정 주파수대역에서 다수의 국부적 공진모드가 발생하고 모드밀도가 급속히 증가한다. 본 연구에서는 음 투과손실과 모드 밀도 사이의 관계를 검토한다. 최종적으로, 중량의 증가 없이 주름 강판의 차음 성능을 향상시키기 위한 모드 밀도의 측면에서의 설계전략을 제시한다.

Abstract: Corrugation of a corrugated panel dramatically increases the bending stiffness per weight. However, corrugated panels show lower sound insulation performance than that of the flat plate having the same weight. Especially, in a particular frequency region, the sound transmission loss significantly decreases. Main reason of the problem is known as the local resonance. A number of local resonance modes occur above a certain frequency band and modal density rapidly increases. In this study, we investigate the relation of the sound transmission loss and the modal density. Finally, we propose a design methodology in terms of the modal density to improve the sound insulation performance of the corrugated panels without weight increase.

1. 서 론

요철 구조의 주름 강판은 건축 구조 및 수송기계의 적층재에 널리 사용되고 있는 중요한 요소이다. 특히 주름 강판은 중량대비 굽힘 강성이 매우 높아 철도차량의 경량화에 매우 유리하다. 그러나 굽힘 강성의 큰 증가효과와는 반대로, 주름 강판의 차음 성능은 동일한 중량을 갖는 평판에 비해서 불리해 진다. 그 원인으로, 굽힘 강성

의 큰 증가는 임계 주파수(Critical frequency)대역을 소음원 주파수 영역으로 떨어뜨림으로써 일치 효과(Coincidence effect)를 발생시켜 차음성능을 하락시킨다. 또한 주기적으로 반복되는 주름 구조는 단위 주름에서 굽힘이나 비틀림 변형을 보이는 국부적 진동모드(Local modes)를 다수 발생시킨다. Cordonnier-Cloarec 등⁽¹⁾은 알루미늄 주름 강판에 대해 고주파수 영역에서 차음 성능의 감소 가능성을 확인 하였으며, Windle 등⁽²⁾은 건축 차음재용 주름구조에서 국부공진이 발생될 때 투과손실이 크게 하락하는 것을 밝힌 바 있다. 이에 관련하여 Kim 등⁽³⁾은 다수의 국부적 공진모드를 갖는 주름 강판의 투과손실을 예측하는 이

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회(2015. 11. 10.-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, seock@kangwon.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

론 모델을 제시하였고, 주름의 제원을 변경하여 국부공진대역을 조절함으로써 차음에 유리한 구조설계⁽⁴⁾ 및 댐핑(damping) 처리 방법⁽⁵⁾을 제시하였다.

이러한 국부적 공진에 의한 차음 성능의 하락은 주름 강판과 유사한 주기적 코어 구조를 갖는 알루미늄 압출재에서도 발생한다.⁽⁶⁾ 이와 관련하여 Kim 등⁽⁷⁾은 차음에 유리한 압출재의 구조 설계 방법을 제안한 바 있다.

그러나 이러한 연구에도 불구하고, 국부적 공진에 의한 투과손실 하락이 어느 주파수 대역에서 어느 정도 발생하는가에 대해서는 아직 명확한 답을 주지 못하는 실정이다. 그 이유는 차음이 문제가 되는 주파수 대역에서 상당히 많은 수의 국부적 모드가 발생하는데다가, 국부적 모드들이 전체 모드(Global modes)와 서로 연성되기 때문이다.

본 연구에서는 주름 강판을 대상으로 주파수에 따른 모드 밀도의 변화를 조사하고, 모드 밀도와 국부공진 모드의 출현대역 및 차음 성능 하락 구간의 관계를 검토한다. 이 연구결과는 주름 강판의 차음 성능 하락 구간을 예측하고 대책을 수립하는 데에 유용할 것이다.

2. 주름 강판의 모드 밀도

2.1 주름 강판의 제원

Fig. 1은 3가지의 주름 간격으로 제작된 철도차량용 주름 강판 시편을 보인다. Fig. 2와 Table 1에 보이는 바와 같이, 주름 강판의 두께와 높이가 구속되는 현장의 사용 환경을 감안하여 주름간격

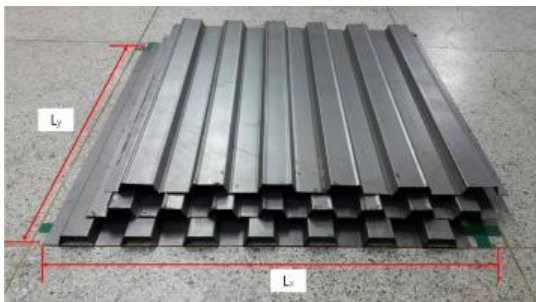


Fig. 1 Corrugated steel panels

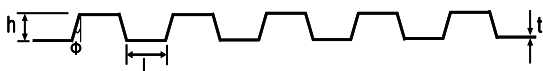


Fig. 2 Main design variables

(L)을 세 가지 경우로 하고 주름의 경사각도(ϕ), 높이(h), 두께(t)는 유지하였다. 그 결과 수송기계에서 중요한 면밀도(Surface density)는 Table 1에서와 같이 유사하다.

2.2 모드 밀도

모드 밀도는 모드의 수(N)를 주파수 대역폭(Δf)으로 나눈 값으로 식 (1)로 정의된다. 단순지지(Simply supported)된 등방성 평판의 경우, 주파수 ω 에 따른 모드밀도는 식 (2)로 구할 수 있다.⁽⁸⁾

$$n(f) = \frac{N}{\Delta f} \tag{1}$$

$$n_g(\omega) = \frac{S}{4\pi} \sqrt{\frac{M''}{B_g} - \frac{1}{4} \left(\frac{M''}{B_g}\right)^{1/4} \left(\frac{L_x + L_y}{\pi}\right)} \omega^{-1/2} \tag{2}$$

S는 평판의 단면적, M'' 은 평판의 면밀도, L_x 과 L_y 는 평판의 x,y 방향의 길이이다. 평판의 굽힘강성 B_g 는 아래 식 (3)으로 정의된다.

$$B_g = Et^3/12(1-\nu^2) \tag{3}$$

t는 등방성 평판의 두께, ν 는 평판의 포아송비(Poisson's ratio), E는 영률(Young's modulus)이다. Fig. 3은 Fig. 1의 시편과 동일한 크기와 두께를 갖는 등방성 평판에 대하여 식 (2)와, 유한요소 해석을 수행하여 구한 모드밀도를 비교한 결과이다. 유한요소 해석에는 ANSYS 15.0 프로그램을 사용하였다. 스테인레스 스틸 재질의 평판을 모델링 하여 L_x 와 L_y 방향으로 각각 50등분으로 메쉬를 사용하였으며, 단순지지 경계조건을 적용하였다. 유한요소 해석치는 100 Hz의 간격으

Table 1 Specification of Corrugated steel panels

Model	S1	S2	S3
Height [mm]	27	27	27
L_x [mm]	836	836	836
L_y [mm]	836	836	836
Plate Thickness [mm]	1.2	1.2	1.2
Surface density [kg/m ²]	12.3	12.6	13.1
Length [mm]	60	50	40
Angle [°]	20	20	20
Young's Modulus	2 x E11 Pa		
Mass density	8,000 kg/m ³		

로 주파수를 표시하되, 표시된 주파수를 중심주파수로 하는 1/3옥타브 대역폭에 대한 평균 모드 밀도 값을 산출하였다. 평판의 경우 전 주파수 대역에서 모드 밀도가 대체적으로 완만하다. 저주파수 대역에서는 모드 수가 작고, 1/3옥타브 대역폭도 좁아 해석과 이론식의 모드 밀도 평균치에 차이를 보이나, 고주파수대역으로 올라가면서 모드 수도 많아지고 대역폭도 넓어져 평균화된 모드 밀도는 해석과 이론치가 접근한다.

그러나 주름 강판의 경우에는 모드 밀도를 이론적으로 구하기가 어렵다. 평판과 달리 주름단위에서 변형을 보이는 다수의 국부적 모드들이 발생하고 이들이 전체 모드와 연성되기 때문이

다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 해석으로 주름 강판의 모드 밀도를 산출하였다.

Fig. 4는 Table 1의 S1모델에 대한 유한요소 해석을 수행한 결과이다. 단순지지 조건하에서 발생하는 주름 강판의 전체 모드와 국부적 모드를 보인다. 전체 모드는 판 전체의 굽힘이나 비틀림 변형을 보이며, 공진 주파수는 판재의 주름 제원뿐만 아니라, 크기와 경계조건에 지배된다. 반면, 국부적 모드는 전체적인 변형보다는 주름단위에서의 변형이 심한 모드로, 공진 주파수는 판재의 크기나 경계조건에는 큰 영향을 받지 않으며, 주름의 제원에 지배된다. 통상적으로 저 주파수대역에서는 전체 모드 특성을 보이다가 어느 정도 주파수대역이 높아지면 국부적 공진 모드가 출현한다. 국부적 공진 모드가 나타나기 시작하는 주파수대역은 주름의 제원에 따라 다르며 전체 모드와 다소 연성되기도 한다. 이전의 연구^(4,5)에서는 주름 단위의 변형이 두드러진 모드를 국부적 공진 모드로 주관적으로 판정하여 국부적 공진 모드가 처음 나타나는 주파수 대역을 투과손실의 하락 주파수대역으로 간주하였다.

본 연구에서는 국부적 모드가 출현하게 되면 모드 밀도가 크게 증가하는 점에 착안하여 모드 밀도의 변화와 음 투과손실 사이의 관계를 검토하였다.

Fig. 5는 3개의 시편을 대상으로 유한요소 해석으로 산출한 주름 강판의 모드 밀도를 보인다. 1000 Hz 아래에서는 3개의 시편이 비슷한 모드 밀도를 보인다. 이는 평판의 모드 밀도 변화와 비슷한 경향이다. 그러나 1000 Hz 이후 평판과 달리 모드 밀도가 급증하는 주파수 대역이 관찰된다. 이러한 급증 대역은 시편에 따라 다른데, 주름 간격이 S1에서 S3로 짧아지면서 최대 모드밀

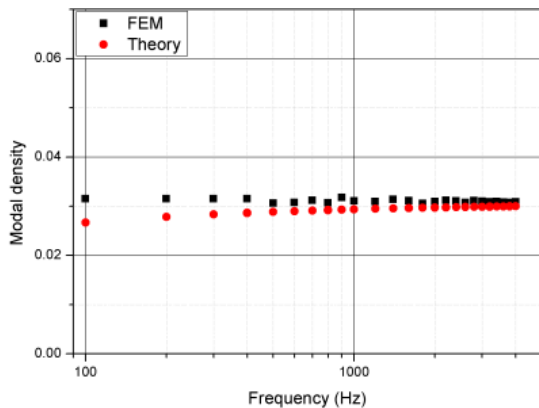
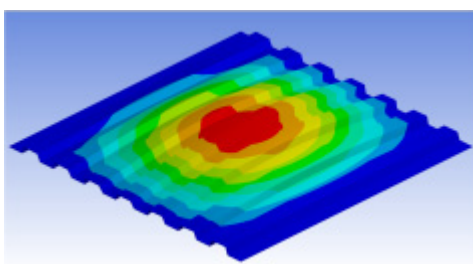
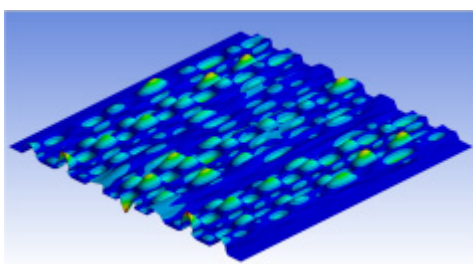


Fig. 3 Modal density of flat panel



(a) 1st Global mode (161.78 Hz)



(b) Local mode (2204.7 Hz)

Fig. 4 Vibration modes of a corrugated panel

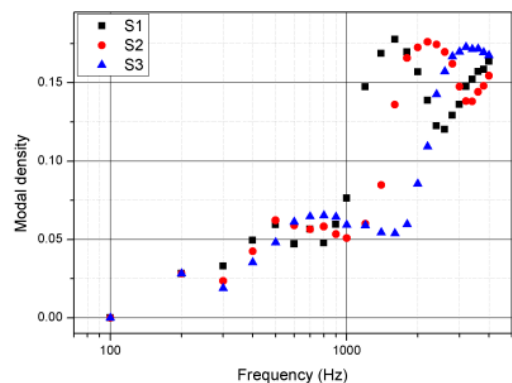


Fig. 5 Modal density of corrugated steel panels

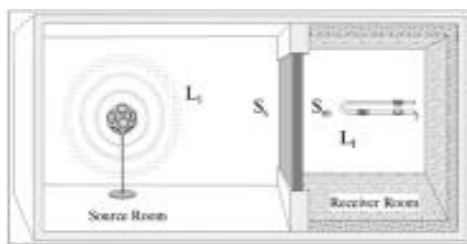
도를 보이는 대역이 1600 Hz, 2200 Hz, 3200 Hz로 높아지고 있다. 전체 모드만으로는 이와 같은 급등 현상이 발생할 수 없으므로, 국부적 공진모드 출현이 그 원인임을 알 수 있다.

3. 음 투과손실과 모드 밀도

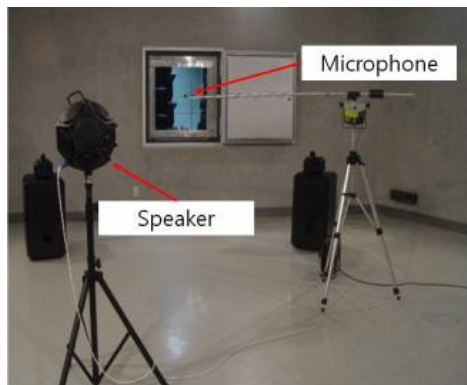
Table 2는 측정에 사용된 장비이다. ASTM E2249-02⁽⁹⁾에 따라 음원실의 스피커에서 발생하는 백색랜덤소음에 의한 확산음장(White noise)의 음향 인텐시티(L_1)를 마이크로폰을 이용하여 측정하고, 수음실의 측정면상 M개의 부분 면적에서의 평균 인텐시티(\bar{L}_T)를 인텐시티 프로브를 스캐닝하여 30초간 측정하였으며, 식 (4)에 적용해 투과손실(TL)을 산출하였다.

Table 2 Measurement devices

Devices	Models
Signal generator	35670A (HP)
Loud speaker	801 (B&W)
Omni-directional speaker	Type 4296 (B&K)
Diffuse field microphone	Type 4942 (B&K)
Rotating microphone boom	Type 3923 (B&K)
Intensity probe	Type 3595 (B&K)
Signal analyzer	Type 3560 (B&K)



(a) Measurement method



(b) Reverberant room

Fig. 6 Experimental set up

$$TL = [L_1 - 6 + 10\log(S_s)] - [\bar{L}_T + 10\log(S_m)] \quad (4)$$

여기서 S_s 는 시편의 면적(836 x 836 mm)을, S_m 은 측정면 면적(836 x 836 mm)을 의미한다. Table 3는 잔향실의 제원을 보인다. 흡음 처리된 수음실(Receiver room)의 배경소음은 25 dB(A)이고, 잔향실은 인텐시티 측정기준인 ASTM E2249-02 Annex A2의 제 조건을 만족시켰다.

Fig. 7은 음 투과손실의 측정결과이다. 투과손실은 세 경우 모두 각각 2개의 주파수 대역에서 급락하면서 직선으로 표시된 필드입사음 질량법칙(Field incidence mass law)치보다 떨어진다. 200 Hz 아래의 저주파수 대역의 하락은 세 시편 모두 공통적인 현상으로, Fig. 4(a)에 보이는 1차 굽힘 진동모드의 공진에 기인한다. 주름 강판의 크기가 같음과 동시에 주름 간격의 차이가 작으므로 전체 공진모드의 1차 주파수는 대동소이하다. 실제 차량에서는 주름강판이 본 연구의 시편보다 훨씬 크다. 따라서 전체 모드의 공진 주파수는 훨씬 낮은 대역으로 내려가므로, 전체 모드의 공진은 차음 측면에서 큰 문제가 되지 않는다.

문제는 1000 Hz 이후에서 나타나는 투과손실의 급락이다. 철도차량의 주요 소음원 대역은 대략 2000 Hz 까지로 고주파수대역으로 가면서 소음원의 파워는 작아진다.⁽¹⁰⁾ 따라서 이 대역에서의 투과손실의 하락은 고주파수 소음의 차음 문제를

Table 3 Specification of the reverberant room

Room Volume	240.75 m ³
Cut off frequency	100 Hz
Background noise	25.7 dB(A)
Opening size	840 mm × 840 mm

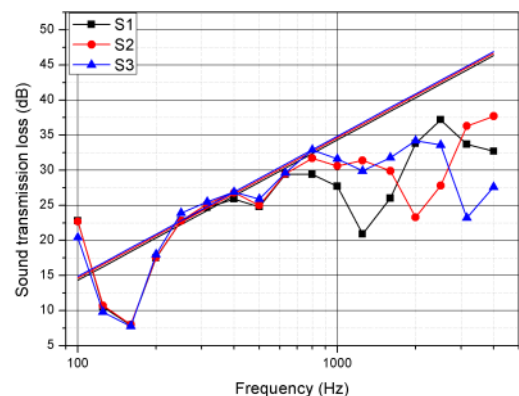


Fig. 7 Sound transmission loss (STL) of corrugated steel panels

야기할 수 있다. 투과손실의 급락 대역은 S1에서 S2, S3로 가면서 높아져 전술한 모드 밀도 변화와 관련성을 보인다. Fig. 8은 투과손실과 모드 밀도의 변화를 비교한 결과이다. 흥미로운 결과로, 세 가지 주름 강판 모두 모드 밀도가 최대가 되는 주파수대역에서 주름강판의 투과손실이 급락하고 있다. 이 결과는 최대 모드 밀도 대역을 구하면 주름 강판의 투과손실이 폭락하는 대역을 예측할 수 있음을 의미한다. 본 시편에서는 주름 간격 이외의 다른 조건은 유지되었다. 따라서 주름 단위의 굽힘 변형에 의한 국부적 공진의 주파

수는 주름간격이 짧아지면서 높아질 것이다. 그 결과 모드 밀도에 큰 변화가 생기는 대역이 다르게 나타나고 있다. Table 1에 주어진 주름간격의 변화는 전체 모드의 공진주파수에는 거의 변화를 주지 않았다. 그러나 시편 전체의 굽힘 강성을 유지하면서 주름 단위의 국부적 강성은 크게 증가시켜 모드 밀도가 급증하는 주파수 대역을 고주파수 영역으로 올릴 수 있었다.

4. 결론

평판의 모드 밀도는 주파수에 따라 큰 변화가 없으나, 주름 강판에서는 변화가 심하고 주파수가 증가하면서 모드 밀도가 급증하는 주파수대역이 발생하였다. 그 원인은 주름 단위에서 변형을 보이는 많은 수의 국부적 공진모드가 나타나기 때문이다. 이러한 국부적 공진모드가 음파에 의하여 가진될 때 큰 공진으로 차음능력이 떨어진다. 주름 강판의 투과손실을 측정된 결과, 모드 밀도가 최대가 되는 주파수대역과 투과손실이 하락하는 주파수대역이 서로 일치하는 것을 확인하였다.

이로부터 주름 강판의 설계 단계에서 유한요소 해석으로 모드 밀도를 계산하면, 음 투과손실이 급락하는 대역을 예측할 수가 있다. 뿐만 아니라, 구조변경을 통하여 투과손실의 급락대역을 소음원 주파수대역 밖으로 이동시키는 것이 가능하다. 본 연구에서는 주름 간격의 변화만으로 중량을 유지하면서 최대 모드 밀도 대역을 높여 차음 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 주름의 두께와 높이 등 다른 설계인자들을 변화시키는 경우에도 동일한 방법으로 모드 밀도의 변화를 예측하여 차음대책을 수립할 수가 있다.

후 기

본 연구는 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-520150054)와 산업통상자원부의 에너지인력양성사업 “풍력발전단지 차세대 핵심기술 고급트랙”(No. 20134030200240)의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌 (References)

(1) Cordonnier-Cloarec, P., Pautin, S. and Biron, D.,

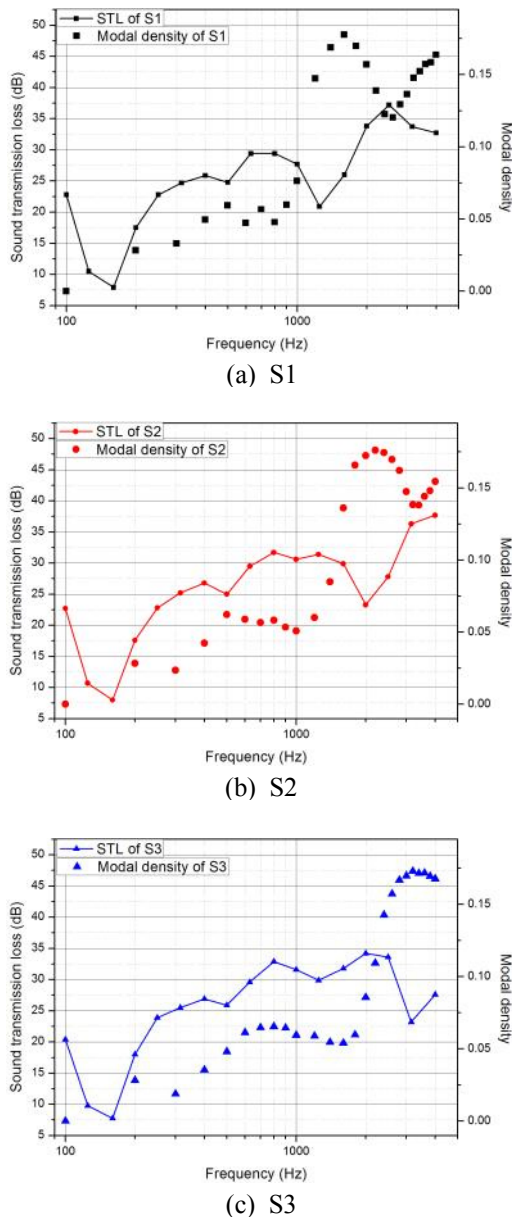


Fig. 8 Modal density and STL of corrugated steel panels

- 1992, "Contribution to the Study of Sound Transmission and Radiation of Corrugated Steel Structures," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 157, pp. 515~530.
- (2) Windle, R. M. and Lam, Y. W., 1993, "Prediction of the Sound Reduction of Profiled Metal Cladding," *Inter-Noise'93*, Vol. 2, pp. 999~1002.
- (3) Kim, S. H., Paek, I. S., Lee, H. W. and 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.
- (4) Kim, S. H., Lee, H. W., Kim, J. T. and Kim, J. C., 2010, "Sound Insulation Design of the Corrugated Steel Panel Considering Local Resonance," *Journal of the KSNVE*, Vol. 20, No. 7, pp. 672~676.
- (5) Kim, S. H., Seo, T. K. and 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.
- (6) Kim, S. H., Park, J. C. and Kim, J. N., 2000, "Sound Transmission Loss of Aluminum Extruded Panels for Railway Vehicles," *Transactions of KSNVE*, Vol. 10, No. 4, pp. 662~668.
- (7) Kim, S. H., Seo, T. G. Kim, J. and Song, D., 2011, "Sound Insulation Design of Aluminum Extruded Panel in Next-Generation High-Speed Train," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. (A)*, Vol. 35, No. 5, pp. 567~574.
- (8) Xie, G., Thompson, D. J. and Jones, C. J. C., 2004, "Mode Count and Modal Density of Structural Systems: Relationship with Boundary Conditions," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 274, pp. 621~651.
- (9) ASTM E 2249 - 02 : American Standards for Testing and Materials, 2003, Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Transmission Loss of Building Partitions and Elements Using Sound Intensity, American Standard Association.
- (10) Choi, S. H., Kim, J. C., et al., 2004, "Interior Noise of a KTX Vehicle in a Tunnel," *Proceedings of Annual Conference of the Korea Society for Railway*, pp. 88~92.