

# 철도 차량용 알루미늄 압출재의 국부진동 모드특성

## Characteristics of Local Vibration Modes of the Aluminium Extruded Panels for Rail Road Vehicles

김석현<sup>1</sup>                      장호식<sup>2</sup>                      김정현<sup>3</sup>  
Seock-Hyun Kim,            Ho-Sik Jang,                Jung-Heon Kim

### Abstract

Characteristics of the local vibration modes of an aluminium extruded panel are investigated by the finite element analysis and modal testing. Practical methods to increase the damping of the local resonances are proposed. Effects by filling urethan foam in the core cavity and by coating tar on the panel surface are compared by experiments. Modified panel structures to shift the local resonance frequency band are proposed. The results of the study are utilized to predict the severe local resonances in the aluminium extruded panels and prevent their undesirable effect on the sound insulation.

### 1. 서론

철도차량에서 사용되는 강판이나 알루미늄 판재는 굽힘 강성을 효과적으로 증가시키기 위하여, 주름구조로 제작된다. 현재 도입된 TGV-K(A) 모델에서는 바닥재에 주름강판 구조를 사용하고 있으나, 차세대 한국형 고속전철에서는 바닥, 측면 및 천장등 차실을 둘러싸는 대부분의 판재에 허니콤(주름구조) 알루미늄 압출재를 적용하여 경량화 시키고 있다.[1] 그러나, 주름 판재는 높은 횡 하중을 지지하는 장점에도 불구하고, 차음 성능면에서는 오히려 동일한 면적 당 질량(면밀도)을 갖는 등가 평판에 비하여 불리한 몇 가지 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 이에 관련하여, 최근 주름 판재를 포함하는 철도차량용 다층재의 차음성능에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.[2,3] 실내 소음은 차실을 둘러싸는 판재가 외부로부터의 음향파위를 얼마나 차단하는가에 따라 결정된다. 허니콤 압출재는 몇가지 주 요인에 의하여 차음성능이 저하된다. 굽힘 강성의 증가가 판재의 임계주파수를 크게 낮추어 사용 주파수대역으로 떨어뜨림으로써, 투과손실(transmission loss)이 저하되고, 코어부의 주기적인

주름단위에서 발생하는 국부적 공진에 의한 차음성능의 급격한 하락, 그리고 고주파수 대역에서 코어 내부 공기층의 공명에 의한 차음성능이 저하된다. 이러한 요인으로 주름형 구조는 주파수 대역별로 예측치보다 훨씬 낮은 차음성능을 가질 수 있다. 특히, 국부적 공진은 해석적인 방법만으로는 차음성능에 미치는 효과를 예측하기가 어렵다. Windle과 Lam[4], Zheng [5]은 다양한 종류의 주름 강판을 대상으로, 주름구조의 국부적 공진에 의하여 투과손실이 급격히 저하될 수 있음을 해석 및 실험적으로 규명한 바 있다. 최근, 알루미늄 압출재의 경우에도 이와 같은 국부적 공진에 의하여 투과손실이 급격히 저하되는 것이 저자들에 의하여 실험으로 확인된바 있다.[6] 본 연구에서는 허니콤형 알루미늄 압출재 시편을 대상으로, 주름 단위의 국부 공진 모드가 어떠한 주파수 대역에서 출현하는지를 설계단계에서 예측할 수 있음을 보이고자 한다. 국부 공진주파수의 예측에는 유한요소해석을 이용하며, 해석결과는 모드시험 결과를 통하여 비교된다. 또한, 압출재의 국부 공진 주파수대역을 이동시키기 위한 구조변경 방안도 제시된다. 마지막으로, 국부 공진 모드의 댐핑을 증가시키기 위하여 코어부에 폼재 충진시키는 방안과 압출재표면에 댐핑재를 피복시키는 방안의 효과를 실험적으로 평가하여, 현장에서의 압출재 차음설계에 유용한 데이터를 제공하고자 한다.

\*1 강원대학교 교수, 정회원

\*2 (주) 세방인터내셔널

\*3 강원대학교 석사과정

## 2. 압출재의 주름(허니컴)구조

차세대 한국형 고속철도 차량에서는 Fig. 1에서와 같은 주름(허니컴)구조가 반복되는 알루미늄 압출재가 차음재로 사용되며, 하중을 지지하는 중요한 기능을 갖는다. 이러한 구조에서는 일정 주파수대역 이상에서 주름단위의 국부적 진동모드가 발생된다. 이러한 국부적 공진 모드는 압출재의 크기나 지지조건에 영향을 받는 전체 굽힘모드(overall bending modes)와는 달리, 코아부의 주름 사양에 의하여 그 주파수대역이 결정된다. 음파가 압출재 표면에 입사되어 압출재를 가진하게 되면 공진주파수 대역에서 이러한 국부적 구조모드가 쉽게 공진되고, 그 결과 반대면에서 많은 양의 음을 방사하게 된다. 이러한 현상은 압출재의 투과손실을 현저히 저하시켜, 차음성능을 악화시키는 결과를 초래한다.[4] Table 1은 본 연구에서 사용된 압출재 시편의 제원을 보인다. 차량내의 사용 위치에 따라 유사한 구조에 조금씩 다른 치수를 가진다. 본 연구에서는 바닥재의 시편을 검토 대상으로 한다.

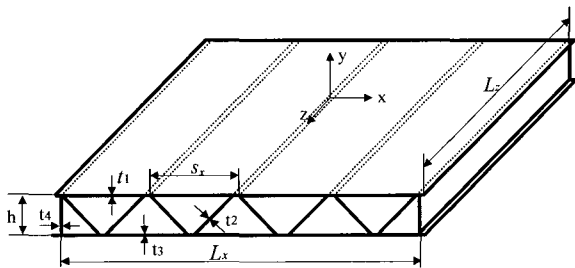


Fig.1 Design variables of the extruded panel.

Table 1. Specification of Aluminum Extruded Panel Specimen

Young's Modulus E	$71.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
mass density $\rho$	$2800 \text{ kg/m}^3$
poisson's ratio $\nu$	0.33
panel height h	80.5 mm
plate thickness $t_1, t_3$	2.8 mm
core thickness $t_2, t_4$	2.5 mm
panel dimension, $L_x \times L_z$	520mm $\times$ 365mm
core length, $S_x$	130mm

## 3. 압출재의 진동모드 해석

### 3.1 2차원 진동해석 모델

압출재 주름 구조에서 Fig.1의 z축 방향으로서는 일정한 형상을 유지한다. 이 경우, 단면 구조에 대한 2차원 유한요소해석 모델을 이용하면 단면모드(z축방향으로는 균일한 변형을 갖는 모드)에 대한 공진주파수 특성을 효과적으로 파악할 수 있다. Fig.2는 Table 1의 주름 사양에 16개의 주름을 가지는 압출재가 양단 단순지지되는 경우의 해석결과이다. 압출재가 길므로, 전체 모드가 저주파수 대역에서 나타나고, 540Hz 부근부터는 코아부 주름에 변형이 발생하는 국부모드가 출현한다. Fig.3과 Fig.4는 시편의 크기를 1/2과 1/4로 줄였을 때, 1,2차 국부 공진모드를 보인다. 크기가 줄어도 국부 공진주파수 발생대역은 크게 변하지 않는다. 이는 전체모드가 압출재의 길이와 지지조건에 매우 민감한 것과는 상이한 특징이다. 따라서, 어느 정도의 주름 수를 갖는 시편이면 크기가 작더라도 국부 모드의 특성을 파악하는데 크게 문제되지 않는다.

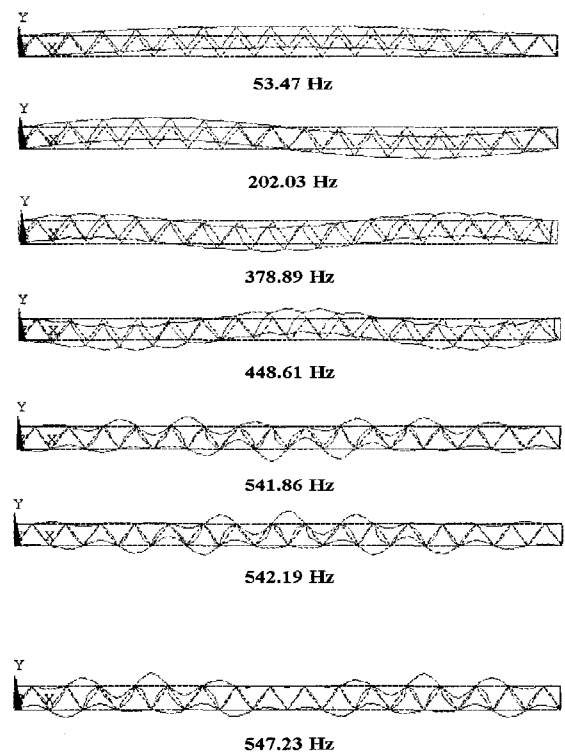


Fig.2 Vibration modes of the extruded panel.

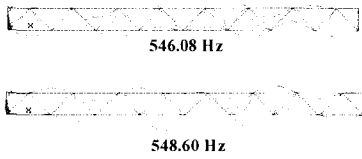


Fig.3 1st and 2nd local modes of 1/2 scale panel

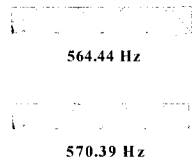


Fig.4 1st and 2nd local modes of 1/4 scale panel

3.2 3차원 해석모델

국부진동 모드 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서 3차원 모델을 사용한다. 시편의 실험치와 비교하기 위하여 시편과 같은 4개의 주름수를 갖는 압출재를 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 주름 간격을 10개로 요소로 분할하여, 5100개의 평판요소로 모델링하고 ANSYS 5.5를 사용하여 모드해석 하였다.[7] Fig.5는 해석결과를 보인다. 시편이 짧으므로 저주파수 대역에서 전체 모드는 나타나지 않고 처음부터 국부 공진 모드가 출현한다. 그림에서 국부 진동 모드는 617Hz부터 발생하고 있으며, 좁은 주파수 간격으로 다수의 진동모드가 발생하고 있다.

4. 모드시험

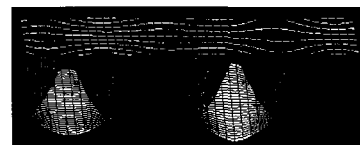
유한요소해석 결과의 검증을 위하여 모드시험을 수행하였다. Fig.6에서와 같이 충격 해머에 의한 가진력과 시편상의 가속도를 측정하여 주파수 응답함수를 구하였다. 모드변수는 피크별로 다항 커브 피팅 (polynomial curve fitting)법으로 구하였다.[8] Fig.7은 압출재 상판의 주파수 응답함수 측정치를 보인다. 유한요소 해석 예측치에 가까운 604Hz부터 다수의 국부 진동모드가 발생한다. 이는 저자들에 의하여 보고되었던 차음성능 연구에서 차음성능이 크게 떨어지기 시작하는 주파수대역에 거의 일치한다.[6]



617.5 Hz



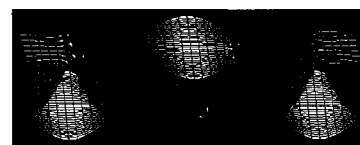
643.4 Hz



651.2 Hz



653.4 Hz



682.1 Hz



698.7 Hz

Fig.5 Local resonance modes of the extruded panel.

1차 공진피크의 감쇠비는 0.003 정도로 매우 낮게 측정되었으며, 다른 공진 피크들도 유사하게 낮은 감쇠를 보인다. 모드시험으로 구한 압출재 시편의 진동모드를 Fig.8에 보인다. 가진이 어려운 내부 코어부를 제외하고, 상판과 하판상의 34개 지점에서 가진하고, 26번 위치에서 가속도를 측정하였다. 해석치와 비슷한 주파수대역에서 1차 공진이 발생하고 있다. 해석에서 나오는 진동 모드가 측정에서는 다수 누락되는 것을 볼 수 있다. 현실적으로 코어 내부에서의 가진 및 측정이 어려워, 측정 및 가진이 평판 상하판으로 제한된 데에 기인한다. 그러나, 상당한 수의 국부 공진 모드가 존재하므로, 하나 하나를 예측하는 것보다는 국부공진에 의하여 차음성능이 저하되기 시작하는 주파수대역을 예측하는 정도로도 차음설계에 큰 도움이 될 것이다.

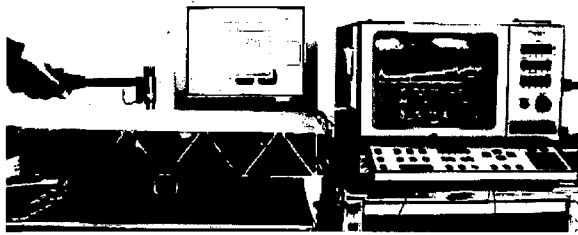


Fig.6 Modal test for estimating modal parameters.

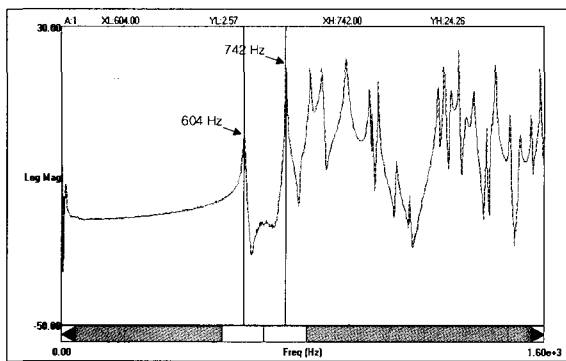
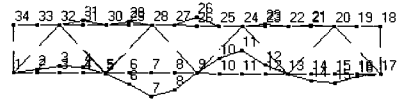
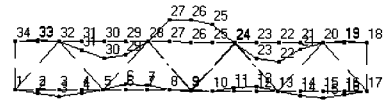


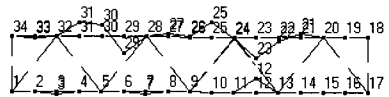
Fig.7 Frequency response function of extruded panel.



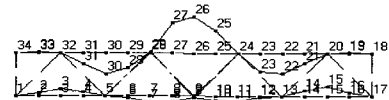
605.7Hz



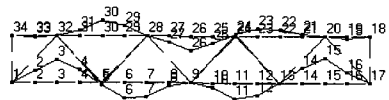
740.0 Hz



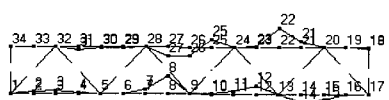
790.6 Hz



815.6 Hz



853.2 Hz



877.3 Hz

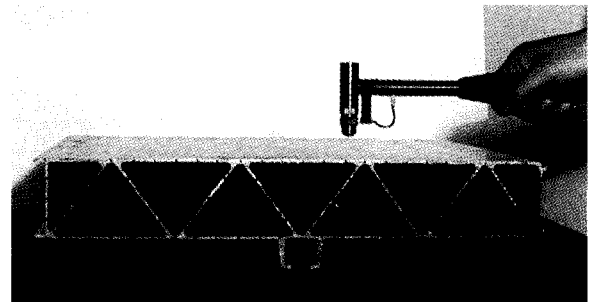
Fig.8 Local vibration modes by modal test.

5. 국부 공진의 대책

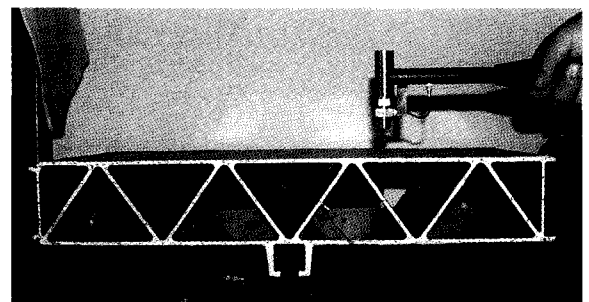
국부 모드의 공진에 의한 차음성능 저하를 예방하기 위해서는 압출재의 감쇠를 최대한 증가시킬 필요가 있다. 이를 위해서 현실적으로 코어부를 폼재로 충전시키는 방법과 압출재에 타르와 같은 점성재를 피복시키는 방법이 있다. 여기서는 두가지 방법을 적용하되, 압출재 대비 동일한 중량의 재료를 사용함으로써, 중량 증가대비 감쇠효과를 비교하였다. Fig.9는 우레탄폼재를 충전한 시편과 타르성 점착제를 피복시킨 시편을 보인다. 두 방법의 효과를 Fig.10에서 비교한다. Fig. 10 (a)에서 폼재의 충전 양을 압출재 중량의 5% ~ 10%까지 증가시킬 때, 충전량에 따라 상당한 크기의 감쇠 증가효과를 관찰 할 수 있다. 1차 공진피크의 모드 감쇠비를 구한 결과 Table 2에서 볼 수 있듯이, 압출재만의 감쇠비 0.0028로부터, 폼재를 10% 충전할 때, 감쇠비 0.028로, 10배 증가하는 것으로 나타났다. 2차 이후의 공진 피크에서는 1차 피크보다 더욱 큰 감쇠치의 증가를 확인할 수 있었다. 감쇠치의 증가는 공진 피크 레벨을 감소시켜 차음성능의 저하를 상당히 완화시킬 것이다. 이러한 감쇠의 증가는 내부에 완전히 충전된 폼재가 판재의 횡진동을 효과적으로 억제할 수 있도록 충분히 밀착되었기 때문이다. 따라서, 부분적으로 충전되어 판재에 완전 밀착이 안되는 상태는 적극 피하여야 할 것이다. 타르재를 피복시킨 결과는 Fig.10 (b)와 Table 2에서 볼 수 있다. 7%와 10%의 중량을 피복시킬 때, 폼재보다 감쇠의 증가 효과는 상대적으로 매우 작다. 또한 폼재의 경우, 압출재에 접착되지 않으므로 직접적인 질량 증가효과를 주지 않고 따라서 공진 주파수의 감소가 거의 없는 반면에, 피복은 주름재 면밀도를 증가시켜 공진주파수가 감소되고, 그 결과 보다 낮은 주파수대역부터 차음성능의 감소가 예상된다. 이러한 실험 결과로부터, 국부 공진의 감쇠를 위하여는 폼재 충전방법이 상대적으로 유리한 것으로 평가된다. 뿐만 아니라, 폼재는 그 흡음성에 의하여 2000Hz 부근에서 출현하는 코어부 공기층의 공명도 저감시키고, 단열성능에서도 현실적인 방안이 될 것이다. 현장 적용시에는 충전 공정과 충전재 비용의 문제를 고려하여 적절한 충전량을 선정하여야 할 것이다.

6. 구조변경에 의한 공진주파수 대역의 변화

국부 공진에 의하여 투과손실이 떨어지기 시작하는 주파수대역은 주름단위의 길이 및 두께에 의하여 지배된다. 따라서, 이러한 설계변수를 조정하면 차음성능이 저하되기 시작하는 주파수대역을 이동시킬 수가 있을 것이다. 압출재의 중량은 설계에서 고려되는 중요한 인자이므로, 여기서는 면적당 중량비를 일정하게 유지하면서 주름구조의 변화에 따른 공진 주파수대역의 이동을 유한요소해석(2차원모델)으로 평가해보았다. 주름단위의 설계변수로는 상하판 및 주름의 두께, 주름의 주기(경사각), 상하판 간격이 있다. 여기서는 Fig. 11의 압출재 상하판 간격은 그대로 유지하고, 현 모델의 평균두께 2.8mm로 한 상태에서, 코어부 주름의 경사각을 현재의 50°로부터 증감시키면서 공진주파수의 변화를 보았다. 경사각 증가와 함께 단위 길이당 주름수도 증가하므로, 평균 두께의 비(변화된 두께/현모델 두께)를 감소시켜 면적당 질량비를 일정하게 유지시켰다. Table 3은 주름재의 구조변경에 따른 1차 공진 주파수의 변화를 보인다.

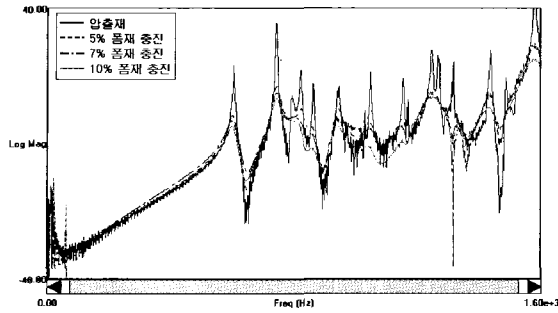


(a) foam filled

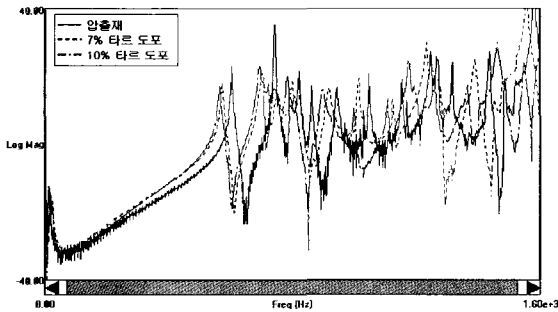


(b) tar coated

Fig.9 Extruded panels with foam filled and tar coated.



(a) foam filled



(b) tar coated

Fig. 10 Frequency response functions of the extruded panels with foam filled and tar coated.

Table 2 Damping by foam filling and tar coating.

	1st Frequency (Hz)		1st Damping (%)
panel	604		0.3
5% damped	foam	600	1.71
	tar	574	0.47
7% damped	foam	598	2.72
	tar	574	0.47
10% damped	foam	598	2.82
	tar	566	0.69

주름 경사각이 증가하면, 주름의 길이가 감소함에 따라, 1차 공진 주파수는 현재의 590Hz부근에서 830Hz로 높아진다. 이 결과는 차음성능이 저하되는 주파수대역이 상당히 상승하게 되므로 차음 성능면에서 유리할 것으로 판단된다. 반대로 주름 경사각을 현재보다 감소시키는 경우, 주름의 간격이 길어지면서 1차 공진 주파수는 감소하고, 현재보다 낮은 주파

수대역부터 차음성능이 저하되는 불리한 상황이 예상된다. 따라서, 차음설계 측면에서는 현재보다 코어부 주름의 경사각을 키우는 것이 유리할 것이다. 현실적으로는 차음 성능뿐만 아니라, 바닥재의 정적인 굽힘강도가 중요하므로 이에 대한 고려가 반드시 병행되어야 할 것이다. 유한 요소해석이나 등가 연속체 모델을 이용한 해석[9]을 통하여 최적의 주름 구조를 결정할 수 있을 것이다.

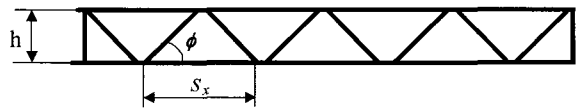


Fig. 11 Design variables of the core structure.

Table 3 1st local resonance frequencies for the modified core structures.

Model	구조변경 모델1	압출재 시편	구조변경 모델2	구조변경 모델3
Parameter	$\phi = 45.5^\circ$	$\phi = 50^\circ$	$\phi = 55^\circ$	$\phi = 60^\circ$
Height, h(mm)	80.5	80.5	80.5	80.5
Plate Thickness ratio	1.05	1.00	0.96	0.90
Mass Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	25.04	25.09	25.05	25.09
Spacing $S_x$ (mm)	161	131	113	93
1st Local Vibration Frequency(Hz)	393	590	655	830

## 7. 결론

알루미늄 압출재 구조를 대상으로, 주름단위에서 큰 변형을 보이는 국부 공진 특성을 유한요소해석과 모드시험을 통하여 검토함으로써, 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 알루미늄 바닥 압출재 시편의 국부 공진모드는 600Hz이후에서 출현하는 것으로 유한요소해석으로 예측되었으며, 모드시험으로 확인되었다.
- 2) 동일한 중량의 재료를 사용할 때, 코어부를 폼재로 충전시키는 방식이 타르재로 표면을 코팅하는 것보다

공진 모드의 감쇠비를 크게 증가시킬 수 있으며, 코어부 공명효과도 완화시키는 장점을 갖는다.

3) 압출재의 면적당 중량을 유지하면서, 주름 경사각을 증가(주름 간격을 감소)시킴으로써, 공진대역을 고주파수대역으로 이동시킬 수 있었다. 이는 차음성능이 저하되는 주파수대역을 위로 이동시킬 수 있는 가능성을 의미한다.

### 후기

본 연구는 2001년도 건설교통부/과학기술부/산업자원부가 지원하는 "고속전철기술 개발사업"의 일환으로 수행된 위탁연구결과의 일부이다.

### 참고문헌

- [1] 이우식, 2000, 진동소음해석 및 저감기술개발, 고속전철 개발사업 2단계 1차년도 위탁과제 연차보고서.
- [2] Cordonnier-Cloarec, P. et al., 1992, "Contribution to the Study of Sound Transmission and Radiation of Corrugated Steel Structures", Journal of Sound and Vibration, Vol. 157, pp.515-530.
- [3] Hansen, C. H., 1993, "Sound Transmission of Corrugated Panels", Noise Control Engineering Journal, Vol. 40, pp.187-197.
- [4] 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.
- [5] Ng, C. F. and Zheng, H., 1998, "Sound Transmission through Double-leaf Corrugated Panel Construction", Applied Acoustics, Vol. 53, No.1-3, pp.15-34.
- [6] 김석현, 박정철, 김종년, 2000, "철도차량용 알루미늄 압출재의 투과손실", 한국소음진동공학회지, 10권, 4호, pp.662-668.
- [7] ANSYS, 1997, "Structural Analysis Guide, Release 5.4", 3rd Edition, ANSYS.
- [8] STAR MODAL System Manual, Spectral Dynamics Inc, 1966.
- [9] 이상윤, 이우식, "평판형 주름판넬에 대한 등가연속체 모델링기법", 한국철도학회논문집 3권 2호, pp43-50, 2000.