

철도 차량용 주름 판재의 국부진동 모드

Local Vibration Modes of Corrugated Panels for Rail Road Vehicles

김석현* 장호식**
Kim, Seock Hyun Jang, Ho Sik

ABSTRACT

Characteristics of local vibration modes of a corrugated panel are investigated by finite element analysis and modal testing. Structural modification model in the corrugation is proposed to increase the resonance frequency. This model decreases the fall by the local resonance in the transmission loss of the corrugated panel and improves sound insulation performance. Damping effect of the foam filled in the core cavity is also estimated by experiment. The results of the study offer useful information how to predict the severe local resonances in corrugations and how to prevent their undesirable effect on the sound insulation and the vibration transmission.

1. 서론

철도차량에서 사용되는 강판이나 알루미늄 판재는 굽힘 강성을 효과적으로 증가시키기 위하여, 주름구조로 되어있다. 그러나, 주름 판재는 높은 횡 하중을 지지하는 장점에도 불구하고, 차음 성능 면에서는 오히려 동일한 면적 당 질량(면밀도)을 갖는 등가 평판에 비하여 불리한 몇 가지 특성을 갖는 것으로 알려져 있다^[1,2]. 현재 도입된 TGV-K(A) 모델에서는 동력차 및 객차 바닥에 주름강판을 사용하고 있으나, 차세대 한국형 고속전철에서는 하중을 지지하는 보형(beam) 강 구조를 주름을 갖는 알루미늄 압출재로 대체하는 경량화 작업이 진행되고 있다^[3]. 철도 차량의 실내소음은 바닥재, 측면재, 천정재 및 유리창등 차체의 판재가 외부 소음원으로부터의 음향파워를 어느 정도 차단하는가에 따라 결정된다. 이와 관련하여, 최근 주름 판재를 포함하는 철도차량용 다층재의 차음성능에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 압출재와 같은 주름판재는 거시적으로 Heckl의 직방성 등가평판 모델^[4]을 사용하여 차음성능을 예측할 수 있다. 그러나, 코어부 주름에 의한 굽힘 강성의 현격한 증가는 판재의 임계주파수를 크게 저감시켜 사용 주파수대역으로 떨어뜨림으로써, 투과손실(transmission loss)의 저하 요인이 된다. 또한, 코어부의 주기적인 주름단위에서 발생하는 국부적 구조모드의 공진, 코어 내부 공기층의 공명등, 차음성능을 저하시키고 그 예측을 어렵게 하는 여러 현상이 발생한다. 특히, 주름 단위의 국부적 공진은 차음성능을 크게 저하시키는 요인으로, 거시적 등가 모델로는 예측이 매우 어렵다. 다양한 종류의 주름 강판을 대상으로, Windle과 Lam^[5], Zheng^[6]은 중주파수대역에서 투과손실의 급격한 저감, 주름구조의 국부적 진동모드의 공진에 의함을 해석 및 실험적으로 밝힌 바 있다.

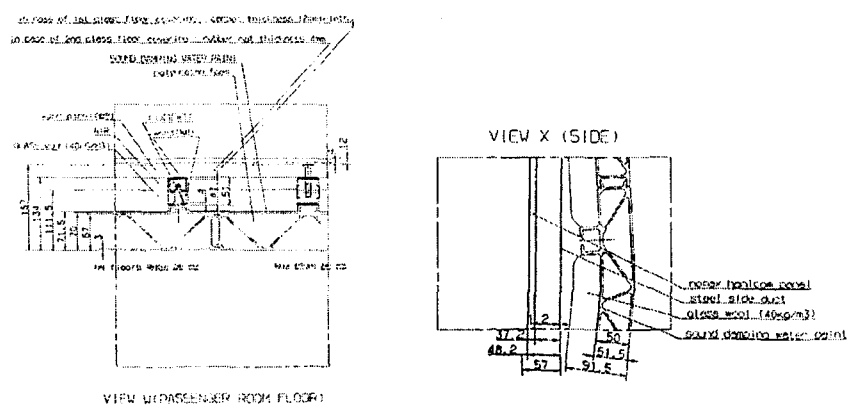
* 강원대학교 교수, 정회원

**강원대학교 석사과정

본 연구에서는 코어부에 주름을 갖는 알루미늄 압출재를 대상으로, 주름 단위의 국부 공진 모드에 대한 유한요소해석 결과와 모드 시험결과를 비교하여 그 특성을 파악한다. 차세대 한국형 고속철도 차량에 적용되는 바닥 압출재의 국부 공진모드를 예측하고, 공진 주파수대역을 고주파 대역으로 이동시키기 위한 구조변경 방안을 제시한다. 또한, 코어부에 폼재를 충진시키는 데 따른 국부 모드의 댐핑 증가 특성을 실험적으로 평가하여, 압출재의 차음 설계에 유용한 데이터를 제공하고 자 한다.

2. 압출재의 주름(허니콤)구조

TGV-K(A)에서 주름강판이 바닥재로 사용되나, 차세대 한국형 고속철도 차량에서는 그림 1에서와 같은 주름(허니콤)구조가 반복되는 알루미늄 압출재를 주요 하중 지지부 및 차음재로 사용한다. 이러한 구조에서는 한 주름 주기에서 국부적 진동모드가 발생되며, 이중에서, 입사파에 의하여 잘 가진되거나, 방사효율이 높은 국부모드의 주파수대역에서 투과손실이 급격히 떨어지는 현상이 발생한다.^[7]



가) 객실 바닥재 단면

나) 객실 측면재

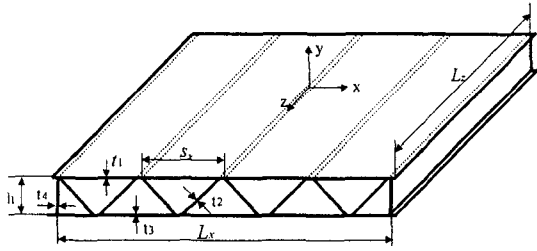
그림 1 차세대 한국형 고속철도차량에 사용되는 알루미늄 압출재

3. 압출재 주름구조의 국부 진동모드

3.1 유한요소 해석결과

(1) 3차원 해석결과

그림 2에 보이는 알루미늄 압출재 시편을 대상으로 유한요소해석을 수행하여 국부 공진 모드를 확인하였다. 해석은 시편 모델에 대한 3차원 해석과 단면구조에 대한 2차원 해석을 병행하여 비교하였다. 3차원 해석에서는 주름의 간격을 10개로 요소 분할하여, 5100개의 평판 및 셸요소로 모델링 하고 ANSYS 5.5를 사용하여 모드해석 하였다. 그림 2는 해석에 사용된 알루미늄 압출재 시편의 치수를 보인다. 그림 3은 국부 진동모드의 3차원 해석결과를 보인다. 그림에서 국부 진동 모드(local vibration modes)는 617Hz부터 발생하고 있으며, 높은 모드 밀도를 보인다.



$t_1 = 3.22 \text{ mm}$	$h = 80.5 \text{ mm}$
$t_2 = 2.82 \text{ mm}$	$L_x = 520 \text{ mm}$
$t_3 = 2.87 \text{ mm}$	$L_z = 365 \text{ mm}$
$t_4 = 2.50 \text{ mm}$	$S_x = 130 \text{ mm}$

그림 2 압출재 시편의 치수

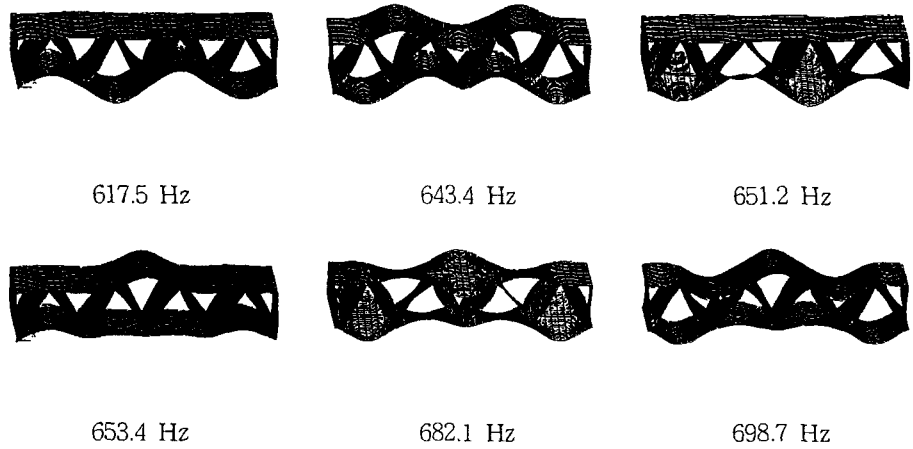


그림 3 알루미늄 압출재 시편의 국부 진동모드

(2) 2차원 해석결과

2차원 평면모델은 그림 4에서와 같이 주름 단면상에서의 평면 모드를 구하는 해석모델이다. 즉, 압출재 주름 방향으로는 균일한 변형을 보이고 단면상에서만 진동하는 국부 모드를 구하게 된다. 3차원 해석에 비해서 주름 축을 따른 변형 모드가 누락되나, 대부분의 저차 모드가 평면모드로 나타나므로, 국부 공진 모드의 주파수 대역을 예측하는데는 충분하다. 또한, 주름단위의 구조변경시, 공진 주파수대역의 변화를 예측하는데도 효과적이다. 그림 5에서와 같이 시편의 길이를 2배로 증가시켜도 국부 공진 주파수의 변화는 3% 이내로 작다. 이러한 특성은 경계조건을 변화시켜가면서 해석한 결과에서도 동일한 양상을 보였다. 구조계의 전체 모드(overall modes)와는 달리, 시편의 전체적인 크기나 장착조건은 국부 공진 모드의 주파수 대역에 거의 영향을 주지 못하고, 주름단위의 치수에 의하여 모드특성이 결정된다. 결과적으로, 본 시편의 경우, 약 600Hz이후부터 주름단위의 국부 공진 모드가 나타나며, 이는 차음성능의 저하로 연결된다.

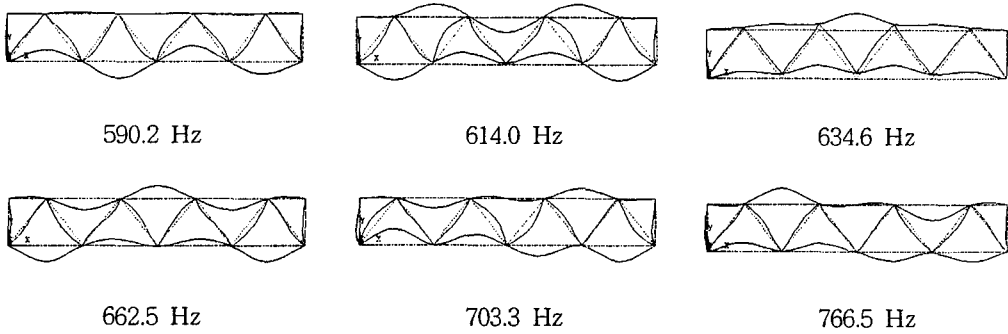


그림 4. 2차원 평면모드

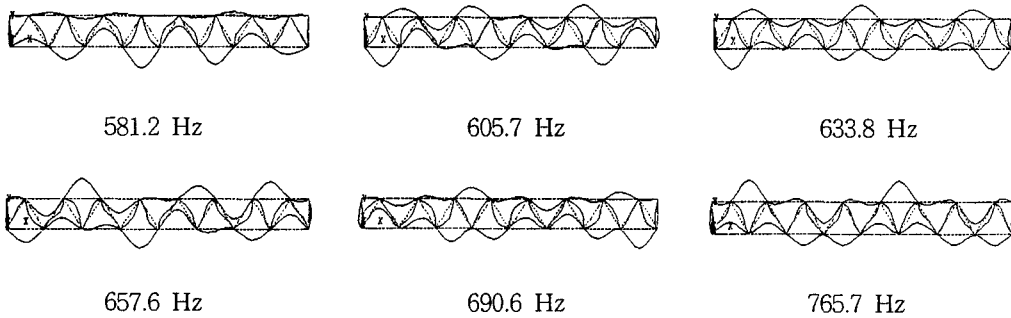


그림 5. 시편 길이를 2배로 증가시킬 때의 평면모드

3.2 모드시험 결과

유한요소해석 결과의 비교 검증을 위하여 모드시험을 수행하여 국부 진동모드를 확인하였다. 그림 6에서와 같이 충격 해머에 의한 가진력과 시편상 34개 지점에서의 가속도를 측정하여 주파수 응답함수를 구하고, 피크별로 다항 커브 피팅(polynomial curve fitting)법으로 모드변수를 구하였다.^[8] 그림 7은 압출재 상판의 주파수 응답함수 측정치를 보인다. 유한요소 해석에서 예측되었던 결과와 같이, 600Hz부근부터 다수의 국부 진동모드가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 모드 감쇠비(modal damping factor)는 1/1000 단위로 매우 낮은 값을 보였다. 이는 공진 주파수 대역에서 차음성능을 크게 떨어뜨릴 가능성과, 압출재를 통한 진동의 전달이 용이한 바람직하지 못한 상황이 발생할 수 있음을 의미한다. 차음성능에 관련하여, 저주파에 의한 차음성능 평가시험에서 600Hz 이후의 투과손실이 현저히 감소하는 결과로부터 실제로 확인된 바 있다.

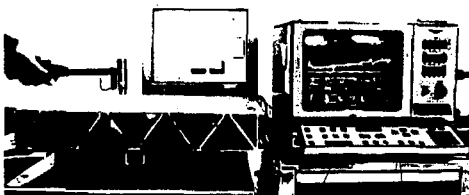


그림 6 충격시험

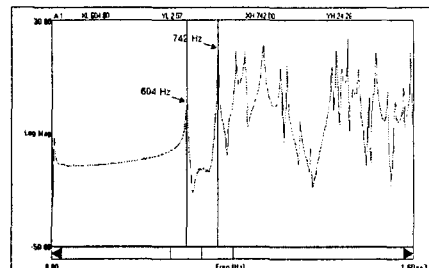


그림 7 압출재 주파수 응답함수

모드시험으로 구한 압출재 시편의 진동모드를 그림 8에 보인다. 가진이 어려운 코어부를 제외하고, 상판과 하판 상 34개 지점에서 가진하고, 26번 위치에서 가속도를 측정하였다. 1차 공진은 해석치와 비슷한 주파수대역에서 발생하고 있다. 이후 해석에서 예측된 몇 개의 진동 모드에 대해서는 누락된 것은 측정 위치때문인 것으로 보인다.

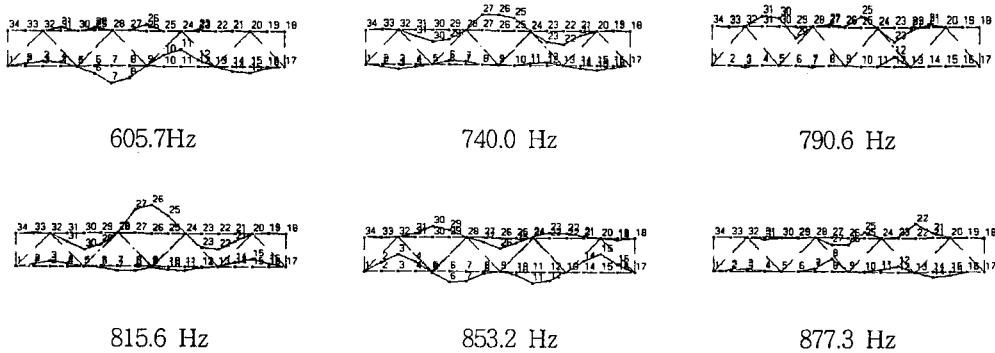


그림 8 모드시험으로 측정된 국부 진동 모드

4. 구조변경에 의한 공진 주파수대역의 변화

국부 공진에 의하여 투과손실이 떨어지기 시작하는 주파수대역은 주름단위의 길이 및 두께에 의하여 지배된다. 따라서, 이러한 설계변수를 조정하여, 차음성능이 저하되기 시작하는 주파수대역을 밀어 올릴 수가 있다. 여기서는 면적당 중량비를 일정하게 유지하면서 주름구조의 변화에 따른 공진 주파수대역의 이동을 유한요소해석(2차원모델)으로 예측해 보았다. 그림 9의 코어부 주름의 경사각도를 현재의 50°로부터 증가시키면 단위 길이당 주름수도 증가하므로, 두께비(변화된 두께/현모델 두께)를 감소시켜 면적당 질량비를 일정하게 유지시켰다. 도표 1은 주름재의 구조변경에 따른 1차 공진 주파수의 변화를 보인다. 주름 경사각이 증가하면, 주름의 길이가 감소하면서 1차 공진 주파수는 현재의 590Hz부근에서 830Hz로 높아진다. 즉, 투과손실의 저하 영역이 위로 올라가므로 차음 성능면에서 유리하게 된다. 반대로 주름 경사각을 현재보다 감소시키는 경우, 주름의 간격이 길어지므로 1차 공진 주파수는 감소하고, 현재보다 낮은 주파수대역에서 차음성능이 저하되는 불리한 상황이 예상된다. 그러나, 이러한 구조변경을 현장에 적용할 때는 차음 성능뿐만 아니라, 바닥재의 정적인 굽힘 강도의 변화도 동시에 고려하여 최적의 주름 구조가 선정되어야 할 것이다.

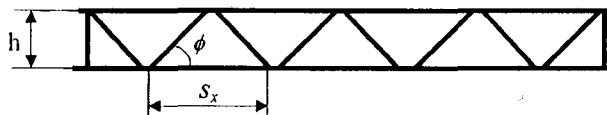


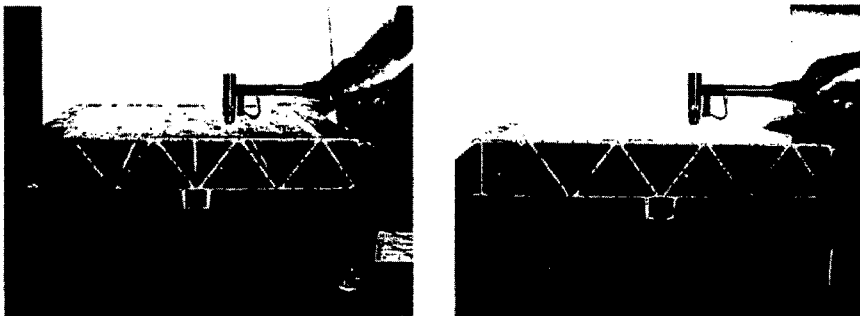
그림 9 주름단위의 구조변경 모델

도표 1 구조변경에 따른 압출시편의 국부진동모드 주파수 변화

Model Parameter	구조변경모델1 ($\phi = 45.5^\circ$)	압출재 시편 ($\phi = 50^\circ$)	구조변경모델2 ($\phi = 55^\circ$)	구조변경모델3 ($\phi = 60^\circ$)
Height, h(mm)	80.5	80.5	80.5	80.5
Plate Thickness ratio	1.05	1.00	0.96	0.90
Mass Density (kg/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

5. 코어부 폼재 충진에 의한 감쇠의 변화

전술한 국부 공진은 많은 진동모드에 의하므로, 그로 인한 차음성능 저하를 완화시키기 위해서는 압출재의 감쇠를 상당히 증가시킬 필요가 있다. 코어부 공기층의 공명효과를 방지하면서 동시에 감쇠를 증가시키기 위해서, 현장에서는 코어부를 폼재로 충진시키는 방안을 강구중이다. 여기서는 폼재 충진에 따른 모드 감쇠비의 변화를 측정하여 평가한다. 그림 10에서와 같이, 폼재의 충진 양을 압출재 중량의 5% ~ 20%까지 증가시키면서, 충격시험에 의한 주파수 응답함수를 측정하여 1차 모드감쇠비를 구한 결과를 그림 11에 보인다. 폼재 충진에 의한 1차 공진 주파수의 변화는 매우 작다. 그러나 1차 모드의 감쇠비는 현재의 0.28%로부터, 10% 폼재 충진시 2.8%로, 10배 증가하는 것으로 나타났다. 2차 이후의 공진 모드도, 그림에서 관찰할 수 있듯이 1차 피크보다 더욱 큰 감쇠치의 증가를 보인다. 이러한 감쇠치의 증가는 공진 피크의 레벨을 현저히 감소시켜, 차음성능의 저하를 상당히 완화시킬 것이다. 또한, 구조전달에 의한 진동 및 소음량을 감소시켜 철도 차량의 진동/소음 저감에 긍정적으로 기여할 것이다. 그러나, 폼재의 적용은 차체의 중량 증가를 가져오므로, 다른 감쇠 증진 방안과의 비교 평가를 통하여, 중량 대비 최고의 감쇠 증가를 가져오는 방안이 강구되어야 할 것이다.



가) 미 충진시

나) 충진시

그림 10 코어부 폼재 충진모델 비교

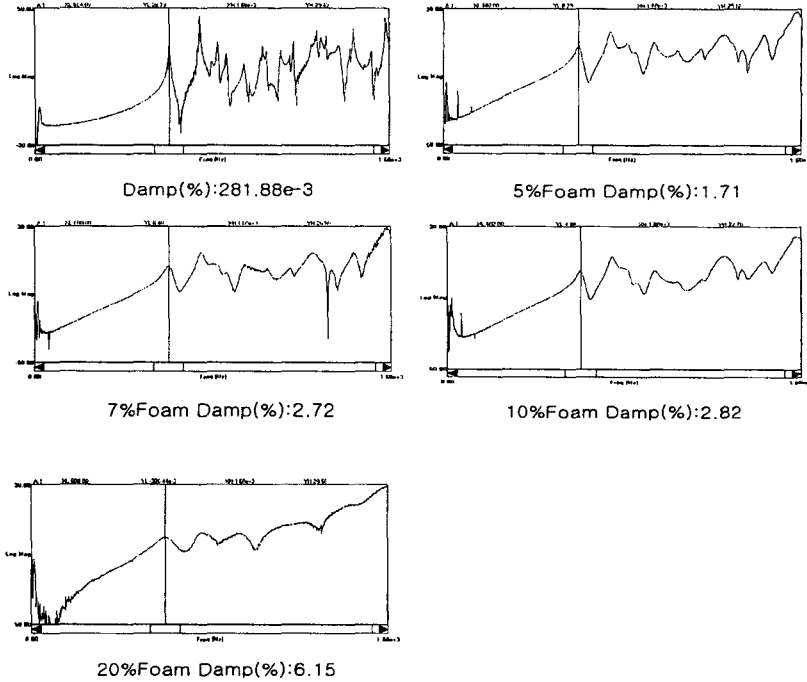


그림 11 폼재 충전량에 따른 감쇠치의 증가

6. 결론

차세대 한국형 고속철도 차량에서는 알미늄 압출 주름재가 하중을 가장 많이 지지하고, 외부로부터의 소음/진동을 차단하는 중요한 부재로 사용된다. 차음 및 진동 전달에서 바람직하지 못한 효과를 발생시키는 주름단위의 국부 공진에 대하여, 유한요소해석과 모드시험을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 국부 공진은 차음성능을 현저히 떨어뜨리며, 그 출현 주파수 대역은 유한요소해석으로 예측이 가능하다.
- 2) 압출재의 면적당 중량을 유지하면서, 주름 경사각을 증가(주름 간격 감소)시키고, 판 두께를 감소시킴으로써, 공진대역을 고 주파수대역으로 밀어 올릴 수 있었다.
- 3) 코어부를 폼재로 충전시킴으로써, 넓은 주파수대역에 존재하는 많은 공진 모드의 감쇠비를 크게 증가시킬 수 있었다.

후기

본 연구는 G7고속전철 기술개발사업 기반기술과제 위탁과제인 "실내소음 저감기술 개발 및 저소음설계 지원"의 일부로 수행되었으며, 관계자들의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Hansen, C. H., 1993, "Sound Transmission of Corrugated Panels". *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 40, pp.187-197.
- [3] 이우식, 2000, 진동소음해석 및 저감기술개발, 고속전철개발사업 2단계 1차년도 위탁과제 연차보고서.
- [4] Heckl, M., 1960, "Untersuchungen an Orthotropen Platten. Acoustics", Vol.10, pp109-115.
- [5] Windle, R. M. and Lam, Y. W., 1993, "Prediction of the Sound Reduction of Profiled Metal Caldding. Inter-Noise'93", Vol. 2, pp.999-1002.
- [6] Ng, C. F. and Zheng, H., 1998, "Sound Transmission through Double-leaf Corrugated Panel Contruction", *Applied Acoustics*, Vol. 53, No.1-3, pp.15-34
- [7] 김석현, 박정철, 김종년 2000, "철도차량용 알미늄 압출재의 투과손실", *한국소음진동공학회지*, 10권, 4호, pp.662-668.
- [8] STAR MODAL System Manual, Spectral Dynamics Inc., 1966.