

도상 매트 공법 도로포장에 의한 자동차 도로 인근 건축물의 고체전파음 저감효과에 관한 실험적 연구

An Experiment Study on the Structure-borne Noise Reduction of Building Nearby the Road by Using Ballast Mat Pavement Method

김 병 삼† · 이 익 주* · 유 제 남**

Kim Byoung-sam, Lee Ik-joo and You Je-nam

(2004년 7월 15일 접수 : 2004년 10월 17일 심사완료)

Key Words : Porous Asphalt(다공성 아스팔트), Compression Permanent Percentage of Contraction(압축영구 줄음률), Dynamic Elastic Modulus(동적탄성계수), Ballast Mat Method(도상 매트 공법), Pavement(도로포장)

ABSTRACT

In contemporary society, vibration and noise in the road nearby buildings have become social problems as vehicles operation has increased. Especially, in the case of the building used to art performance, available suitability of the building is tested by the indoor noise class. Therefore, the purpose of this paper is the measurement of the structure-borne noise of Seoul Art Center nearby Umyeonsan tunnel and analyzing the effects of countermeasure to it. To measure the effects of countermeasure, not only structure-borne noise is measured, but also the vibration is measured, before and after the construction of pavement using pad and porous asphalt. Consequently, the sound pressure level in art center 1st floor is reduced after mat pavement method, structure-borne noise that was high in 25 Hz wide-band before pavement decreased regardless of experimental vehicle's velocity. Using porous asphalt pavement the noise was reduced about 3dB(A).

1. 서 론

차량의 주행으로 인한 도로변 인근 건축물의 진동과 소음이 사회적 문제로 대두되고 있다.⁽¹⁾ 특히, 문화행사나 예술 공연을 목적으로 건립된 건축물의 경우 건축물의 사용 목적 적합성 여부를 건축물의 실내 소음 등급으로 평가하고 있는 실정이다. 따라서, 문화예술행사가 주 사용목적인 서울 예술의전당을 대상으

로 예술의전당 인근 도로의 차량 주행으로 인해 발생하는 고체전파음을 측정·평가하고 그에 대한 방지대책의 효과를 파악하고자 하였다. 서울 예술의전당 하부를 통과하는 우면산 터널은 예술의전당 디자인 미술관, 오페라하우스, 음악당, 서예관 등의 건물과 매우 인접하다. 이들 건물은 진동의 전달경로에 따라 구조-구조의 전달경로인 디자인 미술관과 구조-지반-구조의 전달경로인 오페라하우스, 음악당, 서예관으로 분류할 수 있다. 디자인 미술관은 하부의 기초 중 일부가 우면산 터널 통과를 위해 설치한 박스 터널 상부와 구조계를 형성하고 있고, 오페라하우스와 음악당 및 서예관 주변으로는 우면산 터널의 상행선과 하행선이 각각 인접하여 통과하는 구조계를 형성하고 있다. 본 연구에서는 서울시 서초구 서초동~우면동

† 책임저자 : 정희원, 순천제일대학 자동차기계과

E-mail : anvks@sunchon.ac.kr

Tel : (061) 740-1309, Fax : (061) 742-3027

* 서울시 건설안전본부

** (주)삼안건설기술공사

에 이르는 우면산 터널에 실험 차량이 통과할 때 차량 통행으로 인하여 발생하는 진동이 예술의전당 디자인 미술관, 오페라하우스, 음악당, 서예관 등의 건축구조물에 전달되는 고체전파음의 실태를 파악하고, 예술의전당 통과구간에 도상 매트 공법에 의한 도로 포장 공사 후 그에 대한 효과를 파악하고자 하며, 우면산 터널 예술의전당 통과구간에 대하여 다공성 아스팔트로 도로포장한 후 그에 대한 효과도 파악하고자 한다.

2. 차량 주행에 의한 소음측정

터널 내 실험차량주행으로 인한 예술의전당 디자인 미술관, 오페라하우스, 음악당, 서예관 등에 전파되는 고체전파음을 측정된 후 주파수 분석하였다. 시험에 이용된 차량은 DB-25로 차량의 무게는 25톤이며, 시험 차량에 40톤 만차 상태를 유지한 후, 차량 속도를 10 km/h에서 60 km/h까지 10 km/h씩 증가하면서 소음을 측정하였다. 소음측정은 상행선과 하행선으로 구분하였으며, 예술의전당 주변의 암소음의 영향이 가장 적은 시간대에 실시하였다. 소음측정에 이용된 장비는 소음계(B&K 2260), 디지털 기록기(SONY PC208A), 분석기(B&K 3556), 마이크로폰 보정기(B&K 4231)등이며, 소음계를 통해 측정된 소음은 디지털 기록기에 저장된 후 분석기를 통해 1/3 옥타브 대역 주파수 분석하였다. 소음측정지점은 디자인 미술관 12개소, 오페라하우스 18개소, 음악당 6개소, 서예관 9개소 등 총 45개소이다. Fig. 1에서는 예술의전당 하부를 통과하는 우면산 터널에 대한 평면도이

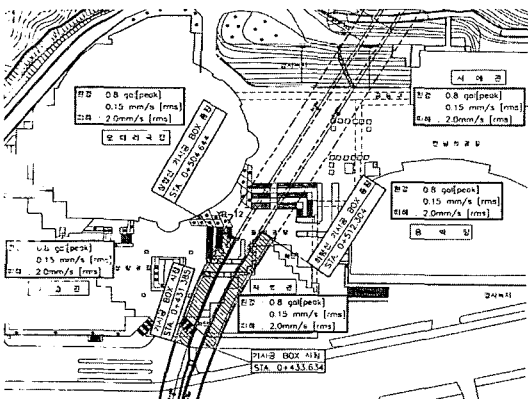


Fig. 1 A plane figure of Umyeonsan tunnel

고, Fig. 2, 3, 4는 디자인 미술관, 오페라하우스, 음악당에서의 측정 지점들이다.

또한, 터널 내 하행선에 가진기를 설치하고 5 Hz~50 Hz 범위 내에서 가진한 후 가진점의 입력진동가속도레벨과 디자인 미술관 1층~4층의 측정점에서 진동가속도 및 음압레벨을 측정하여 터널 내의 진동발생에 의한 고체전파음의 전달특성을 비교 분석하였다. Fig. 5는 터널 내 하행선에 설치된 가진기이고, 가진기의 주파수가진 변위특성은 Table 1과 같다.

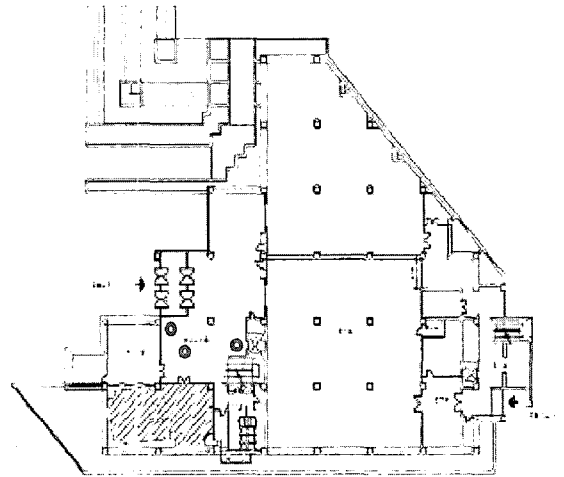


Fig. 2 Measuring point in design art center(1st floor)

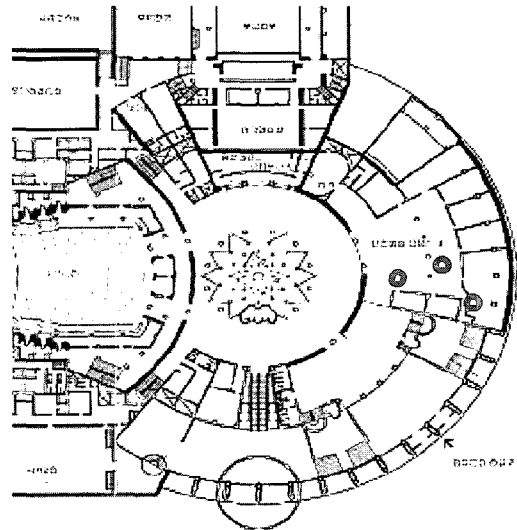


Fig. 3 Measuring point in opera house(2nd floor)

가진기의 특정주파수 가진(5 Hz~50 Hz, 5 Hz 간격)에 의한 디자인 미술관에서의 상대적인 진동 가속도 레벨 분포와 음압레벨은 Fig. 6, 7과 같다.

Fig. 6은 터널 내에 설치한 가진기 가진점의 입력 진동가속도레벨값을 기준으로 보정하여, 디자인 미술

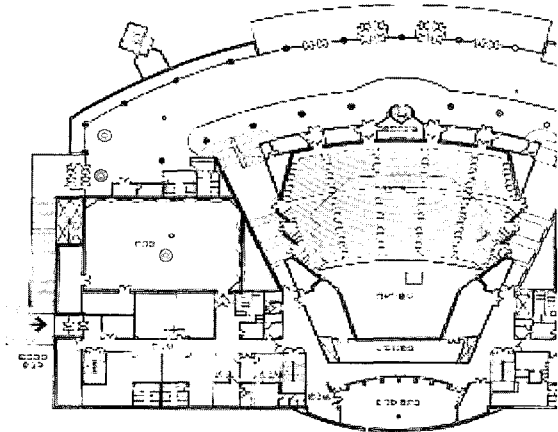


Fig. 4 Measuring point in music hall

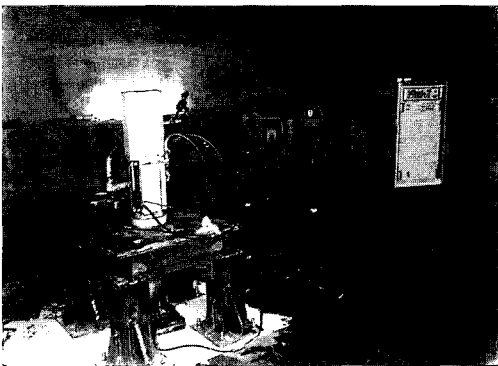


Fig. 5 Exciter used in this study

Table 1 Exciting displacement by frequency

Frequency (Hz)	Displacement (mm)	Frequency (Hz)	Displacement (mm)
5	17	35	3
10	7.5	40	2.5
15	7	45	2
20	5.5	50	1.5
25	4	55	1.2
30	3		

관의 각각의 측정점에서의 진동가속도레벨을 주파수 별로 나타낸 것이다. 디자인 미술관 1층과 3층에서의 측정결과 모두 25 Hz 대역에서 진동가속도레벨의 차가 가장 작은 값을 나타내고 있는데, 이는 25 Hz의 진동이 다른 주파수보다 감쇠량이 적으므로 고체전파음으로서 비교적 잘 전파되고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 특정주파수 가진에 의한 디자인 미술관 1, 3층에서의 음압레벨을 각각의 가진 주파수별로 나타낸 것이다. 15 Hz 이상의 결과를 살펴볼 때, 디자인 미술관 1, 3층에서 20 Hz, 25 Hz에서 가장 높은 값을 나타내고 있어, 진동의 경우와 같이 이 주파수에서 고체전파음이 비교적 잘 전파되고 있는 것을 알 수 있었다.

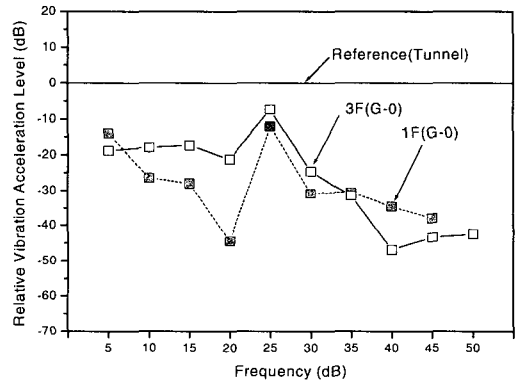


Fig. 6 Relative vibration acceleration level distribution at design art center due to 5~50 Hz exciting of exciter

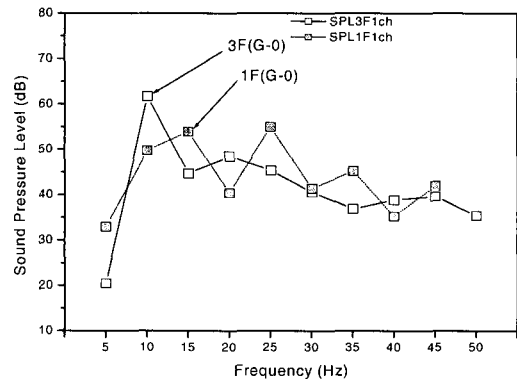


Fig. 7 Sound pressure level distribution at design art center due to 5~50 Hz exciting of exciter

Fig. 8은 시험차량주행에 의한 디자인 미술관 2층에서의 음압레벨 분포로서, 32.5 Hz 대역에서 비교적 낮은 값을 나타내고 있어, 디자인 미술관 북측 남부 순환로의 교통소음 유입이 비교적 적은 것으로 사료되며, 특히 25 Hz 이하의 대역에서 높은 음압레벨 분포를 나타내고 있어, 파장이 긴 주파수대역의 고체전파음이 상층부에까지 영향을 미치고 있다는 경향이 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 9는 시험차량주행에 의한 오페라하우스 1층의 음압레벨 분포로서, 디자인 미술관의 경우와 같이 200 Hz대역 이하의 주파수대역이 전반적으로 높은 음압레벨 분포특성을 보이고 있다. 특히 25 Hz 대역과 50~63 Hz 대역에서 비교적 높은음압분포 특성을 보이고 있다.

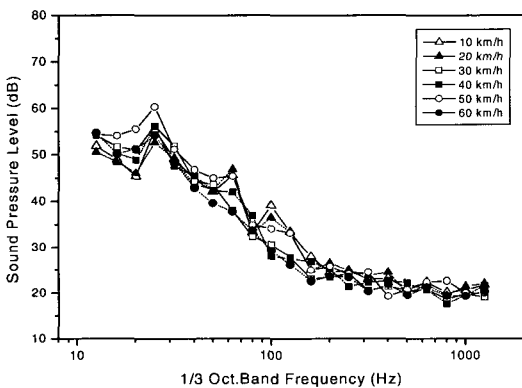


Fig. 8 Sound pressure level in design art center (2nd floor) due to driving of test vehicle

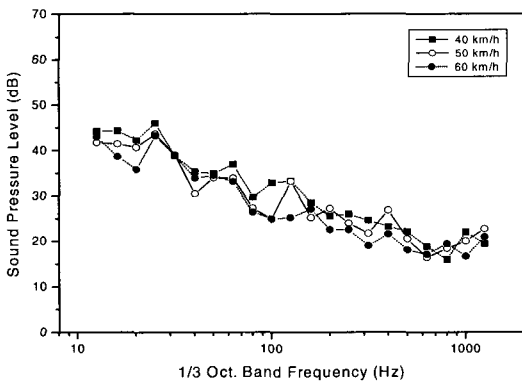


Fig. 9 Sound pressure level at opera house (1st floor) due to driving of test vehicle

Fig. 10은 오페라하우스 1층에서 시험차량주행에 의한 고체전파음 전파특성을 암소음과 비교하여 나타낸 것으로 시험차량 주행시의 주파수 특성은 25 Hz 대역에서 탁월한 값을 나타내고 있으며, 이 결과는 25 Hz 주파수대역의 고체전파음이 가장 잘 전달되고 있음을 보여준다.

터널 내 시험차량주행에 의한 소음측정결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

터널내 차량통행으로 인해 발생하는 소음이 디자인 미술관 및 오페라하우스에 영향을 미치는 고체전파음의 성분은 25 Hz대역이 가장 큰 것으로 분석되어, 25 Hz 주파수성분을 고려한 대책이 필요하다.

디자인 미술관 및 오페라하우스 등에 대한 측정 분석결과, 터널 내 기시공박스를 포함한 상·하행선 연장부분의 교통량과 차량주행속도가 증가하게 되면 본 측정결과 이상의 소음이 디자인 미술관, 오페라하우스, 음악당 및 서예관에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다.

고체전파음은 터널의 도로면에서 입력되는 구조진동음에 대한 영향에서 의하여 나타나는 결과로, 예술의 전당의 각각의 측정건물에 전달되는 고체전파음 방지를 위하여 반드시 방진재가 설치되어야 할 것으로 판단된다. 이 경우에는 건축구조체의 첫 번째 고체전파음 공진주파수로 여겨지는 25 Hz를 충분히 고려한 방진재 설치가 필요하다.

현재 차량운행시 발생한 소음에서 대책이 필요한 최소중심주파수를 25 Hz라 하면, 이 주파수대역의 소음을 감소시키기 위한 방진시스템의 동적고유진동수

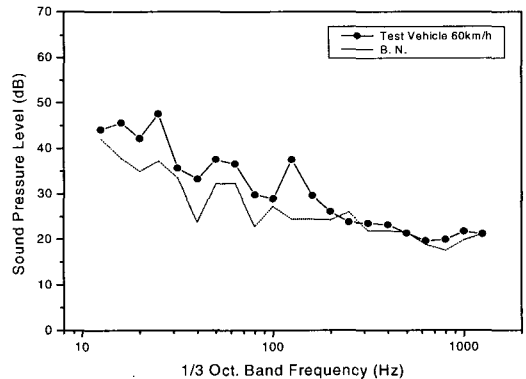


Fig. 10 Sound pressure level at opera house (1st floor) due to driving of test vehicle

(f'_m)의 최대값은 17 Hz ($25/\sqrt{2} = 17.67 \approx 17$)가 된다. 한편 방진재는 동적 상태에서 딱딱해지는 특성을 갖는 재료적인 특성이 있기 때문에 성능이 우수한 방진재의 경우 150% 이하의 동적 배율을 갖거나, 방진재의 정적 고유진동수 13 Hz 를 고려할 때 방진재 두께의 10% 이내의 처짐을 가져야만 그 효과가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

방진패드는 실질적으로 교체가 불가능하기 때문에 장기간 형태변형성이 거의 없는 물성과, 내구성이 충분히 검증된 재질을 갖춘 소재가 필요하다.

3. 예술의전당 통과구간 도로터널 소음저감 대책

우면산 터널 예술의 전당 통과구간의 소음저감 대책으로 현재까지 토목 설계자와 소음진동 전문가들에 의하여 많은 검토와 연구⁽¹⁾가 이루어져 왔던 바, 최근의 연구 결과에 따라 소음진동의 적절한 제어방법으로 도상콘크리트 하부에 방진 패드를 설치함으로써 차량주행에 의하여 발생된 진동에 의한 소음을 제어하는 방법이 중점적으로 검토되었다. 따라서 방진에 효과적인 패드의 탄성계수가 $E=10 \text{ kg/cm}^2$ 로 제시되어 있는 바, 이에 대하여 차량 하중 재하시에 구조적으로 안정적인 도상콘크리트를 설계하고 차량 주행에 대한 도상콘크리트 변형의 적정성에 대하여 검토하여 적용 가능한 패드 설치 방안에 대하여 소음제어 측면에서 필요한 방진패드의 탄성계수 및 소요 두께 등의 동적 물성치를 갖는 도상콘크리트 구조물의 구조응력 안정성과 처짐에 대하여 안정하도록 설계하였다.

패드를 스프링으로 모델링하고, 패드 위의 도상콘크리트를 판(plate)으로 모델링하여 유한요소법에 의한 구조해석을 수행함으로써 도상콘크리트의 부재력과 처짐을 산정하고 이에 대하여 구조물이 안정적이 될 수 있도록 철근으로서 보강하는 설계를 수행하였다.

예술의전당 통과구간 도로터널에서의 소음진동은 저주파 대역인 20 Hz 내외로부터 500 Hz 이상의 고주파 대역까지 다양하게 분포하고 있다. 저주파 대역에 대한 소음진동은 방진 패드에 의한 진동 절연으로 저감대책이 될 수 있으며, 고주파 대역에 대하여는 저소음 아스팔트 등의 공법을 도입하여 소음을 저감시키고자 하였다. 여기서는 저주파 대역에 대한 소음진동 저감대책으로서의 방진 패드 적용 방안에 대하여

적정 탄성계수를 갖는 패드에 대하여 안정적인 도상콘크리트 슬라브를 설계하도록 하였다. 고주파 대역에 대한 소음은 계측 결과 비교적 낮은 음압레벨을 나타내고 있으며 이에 대하여는 저소음 아스팔트를 도입하여 소음저감을 이루도록 하였다.

방진 패드와 저소음 아스팔트 포장 공법의 경우, 방진 패드의 적용범위는 가진원인 지하터널 구조물로부터 수신원인 건축물의 이동 통로 부분을 기준으로 차량 진동 소음의 영향이 급격히 감소되는 것으로 연구검토된 필요 이격 거리 40 m 보다 여유치 10 m 를 가산하여 수신점과 가진원 사이가 50 m 거리에 해당되는 범위를 3차원 입체적으로 cad 도면상에서 선정하여 이를 적용 범위로 하였다.

도상콘크리트는 판 구조로 모델링하여 휨모멘트에 대하여는 철근이 부담하도록 철근콘크리트 부재로서 설계하였으며, 차량하중 작용점 위치를 검토하여 실제 작용점의 콘크리트 두께에 대하여 검토하였고, 부재 안정성 검토 및 처짐 검토를 위하여 하중 작용점에서 하중재하의 분포면적을 부재 두께에 반영하여 적용함으로써 실제에 가까운 분포하중 적용하였다. 도상콘크리트 부재에 대한 안정성은 분포하중 재하면적을 도상콘크리트 부재두께 중심축에서의 재하면적으로 적용하였고, 패드의 처짐은 분포하중 재하면적을 도상콘크리트 하부면을 기준으로 재하면적을 적용하였다. 방진 패드의 특성치는 동적 특성치와 정역학적 특성치가 서로 다른 바, 동적 특성치를 기준으로 정역학적인 상태에 대하여도 안정하도록 구조 설계하였다.

4. 방진재 검토

4.1 설계기준

방진패드는 휠하중 9.6 ton (DB-24기준), 속도 80 km/h , 가진주파수 25 Hz 를 설계 사양에 적용하였으며, 방진패드 설치시 25 Hz 대역에서 약 5 dB 의 진동 및 고체를 저감효과가 있도록 설계하였고, 동적성능, 내마모성, 내유성, 내수성, 내화학성 등이 우수한 재료를 선택하였다.

방진패드는 최소 30년 이상 사용되고 그 효과가 유지되어야 하므로 매트단면에 프로파일 형상이 없어야 하고 정해진 탄성을 유지하기 위해서는 micro-cell

구조를 가지도록 하였다. 방진패드는 필요에 따라 다층으로 구성되어도 무방하며 또한 콘크리트 타설 및 배근시에 매트와 파손을 막기 위한 보호재가 탄성

재의 상부에 접촉된 구조가 되도록 하였고, 도로의 차선 횡방향으로 이음매가 최소가 되도록 하였다. Table 1은 본 연구에 이용된 실험용 방진패드의 물리적 특성이다.

Table 2 Physical properties of test pad

Test item	Standard
Static elasticity modulus (kgf/cm ²)	7 over
Deflection limit (mm)	Pad thickness 10 % under
Dynamic elasticity modulus (kgf/cm ²)	10 under
Compressio permanent percentage of contraction	4 % under

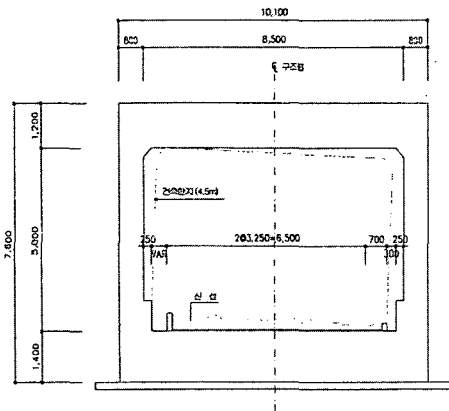


Fig. 11 Cross section view of tunnel

Table 3 Construction of upper road

Section	Thickness		
	Inner	Middle	Outer
The height of tunnel [m]	5	5	5
Construction limit [m]	4.5	4.5	4.5
Pad thickness [mm]	40	40	40
Asphalt density [kg/m ³]	2300	2300	2300
Concrete density [kg/m ³]	2500	2500	2500
Asphalt weight [kg/m ²]	115	115	115
Concrete weight [kg/m ²]	850	675	500
The wight of pad upper structure [kg/m ²]	965	790	615

4.2 도로조건

도로의 현황은 터널 천장높이가 가장 낮은 기시공 박스를 기준으로 할 때 높이가 5.0m, 건축한계 4.5m와 편구배(4%, R=354m)로 가정하면, 도로의 전체 두께는 곡선부 바깥쪽에서 최대두께 50cm이며, 편구배에 의해서 곡선부 안쪽에서는 최소두께 22cm가 된다. 도로의 전체 두께가 22~50cm이므로 방진재의 두께를 제외한다면 방진재 상부 콘크리트 구조물의 두께는 얇아지게 된다. Fig. 11은 기시공 박스의 터널 단면도이고, Table 3는 도로상부 구조물의 치수이다.

4.3 방진재 선정을 위한 평가시험

정적탄성계수 시험은 도로의 일반상태에서 차량 주행시 방진재의 상태를 평가하기 위한 시험으로 정적 상태에서 방진매트의 하중변화와 그에 대응하는 변위량과의 관계를 측정하기 위함이다.

Table 4는 정적탄성계수를 측정하기 위한 시험하중과 시험편의 크기이고 Fig. 12은 탄성계수와 처짐량을 측정하기 위한 시험장치이다. 시험기는 하중

Table 4 Test load value and scale of specimen

Item	Standard
Under limit (P ₁)	0.092 ton(0.10 kgf/cm ²)/ 0.9 KN(0.01 N/mm ²)
Upper limit (P ₂)	0.55 ton(0.61 kgf/cm ²)/ 5.4 KN(0.06 N/mm ²)
The scale of specimen	300 × 300 mm

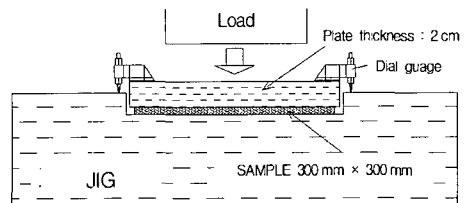


Fig. 11 Test jig for modulus of elasticity measurement

P_1 및 P_2 가 그 공칭용량의 20~100%의 범위에 있는 것을 사용하였다.

압축 영구 줄음 시험은 KS M 6518에 의하여 시험하였다. 시험편은 방진패드에서 안지름 50 ± 1 mm, 두께 25 ± 1 mm의 원형인 것 1개를 채취하였다. 패드에 흠이 있을 경우에는 1개의 흠이 지름이 되도록 하였다. 시험편 두께의 $50 \pm 2\%$ 까지 균일하게 압축 후 15분 이내에 KS M 6518에 규정된 공기 가열식 노화 시험기에 넣고 70 ± 1 °C에서 22시간 유지한 다음 시험기에서 꺼내어 압축을 풀고 30분 이내에 두께를 측정하였다. 측정은 시험편의 거의 중앙에서 흠이 없는 부분 5곳을 측정하여 그 평균값으로 하였다.

압축 영구 줄음률은 식 (1)에 따라 계산하였다.

$$C = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, C : 압축 영구 줄음률 (%)

t_0 : 시험편의 처음 두께 (mm)

t_1 : 압축된 시험편의 두께 (mm)

5. 도로포장 후 소음측정 및 분석

5.1 측정지점

예술의전당 통과구간 도로터널 소음저감 대책을 기초로 예술의전당 건축구조물의 차량주행에 의한 고체전달음이 잘 전달되는 지점을 측정지점으로 선정하였다. Fig. 13은 측정지점에서의 소음측정 사진이다.

5.2 측정결과

Fig. 15는 시험차량주행에 의한 디자인 미술관에서 음압레벨 분포로서, 주행 속도에 따라 주파수 특성의 변화가 보이기는 하지만, 전반적으로 유사한 분포를 보이고 있다. 특히 전 주파수 대역에서 암소음의 음압레벨 정도의 낮은 음압레벨 분포를 보이고 있으나, 차량의 속도가 50 km/h일 때 60 Hz 대역의 주파수 성분이 비교적 탁월한 분포 특성을 보이고 있는데, 이는 측정시 엘리베이터 기계실에서의 암소음에 의한 사료된다.

Fig. 16은 디자인 미술관 1층에서의 측정된 소음의 주파수 분석결과를 비교한 것이다. 도로포장 후 음압레벨이 현저하게 감소하였는데, 이는 디자인 미술관 주변의 인접 남부순환로의 교통소음의 감소하였기 때

문이며 특히, 도로포장 전 25 Hz 대역에서 탁월했던 고체전파음이 시험차량의 주행속도에 관계없이 대폭적으로 감소했음을 알 수 있었다. 디자인 미술관 2층과 오페라하우스 등에서 측정된 음압레벨을 비교한 결과, 전반적으로 50 Hz 대역 이하에서의 고체전파음

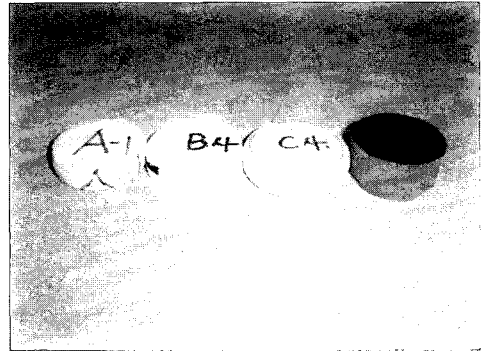


Fig. 13 Test specimen

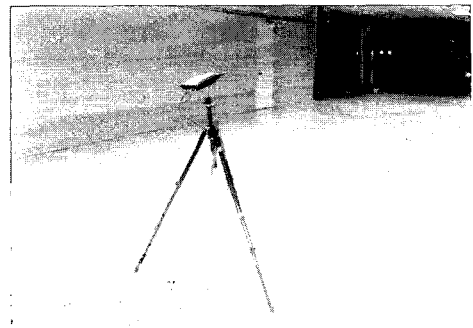


Fig. 14 A scene of noise measurement

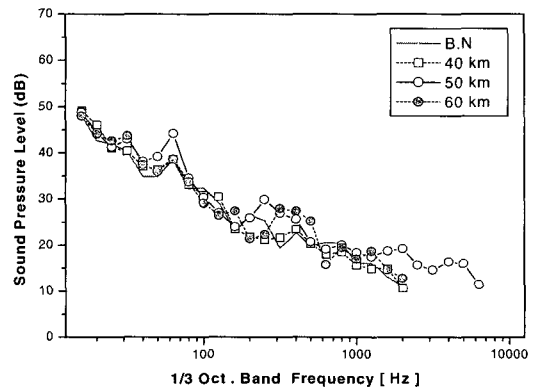


Fig. 15 Frequency analysis result of noise measurement at design art center due to driving of test vehicle

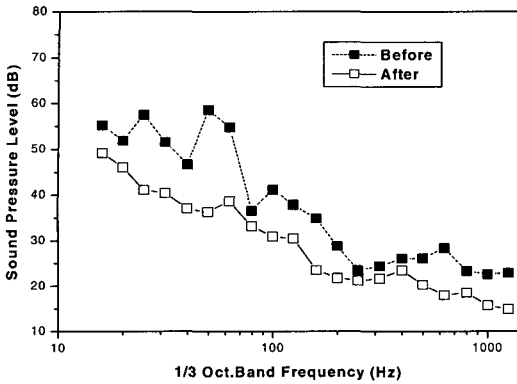


Fig. 16 Frequency analysis result of noise measurement at design art center due to driving of test vehicle

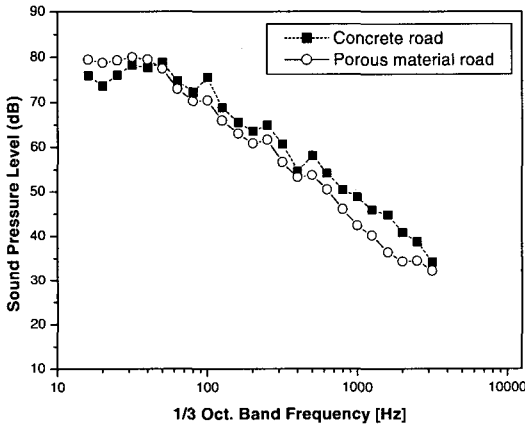


Fig. 17 Frequency analysis result of noise measurement at tunnel due to driving of test vehicle

은 방진패드 공법에 의한 도로포장의 효과로 인해 음압레벨이 감소하였다. 반면, 50 Hz 대역 이상에서의 음압레벨은 측정시 주변의 암소음에 의하여 높은 음압레벨 분포를 보였다.

Fig. 17은 콘크리트 도로와 다공성 아스팔트 포장도로에서의 실차소음 측정결과이다. 콘크리트 도로에 비해 다공성 아스팔트 포장도로가 고주파수 대역에서 낮은 음압레벨 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다. 시험차량의 속도가 40 km/h인 경우, 25 Hz 대역을 중심으로 25 Hz 대역 이하에서는 다공성 아스팔트 포장도로에 비해 콘크리트 도로가 낮은 음압레벨을 보인 반면 25 Hz 대역 이상에서는 콘크리트 도로에 비해 다공성 아스팔트 포장도로가 낮은 음압레벨 분포

를 보이고 있었다. 이러한 현상은 시험차량의 속도가 증가하면 25 Hz 대역이 중심이었던 것이 각각 50 Hz 대역(시험차량속도가 60 km/h인 경우)과 80 Hz 대역(시험차량속도가 80 km/h인 경우)으로 이동하고 있음을 알 수 있었다.

전반적으로 콘크리트 도로와 다공성 아스팔트 포장도로의 소음레벨을 비교해 보면 시험차량속도가 60 km/h인 경우, 약 3 dB(A)의 저감효과가 있었다.

6. 결 론

방진패드 공법에 의한 도로포장 전·후의 음압레벨 측정결과, 디자인 미술관 1층의 경우에는 도로포장 후 음압레벨이 현격하게 감소하다. 특히, 도로포장 전 25 Hz 대역에서 탁월했던 고체전파음이 시험차량의 주행속도에 관계없이 감소했음을 알 수 있었다. 디자인 미술관 2층과 오페라하우스 등에서 측정한 음압레벨을 비교한 결과, 전반적으로 50 Hz 대역 이하에서의 고체전파음은 방진패드 공법에 의한 도로포장의 효과로 인해 음압레벨이 감소하였다. 일반 콘크리트 도로와 다공성 아스팔트 포장도로의 음압레벨 측정결과, 콘크리트 포장도로에 비해 다공성 아스팔트 포장도로가 고주파수 대역에서 낮은 음압레벨 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다. 콘크리트 포장도로와 다공성 아스팔트 포장도로의 소음레벨을 비교해 보면 시험차량속도가 60 km/h인 경우, 약 3 dB(A)의 저감효과가 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 박준철 등, 1999, "차량통행으로 발생하는 도로진동의 전파특성," 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 1 호, pp. 25~32.
- (2) 김문겸 등, 2003, "예술의전당 기시공 박스소음 및 진동영향 분석평가, 연구보고서", 한국소음진동공학회, 5장.
- (3) 김병삼 등, 2004, 우면산 터널 예술의전당 통과구간 방진패드 공법의 도로포장 완료후 소음측정 및 분석, 연구보고서, 우면산 개발(주), 3장.
- (4) 김병삼 등, 2004, 예술의전당 통과구간 지하도로터널에서의 소음저감 대책 수립, 연구보고서, 두산중공업(주), 3장.