

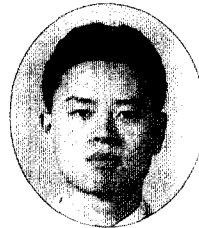
# 재활용재 혼입콘크리트 패널의 진동감쇠성에 대한 사조실험

## Sand-Box Evaluation for Vibration-Attenuation of Concrete Panels with Recycled Materials



정영수\*

Chung, Young-Soo



최우상\*\*

Choi, Woo-Sung



조성호\*\*

Cho, Sung-Ho

### ABSTRACT

Vibration-controlled concrete has been developed by using various concrete mixtures, such as latex, rubber powders, plastic resins and polystyrene(styrofoam). As part of the recycling research of obsolete aged tires and plastic materials, various vibration-reducing mixtures are used for 10 concrete panels having above  $200 \text{ kg/cm}^2$  in uniaxial compressive strength. Plywood box with sand uniformly saturated by the raining device has been used for the analysis of the impact wave, of which data have been transferred by the FFT technique to comparatively investigate damping ratios of 10 concrete panels.

According to wave propagation analysis on vibration-controlled concrete for this research, it can be concluded that Latex concrete has relatively larger damping ratios than those for noncontrolled normal concrete in a similar compressive strength

Keywords : vibration-controlled concrete, vibration-controlled materials, FFT

\* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원, (주)도화종합기술공사 구조부 사원

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

최근 사회기반 시설의 확충에 따른 각종 건설공사 및 지하철에 인접한 구조물의 진동 피해, 각종 기계류 진동에 의한 시설물 피해 등이 많은 사회적인 문제를 야기하고 있는 실정이며, 특히 고속철도가 완공 되면 운행에 따른 진동문제는 더욱 크게 대두되리라 생각된다. 따라서, 본 연구의 목적은 이러한 진동공해 문제를 재료적 측면에서 감소시킬 수 있는 제진 콘크리트 재료의 개발에 관한 것으로서, 여러 가지 사회문제 중의 하나인 폐기물 처리의 한 방안으로서 폐타이어나 폐플라스틱을 원료로 한 제품을 제진재로 사용하였다. 사용된 제진용 결합제는 라텍스, 고무 분말(rubber powder), 플라스틱 레진 그리고, 스타이로폼등으로 이들 재료의 경우 콘크리트의 압축 강도저하를 초래할 수 있으므로 이러한 문제점을 개선한다면 좋은 제진 재료로서 상당히 이용가치가 높으리라 사료된다.

본 연구와 관련하여 제 1 단계 실험으로 제진 시멘트 몰탈 시험체에 대해 도달시간 실험법과 공명진동 실험법을 이용하여 재료적 동적 물성값을 파악하였으며<sup>(13)</sup>, 제 2 단계 예비 실험에서는 제진 콘크리트 보를 제작하여 시험체에 휨진동을 유발시켜 이들의 고유진동수, 감쇠비와 같은 재료적 및 구조적 동적 특성값을 실험적으로 규명하였다<sup>(14)</sup>. 따라서 본 연구에서는 선정된 적정 배합비에 따른 제진 재료를 이용한 진동제어 콘크리트 시험 패널을 제작하여 원지반 매설상태로 이상화시킨 사조(모래함)에서 낙하충격을 이용하여 충격진동을 발생시키고, 이 파형을 푸리에 변환시켜 주파수 영역별 각 패널의 제진 효과를 비교해보는 실내 실험을 실시하였으며, 제작된 강사기의 성능 평가와 사조에 타설된 모래 지반의 균질 정도에 대한 판단은 표면파 해석기법을 응용하여 평가하였다.

## 2. 파의 해석 및 방법

### 2.1 표면파 해석기법의 응용

#### 2.1.1 기본원리 및 방법

주파수영역 표면파 해석기법(Spectral Analysis of Surface Waves : SASW)은 지반이나 구조물의 위상속도 분산곡선을 분석하여 하부 구조의 강성주상

도를 추정하는 기법으로 정의되며, 본 연구에서는 표면파 해석 실험의 응용으로 강사기(raining device)로 타설되어 상대밀도가 조절된 사조에 적용하였다. 연구에 적용된 기법은 반무한 탄성체 내에서 파의 전파에 의한 매질의 강성단면을 추정하는 방법으로 이는 매질 내부에서의 특성에 따라 파의 전파속도가 파의 파장에 따라 변하는 표면파의 분산 특성을 이용하였다. 이러한 특성은 깊이에 따른 매질 내부의 밀도 및 강성 등의 영향을 받으므로, 모래 지반의 균질성은 파장에 대한 표면파 속도의 측정을 통하여 전단파속도 주상도에 의해 검증받게 된다. 표면파 해석 실험에서는 다양한 주파수 특성을 가진 표면파를 발생시키기 위하여 충격하중(impact load)을 가하였다. 이렇게 형성된 표면파는 2개의 수신기에 의하여 감지되고 스펙트럼 분석기를 이용하여 기록된 파는 FFT를 이용하여 주파수영역으로 변환하고 크로스 파워스펙트럼(cross power spectrum)의 위상 정보(phase information)를 평가하였다. 가진된 표면파는 여러 주파수 성분으로 구성되어 있으며 이 성분의 속도를 위상 속도라 하고 위상속도와 파장과의 관계인 분산곡선(dispersion curve)을 계산하였다.

가진된 이후 첫번째 감지기(1ch.)로부터 주파수영역상에서의 신호  $X(f)$ , 두번째 감지기(2ch.)로부터의 신호  $Y(f)$ 를 이용하여 크로스 파워스펙트럼  $G_{12}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{12} = X(f)^* \cdot Y(f) \quad (1)$$

여기서  $X(f)^*$ 는  $X(f)$ 의 공액복소수 값이며, 크로스 파워스펙트럼  $G_{12}$ 는 두 감지기 위치 사이의 위상 정보를 나타내며, 한 지점에서 다른 지점으로 전파되는 표면파의 파장을 통하여 위상 속도를 결정한다. 위상각이 동일한 감지기 사이의 거리로 파장( $\lambda$ )을 구하면, 위상 속도( $V_{Ph}$ )는 아래 식과 같이 해당 주파수( $f$ )에서 위상각( $\phi_{12}$ )과 감지기 간격( $d$ ) 사이의 관계를 이용하여 구할 수 있다.

$$V_{Ph} = f \cdot \lambda = f \cdot \frac{d \cdot 360^\circ}{\phi_{12}} \quad (2)$$

위와 같은 일련의 과정을 수행하여  $V_{Ph}$ 와  $\lambda$ 사이의 분산곡선을 얻을 수 있으며, 모든 감지기 간격에

대해 실험분산곡선이 작성되면 작성된 실험분산곡선 모두를 하나로 합쳐서 축선 상의 변이성을 판단할 수 있으며, 각각의 실험분산곡선으로부터 지반의 강성을 추정하는 역산해석(inversion analysis)에 의해 실험 측정에 대한 일차원적 전단파 속도 주상도를 구하였다<sup>(7),(9)</sup>.

### 2.1.2 실험 절차 및 구성

실험계획에 따른 발진기(source)와 감진기(accelerometer)의 구성 및 배치는 Fig. 1에 보인 바와 같이 발진기와 감진기, 인접감진기 사이의 간격을 각각 10cm 되도록 위치시켰으며, 측정은 10여 곳에서 수행하였다. 측정 간격은 0.15m로 정하였다. 발진기로서는 직경 약 2cm, 길이 약 15cm 정도의 볼트를 사용하여 약 10cm 높이에서 낙하시킴으로 충격을 가하는 방식을 택하였다. 사질토의 경우 충격에 의한 응력파의 에너지가 모래 입자를 통해 전파되는데 다소 어려움이 있어 양호한 실험결과를 얻기 위해 약 40회의 반복실험결과와 평균을 취하는 앙상블 평균(ensemble averaging)기법을 수행하여 최종 위상각 스펙트럼을 구하였다. 앙상블 평균은 주파수 영역에서 수행하는 동일한 조건에서 반복 측정된 신호를 평균함으로써 잡음 성분을 제거하여 신호 대 잡음비를 향상시키는 기법으로, 주로 동적신호분석기에 의해서 실시간으로 행해진다<sup>(3),(5)</sup>. 사조에서 수행된 실험에 의해 발생하는 응력파는 여러 가지 주파수 성분을 포함하고 있지만, 약 0.1m까지 지반 강성을 추정하는 표면파 해석 실험을 위해서는 응력파의 주파수를 약 10kHz까지 측정하여야 한다. 따라서 모래 지반임에도 불구하고 지반 진동의 측정을 위해 가속도계를 사용하였으며, 이는 지표면에 근접한 구간에서의 지반 물성을 파악하기 위하여 고주파 대역에서의 지반 진동 측정이 필요하기 때문이었다.

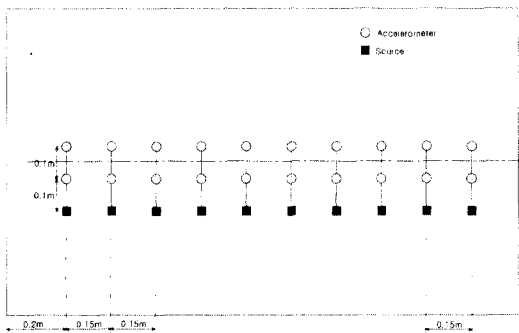


Fig. 1 Composed Method on the SASW

## 2.2 사조내에서의 제진성능평가 방법

실내 즉 제작된 사조에서 강사기에 의해 일정한 높이를 유지하면서 모래를 타설하였고, 진동원은 재하판을 위치시킨 후 약 3cm, 길이 약 20cm 정도의 볼트를 사용하여 약 5cm 높이에서 위치된 진동판 위에 낙하시켜 충격을 가하는 방식을 택하였다. 발진기에 의해서 발생한 응력파의 전파를 감지하기 위한 감지기로는 1,2ch의 공진주파수 2Hz, 감도 7.22volt/in/sec의 속도계 2개와 3, 4, 5, 6, 7ch의 공진주파수 4.5Hz, 감도 0.923volt/in/sec의 속도계 5개, 그리고 감지된 신호는 동적신호분석기를 거쳐 컴퓨터를 이용하여 자료 분석을 수행하였다. 실험 순서는 우선 패널이 없는 사조만의 상태에서 진동 실험을 실시한 후, 각 패널을 사조내에 위치시킨 후 실험을 실시하였다. 진동 실험에 대한 과정은 Fig. 2와 같고 두 가지의 실험 경우가 제시되어 있는데 이는 패널의 매입 유·무에 따른 실험을 나타낸다.

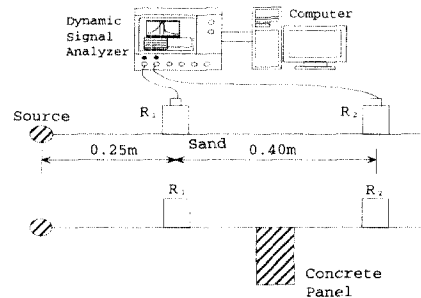


Fig. 2 Analysis Example of Receivers ( $R_1$ ,  $R_2$ )

## 3. 시험체 및 장비 계획

### 3.1 제진재료 및 시험체

동적 하중의 재하로 인한 진동을 억제시킬 수 있는 재료를 개발하고자 콘크리트에 비해 비중이 낮으면서, 강도저하 현상이 상대적으로 적은 제품을 찾기 위하여 예비실험을 실시한 후, 네 가지의 제진재료를 선택하였다<sup>(1),(3)</sup>. 라텍스는 국내 K사의 KSL203, 고무분말은 국내 K사의 KTR101, 그리고 플라스틱 레진은 국내 Y사의 B360F 제품이다. 사용된 제진제 중에서 고무분말 및 플라스틱 레진을 혼합한 콘크리트는 페타이어 및 페플라스틱 제품 등의 재활용을 위한 예비실험으로 제작하였고 스티로폼(Styrofoam)

은 모래를 사용하지 않고 시공 가능한 건축용 내·외부 미장재로 활용 중에 있는 국내 M사의 제품을 이용하여 적용성에 중점을 두었다. 각종의 제진 재료를 이용한 콘크리트 몰탈의 압축강도가 약  $200\text{kg}/\text{cm}^2$  이상 되는 배합비를 찾기 위하여 24배치의 예비실험을 수행하였으며, 시험체 제작에 사용된 주요 재료는 S사의 1종 보통 포오텔랜드시멘트, 단위중량  $1.53 \sim 1.6 \text{ t}/\text{m}^3$ 이고 조립율 2.60 수준인 동해안 지역의 강사, 최대치수 13mm의 굵은 골재와 각종의 제진재료 등이다. 한편, 강도를 증진시키기 위하여 S사의 고성능감수제(멜라민계)를 사용하였으며 슬럼프값(콘크리트의 슬럼프 시험방법 KS F 2402에 의한 결과)을 일정하게 하기 위하여 감수제의 양을 조절하였다. 제진 콘크리트 패널의 시험체는 Fig. 3과 같이 길이 100cm, 폭 50cm, 두께 10cm로 결정하였으며 와이어 직경 4mm, 간격 5cm의 와이어 매쉬를 삽입하여 제작하였다. 제진 콘크리트의 압축강도시험은 KS F 2405에 의하여 수행하였으며, 시험체 종류는 Table 1에서 보인 바와 같이 10종류로 구분하였다. 고성능감수제는 슬럼프값( $120 \pm 10\text{mm}$ )을 기준으로 첨가하였으며, 제진재인 라텍스, 플라스틱 레진, 고무 분말 등을 혼입한 콘크리트는 각각 시멘트중량에 5%와 10%를 사용하였다. 그리고 타 제진재에 비해 비중이 낮은 스티어로폼은 1%와 2%를 첨가하였다. 강도시험은 재령 7일, 28일에 각각 수행하였으며 Table 1은 각 제진 콘크리트의 배합표와 압축강도 실험결과이다.

따라서 SASW실험과 패널 매설을 위하여 상대밀도가 일정하고, 교란되지 않은 이상화된 지반을 만들기 위하여 강사기를 사용하였다. 사조에 타설된 모래는 금강에서 채취된 것으로 부유물질과 유기물질 제거를 위해 세척하였고, 완전 건조후 3mm 체를 통과 시킴으로써 강사기에 사용할 모래의 최대 입경을 작게 하였다.

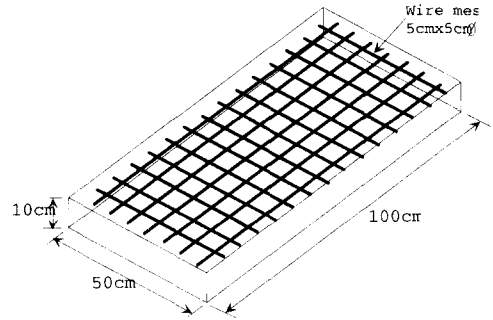


Fig. 3 Schematic Diagram for Panel

### 3.2 실험 장비

#### 3.2.1 진동실험장비

제진 콘크리트 패널의 실험과 타설 지반의 변이성 평가 실험을 위한 장비로서 동적신호분석기는 SA390과 오실로스코프 GRAPHTEC\_MA6000-10을 이용하였고, 가속도계 PCB 308C02 제품을 사용하였다. 주파수 2Hz 2개, Geophone ③~⑦는 감도 0.923volt/in/sec의 공진주파수 4.5Hz 5개의 두종류를

Table 1 Mix proportions and compressive strength of vibration-controlled concrete panels

Type	Specimen Designation	Slump (cm)	Weight per $1\text{M}^3$ Concrete (kg)						Compressive Strength ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	
			Water	Cement	V-C <sup>1)</sup>	Aggregate		Super-plasticizer	7days	28days
						Fine	Coarse			
Normal	N1	12	168	350	-	717	1,144	5.25	241	280
	N2	11		350	-	717	1,144	5.00	238	272
Poly Styrofoam	PS1	11		332.5	3.3(1%)	704	1,119	6.50	210	264
	PS2	10.5		315	6.3(2%)	689	1,100	10.75	142	226
Rubber	RP5	11		332.5	17.5(5%)	704	1,119	6.75	148	228
Powder	RP10	12		315	35(10%)	689	1,100	15.50	90	186
	Plastic Resin	PR5		12	332.5	17.5(5%)	704	1,125	4.50	203
Latex	PR10	11.5		315	35(10%)	694	1,103	4.90	166	207
	L5	11		332.5	17.5(5%)	704	1,125	4.00	254	294
	L10	13		315	35(10%)	694	1,106	2.20	178	239

Note 1) V-C는 Vibration-Controlled Material이고 라텍스, 고무가루분 및 플라스틱 레진의 혼입률은 시멘트 중량에 대한 결합재의 중량비이다.

사용하였고 진원에서부터 진행되어 오는 진동성분의 수직방향 속도이력을 기록하도록 배치하였다.

### 3.2.2 강사기(Raining Device)

토조에 타설되는 모래 지반의 균질성을 확보하기 위해서 강사법으로 모래를 타설하였으며, 사용된 강사기는 Fig. 4에 보인 바와 같다. 강사법이란 일정한 높이에서 일정한 간격의 슬릿 사이로 모래를 낙하시킴으로써 모래 지반의 상대밀도가 일정범위 내에 타설되도록 하고 타설되는 모래 지반이 수직방향으로 나 수평방향으로 균일한 상대밀도를 갖도록 하기 위하여 사용하는 방법이다. 강사기는 길이 1.2m, 높이 0.5m의 크기이며 용량 5ton의 실내 기중기에 의해 운반 및 운용이 가능하도록 제작되었으며, 강사기의 슬릿의 크기는 4mm로 하고 모래를 강하하는 높이는 1.2m로 고정하였다.

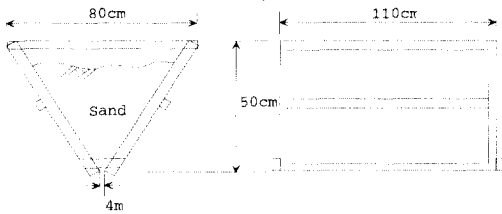
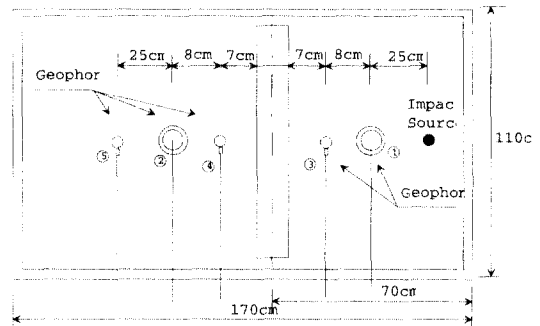


Fig. 4 Schematic Diagram for Raining Device

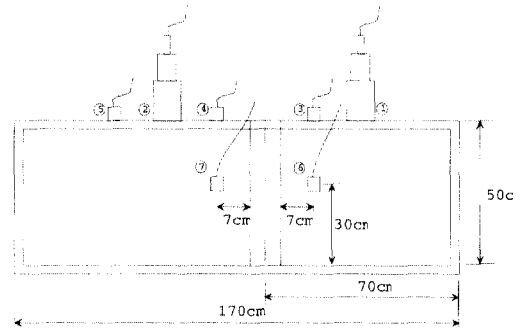
### 3.2.3 사조와 감지기

모형박스는 제작 및 관리를 용이하게 하고, 상대 밀도 조정 등과 같은 모래 지반의 관리를 용이하게 하기 위하여, 직육면체의 형태를 가진 나무 상자로 선택하였다. 소규모 사조에서의 응력과 실험에서는 직접 전달파와 토조 경계면에서 반사되어 돌아오는 반사파의 교란이 문제시 되므로, 응력과 실험에 적합한 사조는 반사파를 최소화시키고, 직접 전달파가 반사파보다 우선적으로 도착할 수 있도록 가능한 큰 형태가 바람직하다. 그리고 응력파의 반사를 최소화하기 위해서 사조 벽체의 재질로 합판을 선택하였으며 합판이 강철판이나 콘크리트 벽체보다 사조내에 타설되는 모래의 임피던스와 유사한 임피던스를 가지기 때문이다. 사조의 크기는 직접 도달파에 대한 파경로보다 반사파의 파경로가 상대적으로 크도록 하여 반사파의 기하학적 감쇠에 의해 반사파의 진폭을 감소시키도록 하였다. 모래 지반의 타설등 작업조건을 고려하여 사조의 크기는 170cm×110cm×50cm로서 높이 50cm는 전달되는 응력과 중 표면파의 파

장보다 크게 계획하고 패널의 높이와 일치시켜 패널 하단부의 지반을 통하여 전달되는 파를 차단하고자 하였다. 실험에 적용된 진동원의 위치는 감지기의 거리를 고려하여 패널에서부터 수직방향으로 0.4m에 배치하였다. 진동은 재료적 감쇠(material damping) 뿐만 아니라 기하학적 감쇠(spatial damping)의 영향으로 진동원에서부터의 거리에 따라 감소되며, 표면파와 실체파의 전파 특성으로 인하여 깊이에 따른 저감 효과도 예상되므로 패널 20cm하단 중앙부에도 감지기를 배치하여 구조물의 기초 깊이에 따른 진동에 대한 영향도 조사하였다. 사조의 크기와 자세한 진동원과 감지기의 위치는 Fig. 5와 같다.



평면도



입면도

Fig. 5 Test Setup for Wave Propagation Analysis in Sand Box

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 타설 지반의 변이성

#### 4.1.1 실험분산곡선

사조의 길이 방향으로 10회에 걸쳐 SASW 실험이 수행이 되었고, 각각의 실험에 대해 실험분산곡선을 구하였으며, 실험분산곡선 상호 간의 변이를 조사하기 위하여 Fig. 6에 모두 중복해서 도시하였으며, 10개의 실험 분산곡선은 대체적으로 좁은 띠를 이루고 있음을 알 수 있는데, 이는 횡방향으로 균일한 정도를 암시하는 것이다. 도시된 10개의 축점에 대한 각각의 실험분산곡선 상호 간의 변이는 각 실험분산곡선에 상응하는 축점간의 지반물성의 차이를 의미하고 있다. 파장과 지반의 깊이와는 단순한 관계식으로 표현할 수 없으나, 인근 축점의 분산곡선과의 비교는 지반의 균질성을 판단하는데 중요한 단서가 될 수 있다.

#### 4.1.2 전단파 속도 주상도

전단파속도의 등고선 도표를 구하기 위해 각 10개의 SASW 실험 축점에 대한 일차원적 분산곡선을 구하였고, 10개의 실험분산곡선에 대해 각각 역산해석을 수행하여 10개의 전단파 속도 주상도를 결정하였다. Fig. 7은 역산해석에 의한 전단파 주상도로서 깊이 0.08m에 강성이 높은 모래층이 위치하고, 그 아래에 강성이 낮은 층이 이어지고 있음을 알 수 있다. 모래의 강하높이를 결정하기 위한 예비실험시 강사기 내의 잔류 모래 량에 대한 고려는 하지 않았었는데, SASW 실험 결과 모래의 강하높이에 대한 영향보다는 강사기 내의 잔류 모래량에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 실내 실험시 사조를 모래로 가득 채우기 위해서 강사기를 약 4.2번 사용하였다. 이러한 점을 고려할 때, Fig. 7의 토모그래피(tomography)가 보여주고 있는 깊이 약 0.08m 지점은 바로 이 강사법에 의한 모래 타설의 불연속점, 즉 이 지점에서 강사기에 모래를 다시 채워 강사하였음을 나타낸다. 모래를 가득 채웠을 때의 강사기와 모래가 거의 바닥이 되었을 때의 강사기는 서로 상이한 상대밀도의 지반을 타설한다고 할 수 있으며, 본 연구를 위해서 제작된 강사기는 수평방향으로는 거의 상대밀도가 일정한 지반을 타설하지만, 깊이방향으로는 타설된 지반이 균질하지 않은 것으로 판단된다.

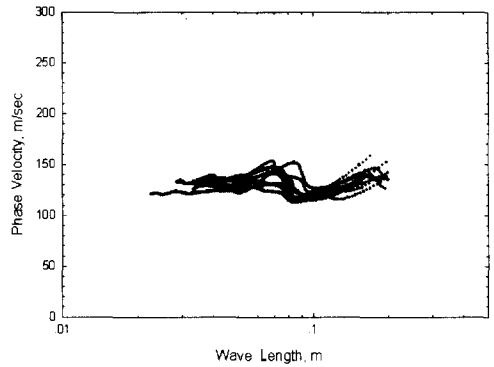


Fig. 6 Dispersion Curves of 10 SASW Tests in the Sand Box

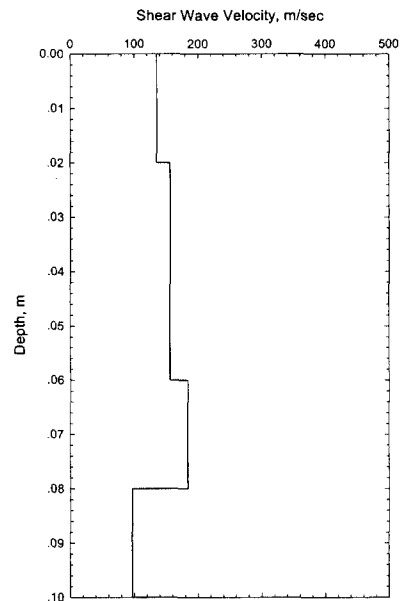


Fig. 7 Profile of Shear Wave Velocity Based on SASW Tests in the Sand Box

#### 4.2 시간 영역 분석

시험 패널을 설치하지 않은 상태에서 Fig. 5와 같이 감지기를 위치시킨 후 낙하충격에 의한 진동실험을 실시하였으며, 패널 설치 이전 상태에서 진동에 의해 각 감지기 위치에서의 진폭을 기준으로 각 패널의 진동 감쇠 정도를 상대적으로 비교 분석하였다. 이후 타설된 모래를 제거하고 사조에 패널을 위치시킨 후 다시 강사법에 의해 모래를 타설하여 2.2절의

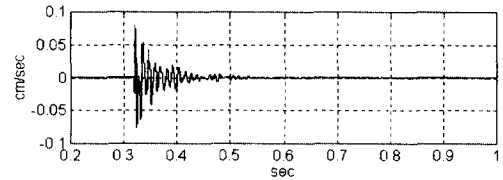
실내 실험을 각 패널에 따라 반복하였다.

시간영역분석은 계측된 시간이력곡선에서의 시험 패널 종류에 따른 예비적인 평가로서 진폭감쇠의 정도를 파악하여 보았다. 시험패널 전·후에 위치한 속도계에 감지된 속도 진폭의 저하정도를 파악하는 분석으로, 낙하 충격에 의한 전압 진폭을 속도진폭으로 변환하여  $y(t)_{Rii}$ 와 같은 비(ratio)의 값을 산출하였다.

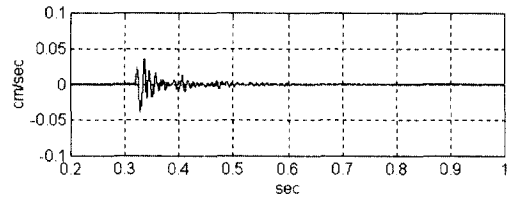
$$y(t)_{Rii} = y(t)_i / y(t)_j \quad (3)$$

여기서,  $y(t)_i$ 는 패널 통과전에 위치한 감지기의 최대 진폭값(ch.1,3,6),  $y(t)_j$ 는 패널 통과후에 위치한 감지기의 최대 진폭값(ch.2,4,7)이다. 이러한 분석은 주파수 영역별 분석 이전에 대체적인 패널의 감쇠도 성능을 예측할 수 있는 자료로 평가된다<sup>(2),(3)</sup>. Fig. 9는 실내실험에 의해 PR10 패널 삽입상태의 3, 4감지기에 계측된 시간이력 곡선이며, Table 2는 각 시험체별 시간영역분석 결과표로서 각 패널 전후의 비(Ratio)를 산출하여 대체적인 감진정도를 파악하였다. Fig. 9에서 각 감지기와 패널 종류별로 도시해본 결과 패널 삽입 이전의 상태(Sand Box의 약자로서 SB)에서 가장 높고 일반 콘크리트에 비해 제진재가 혼합될수록 낮게 나타났으며, 이는 감쇠정도는 제진 콘크리트에서 높게, 그리고 패널 매입 이전상태에서 가장 낮게 나타난 것을 의미한다. 즉 패널의 종류에 무관하게 패널 자체의 존재가 감진체의 역할을 하는 것으로 판단된다. 감지기 3-4, 6-7의 경우에는 감지기의 위치가 시험 패널에 상대적으로 가장 밀접해 있기 때문에 패널에 의한 진동의 저감효과가 상대적으로 잘 나타난다고 판단되며, 라텍스와 고무

분말 계열에서 가장 큰 감진 효과가 일어났으며, 제진재의 함유량이 진폭의 감쇠에 영향을 미친 것으로 나타났다.

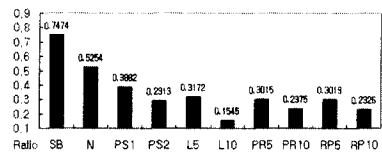


(a) At Ch. 3 Before Concrete Panel

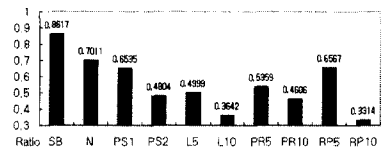


(b) At Ch. 4 After Concrete Panel

Fig. 8 Time Domain History



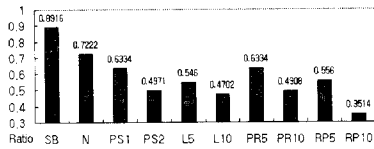
(a) Ch. 2 / Ch. 1



(b) Ch. 4 / Ch. 3

Table 2 Time Domain Analysis of the Sand Box Test

Specimen	Receiver 1-2			Receiver 3-4			Receiver 6-7		
	$y(t)_1$	$y(t)_2$	$y(t)_{R21}$	$y(t)_3$	$y(t)_4$	$y(t)_{R43}$	$y(t)_6$	$y(t)_7$	$y(t)_{R76}$
SB	0.1908	0.1426	0.7474	0.1024	0.0883	0.8617	0.0557	0.0497	0.8916
N	0.1770	0.0929	0.5254	0.0605	0.0424	0.7011	0.0524	0.0378	0.7222
PS1	0.1725	0.0444	0.3882	0.0753	0.0492	0.6535	0.0507	0.0321	0.6334
PS2	0.2263	0.0659	0.2913	0.0623	0.0299	0.4804	0.0825	0.0410	0.4971
L5	0.1375	0.0436	0.3172	0.0582	0.0291	0.4999	0.0549	0.0300	0.5460
L10	0.2488	0.0384	0.1545	0.0843	0.0307	0.3642	0.0776	0.0365	0.4702
PR5	0.1274	0.0396	0.3105	0.0492	0.0264	0.5359	0.0395	0.0250	0.6334
PR10	0.2207	0.0524	0.2375	0.0785	0.0362	0.4606	0.0751	0.0369	0.4908
RP5	0.1598	0.0482	0.3019	0.0391	0.0257	0.6567	0.1017	0.0257	0.5560
RP10	0.3010	0.0700	0.2326	0.1130	0.0375	0.3314	0.0487	0.0271	0.3514



(c) Ch. 7 / Ch. 6

Fig. 9 Attenuation Ratio of Velocity Amplitude in Time Domain

#### 4.3 투과파와 반사파에 대한 가정

방사기가 모래공급의 제한성으로 인하여 깊이 방향으로는 상대밀도를 균일하게 조성하지 못하였으므로 Fig. 10에 도시한  $d_i$  위치에서 지반 층(layer)의 존재와, 층에 의한 반사파 ②, ③, ④의 존재 가능성을 확인할 수 있었다. 이상화시킨 지반으로 구성한 사조에 패널을 횡방향으로 위치시키어 지반을 차단시켰으며, 파의 전파에 따른 에너지 량의 감쇠정도를 파악하기 위하여 파가 투과될 때의 재료적 감쇠비에 따른 투과파 지배 대역과 전달파의 차단 원리인 중간에 위치한 이질 매층과의 임피던스 차에 의한 반사파 지배 대역을 조사하였다. 진동이 지반을 전파하여 패널과 충돌하게 되면 지반과 시험 패널의 임피던스비와 주파수 영역에 따라 투과(pass), 굴절(refraction) 그리고 반사(reflection)를 일으킨다. 지반에 매설된 패널에 의한 감쇠효과를 파악하기 위해 투과, 굴절과 영향의 지배적 구간과 반사파에 의해 지배적인 구간을 주파수 영역에서 살펴보았다. 두 파 영역상에서 감쇠 특성을 살펴보면, 먼저 투과파 지배 영역에서는 패널의 재료적 감쇠로 인한 감쇠효과, 반사파 지배 영역에서는 파의 차단원리에 근거하여 지반구성 물질, 즉 모래와 패널의 임피던스 차에 의한 감쇠효과가 지배적인 것으로 판단된다. 패널의 재료적 감쇠비(material damping ratio)는 제진 시멘트 몰탈의 재료적 물성연구에서 제진 콘크리트의 재료적 감쇠효과가 나타남바 있으므로 투과파 지배 영역에서의 효과가 기대되었다<sup>(13)</sup>. 한편 반사파 지배영

역 영역 상에서는 제진제가 포함되어 경량화 된 콘크리트보다 일반콘크리트가 상대적으로 비중이 크므로 전달파의 차단에 의한 감쇠효과가 기대된다

시간영역상에서 1, 2, ... 감지기로부터 얻어진 신호  $x(t)$ ,  $y(t)$ , ...는 FFT를 사용하여 주파수영역상에서의 신호  $X(f)$ ,  $Y(f)$ , ...로 나타낼 수 있다. 이와 같은 신호를 이용하여 시험 패널 전에 위치한 1ch.의 오토 파워스펙트럼(auto power spectrum)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$G_{11} = X(f)^* \cdot X(f) \quad (4)$$

여기서  $X(f)^*$ 는  $X(f)$ 의 공액값이다. 공존할 수 없는 이 두영역의 구분은 Fig. 12에서와 같이 패널 유·무에 따른 패널 이전에 위치한 감지기에서 파워 스펙트럼(power spectrum)의 진행 경향을 비교하여 판단하였다. 각 실험에 따른 진동원의 크기와 주파수 대역이 일정하지 않음을 고려하여 사조와 전패널의 파워 스펙트럼(power spectrum)상에서 변곡점(pick point와 nodal point)의 유사성에 대하여 Table 3의 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 시험 패널 설치 전 스펙트럼과 일반패널을 포함한 전 제진패널 시험체에 걸쳐 거의 유사한 주파수 대역에서 변곡점이 나타남을 알 수 있었으며 투과파와 반사의 구분 주파수 대역은 200~220Hz정도인 것으로 판단하였다.

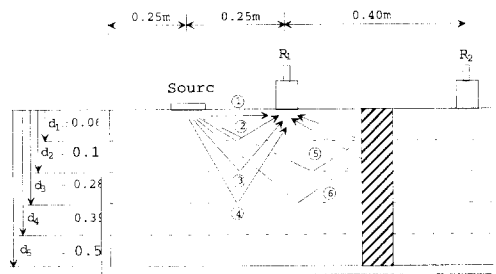
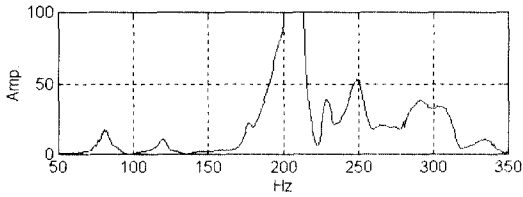


Fig. 10 Typical Behavior of Reflected Waves Layered Soil

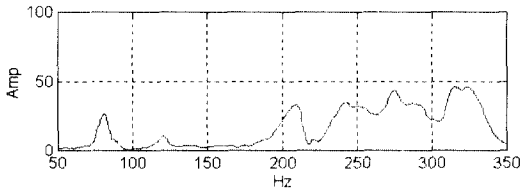
Table 3 Turn Point at Power Spectrum

Specimen	Pick Point (Hz)			Nodal Point (Hz)			Specimen	Pick Point (Hz)			Nodal Point (Hz)		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
SB	81.3	123.4	210.8	93.1	140.5	221.6	L10	80.6	124.0	210.3	91.5	142.6	223.5
N	82.1	122.8	210.7	94.2	142.8	218.4	PR5	80.9	125.4	209.5	90.3	143.8	218.6
PS1	82.4	122.2	208.5	94.3	141.5	220.5	PR10	81.4	122.0	208.6	93.5	142.7	217.5
PS2	81.7	120.4	212.3	96.5	143.5	217.6	RP5	80.8	124.6	209.3	92.2	141.5	219.1
L5	81.5	121.5	211.0	92.1	140.3	214.6	RP10	81.7	122.4	211.5	92.5	139.8	220.5





(a) Without Panel (SB Specimen)



(b) With Panel (N Specimen)

Fig. 11 AutoPower Spectrums

#### 4.4 주파수 영역 분석<sup>(3),(4),(6),(13)</sup>

##### 4.4.1 패널의 재료적 감쇠비

반사파의 간섭 영향을 살펴본 결과 파의 투과파 지배 영역, 즉 200Hz 이내 구간에서 패널의 재료적 감쇠비에 의한 진동 감쇠효과를 기대할 수 있었다. 따라서 Fig. 5에서와 같이 시험패널 전·후에 위치한 감지기 각 간격 내에 패널과 지반을 한 구성물질로 보고 감쇠 정도를 살펴보기 위하여 주파수 영역별로 재료적 감쇠비를 조사하였다. 조사 주파수대역으로 파의 투과파 지배영역인 0~200Hz 구간에서 식(5)에 의해 산출하였는데 Table 4의 결과는 각 감지기 위치에서의 주파수별 재료적 감쇠비에 대한 평균값이다.

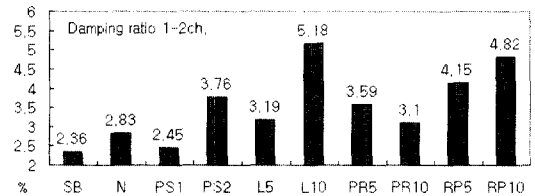
$$D = \frac{\ln[A_1 d_1 / A_2 d_2]}{2 \pi t f} \rightarrow \frac{\ln[A_1 \sqrt{d_1} / A_2 \sqrt{d_2}]}{2 \pi t f} \quad (5)$$

여기서,  $t$ 는 거리  $d_1$ 과  $d_2$ 사이에서 파의 진행사

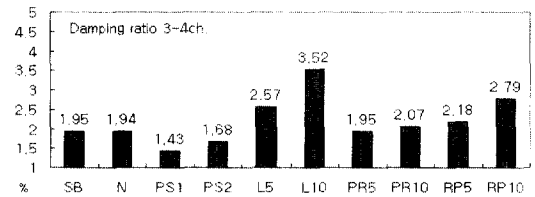
Table 4 Material Damping Ratio with Panels

Specimen	material damping ratio(%)			Specimen	material damping ratio(%)		
	Reciever 1-2	Reciever 3-4	Reciever 6-7		Reciever 1-2	Reciever 3-4	Reciever 6-7
SB	2.36	1.95	2.89	L10	5.18	3.52	4.25
N	2.83	1.94	3.05	PR5	3.59	1.95	3.68
PS1	2.45	1.43	3.15	PR10	3.1	2.07	3.72
PS2	3.76	1.68	3.69	RP5	4.15	2.18	4.22
L5	3.19	2.57	3.74	RP10	4.82	2.79	4.77

간,  $f$ 는 파의 주파수이다. 진원으로부터 거리가  $d_1$ 과  $d_2$ 인 위치에서의 시간기록은 푸리에 변환을 사용하여 주파수 영역으로 변환해야 한다. 각 주파수에서  $A_1/A_2$ 는 주파수 영역 상에서의  $d_2$  신호의 진폭으로  $d_1$  신호의 진폭을 나누므로서 계산할 수 있다. 그리고, 각 주파수에서의 감쇠비는 식(5)에서 기하학적인 감쇠의 영향을 거리에 대한  $d \rightarrow \sqrt{d}$ 으로 소거하여 재료적 물성을 파악하였으며[8,9] 결과는 Table 4, Fig. 12와 같다. 라텍스와 고무분말계열에서 크게 나타났고 제진제의 배합비율에 따라 감쇠효과가 증가하는 경향이 나타났다. 그리고 일반콘크리트와 제진 콘크리트와의 감쇠비 차이도 확실히 드러났다. 이는 콘크리트 배합시 첨가한 제진제의 배합량이 실험결과에 영향을 미친 것으로 판단된다.



(a) Ch. 2 / Ch. 1



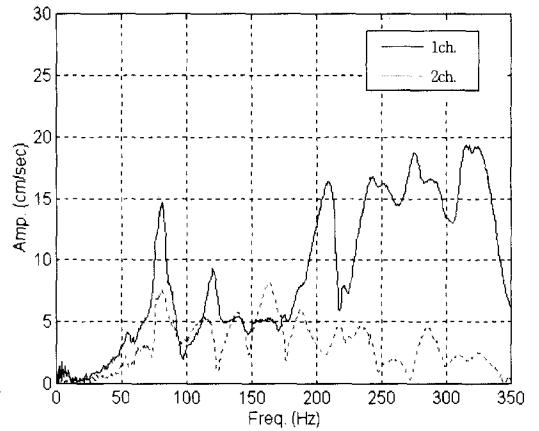
(b) Ch. 4 / Ch. 3

Fig. 12 Material Damping Ratios of Test Specimen

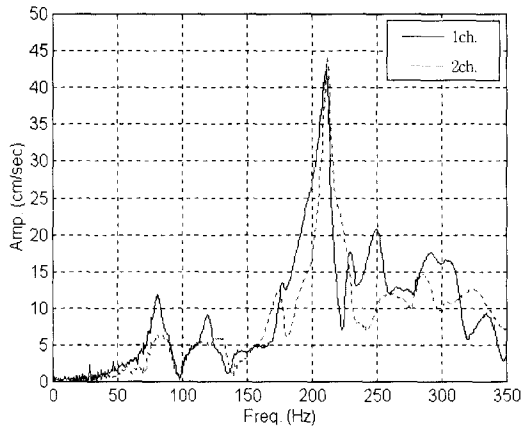
##### 4.4.2 주파수영역별 감쇠효과

주파수 대역별 감쇠효과를 파악하기 위하여 시험패널 전·후에 위치한 감지기에서의 진폭 스펙트럼(magnitude spectrum)을 이용하여, 우세 주파수 3

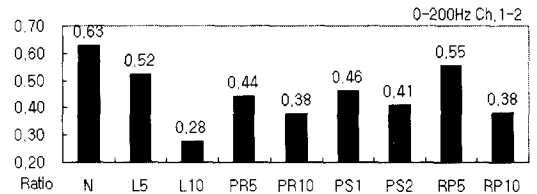
(dominant frequency) 대역에서의 감쇠효과를 조사하였다<sup>(5),(6)</sup>. 충격 진동에 의해 전달된 파의 Peak Frequency 대역에서 진폭의 감쇠정도를 파악하는 기법으로 투과파 지배 영역과 반사파 지배 영역에서의 각 시험패널 별 감쇠성을 Table 5와 Fig. 14로 나타냈으며, Peak값에서 3db 가량 내려온 값에서 Root Mean Square(RMS)방법을 사용하여 평균값을 구하였다[9]. 투과가정 영역과 반사파 간섭영역 기준, 즉 200Hz이전과 이후의 주파수 대역을 F1과 F2라하고 전달함수(transfer function)의 평균을 살펴보았다. Fig. 15에서 나타낸 바와 같이 투과파 지배 영역(200Hz이내 구간)에서는 일반 패널에 비하여 제진재가 첨가된 시험패널에서 진동의 감쇠폭이 크게 나타나고 있으며, 반대로 반사파 지배 영역(200Hz이후 구간)에서는 오히려 일반 시험패널이 감쇠효과가 크게 나타났다.



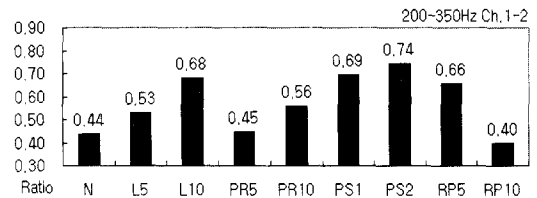
(b) With Panel (N Specimen)  
Fig. 13 Magnitude Spectrums



(a) With out Panel (SB Specimen)



(a) Passive Wave Domain in 0~200Hz



(b) Reflected Wave Domain in 200~350Hz

Fig. 14 Damping Variation of Test Specimens in Dominant Frequency Region

Table 5 Average of Transfer Function at Sand-Box Test

Specimen Designation	Reciever 1-2		Reciever 3-4		Specimen Designation	Reciever 1-2		Reciever 3-4	
	F1	F2	F1	F2		F1	F2	F1	F2
SB	0.92	0.91	0.89	0.90	L10	0.28	0.68	0.61	0.80
N	0.63	0.44	0.71	0.49	PR5	0.44	0.45	0.70	0.44
PS1	0.46	0.69	0.73	0.59	PR10	0.38	0.56	0.56	0.57
PS2	0.41	0.74	0.68	0.62	RP5	0.55	0.66	0.57	0.55
L5	0.52	0.53	0.72	0.60	RP10	0.38	0.40	0.59	0.51

## 5. 결론 및 추후연구과제

기계류 작동에 의한 충격 진동을 야기시키는 경우 기계 기초 부근에서 고주파 성분을 포함한 충격파동이 감지되고, 기초로부터 멀어짐에 따라 충격파는 급격히 감소되고, 저주파 성분을 포함하는 표면파가 먼 곳까지 전달된다. 따라서 전달된 파의 해석은 표면파와 350Hz이하의 주파수영역 중심으로 해석하였고 결론은 다음과 같다.

(1) 제진 콘크리트 시험체 패널의 압축강도를 살펴보면 현장작용성에 의구심 야기되었던 스티어로폼의 경우 일반콘크리트와 크게 차이를 보이지는 않았으며, 라텍스의 경우 오히려 일반콘크리트에 비해 크게 나타났다. 이는 배합시에 나타난 라텍스의 유동성이 강도와 작업성에 유리하게 작용한 것으로 판단된다.

(2) 본 연구에서 사조의 상대밀도를 균일하게 하기 위하여 사용한 강사기가 수평방향으로는 거의 균질한 지반을 타설하지만, 깊이방향으로는 상대밀도를 균일하게 조성하지 못하여 타설된 지반이 균질하지 않게 되므로 개선의 필요성이 요구되었다.

(3) 사조 내에서의 성능평가 실험에서 투과 및 굴절과 지배 주파수 영역과 반사파의 간섭 영역에 대한 대략적인 전환점을 확인할 수 있었다.

(4) 주변 여러 환경에서의 야기되는 진동원을 살펴볼 때 지하철 구조물 내부에서는 120~300Hz 영역에서, 지반에 전달되는 범위는 30~80Hz 영역에서 최대값이 나타나는 점을 감안할 때 이와 같은 저주파 영역에서의 시험체의 감쇠 성능이 크게 나타남을 확인할 수 있었다<sup>(10),(12),(15)</sup>.

결론적으로 제진재가 시험체 밀도의 감소로 인한 압축강도 저하와 그에 따른 감쇠비 상승이라는 어느 정도의 상관관계를 나타내었지만 라텍스의 경우 유동성과 일반콘크리트와 유사한 압축강도, 그리고 고제진성등이 나타나 적절한 제진재가 될 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 주파수 대역에 따른 패널의 진동 감쇠 특성상 제진 콘크리트와 고강도 콘크리트 패널을 병렬로 배열하면 보다 월등한 제진 효과가 기대되리라 판단된다. 그러나 이와 같은 결론은 일반 콘크리트와 제진재 혼입 콘크리트와의 비교를 주로 하여 얻었으며 각종 제진재 혼입 콘크리트간의 진동 성능평가에 대한 기준은 추후연구를 통해서 명확히 할 필요가 있다고 사료되며 진동원으로서 낙하충격 방법대신에 진동기(vibrator)에 의한 진동원의 주파

수 대역 설정이 필요하리라 판단된다. 한편, 제진재 혼입에 따른 진동감쇠성 향상 및 콘크리트 압축강도 저하에 관한 문제는 추후에 보다 심도있는 연구가 필요하다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단 특정연구(과제 번호 : 94-0600-05-01-3) 지원비에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 마음을 표합니다. 또한 농어촌진흥공사 관계자 여러분께도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. ACI Committee 213, Report 213R-79, "Guide for Structural Lightweight Concrete," *Concr. Int.*, Vol. 1, No. 2. 1979.
2. Bendat, J. S., Piersol, A. G., "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis," John Wiley & Sons, Inc., 1993.
3. Broch, J. T., "Mechanical Vibration and Shock Measurements," Brüel & Kjær, 1984.
4. Cyril M. Harris, "Shock and Vibration Handbook," McGraw-Hill, Inc., 1961.
5. E. Oran Brigham, "The Fast Fourier Transform and It's Application," Prentice-Hall, 1986.
6. Ewins D. J., "Modal Testing Theory and Practice," Brüel & Kjær Korea Ltd., 1986.
7. Kalinski, M. E., "Measurement of Intact and Cracked Concrete Structural Elements by the SASW Method," Master Thesis, The University of Texas at Austin, 1994.
8. Mok, Young Jin, "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods," Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin, 1987.
9. Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., and Woods, R. D., "Vibrations of soils and foundations," Prentice-Hall, Inc., 1970.
10. Volberg, G., "Propagation of Ground Vibration Near Railway Track", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 82, No. 2, 1983.
11. 大崎順彦, "地震動のスペクトル解析入門," 島出版 1994.
12. 백영식, 심재수, 정영수, 1996, "진동공해 예측과 방

- 지 기술에 관한 연구, 특정연구과제 2차 중간보고서," 한국과학재단, 1996.
13. 정영수, 이대형, 최우성, "진동제어 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구(1)," 한국 콘크리트 학회지 논문집, 제 8권, 5호, 1996. 8..
  14. 최우성, 이대형, 정영수, "진동제어 콘크리트 보의 하중 단계에 따른 동적 특성에 관한 실험적 연구," 한국 콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol. 9, No. 1, 1997. 5.
  15. "지하철 시설물의 진동영향에 관한 세미나", 서울 특별시 지하철 공사, 1993.

## 요 약

본 연구는 진동규제기준 설정을 위한 기본적인 연구의 일부로서 진동을 억제시킬 수 있는 제진 콘크리트 재료의 개발에 관한 것이며 제진용 결합재로서 라텍스(latex), 고무 분말(rubber powder), 플라스틱 레진(plastic resin) 그리고 스티이로폼(發泡 polystyrene : styrofoam)등을 사용하였다. 선정된 적정 배합비에 따른 제진 재료를 이용한 진동제어 콘크리트 시험 패널을 제작하여 원지반 매설상태로 이상화시킨 모래 사조에서 낙하충격을 이용하여 충격진동을 발생시키고, 이 파형을 퓨리에 변환시켜 주파수 영역별 각 패널의 제진 효과를 비교해보는 실내 실험을 실시하였다. 또한 모형 박스로 제작한 사조에 모래 타설을 위하여 제작된 강사기의 성능평가와 토조에 타설된 모래지반의 균질(homogeneity)정도를 판단하기 위하여 표면파 해석기법을 응용한 횡방향 변이성을 실험분산곡선과 전단파 속도 주상도를 이용하여 평가하였다.

(접수일자: 1998. 3. 4)