

# 진동제어 콘크리트 패널의 제진성능 평가에 관한 실험적연구

## Experimental Evaluation for Vibration Reduction Capability of Vibration-Controlled Concrete Panels

최우성\* 박용구\* 조성호\*\* 정영수\*\*  
Choi, Woo-Sung Park, Yong-Gu Cho Sung-Ho Jung, Young-Soo

### ABSTRACT

With the aid of advanced structural engineering, the construction of infrastructures has been recently accelerating to keep up with rapid economic growth. Construction activities and operation of transportation facilities cause civil petitions associated with vibration-induced damages or nuisances. As part of the decrease of vibration induced damage, the objective of this study is to develop vibration-controlled concrete with vibration-reduced materials, which can be recycled from obsolete materials, such as aged tires, plastics and etc.

Appropriate mix proportion has been used for making 10 reinforced concrete panels with vibration-reduced material, which have been tested to investigate on vibration reduction capability, based on the time and frequency domain analysis, and vibration velocity level analysis. Vibration-reduced mixtures are latex, styrofoam, rubber powder and plastic resin, which have been determined to by reduce vibration.

### 1. 서론

오늘날 과학기술의 발달은 긴 교량, 고층건물, 우주선, 선박과 같은 거대한 구조물이나 자동차, 철도차량, 비행기와 같은 운송수단의 발달과 더불어 최근의 각종 사회시설의 확충에 따른 건설공사 및 교통시설 등의 변천과정에서 진동에 대한 지식의 중요성이 날로 커지고 있다. 진동이론의 발달은 물리학의 역학분야의 발전과 수학의 도움으로 이룩되었고 전자기기의 급속한 발전과 더불어 근사해를 얻을 수 있어 설계분야에 적용할 수 있게 되었다.

본 연구는 각종 제진재료를 이용하여 진동을 억제할 수 있는 콘크리트를 개발하여 각종 건설공사에서 흔히 발생할 수 있는 진동공해문제를 억제하고자 하며 비파괴 진동실험을 통하여 구조물의 손상정도를 파악할 수 있는 방법을 모색하고자 한다. 즉, 콘크리트 구조물의 균열에 따른 진동수의 추이를 평가하여 대상구조물의 사용성을 평가하고자 하는데 그 의의가 있다. 본 연구에서는 제진용 결합재로서 1) Latex, 2) Rubber Powder 3) Plastic Resin 그리고 4) 發泡Polystyrene (styrofoam) 등을 사용하여, 선정된 적정

\* 정희원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정

\*\* 정희원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

배합비에 따른 제진재료를 이용한 진동시험체 패널을 제작하였다. 원지반 매설상태로 이상화시킨 모래 토조에서 낙하충격을 이용하여 충격진동을 발생시키고, 이 파형을 푸리에 변환시켜 각 패널의 제진효과를 비교해보는 실내 실험을 실시하였다. 충격진동시 발생하는 지반진동에 대한 제진 패널에 따른 영향을 살펴보기 위해 각 패널의 고유주기에 대한 Transfer function과 진동레벨에 의한 분석으로 제진 성능을 평가해보았다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 제진 콘크리트 슬래브 제작

#### 2.1.1 사용재료

각종의 제진재료를 이용한 콘크리트몰탈의 압축강도가 약  $200\text{kg/cm}^2$  이상 되는 배합비를 찾기 위하여 24배치의 예비실험을 수행하였으며, 사용된 주요 재료는 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트, 단위중량  $1.53 \sim 1.6\text{ t/m}^3$ 이고 조립을 2.60 수준인 강사와 최대치수 19mm의 굵은골재와 각종의 제진재료 즉 라텍스, 고무가루분 및 플라스틱 원료 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. 한편, 동적하중의 재하시 발생하는 진동의 크기를 억제하는 효과를 위해 사용된 Latex는 국내 K사의 KSL203제품, 국내 K사의 Rubber Powder 및 국내 Y사의 Plastic Resin을 사용하였다. 사용된 제진제 중에서 Rubber Powder 및 Plastic Resin을 혼입한 콘크리트는 페타이어 및 페플라스틱제품등의 재활용을 위한 예비실험으로 제작하였다. 그리고 Poly Styro-foam은 모래를 사용하지 않고 시공가능한 건축용 내, 외부 미장재로 활용중에 있는 시중 제품을 이용하여 적용성에 중점을 두었다. 제진재료로 사용한 제품의 자세한 물성은 참고문헌 (7)에 언급하였고, 제진 콘크리트 패널의 시험체는 단면치수  $100 \times 50 \times 10\text{cm}$ 이며 5cm 와이어 매쉬를 삽입하여 제작하였다.

#### 2.1.2 배합표 및 압축강도

배합은 기존의 제진콘크리트 몰탈의 실험결과에 따라 압축강도가 양호하게 나타난 배합비를 기준으로 하였다. 제진콘크리트의 압축강도시험은 KS F 2405에 의하여 수행하였으며, 배합종류는 각 제진제에 대한 최적혼입량을 표 1에서 보인 바와 같이 10종류로 구분하였다. 고성능감수제는 슬럼프값( $120 \pm 10\text{mm}$ )을 기준으로 첨가하였으며, 각각의 배합에 대한 강도특성을 비교·분석하였다.

표 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 ( $\text{kg/cm}^2$ )		
			Water	Cement	V-C	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 Powder	RP5	11		332.5	17.5(5%)	704	1.119	6.75	148	228
	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	259
	PR10	11.5		315	35(10%)	694	1.103	4.90	166	207
Latex	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

강도실험은 재령 7일, 28일에 각각 수행하였으며 표1.은 각종 제진재를 사용한 제진콘크리트의 배합표와 압축강도실험결과이다. 표 1에서 V-C는 Vibration-Controlled Material의 혼입률이며 ( )안의 %는 시멘트 중량에 대한 결합재의 중량비이다. 시험체명 N은 제진재료가 혼입되지 않은 일반콘크리트, 즉 기준콘크리트로서 같은 배합비로 2개의 시험체를 제작하였다.

## 2.2 강사기(Raining Device)와 토조(Sand Box)제작

상대밀도는 점성토의 Consistency를 나타내는 지수에 상당하기 때문에 밀도지수라고도 말하며, 최근 모래지반인 경우 각종공사의 토질조사에서 그 이용범위가 증가하고 있고 공시체나 모델지반을 원지반의 역학적 특성과 유사하게 조성하기 위하여 상대밀도를 고려한 지반을 조성하기 위하여 강사법을 이용한다.

Model box의 제작 및 관리를 용이하게 하고, 상대 밀도 조정 등과 같은 sand 지반의 관리를 용이하게 하기 위하여, 직육면체의 형태를 가진 나무 상자로 선택하였다. 또한 나무 상자의 벽면, 즉, reflection boundary에는 모래의 자중에 의해 벽면에 발생하는 변형, 즉 모래의 상대밀도의 변화를 막기 위해 그림에서와 같이 앵글로 격자보강을 하였다. 토조(Sand box)의 크기는 직접 도달파에 대한 Wave path보다 반사파의 Wave path가 상대적으로 크도록 하여 반사파의 기하학적 감쇠에 의해 반사파의 진폭을 감소 시키도록 한다. 모래 지반의 타설등 작업조건을 고려하여 제안하는 토조의 크기는 170cm×110cm×50cm로서 그림 1과 같다.

## 2.3 진동원(Source)과 감지기(Receiver)의 위치

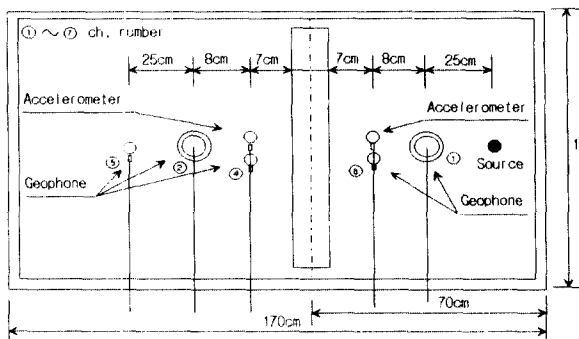


그림 1. 토조의 크기와 진동원, 감지기의 위치

시험 패널에서부터 진동원까지의 거리는 진동의 저감에 상당한 영향을 미치므로 패널의 저감효과를 판단하기 위해서는 진동원을 패널에 다소 가까이 위치시킴이 중요하다. 따라서, 실험에 적용된 진동원의 위치는 감지기의 거리를 고려하여 패널에서부터 수직방향으로 0.4m이다. 진동은 재료적인 감쇠효과 뿐만 아니라, 기하학적 감쇠의 영향으로 진동원에서부터의 거리에 따라 감소한다. 표면파의 경우  $1/\sqrt{r}$ , 실체파(body wave)의 경우  $1/r$ 에 비례하여 진폭은 감소하게 된다. 따라서, wave barrier의 저감 효과를 효과적으로 파악하기 위해서는

거리에 따른 저감 정도를 파악함이 필요하다. 또한, 표면파와 실체파의 전파 특성으로 인하여 깊이에 따른 저감 효과도 차이가 예상되므로 패널 20cm하단 중앙부에도 감지기를 배치하였다. 이는 구조물의 기초 깊이에 따른 진동에 대한 영향을 이해하는데 도움이 될 것으로 사료된다. 따라서, 실험에 적용된 감지기의 위치는 패널과 수직 방향으로 -0.15m, -0.07m, 0.07m, 0.15m, 0.4m이다. 또한 패널의 깊이 방향으로 지표면에서부터 0m, 0.2m를 설치하였다. 진동원과 감지기의 위치는 그림 1과 같다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 실내실험

충격 혹은 가진에 의한 진동원이 지표면에 가해졌을때 물리량이 적은 단계에서는 표면파가 지배적인 파동이되고, 한편 지층 내부에서의 진동이나 큰에너지의 진동이 가해졌을때에는 직접적으로 전파되

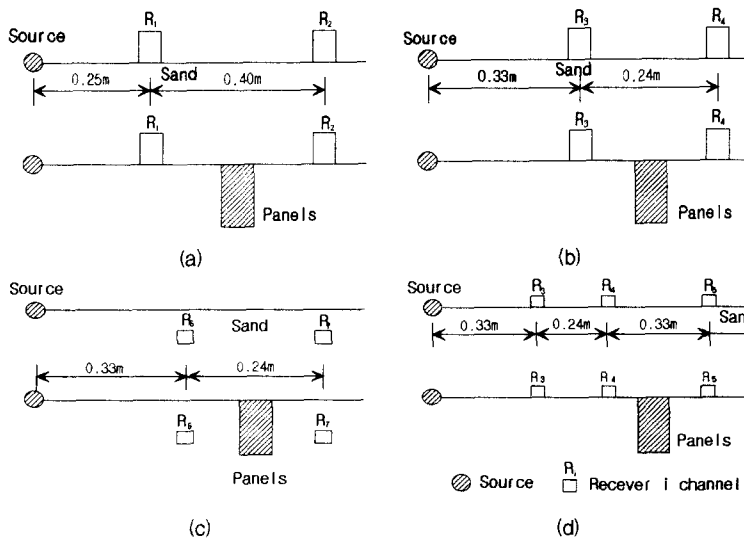


그림 2. 실험개략도

어오는 체적파와 표면파, 또 지층층에까지 도달했다가 거기서 반사되어 되돌아 오는 반사파가 혼재하고 있다. 본 연구에서는 표층에 진동원을 설치하고 그에 따라 발생할 수 있는 여러 파를 염두해 두고 실험분석을 실시하였다.

실내, 즉 제작된 토조에서 강사기에 의해 일정한 높이를 유지하면서 모래를 타설하였고, 진동원은 재하판을 위치시킨후 추를 향타하였다. 1,2ch의 2Hz 속도계 2개와 3, 4, 5, 6, 7ch의 4.5Hz 속도계 5개, 그리고 감지된 신호는 동적신호분석기를 거쳐 컴퓨터를 이용하여 자료 분석을 수행하였다. 아래 그림에서와 같이 크게 4가지 경우로 나누어 실험을 요약할 수 있는데 (a) 2Hz

1, 2ch의 Geophone 분석 (b) 4.5Hz 3, 4ch의 Geophone 분석 (c) 지표면 아래 20cm 위치의 4.5Hz 6, 7ch의 Geophone 분석 (d) 4.5Hz 3, 4, 5ch의 거리에 따른 거리감쇠 분석 등으로 나눌 수 있다.

### 3.2 실험결과 및 분석

#### 3.2.1 시간영역분석

계측된 시간이력곡선에서의 시험패널 종류에 따른 진폭감쇠 정도를 파악하여 보았다. 각 시험패널 전후에 위치한 속도계에 감지된 속도 진폭의 저하정도를 파악하는 분석으로, 이는 주파수 영역별 분석 이전에 대체적인 패널의 감쇠도 성능을 예측할 수 있는 자료로 평가된다.

표2. 각 채널별 시간영역분석 결과표

Specimen	Receiver 1-2			Receiver 3-4			Receiver 6-7		
	1ch	2ch	2ch/1ch	3ch	4ch	4ch/3ch	6ch	7ch	7ch/6ch
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
BS1	0.1725	0.0444	0.3882	0.0753	0.0492	0.6535	0.0507	0.0321	0.6334
BS2	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

표3. 패널에 따른 감쇠성

Specimen	Receiver 1-2	Receiver 3-4	Receiver 6-7
SB	0.0543	0.0372	0.0390
N	0.0483	0.0293	0.0503
BS1	0.0539	0.0243	0.0615
BS2	0.0576	0.0355	0.0579
L5	0.0518	0.0318	0.0574
L10	0.0718	0.0480	0.0676
PR5	0.0559	0.0298	0.0568
PR10	0.0510	0.0302	0.0525
RP5	0.0625	0.0418	0.0629
RP10	0.0686	0.0456	0.0677

#### 3.2.2 주파수 영역 분석

진동이 지반을 전파하여 주변 구조물(패널)과 충돌하게 되면 지반과 시험 패널의 임피던스(밀도 × 파속도)비에 따라 투과, 굴절 그리고 반사를 일으킨다. 그에 따른 기준 주파수 대역을 알아보기 위해 패널 유, 무에 따른 Power spectrum을 비교하여 반사파의 간섭 영향을 살펴보았다. 그리고 파의 투과 영역(220Hz 이내)에서 감지각 각 간격내에 감쇠계수(Attenuation coefficient)를 살펴보기 위해 주파수

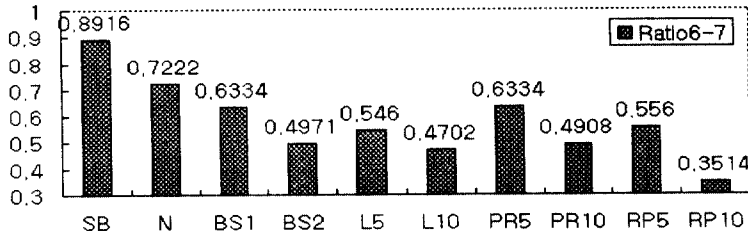


그림 3. 시간영역상에서 속도진폭 감쇠비율

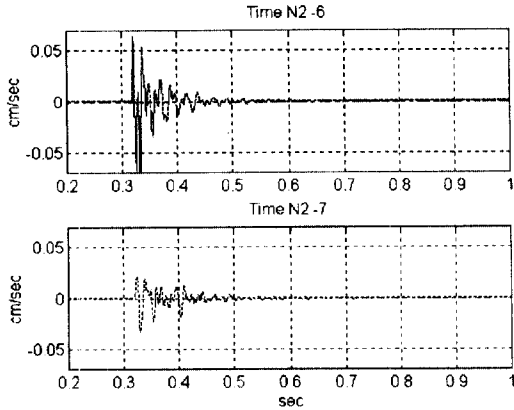


그림 4. 패널(N2)의 시간영역 기록

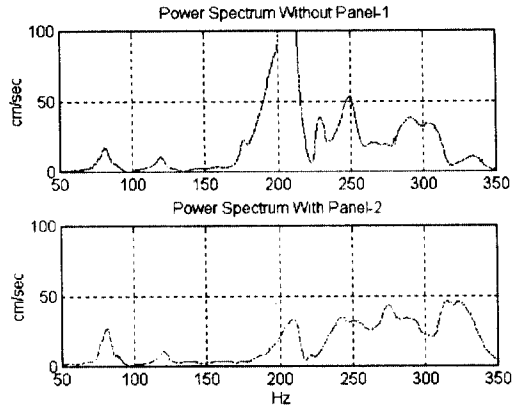


그림 5. 패널 유, 무에 따른 Power Spectrum

영역별로 식 1에 의해 기하학적 감쇠비를 조사하였다.

$$D = \frac{\ln[A_1\sqrt{D_1}/A_2\sqrt{D_2}]}{2\pi t_1 f} \quad (1)$$

여기서,  $A_1$ 은  $D_1$ 위치에서의 파의 진폭,  $A_2$ 는  $D_2$ 위치에서의 파의 진폭,  $D_1$ 은 진동원에서 감지기  $R_1$ 까지의 거리,  $D_2$ 는 진동원에서 감지기  $R_2$ 까지의 거리,  $t_1$ 는 감지기  $R_1$ 에서 감지기  $R_2$ 까지 파의 도달시간, 그리고  $f$ 는 파의 frequency이다. 그에따른 결과는 표 3과 같고 표 4에서는 투과영역과 반사파 간섭영역 기준, 즉 220Hz이전(F1)과 이후(F2)의 Transfer function의 magnitude의 평균치를 살펴 보았다.

표 4. 주파수 대역에 따른 평균 진폭

Specimen Designation	Reciever 1-2		Reciever 3-4		Reciever 6-7	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
SB	0.9214	1.0603	0.9214	1.0603	0.9155	0.7969
N	0.7435	0.1673	0.7435	0.1673	0.6785	0.2232
BS1	0.8515	0.3994	0.8515	0.3994	0.7844	0.5009
BS2	0.8773	0.2615	0.8773	0.2615	0.2524	0.2524
L5	0.9090	0.4432	0.9090	0.4432	0.5817	0.5817
L10	1.1884	0.1760	1.1884	0.1760	0.2443	0.2443
PR5	0.8115	0.3660	0.8115	0.3660	0.4484	0.4484
PR10	0.7976	0.2725	0.7976	0.2725	0.4360	0.4360
RP5	0.9432	0.3940	0.9432	0.3940	0.4520	0.4520
RP10	0.9262	0.1682	0.9262	0.1682	0.2716	0.2716

표 5. 거리에 따른 진동레벨 (db)

Specimen Designation	ch3	ch4	ch5
SB	0	-0.9	-3.4
N	0	-1.2	-7.3
BS1	0	-1.5	-6.3
BS2	0	-1.7	-6.7
L5	0	-1.5	-5.9
L10	0	-3.0	-10.3
PR5	0	-3.0	-8.9
PR10	0	-2.6	-10.7
RP5	0	-1.3	-4.8
RP10	0	-1.8	-5.1

진동문제에서 진동원으로부터 발생한 진동이 사방으로 전파되고, 이것이 건물이나 기타 구조물 등에 전달되어 문제를 일으키는 경우가 대부분이다. 진동이 지반 내부를 전파할 때 거리가 멀어짐에 따라 그 진동은 감쇠된다. 이것을 진동의 거리감쇠라고 한다. 관측되는 진동의 강도는 충격, 진동원의 특징, 지반의 물성, 관측점까지의 거리에 따라 변화된다. 그에 따른 진동의 강도는 진동가속도레벨(VAL) 혹은 진동속도레벨(VL)로 나타내며,

$$VL = 20 \log (v/v_0) \quad (2)$$

여기서,  $v$ 는 진동속도,  $v_0$ 는 기준속도(보통  $10^{-6}$ cm/sec를 사용)이다. 표 5는 패널전 3ch 감지기를 기준으로하고 패널후 24cm, 33cm 떨어져 위치에서 진동레벨의 감쇠정도를 파악해 보았다.

#### 4. 결론 및 추후연구과제

기계류 작동에 의한 충격 진동을 야기시키는 경우 기계 기초 부근에서 고주파 성분을 포함한 충격파를 관측하게 되는데, 기초로부터 멀어짐에 따라 이 충격파는 급격히 감쇠되고, 저주파 성분을 다량포함하는 표면파가 먼 곳까지 전파된다. 따라서 전달된 파의 해석은 표면파와 350Hz이하의 주파수영역 중심으로 해석하였고 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- 1) 제진 콘크리트 시험체 패널의 압축강도를 살펴보면 현장적용성에 의구심 야기되었던 Poly styro-foam의 경우 일반콘크리트와 크게 차이를 보이지는 않았다. 그리고 Latex의 경우 오히려 일반콘크리트에 비해 크게 나타났다.
- 2) 투과와 반사의 대략적인 전환점을 살펴보았는데 220Hz 이전에서 투과 및 굴절이, 이후에서 반사파의 간섭 영향을 확인할 수 있었다.
- 3) 시간영역 분석에 있어서 전반적인 감쇠현상이 두각된 시험체는 주변 여러 환경에서의 야기되는 진동원을 살펴볼 때 수평방향으로 5Hz, 상하방향으로 20Hz이하인 진동 혹은 40~60Hz의 지하철진동이 많은 점을 감안할 때 저주파영역에서 감쇠현상이 크게 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 1996년도 중앙대학교 교내학술연구비 지원과 1994년도 한국과학재단 특정연구(과제번호: 94-0600-05-01-3)지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 마음을 표합니다. 또한 농어촌진흥공사 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) F.E. Richart, J.R. Hall, and R.D. Woods, "Vibrations of soils and foundations," Prentice-Hall, 1968.
- 2) William T. Thomson "Theory of Vibration with Applications," Prentice Hall, 1988.
- 3) A. Major, " Dynamics in Civil Engineering," Academiai Kiado Budapest, 1982.
- 4) Mehta, P.K., " Concrete : Structure Properties and Materials," Pentice-Hall,1986.
- 5) BRAJA M. DAS, "Principles of Soil Dynamics," Pws-kent, 1992.
- 6) J.S. Bendat, A.G. Piersol, "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis," John Wiley & Sons. Inc, 1993.
- 7) 정 영수, 이 대형, 최 우성 "진동제어 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구(I)," 한국콘크리트 학회지 논문집, 제 8권, 5호, 1996. 8.