

# 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구

## An Experimental Study on the Effects of Early-Age Vibrations on the Properties of Concrete

오 병 환\*, 송 해 금\*\*, 조 제 열\*\*\*

### Abstract

Recently, the pile driving or blasting works are increasingly done in many areas to perform large scale construction projects. The vibrations from these blasting works may affect the properties of concrete, especially young concrete. The purpose of present study is to explore the effects of vibration at early ages on the properties of concrete. To this end, comprehensive experimental study is conducted in the present study. The major test variables are peak particle velocity or vibration velocity and the age at vibration.

The compressive strengths and bond strengths are measured for all the specimens at 28days after casting. The duration of vibration is fixed to 30 minutes for all cases. The results indicate that the strength increases for vibration velocity less than about 0.25cm/sec and decreases for vibration velocity larger than 0.5cm/sec. The effect of age at vibration is not pronounced and shows almost similar behavior for the age at vibration of 0 to 12 hours range. The present study provides some important guidelines to control the construction or vehicle vibrations for the concrete at very early ages.

Key word : fresh concrete, vibration, vibration velocity, young concrete, compressive strength, bond strength

### 1. 서론

현재 국내에서는 도심지 공사 및 신도시 조성 등을 위해 인접지역에서 콘크리트 타설과 다른 작업이 동시에 진행되는 경우가 많다. 콘크리트 타설시 주변에서의 파일함타, 발파 등으로 인한 진동의 영향이 우려되고 있다. 또한 교통난 해소를 위한 도로확폭 공사를 하고 있는 경우 기존 도로상의 차량진행으로 인한 진동도 콘크리트의 품질 저하에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이와같이 현장에서의 콘크리트 타설은 거의 대부분이 작업진동과 동시에 이루어지고 있는 것이 현실이다. 하지만, 현재 사용되고 있는 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 규정이 너무 낮게 정해져 있어서 효율적이지 못하다.

본 연구에서는 도로의 보수보강 및 차선확폭시 주변에서 발생하는 진동이 양생초기 콘크리트에 미치는 영향을 고찰해 보았다. 진동이 양생초기 콘크리트에 미치는 영향을 평가하기 위하여 본 실험에서는

\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수, 공박

\*\* 한국건설기술연구원 연구원

\*\*\* 서울대학교 토목공학과 박사수료

실험변수를 진동속도(vibration velocity), 진동가력시점(time when vibrated) 등으로 나누어, 콘크리트의 압축강도, 부착강도를 측정하였다. 또한 응결시간을 측정하여 외부진동요인이 응결에 미치는 영향을 검토하였고, 응결이 강도에 미치는 상관관계를 고찰해 보았다.

## 2. 진동의 종류 및 허용진동기준

### 2.1 양생초기 콘크리트에 대한 허용진동기준

발파진동이나 파일항타시의 진동은 그 진동속도나 진동가력시점에 따라 콘크리트에 미치는 영향이 다를 수도 있다. 따라서, 이러한 진동영향을 고려하기 위해 각국 마다 허용진동기준을 정하여 사용하고 있다. 그 일례로써 미국토목학회(ASCE)에서는 다음 표 1과 같은 기준을 제시하고 있는데, 타설 후 12시간이내의 콘크리트에는 0.254cm/sec의 낮은 기준을 사용하고, 재령시간이 길어질수록 허용할 수 있는 최대진동속도가 높아짐을 알 수 있다.

표 1 허용진동기준치(ASCE)

타설후 시간	최대진동속도(cm/sec)
0~12시간	0.254
12~24시간	1.27
24시간~5일	1.27~5.08(비례하여 증가)
5일 이상	5.08

### 2.2 진동의 종류 및 특성

양생 중인 콘크리트에 진동이 가해지면 어떠한 형태로든 영향을 받게된다. 이러한 진동은 타설후 성질을 좋게 해주는 재진동(revibration)이 있고, 타설과 동시에 이루어지는 여러 가지 작업으로 인하여 발생하는 작업진동이 있다.

일반적으로 실제 현장에서 고려되어야 할 진동은 발파시의 진동, 파일항타시의 진동, 진동롤러 다짐기에 의한 진동, 교통하중에 의한 진동과 같은 경우이다. 요즘들어 대규모 주택단지 조성을 위해 산악지대를 이용하는 경우가 많다. 이러한 경우 파일항타나 발파진동이 많은 기초공사와 콘크리트 타설을 동시에 하는 경우가 늘어나고 있다. 또한, 교통량이 늘어남에 따라 도로나 교량의 부족으로 기존의 구조물을 확충하는 경우가 있다. 이러한 경우 차량을 통제하고 작업을 하기가 힘들다. 이런 차량진동이 파일항타나 발파진동보다 최대진동속도가 작기는 하지만 양생초기에는 규정된 기준을 넘어서는 경우도 발생한다.

## 3. 기존의 연구사례 분석

이제까지의 진동에 관한 연구는 발파나 파일항타에 의한 진동에 대한 연구를 중심으로 해서 수행되어져왔다. 여러 다른 진동이 콘크리트의 특성에 미치는 영향에 관련된 몇몇의 연구내용은 다음과 같다. Bastian(1970)<sup>(1)</sup>은 콘크리트 타설직후 7.6cm/sec의 파일항타 진동속에서 3일간 양생된 콘크리트와 진동을 가하지 않고 양생한 콘크리트를 비교하였다. 실험의 결과 진동은 콘크리트의 응결과 양생기간 동안에 악영향을 주지 않는다고 나타났다. 그리고, 일축압축강도는 항타진동을 받은 표본이 무진동 양생된 표본보다 4% 높은 강도로 나타났다. Howes(1979)<sup>(2)</sup>는 진동의 영향을 연구하기 위해 현장발파와 같은 주기 범위를 갖는 진동속도를 발생시키는 진동기(shaking 표)를 제작하였다. 또한, 진동수가 20~50Hz범위에서 일주일동안 1시간 간격을 두고 여러 다른 압축시험 공시체에 1.2, 3.2, 5.0in/sec의

진동속도를 가하였다. 진동을 가하지 않은 기준 공시체와 진동을 가한 공시체의 탄성계수, 초음파 속도, 밀도와 인장, 일축압축강도를 측정하였다. Hulshizer(1984)<sup>(3),(4)</sup>는 발파진동이 굳지않은 콘크리트(green concrete)에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 실내실험과 현장실험을 수행하였다. 현장에서 압축강도 시험, 보 시험, 벽체 시험을 수행하였고, 실내실험으로는 압축강도 시험체와 부착강도 시험체를 고정된 주기를 가지고 여러 가지 진동속도를 양생시간별로 가하였다. 그는 굳지않은 콘크리트에 대한 한계발파진동을 구하기 위해 실험을 수행하였으나, 실험에 쓰인 진동속도는 콘크리트시험시 극단적인 손상을 입히지는 않았다. 진동속도를 8~12in/sec까지 변화시키며 시편에 가하였고, 가장 크게 20in/sec까지의 진동을 가하기도 했으나, 발파진동이 굳지않은 콘크리트에 가해졌을 때 28일강도와 구조적으로 같이 거동한다거나 내구성이 적어지는 결과를 초래한다는 어떠한 증거도 얻지 못했다. Esteves(1978)<sup>(5)</sup>는 양생 초기 5~20시간사이의 콘크리트에 대해 실험을 수행하였다. 진동은 콘크리트가 놓인 철판을 큰 해머로 때려서 발생시켰다. 콘크리트의 양생시간에 따라 진동속도가 6in/sec(15.24cm/sec)에서 8in/sec(20.32cm/sec)까지 균열생성을 볼 수 있었다. 이 실험에 의하면 진동이 균열에 나쁜 영향을 주는 시간은 11시간에서 16시간까지임을 알 수 있었다. 대한주택공사(1990)<sup>(6)</sup>는 경화중인 콘크리트에 진동이 가해지는 시점, 시간 및 진동의 크기를 0.0002cm/sec, 0.00025cm/sec, 0.00075cm/sec, 0.0018cm/sec, 1.2cm/sec, 4.8cm/sec까지 변화시키며 28일 후의 콘크리트 강도를 측정하였다. 그 결과 타설 후 3~5시간에 작용하는 진동은 콘크리트강도를 떨어뜨리고, 진동속도의 크기는 별다른 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주었다. 이러한 연구 결과는 기존의 외국연구결과와 매우다른 연구결과로서 실험 데이터의 변동이 크고 진동크기에 따라 강도등 영향이 없는 것으로 나와 연구결과의 분석을 어렵게 하고 있다.

#### 4. 양생중인 콘크리트에 미치는 진동의 영향실험

##### 4.1 개요

콘크리트 타설시 주변에서의 파일함타, 발파 등으로 인한 진동의 영향이 우려되고 있다. 또한 교통난 해소를 위한 도로확폭 공사를 하고 있는 경우 기존 도로상의 차량진행으로 인한 진동도 콘크리트의 품질 저하에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서, 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향을 연구하기 위해 본 실험을 수행하였다. 진동이 양생초기 콘크리트에 미치는 영향을 평가하기 위하여 본 실험에서는 실험변수를 진동속도, 진동발생시점(time when vibrated)등으로 나누어, 콘크리트의 압축강도, 부착강도를 측정하였다. 또한 응결시간을 측정하여 외부진동요인이 응결에 미치는 영향을 고려하였고, 응결이 강도에 미치는 상관관계를 고찰해 보았다.

##### 4.2 실험변수

본 연구에서는 이러한 진동이 양생초기의 콘크리트에 미치는 영향을 연구하기 위하여 구조물의 일반 진동범위로서 최대 수평진동속도를 4.2cm/sec까지 발생 시킬 수 있는 진동기(shaking table)를 제작하였다. 또한 압축강도실험을 위하여 10×20cm의 원형공시체를 제작하였고, 부착강도 실험을 위하여 15×15×15cm의 부착시험 공시체를 제작하였다. 실제로 한강상의 실교량의 교각상부에서 진동의 크기를 측정된 결과 0.3~0.8cm/sec 범위의 진동이 측정되었다. 따라서, 본 연구에서는 진동속도를 다음과 같이 0.25cm/sec, 0.5cm/sec, 2.5cm/sec, 4.2cm/sec 네가지로 구분하였으며, 이때 일반적으로 사용하고 있는 진동규정 중에서 재령 12시간 이내의 양생초기 콘크리트의 기준인 0.25cm/sec를 최소값으로 설정하고, 최대값을 4.2cm/sec까지 변화시키며, 다양한 다른 진동속도를 원형공시체와 부착시험 공

시체와 응결시험체에 대하여 진동발생시점을 달리하였다. 이러한 진동은 타설 직후 그리고 2시간, 4시간, 6시간, 12시간 후에 가하였다. 진동지속시간(duration)은 실제로 가능한 30분으로 정하여 설정하였다. 진동을 가하지 않은 기준시험체(control specimen)를 위와 같은 진동을 가한 시험체와 동시에 제작하였다.

이상의 변수를 가지고 원형공시체와 부착시험 공시체를 제작하였다. 각 변수별 시험체명에 대한 설명은 그림1과 같다.

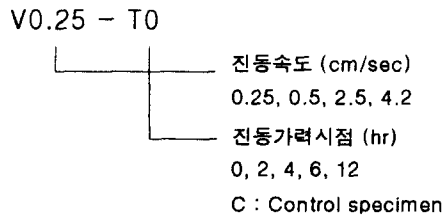


그림. 1 시험명

### 4.3 실험재료 및 기기

#### 1) 콘크리트 배합표

본 실험을 하는데 있어서 콘크리트의 설계기준강도는 가장 보통의 콘크리트로서 240 kg/cm<sup>2</sup>로 설정하였으며, 비중이 2.64이고 최대치수가 19mm인 굵은 골재를 사용하였고, 비중이 2.6인 잔골재를 사용하였고, 비중이 3.15인 시멘트를 사용하였고, 목표 슬럼프가 12cm였다. 작업성을 높이기 위하여 AE제를 0.01% 첨가하였고, 감수제를 0.25% 사용하였다.

본 실험에 사용된 콘크리트의 배합표는 다음 표 2와 같다.

표 2 배합표

설계기준강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	시멘트 (kg/m <sup>3</sup> )	물 (kg/m <sup>3</sup> )	굵은골재 (kg/m <sup>3</sup> )	잔골재 (kg/m <sup>3</sup> )	AE제 (kg/m <sup>3</sup> )	감수제 (kg/m <sup>3</sup> )
240	55	300	165	972.1	849	0.03	0.75

#### 2) 진동기

본 실험에 사용된 진동기는 수평 최대진동속도를 4.2cm/sec까지 발생시킬 수 있는 것으로 제작하였고, 그 주파수가 구조물에서 일반적인 10Hz 이하인 주파수를 사용하였다.

#### 3) 실험방법 및 측정

본 실험에서는 하중재하방법을 변위제어방법으로 행하였고, 매분 약 1.3mm의 속도로 재하하였다. 본 실험에서 압축강도 측정에 사용된 시험장치는 200t의 MTS 시험기이고, 부착강도 측정에 사용된 시험장치는 MTS 인장시험기이다.

## 5. 실험 결과 및 분석

### 5.1 압축강도실험 결과 및 분석

압축강도는 진동을 가하지 않은 기준 시험체(control specimen)에 대한 변수 별 시험체의 편차를 백분율로 나타내었다. 그림 2는 압축강도편차와 진동가력시점과의 관계를 그래프로 나타낸 것이고, 그림 3은 압축강도편차와 진동속도와의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

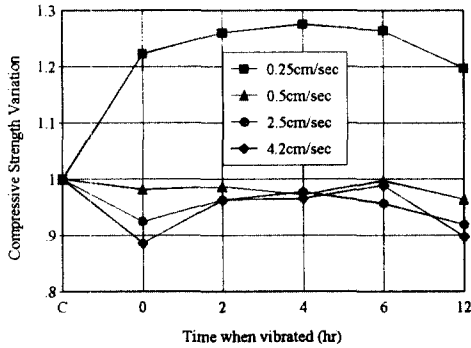


그림 2 진동가력시점에 따른 압축강도변화율

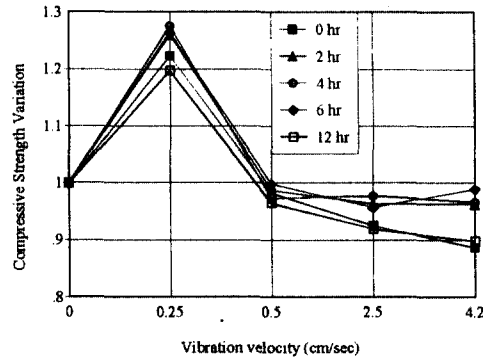


그림 3 진동속도에 따른 압축강도변화율

진동속도가 작은 0.25cm/sec의 경우는 진동가력시점과 무관하게 기준시험체에 비하여 압축강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 0.5cm/sec이상의 경우에는 압축강도의 감소를 나타내고 있는데, 약 5~11%까지의 압축강도 감소를 보이고 있다. 하지만 전체적으로 볼 때 진동가력시점에 대해서는 별 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 진동속도가 0.25cm/sec의 경우는 6시간까지 소폭으로 증가함을 보여주고 있으나, 진동속도가 0.5cm/sec이상의 경우는 진동가력시점에 대해서 뚜렷한 경향을 보이지 않고 있음을 알 수 있다.

### 5.2 응결시간 실험결과 및 분석

진동에 의한 응결시간에 대한 영향을 보면 다음 표 3과 같다.

표 3 여러진동속도에 따른 응결시간 (hr)

진동속도(cm/sec)	0.25		0.5		2.5		4.2	
	초결	종결	초결	종결	초결	종결	초결	종결
진동가력시점(hr)								
C	8.12	12.85	7.31	11.31	9.01	12.67	8.01	11.95
0	8.20	12.99	7.00	10.81	7.60	12.13	7.35	11.22
2	8.49	12.96	7.58	11.17	8.57	13.33	7.63	11.37
4	8.07	12.69	7.29	10.92	8.03	11.77	8.02	11.80
6	8.44	13.45	7.49	11.23	8.05	11.91	8.06	12.06
12	8.03	12.69	7.13	11.29	8.70	12.36	8.10	11.69

진동이 응결에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

진동속도가 0.25cm/sec는 응결에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 반면에, 진동속도가 0.5cm/sec이상의 경우에는 응결시간에 영향을 주고 있다.

진동가력시점에 따라서는 타설직후에 진동을 가하면 응결시간이 다소 빨라지는 것으로 나타나고 있고, 진동속도 2.5cm/sec의 경우는 진동가력시점이 2시간인 경우 종결시간이 다소 지연됨을 보이고 있다.

### 5.3 부착강도 실험결과 및 분석

그림 4는 부착강도편차와 진동가력시점과의 관계를 나타낸 그래프이고, 그림 5는 부착강도편차와 진동속도와의 관계를 나타낸 그래프이다.

전체적인 경향이 앞서 기술한 압축강도 특성과 흡사한 결과를 보임을 알 수 있다. 진동속도가 0.25cm/sec의 경우에는 부착강도가 약 5~11%증가하는 데, 진동속도가 0.5cm/sec이상의 경우는 부착강도가 약 5~12%정도 감소하는 것으로 나타나고 있다.

진동가력시점에 대해서도 압축강도와 마찬가지로 별다른 영향을 나타내고 있지 않음을 알 수 있는데, 진동속도가 0.25cm/sec의 경우는 진동가력시점 6시간까지 소폭으로 증가하고 있음을 나타내고 있다. 또한, 진동속도 0.5cm/sec이상의 경우에는 진동가력시점이 별 영향을 주지 않는 것으로 나타나고 있다.

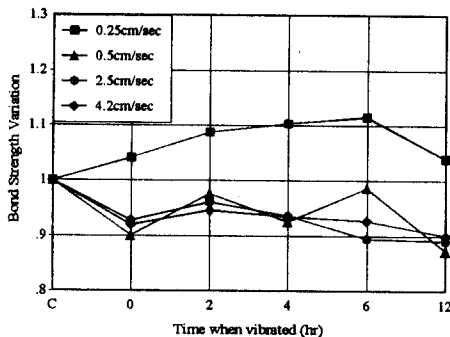


그림 4 진동가력시점에 따른 부착강도변화율

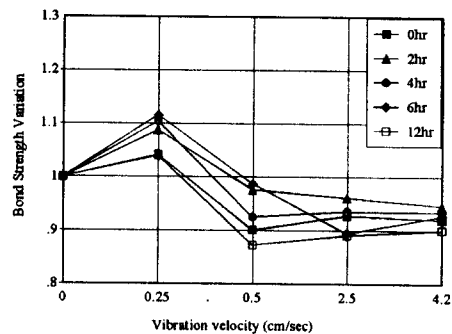


그림 5 진동속도에 따른 부착강도변화율

## 5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 양생중인 콘크리트에 작용하는 진동이 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 일반적으로 현장에서의 콘크리트 타설이 여러가지 작업과 동시에 이루어 지는 것이 현실이다. 이제까지는 파일함타나 발파진동에 의한 진동의 영향연구를 중심으로 많은 연구가 수행되어 왔으나, 도로 확폭시의 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 대해서는 연구되어지거나 잘 설명되어지지 않았다. 따라서 차량하중에 의한 진동으로 인하여 주변구조물이나 양생초기의 콘크리트가 받는 영향에 대한 연구가 요구되었다. 본 연구에서는 현장구조물에서 일반적으로 나타나는 주파수가 약 10Hz 이하인 진동을 발생시켜, 양생초기(재령 12시간 이내)의 콘크리트에 진동이 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 진동속도와 진동가력시점을 변수로 실험을 수행하였는데, 진동속도는 가장 일반적인 범위인 0.25, 0.5, 2.5, 4.2cm/sec, 진동가력시점은 타설 직후, 그리고 타설 후 2시간, 4시간, 6시간, 12시간으로 분류하여 실험을 수행하였다. 이러한 일련의 연구로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 진동속도가 0.25cm/sec의 경우는 압축강도와 부착강도를 증가시키는 결과를 나타내었고, 응결에는 별다른 영향을 주지않았다. 압축강도 증가율은 약 20%까지 나타났으며 부착강도 증가율은 10%정도 나타났다.

- 2) 진동속도가 0.5cm/sec 이상의 경우에는 압축강도와 부착강도가 감소되는 것으로 나타났으며, 감소율은 약 5~12% 정도로 나타나고 있다.
- 3) 본 연구결과 양생초기 진동이 콘크리트특성에 나쁜 영향을 미치기 시작하는 진동속도크기는 0.25cm/sec에서 0.5cm/sec 사이에 존재하는 것으로 나타났으며, 본 실험연구로부터 분석할 때 약 0.3~0.4cm/sec 정도의 진동이 제한치로 나타나고 있다.
- 4) 본 연구의 결과 재령 12시간 이내의 콘크리트에 대해서 진동속도 규제치가 0.25cm/sec로 규정되어 있는 ASCE의 규정은 안전측인 것으로 사료되며 제한치는 대략 0.3~0.4cm/sec 정도로 판단된다.  
본 연구에서는 진동속도를 0.25~4.2cm/sec까지 변화시켜 실험하였으며 각 진동속도에서의 압축강도 감소와 부착강도 감소량을 실험을 통하여 도출하였다. 본 연구는 앞으로 진동이 양생초기 콘크리트 (young concrete)에 미치는 영향을 실제로 분석할 수 있는 유용한 기초자료를 제시하고 있는 것으로 사료된다. 본 논문에서는 실험변수를 가능한 대로 선정하여 실험하였으나, 앞으로 구조물에 따른 진동의 형태나 지속시간 등 추가 영향인자에 대하여 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- 1) Bastian C. E., "The Effect of Vibrations on Freshly Poured Concrete.", Foundation Facts, Raymond International, Vol.VI, NO.1, pp. 14-17, 1970
- 2) Howes E. V., "Effect of Blasting Vibrations on Curing Concrete", Proceedings of the 20th United State Symposium on Rock Mechanics, University of Texas, Austin, Tex., 1979
- 3) Allen J. Hulshizer, "Accept Shock and Vibration Limits for Freshly Placed and Maturing Concrete," ACI Material Journal, Vol. 93, No.6, pp. 524-533, 1996
- 4) Allen J. Hulshizer, Ashok J. Deasi, "Shock Vibration Effects on Freshly Placed Concrete.", ASCE Journal, Vol.110, No.2, June, 1984
- 5) Esteves, J. M., "Control of Vibrations Caused by Blasting.", Laboratorio De Engenharia Civil, Memoria No.498, Lisbon, Portugal., 1978
- 6) 임종석외, "진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향.", 대한주택공사주택연구소. 1990
- 7) Akins, Kenneth P. Jr., Dixon, Donald E., 1979, "Concrete Structures and Construction Vibrations," ACI SP 60-10
- 8) 송혜금, "진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구", 서울대학교 석사학위 논문, 1998, 2
- 9) A M Neville, "Properties of Concrete," Pitman.
- 10) Sidney Mindess, J. Francis Young, "Concrete.", Prentice-Hall
- 11) P. Kumak Mehta, Paulo J.M. Monteiro, "Concrete.", Prentice-Hall
- 12) Cheng-ju Guo, "Early-Age Behavior of Portland Cement Paste.", ACI Material Journal, Vol.91, No.1, 1994
- 13) ACI manual of concrete practice, part 2, "Fresh Concrete During Vibration."
- 14) Cornelius R. Barrett, Nyack, N. Y., "Re Vibrations Puts More Life in Concrete." Engineering new-record, march 10., 1955