

발파진동의 크기가 양생콘크리트의 강도와 물성에 미치는 영향

임한욱¹⁾ · 박근순²⁾ · 정동호³⁾ · 이상은³⁾

Effects of Blasting Vibrations on Strength and Physical Properties of Curing Concrete

Han-Uk Lim, Keun-Soon Park, Dong-Ho Jung and Sang-Eun Lee

ABSTRACT Effects of blasting vibrations on curing concrete have not been well studied. As a result, unreasonable and strong blasting vibration constraints have been placed on blasting when it occurs in the vicinity of curing concrete.

To study the effects of blasting on curing concrete blocks of 33.3×27.7×16.2 cm were molded and placed on the quarry. Several sets of concrete blocks were subjected separately to peak vibrations of 0.25, 0.5, 1.0, 5.0, and 10 cm/sec. The impulses of blasting vibrations were applied with thirty-minute intervals. Along with unvibrated concrete blocks, the vibrated concrete samples cored with 60.3 mm in diameter were measured for elastic moduli, sonic velocity and uniaxial compressive strength.

Test results can be summarized as follows ;

- 1 The blasting vibrations between 6 and 8 hours after pour generally lowered on the uniaxial compressive strength of the concrete.
- 2 A low blasting vibration of 0.25 cm/sec did not affect the uniaxial compressive strength. As the magnitude of the blasting vibration increases, compressive strength of concrete is decreased.
- 3 Physical properties of the P-wave velocity, Young's modulus, and Poisson's ratio showed a weakly decreasing trend in the concrete blocks vibrated between 6 and 8 hours after pour.

1. 서 론

지반의 진동은 크게 지진(earthquake)과 같은 자연적인 진동과 발파, 항타(piling) 및 중장비의 가동등 건설진동에 따른 인공진동으로 나눌 수 있는데 이들 지반 진동은 지상 구조물의 안전도에 큰 영향을 미친다. 특히 양생(養生)중인 콘크리트의 강도 및 물리적 성질에 큰 영향을 미치기 때문에 선진국에서는 엄격히 제한하고 있다^{10,11)}.

우리나라는 전 국토의 2/3이상이 산지(山地)로 형성되어 있어 과밀한 인구의 소산과 국토의 효율적인 개발을 위하여 지상 및 지하생활공간 확보를 위한 발파작업이 더욱 확대될 것으로 예상된다. 더욱이 최근 서울, 부산등 대도시에서 활발히 시행되고 있는 각종 건

설공사, 예를 들면 지하철, 통신구, 전력구등 건설공사와 재개발을 위한 도심지에서의 택지조성 공사등을 실시할 때 경제성과 시공성 때문에 화약류에 의한 발파작업이 불가피한 경우가 허다한 것으로 알려지고 있다.

잘 알려진 바와 같이 발파작업에 따른 지반의 진동, 소음, 폭풍압 및 파쇄압편의 비산등 발파로 인한 공해는 민원의 대상이 되고 있을 뿐만 아니라 때로는 건물 및 인체에도 중요한 영향을 미치기 때문에 이에 대한 기준치 설정, 감소방안 확립등을 위한 상당한 연구가

* 1995년 5월 15일 접수

- 1) 정회원, 강원대학교 공과대학 자원공학과 교수
- 2) 정회원, 강원대학교 산업대학원 자원공학과 석사
- 3) 학생회원, 강원대학교 공과대학 자원공학과 박사과

수행되어 오고 있다.^{1,2,3,4,5,7,8)} 대부분의 건설공사는 굴착과 동시에 인접지역에서 콘크리트의 타설작업이 실시됨에도 불구하고 양생중인 콘크리트를 보호하고 설계강도를 발현시키기 위한 구체적인 허용 진동치의 기준이 설정되어 있지 않고 또 이에 대한 연구도 국내에서는 거의 알려지지 않고 있어 콘크리트의 품질관리에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 또한 외국의 시설물과 국내의 시설물은 그 구조 및 기초 지반상태가 서로 달라 콘크리트의 피해정도가 상이함은 물론이고 콘크리트 타설에 따른 배합비등 시방기준도 서로 다르기 때문에 외국의 허용기준치를 그대로 적용할 수도 없다. 특히 원자력 발전소 건설과 같은 정밀 시공의 경우 진동의 영향은 반드시 고려되어야 할 것이다. 실제로 외국의 기준치는 너무 높아 국내에 적용할 경우 상당한 량의 미세균열이 발생되어 문제가 제기될 것으로 추정되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 발파진동에 의한 양생콘크리트의 강도 및 물리적 성질에 미치는 영향을 고찰하여 진동 허용 기준치 설정을 위한 자료를 제공하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 측정지역의 지질 및 암반의 특성

본 발파 실험장소는 기반암으로 선캠브리아기의 경기변성복합체의 일부인 호상 흑운모 편마암과 화강암질 편마암이 주로 분포하는 지역인 경기도 김포군 검단면 오류리에 위치하며 골재를 생산하는 석산이다. 실험지역에서 깊이에 따른 암석층의 변화를 보면, 깊이 약 3 m 까지는 황색계통의 풍화암층이며, 그 이하는 약간 풍화된 경암층이다. 화강암질 편마암은 대체로 중립질로서 흑운모가 거의 눈에 띄지 않으며 석영의 함유량이 많다. 편마암류는 산출상태로 보아 괴상이며 습곡등 변성암으로서의 특징적 구조는 나타나고 있지 않다.

이 지역에서의 대표적인 암석에 대한 물성을 얻기 위하여 10개의 시료를 채취하여 실험실 시험을 한 결과 단위 중량은 2.59~2.65 g/cm³ 이며, 일축압축강도는 1100~1700 kgf/cm² 이고 인장강도는 62~78 kgf/cm² 이다. 탄성계수 및 포아송 비는 각각 (5.4~6.6)×10⁵ kg/cm² 과 0.14~0.21 이며, 탄성과 속도는 P 파가 4100~5800 m/sec, S 파가 2900~3800 m/sec 로 나타났다.

3. 발파진동의 이론적 고찰

3.1 발파진동의 특성

발파를 통한 굴착에서는 화약의 폭발시 발생하는 충격압과 가스압을 이용하여 굴착단면의 암석을 제거하게 된다. 즉 폭약이 장약공간에서 폭발하면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압(또는 폭핑압)과 연소된 화약에 의한 가스압, 그리고 3000°C 이상의 고온이 발생한다. 이와같이 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수 mm~수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로 부터 3차원적으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감소되어 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반중에 전파되어 간다¹¹⁾. 이러한 탄성파는 암반중에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데 이를 발파진동(blast vibration)이라 한다.

발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며, 발파진동의 크기는 암반의 변위(particle displacement, 또는 진동입자변위), 진동속도(particle velocity, 또는 진동변위속도, 진동입자속도), 진동가속도(particle acceleration, 진동변위가속도, 진동입자가속도)로 표시할 수 있으며, 진동의 형태를 일정 주기의 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 진동변위, 속도 및 가속도 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$u = U \sin(\omega t + \theta_1) \quad (1)$$

$$v = \frac{du}{dt} = U\omega \cos(\omega t + \theta_2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2u}{dt^2} = U\omega^2 \sin(\omega t + \theta_3)$$

$$\omega = 2\pi \left(\frac{1}{T} \right) = 2\pi f \quad (2)$$

여기서 f는 진동주파수, T는 진동주기, ω 는 진동수와 관련된 각속도, θ 는 위상차를 의미한다. 지반진동의 피해여부와 관련된 상황에서는 대부분 최대치가 중요하므로, $u_{max}=U$, $v_{max}=V$, $a_{max}=A$ 라 하면 진동변위, 속도, 가속도의 각 최대치 사이에는 식(3)과 같은 관계가 성립한다.

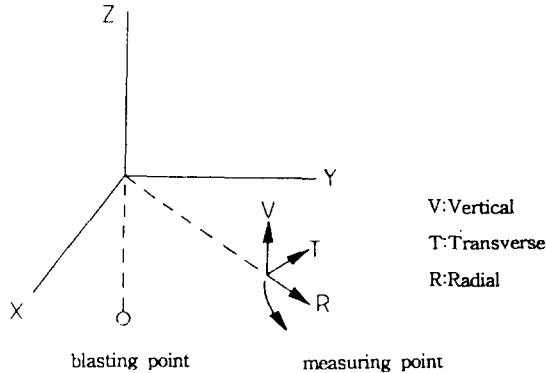


Fig. 1. Three components of blast vibration¹¹⁾

$$U = \frac{V}{2\pi f} ; \quad V = \frac{A}{2\pi f} \quad (3)$$

발파진동의 측정은, 그 방향에 따라 Fig. 1과 같이 수직성분(vertical), 진행성분(longitudinal), 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선성분(transverse)의 세성분에 대해 실시된다. 일반적으로 진행성분에는 탄성파의 P파(종파, primary wave)가, 접선성분에는 S 파(횡파, secondary wave)와 L파(혼합파, love wave)가, 수직성분에는 표면파인 R파(Rayleigh wave)가 우세한 것으로 알려져 있다.

3.2 발파진동 속도의 예측

발파진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 여러 학자들이 의해서 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정경험을 토대로 발파진동식을 제언하고 있으며 현재 국내외로 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 다음과 같다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^{-n} \quad (4)$$

V : 발파진동속도(cm/sec)

D : 폭원으로부터의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

K : 발파진동상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

(4)식에서 거리와 지발당 장약량의 관계로부터 D/W^b 를 환산거리(scaled distance, SD)라고 하며, b의 값이 1/2이면 자승근 환산거리(square root scaled

distance), 1/3이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라고 한다.

지금까지 연구된 바에 의하면^{1,5,7)} 발파진동은 주로 지발당 장약량(kg)과 거리(m)에 의해 결정되고 기타의 요인들은 지반의 성질이나 발파조건에 의해 결정된다. 따라서 발파설계를 위해서는 대상지역에서의 시험발파를 통해 입지상수인 K, n 등 상수값을 정의하는 것이 매우 중요하다. 입지상수의 결정법은 식(4)을 이용하여 log-log scale로 좌표상에 도시하였을 때 기울기(n)와 절편(log K)으로부터 결정한다.

4. 실험방법 및 시험편의 제작

4.1 실험방법

발파 진동이 타설된 양생콘크리트의 강도 및 물성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 폭원으로 부터 일정한 간격으로 떨어진 암반위에 설치된 일정 크기의 블럭에 콘크리트를 타설한 다음 시험조건에 맞춰 기폭시킴으로써 형성된 진동이 양생중인 콘크리트에 전달되도록 하였다.

이때 폭원에서의 발파 조건은 Table 1 과 같이 지표로부터 2.0 m 깊이로, 공경 76 mm 되는 장약공을 18공 천공하고 각공에 균일한 폭약 즉, 하이마이트 폭약을 250 g 씩 장약하여 기폭시킨다.

진동의 크기는 지형, 암반의 조건, 암반내 불연속면의 발달 상태와 그 정도, 폭원에서 측점까지의 거리, 장약량 등 여러가지 요인에 의하여 변화하는 것으로 알려져 있으나 본 실험에서는 동일 조건에서 실시 하였기 때문에 진동의 크기는 폭원으로 부터의 거리에만 관계 되도록 단순화시켰다.

또한 발파 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향은 크게 두가지 방법으로 검토하였다. 첫째, 콘크리트를 타설한 다음 일정한 시간 간격으로 반복하여 진동을 가하는 즉 반복 진동을 작용시킨 경우이고 둘째, 콘크리트를 타설한 다음 일정한 크기의 진동을 단 1회 가한 경우이다. 위 실험 조건에 관한 구체적인 내역은 다음과 같다.

4.1.1 반복 진동을 작용시킨 경우

현장 조업의 특성상 폭원에 Fig. 2 와 같이 1.0 m 간격으로 장약공 18공을 천공한 다음 제 5공을 중심으로 동심원 상으로 6.6 m, 9.2 m, 15.7 m, 22.4 m 되는 지점에 각각 1열, 2열 3열 및 4열을 설정하고 각 열에

Table 1. Drilling and charging conditions for blast

Classification	Contents
Number of Holes	18 holes
Diameter of Hole	76 mm
Hole Spacing	1.0 m
Drilling Depth	2.0 m
Explosive	Himite - 50 mm
Charge per Hole	250 g
Distance	3.30~24.30 m
Detonator	Electric Detonator
Stemming Materials	Sand+Clay
Vibrometer	DS-477, VMS-500

6개의 콘크리트 블럭을 설치하였다. 그 위치를 예로 들면 1열의 경우 101, 102, 103, 104, 105, 106으로 명명하고 제 4열의 경우는 401, 402, 406으로 설정했다.

이와 같이 폭원과 축점(이때 축점에 콘크리트 블럭을 설치함)과의 거리를 달리하면서 진동을 계측하였는데 그 결과는 Table 2 와 같다.

한편 Table 2 에 제시된 계측치를 근거로 하여 발파 진동 상수와 감쇠지수를 구하기 위한 진동속도와 환산거리의 log~log 상관관계를 이용하여 분석하였다. 이때 진동속도의 크기는 종방향, 횡방향 및 수직방향 성분을 종합 합성한 백터값을 적용하였으며 자승근 환산거리를 채택한 결과는 Fig. 3 와 같으며 진동식은 식(5)와 같다.

$$V = 54.3 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.329}, r = 0.92 \quad (5)$$

4.1.2 콘크리트 타설 후 단일 진동을 가하는 경우

콘크리트를 타설한 다음 단 1회의 진동을 가할때에 예를들면 타설 후 2시간, 4시간, 6시간 등 2시간의 시간차를 갖고 진동이 가하여질 때 그 영향을 분석하기 위하여 폭원으로 부터 1.8 m, 3.0 m, 10.0 m, 17.0 m 및 28.4 m의 거리를 두고 다수의 콘크리트 블럭을 설치하였는데 그 개요도는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4와 같이 배열하고 기폭할때 진동의 크기는 1열, 2열, 3열, 4열, 5열에서 각각 0.25, 0.50, 1.0, 5.0, 10.0 cm/sec 로 추정된다. (진동식 $V=54.3 (SD)^{-1.329}$).

이의 정확도를 검증하기 위하여 실제 계측한 값과 이론적인 계산치를 비교한 결과는 Table 3과 같으며 이 결과는 현장 실험임을 고려할 때 잘 부합됨을 알 수 있다.

이때 진동기록은 디지털 및 아날로그 형태로 나타낼 수 있고, 진행방향, 횡방향, 수직방향 및 이들 속도에 대한 백터합의 측정이 가능한 전형적인 발파진동 계측기

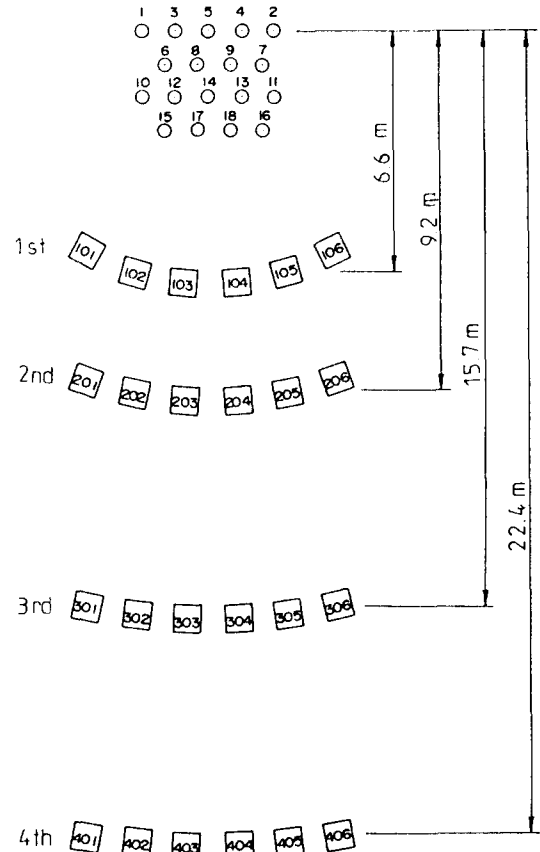


Fig. 2. Drill hole distribution in case I

인 InstanTel사 제품인 DS-477 기종 1대와 Thomas 회사 제품의 VMS-500 기종 1대등 2대로 측정하였다.

4.1.3 시료의 제작

콘크리트의 압축강도 시험방법은 KSF 2405 규정⁶⁾에 준하였고 배합설계는 시멘트와 잔골재 및 굵은골재의 비가 1 : 1.72 : 3.25의 무게비로 혼합하였다.

한편 공시체 성형용 거푸집 제작은 편의상 가로 33.3cm 세로 27.7cm 높이 16.2 cm의 입방체로 만들었으며 거푸집의 옆면이 넓어지든가 휘어지는 일이 없도록 두께 12 mm의 합판으로 견고하게 측면을 구속하였다. 이때 거푸집을 암반위에 직접 밀착시켰으며 누수를 방지하기 위해 거푸집 바닥에 비닐을 깔고 콘크리트를 타설하였다.

콘크리트 타설후 무진동 및 적정 진동을 가한 다음 14일 후에 거푸집에서 입방형 공시체를 탈형시켜 코아 드릴링 머신(Core Drilling Machine)으로 직경 60.3

Table 2. Distance from blasting site to measuring point

Content Procedure	1st row		2nd row		3rd row		4th row	
	D (m)	V (cm/sec)	D (m)	V (cm/sec)	D (m)	V (cm/sec)	D (m)	V (cm/sec)
1	8.40	1.592	11.30	(0.861)	17.70	(0.474)	24.30	0.390
2	7.80	1.627	10.70	(0.926)	17.30	(0.489)	24.20	0.381
3	7.10	(1.623)	9.70	0.956	16.40	(0.525)	23.30	0.415
4	6.90	1.979	9.40	(1.100)	15.80	0.525	22.60	(0.435)
5	6.60	(1.760)	9.20	1.184	15.70	0.495	22.40	(0.347)
6	6.30	(1.872)	9.00	0.881	15.50	0.529	21.50	(0.366)
7	6.05	1.901	8.60	(1.238)	14.90	0.615	21.20	(0.373)
8	5.50	(2.243)	8.30	1.060	14.60	(0.613)	21.00	0.368
9	5.20	2.527	7.90	(1.238)	14.10	(0.642)	20.70	0.385
10	4.90	(2.615)	7.60	1.060	14.00	0.529	20.60	(0.442)
11	4.90	(2.615)	7.10	(1.386)	13.10	0.583	19.70	(0.536)
12	4.70	(2.763)	6.80	1.083	12.90	(0.722)	19.40	0.544
13	4.70	2.801	6.10	1.339	12.40	(0.722)	19.40	0.512
14	4.50	2.993	6.10	1.692	12.40	(0.761)	19.10	0.544
15	4.40	3.250	6.00	(1.954)	12.00	0.577	18.90	(0.435)
16	4.30	(3.110)	5.20	(1.881)	11.60	0.660	18.30	(0.454)
17	4.25	(3.159)	5.10	(1.998)	11.20	0.720	17.70	(0.474)
18	4.20	(3.209)	5.00	1.871	10.90	0.778	17.50	(0.482)

D : distance from blasting site to measuring point(m)

V : level of peak particle velocity (cm/sec)

() : data in the parenthesis are calculated from the empirical equation(3.1) derived by other measured data

Table 3. Comparison of measured and calculated peak particle velocity

Position of hole	Distance (m)	Calculated velocity (cm/sec)	Measured velocity (cm/sec)	Remarks
1st row	1.8	10.0	9.72(9.02~10.3)	V=54.3 (SD) ^{-1.329}
2nd row	3.0	5.0	4.94(4.82~5.01)	r=0.92
3rd row	10.0	1.0	1.01(0.98~1.21)	n=36
4th row	17.0	0.5	0.52(0.48~0.53)	
5th row	28.4	0.25		

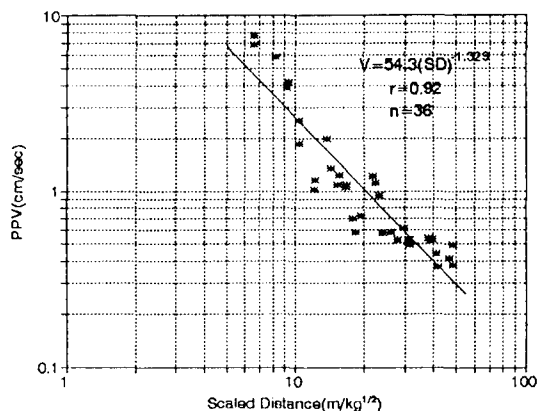


Fig. 3. Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance

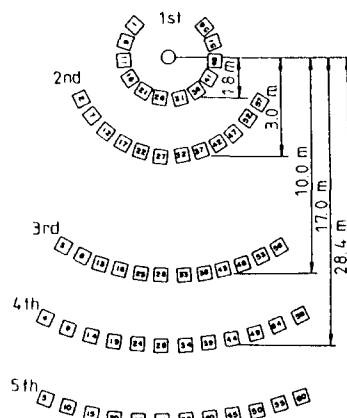


Fig. 4. Drill hole distribution in case II

mm의 코어를 채취하였다. 이때 각각의 코어는 절단기를 사용하여 절단한 후 120, 300 및 600 mesh의 Carborundum 분말로 연마하여 성형 정밀도는 ± 0.06 mm(시험편 길이의 0.05%) 이내가 되도록 제작하였다. 이때 시험편의 수는 약 430개를 제작하여 실험하였다.

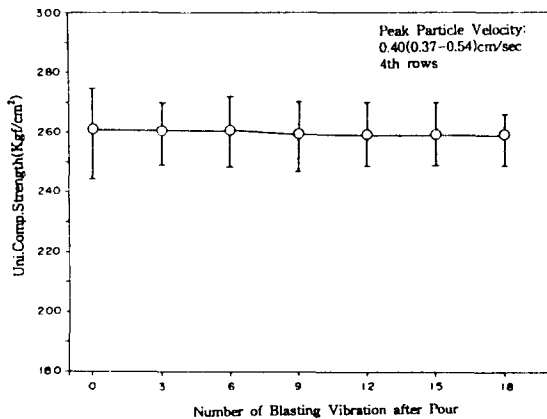
본 실험에서 사용한 압축시험기는 미국 SBEL (Structural Behavior Engineering Laboratories)사의 압축시험용 서보시스템(Electro-Hydraulic Closed Loop Servo Dynamic Test System)으로 가압용 프레임, 조정부(Control Panel), 유압 펌프의 세부분으로 구성되어 있다. 가압용량은 20톤으로 조정하였으며 재하 형태나 입출력 명령, 측정자료의 처리 등은 컴퓨터로 이루어진다.

5. 실험결과 및 고찰

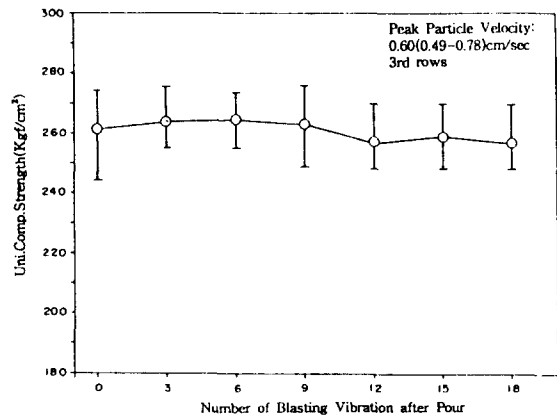
KS 규정에 따라 콘크리트를 타설하고 외부로부터 진동을 가하지 않은 경우와 진동을 가한 경우로 나누어 각각의 시험편으로부터 구한 일축압축강도와 탄성계수, P파의 전파속도 그리고 포아송비 등 물리적 성질의 변화를 검토하였다.

5.1 반복 진동에 의한 영향

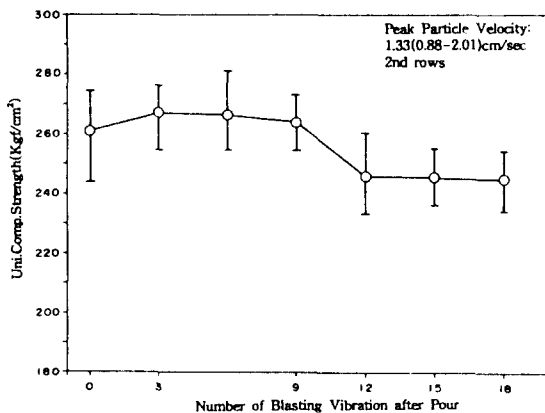
콘크리트를 타설후 30분의 시간 간격으로 각각 3회, 6회, 9회, 12회, 15회 및 18회의 진동을 작용시킬 때와 무진동의 경우 압축강도의 결과는 Fig. 5와 같다. 이것은 진동의 크기에 따라 구분한 것이다.



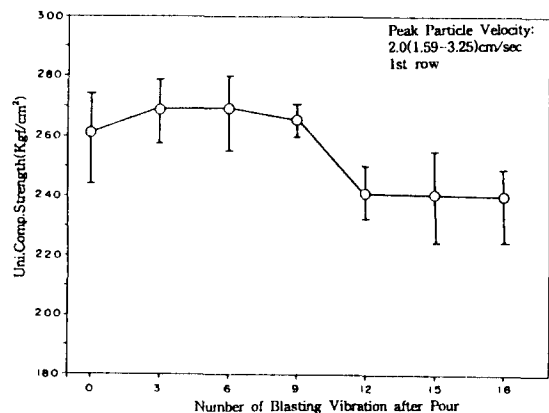
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. Uniaxial compressive strength vs. number of blasting vibrations in concrete.

Fig. 5(a) 는 진동의 크기를 0.405 cm/sec (0.37~0.54 cm/sec) 로 작용시킨 경우로서 진동회수 0은 무진동을, 진동회수 3회는 타설 후 30분 간격으로 3회를 작용시킨 것으로 양생기간 중 1시간 30분 동안에 3회의 진동이 작용되고 그 이후는 전혀 작용되지 않은 예이다.

또한 예를들면 12회는 30분 간격으로 12회가 작용되었으므로 6시간 동안 진동이 가해졌음을 알 수 있다.(이하 Fig. 5(a-d)까지 같은 방법임)

Fig. 5(a) 에서 무진동의 경우 콘크리트의 평균 압축 강도는 261 kgf/cm² (실험치의 범위는 244~274 kgf/cm²)

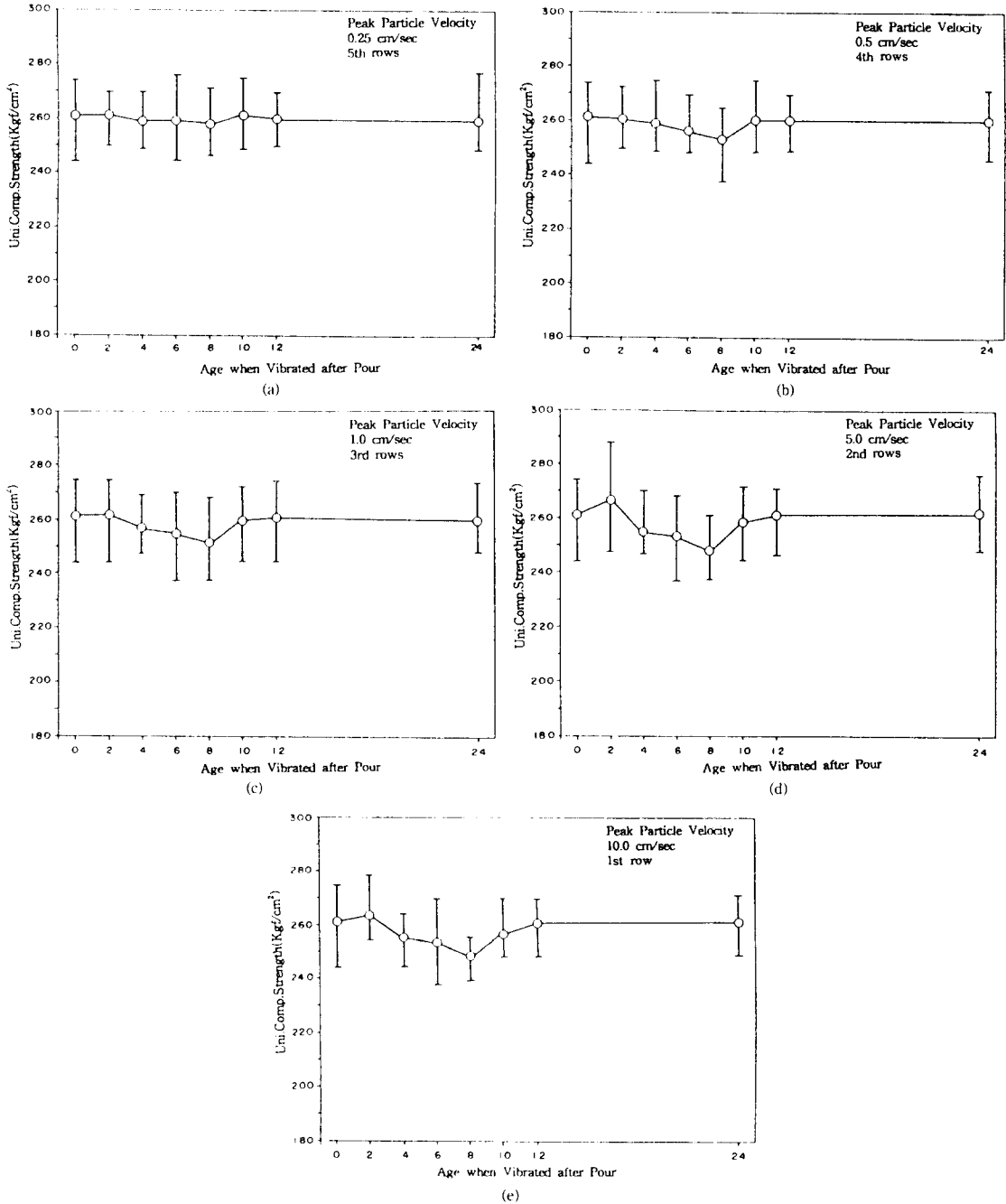


Fig. 6. Uniaxial compressive strength vs. vibrated Period.

cm²인 데 비하여 3회에서 15회까지 진동을 가한 때는 진동을 받은 회수가 많아지면 그에 따라 강도는 약간 감소하는 경향을 보이거나 뚜렷하지 않다. 이와 같은 현상은 작용 진동의 크기가 0.405 cm/sec로 대단히 적고 또 진동의 지속시간이 단일공 발파로 50/1000초 미만의 극히 짧은 시간이기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5(b)도 (a)와 같은 조건에서 진동을 가한 것이다. 이때 콘크리트 블록은 Fig. 2에서 3열에 설치한 것으로 작용진동의 크기는 평균 0.594 cm/sec이고, 그 범위는 0.49~0.78 cm/sec이다.

이때 무진동, 3회, 6회, 9회, 12회 및 15회 작용시 그 평균 강도는 각각 261 kgf/cm²(244~274), 263 kgf/cm²(249~276), 264 kgf/cm²(261~273), 263 kgf/cm²(249~275), 257 kgf/cm²(249~270), 258 kgf/cm²(249~270)이다.

이상의 결과는 각각 6개의 시험편에서 구한 값으로 전반적으로 강도의 변화는 대단히 미약하지만 강도범위로 볼 때 하한선 강도는 6회 작용시 (261 kgf/cm²), 상한선 강도는 3회 작용시 (276 kgf/cm²) 가장 큰 값을 보인다.

뚜렷하지는 않지만 타설 후 3시간까지 진동이 가해지면 약간 강도가 증가하나, 그 이후 즉 6시간대에서는 강도가 감소하는데 이것은 콘크리트의 수화(水和) 작용과 관계가 있는 것으로 추측된다. 또한 이 역시 강도의 변화가 미미한 것은 Fig. 6(a)의 경우와 같이 진동의 크기가 작고 진동의 지속시간이 짧은 이유일 것으로 생각된다.

Fig. 5(c)는 진동의 크기 1.33 cm/sec가 작용할 때 2열에서 채취된 시험편의 강도이다. 이것 역시 무진동, 3회, 6회, 9회, 12회 및 15회 경우 그 평균 강도는 각각 261 kgf/cm²(244~274), 267 kgf/cm²(260~276), 266 kgf/cm²(255~281), 264 kgf/cm²(254~272), 246 kgf/cm²(221~260), 245 kgf/cm²(236~254)이다.

9회(4시간 30분)까지는 강도가 약간 증가하나, 12회(6시간대)에서는 강도가 다소 감소하고 그 이후는 변화가 없이 거의 일정함을 알 수 있다.

Fig. 5(d)는 평균 2.0 cm/sec의 진동을 가한 경우로 앞의 예에서와 같이 무진동에서 3회, 6회, 및 9회까지 작용할 때는 평균 강도가 269 kgf/cm² 정도인데 비하여 12회(6시간)가 작용할 때는 평균 240 kgf/cm²로 대폭 감소하나 그 이후는 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

5.2 크기가 다른 단일 진동이 작용할 때

반복 진동과는 달리 크기가 각각 0.25, 1.50, 1.0, 5.0 및 10.0 cm/sec 인 진동치를 양생중인 콘크리트에 단 1회 작용시켰을 때 압축강도의 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 즉 x 좌표상에 0, 2, 4, ... 시간 등은 각각 무진동, 타설 후 2시간, 타설 후 4시간대에 진동이 작용했음을 의미한다.

이때도 단일공 발파로 진동 지속시간은 0.05초 미만의 극히 짧은 시간이다.

Fig. 6(a) 및 (b)는 진동의 크기가 각각 0.25 cm/sec, 및 0.5 cm/sec 인 경우로 거의 변화가 없으나 타설 후 8시간대에서 약간 감소한다.

Fig. 6(c)는 1.0 cm/sec의 진동이 작용한 때로 타설 후 최초진동이 작용하는 시간에 따라 강도의 변화상태를 나타낸 것이다.

즉 그림 (c)와 같이 4~10 시간대에서 강도가 감소하는 추세를 보이고 그 이후는 거의 변화가 없다.

Fig. 6(d) 및 (e)는 비교적 진동치가 큰 경우로 각각 5.0 cm/sec 및 10.0 cm/sec가 작용한 경우이다. 두 경우 모두 타설 후 2시간대에서 진동이 작용하면 오히려 평균강도가 261 kgf/cm²에서 265 kgf/cm²로 약간 증가되나 타설 후 8시간대가 되면 248 kgf/cm²로 감소한다. 이와 같은 현상은 전자는 초결이전의 다짐효과, 후자는 수화작용과 관계가 되는 것⁴⁾으로 추정된다.

특히 이 경우 진동치가 5.0 및 10.0 cm/sec로 2배의 차이가 있는데도 불구하고 강도에는 거의 차이가 없는데, 이점은 앞으로 더욱 연구가 요망된다.

한편 발파진동의 영향을 가장 많이 받는 시간은 콘크

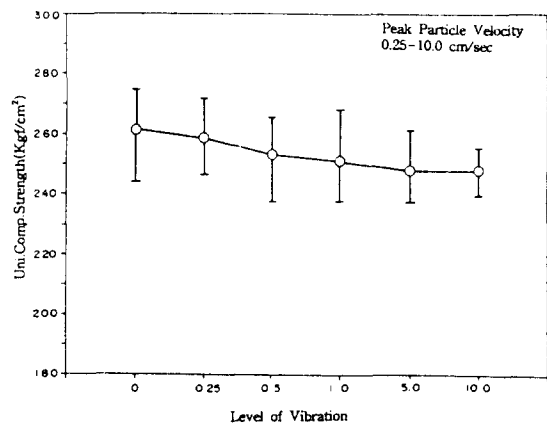


Fig. 7. Uniaxial compressive strength vs. vibrating steps

Table 4. Experimental results of physical properties of concrete

Classification	P-Wave Velocity (m/sec)	Uni. Comp. Strength (kgf/cm ²)	Young's Modulus (x10 ⁵ kgf/cm ²)	Poisson's Ratio
Unvibrated Block	3210~3270 (3240)	244~274 (261)	1.67~1.75 (1.70)	0.14~0.19 (0.17)
Vibrated Block	3200~3260 (3230)	224~254 (240)	1.66~1.73 (1.67)	0.13~0.19 (0.17)

리트 타설후 4~10시간 정도로 특히 8시간대에서 그 감소율이 크다. 따라서 8시간대의 시험편에 서로 다른 크기의 진동이 작용할 때 압축강도의 변화를 표시하면 Fig. 7 과 같다.

Fig. 7에 표시한 강도는 무진동 콘크리트의 강도를 1로 기준할 때 각각 0.99, 0.97, 0.96, 0.95, 0.95로 대체로 5%정도의 강도 감소를 보이고 있다. 그러나 이러한 현상은 진동의 지속시간이 0.2초 미만의 극히 짧은 시간인 점에 특색이 있다 하겠다.

5.3 진동이 콘크리트의 물성변화에 미치는 영향

진동이 콘크리트의 물성 즉 탄성계수, 탄성과 전파속도, 포아송비등 주요 물성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 5.1절 즉 발파진동의 크기 2.0 cm/sec (범위는 1.59~3.25 cm/sec)를 콘크리트 타설 후 30분 간격으로 12회에서 18회까지 작용시킨 블럭에서 시험편을 채취하여 시험한 결과는 각각 Table 4 및 Fig. 8과 같다.

Table 4 에서와 같이 진동을 받은 경우 무진동에 비하여 약간씩 감소함을 알 수 있으나 뚜렷하지는 않다. 이와 같은 현상은 Fig. 8의 실선(무진동)과 점선(진동을 받은 경우)에서도 알 수 있다.

이상 2가지 실험조건에서 보면 콘크리트를 타설 후 3시간이내에 진동이 작용되면 콘크리트의 강도는 증가하고 6~8 시간대에서는 도리어 감소하며 12시간 이후에는 진동에 관계없이 거의 변화하지 않는다. 이와 같은 현상은 전자는 콘크리트 타설시 다짐효과, 후자는 시멘트의 수화작용이 완료된 후 진동이 작용되기 때문인 것으로 생각 된다.

특히 강도 감소는 반복진동에서 6시간, 단일진동에서는 8시간대에서 나타나는데 이것은 현장에서 콘크리트를 타설시 전자는 낮에, 후자는 온도가 비교적 낮은 밤에 타설한 영향이 아닌가 추측되는데 앞으로 검토가 요망된다.

한편 진동의 크기효과를 보면 0.25 cm/sec의 저진동에서는 강도 변화가 거의 없고 점차 진동이 커짐에 따

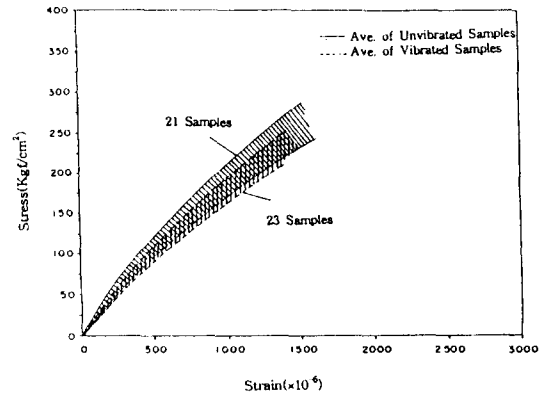


Fig. 8. Effect of vibration on elastic modulus

라 강도의 감소율도 커지다가 5 cm/sec와 10 cm/sec의 진동에서는 거의 같은 경향을 보여주고 있다.

6. 결 론

콘크리트의 타설후 양생도중 발파진동의 회수, 진동을 가하는 최초의 시간, 진동의 크기 등을 변수로 하여 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 콘크리트 타설 후 양생기간중 발파진동의 크기를 0.40, 0.60, 1.33 및 2.0 cm/sec로 구분하여 30분 간격으로 각각 3회(1시간 30분), 6회(3시간), 9회(4시간 30분), 12회(6시간), 15회(7시간 30분), 18회(9시간)씩 주기적 진동을 가하면 진동을 가하지 않은 경우에 비해 초기 6회 까지는 강도가 약간씩 증가하는 경향을 나타내다가 12회(6시간), 15회, 18회의 발파진동을 받으면 강도가 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다.

2) 타설 후 양생시간대별 발파진동은 3시간 이내에서는 진동을 가하면 오히려 강도가 증가하고 있는데 이는 콘크리트 타설시 다짐효과를 주기 때문인 것으로 판단되며 6시간 이후에는 시멘트의 수화작용이 완료되기 때문인 것으로 생각된다.

3) 발파진동의 크기가 양생 콘크리트의 강도에 미치

는 영향을 검토하기 위하여 각각 0.25, 0.5, 1.0, 5.0, 및 10.0 cm/sec 의 크기로 단 1회 작용 시켰다.

이 경우 0.25 cm/sec의 저진동에서는 강도의 변화가 거의 없고 점차 진동이 커짐에 따라 강도의 감소율도 증가하다가 5 cm/sec 및 10 cm/sec의 진동에서는 거의 같은 경향을 보여주고 있다.

4) 콘크리트의 주요 물성인 탄성과 전파속도, 탄성계수 및 포아송비등은 무진동에 비하여 진동이 작용되면 감소하나 그 감소 경향은 뚜렷하지 않다.

5) 콘크리트를 타설하는 인접 지역에서 발파작업을 실시하는 경우 발파진동은 타설 후 6~8시간대에서는 강도 및 물성을 약화시키는 요인이 되므로 세심한 주의를 요한다. 또한 진동치의 크기도 유념하여 가능한 한 저진동이 되도록 해야 한다

이상의 실험결과는 현장 여건상 단일공 발파에 의한 것으로 실험조건 즉 진동의 지속시간이 대체로 0.05초 미만의 대단히 짧은 시간이기 때문에 양생콘크리트에 미치는 영향이 비교적 적은 것으로 추정된다. 앞으로 다수의 발파공을 기폭시켜 진동이 30초 정도로 지속될 경우 그 영향에 관한 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

- 1) 김대상, 이정인, 이회근, "발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구," 한국자원

공학회지, 28, 1991, pp.444-455.

- 2) 권영웅, "진동이 콘크리트의 초기강도에 미치는 영향에 대하여," 대한주택공사, 1988, pp.95-100.
- 3) 대우 건설기술연구소(주), "건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구," 1988, pp.40-60.
- 4) 대한주택공사, "진동이 주변 구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향," 1990. 6, pp.15-90.
- 5) 류창하, 이정인, "발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구," 한국자원공학회지, 16, 1979, pp.41-50.
- 6) 박승범, "최신 토목재료실험," 문운당, 1993, pp.18-171.
- 7) 임한욱, 김재동, "발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구," 한국자원공학회지, 29, 1992, pp.146~157.
- 8) 정동호, 이상은, 임한욱, "인공진동의 크기가 양생콘크리트의 강도와 물성에 미치는 영향," 한국암반역학회지, 제4권 제1호, 1994, pp.31-37.
- 9) 정일록, "소음. 진동이론과 실무," 녹원출판사, 서울, 1988, pp.119-176.
- 10) Chellis, R. D., "Pile Foundations", Foundation Engineering(Edited by Leonards, G. A.), Chapter 7, McGrawhill, 1962, pp.707.
- 11) G.A.Bollinger, 1980, Blast Vibration Analysis, Southern Illinois University Press 12. Ken Gray, "Effects of Blasting Vibrations on Curing Concrete," The 20th U.S Symposium on Rock Mechanics in Austin, Texas, June 4~10, 1979, pp.455-458.