

# 일상 환경변화를 고려한 구조물 진동피해의 수준 평가

## Estimation of Structural Damage by Blasting Vibration Considering the Environmental Crack Deformation

정 지 문\*<sup>1</sup>  
Jung, Ji - Moon

양 형 식\*<sup>2</sup>  
Yang, Hyung-Sik

---

---

### Abstract

In order to decide critical vibration level on structural damages induced by near blasting, deformation of existing cracks in structure was investigated and ground vibrations were measured. New criteria to evaluate blasting damage to structure are proposed considering daily deformation of cracks in structures. Results from 2 brick houses in fishing village show that new design criteria far more than current are required to cause structural damage for brick houses.

### 요 지

근거리 발파에 의한 구조물 피해의 임계진동수준을 결정하기 위해 구조물의 기존 균열 변형과 지반 진동수준을 계측하였다. 구조물에 대한 발파진동의 피해를 평가하기 위해 일상적인 환경변화에 의한 기존 균열의 최대 변형량을 고려한 새로운 기준을 제시하였다. 본 실험에서 사용된 2 채의 농어촌 조적조 가옥에 대한 시험 결과를 보면, 구조물에 피해를 유발하기 위한 진동 수준은 설계 기준보다 훨씬 더 큰 수준임을 알 수 있다.

**Keywords :** Blasting, Crack deformation, Damage criteria, Ground vibration, Structural vibration.

---

\*1 정회원, 전남대학교 대학원 자원공학과 석사  
\*2 정회원, 전남대학교 공과대학 자원공학과 교수

## 1. 서론

발파진동에 의한 구조물의 피해 문제는 적용 법규가 모호한 가운데 관습적으로 서울지하철공사의 설계허용기준과 환경부 분쟁조정위원회의 적용 사례 및 민사소송에서의 판례 등이 혼용되어 적용되고 있다. 그러나 발파 설계를 위한 허용기준이 곧 피해를 인정하는 기준이 아님은 명백할뿐더러 수많은 시공회사의 시공경험에 비추어서도 이러한 판정은 옳지 않다. 몇몇 연구자들이 여러 가지 문헌 연구를 통하여 새로운 기준을 제시한 바 있지만(류창하 외, 1994, 양형식 외, 1997) 구조물에 실제 피해가 발생하는 수준으로 발파하며 관찰하는 연구는 없었다.

본 연구에서는 여천국가공단 확장공사에서 철거대상인 가옥들을 선정하고 이들 가옥 주변에서 구조물의 균열이 확장되거나 생성되는 수준의 발파를 실시하면서 진동수준과 균열의 확장을 관찰하였다. 이들 연구를 통하여 본 연구에서는 발파공사 시 주변 구조물에 미치는 발파진동의 영향을 평가하기 위해 발파로 인한 피해 산정 방안을 새롭게 제안하였고, 여기에서 제시된 방안을 적용하여 놓여준 조적조 건물에 대한 발파진동 피해의 인정수준을 제시하였다.

## 2. 이론과 가설

### 2.1 평면파 가정에 의한 변형률 예상

파가 파원으로 부터 전파하여 거리가 증가함에 따라 전파면은 곡률이 줄고 점차 평행하게 되고 관련구조물(집, 관로 등)의 어디서나 입자운동이 평행으로 되는 거리에서는 파가 평면파로 거동한다. 따라서 발파 파동을 평면파로 가정하면 지반의 변형률과 입자속도의 관계를 간단히 계산할 수 있다. 발파진동을 사인파로 하고, 평면파의 변위식

은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \sin(x - ct) \quad (1)$$

여기서,  $u$ 는 진행방향에 평행한 입자의 변위 즉 이동량이고  $x$ 는 위치,  $c$ 는 전파속도,  $t$ 는 시간이다. 변형률의 정의로부터 진동 속도  $\dot{u}$ 와 파속  $c$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon = -\frac{\dot{u}}{c} \quad (2)$$

따라서 평면파의 전파방향 파속을 알면 지반변형률을 예상할 수 있다.(Dowding, 1985)

### 2.2 인장 균열 발생 조건

콘크리트나 석고 벽 등 부재의 균열은 인장파괴 메커니즘에 의한 것이 많다. 어떤 부재 자체의 재료에 이미 발생한 변형률과 진동 등의 외력으로 인한 변형률의 합이 부재의 파괴를 초래하는 임계 인장변형률을 초과할 때 인장 균열이 발생한다.

$$\epsilon_c \geq \epsilon_p + \epsilon_d \quad (3)$$

여기서  $\epsilon_c$ 는 임계 변형률,  $\epsilon_p$ 는 기존 변형률,  $\epsilon_d$ 는 진동으로 인한 변형률이다. 기존변형률은 가옥의 노후도에 따라 증가할 것이며 정량화하기가 쉽지 않다.

### 2.3 피해 인정 가설

가옥 벽체의 균열발생 원인으로 구조적인 측면에서는 기초의 부등침하, 과하중 등을 들 수 있고 재료자체의 성질로는 부재의 변질이나 열팽창

차 등을 들 수 있다. 기왕에 발생한 균열의 변형은 장기적으로는 구조적 요인들이나 재료변질의 영향을 받을 것이나 단기적으로는 온도 등 열팽창의 영향이 가장 클 것으로 판단된다.(White 등, 1993)

발파진동은 1초 이내의 짧은 시간 동안 지속되며 가시적인 피해는 기존 균열의 확대, 새 균열의 형성, 부재의 탈락 등으로 나타나고 이러한 현상은 기존균열에 응력이 집중하여 주변이 팽창하고 수축하기 때문에 발생한다. 일상적인 환경변화에 의해서도 기존균열에 응력이 작용하여 상당한 변형을 유발하므로 피해인정 수준은 최소한 일상적인 열팽창 수축에 의한 균열의 변형량 보다 더 큰 변동을 일으키는 진동이 작용하는 경우라야 할 것이다. 결국 구조물의 최초 피해를 균열의 발생으로 본다면, 온도 등의 환경적 변화량을 초과하지 않는 범위에서의 진동수준은 구조물 피해를 유발하지 않는다고 볼 수 있다.

### 3. 계측

계측 대상 지역은 여천공단 확장단지 현장인 전남 여천시(현 여수시) 화치동 연성마을로서 기반암은 주로 안산암 및 응회암이고 풍화층이 기반암 상부에 불규칙하게 피복되어 있다. 풍화층 상부에

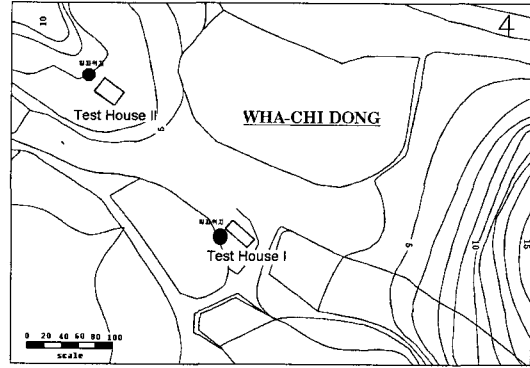


그림 1. 실험대상지역의 지형도

는 미고결 상태의 해성퇴적층인 실트질 모래, 자갈층과 실트질 점토층이 광범위하게 발달, 분포하고 있다.(양 등, 1999) 시험가옥 I, II는 건축한지 30년이 경과한 전형적인 농어촌가옥으로 단층 블록조이며 외벽은 시멘트 모르타르로 마감 처리되어 있고 목조 스리스트에 스테이트 덮개 형식으로 축조된 취약한 구조물이다. 벽체에는 수직, 수평 및 전단균열이 다수 발달되어있다. 그림 1은 실험대상지역의 지형도이며 그림 2는 대상지역을 포함하는 광역지질 단면도이다.

진동 측정기는 Canada Instancel사의 Blastmate I (DS-477), Blastmate II (DS-677) 및 Minimate (DS-077) 등 8대이다. 계측기는 알루미늄 plate와

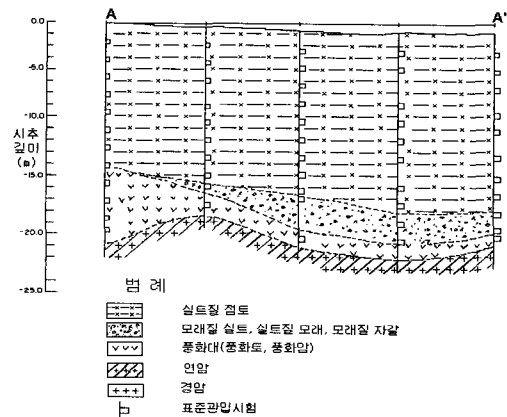


그림 2. 광역 지질단면도

bolt를 제작하여 시험가옥 벽체와 바닥에 부착하였으며 측정기가 시험가옥의 각 부분과 함께 움직일 수 있도록 완전히 고정시켰다. 벽체 균열의 변형량을 측정하기 위하여 크랙 게이지를 사용하였다. 크랙 게이지의 측정범위는 0~40 mm이며, 분해능은 0.04 mm이다.

본 연구에서는 대표적 균열의 일상 변화를 조사하고 근접 발파시의 균열 변형량을 조사하였으며 주요 벽체의 미세균열 생성 여부를 함께 조사하여 피해 발생을 판정하였다. 일상변화 관측에서는 단시간 동안의 균열발생 및 변동을 추적하여 지반침하나 재료의 노후화로 인한 균열의 변동 가능성을 최소화하고 온도와 습도 등 기후 조건으로 인한 변화만이 고려되도록 하였다. 시험가옥의 온도 변화에 따른 균열 변화에 대한 실험은 환절기인 98년 3월 20일에서 22일까지 3일에 걸쳐 실시하였다. 시험가옥 I, II의 외부와 내부 벽체의 여러 균열에 크랙 게이지를 붙이고 온도의 변화에 따른 기존 균열의 변형량을 측정하였다. 발파는 장약량과 거리를 달리하여 지반진동속도를 작은 수준에서 큰 수준으로 점증하도록 유도하였고 지반과 시험가옥 내 벽체와 바닥면에 진동계측기와 crack gage를 부착하여 동시에 계측하였다.

## 4. 일상 변형계측 결과

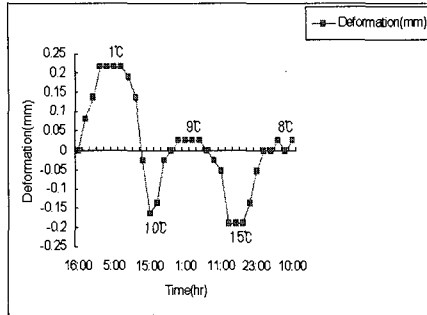
### 4.1 균열 변형의 인자

일상의 환경 변화로 인한 균열의 변형을 계측한 결과는 표 1과 같다.

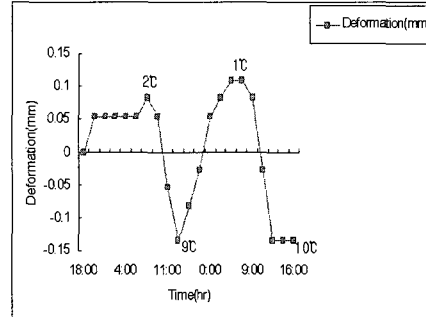
실내에서 측정된 균열의 변형량은 0.1 mm 미만으로 아주 작은 변화를 보였고 실외에서 측정된 변형량은 최대 0.41 mm까지 변화를 보였다. 가옥 외부 벽체의 균열에 대한 변형량을 비교하면 대체로 햇빛을 직접적으로 받아 실외 기온의 영향과 습기의 건조와 흡습을 가장 크게 받는 벽체의 균열이 가장 큰 변화를 보이고 있다. 시험가옥 I에서는 좌측벽의 균열이 0.41 mm의 변화를 보였고, 시험가옥 II에서는 보일러실 우측벽의 수직균열이 0.24 mm의 변화를 보였다. 균열의 형태에 따른 균열의 변화는 대체로 수직균열이 가장 큰 변형을 나타내고 있고, 수평균열, 전단균열의 순으로 변화의 경향을 보이고 있다. 시험가옥 I에서 최대 변화를 보이는 좌측벽의 균열의 길이는 0.7 m이고, 시험가옥 II의 보일러실 우측벽 수직균열의 길이는 1.3 m로 대체로 신장이 긴 균열이 많은 변화를 보이거나 균열의 폭과 길이는 변형량과 직접적인 관

표 1. 일상 온도변화에 의한 여러 인자에 따른 균열의 변형량 비교

시험가옥	인자					
	위치	모양	길이(m)	폭(mm)	최대변형량(mm)	최대일교차(℃)
I	방 1	수직	0.45	7	0.05	3
	좌측벽	수직	0.7	0.5	0.41	14
	우측벽	전단	0.5	0.45	0.03	14
	대면벽	수평	0.4	0.1	0.05	14
II	방 1 우측벽	수직	2.2	5	0.03	8
	방 1 좌측벽	수직	0.6	1	0	8
	보일러실 우측벽	수직	1.3	4	0.24	9
	보일러실 우측벽	수평	1.1	0.6	0.11	9
	부엌 벽	수평	1.5	0.4	0	7



(a)



(b)

그림 3. 일상 온도변화에 따른 시험가옥 대표균열의 변형량 비교 (a) 시험가옥 I (b) 시험가옥 II

계는 보이지는 않는다.(양 등, 1999)

구조물에 발생한 균열의 변화는 대기중의 온도 차에 의해 변화를 하지 않고, 벽체 온도의 변화에 반응을 한다. 그러므로 대기중의 온도와 벽체 온도 사이에는 차이가 있어 대기중의 온도와 균열 변화 사이에는 상당한 차이가 있었다.

#### 4.2 온도변화와 균열 변형량

이상의 결과들을 비교 분석하면, 가장 큰 변화를 보이는 균열의 특징은 외부 온도와 햇빛에 직접 노출되어 습기의 건조와 흡습이 자유로운 벽체에 위치한 수직균열이 가장 큰 변화를 일으키는 것으로 나타났다. 또한 가옥의 노후정도가 균열의 변화에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 점을 고려할 때, 대표 균열로는 햇빛에 직접 노출되는 벽체의 수직 균열이 가장 적당한 것으로 보인다. 본 연구에서는 시험가옥 I의 좌측벽 수직균열은 온도차 14°C에서 최대 0.41 mm의 변형을 보였으며, 시험가옥 II에서는 보일러실 우측벽의 수직균열이 온도차 9°C에서 최대 0.24 mm의 변형을 보였다. 이러한 균열들은 1°C의 온도차에 의해 약 0.03 mm의 변형을 일으키는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 균열의 변화는 발파 시 피해를 판단하는 기준으로 사용할 수 있을 것으로 생

각된다.

그림 3은 시험가옥 I·II의 대표 균열의 일상 온도변화에 따른 변화량을 나타내고 있다.

그림에서 시간대에 따른 균열의 변형 양상은 사막 환경에서 온도 일교차에 따른 콘크리트 블록 벽 균열의 응답을 보고한 Wall의 연구(1966)나 White 등(1993)의 온도변화연구와 같이 일교차의 변화에 따라서 실내외, 주야별로 상반되는 주기적 변화를 볼 수 있다.

#### 4.3 예상 변형률과 진동속도

발파를 실시하기 전에 미리 각 시험가옥 벽체의 강도 및 탄성과 속도를 측정하고, 이 결과로부터 임계변형률에 해당하는 진동속도를 구하면 발파진동만으로 균열이 발생할 수 있는 진동수준을 구할 수 있다. 실제로는 벽체가 노후화되고 기존의 응력 이력에 따라 상당한 수준의 변형이 발생되어 있으므로 임계 변형률 보다 훨씬 작은 수준의 진동에서 균열이 발생할 수 있다. 주조 석고는 최대 인장 변형률이 250  $\mu$ 일 때 정적파괴가 발생하였고 콘크리트와 시멘트 블록은 100  $\mu$ 과 300  $\mu$ 의 동인장 변형률에서 균열된다. 석고 부분은 300~500  $\mu$ 의 변형률에서 파괴된다.(Perrson et al, 1992)

표 2. 예상 변형률과 지반진동속도

시험가옥		슈미트 헤머 반발치	추정 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	추정 인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	탄성과 속도 (m/s)	Young율 (10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	예상 변형률 (μ)	상응 진동속도 (cm/s)
I	대면벽	36	320	32	2860	2.04	160	45
	좌측벽	42	490	49	3420	2.35	210	71
	우측벽	35	300	30	2890	2.04	150	43
II	대면벽	41	460	46	3060	2.14	220	66
	좌측벽	46	650	65	2740	2.00	330	89
	우측벽	44	570	57	3030	2.12	270	81

표 2는 각 시험가옥에서 조사한 Schmidt hammer test와 탄성과 속도 측정 결과로부터 탄성론적으로 구한 파괴예상 변형률이다. 여기서 인장강도는 압축강도의 1/10로 가정하였다. 예상변형률은 벽체의 강도와 탄성계수를 측정하여 구하였다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 예상변형률,  $\sigma$ 는 인장강도,  $E$ 는 탄성계수(Young's modulus)이며 시험가옥에서 입수한 속빈 콘크리트 블록(hollow concrete block)을 이용하여 측정하였다.

계산결과, 시험가옥 1에서 피해를 일으킬 수 있는 최저 진동수준은 우측벽의 43 cm/s이고, 시험가옥 2에서는 대면벽의 66 cm/s이다. 이처럼 진동피해가 가능한 진동수준은 가옥마다, 벽체마다 또 부재의 노후도에 따라 달라질 수 있으므로 예상진동수준을 이용한 진동피해 판정은 신뢰성이 높지 않을 것으로 생각된다.

## 5. 발파진동에 의한 변형

### 5.1 발파진동에 대한 벽체의 응답

그림 4는 시험가옥 벽체의 발파진동에 대한 균열의 이동량을 나타낸 것이다.

온도변화에 따른 최대 변형량 0.41 mm를 피해의 기준으로 하였을 때 이에 해당하는 발파진동수준인 파괴 최소선은 시험가옥 II에서 발생한 98.5 mm/s로서 변형량은 -0.68 mm였으며, 피해기준인 변형량 0.41 mm 미만의 가장 큰 변형을 일으킨 진동속도인 비파괴 최대선은 시험가옥 II에서 발생한 76.3 mm/s로서 이 때 발생한 변형량은 -0.22 mm였다. 결국 피해기준에 해당하는 변형을 일으킨 진동속도는 0.5 kine의 10배에 달하는 값이며 비파괴 최대선도 국내에서 적용되는 허용 설계진동수준 보다 훨씬 더 높았다.

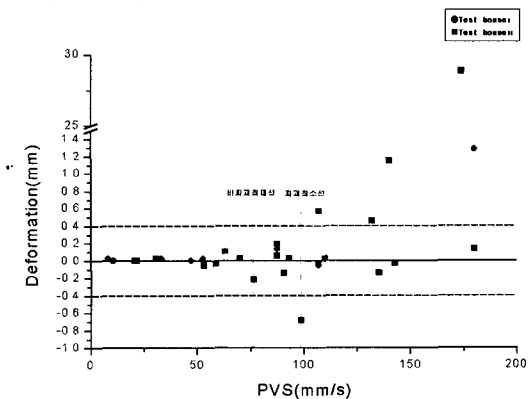


그림 4. 발파진동에 의한 시험가옥 벽체의 균열 변형량

## 5.2 구조물의 동적응답

발파진동에 대한 구조물의 영향을 평가하기 위하여 벽체 계측데이터를 이용하여 고유진동수와 감쇠율을 측정하였다. 고유진동수는 11 Hz로서 낮은 편이며 감쇠율은 5%로 계산되었다.

건물벽체의 고유진동수에 대한 연구로 Dowding은 12~20 Hz(Dowding, 1985), 양은 우리나라 조적조 가옥은 11~24 Hz라 보고했다.(양형식 외, 1999)

대부분 구조물의 고유진동수는 저주파수 대역이며 지반의 진동수와 일치하는 경우 공진하여 응답수준이 크게되는 경향이 있다.

시험가옥지반에서 계측한 진동속도의 주진동수는 거리, 장약량, 자승근 환산거리의 분포가 다양함에도 불구하고 표 3에서 보듯이 7~85 Hz로 저주파수가 우세하였다. 따라서 발파진동에 의한 주진동수와 건물의 고유진동수와 비슷한 대역에서 미미한 공진 증폭이 있었을 것으로 판단된다.

## 5.3 예상진동속도와 실제진동속도 비교

표 2에서 예상진동속도에서 대면벽에 피해를 일으킬 수 있는 최저 진동수준은 450 mm/s, 좌측벽에 피해를 일으킬 수 있는 최저 진동수준은 710 mm/s, 우측벽에 피해를 일으킬 수 있는 최저 진동수준은 430 mm/s로 예상되었다. 온도변화에 따른 최대 변형량인 0.41 mm를 기준으로 한 피해인정 진동속도는 대면벽에서 70 mm/s, 좌측벽은 135 mm/s, 우측벽은 76 mm/s로서 예상진동속도에서 예측한 것과 같은 경향을 보였다. 예상진동속도와 피해기준 미만의 가장 큰 변형을 일으킨 실제 진동속도를 비교하면, 대면벽에서는 예상 진동속도가 실제 진동속도의 약 6.5 배이고, 좌측벽에서는 5.3 배이며, 우측벽에서는 5.6 배로서 예상진동속도에 비해 실제진동속도가 약 1/6 정도로 작게 나타났다. 이것은 가옥의 노후도에 의한 변형률  $\epsilon_p$

표 3. 시험가옥지반의 주진동수

대상가옥	발파횟수	지반 진동수(Hz)
시험가옥 I	1회	85
	2회	64
시험가옥 II	1회	16
	2회	18
	3회	57
	4회	37
	5회	10
	6회	17
	7회	7
	8회	16
	9회	18

를 고려할 수 없어 진동속도만으로 표현하였기 때문으로 생각된다.

## 5.4 새 균열 발생 관측

발파진동으로 인한 벽체 균열변화를 관찰한 결과 각각의 진동으로 미세 균열의 발전과 새 균열의 발생보다는 어느 진동수준 이상에서 기존균열이 크게 열리면서 파괴되는 양상을 보였다. 40 mm/s 이상의 진동을 경험한 후 대면벽 일부에 극히 미세한 깃털 모양의 균열이 발생하였으며 역시 이 정도의 수준에서 균열끼리 연결되는 현상이 관찰되었다. 구조물에서 눈으로 인식할 수 있는 정도의 균열 발생은 적어도 70 mm/s 이상의 진동을 경험한 후였으며 이때도 벽체에 따라서는 전혀 새로운 균열이 발생하거나 확장된 것을 확인하지 못하는 경우도 있어서 크랙 게이지의 계측 결과와 일치하는 경향이였다.

## 6. 결 론

전남 여천시 화치동 연성마을에서 조적조 가옥을 대상으로 실시한 발파진동 및 균열 계측을 통하여 온도 및 자연적인 영향에 따른 기존 균열의 변화와 근거리 발파로 발생한 발파진동이 주변 구조물의 균열에 미치는 영향을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 환경적인 영향 즉 외부온도와 습도로 인한 기존균열의 변형량을 고려하여 발파진동에 의한 구조물의 피해를 판단하는 기준을 제시하였다.
- 2) 시험가옥의 균열 변화량은 외부 온도와 햇빛에 직접적인 영향을 받아 습기의 건조가 자유로운 벽체에 위치한 수직균열이 가장 큰 값을 보였다.
- 3) 벽체에 변형을 일으킬 수 있는 이론적 예상진동속도는 벽의 노후에 따른 변형률이 포함되어 실제 진동속도의 6배에 달하였으며 따라서 피해기준 판정에는 부적합하였다.
- 4) 제시된 피해기준에 해당하는 변형을 일으킨 진동속도는 최소한 70 mm/s 이상으로 국내에서 적용되는 허용 설계진동수준 보다 훨씬 더 높다.
- 5) 발파진동으로 인한 벽체 균열변화를 관찰한 결과 각각의 진동으로 미세 균열의 발전과 새 균열의 발생보다는 어느 진동수준 이상에서 기존 균열이 크게 열리면서 파괴되는 양상을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 여천국가공단 확장공사 현장에서 수행되었으며 제3공구 현대건설 박대휴 부장님(당

시), 강재갑 차장님, 김은수 대리 및 태아건설 전옥 소장님, 제2공구 대우의 엄현천 소장님, 은희범 차장님 외 관계자 여러분의 도움에 감사드립니다. 오랜 기간의 계측을 도와준 전남대학교 발파공학 연구실 김남수, 전양수, 김재철, 문승백, 조상호, 진연호 군들에게도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 류창하, 선우춘, 정소걸, 이종림, 주광호, 이대수(1994), "안전관련 구조물 근접시공시 발파진동 허용 기준의 적용성에 관하여", 한국암반공학회지, 제4권, pp.157~165.
2. 양형식, 김남수, 전양수, 정지문, 김재철, 문승백, 조상호, 진연호(1999), "발파진동으로 인한 조적조 가옥 피해의 임계수준 평가", 한국암반공학회지, 제9권, pp.72~77.
3. 양형식, 전양수, 이경운(1997), "인체에 대한 진동의 허용 기준 및 피해 산정에 관한 연구", 한국암반공학회지, 제7권, pp.310~322.
4. 양형식, 조상호, 진연호(1999), 발파진동에 대한 조적조 가옥의 응답특성 연구, 1999년 춘계 공동학술발표회논문집, 자원환경지질학회·한국자원공학회·한국지구물리탐사학회, pp.348~353
5. Dowding, C.H.(1985), Blasting Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., pp.126~127.
6. Perrson, P.-A., R. Holmberg and J. Lee(1992), Rock Blasting & Explosives Engineering, CRC Press, pp.337~367.
7. Wall, J.F.(1966), Seismic-induced Architectural Damage to Masonry Structures at Mercury, Nevada, University of California, Lawrence Radiation Laboratory, UCRL-14987.
8. White, T., R. Farnfield and M. Kelly(1993), "The effects of surface mine blasting on buildings", Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam, pp.105~111.

(접수일자 1999. 2. 10)