

<논 문>

지반진동이 건물의 균열에 미치는 영향에 관한 연구  
-부산 안산암지역을 대상으로-

A Study of Effects on Building for Cracks by Ground Vibration  
- Pusan Andesite -

안 명 석\* · 박 중 남\*\* · 이 영 대\*\*\*

Ahn Myoung Seog, Park Jong Nam and Lee Yung Dae

(1999년 7월 12일 접수 : 1999년 11월 5일 심사완료)

**Key Words** : Pusan Andesite(부산 안산암), Nearly Buildings(주변건물), Blasting(발파), Safety(안전)

**ABSTRACT**

A study was made on crack developments of the nearly buildings due to rock blasting for road construction at the 623 Common Block near the rear side of the Gamchun Habor. The geology of the study area is composed of andesite, which belongs to the Kyungsang System of the Cretaceous Period. For 3 months of blasting events, the vibration velocity data were measured at the site just in front of the K freezing factory. The data were divided into 4 groups according to the period of blasting(i.e. DATA 1, DATA 2, DATA 3 and DATA 4), for deriving K and n values. As a result, DATA 1 shows that K and n were 83.3756 and -0.848, respectively, and then K and n were progressively increased in absolute values for the follow-up groups and the last DATA 4 shows K and n were 2980.4898 and -1.502, respectively. Such differences in K and n values may be due to partly : 1)variations geological characteristics, from the upper rather weathered, fissuring soft rocks at the earlier stage less weathered and fissuring hard rocks at the later stage of blasting events, and 2) the geometry between the blasting and detecting points. Among the total count of 225 blasting events, the number exceeding the safety limits of 0.5cm/sec was 20(8.9% of the total), the maximum displacement detected at the crack gage was 0.25mm, the level of which is far less to cause the occurrence and development of any cracks to the K factory. Therefore, it was confirmed that there were no damages such as structural failure or safety problem to the building.

1. 서 론

최근 대도시의 도시기반시설 확충을 위한 도로개

설공사 및 터파기 공사 등이 활발해지면서 인구밀집 지역에서의 발파작업이 불가피하게 되고 이로 인한 인근건물에 대한 안전도 문제와 불편 및 피해 보상성 민원이 발생되고 있다. 따라서 이러한 민원과 주변에 피해를 최소화하기 위해서는 안전정밀발파를 하는 것이 필수적이다. 그러나 안전성과 함께 시공성, 경제성 문제 등을 동시에 고려해야하므로 예정

\* 정희원, 동서대학교 응용공학부

\*\* 동아대학교 공과대학 자원공학과

\*\*\* 부경대학교 공과대학 토목공학과

설계와 시험발파를 통한 발파진동상수  $K$  및 감쇠지수  $n$ 을 확정하여 실시설계를 한 후 시공해야 할 것이다<sup>(6,8)</sup>.

본 연구는 이와 같은 문제를 정량적으로 처리하기 위하여 부산광역시 사하구 구평동에 위치한 도로개설공사 발파현장에서 3개월동안 225개의 발파진동 측정자료를 수집하여 이를 거리, 장약량, 발파초기와 중기, 말기에 따라 분석, 검토함으로써 더욱 효과적이고 정확한 설계 및 정밀시공감리를 위해 본 사례 연구를 실시하였다.

## 2. 대상지역의 지질 및 주변현황

대상지역의 지질은 중생대 백악기(cretaceous period)의 경상계(경상누층군)에 속하는 안산암으로서 적갈색 내지 청색을 띠고 있는 단축압축강도 2081.3 kg/cm<sup>2</sup>, 삼축압축강도 2781.23 kg/cm<sup>2</sup>, 현지 암반의 탄성파속도 2.627 km/sec, 시추코아의 탄성파속도 5.87 km/sec, 균열계수(Cr) 0.55의 암반으로 이루어져 있다. 또한 현장은 도로개설을 위한 암반발파현장으로서 근접된 보안대상건물로는 구평동 산 83번지와 103번지 등에 산재한 제1종 보안물건인 시가지주택과 제4종 보안물건인 냉동공장 등이 43~50 m 지점에 위치해 있다. 사용한 화약류는 GD(gelatine dynamite) 및 emulsion 폭약을 사용하였으며, ED(electric detonator) 및 MSD(milli second detonator) 뇌관을 사용하였고<sup>(11)</sup>, 발파진동측정기는 Blastmate II DS-677 Instantel을 사용하였다.

## 3. 진동 및 균열의 허용치

### 3.1 발파진동

#### (1) 발파진동식

발파진동의 크기를 결정하는 변수로는 화약 종류, 지발당 장약량, 천공간격, 저항선의 길이 등과 같은 발파관련 변수와 진동을 전달하는 암반의 종류, 층의 두께, 지반내의 탄성과 전달속도, 밀도 등의 지반관련 변수가 있다.

Hendron, Devine, Oriad등은 이러한 발파현장에 관련된 변수를 차원해석하여 지상구조물의 피해영향의 척도가 되는 지반의 진동속도를 지발당 장약량과 발파원으로부터의 거리를 주요변수로 하는 경험식(1)과 같이 나타내었다<sup>(8,12)</sup>.

$$V = K \left( \frac{R}{W^b} \right)^{-n} \quad (1)$$

$V$  : 최대진동속도

$K$  : 발파진동상수

$R$  : 발파원으로부터의 거리

$W$  : 지발당 장약량

$b$  : 근거리 1/3, 원거리 1/2 적용

$n$  : 감쇠지수

여기서,  $R/W^b = SD$ (scaled distance)라고 한다.

환산거리식의 두 변수를 제거하고 지수계수를 달리 하면 식 (2)가 된다.

$$V = KW^a L^b \quad (2)$$

Table 1 The examples of estimated blasting vibration coefficients<sup>(5)</sup>

Researcher	Rock type	Pattern of blast	Type of explosive	SD	$K, n$
이정인(1979)	Limestone	Bench blast	ANFO	1/2	$K_{50} = 45.2$ $n = -1.80$
이정인(1979)	Limestone	Bench blast	Gelatine dynamite	1/3	$K_{50} = 103.2$ $n = -1.64$
					$K_{50} = 272.0$ $n = -1.64$
					$K_{50} = 406.3$ $n = -1.64$
양형식(1990)	Granite gneiss	Bottom blast (Test blast)	Gelatine dynamite	1/3	$K_{50} = 128.0$ $n = -1.75$ $K_{50} = 260.0$ $n = -1.75$ $K_{50} = 367.0$ $n = -1.75$
임한옥(1992)	Gneiss sandstone granite	Surface blast Tunnel blast Surface blast Center cut (1 free face) Bench blast (2 free face)	Gelatine dynamite & Slurry	1/3	$K_{50} = 36.0$ $n = -1.34$
					$K_{50} = 13.0$ $n = -0.85$
					$K_{50} = 1027.0$ $n = -2.34$
					$K_{50} = 29.0$ $n = -1.23$
					$K_{50} = 44.0$ $n = -1.38$
					$K_{50} = 14.0$ $n = -1.01$

$\alpha$  : 지수계수  
 $\beta$  : 감쇠계수

식 (1)에서  $b=1/2$ 이면 자승근(원거리) 환산거리,  $b=1/3$ 이면 삼승근(근거리) 환산거리라고 한다. 일반적으로 짧은 거리에는 삼승근이, 먼 거리에는 자승근이 더욱 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 식 (1)의 발파진동식에서는 지반공학적 성질이나 발파조건에 따른 진동감쇠 특성이 결국  $K, n$ 에 반영되어 표시되므로 발파설계를 위해서는 대상지역에서의 시험발파를 통해  $K$  및  $n$ 의 값을 결정하는 것이 대단히 중요하게 된다. 현재 국내에서 발표된 발파진동식의  $K$  및  $n$ 에 대한 연구를 정리하면 Table 1과 같다<sup>(8)</sup>.

이들 데이터는 각각의 지질조건과 발파조건 등이 일정하지 않아 일률적으로 비교할 수 없지만 현재 국내에서의 경험적인 발파진동식 결정 현황을 파악하는데 유용할 것이다.

(2) 허용진동치<sup>(7)</sup>

미국, 캐나다, 유럽 등에서 수 십 년간 연구한 결과를 종합하면 인체가 감응하는 정도는 가속도 성분에 따라 변하고 구조물이 받는 피해의 정도는 진동속도성분에 직접적인 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 구조물이 받는 피해의 정도는 발파진동속도

Table 2 The construction safety standards of USBM and Dupont

최대입자속도(cm/sec)	피해정도
30.5	터널암반의 낙석 유발
19.3	회벽에 커다란 피해
13.7	회벽이 갈라지기 시작
7.6	밀폐지역발파의 규제치
5.0	미광무국이 추천한 안전한계

1980년에 Siskind는 40 Hz이하의 낮은 주파수에서는 1.2 cm/sec의 진동수준에도 건물에 피해를 줄 수 있다고 주장

Table 3 The allowable vibration standard of Germany (DIN 4150)

건축물의 종류	허용진동치(cm/sec)		
	< 10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz
유적이거나 고적 등의 문화재	0.3	0.3~0.8	0.8~2.0
결합이 있는 건물, 빌딩이나 균열이 있는 저택	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0
공업지역	2.0	2.0~4.0	4.0~5.0

Table 4 The allowable vibration standard of Korea

건물분류	문화재	주택, 아파트 (균열이 있는 상태)	상가 (균열이 없는 상태)	철근콘크리트 빌딩 및 공장
건물기초에서의 허용진동치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

에 비례한다고 할 수 있다<sup>(13,14)</sup>. 각 나라의 진동속도 기준은 다음과 같으며, 우리나라의 경우 이정인등은 10~35 Hz에서 1~2 cm/sec, 35 Hz이상에서 5 cm/sec를 허용기준으로 제시하였으며, 양형식은 변형을 일으킨 진동속도는 최소한 10 cm/sec 이상이였다고 보고하였다<sup>(9)</sup>. 미국의 경우 Table 2, 독일의 경우 Table 3, 한국의 경우 Table 4에 나타내었다.

진동이 건물에 미치는 영향을 더욱 상세히 나타내는 평가기준으로는 독일규격이 주로 쓰이고 있으며,

Table 3은 1986년에 DIN 4150을 개정한 기준이며, 여기서 허용기준치는 진동의 수직, 접선, 진행성분의 세 방향의 벡터합으로 표시한 값이다<sup>(5)</sup>.

또한 Table 4는 우리나라의 노동부 발파작업 표준 안전작업지침이며 서울, 부산, 대구, 광주, 대전, 인천 지하철 건설현장에서도 적용되고 있는 진동안전 기준치이다<sup>(10)</sup>. 위의 자료들을 종합한 결과 당 현장의 적용 진동안전기준은 기존 균열이 있는 아파트 건물과 유사하므로 0.5 cm/sec(kine)이 적합한 것으로 판단되어 이를 적용하였다.

3.2 구조물에서의 균열

(1) 구조물에서의 균열발생 원인<sup>(1,3)</sup>

콘크리트 구조물에서의 균열의 발생은 피할 수 없는 것이다. 일반적으로 철근 콘크리트 구조물의 설계시 부재의 인장축은 균열이 형성된다고 가정하고 모든 인장력을 철근이 부담하도록 설계한다. PS 콘크리트 구조물에서는 인장축을 최대한 긴장하면 균열발생을 방지할 수 있다고 생각하나 여러 가지 복잡한 이유 등으로 인하여 균열을 완전히 막지는 못한다. 최근에는 균열발생이론에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일반적인 균열발생 원인은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 부적절한 구조설계 및 용도변경에 따른 과도하중의 작용, 지지, 부등침하
- 콘크리트의 건조수축, 수화열, 외기의 온도변화
- 지보공 등의 불완전, 부적절한 양생 등의 시공상의 원인
- 철근 부식 및 동결·융해현상

Table 5 The allowable crack width of countries

국명	건물별 종류	균열 허용폭	비고
한국	콘크리트 표준 시방서 설계편	0.4	대한토목학회 도로협회
	육내 구조물	0.33	
	육외구조물 도로시방서 및 제설	0.22	
일본	항만 구조물	0.2	운수성 일반공업규격
	원심력 철근 콘크리트 말뚝(pole)설계하중시	0.25	
	설계휨모멘트 작용시	0.25	
	설계하중, 설계모멘트 개방시 보통의 기상조건	0.3	
미국	육내부재 육외부재	0.4	ACI 건축규정
영국	BSI 규정 일반구조물	0.3	CP-110 d : 주철근의 피복
	특히 신한 침식성의 판정	0.004d	
프랑스		0.4	Brcard
구소련	비부식성	0.3	철근콘크리트규정
	약 · 중부식성	0.2	
스웨덴	도로교 사하중	0.3	도로규정
	사하중+활하중×0.5	0.4	
유럽공동체	상당한 침식작용을 받는 구조물의 부재	0.1	유럽콘크리트위원회
	방호공이 없는 보통 구조물의 부재	0.2	
	방호공이 있는 보통 구조물의 부재	0.3	

· 화재 및 가스 폭발, 차량충돌

· 충격 진동

(2) 균열폭 허용값<sup>(2,4)</sup>

균열폭이라 하면 균열이 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 판단하는데 이용되는 가장 중요한 요소이며, 일반적으로 콘크리트 표면에서 균열방향에 대하여 직각으로 측정된 폭을 말한다.

연속된 하나의 균열이라 해도 위치에 따라 폭이 다른 것이 보통이나 보수, 보강의 필요여부 판단자료로 중요한 것은 최대 균열폭이다. 이러한 균열폭의 측정은 crack gage, strain gage 등의 균열 측정기를 사용하여 균열 방향에 직각으로 측정하고, 수평 혹은 수직방향이 필요한 경우에는 그 값을 균열 방향의 각도로 보정한다.

콘크리트 구조물의 균열 허용치는 다음의 Table 5 와 같이 보통의 기상조건과 일반적인 콘크리트 구조물의 경우 각국의 균열폭 허용값을 수치로 비교해 볼 때 일본, 영국, 구소련, 유럽공동체는 0.3 mm, 한

국, 미국, 프랑스, 스웨덴 등이 0.4 mm로 규정하고 있다. 본 연구에서는 선진국에서 가장 많이 사용되고 있는 기준인 0.3 mm를 균열폭 허용값으로 설정하였다.

4. 측정방법 및 결과

4.1 측정방법

감천항 배후 623 공동구간 도로개설 현장에서 암반 절취를 위해 발파를 시행하였으며 구평동에 소재한 K 냉동공장 건물 앞 콘크리트 바닥 위에서 발파진동을 측정하였고, 진동측정에 사용된 기기는 Blastmate II DS 677이였으며 측정기간은 1996년 1월 22일부터 1996년 4월 13일까지였다. DATA 1은 통계자료를 확보하기 위한 시험발파기간으로서 1996년 1월 22일부터 2월 6일까지이며, DATA 2는 1996년 1월 22일부터 2월 16일 전반까지이고, DATA 3은 1996년 1월 22일부터 2월 16일 후반까지이며

Table 6 The measured results of blasting vibration and noise

측정 일시	사용 폭약	사용 뇌관	지발당 장약량 (kg)	진동측정결과			천공수 (hole)	장약량 (kg)	소음측정결과		
				0.5 kine 이하	0.5~1.0 kine	1 kine 초과			70 dB (A)이하	71~80 dB (A)이상	80 dB (A)이상
96.1.22 ~4.13	다이너 마이트, 에멀전	지발 뇌관	0.5~2.8	205 (91.1%)	18 (8%)	2 (0.9%)	807	1073.75	92 (40.9%)	51 (22.7%)	82 (36.4%)

DATA 4는 1996년 1월 22일부터 4월 13일까지의 종합누적데이터이다.

### 4.2 측정결과

#### (1) 진동측정 분석결과

3개월간의 발파진동과 소음을 측정 집계한 결과는 Table 6과 같으며 Table 7에서와 같이 기간 중 최대진동속도는 DATA 1에서 0.375 kine, DATA 2에서 0.991 kine, DATA 3에서 1.256 kine, DATA 4에서 0.735 kine이었다 또한 진동측정데이터를 통계적 분석의 정밀도를 높이기 위하여 유사구역을 4개의 기간별로 나누어 식 (1)을 이용하여  $K$  및  $n$  값을 회귀분석하여 Table 7에 나타내었다.

Table 7에서 보는바와 같이 시험발파기간인 DATA 1에서의  $K$ 는 83.3756,  $n$ 은 -0.848이었으며, 기반암 발파인 DATA 2의 경우  $K$ 는 956.2314,  $n$ 은 -1.256이었으며, DATA 3의  $K$ 는 2855.8101,  $n$ 은 -1.506이었다. 기간 중 종합누적치인 DATA 4에

Table 7  $K$  and  $n$  results each of accumulated data

구분	누적데이터수	$K$	$n$	최대진동치
DATA 1	85	83.3756	-0.848	0.375
DATA 2	130	956.2314	-1.256	0.991
DATA 3	172	2855.8101	-1.506	1.256
DATA 4	210	2980.4898	-1.502	0.735

대한  $K$ 는 2980.4898,  $n$ 은 -1.502였다. 이들 결과에 의하면 누적데이터가 172개인 DATA 3에서부터  $K$ 와  $n$ 의 값이 안정을 보였음을 알 수 있다(Fig 1. 참조).

#### (2) 크랙게이지 측정결과

1996년 2월 7일부터 4월 13일까지 64일간의 발파 기간 중 주변  $K$  냉동공장내, 외부 14개소에 설치한 크랙게이지 측정결과는 Table 8과 같으며, 그 중 5번 데이터가 최대변위(확대 0.47)를 나타내었고, 11번 데이터가 최소변위(수축 0.51)를 나타내었으며, 14번 데이터가 전체 평균에 가장 가까웠다.

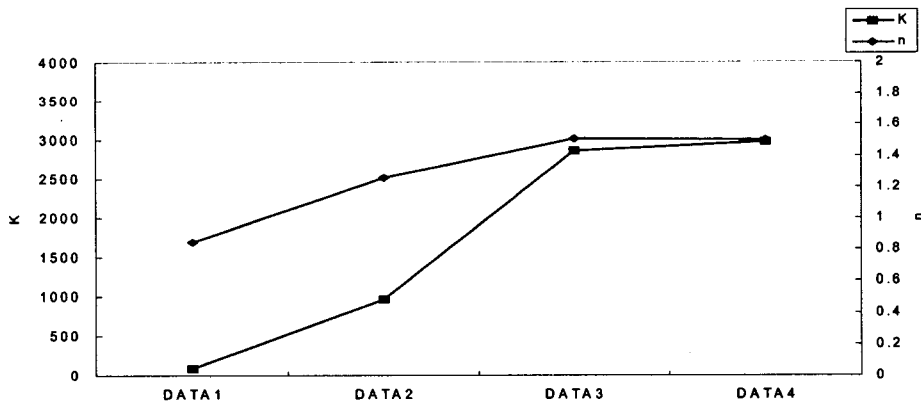


Fig. 1 The changes of  $K$  and  $n$  for periods

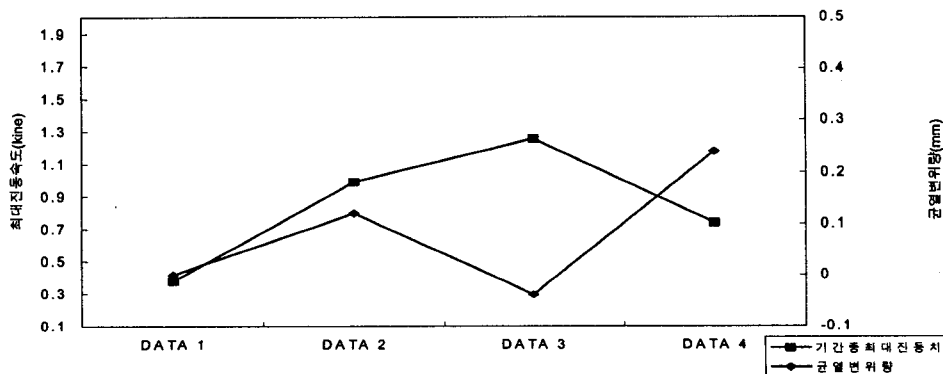


Fig. 2 The changes of maximum particle velocity and crack for periods

Table 8 The measured results of crack gage

	측정 위치	측정치 평균(mm)		변위량 (mm)	비고
		최초측정일(2/7)	최종측정일(4/13)		
1	지하 L/R 출입구	189.56	189.23	-0.33	
2	지하노조대기실	67.21*	66.94	-0.27	* 3/13 측정
3	1층 인승 E/V	74.97	74.86	-0.11	
4	2층 영업부 창고	66.95	66.98	0.03	
5	3층 회의실	172.98	173.45	0.47	
6	4층 FRONT	69.92	69.73	-0.19	
7	5층 보일러실	44.66	44.95	0.29	
8	6층 옥상	148.36	148.42	0.06	
9	7층 FRONT	53.34	53.20	-0.14	
10	8층 인승 E/V	58.83	58.49	-0.34	
11	9층 인승 E/V	34.15	33.64	-0.51	
12	10층 FRONT	61.61	61.42	-0.19	
13	11층 FRONT	50.17	50.30	0.13	
14	옥상남쪽 파라페트	203.69	203.93	0.24	2/14측정:+0.12 2/16측정:-0.04

균열변화를 대표하는 것으로 판단되는 14번 (옥상 남쪽 파라페트) 데이터를 기간 중 최대진동속도와 비교하여 Fig. 2에 도시하였다.

4.3 결과토의

총발파 225회 중 노동부 발파작업 표준안전 작업 지침의 진동안전기준 0.5 kine 이하는 205회로서 91.1%였으며, 0.5~1.0 kine은 18회로써 8%, 1.0 kine초과수치는 2회로써 0.9%였다. 또한 소음측정치는 70 dB(A) 이상이 133회로써 59.1%였으며, 80 dB(A)이상이 82회로서 36.4%였다. 그리고 균열측

정결과 측정위치 14개소 중 8개소는 오히려 수축하였고, 허용균열폭기준치 0.3 mm 초과수치는 3층 회의실 1개소뿐이었으며, 나머지 5개소는 0.03~0.29 mm에 해당하였다. 기존 이들 측정변위량을 측정장소별로 Fig. 3에 나타내었다. 그러므로 균열폭의 증가량 평균값 0.25 mm로는 구조물에 새로운 균열은 발생하지 않았고 기존균열폭의 증가량도 매우 미소하여 건물에 구조적인 결함이나 안전성 저해 등의 피해는 없는 것으로 판단되었다.

5. 결 론

부산 감천항 배후 623 공동구간 도로개설 현장에서의 안산암에 대한 3개월간의 발파진동 측정결과를 분석하고 주변 구조물의 균열에 미치는 영향에 관한 연구결과는 다음과 같다.

(1)연구대상지역은 중생대 백악기의 경상계에 속하는 안산암으로써 통계자료확보를 위한 시험발파 기간인 DATA 1에 대한  $K$ 는 83.3756,  $n$ 은 -0.848 이었고, 총 225개의 모든 발파진동 측정값에 대한 누적데이터인 DATA 4에 대한  $K$ 는 2980.4898,  $n$ 은 -1.502였다. 본 연구대상지역에서는  $K$ 와  $n$ 의 값이 안정되는 누적데이터는 130개 이상에서 나타났다.

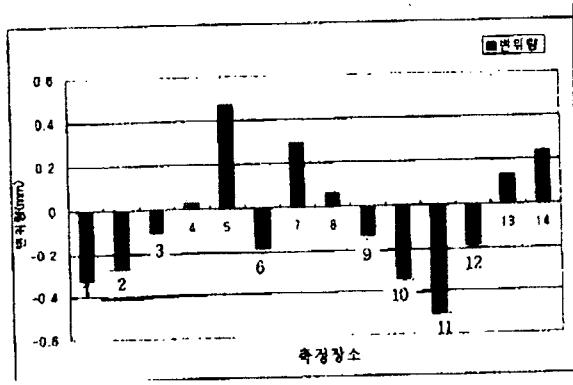


Fig. 3 The displacements for measured points

(2) 본 연구대상지역에서는 3개월간 측정회수 225 회 중 노동부 발파작업 표준안전 작업지침의 0.5 kine이하는 205회로써 91.1%였고, 0.5~1.0 kine은 18회로써 8%였으며, 1.0 kine초과수치는 2회로써 0.9%였다. 또한 소음측정치는 70 dB(A)이상이 133 회로서 59.1%였으며, 80 dB(A)이상이 82회로서 36.4%였다. 그리고 균열측정결과 균열폭의 증가량 평균값은 0.25 mm로써 허용균열폭기준치 0.3 mm보다 적었으며, 건물에 새로운 균열발생이 없었고 기존 균열폭의 증가량도 매우 미소하였으므로 건물에 구조적인 결함이나 안전성 저해 등의 피해는 없는 것으로 판단된다. 그러므로 K 냉동공장 건물의 경우 진동치가 노동부 진동안전기준 0.5 kine(균열이 있는 상태의 건물 기준)초과 수치가 20회 있었으나(최대수치 1.256 kine) 새로운 균열발생 등이 없었으므로 건물에는 피해가 없는 것으로 판단된다.

(3) 본 연구를 통하여 알게 된 안정된 K와 n 값의 산출을 위한 최소필요누적숫자에 대한 통계적인 기법에 관한 추가연구가 필요하며, 이러한 K와 n의 변화상태를 볼 때 공사진행 중 더욱 정밀한 설계로 경제성 향상 및 안전발파를 위해서는 전문기술자에 의한 발파계측관리 및 분석을 통해 작업진행 일수별로 적절한 K값의 단계별 조절적용시공이 필요한 것으로 판단된다<sup>(8)</sup>.

### 참 고 문 헌

(1) 윤우현, 1991. "콘크리트 구조물의 균열에 대하여", 콘크리트학회지, pp. 66~74.  
 (2) 최윤호, 1997. "철근콘크리트 구조물의 균열측 허용치 규정의 개선방향에 관한 연구", 한국건설안

전기술협회, pp. 29~35.

(3) 지경진, 1996. "콘크리트 균열의 발생원인과 보수보강", 토지개발기술, pp. 55~71.

(4) 도서출판 건설도서. "콘크리트의 균열조사, 보수, 보강지침", pp. 14~87.

(5) 이정인, 1991. "발파진동이 구조물에 미치는 영향평가", 서울대학교 공학연구소.

(6) 안명석, 1997. "도심지 발파에서 민원처리 사례에 대한 연구", 대한토목학회, pp. 63~69.

(7) 양형식, 1997. "측정수가 발파계수와 허용환산 거리의 산정에 미치는 영향", 한국자원공학회, pp. 320~326.

(8) 안명석, 1998. "도심지 미진동 제어발파에서 진동분석을 통한 안전발파설계에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제 18 권, 제 III-3 호, pp. 373~380.

(9) 양형식, 1999. "발파진동으로 인한 조적조가옥 피해의 임계수준평가", 한국암반공학회, Vol. 9, p. 77.

(10) 장창훈, 1996. "건설공사와 관련된 소음·진동기준 해설", 대한토목학회, p. 48.

(11) 안명석, 1998. "암반분류·파쇄공법과 계측관리", 영남건설기술교육원 건설기술자 교육교재, pp. 36,74.

(12) Charles. H. Dowding, 1992. "Blast Vibration Monitoring and Control", pp. 24~70.

(13) Cakvub, J. Konya and Edward J. Walter, 1990. "Surface Blast Design", by Prentice-Hall, Inc, pp. 240~281.

(14) Per-Anders Persson, Roger Holmberg V. and Lee, Jaimin, 1992, "Rock Blasting and Explosives Engineering". pp. 337~373.