〔論 文〕

안산암반 절취장에서 충격진동 및 소음이 건물의 균열에 미치는 영향

Effect on Building Cracks by Shock Vibration & Noise in Anedsite

*안 명 석 **김 수 석
M. S. Ahn S. S. Kim

1. 머리말

물류비용의 절감 및 운송시간 절감등을 위한 도로개설공사 및 도심지의 고층건물, 터파기 공사 등이 활발해지면서 인구밀집지역에서의 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 예정설계에 의한 시험발파를 실시하여 발파진동상수 K 및 감쇠지수 n을 산출하여 시공을 위한 실시설계를 한 후 본공사에 착공해야 할 것이며 이를 더욱 효과적이고 정확한 설계 와 정밀시공감리를 위해 기간별 상수 및 지수를 파악하고 이때 기존균열의 변화를 알기위하여 본 사례연구를 실시하였다.

2. 지질 및 주변현황

대상지역의 지질은 중생대 백악기(Cretaceous period)의 경상계(경상누층군)에 속하는 안산암으로서 적갈색 내지 청색을 띠고 있는 일축압축강도 2081.3kg/cm^2,삼축압축강도 2781.23Kg/cm^2, 현지 암반의 탄성파속도 2.627km/sec, 시추코아의 탄성파속도 5.87km/sec , 균열계수(Cr) 0.55의 경암 암반으로 이루어져 있다. 또한 현장은 도로개설을 위한 암반발파현장으로서 근접된 보안대상건물로는 구평동 산 83번지와 103번지 등에 산재한 제1종 보안건물인 시가지 주택과 제4종 보안물건인 냉동공장 등이 43~50m 지점에 위치해 있다. 사용한 화약류는 GD(Gelatine Dynamite) 및 Emulsion 폭약을 사용하였으며, ED(Electric Detonator) 및 MSD(Milli Second Detonator) 뇌관을 사용한 제어안전발파 내지 소발파 공법을 적용하였으며[10] 발파진동 측정기는 Blastmate II DS-677 Instantel을 사용하였다.

3. 진동 및 균열의 허용치

가. 충격진동허용치

(1) 충격(발파)진동 이론식

발파진동의 크기를 결정하는 변수로는 화약 종류, 지발당 장약량, 천공간격, 저항선의 길이 등과

* 동서대학교 응용공학부 겸임교수, 대한화약기술학회 영남지회 회장,
E-mail : AMSPEOFF@chollian.net TEL : 053-756-1688, -51-243-2593
** 동서대학교 건설공학과 교수

같은 발파관련 변수와 진동을 전달하는 암반의 종류, 층의 두께, 지반내의 탄성파 전달속도, 밀도 등의 지반관련 변수가 있다. Hendron, Devine, Oriad 등은 이러한 발파현장에 관련된 변수를 차원해석하여 지상구조물의 피해영향의 척도가 되는 지반의 진동속도를 지발당 장약량과 발파원으로부터의 거리를 주요변수로 하는 경험식을 (1.1)과 같이 나타내었다.[7]

$$V = K\left(\frac{R}{W^b}\right)^{-n} \text{----------(1.1)}$$

V : 최대진동속도
K : 발파진동상수
R : 발파원으로부터의 거리
W : 지발당 장약량
b : 근거리 1/3, 원거리 1/2
n : 감쇠지수

여기서, $R/W^b = SD$(Scaled Distance)라고 한다.

환산거리식의 두 변수를 제거하고 지수계수를 달리하면 (1.2)식이 된다.

Table 1은 각각의 지질조건과 발파조건 등이 일정하지 않아 일률적으로 비교할 수 없지만 현재 국내에서의 경험적인 발파진동식 결정 현황을 파악하는데 유용할 것이다.[5]

$$V = KW^{\alpha}L^{\beta} \text{----------(1.2)}$$

(2) 진동허용기준

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 발파진동속도에 비례한다고 볼 수 있다. 즉, 구조물이 받는 피해의 정도는 발파진동속도에 비례한다고 할 수 있

Table 1. Examples of estimated blasting vibration coefficients

Researcher	Rock type	Pattern of blast	Type of explosive	SD	K, n
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
임한욱(1992)	Gneiss sandstone granite	Surface blast Tunnel blast Surface blast Center cut (1 free face) Bench blast (2 free face)	Gelatine dynamite & Surry	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
안명석(1998)	Purple Siltston Andesite	Bench blast Bench blast	Emulsion Explosive 1/2 Gelatine dynamit 1/2		K_{95}=114.8 n=-1.475 K_{95}=298.0 n=-1.502

다. 각 나라의 진동속도 기준은 다음과 같으며, 우리나라의 경우 최근 연구결과에 의하면 변형을 일으킨 진동속도는 최소한 10cm/sec 이상이 였다고 보고하였다.[8] 미국의 경우 Table 2, 독일의 경우 Table 3, 한국의 경우 Table 4에 나타내었다.

Table 2. Construction safety standards of USBM and Dupont

최대입자속도(cm/sec)	피해정도
30.5 19.3 13.7 7.6 5.0	터널암반의 낙석 유발 회벽에 커다란 피해 회벽이 갈라지기 시작 밀폐지역발파의 규제치 미광무국이 추천한 안전한계
1980년에 Siskind는 40Hz이하의 낮은 주파수에서는 1.2cm/sec의 진동수준에도 건물에 피해를 줄 수 있다고 주장	

Table 3. Allowable vibration standard of Germany(DIN 4150)

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

진동이 건물에 미치는 영향을 나타내는 평가기준으로는 독일규격이 주로 쓰이고 있으며, 표 3은 1986년에 DIN 4150을 개정한 기준이며, 여기서 허용기준치는 진동의 수직, 접선과 진행성분의 세 방향의 벡터합으로 표시한 값이다.[5]

Table 4. 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

Table 4는 우리나라의 노동부 발파작업 표준안전작업지침이며 서울, 부산, 대구, 광주, 대전, 인천 지하철 건설시 적용되고 있는 허용기준치이다.[9] 위의 자료들을 종합한 결과 당 현장의 경우 진동안전기준은 0.5cm/sec(kine)이 적합한 것으로 판단되어 이를 기준으로 적용하였다.

나. 균열 허용치

(1) 구조물에서의 균열발생 원인[1,3]

일반적으로 철근 콘크리트 구조물의 설계시 부재의 인장축은 균열이 형성된다고 가정하고 모든 인장력을 철근이 부담하도록 설계한다. PS 콘크리트 구조물에서는 인장측을 최대로 긴장하면 균열발생을 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 등 시공상의 원인
- 철근 부식 및 동결·융해현상
- 화재 및 가스 폭발, 차량충돌
- 충격 진동 및 소음

(2) 균열폭 허용값[2,4]

균열폭이라 하면 균열이 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 판단하는데 이용되는 가장 중요한 요소이며, 일반적으로 콘크리트 표면에서 균열방향에 대하여 직각으로 측정한 폭을 말한다. 연속된 하나의 균열이라 해도 위치에 따라 폭이 다른 것이 보통이나 보수, 보강의 필요여부 판단자료로 중요한 것은 최대 균열폭이다. 이러한 균열폭의 추정은 crack scale, strain gage

Table 5. Allowable crack width of countries

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

Table 6. Blasting vibration and noise measured results

측정 일시	사용 폭약	사용 뇌관	지발당 장약량 (kg)	진동측정결과			천공수 (hole)	장약량 (kg)	소음측정결과		
				0.5kine 이하	0.5~1.0 kine	1kine 초과			70dB (A)이하	70~80dB (A)	80dB (A)이상
96.1.22 ~4.21	다이너 마이트, 에멀젼	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%)

등의 균열 측정기를 사용하여 균열 방향에 직각으로 측정하고, 수평 혹은 수직방향이 필요한 경우에는 그 값을 균열방향의 각도로 보정한다.

콘크리트 구조물의 균열 허용치는 다음의 표 5와 같이 보통의 기상조건과 일반적인 콘크리트 구조물의 경우 각국의 균열폭 허용값을 수치로 비교해 볼 때 일본, 영국, 구소련, 유럽공동체는 0.3mm, 한국, 미국, 프랑스, 스웨덴 등이 0.4mm로 규정하고 있다. 본 연구에서는 선진국의 최다기준인 0.3mm를 균열 폭 허용값으로 설정하였다.

4. 데이터 수집방법과 분석결과

가. 충격 진동 측정방법

사례연구지역에서 암절취를 위한 발파를 실시하였으며 이때 43~50m 떨어진 K 냉동공장 건물 앞 콘크리트 바닥위에서 발파에 따른 충격진동을 측정하

였고, 진동측정에 사용된 기기는 Blastmate II DS 677을 사용하였고, 측정기간은 1996년 1월 22일부터 1996년 4월 13일까지였다.

나. 측정결과 및 분석

(1) 진동측정 분석결과

3개월간의 발파충격진동과 소음을 측정한 결과는 Table 6과 같으며 통계적분석의 정밀도를 높이기 위하여 유사구역을 4개의 기간별로 나누어 (1.1)식을 이용하여 K 및 n값을 회귀분석하여 Table 7에 나타내었다.

Table 7. K and n results each of accumulated data

DATA	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

Table 7에서 보는바와 같이 시험발파기간인DATA 1에서의 K는 83.3756, n은 -0.848이었다. 기간 중 종합누적치인 DATA 4에 대한 K는 2980.4898, n은 -1.502였다. 이들 결과에 의하면 누적데이터가 172개인 DATA 3에서부터 K와 n의 값이 안정을 보였음을 알 수 있다.

(2) 균열 변화의 측정결과

1996년 2월 7일부터 4월 13일까지 3개월간의 발파기간 중 발파현장 주변의 K 냉동공장내, 외부 14개소에 설치한 크랙게이지 측정결과는 Table 8과 같으며, 그 중 5번 데이터가 최소변위(확대 0.47)를 나타내었고, 10번 데이터가 최소변위(수축 0.34)를 나타내었으며, 14번 데이터가 전체 평균에 가장 가까웠다.

Table 8. Crack gage measured results

측정 위치	측정치 평균(mm)		변위량 (mm)	비고
	최초측정일(2/7)	최종측정일(4/4)		
지하 L/R 출입구	189.56	489.23	-0.33	
지하노조대기실	67.21*	66.94	-0.27	* 3/13 측정
1층 인승 E/V	74.97	74.86	-0.11	
2층 영업부 창고	66.95	66.98	0.03	
3층 회의실	172.98	173.45	0.47	
4층 FRONT	69.92	69.73	-0.19	
5층보일러실	44.66	44.95	0.29	
6층 옥상	148.36	148.42	0.06	
7층 FRONT	53.34	53.20	-0.14	
8층 인승 E/V	58.83	58.49	-0.34	
9층 인승 E/V	34.15	33.64	-0.51	
10층 FRONT	61.61	61.42	-0.19	
11층 FRONT	50.17	50.30	0.13	
옥상남쪽 파라페트	203.69	203.93	0.24	2/14측정: +0.12 2/16측정: -0.04

다. 결과 분석

총발파 225회 중 노동부 발파작업 표준안전지침의 진동안전기준 0.5kine 이하는 205회로서 91.1%였으며, 0.5~1.0kine은 18회로써 8%, 1.0kine 초과수치는 2회로써 0.9%였다. 그리고, 균열측정결과 측정위치 14개소 중 8개소는 오히려 수축하였고, 허용균열폭기준치 0.3mm 초과수치는 3층 회의실 1개소뿐이었으며, 나머지 5개소는 0.03~0.29mm에 해당하였다. 그러므로 균열폭의 증가량 평균값 0.25mm로는 구조물에 새로운 균열은 발생하지 않았고 기존균열폭의 증가량도 매우 미소하여 건물에 구조적인 결함이나 안전성 저해 등의 피해는 없는 것으로 판단되었다.

5. 맺음말

부산 지역의 안산암에 대한 3개월간의 발파진동 측정결과를 분석하고 주변 구조물의 균열에 미치는 영향에 관한 연구결과는 다음과 같다.

• 사례 연구대상지역은 중생대 백악기의 경상계에 속하는 안산암으로써 통계자료 확보를 위한 시험발파 기간인 DATA 1에 대한 K는 83.3756, n은 -0.848이었고, 총 225개의 모든 발파진동 측정값에 대한 누적데이터인 DATA 4에 대한 K는 2980.4898, n은 -1.502였다. 본 연구대상지역에서는 K와 n의 값이 안정되는 누적데이터는 130개 이상에서 나타났다.

• 3개월간의 측정회수 225회 중 노동부 발파작업 표준안전지침의 0.5kine이하는 205회로써 91.1%였고, 0.5~1.0kine은 18회로써 8%였으며, 1.0kine초과 수치는 2회로써 0.9%였다. 또한 소음측정치는 70dB(A)이상이 133회로서 59.1%였으며, 80dB(A)이상이 82회로서 36.4%였다. 그리고 균열측정결과 균열폭의 증가량 평균값은 0.25mm로써 허용균열폭 기준치 0.3mm보다 적었으며, 건물에 새로운 균열발생이 없었고 기존 균열폭의 증가량도 매우 미소하였으므로 건물에 구조적인 결함이나 안전성 저해 등의 피해는 없는 것으로 판단된다. 그러므로 K 내동공장건물의 경우 진동치가 노동부진동안전기준 0.5kine(균열이 있는 상태의 건물기준) 초과수치가 20회 있었으나(최대수치 1.256kine)새로운 균열발생 등이 없었으므로 건물에는 피해가 없는 것으로 판단되었다.

• 본 사례 연구를 통하여 안정된 K와 n 값의 산출을 알 수 있으며 K와 n의 변화상태를 볼 때 공사 진행 중 더욱 정밀한 설계로 경제성 향상 및 안전발파를 위해서는 전문기술자에 의한 발파계측관리 및 분석을 통해 작업진행 일수별로 적절한 K값의 단계별 조절적용시공이 필요한것으로 판단되었다.

• 추; 화약계의 대부이신 碧山 허진박사님께서 지난 2월 24일 미국 ISE세미나 참석 출장중 별세하셨다. 개인적으로는 1976년 관훈동 학회에서 첫 만남 이후 2000년 1월 29일 한국화약기술사회 총회만남이 이생에서의 마지막이 되었다. 그 분의 신앙인으로써 기술자로써 완고한 성품의 추진력으로 인해 화약계에 미친 엄청난 영향은 어느 누구도 부인할 수 없다. 자! 이제 화약계의 제 2세대의 새로운 출발을 위해 협회, 연합회, 기술사회, 학계, 산업계 모두 다시 지혜를 모아 힘차게 나아갑시다!

참고문헌

1. 윤우현(1991). "콘크리트 구조물의 균열에 대하여", **콘크리트 학회지**, pp. 66-74.
2. 최윤호(1997). "철근콘크리트 구조물의 균열측 허용치 규정의 개선방향에 관한 연구", 한국건설안전기술협회, 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. 안명석(1998). "도심지 미진동 제어발파에서 진동분석을 통한 안전발파설계에 관한 연구", **대한토목학회 논문집**, 제18권, 제III-3호, pp.373-380
8. 양형식(1999). "발파진동으로 인한 조적조 가옥 피해의 임계수준평가",**한국암반공학회**,vol.9, pp.77
9. 장창훈(1996). "건설공사와 관련된 소음·진동기준 해설", **대한토목학회**, pp.48
10. 안명석(1998). "암반분류·파쇄공법과 계측관리." 영남건설기술교육원 건설기술사 교육교재. pp.36, 74
11. Charles. H. DOWDING(1992)."Blast vilbration monitoring and control. pp.24-70
12. Calvin. J. konya and Edward J. Walter(1990). "Surface Blast Design", by Prentice-Hall.Inc, pp.240-281