화약·발파(대한화약발파공학회지)
제32권 제2호, 2014년 9월, pp. 9~15

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 32, No. 2, 2014, pp. 9-15
Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

장약공 상태에 따른 콘크리트 기둥의 진동 전파 특성

노유송[1)], 김정규[1)], 고영훈[1)], 신명진[1)], 양형식[1)*]

Propagation Characteristics of Blast Vibration Caused by Different Loading Conditions in the Concrete Column

You-Song Noh, Jung-Kyu Kim, Young-Hun Ko, Myeong-Jin Shin, Hyung-Sik Yang

Abstract A number of concrete columns were blasted using TNT to study the propagation characteristics of ground vibration caused by different loading conditions in the blast hole of the columns. For each loading condition, peak particle velocity measured on the ground was analyzed. The regression analysis revealed that the use of square blast hole results in smaller vibration magnitude and faster decaying time than the case with circular blast hole. The analysis also showed that the blasting in the closed hole leads to larger vibration magnitude than the blasting in the hole penetrating the column, whereas the difference in vibration decaying time is negligible.

Key words Blasting hole, TNT, Concrete column, Regression analysis

초 록 콘크리트 기둥 발파 시 장약공 상태에 따른 지반 진동의 전파 특성을 확인하기 위해 몇 가지 기둥 구조물을 제작하였고, 각 기둥 구조물에 설치된 장약공의 상태를 달리하여 TNT로 발파하며 진동을 측정하였다. 회귀분석 결과, 사각 장약공이 원형 장약공보다 진동의 크기가 작고 감쇠가 더 빨랐으며 관통된 장약공보다 폐쇄된 장약공에서 진동의 크기는 크고 감쇠는 비슷하였다.

핵심어 장약공, TNT, 콘크리트 기둥, 회귀분석

1. 서 론

현대의 발파는 발파현장 인근의 밀집된 도심환경으로 인해 고려해야 할 변수가 많아졌다. 진동, 소음, 먼지 등과 같은 환경문제와 주변 구조물에 대한 발파진동 전달 문제가 가장 크게 고려되고 있으며, 동시에 발파의 효율성 및 안정성까지 고려해야 한다. 안정화된 발파진동 조절은 발파재해와 관련된 변수로서 도심지 밀집지역 공사의 경우 가장 우선으로 고려되어야 할 사항이다.

일반적으로 발파해체 때의 지반진동은 발파에 의한 발파진동과 구조물의 낙하에 의한 충격진동의 형태를 보이며(Williams, 1990; Dowding, 1994), 수치해석을 이용한 구조물 발파해체 시 지반 진동 모사(최 외, 2009)와 모형 구조물의 장전층을 달리한 발파진동과 충격진동 해석 실험(김 외, 2002), 사례분석 및 모형시험을 통한 낙하충격진동에 대한 예측 기법이 연구되고 있다(임과 임, 2004).

본 연구에서는 주로 건물을 구성하는 콘크리트 기둥에 대하여 장약공 상태에 따른 지반진동의 전파 특성에 대해 고찰하였다. 먼저 현지 지반의 진동 전파 특성을 파악하기 위해 지반발파를 실행하였다. 그 후 각각의 콘크리트 기둥을 제작하여 기둥에 설치된 장약공의 모양, 위치, 폐쇄 여부를 달리하여 실험을 진행하였다. 측정된 데이터로 회귀분석하여 진동 추정식을 도출하고 비교하여 장약공의 모양 및 폐쇄 여부,

[1)] 전남대학교 에너지자원공학과
* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr
접수일 : 2014년 9월 1일
심사 완료일 : 2014년 9월 15일
게재 승인일 : 2014년 9월 22일

(a) 굴착 (b) 파이프 매설 및 복토 (c) 발파 전

그림 1. 지반발파.

위치에 따른 진동 전파 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 지반발파

콘크리트 기둥 발파에 앞서 실험 현장의 지반진동 전파 특성을 확인하기 위하여 TNT 카트리지 0.72~2.88kg을 사용하여 총 3회 발파를 시행하였다. 그림 1과 같이 굴착기로 지반을 굴착 후 파이프를 매설하고 다시 복토하는 방법으로 실험하였다.

지반을 천공하는 방법이 아닌 굴착 후 다시 복토하는 방법으로 지반발파를 할 경우 발생하는 진동의 정확도가 떨어질 수 있다. 그래서 그림 2와 같이 장전 파이프를 구덩이 벽면에 붙여서 매설하고 복토 반대 방향으로 진동 계측기를 설치하여 지반 교란으로 인한 진동 전달의 왜곡을 최소화하였다.

2.2 콘크리트 기둥 발파

실험재료

콘크리트 기둥

콘크리트용 시멘트로는 콘크리트 품질기준(KS L 5201)에 규정한 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 내구성 및 강도 향상을 위하여 한국산업규격 콘크리트용 화학혼화제 규정(KS F 2560)에 적합한 AE감수제를 사용하였다.

전색재료

전색재료는 구입이 용이하고 주변에서 쉽게 얻을 수 있는 모래를 이용하였다.

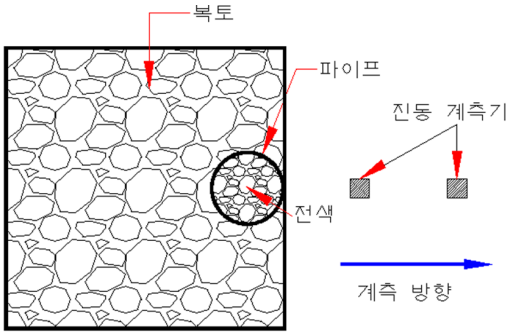


그림 2. 장전 파이프 설치 위치.

폭약

본 실험에서는 위력이 일정하여 기준폭약으로 사용되고 있는 TNT(tri-nitro-toluene) 카트리지를 이용하여 실험하였다.

실험부재 설계

TNT를 이용한 콘크리트 장약량 공식은 콘크리트 파괴 장전공식(Headquarters Department of The ARMY, 2007)을 사용하였다.

$$P = 16R^3KC \tag{1}$$

여기서, R은 파괴반경(m), K는 물질계수, C는 전색계수, P는 폭약량(kg)이다.

압축 부재인 콘크리트 기둥의 철근비는 콘크리트 구조 설계 기준인 0.04 이하로 고려하여 주철근의 지름은 13mm 이상, 철근의 중심간격은 20cm로 배근하였다. 상부 기둥은 90cm(폭)×60cm(길이)×300cm(높

그림 3. 콘크리트 기둥 부재.

이)이며, 하부 기둥 기초는 290cm(폭)×60cm(길이)×100cm(높이)로 제작하였다. 28일간의 양생 기간을 걸쳐 콘크리트 설계기준강도 25MPa를 맞추었고, 상부 기둥에 모양, 위치, 폐쇄 여부를 달리한 장약공을 설치하였다(그림 3). 표 1은 파괴반경에 대한 물질계수(K)를 나타낸 것이며, 실험에 사용된 모든 콘크리트 기둥의 파괴반경(R)은 0.45, 물질계수(K)는 0.96을 적용하여 폭약량을 1.36kg으로 산정하고 모래로 완전 전색하여 총 4회의 실험을 시행하였다(표 2).

표 1. 물질계수(K)

물질	파괴반경(R)	물질계수(K)
보통토양	모든 치수	0.07
상태가 나쁜 석조물, 암석 양질의 목재 및 토질	1.5 m 미만	0.32
	1.5 m 이상	0.29
양호한 보통 콘크리트, 암석	0.3 m 이하	0.88
	0.3 초과 ~ 0.9 미만	0.48
	0.9 이상 ~ 1.5 미만	0.40
	1.5 이상 ~ 2.1 미만	0.32
	2.1 이상	0.27
고강도 콘크리트, 1급 석조물	0.3 이하	1.14
	0.3 초과 ~ 0.9 미만	0.62
	0.9 이상 ~ 1.5 미만	0.52
	1.5 이상 ~ 2.1 미만	0.41
	2.1 이상	0.35
철근 콘크리트 (콘크리트만 파괴, 철근은 고려되지 않음)	0.3 이하	1.76
	0.3 초과 ~ 0.9 미만	0.96
	0.9 이상 ~ 1.5 미만	0.80
	1.5 이상 ~ 2.1 미만	0.63
	2.1 이상	0.54

표 2. 각 Case별 폭약량 및 장약공의 상태

구 분	Case	폭약량(kg)	장약공의 상태
지반발파	A	0.72	-
	B	1.44	-
	C	2.88	-
콘크리트 기둥 발파	D	1.36	사각, 폐쇄, 높이 30cm
	E	1.36	원형, 관통, 높이 30cm
	F	1.36	원형, 폐쇄, 높이 30cm
	G	1.36	사각, 폐쇄, 높이 75cm

3. 실험결과

그림 4는 폭약량 2.88kg을 사용하여 지반발파를 시행한 결과 사진이다. 지반발파 시 발파 전 굴착했던 깊이만큼 누두공(crater)이 형성되었고, 누두 반지름은 굴착했던 넓이보다 크게 나타났다. 콘크리트 기둥 발파 시 장약공의 모양, 폐쇄 여부가 다른 기둥은 유사한 파괴양상을 보였으나(그림 5~7), 장약공의 높이가 다른 기둥은 파괴반경이 넓게 나타났다(그림 8).

그림 4. 지반발파 후 누두공 형상.

그림 5. Case D의 발파 결과(사각, 폐쇄, 높이 30cm).

그림 6. Case E의 발파 결과(원형, 관통, 높이 30cm).

4. 진동영향 평가

4.1 회귀분석

각각의 실험에서 계측한 진동 데이터로 회귀분석하여 노천발파에서 발파진동의 전파 특성을 가장 잘 모사할 수 있는(양형식, 1992) 자승근 환산거리 추정식을 도출하였다(표 3). 표 3에서 지반발파 회귀식은 국토교통부의 진동추정식(양과 최, 2006)과 초기진동속도 비교 시 5% 미만으로 유사하였으나, 콘크리트

그림 7. Case F의 발파 결과(원형, 폐쇄, 높이 30cm).

그림 8. Case G의 발파 결과(사각, 폐쇄, 높이 75cm).

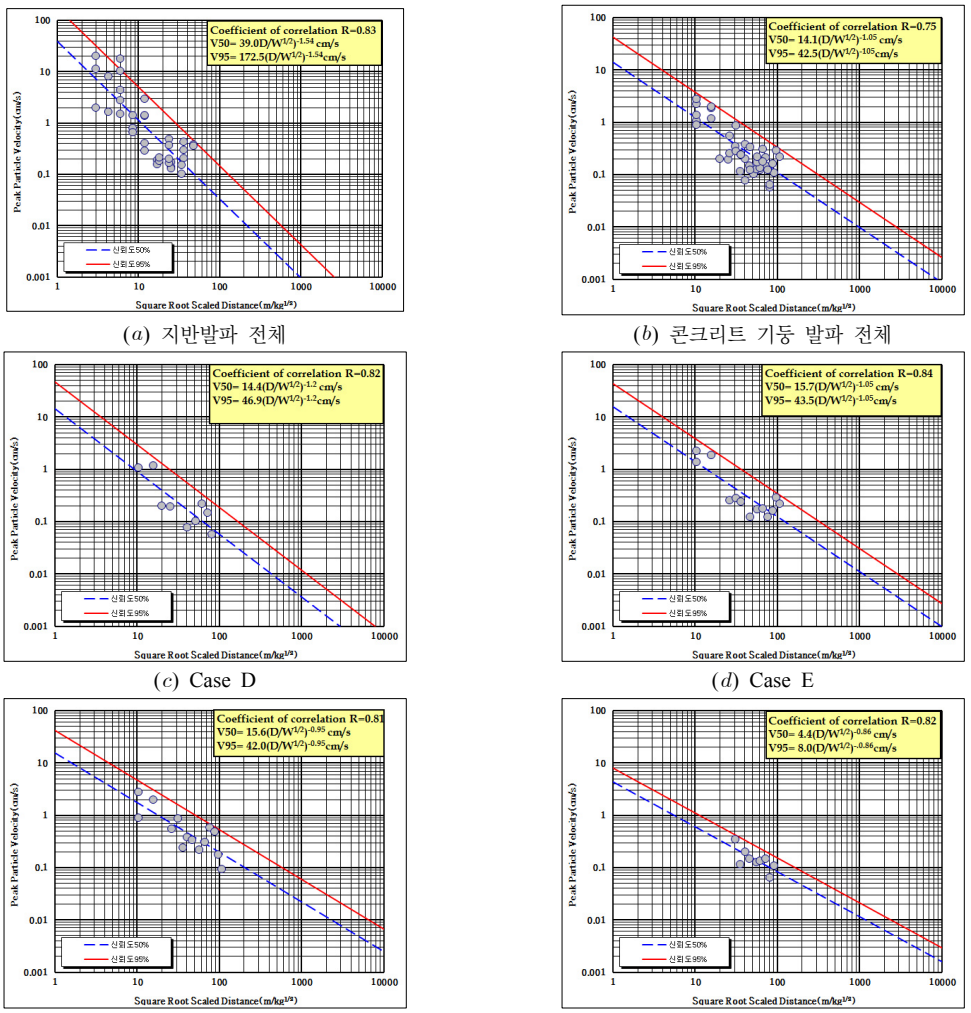
표 3. 각 Case별 회귀분석 결과

구분	Case	자승근 회귀 분석식 (cm/sec)	상관계수 (R)
지반발파	A	$V_{95\%} = 345.8(SD2)^{-1.72}$	0.94
	B	$V_{95\%} = 62.7(SD2)^{-1.66}$	0.95
	C	$V_{95\%} = 134.7(SD2)^{-1.88}$	0.95
	전체	$V_{95\%} = 172.5(SD2)^{-1.54}$	0.83
콘크리트 기둥 발파	D	$V_{95\%} = 46.9(SD2)^{-1.20}$	0.82
	E	$V_{95\%} = 43.5(SD2)^{-1.05}$	0.84
	F	$V_{95\%} = 42.0(SD2)^{-0.95}$	0.81
	G	$V_{95\%} = 8.0(SD2)^{-0.86}$	0.82
	전체	$V_{95\%} = 42.5(SD2)^{-1.05}$	0.75

기둥 발파는 지반발파보다 K값과 n값이 모두 작은 양상을 보였다. 즉 근거리에서 진동 크기가 작고 감쇠가 느린 경향을 보였다.

4.2 진동 회귀분석 그래프

그림 9는 지반발파와 콘크리트 기둥 발파의 진동추정식 회귀분석 그래프이다. 그림 9에서 콘크리트 기둥 발파를 나타내는 그래프((b)~(f))가 지반발파를 나타내는 그래프(a)에 비해서 기울기가 더 완만하다. 또 절편으로 나타나는 K값도 더 커서 지반에서 발파하는 경우에 진동의 크기와 감쇠가 크다는 것을 확인하였다.



(a) 지반발파 전체 (b) 콘크리트 기둥 발파 전체

(c) Case D (d) Case E

(e) Case F (f) Case G

그림 9. 각각의 실험 Case에 따른 회귀분석 그래프.

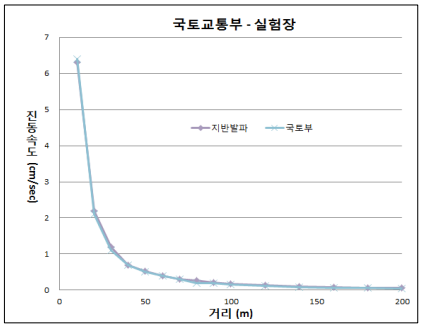


그림 10. 국토교통부와 실험장의 진동추정식의 진동감쇠곡선.

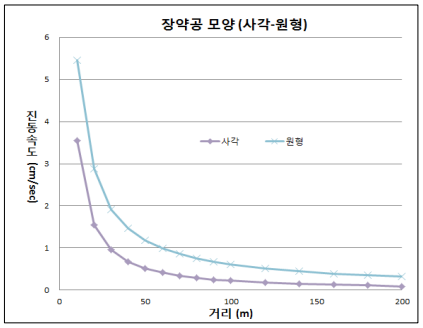


그림 11. 장약공의 모양 변화에 따른 진동감쇠곡선.

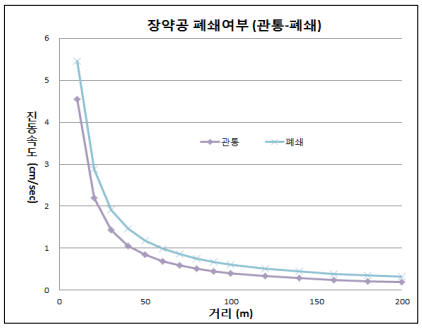


그림 12. 장약공의 폐쇄 여부에 따른 진동감쇠곡선.

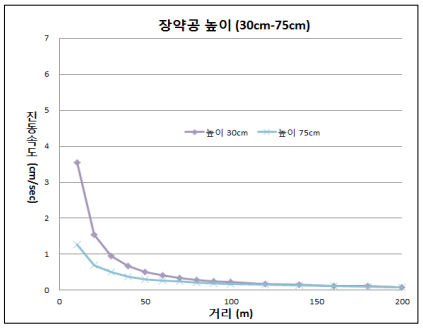


그림 13. 장약공의 높이에 따른 진동감쇠곡선.

4.3 거리 별 진동감쇠 그래프

각각의 지반 진동 전파 특성을 확인하기 위하여 동일 약량을 사용하여 이격거리별 진동의 감쇠 양상을 그래프로 나타내었다. 국토교통부와 실험 현장의 진동 감쇠 양상은 매우 유사하게 나타났다(그림 10). 장약공의 모양을 달리하였을 경우 원형 장약공에서 초기진동의 크기가 크게 나타났으며 감쇠가 적게 나타났다(그림 11). 장약공의 폐쇄 유무를 달리하였을 경우 폐쇄된 장약공의 초기진동의 크기가 높았으며 감쇠 경향이 비슷하였다(그림 12). 장약공의 높이를 달리한 결과 장약공의 위치가 높으면 초기진동이 낮게 나타났다(그림 13).

5. 결 론

본 연구는 장약공의 상태에 대한 진동 전파 특성을 확인하기 위해 지반발파를 통해 실험 현장의 지반 진동 전파 특성을 확인하였다. 그 후 장약공의 모양, 폐쇄 여부, 높이를 달리하여 동일약량으로 콘크리트 기둥 발파를 진행하였고, 획득된 진동 데이터로 자승근 환산거리 추정식을 도출한 뒤 이격거리별 진동감쇠 그래프를 비교 분석하였다. 그 결과 실험 현장에서 실시한 지반발파는 국토교통부 진동 추정식과 진동 감쇠 정도가 유사하게 나타났고, 지반발파는 콘크리트 기둥 발파에 비해 진동의 크기와 감쇠 정도가 크게 나타났다. 장약공의 모양, 폐쇄 여부, 높이를 각각 비교한 결과 원형 장약공에서 초기진동이 크고, 사각 장약공에서 큰 감쇠를 보였으며 폐쇄된 장약공에서 초기진동은 크지만 비슷한 감쇠를 보였다. 또한, 장약공이 높으면 초기진동이 낮음을 확인하였다.

참고문헌

1. 김승곤, 박훈, 양형식, 2002, 구조물 발파해체로 인한 지반진동의 해석 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 12, No, 3, pp. 210-219.
2. 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 2, No. 2, pp. 199-211.
3. 양형식, 최미진, 2006, 암발파 잠정지침 발파진동 추

정식의 타당성, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 189-193.
4. 임대규, 임영기, 2004, 발파해체시 낙하충격진동 예측에 관한 연구, 화약 · 발파, 대한화약발파공학회, Vol. 22, No. 3, pp. 43-55.
5. Dowding, C. H., 1994, Ground motions and air-blast effects of explosive demolition of structures, J. Construction Engineering and Management, 120.3, 838-856.
6. Headquarters Department of The ARMY, 2007, FM3-34.214(FM 5-250) Explosives And Demolitions, pp. 3-11-20.
7. Williams, G. T., 1990, Explosive demolition of tall buildings on inner city area, Mun, Engr, 7, August, 163-173.

노 유 송
전남대학교 대학원
에너지자원공학과 석사과정

Tel: 062-530-0824
E-mail: nomoosong@hanmail.net

김 정 규
전남대학교 대학원
에너지자원공학과 박사과정

Tel: 062-530-0824
E-mail: evangelong@hanmail.net

고 영 훈
전남대학교 대학원
에너지자원공학과 박사과정

Tel: 062-530-0824
E-mail: dddd8401@nate.com

신 명 진
전남대학교 대학원
에너지자원공학과 석사과정

Tel: 062-530-0824
E-mail: mjshinetm@naver.com

양 형 식
전남대학교
에너지자원공학과 교수

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr