

중첩모델링자료를 활용한 발파 동해석 기법에 관한 연구

박지우¹⁾, 강추원^{2)*}, 고진석²⁾, 장호민¹⁾

A Study on the Blasting Dynamic Analysis Using Superposition Modeling Data

Ji-Woo Park, Choo-Won Kang, Jin-Seok Go, Ho-Min Jang

Abstract Since blast-induced vibration may cause serious problem to the rock mass as well as the nearby structures, the prediction of blast-induced vibration and the stability evaluation must be performed before blasting activities. Dynamic analysis using measurement vibration waveform which is measured by bore hole blasting or test blasting has been increased recently in order to analyze the effect of the blast-induced vibration. The waveform made by bore hole blasting has the similar vibration level and duration to those the waveform of sing hole has. However, there can be a little difference in attenuation characteristics with the blast induced vibration waveform in the field. Through the superposition modeling of single hole waveform, I obtained the vibration waveform on the blasting condition changes and conducted dynamic analysis using this waveform in this study.

Key words Dynamic analysis, Vibration waveform, Superposition modeling

초 록 발파진동은 암반 및 인근 구조물에 심각한 문제를 야기할 수 있기 때문에 시공 전 발파진동의 예측과 안전성 평가가 반드시 선행되어야 한다. 최근 발파진동 영향평가를 위하여 시추공이나 시험발파를 통해 획득한 실측진동파형을 이용한 동적수치해석이 증가하고 있다. 하지만 시추공 발파 진동파형은 실제 발파현장에서 측정된 진동파형과 진동수준이나 진동지속시간에서 다소 차이가 있으며 이는 단일공 파형과 유사한 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 단일공 파형의 중첩모델링을 통해 발파조건 변화에 따른 진동파형을 획득하고 이 파형을 이용한 동적수치해석을 수행하였다.

핵심어 동적수치해석, 진동파형, 중첩모델링

1. 서 론

최근 단일공 파형의 중첩모델링을 이용한 발파진동추정식을 산출한 발파진동의 영향 평가 방법^{1,2)}과 다양한 동적수치해석기법이 연구되면서 설계단계에서 발파에 대한 영향을 사전에 검토하여 현장여건에 적합한 발파공법을 산정하는데 많은 도움을 주고 있다. 이중 시추공발파를 활용한 발파동적수치해석은 현장의 지질조건을 잘 반영하고 실제 발파에서 화약력이 암반에 작용하는 크기만큼의 하중을 작용시킨다는 장점이 있으나 단일공 수준의 해석을 수행한다는 단점을 가지고 있다.

또한 시험발파 실측파형을 이용한 발파동해석기법^{3,4)}의 경우 실규모의 시험 발파가 먼저 이루어져야 하기 때문에 설계단계에서 발파에 의한 영향을 검토하는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 단일공 파형의 중첩모델링을 통해 발파공수 증가와 지연시차에 따른 진동파형으로 변환시켜 실규모 발파를 실시했을 때와 동일한 진동 지속시간을 가지는 진동파형을 생성하고 이를 발파하중으로 적용한 동적수치해석법에 대해 연구하였다.

2. 단일공시험발파

2.1 단일공 시험발파 조건

본 연구 지역은 무안군 일로읍 청호리 일대에 건설 중인 ○○대교 시점구간의 사면 절토구간으로서 단일공파형 획득을 위하여 총 2회에 걸쳐 발파를 실시하였다.

다음 Table 1은 각 회차별 발파제원을 정리한 것이다.

¹⁾ 조선대학교 자원공학과

²⁾ 조선대학교 자원공학과 교수

* 교신저자 : cwkang@mail.chosun.ac.kr

접수일 : 2008년 7월 25일

심사 완료일 : 2008년 8월 22일

제재 확정일 : 2008년 8월 25일

Table 1. Applied design parameter for some of the shots

No.	1	2
Explosive	Emulsion explosive ($\phi 50$ mm)	
Detonator	MS or LP Detonator	
Diameter (mm)	$\phi 75$ mm	
Drilling Length (m)	3.2	
Burden (m)	1.2	
Spacing (m)	1.4	
Charge per delay (kg)	1.6~3.2	3.2
Number of holes	21	7

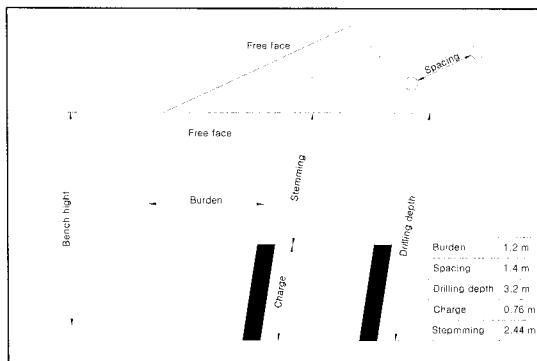
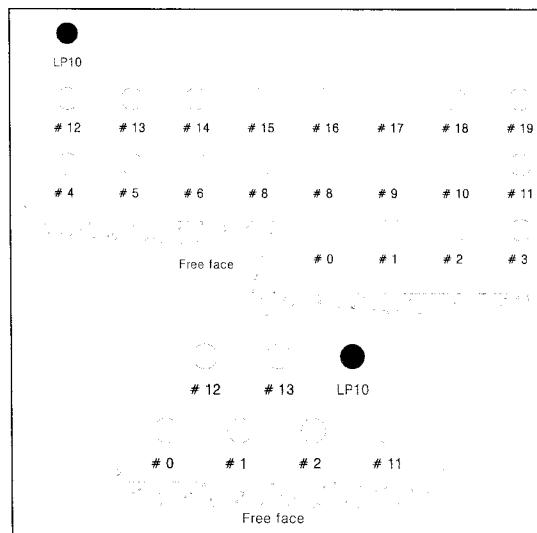
**Fig. 1.** Blasting Pattern**Fig. 2.** Firing times for a Pattern

Figure 1~2는 발파 패턴 및 기폭패턴을 도시한 것이다.

2.2 단일공 시험발파 분석 결과

본 연구지역의 각 성분별 발파진동예측식은 다음 식 (1), (2), (3)과 같다.

Vertical component

$$V = 644.6 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.38} \quad (r=0.96) \quad (1)$$

Transverse component

$$V = 185 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.09} \quad (r=0.87) \quad (2)$$

Longitudinal component

$$V = 388.2 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.2} \quad (r=0.92) \quad (3)$$

여기서, V : 진동속도(mm/sec),

D : 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

2.3 단일공시험발파 파형 선정

본 연구에서는 획득한 단일공 파형 중 수치해석을 수행할 선상에 위치한 측정지점에서 획득한 파형만을 이용하였으며 편의를 위하여 SN. 1~SN. 2까지의 시료번호를 부여하였다. 다음 Figure 3~4는 SN. 1~SN. 2의 각 성분별 실측파형과 단일공 파형을 도시한 것이다.

2.4 시차분석

본 연구에서는 중첩모델링의 적합성 판단을 위하여 중첩모델링을 통한 시차분석을 실시하였다. SN. 2를 분석파형으로 선정하였으며 접선성분, 진행성분, 수직성분의 실제 기폭시차와 파형을 예측하였다. 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

단일공 파형을 이용한 SN. 2의 파형분석결과 실제 사용된 뇌관의 지연시차와 실제기폭시차가 다소 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 뇌관의 발화오차 및 발파공의 기하학적 배열, 지반의 탄성파속도 등의 영향에 의해 발생된 결과라 판단된다.

진동파형의 경우 중첩모델링을 통해 실제 진동파형과 거의 유사한 파형을 획득할 수 있었다.

다음 Figure 5는 SN. 2파형을 성분별로 분석한 결과를 도시한 것이다.

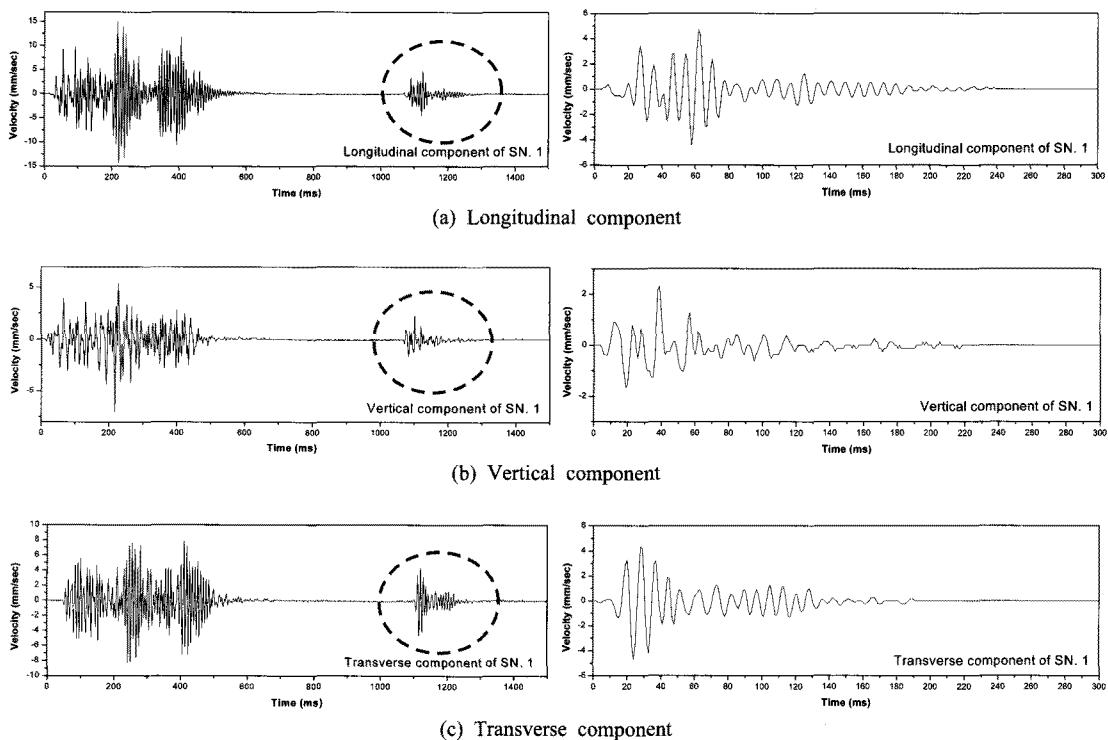


Fig. 3. Each partial velocity waveform of SN. 1

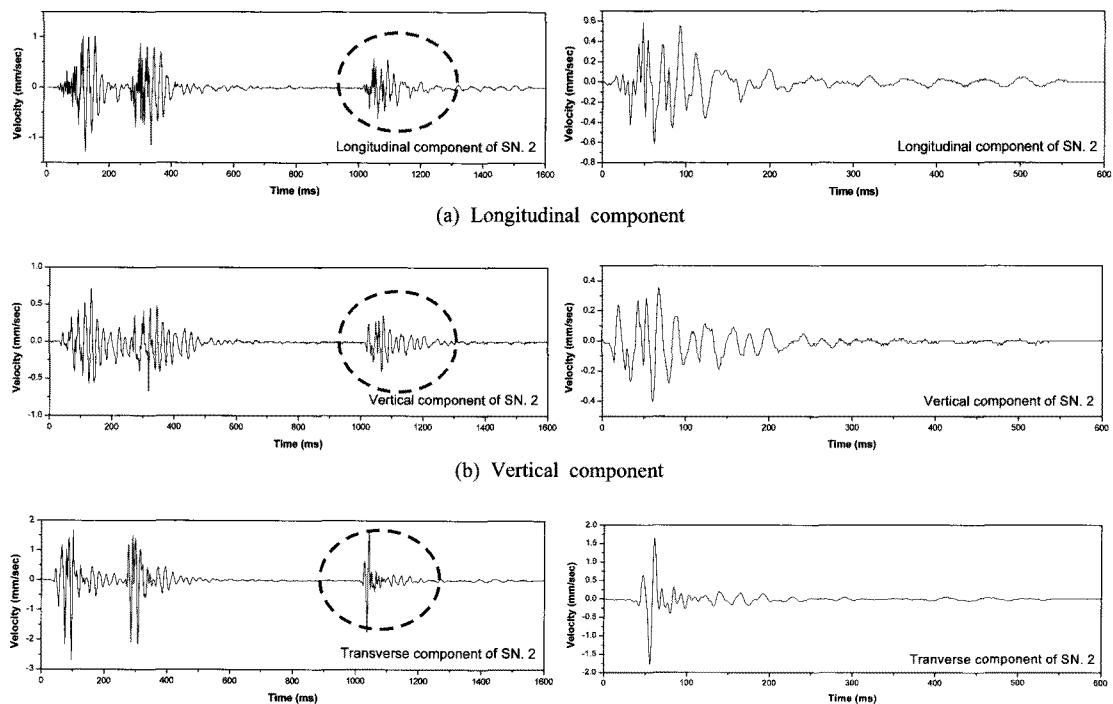


Fig. 4. Each partial velocity waveform of SN. 2

Table 2. Result of delay time analysis about SN. 2

Detonator	Delay time (ms)	Analysing delay interval (ms)
MS 0	0	0
MS 1	20	21
MS 2	40	41
MS 11	220	226
MS 12	240	246
MS 13	260	252

3. 발파공의 기하학적 배열에 따른 시차 변화

본 연구에서는 발파공의 기하학적 배열이 자연시차의 변화에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 본 연구지역의 탄성파 속도는 리핑암의 경우 0.7~1.2 km/sec이며 발파암으로 구분되는 기반암의 경우 1.2 km/sec 이상으로 조사되었다. Figure 6의 3번 발파공과 4번 발파공의 경우 뇌관시차는 20 ms이다. 하지만 공의 간격이 9.8 m 차이가 발생하기 때문에 탄성파속도를 감안했을 때 실제 기폭시차와 약 8 ms 정도의 오차가 발생하게 된다. 따라서 Figure 6의 세 측점에서 실제로는 뇌관의 자연시차인 20 ms가 아닌 12 ms, 20 ms, 28 ms로 각각 다른 시차로 파형의 중첩이 이루어지게 된다. 다음 Table 3은 중첩모델링을 통해 획득한 각 계측위치별 예상진동속도를 정리한 것으로 방향에 따라 최대 1 mm/sec의 차이가 발생한 것을 알 수 있다.

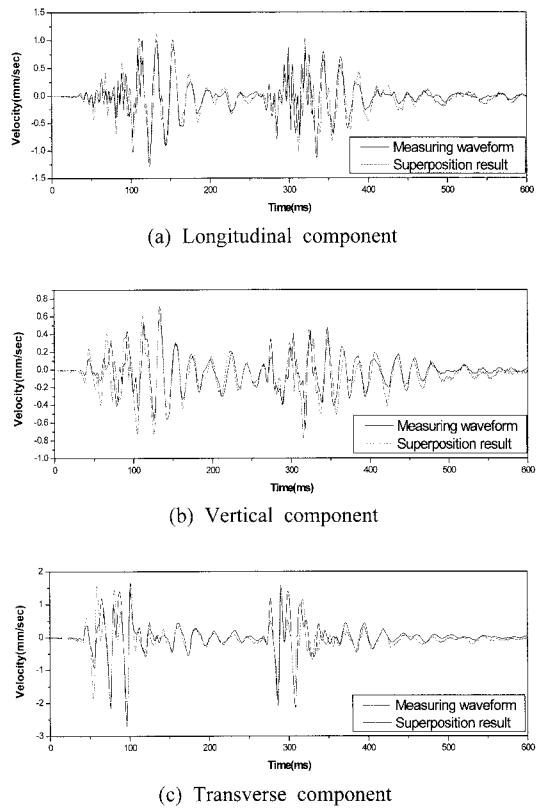


Fig. 5. Superposition modeling and Measuring waveform of SN. 2

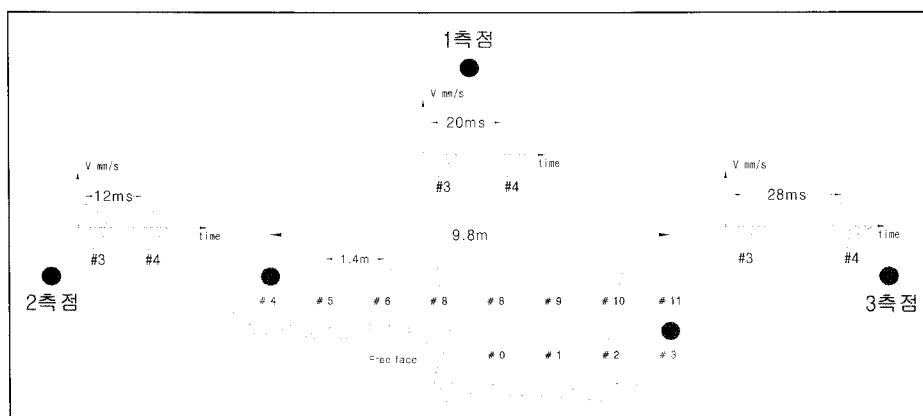


Fig. 6. Change of delay time by geometrical arrangement of blasthole

Table 3. Prospect vibration velocity of each measuring point

Velocity (mm/sec)	Measuring point #1		Measuring point #2		Measuring point #3	
	60 m	150 m	60 m	150 m	60 m	150 m
Longitudinal component	10.29	1.56	9.91	1.64	9.29	2.11
Vertical component	3.43	1.44	4.83	1.27	3.56	1.11

4. 중첩모델링

원거리에서 측정된 단일공 파형을 발파지점의 단일공 파형으로 변환시키고 뇌관의 지연시차와 발파공의 배

Table 4. Delay time of superposition modeling

Detonator	Delay time (ms)	Delay interval (ms)
MS 0	0	0
MS 1	20	21
MS 2	40	42
MS 3	60	63
MS 4	80	75
MS 5	100	96
MS 6	120	117
MS 8	160	158
MS 8	160	159
MS 9	180	180
MS 10	200	201
MS 11	220	222
MS 12	240	235
MS 13	260	256
MS 14	280	277
MS 15	300	298
MS 16	320	319
MS 17	340	340
MS 18	360	361
MS 19	380	382

Table 5. Measuring and superposition modeling result

Velocity (mm/sec)	Measuring result		Superposition result	
	60 m	3 m	60 m	3 m
Longitudinal component	15	360.7	9.91	
Vertical component	7	301.3	4.83	

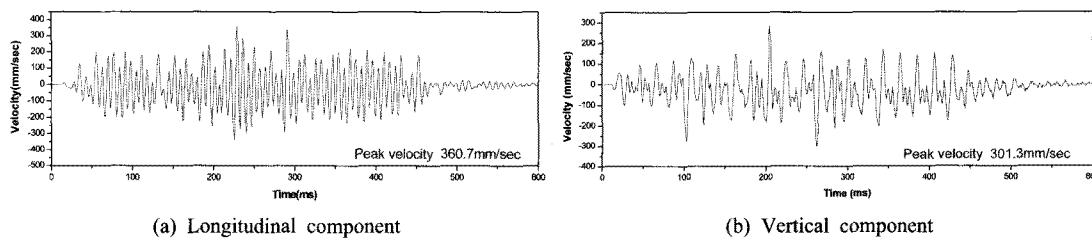


Fig. 7. Superposition modeling waveform

Table 6. Properties of in-suit rock mass

	Weight per Unit (kg/m^3)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Cohesion (MPa)	Friction angle ($^\circ$)
Weathered rock	2000	200.45	0.3	0.03	33
Soft rock	2340	1723	0.22	0.14	32
Hard rock	2420	5720.81	0.22	0.26	38

열, 탄성파 속도에 따른 기폭시차 변화를 감안한 지연시차를 결정하여 중첩모델링을 실시하였다. 이상의 과정을 통해 실제 시공 중 발생할 것으로 예상되는 진동파형을 획득하였다. 다음 Table 4는 중첩모델링에 적용시킬 지연시차이며 Table 5는 중첩모델링으로 얻어진 결과를 정리한 것이다. 다음의 Figure 7은 중첩모델링 결과 생성된 성분별 진동파형이다.

5. 동적수치해석

본 연구에서는 상용 유한차분 해석프로그램인 FLAC을 이용하였으며 동적수치해석을 수행하기 위해서 발파하중의 경우 SN. 1의 실측진동파형과 중첩모델링파형 두가지를 이용한 동적수치해석을 수행하였다.

지반 모델은 대표적인 지반모델인 탄소성 모델로 가정하였으며 경계조건은 모델의 좌, 우 및 하단을 절성경계로 가정하였다. 수치모델 내에서의 탄성파 전파에 따른 진동감쇠율은 중첩모델링파형의 경우 6.5%, SN. 1 실측진동파형의 경우 5.5%의 감쇠율을 적용하였다.

동적수치해석 시 발파하중으로 작용시킬 진동속도파형은 발파위치에서 60 m 거리에 위치한 진동계측기에서 측정된 진동파형을 보정한 것이며 이를 이용한 동적수치해석을 수행하여 150 m 거리에 위치한 장소의 진동속도를 예측할 것이다. 다음 Table 6은 대상지역의

지반 물성치를 나타낸 것이며 Figure 8~9는 대상지역의 지질 및 진동측정위치, 동적수치해석을 위한 수치모델을 도시한 것이다.

5.1 동적수치해석 적용파형

본 연구에서는 중첩모델링파형과 SN. 1 실측진동파형을 이용한 동적수치해석을 실시하고자 한다. 발파와 종으로 작용시킬 진동파형은 전결에서 보정 및 중첩모델링을 실시한 60 m에서 측정된 SN. 1의 중첩모델링파형과 SN. 1의 실측진동파형이다. 다음 Figure 10~11은 동적수치해석에 적용될 진동파형을 도시한 것이다.

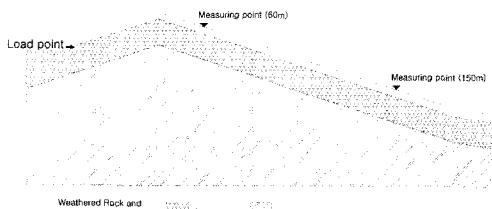


Fig. 8. in-situ rock mass and measuring point

5.2 동적수치해석 결과

중첩모델링 파형과 실측파형인 SN. 1 진동파형을 이용한 동적수치해석을 통하여 발파공법 적용에 따른 150 m 지점에 위치한 구조물의 안정성 평가를 실시하였다. 발파공법에 대한 구조물의 안정성 평가는 일반적으로 구조물이 위치한 지점의 지반진동속도를 기준으로 하기 때문에 본 해석모델의 150 m 지점에서의 진동속도를 동적수치해석을 통해 예측하였다.

다음 Table 7은 동적수치해석결과와 중첩모델링에 의해 예측된 예상 진동속도를 비교한 것이다. Figure 12는 중첩모델링 파형을 이용한 동적수치해석의 결과 발

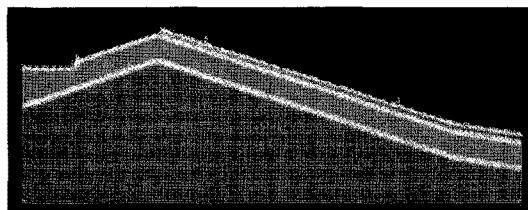
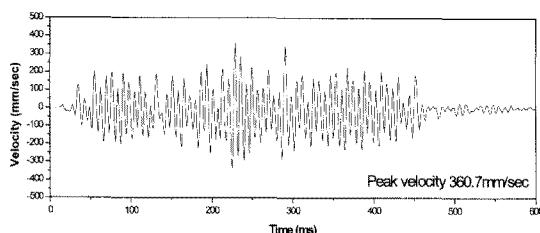
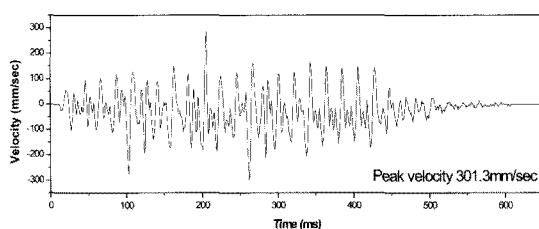


Fig. 9. Numerical model for dynamic analysis

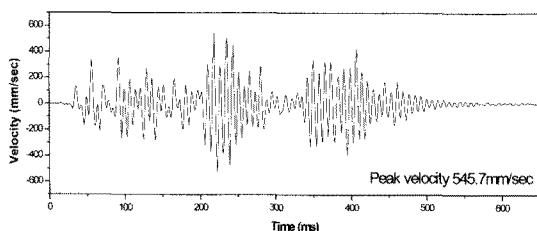


(a) longitudinal component

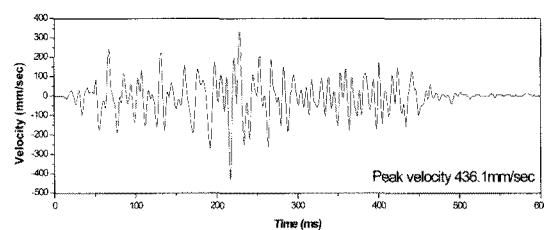


(b) vertical component

Fig. 10. Superposition modeling waveform of SN. 1



(a) longitudinal component



(b) vertical component

Fig. 11. Measuring waveform of SN. 1

Table 7. Comparison between dynamic analysis and superposition modeling

Velocity (mm/sec)	Superposition modeling		Dynamic analysis	
	60 m	150 m	60 m	150 m
X-velocity	9.91	1.64	9.86	1.75
Y-velocity	4.83	1.27	5.65	0.85

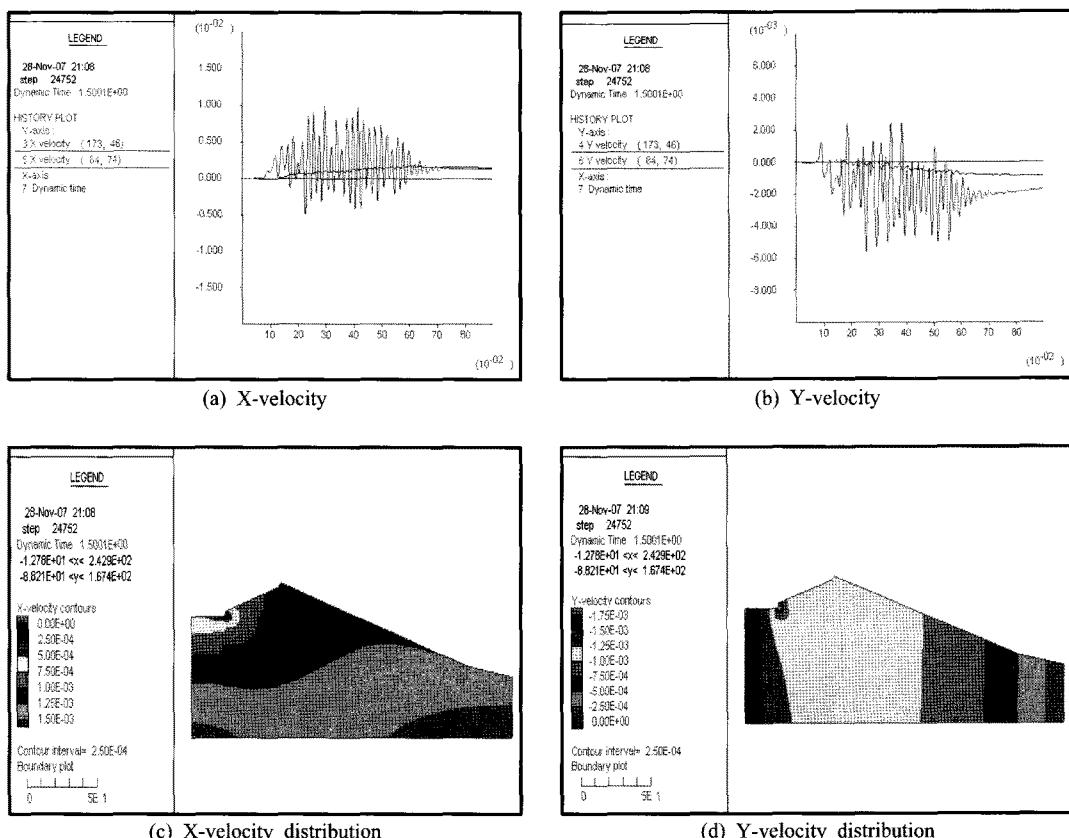


Fig. 12. Result of dynamic analysis using superposition modeling waveform

Table 8. Comparison between dynamic analysis and real measurement

Velocity (mm/sec)	Real measurement		Dynamic analysis	
	60 m	150 m	60 m	150 m
X-velocity	15	1.17	16.4	1.22
Y-velocity	7	1.13	7.7	1.16

생한 60 m와 150 m에서의 각 성분별 진동속도파형 및 수치모델 내에 나타난 X방향 진동속도와 Y방향 진동속도의 분포를 도시한 것이다.

중첩모델링파형을 이용한 동적수치해석을 통해 150 m에서의 최대진동속도를 동일 지점에서 측정된 단일공파형의 중첩모델링 결과와 0.11 mm/sec의 근소한 차이의 진동수준을 예측하였다.

수치모델링의 적합성 판단을 위하여 SN. 1 실측진동파형을 이용한 동적수치해석을 실시하였으며 Table 8은 동적수치해석결과와 60 m와 150 m에서 실측된 진동속도를 비교한 것이다. Figure 13은 60 m와 150 m에서의 각 성분별 진동속도파형 및 수치모델 내에 나타난 X방

향 진동속도와 Y방향 진동속도의 분포를 도시한 것이다. SN. 1 실측진동파형을 이용한 동적수치해석을 통해 150 m에서의 최대진동속도를 실제측정값과 0.05 mm/sec의 아주 근소한 차이의 진동수준을 예측하였다. SN. 1 실측진동파형을 이용한 동적수치해석 결과를 바탕으로 본 연구에서 수행한 동적수치해석이 적절히 이루어진 것으로 판단하였다.

6. 결론

본 연구에서는 단일공 및 시추공 발파 진동파형을 중첩모델링 하여 획득한 진동파형을 발파 동적수치해석

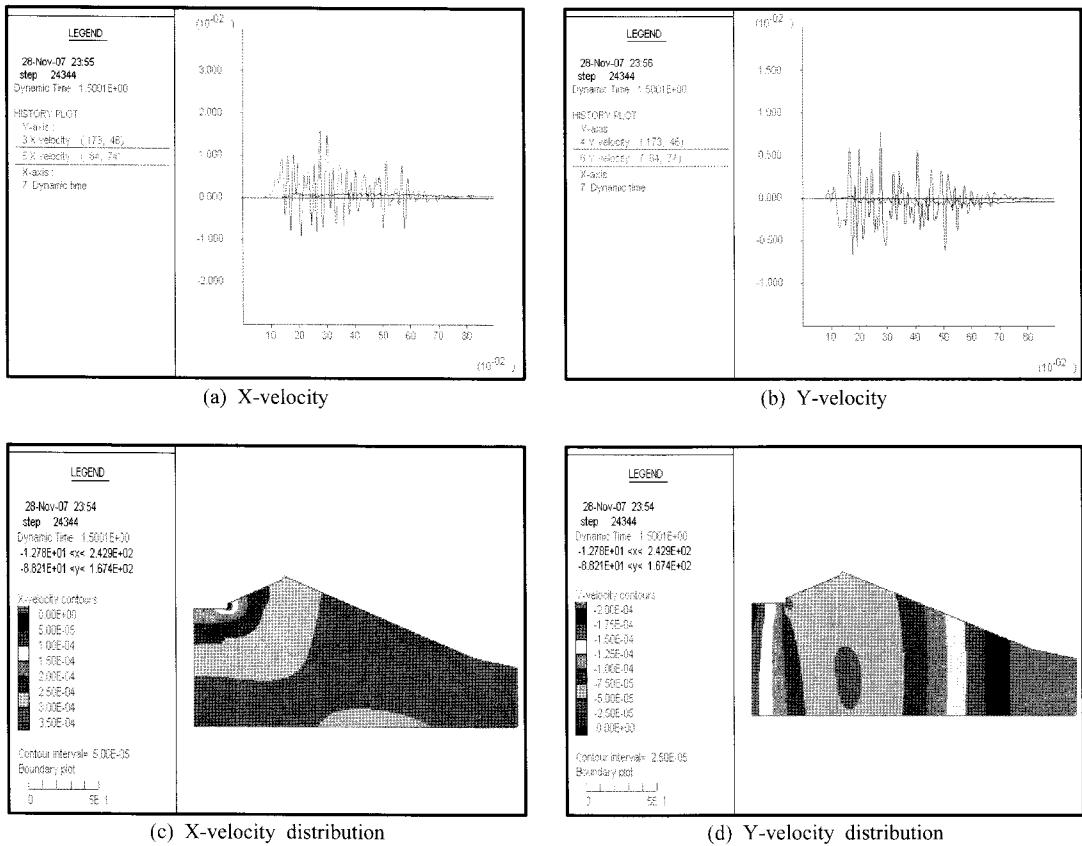


Fig. 13. Result of dynamic analysis using measured waveform

의 발파하중으로 작용 시키는 것에 대해 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 중첩모델링의 적합성 판단을 위해 실시한 단일공 파형을 이용한 본발파 파형의 시차분석을 실시하였다. 그 결과 단일공 파형을 이용한 중첩모델링으로 실제 발파 시 발생할 것으로 예상되는 진동파형을 획득할 수 있음을 알 수 있었다.
2. 중첩모델링을 통해 파형을 분석해 본 결과 진동속도를 변화시키는 요소는 단순히 장약량과 뇌관지 연시차 만이 아니며 지질특성, 기폭방향, 뇌관발화 오차 등 다양한 변수에 의해 변화되는 것으로 판단된다.
3. 중첩모델링 결과 생성된 파형을 발파하중으로 작용시켜 수행한 동적수치해석 결과 60 m에서 9.8 mm/sec, 150 m에서 1.75 mm/sec의 최대진동속도가 예측되었다.
4. 단일공 파형을 이용한 중첩모델링 결과 60 m에서 9.91 mm/sec, 150 m에서 1.64 mm/sec로 최대진

동속도가 예측되었다. 이는 수치해석결과와 0.11 mm/sec의 근소한 차이를 보인다.

따라서 본 연구에서 수행한 단일공 파형의 중첩모델링을 통해 시차변화에 따라 발생 가능한 진동수준의 범위를 설정하고 각각의 진동파형을 활용한 동적수치해석을 실시함으로써 사전설계 단계에서 발파공법의 적용에 따른 주변 암반이나 구조물에 발생 가능한 피해의 범위를 산정하는 평가 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2004년도 조선대학교 연구보조비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강추원, 김승현, 박현식, 2006, “중첩모델링을 통한 발파

- 진동의 특성에 관한 연구”, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제16권, 제4호, pp. 326~332.
2. 김종인, 2006, “단일공파형 중첩모델링 자료에 의한 발파 진동의 예측”, 『조선대학교 박사학위논문』.
 3. 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, “실측파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구”, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제14권, 제2호, pp. 108~120.
 4. 박도현, 조영곤, 전석원, 2006, “실측파형을 이용한 비탈면 발파진동 해석 사례”, 대한화약밸파공학회, 화약·밸파 제24권, 제2호 99. 41~50.

박지우

2006년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사

Tel: 062-230-7876

E-mail: iamjiwoo@hanmail.net

현재 조선대학교 대학원 자원공학과 석사과정



고진석

1979년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사

1981년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사

1995년 한양대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 062-230-7118

E-mail: jsgo@mail.chosun.ac.kr

현재 조선대학교 자원공학과 교수



강추원

1973년 조선대학교 공과대학 자원공학
과 공학사

1981년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사

1999년 강원대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 062-230-7117

E-mail: cwkang@mail.chosun.ac.kr

현재 조선대학교 자원공학과 교수



장호민

2003년 조선대학교 공과대학 자원공학
과 공학사

2005년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사

Tel: 062-230-7876

E-mail: swessil@hanmail.net

현재 조선대학교 대학원 자원공학과 박
사수료

