

## 중첩 모델링자료를 활용한발파 동해석 기법에 관한 연구

박지우<sup>1)</sup>, 강추원<sup>2)</sup>, 장호민<sup>1)</sup>, 류복현<sup>1)</sup>, 문태철<sup>1)</sup>

### 1. 서 론

최근 단일공 파형의 중첩모델링을 이용한 발파진동추정식을 산출한 발파진동의 영향성 평가 방법<sup>1)2)</sup>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<sup>3)4)</sup>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 작용시키는 동적수치해석법에 대해 연구하였다.

### 2. 단일공시험발파

#### 2.1 단일공 시험발파 조건

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

표 2.1 각 회차별 발파제원

No.	1	2
Explosive	Emulsion explosive ( $\phi$ 50mm)	
Detonator	MS or LP Detonator	
Diameter(mm)	$\phi$ 75mm	
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

1) 조선대학교 자원공학과

2) 조선대학교 자원공학과 교수

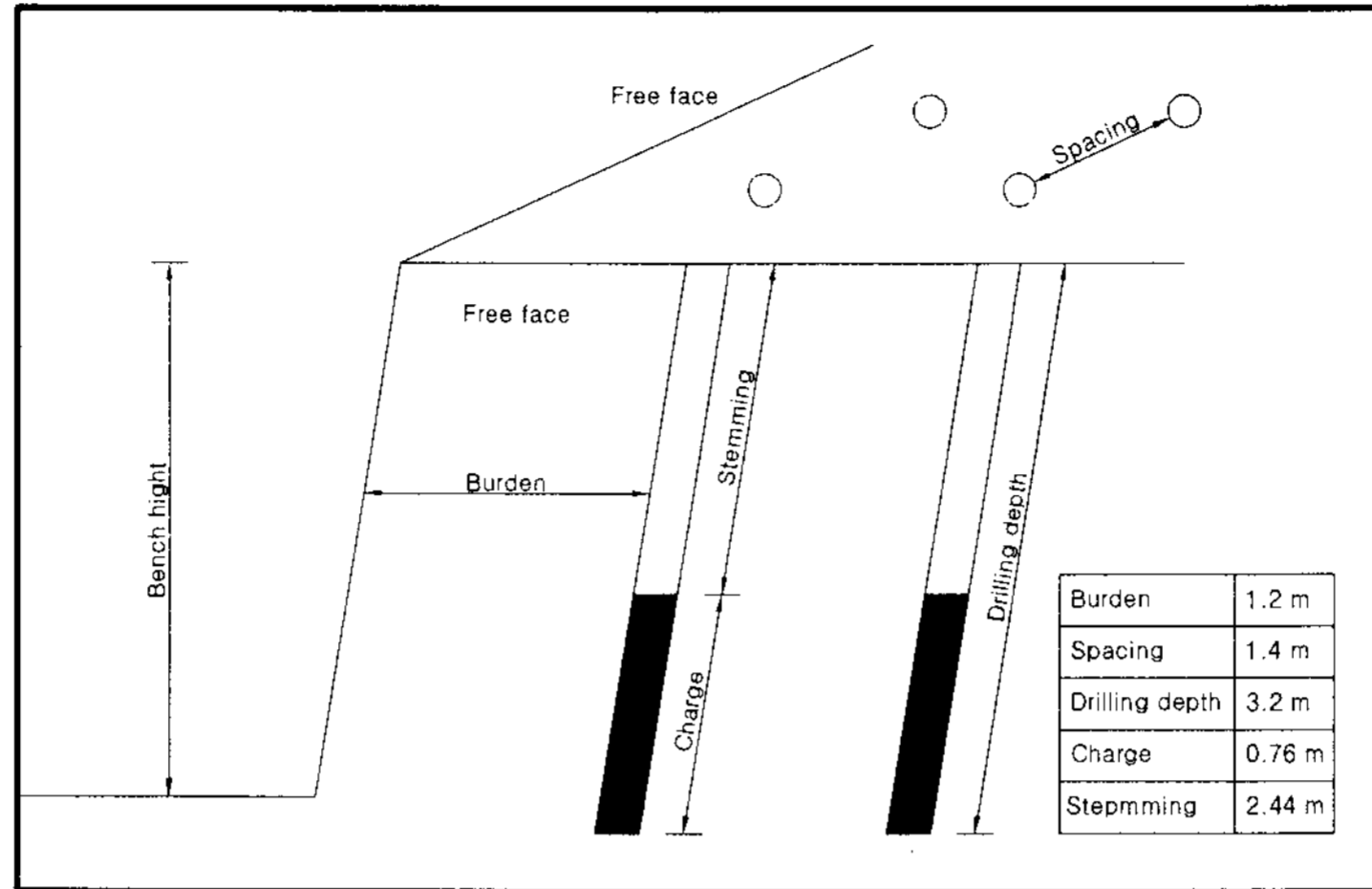


그림 2.1 발파패턴

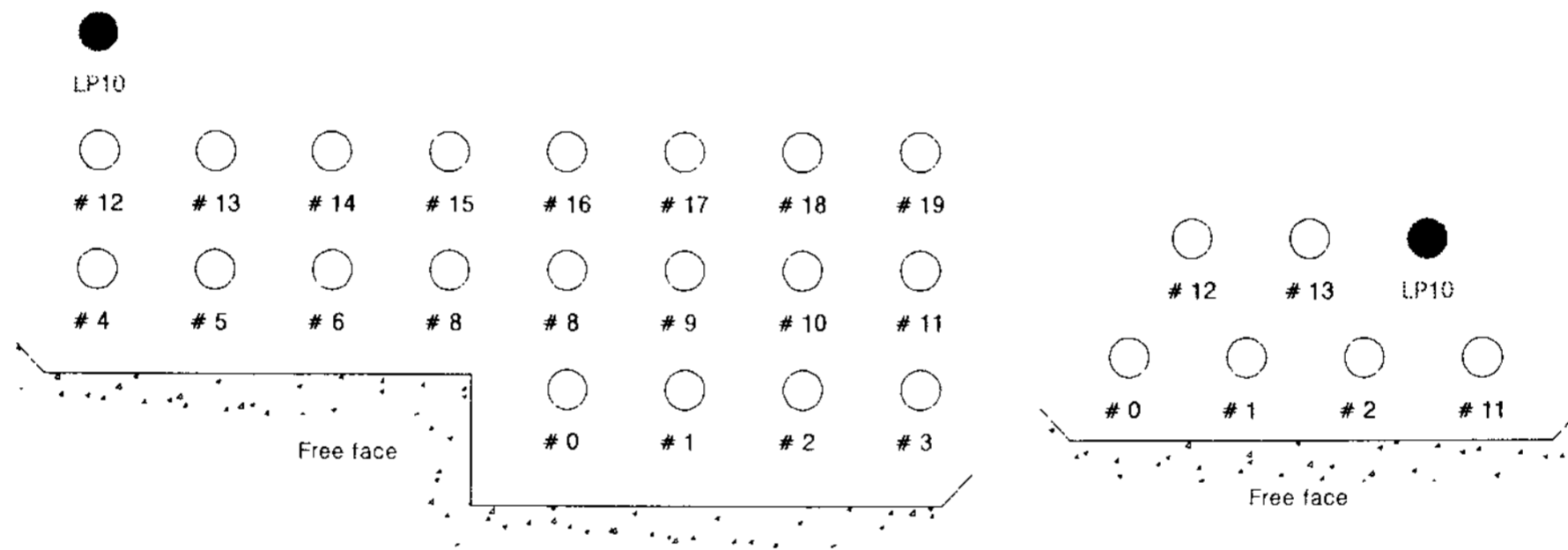


그림 2.2 기폭패턴

## 2.2 단일공 시험발파 분석 결과

본 연구지역의 각 성분별 발파진동예측식은 다음 식(2.1), (2.2), (2.3)과 같다

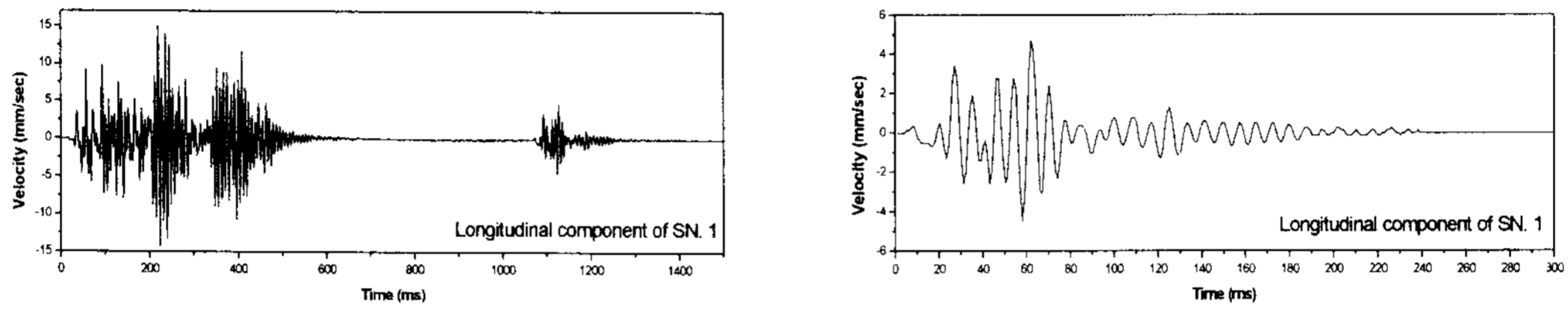
$$\text{Vertical component } V = 644.6 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.38} \quad (r=0.96) \quad (2.1)$$

$$\text{Transverse component } V = 185 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.09} \quad (r=0.87) \quad (2.2)$$

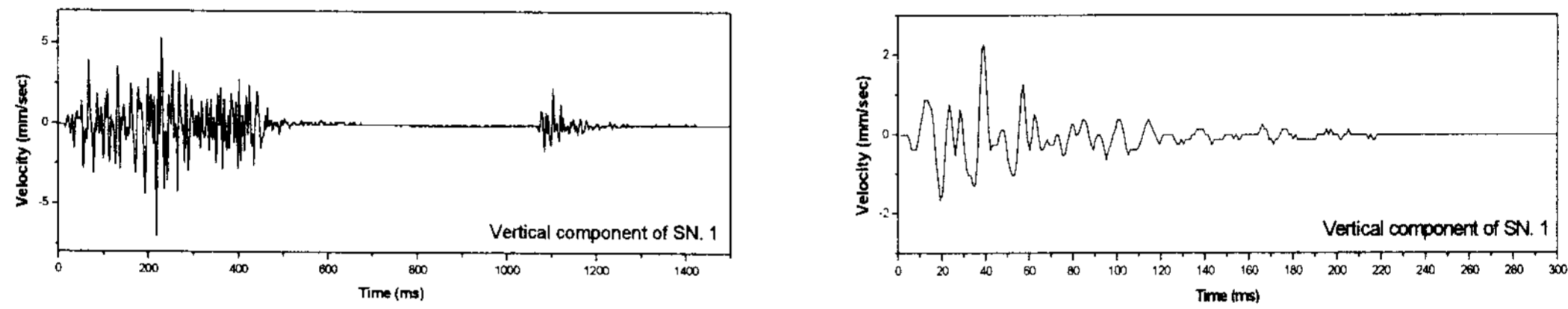
$$\text{Longitudinal component } V = 388.2 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.2} \quad (r=0.92) \quad (2.3)$$

### 2.3 단일공시험발파 파형 선정

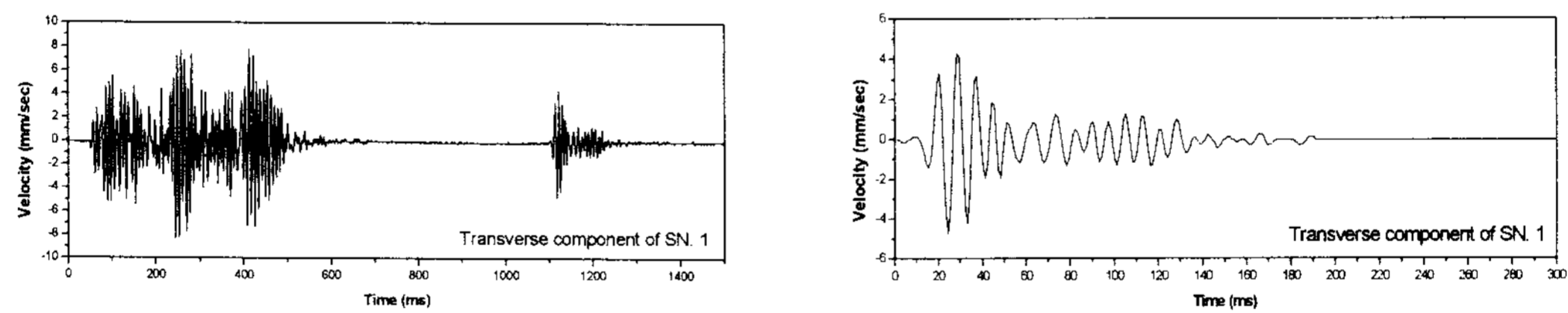
본 연구에서는 획득한 단일공 파형 중 수치해석을 수행할 선상에 위치한 측정지점에서 획득한 파형만을 이용하였으며 편의를 위하여 SN. 1~SN. 2까지의 시료번호를 부여하였다. 다음 그림 2.3~2.4는 SN. 1~SN. 2의 각 성분별 실측파형과 단일공 파형을 도시한 것이다.



(a) Longitudinal component

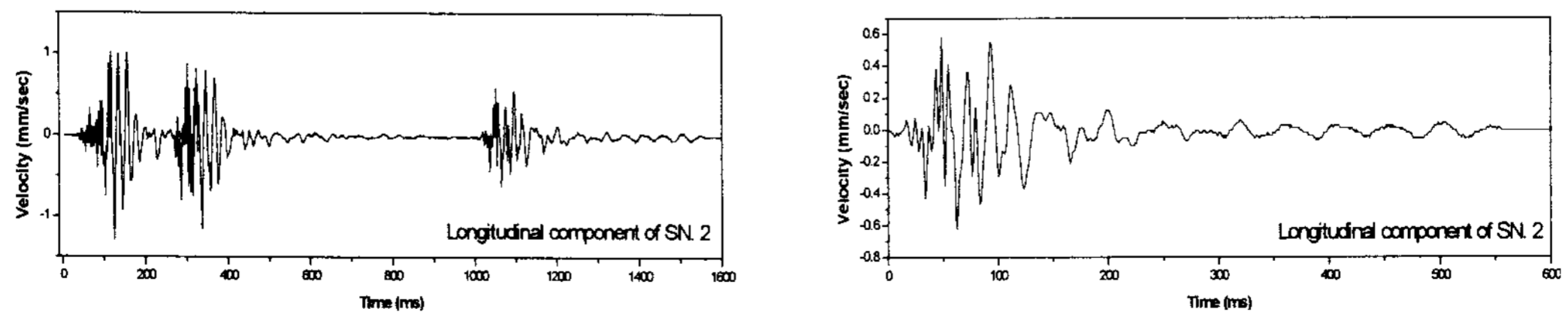


(b) Vertical component

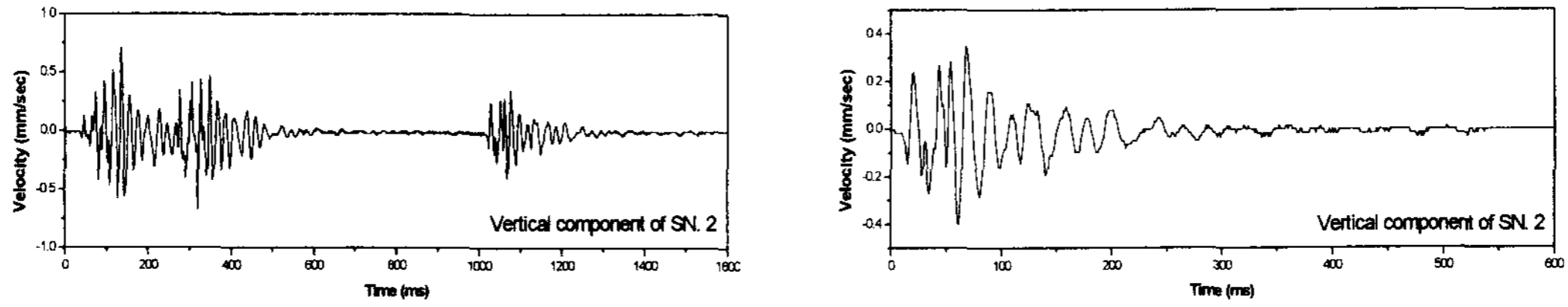


(c) Transverse component

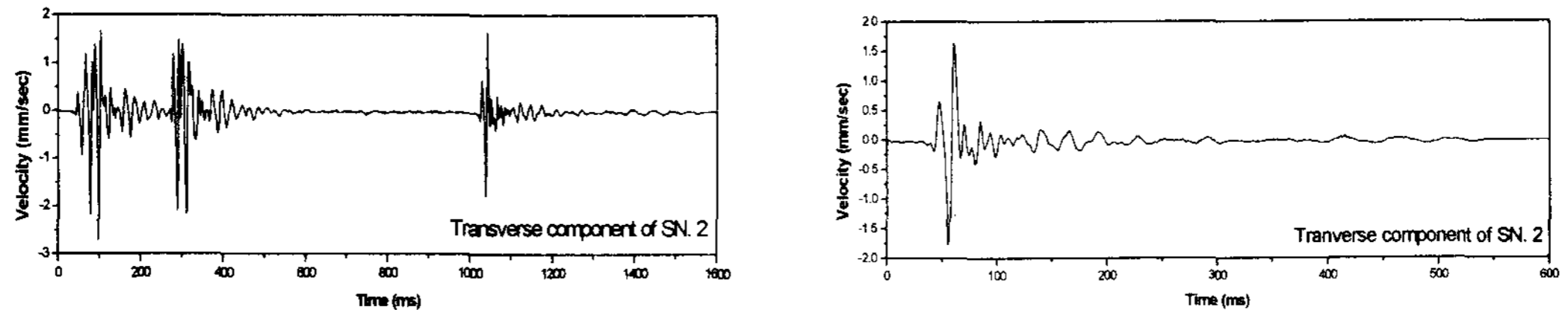
그림 2.3 SN. 1의 각 성분별 진동파형



(a) Longitudinal component



(b) Vertical component



(c) Transverse component

그림 2.4 SN. 2의 각 성분별 진동파형

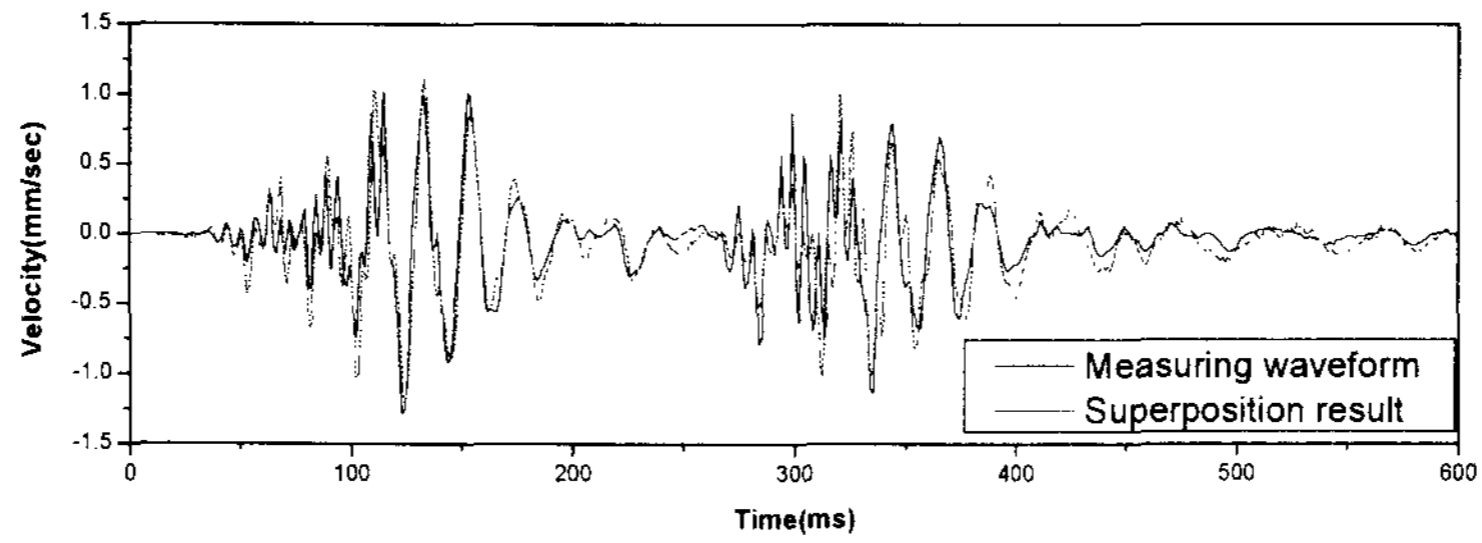
### 2.4 중첩모델링을 통한 시차분석

본 연구에서는 중첩모델링의 적합성 판단을 위하여 중첩모델링을 통한 시차분석을 실시하였다. SN. 2를 분석 파형으로 선정하였으며 접선성분 (Transverse component), 진행성분 (Longitudinal component)과 수직성분 (Vertical component)의 실제 기폭시차와 파형을 예측하였다. 그 결과를 표 2.1에 나타내었다.

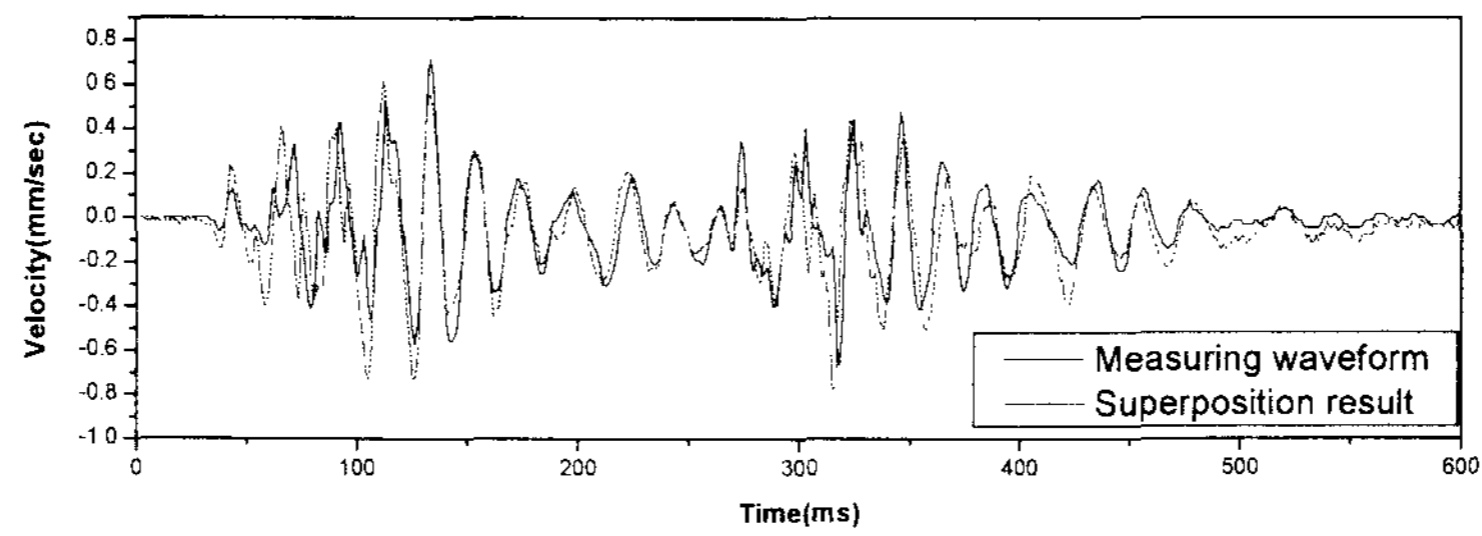
다음 그림 2.5는 SN. 2파형을 성분별로 분석한 결과를 도시한 것이다.

표 2.1 SN. 2의 시차분석 결과

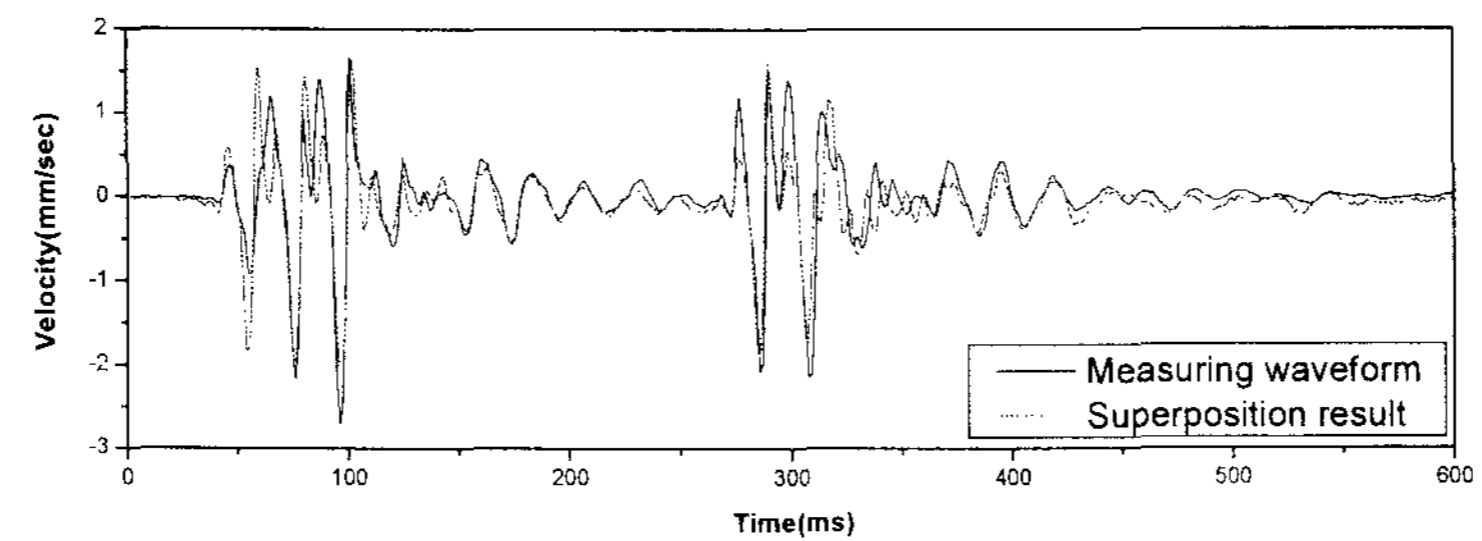
Detonator	Delay time(ms)	Delay interval(ms)	Analysing delay interval(ms)
MS 0	0	0	0
MS 1	20	20	21
MS 2	40	40	41
MS 11	220	220	226
MS 12	240	240	246
MS 13	260	260	252



(a) Longitudinal component



(b) Vertical component



(c) Transverse component

그림 2.5 SN. 2의 실측파형과 중첩모델링 파형과의 비교

단일공 파형을 이용하여 SN. 2 파형분석결과 사용되는 뇌관의 지연단차와 실제기폭시차가 다소 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 뇌관의 발화오차 및 발파공의 기하학적 배열, 지반의 탄성파속도 등의 영향에 의해 발생된 결과라 판단된다.

### 3. 발파공의 기하학적배열에 따른 시차 변화

본 연구지역의 탄성파 속도는 리핑암의 경우 0.7~1.2km/sec이며 발파암으로 구분되는 기반암의 경우 1.2km/sec이상으로 조사되었다.

4번 발파공과 3번 발파공의 경우 뇌관시차는 20ms 지연시간을 가지지만 공의 간격이 9.8m차이가 발생하기 때문에 탄성과속도를 감안했을 때 약 8ms정도의 오차가 발생하게 되어 2측점에서 실제로는 12ms의 지연시차를 가지게 된다. 다음 표 3.1은 중첩모델링을 통해 획득한 각 계측위치별 예상진동속도를 정리한 것으로 방향에 따라 최대 1mm/sec의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

표 3.1 계측위치별 예상 최대진동속도

Velocity (mm/sec)	Measuring point #1		Measuring point #2		Measuring point #3	
	60m	150m	60m	150m	60m	150m
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

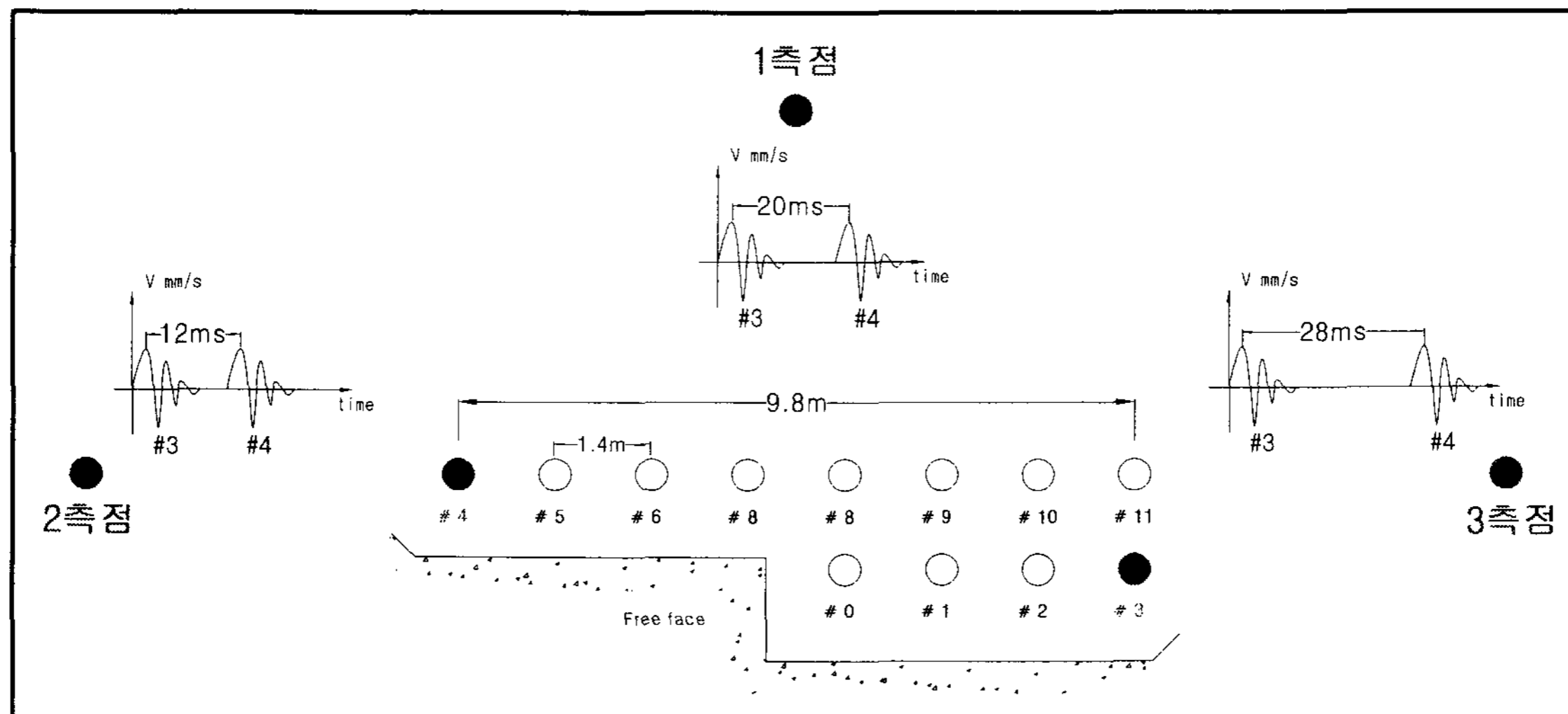


그림 3.1 발파공의 기하학적 배열에 따른 시차변화

#### 4. 중첩모델링

파형 보정과정을 거친 단일공 파형을 중첩의 원리를 적용하여 뇌관의 지연시차와 발파공의 배열과 탄성과 속도에 따른 기폭시차 변화만을 고려한 중첩모델링을 실시함으로써 실제 시공 중 발생할 것으로 예상되는 진동파형으로 변환시켜 예상 진동파형을 획득하였다.

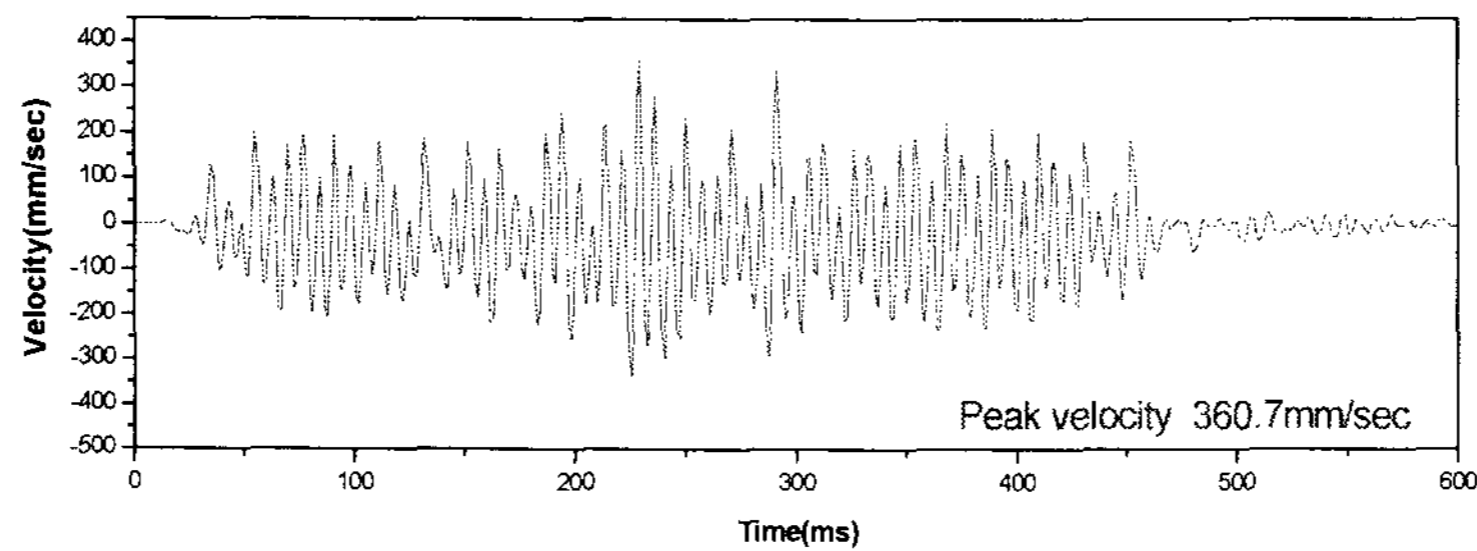
다음 표 4.1은 중첩모델링에 적용시킬 지연시차이며 그림 4.1은 중첩모델링 결과 생성된 성분별 진동파형이다.

표 4.1 중첩모델링에 적용한 지연시차

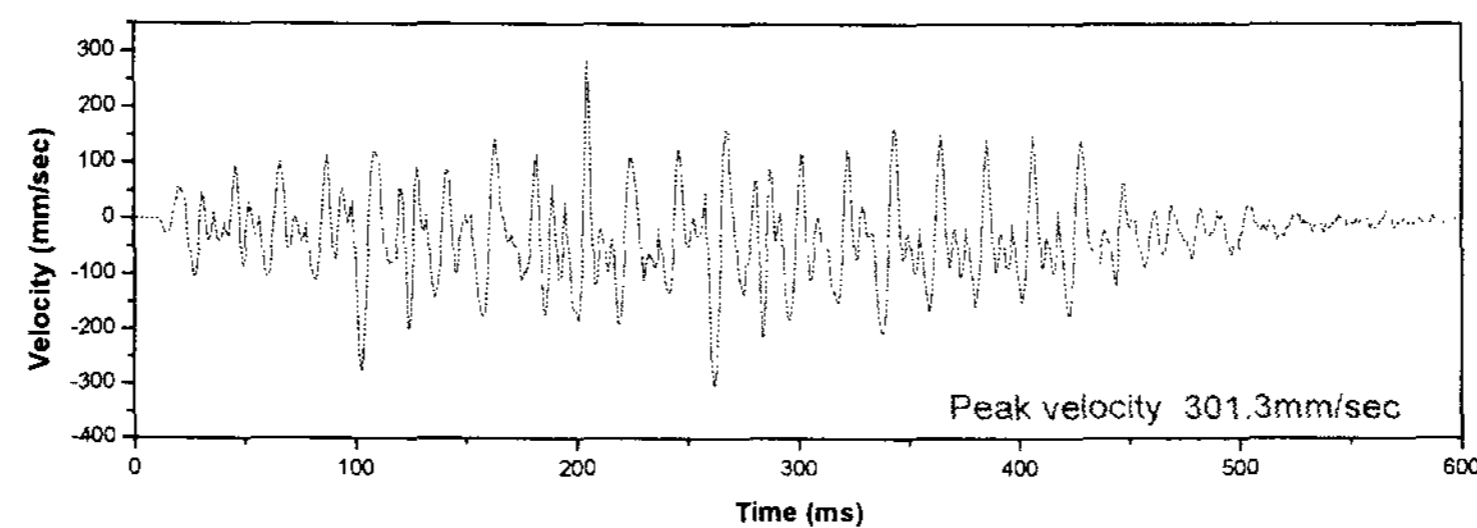
Detonator	Delay time(ms)	Delay interval(ms)	Detonator	Delay time(ms)	Delay interval(ms)
MS 0	0	0	MS 10	200	201
MS 1	20	21	MS 11	220	222
MS 2	40	42	MS 12	240	235
MS 3	60	63	MS 13	260	256
MS 4	80	75	MS 14	280	277
MS 5	100	96	MS 15	300	298
MS 6	120	117	MS 16	320	319
MS 8	160	158	MS 17	340	340
MS 8	160	159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

표 4.2 중첩모델링 결과 얻어진 최대진동속도

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



(a) Longitudinal component



(b) Vertical component

그림 4.1 중첩모델링 결과 생성된 각 성분별 진동파형

## 5. 동적수치해석

본 연구에서는 상용 유한차분 해석프로그램인 FLAC을 이용하였으며 동적수치해석을 수행하기 위해서 발파하중의 경우 SN. 1의 실측진동파형, 중첩모델링 파형 두가지를 이용한 동적수치해석을 수행하였다.

지반 모델은 대표적인 지반모델인 탄소성 모델로 가정하였으며 다음 표 5.1은 대상지역의 지반 물성치를 나타낸 것이며 그림 5.1은 대상지역의 지질 및 진동측정위치를 도시한 것이다.

표 5.1 현지암반 물성치

	Weight per Unit( $t/m^3$ )	Young's modulus( $t/m^2$ )	Poisson's ratio	Cohesion ( $t/m^2$ )	Friction angle( $^{\circ}$ )
Weathered rock	2	20,440	0.3	3	33
Soft rock	2.34	175,700	0.22	14	32
Hard rock	2.42	583,360	0.22	26	38

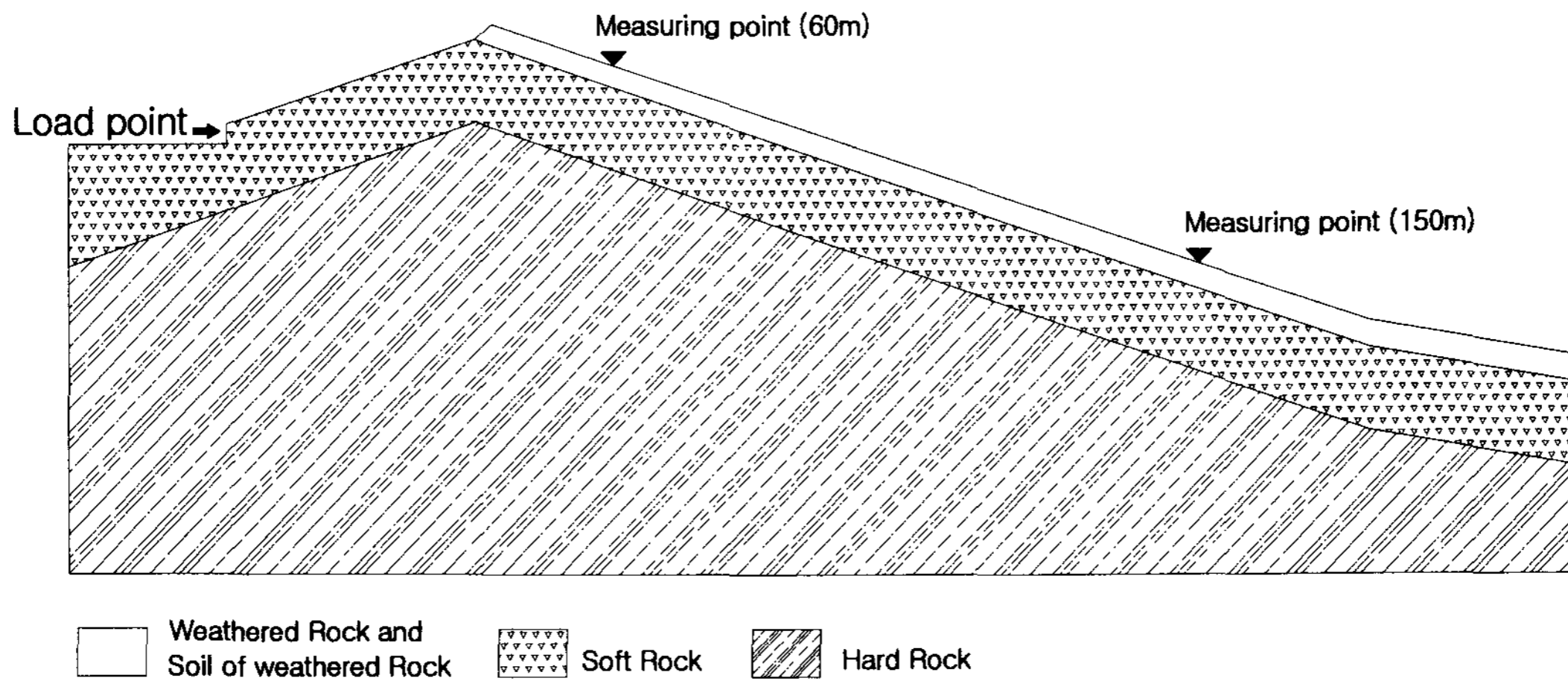


그림 5.1 연구지역 지질 및 진동측정 위치

수치모델 내에서의 탄성과 전파에 따른 진동 감쇠율은 중첩모델링파형의 경우 6.5%, SN. 1 실측진동파형의 경우 5.5%의 감쇠율을 적용하였다.

동적수치해석 시 발파하중으로 작용시킬 진동속도 파형은 발파위치에서 60m거리에 위치한 진동계측기에서 측정된 진동파형을 보정한 것이며 이를 이용한 동적수치해석을 수행하여



150m 거리에 위치한 장소의 진동속도를 예측할 것이다.

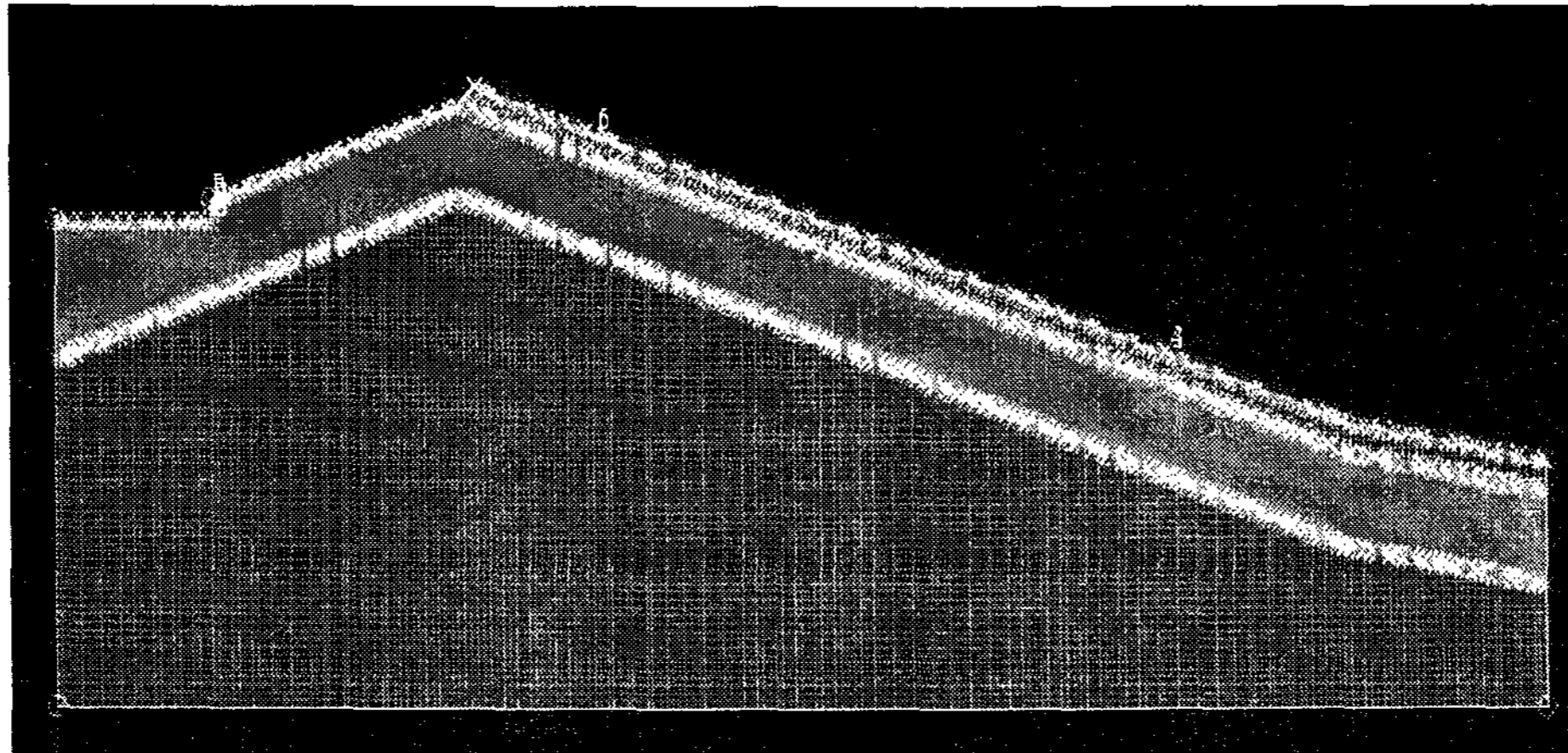
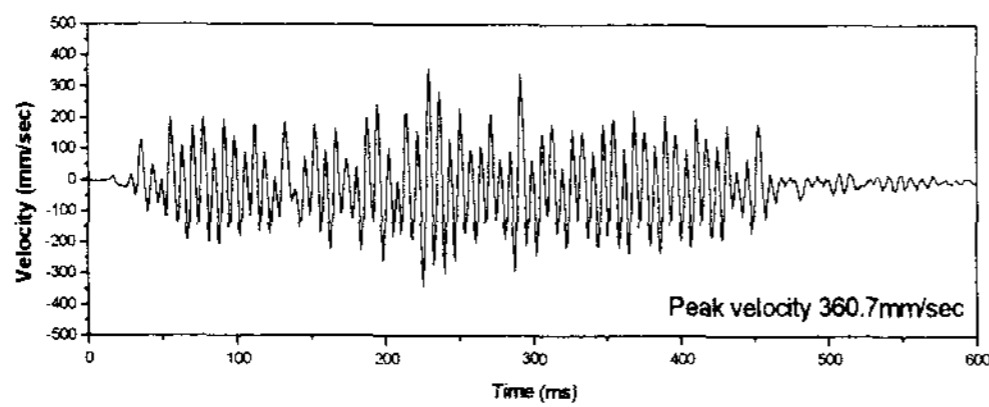


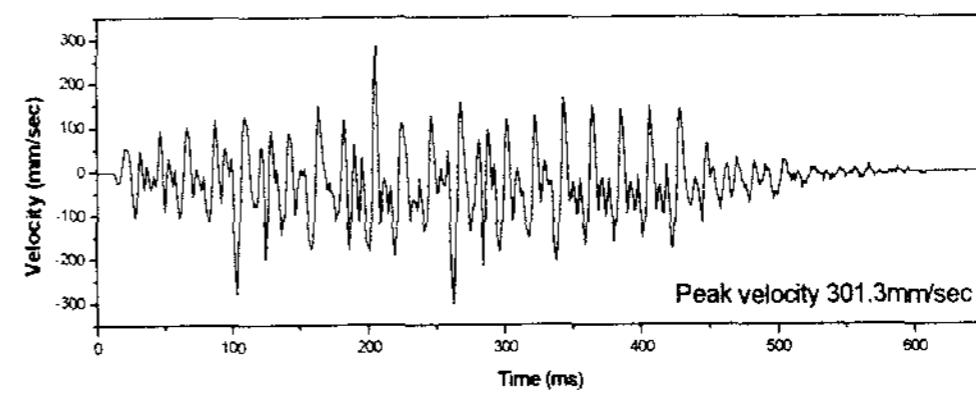
그림 5.2 연구지역의 수치해석모델

### 5.1 동적수치해석 적용과형

본 연구에서 중첩모델링과형과 SN. 1 실측진동과형을 이용한 동적수치해석을 실시할 것이다. 발파하중으로 작용시킬 진동과형은 전절에서 보정 및 중첩모델링을 실시한 60m에서 측정된 SN. 1의 중첩모델링과형과 SN. 1의 실측진동과형이다. 다음 그림 5.3~5.4는 동적수치해석에 적용될 진동과형을 도시한 것이다.

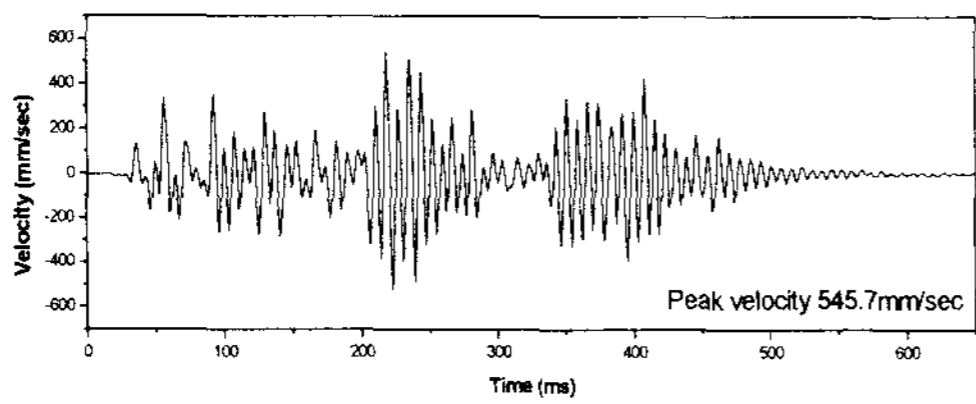


(a)longitudinal component

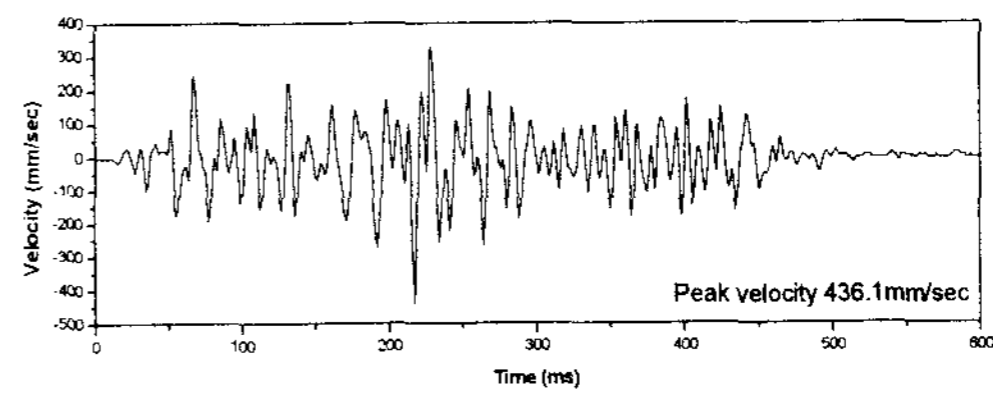


(b) vertical component

그림 5.3 중첩모델링 진동과형



(a) longitudinal component



(b) vertical component

그림 5.4 실측진동과형

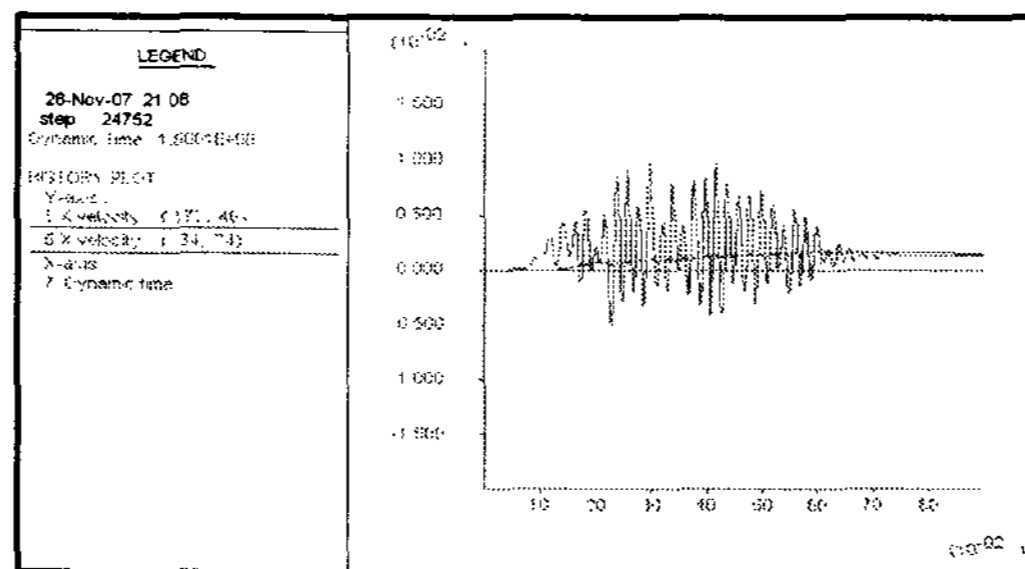
### 5.2 동적수치해석 결과

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

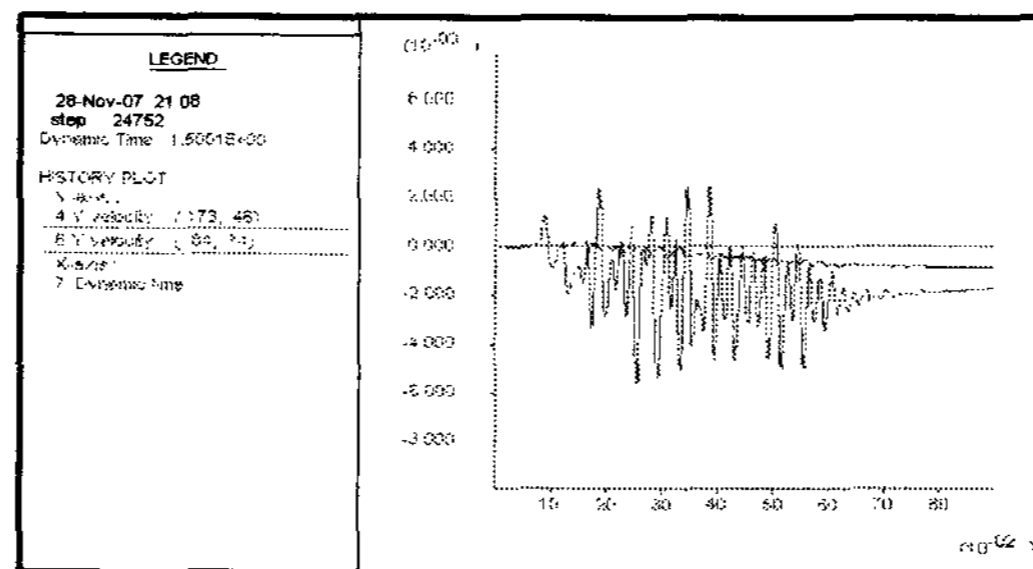
다음 표 5.2는 동적수치해석결과와 중첩모델링에 의해 예측된 예상 진동속도를 비교한 것이다. 그림 5.5는 중첩모델링 파형을 이용한 동적수치해석의 결과 발생한 60m와 150m에서의 각 성분별 진동속도파형을 도시한 것이다. 또한 그림 5.6은 동적수치해석 결과 수치모델 내에 나타난 X방향 진동속도와 Y방향 진동속도의 분포를 도시한 것이다.

표 5.2 동적수치해석 결과와 중첩모델링 결과와의 비교

Velocity (mm/sec)	Superposition modeling		Dynamic analysis	
	60m	150m	60m	150m
Longitudinal component	9.91	1.64	9.86	1.75
Vertical component	4.83	1.27	5.65	0.85

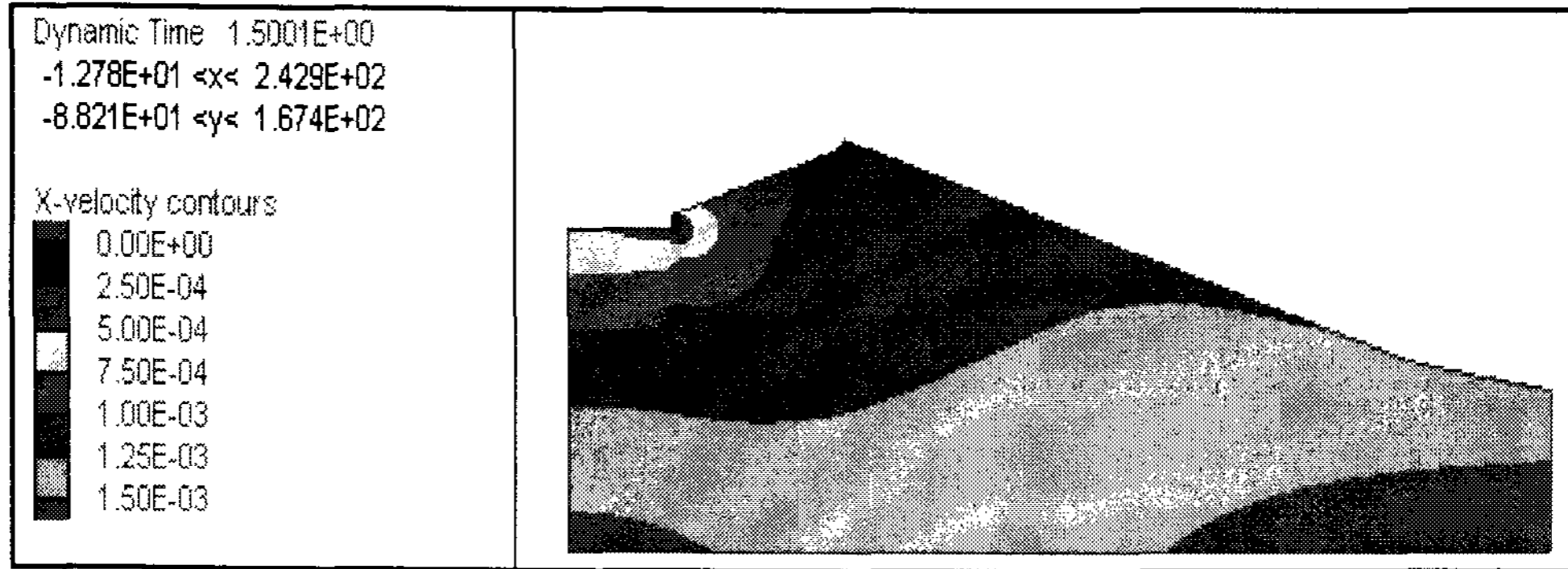


(a) longitudinal component

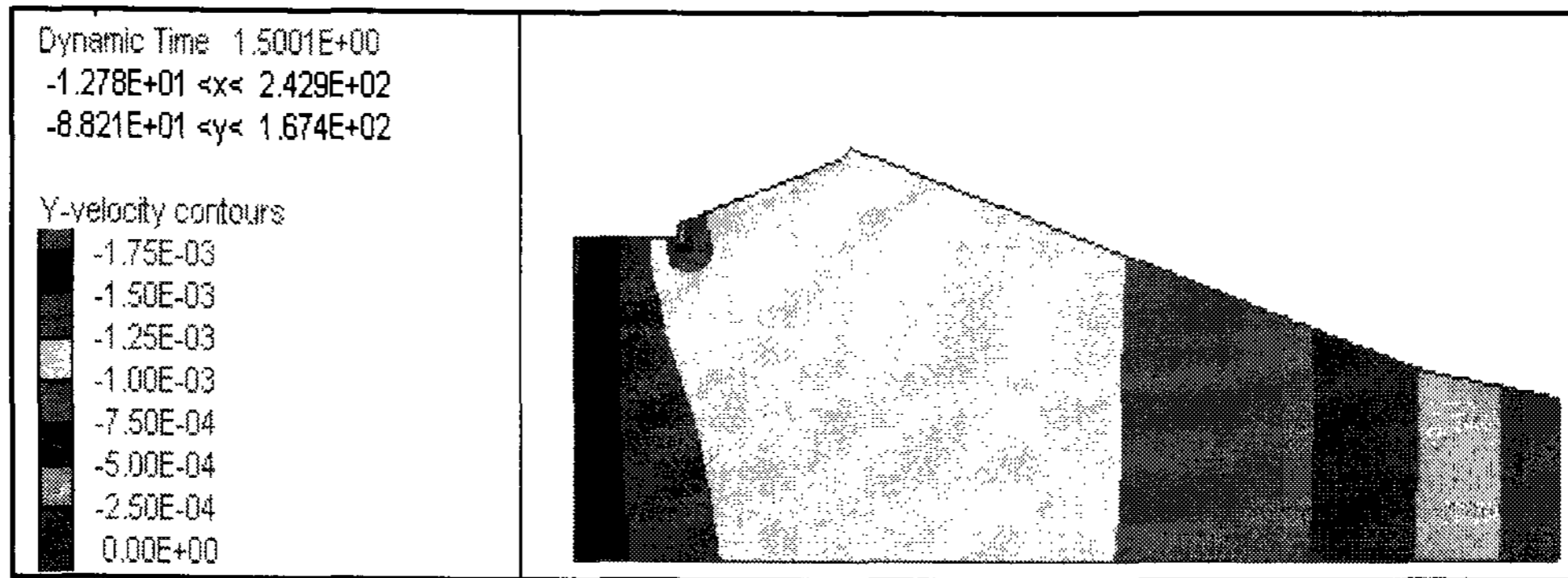


(b) vertical component

그림 5.5 중첩모델링 파형을 이용한 동적수치해석결과 60m와 150m에서 예측된 각 성분별 진동파형



(a) X-velocity



(b) Y-velocity

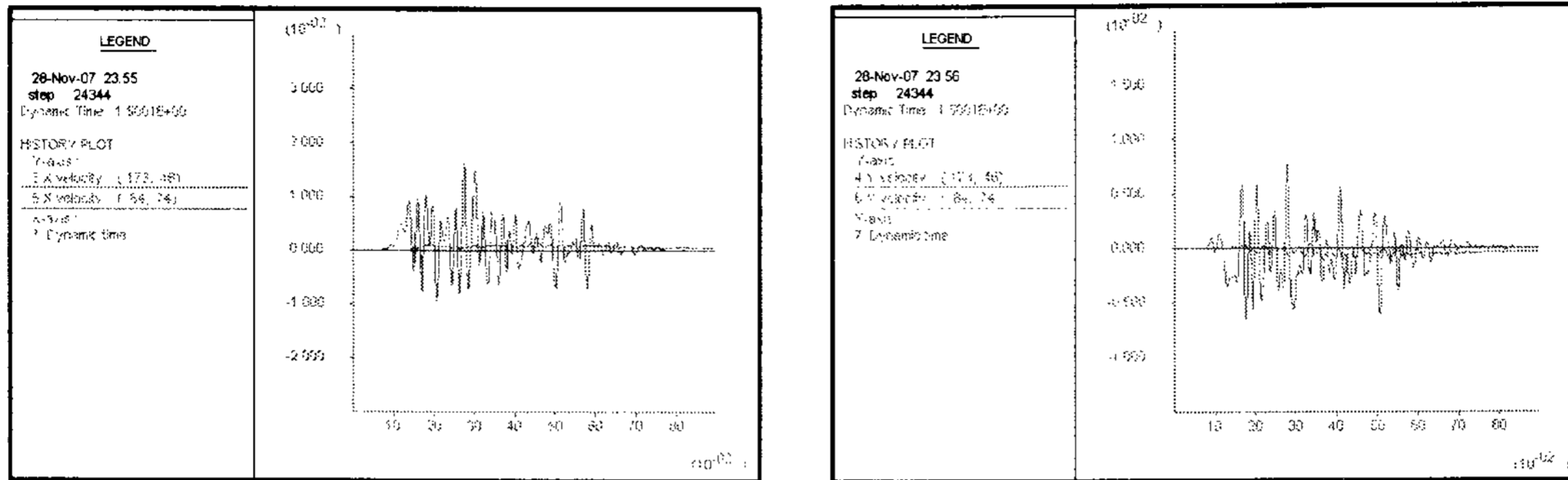
그림 5.6 중첩모델링 파형을 이용한 동적수치해석 결과

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

수치모델링의 적합성 판단을 위하여 SN.1 실측진동파형을 이용한 동적수치해석을 실시하였으며 표 5.3은 동적수치해석결과와 60m와 150m에서 실측된 진동속도를 비교한 것이다. 그림 5.7은 60m와 150m에서의 각 성분별 진동속도파형을 도시한 것이다. 또한 그림 5.8은 동적수치해석 결과 수치모델 내에 나타난 X방향 진동속도와 Y방향 진동속도의 분포를 도시한 것이다.

표 5.3 동적수치해석 결과와 실측 진동속도 비교

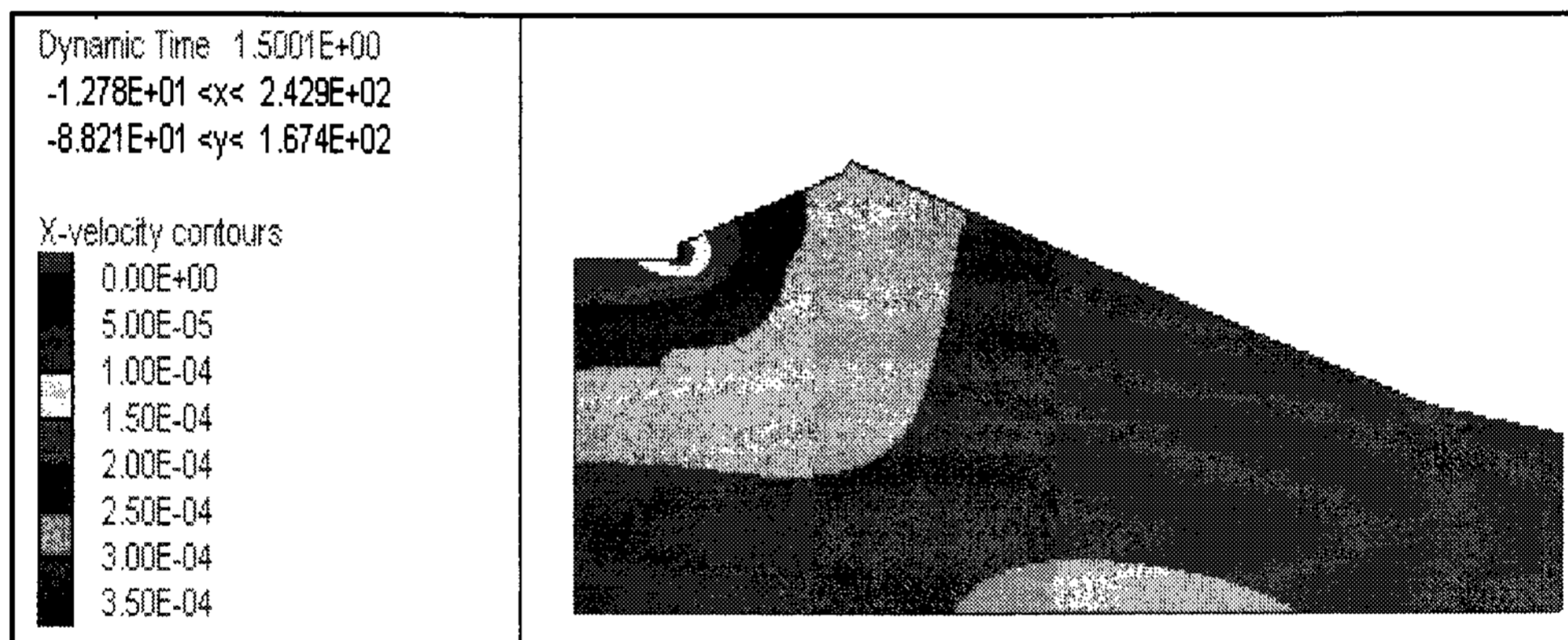
Velocity (mm/sec)	Measuring result		Dynamic analysis	
	60m	150m	60m	150m
Longitudinal component	15	1.17	16.4	1.22
Vertical component	7	1.13	7.7	1.16



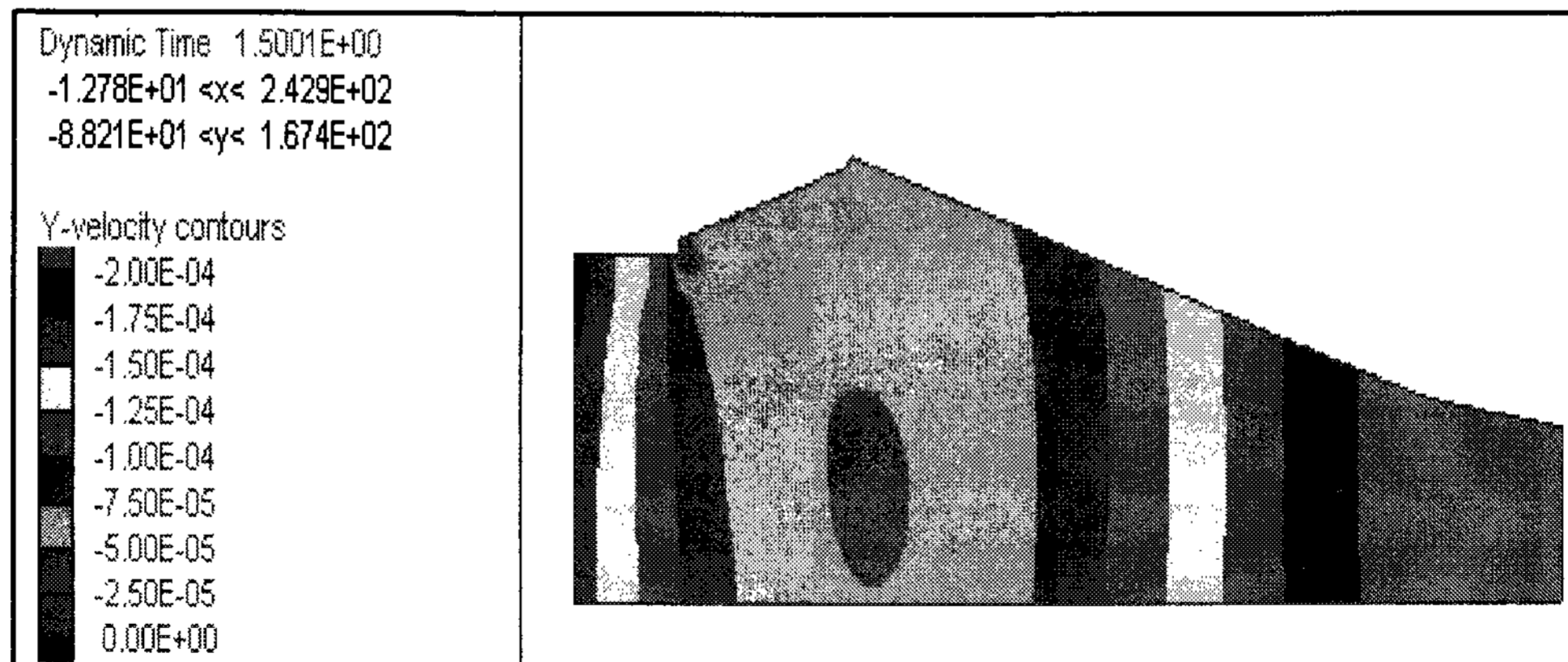
(a) Longitudinal component

(b) Vertical component

그림 5.7 SN. 1 실측진동파형을 이용한 동적수치해석결과 60m와 150m에서 예측된 각 성분별 진동파형



(a) X-velocity



(b) Y-velocity

그림 5.8 SN. 1 실측진동파형을 이용한 동적수치해석 결과

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

## 8. 결 론

본 연구에서는 단일공 및 시추공 발파 진동파형을 중첩모델링 하여 획득한 진동속도파형을 발파 동적수치해석의 발파하중으로 작용 시키는 것에 대해 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 중첩모델링의 적합성 판단을 위해 실시한 단일공 파형을 이용한 본발파 파형의 시차분석 결과 단일공 파형을 이용한 중첩모델링으로 실제 발파 시 발생할 것으로 예상되는 진동파형을 획득할 수 있음을 알 수 있었다.
2. 현장에서 실제 측정된 진동속도를 변화시키는 요소는 단순히 장약량과 뇌관지연시차만이 영향을 주는 것이 아니며 지질특성, 기폭방향, 뇌관발화오차 등 다양한 변수에 의해 변화되는 것으로 판단된다.
3. 중첩모델링 결과 생성된 파형을 이용한 동적수치해석 결과 60m에서 9.8mm/sec, 150m에서 1.75mm/sec의 최대진동속도가 예측되었다. 각 위치의 단일공파형을 중첩모델링한 결과 역시 60m에서 9.91mm/sec, 150m에서 1.64mm/sec로써 수치해석결과와 0.11mm/sec의 근소한 차이를 보였다

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.

## 참 고 문 헌

1. 강추원, 김승현, 박현식, 2006, “중첩모델링을 통한 발파진동의 특성에 관한 연구”, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제16권, 제4호, pp. 326~332.
2. 김종인, 2006, “단일공파형 중첩모델링 자료에 의한 발파진동의 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”, 대한화약발파공학회, 화약·발파 제24권, 제2호 99. 41~50.