

# 충격진동 예측방법에 관한 연구

조규용<sup>1)</sup> · 강추원<sup>1)</sup>

## 1. 서론

최근 도심지 재개발사업의 증가, 노후 산업건물의 개축 및 증축을 위한 대규모 건축물의 철거에 발파해체공법이 적용되고 있다.

그러나 발파해체공법으로 철거 시 화약력으로 인한 비석, 소음 및 낙하중량의 충격으로 인해 발생하는 진동의 영향으로 주변 보안물건에 영향을 줄 수 있다. 특히 구조물 해체 시 발생하는 진동은 폭약이 장전공 내에서 폭발할 때 발생하는 발파진동과 구조물 붕괴 시 부재가 지면과 충돌하여 발생하는 충격진동으로 구분할 수 있다. 일반적으로 발파에 의한 진동을 예측할 경우 지발당 장약량을 기준으로 산출하고 건물해체 시 발생하는 충격에 의한 예측에는 건물의 중량과 낙하높이에 따라 적용한다. 또한 진동수준은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등에 의해 결정되는데 이러한 조건은 발파진동과 비슷한 조건이다.

이 요인들 모두가 충격진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 되며, 이중에서도 건물의 중량, 낙하높이와 보안물건(측점간의 거리)과의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용한다. 건물의 발파해체공법은 주로 도심지의 고층건물의 철거에 적용되고 있기 때문에 구조물에 낙하충격에 의한 진동으로 인해 보안물건에 심각한 손상을 끼칠 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점 때문에 진동 감쇠기법과 낙하중량에 의한 충격진동에 관한 연구가 진행되고 있다.

이러한 흐름에 맞춰 본 연구에서도 낙하중량에 의한 충격진동을 예측하는 방법에 대한 새로운 방법을 제시하고자 한다. 기존의 발파진동추정식(예측식)에서 사용하는 환산거리 변수에서 장약량에 대해서 낙하충격진동을 예측할 때는 위치에너지를 사용하는데 본 연구에서는 충격량으로 산정하는 식을 제안하였고 낙하중량이 지면에 충격을 가하는 시차에 따른 진동 중첩의 원리를 자유낙하시차와 낙하충격량의 거리별 감쇠율을 적용하여 충격진동을 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 충격진동 예측식

### 2.1 기존의 예측식

Robert Folchi는 14층 건물이 수직으로 붕괴될 때 건물의 중심으로부터 거리 D만큼 떨어

---

1) 조선대학교

진 지점에서 예상되는 지반진동을 식(1)과 같이 표현하였다.

$$V_{\max} = 167.3 D^{-1.41} \quad (1)$$

여기서,  $V_{\max}$ : 예상 지반진동(cm/sec)

$D$  : 충격질량 중심으로부터 측정지점까지의 거리(m)

상기의 식은 거리만을 변수로 하고 있으며 충격량의 규모에 따른 변수가 포함되어 있지 않기 때문에 상기 식이 적용된 특정 지역 외의 일반적 적용이나 실제 여러 발파패턴에 대한 효과를 예측함에 있어서 제한을 갖고 있다.

또한 국내에서는 충격에 의한 지반진동의 전파특성을 고찰하기 위하여 추를 이용한 충격 실험을 실시하여 나온 결과를 분석하여 낙하충격에 의한 지반진동의 속도는 발파에 의한 예측식의 환산거리 변수에서 장약량 대신 에너지 양을 사용하여 유도할 수 있음을 보여주었다. 낙하충격에 의한 지반진동 전파는 추의 위치에너지를  $E(J)$ , 낙하지점에서의 거리  $D(m)$ 에서의 최대진동속도를  $PPV$ 라 할 때 식(2)로 표현하였다.

$$PPV = K \left( \frac{D}{\sqrt{E}} \right)^n \quad (2)$$

여기서,  $V$ : 최대 진동속도(mm/sec)

$D$ : 충격지점으로부터의 거리(m)

$E$ : 낙하물체의 초기 위치 에너지(J)

$K, n$ : 입지상수

$$E = mgh \quad (3)$$

여기서,  $m$ : 추(부재)의 질량(kg)

$g$ : 중력가속도( $9.8m/sec^2$ )

$h$ : 추(부재)의 높이(m)

## 2.2 충격진동 예측식 제안

기존의 예측 식(2)처럼 환산거리변수에서 위치에너지를 장약량 대신 사용한다면 높이가 2배 증가한 경우와 하중을 2배 증가한 경우의 위치에너지는 같게 된다. 하지만 지면에 발생시키는 충격량의 차이가 발생한다. 하중을 2배 증가할 때에는 충격량도 하중만큼 2배 증가하지만 높이가 2배 증가할때는  $\sqrt{2}$ 만큼 증가한다. 그러므로 환산거리 변수를 사용하는데

있어 장약량 대신 사용하는 것은 위치에너지가 아닌 지면에 닿는 충격량을 사용하여야 할 것으로 판단된다. 환산거리변수에서 장약량 대신 충격량을 사용한 다음 식(4)를 본 연구에서는 제안하고 사용하였다.

$$PPV = K \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^n \quad (4)$$

여기서,  $V$  : 최대 진동속도( $mm/sec$ )

$D$  : 충격지점으로부터의 거리( $m$ )

$I$  : 낙하물체가 지면과 충돌시 발생하는 초기충격량

$K, n$  : 입지상수

본 연구에서 사용한 충격량은 다음과 같다.

어떤 형태의 충돌에 대해서도 충돌 전의 총 운동량은 충돌 후의 전체 운동량과 같다. 어떤 형태의 충돌에서도 총 운동량은 보존된다고 말할 수 있다. 그러나, 물체들이 변형될 때 운동 에너지의 일부가 열에너지와 내부 탄성위치 에너지로 변환되기 때문에, 충돌에서 총 운동 에너지는 일반적으로 보존되지 않는다.

비탄성 충돌이란 운동량은 보존되지만, 운동에너지는 보존되지 않는 충돌이라고 정의한다. 단단한 표면을 가진 고무공의 충돌은 표면이 접촉하는 동안 모양이 변형되면서 운동 에너지가 손실되므로 비탄성 충돌이다. 두 물체가 충돌하여 함께 달라붙을 때, 이 충돌을 완전 비탄성 충돌(perfectly inelastic collision)이라고 한다. 예를 들면, 두 찰흙 덩어리들이 충돌한다면, 충돌 후에 함께 달라붙어서 어떤 공통 속도로 움직인다. 만일 운석이 지구에 정면 충돌하면 운석은 지구에 파묻히게 되고, 이 충돌은 완전 비탄성 충돌로 간주된다. 완전 비탄성 충돌의 경우 항상 처음 운동 에너지가 전부 손실 되는 것은 아니다.

탄성 충돌은 운동량뿐만 아니라 운동 에너지 둘 다 보존되는 것으로 정의한다. 당구공의 충돌과 상온에서의 공기 분자들과 용기의 벽과의 충돌은 매우 탄성적이다. 당구공 사이에서의 충돌과 같은 거시적인 충돌은 약간의 영구적인 변형과 운동에너지의 손실이 발생되기 때문에 근사적으로 탄성 충돌이다. 하지만, 원자나 원자의 구성입자들 사이에는 완전 탄성 충돌이 발생한다. 완전 탄성 충돌이나 완전 비탄성 충돌은 제한적인 충돌이다. 즉, 대부분의 실제적인 충돌은 이 두 범주 사이에 속한다.

충돌의 유형을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 탄성 충돌은 운동량과 운동 에너지가 모두 보존되는 충돌이다.
- 비탄성 충돌은 운동량은 보존되지만, 운동 에너지는 보존되지 않는 충돌이다.
- 완전 비탄성 충돌은 충돌 후에 두 물체가 함께 들어붙어 나중 속도가 같아지고, 계의 운동량은 보존된다.

완전 비탄성 충돌은 어느 직선을 따라  $v_{1i}$  와  $v_{2i}$  로 움직이는 질량이  $m_1$  과  $m_2$  인 두 물체에 대해서 생각해 보자. 물체들이 정면충돌한다고 가정하면, 이들은 충돌 후에 같은 직선

조규용, 강추원

상에서 운동을 한다. 만약 두 물체가 충돌 후에 함께 붙어서 같은 속도  $v_f$ 로 움직인다면 오직 운동량만이 보존되며 따라서 충돌 전과 후의 총 운동량은 같다고 말할 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$I = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2i} = (m_1 + m_2) v_f \quad (5)$$

$v_{1i}$ ,  $v_{2i}$  및  $v_f$ 는 벡터  $V_{1i}$ ,  $V_{2i}$  및  $V_f$ 의  $x$ 성분을 나타낸다.

일직선상에서 발생하는 위 식(5)를 자유낙하에 적용하면 자유낙하를 통해 지반에 충격을 가한후 충격 후 에너지는 지반을 통한 진동으로 나타난다. 이 경우  $v_{1i}$ 은 지면에 도달할 때의 속도,  $v_{2i}$ 는 지반에 충격을 가한후 소멸된 속도라고 하고  $m_1$ 은 충격 전 무게,  $m_2$ 는 충격 후 무게라고 한다면 충격 후 지반진동으로 발생하므로 충격 후 속도는 0으로 볼 수 있다.

충돌 전의 운동량인 초기충격량은 다음 식(6)과 같다.

$$I = m v \quad (6)$$

여기서,  $I$  : 낙하물체가 지면과 충돌시 발생하는 초기충격량( $kg \cdot m/sec$ )

$m$  : 부재의 질량 ( $kg$ )

$v$  : 자유낙하속도( $m/sec$ )

충돌 후 운동량은 지반진동으로 변화되면서 속도는 소멸된다고 생각할 수 있다. 그리고 자유낙하로 지면에 닿는 속도를 산정한다면 자유낙하에 의한 충격에너지를 구할수 있다. 식은 다음과 같다.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (7)$$

여기서,  $v$  : 자유낙하속도( $m/sec$ )

$g$  : 중력가속도( $9.8m/sec^2$ )

$h$  : 부재의 높이( $m$ )

위 식(7)을 이용한다면 높이별 속도를 구할수 있다. 또한 식(7)을 식(6)에 대입하면 다음과 같다.

$$I = m \sqrt{2gh} \quad (8)$$

여기서,  $I$  : 낙하물체가 지면과 충돌시 발생하는 초기충격량

$m$  : 부재의 질량 ( $kg$ )

$g$  : 중력가속도( $9.8m/sec^2$ )

$h$  : 부재의 높이 ( $m$ )

위 식(8)에서 알 수 있듯이 충격량은 중량에 대해서는 중량의 배수만큼, 높이에 대해서는  $\sqrt{h}$  만큼 증가함을 알 수 있다.

본 연구에서는 충격량을 환산거리에서의 장약량 변수 대신 사용하였다. 하지만 위 식(4)는 자유낙하에 의한 충격진동을 예측한 것이므로 실제 건물발파해체에 적용한다면 파괴된 부재의 형태자체가 단순한 형상이 아닐 경우의 충격흡수 영향문제에 대한 고려가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 위 식(4)를 이용하여 충격진동 추정식을 구하였고 거리별 감쇠지수를 산출하는데 사용하였다. 그리고 한번의 낙추실험으로 얻은 데이터 파형을 중첩시켜 중첩 모델링을 통한 예측을 하였다

### 3 실험방법

#### 3.1 낙하충격실험 개요

지반에 충격진동을 주기 위해서 본 실험에서는 조선대학교 주차장 바닥위에 실험장치를 고정시키고 중량 1.70kg ~ 5.6kg의 콘크리트 블록을 자유낙하 하도록 설계하였다. Fig. 1은 실험장치를 나타낸 것이다. 이러한 고정틀을 만들어서 낙하도중 발생할 수 있는 회전운동을 최소화 시킴으로써 비교적 정확하게 낙하할 수 있도록 하였다.

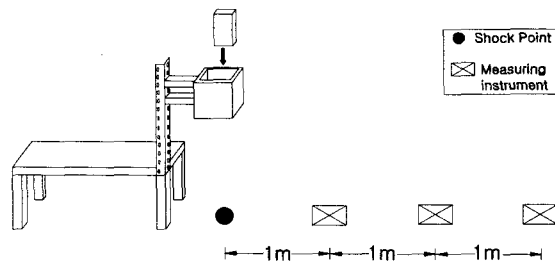


Fig. 1. The position of experimental instrument and measuring instrument

콘크리트 블록의 낙하높이를 1m, 2m의 높이에서 실시하였고 콘크리트 블록의 중량은 1개, 2개 및 3개를 연결함으로써 중량 증가에 따른 실험을 실시하였다. 또한 지반과 접촉면적이 다른 가로방향과 세로방향으로 낙하시킴으로써 접촉면적에 따른 진동수준의 차이를 비교실험 하였고 바닥에 블록을 1단과 2단을 쌓아 블록위에 낙하 충격을 줌으로써 붕괴 부산물에 의한 진동 감쇠 수준을 측정하였다. 이러한 방법으로 총 60회의 낙하실험을 실시하였으며

진동측정은 낙하지점으로부터 1m, 2m, 3m 지점에 진동측정기를 설치하여 진동을 측정하였다.

### 3.2 발파진동 계측기

#### 계측기기

본 연구에 사용된 발파진동 계측기기로는 Instantel INC.의 BlastMate Series인 BlastMate III 3대를 사용하였다.

측정기는 낙하지점을 기준으로 하여 일직선상으로 1~3m의 거리에 1m간격을 두고 설치하였으며, 계측기의 센서는 모두 주차장 바닥에 고정하였다.

BlastMateIII는 현장의 발파 및 건설장비 등을 이용한 작업 시 발생하는 소음, 진동 등을 계측하여 진행, 접선, 수직 및 주파수 등을 현장에서 print하여 진동 계측 값을 손쉽게 확인할 수 있으며, Scaled Distance 등을 수동 입력하면 이를 자동으로 계산하는 기능뿐만 아니라, 진동측정의 주파수 및 시간이력 등을 상세히 보여주는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 진동측정기이라 할 수 있다.

## 4. 계측결과 및 분석

### 4.1 실험방법별 계측결과

일반적으로 발파에 의한 진동 예측식에서 변수로 사용하는 환산거리는 거리를 사용화약량에 의하여 환산한 것이다. 장약량은 폭원에서 에너지양에 비례하며 따라서 충격진동의 경우에도 장약량에 해당하는 충격량 변수의 사용을 고려하여 볼 수 있다. 충격 시 지반에 전달되는 에너지는 블록이 지면에 닿을 때의 속도와 중량에 의해 변환되므로 계측자료의 처리는 장약량 변수를 충격량 변수로 대체하였다. 본 연구에서 획득한 데이터 수는 총 126개이다. 낙하방향별 개수는 Table 1, 2와 같다. 또한 획득한 데이터의 회귀분석 결과를 type I~TypeXIII으로 표현하였다.

Table 1. Length direction

Falling height (m)	The number of Blocks	The number of Daters	Result Type	
1	1	27	Type I	TypeIX
	2	15	TypeII	
	3	6	TypeIII	
2	1	15	TypeIV	Type X
	2	12	TypeV	
sum	-	75		TypeXI

Table 2. Width direction

Falling height (m)	The number of Blocks	The number of Daters	Result Type	
1	1	6	TypeVI	
2	1	18	TypeVII	TypeXII
	2	27	TypeVIII	
sum	-	51		TypeXIII

#### 4.2 계측결과 분석

본 연구에서 낙하충격진동을 낙하방향, 높이, 중량(개수)별로 실험한 결과로 구분하여 각각의 95% 충격진동 추정식을 다음과 같이 산출하였다.

##### 낙하방향, 높이 및 중량별 충격진동 추정식

Type별로 계측된 값을 낙하방향, 높이 및 중량별로 회귀분석에 의해 입지상수  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 95% 충격진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = 0.346 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.09} \quad r^2=0.873 \quad (9)$$

$$V = 0.296 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.32} \quad r^2=0.956 \quad (10)$$

$$V = 0.234 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.26} \quad r^2=0.939 \quad (11)$$

$$V = 0.229 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.30} \quad r^2=0.926 \quad (12)$$

$$V = 0.282 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.37} \quad r^2=0.984 \quad (13)$$

$$V = 0.114 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.44} \quad r^2=0.929 \quad (14)$$

$$V = 0.183 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.18} \quad r^2=0.871 \quad (15)$$

$$V = 0.260 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.01} \quad r^2=0.565 \quad (16)$$

식 (4.1)~(4.8)은 95%의 신뢰도를 가지는 식으로  $K$ 값은 0.114~0.386로 나타났으며,  $n$ 값은 -1.01~-1.44로 나타났다. 그리고 결정계수는 0.565~0.984로 나타났다.

**낙하방향 및 높이별 충격진동 추정식**

Type별로 계측된 값을 낙하방향 및 높이별로 회귀분석에 의해서 입지상수  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 95% 충격진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = 0.331 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.24} \quad r^2 = 0.919 \quad (17)$$

$$V = 0.267 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.49} \quad r^2 = 0.904 \quad (18)$$

$$V = 0.319 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.31} \quad r^2 = 0.896 \quad (19)$$

$$V = 0.233 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.04} \quad r^2 = 0.683 \quad (20)$$

$$V = 0.217 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.07} \quad r^2 = 0.691 \quad (21)$$

식(4.9)~(4.13)은 95%의 신뢰도를 가지는 식으로  $K$ 값은 0.217~0.331로 나타났으며,  $n$ 값은 -1.04~-1.49로 나타났다. 그리고 결정계수는 0.683~0.919로 나타났다.

**위치에너지와 충격량 비교**

본 회귀분석을 함에 있어 환산거리 변수에 위치에너지를 산정했을 때와 충격량을 산정했을 때를 비교해보면 같은 높이에서의 회귀분석에서는  $K$ 값만 변했다. 하지만 높이가 서로 다른 TypeXI에서는  $K$ ,  $n$ ,  $r^2$ (결정계수)에서 차이를 보였다. 위치에너지를 산정했을 때의 충격진동 추정식은 아래 식(22)와 같다.

$$V = 0.300 \left( \frac{D}{\sqrt{E}} \right)^{-0.96} \quad r^2 = 0.845 \quad (22)$$

아래는 충격량을 산정했을때의 충격진동 추정식이다.

$$V = 0.319 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.31} \quad r^2 = 0.896 \quad (23)$$

위 두 식(22), (23)은 동일 측정값을 이용한 회귀분석 결과이다. 두 식을 비교해보면 결정계수에서 차이가 난다. 이것은 앞 절에서 언급했듯이 중량과 높이에 따른 적용방법의 차이라고 판단된다.

또한 식(9)~식(11)은 블록시료가 동일높이(1m)에서 각각 1개, 2개, 3개로 중량을 증가시켜 낙하충격 실험을 통해 획득한 식이다. 본 제안식에서는 중량이 2배, 3배가 되면 충격량도 2



배, 3배가 된다. 하지만 진동값은 2개일때 2배가 아닌 예상치의 0.945배, 3개일 때는 3배가 아닌 0.84배의 진동값을 나타낸다. 이 진동값의 결과는 회귀분석에서의 충격량증가에 의한 진동 결과값과 비교해 보면 일치함을 알 수 있다.

식(9)와 식(12), 식(10)와 식(13)은 각각 동일 중량일 때의 높이증가에 따른 진동값에 대한 예측식이다. 본 제안식에서는 높이가 증가함에 따라 충격량은  $\sqrt{h}$  배 증가한다. 다시 말해 동일중량으로 실험할 경우 낙하높이를 1m에서 2m로 증가시키면 충격량은  $\sqrt{2}$  배 증가한다는 것이다. 이 실험자료 역시 식(9)와 식(10)을 기준값 1로 하고 식(12)과 식(13)의 결과값을 분석해보면 높이증가에 따른 결과는 기준값보다 약 1.085배, 1.38배 증가하는 것으로 나타났다. 이 두 개의 결과는 TypeXI의 회귀분석 결과를 기준으로 중량과 높이에 대한 비교를 하였다. 회귀분석 결과와 실제 실험에서 측정된 진동값의 결과가 거의 일치함을 나타냄으로 본 연구에서 제안한 식(4)의 충격량을 환산거리 변수로 적용함은 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

#### n(감쇠지수)의 변화에 의한 거리별 감쇠율 분석결과

본 연구에서는 회귀분석을 통한 95% 충격진동 추정식의 n(감쇠지수)값으로 중첩모델링의 거리별 감쇠율로 사용한다. 식(9)~(16)의 결과는 각각 낙하높이, 중량 및 낙하방향의 변수가 하나일 때의 결과이다. 이 경우 식(16)을 제외하면 결정계수가 높게 나오는 것을 알 수 있다. 식(17)~(21)까지는 동일 높이의 낙하충격 진동 값에 대한 충격진동 추정식이다. 이 경우에는 결정계수가 약간 낮아졌다. 또한 한번의 충격으로 발생하는 거리별 진동 값에 대한 결정계수는 거의 모든 값이 1에 근사한 값을 나타냈다. 하지만 60회 정도의 실험결과로 어느 지반을 대표한다고 할 수 없으므로 보다 많은 정확한 실험을 통해 지반의 감쇠지수 대표 값을 산정해야 할 것이다. 본 연구에서는 실험결과 중 결정계수가 가장 높은 값인 식(10), (11), (13)의 실험데이터 중에서 중첩모델링에 적용할 데이터를 선정하였고 위 세 개의 데이터를 모두 포함한 식(19) 대표값으로 하였다. 거리별 감쇠율은 회귀분석을 통한 추정식의 n 값에만 영향을 받으며 초기값에 대해 일정한 비율로 감소한다.

## 5. 충격 진동의 중첩모델링

### 5.1 대상 파형의 선정

선정된 파형은 주변의 noise에 의해 교란되지 않은 비교적 양호한 파형을 보이며 동일거리에서 평균치에 근사한 수준으로 보이는 진동데이터를 선정하였다. 잔여진동이 많은 파형은 중첩모델링과정에서 부정확한 결과를 보일 가능성이 많아 선정에서 제외하였다. 신뢰성을 높이기 위해 대표값으로 선정된 진동데이터 내에서 선정하였으며 높이와 중량이 각각 다른 파형을 선택하였다. 선정된 파형은 자료처리의 편의를 위하여 T1, T2, T3의 번호를 부여하였고, 위 세 개의 데이터가 모두 포함된 TypeXI를 대표값으로 사용하였다.

## 5.2 파형의 중첩 방법

선정된 파형은 층별 낙하시간차를 이용하여 시차에 따라 중첩시켜 초기파형을 만들었다. 건물의 전체하중을 지발시차별로 나누어 각 지발당 중량을 산출하였으며 이렇게 산출한 지발당 하중을 다시 1ms간격으로 세분화하여 1ms의 하중에 의한 진동데이터를 1지발 시차까지 1ms간격으로 중첩을 실시하였다. 중첩을 통해 만들어진 파형을 낙하실험에 의해 산출한 감쇠지수를 적용하여 거리별 파형으로 변환하였다.

본 연구에서는 낙하충격실험에 대해 다음과 같은 가정 하에서 중첩모델링 시험을 시행하였다.

- ① 동일한 지반에서는 모든 낙하충격실험에서 동일한 진동파형이 발생한다.
- ② 높이는 잔재물의 높이에 따른 충격흡수제 역할을 할 것으로 판단되므로 각층이 바닥에 충격을 가하는 시점에서 다음 층의 높이를 계산한다.
- ③ 주파수( $f$ )는 고려하지 않았다.

## 5.3 중첩모델링 결과

본 연구에서는 중첩모델링으로 결과를 산출하기 위해 한번의 충격으로 발생하는 진동값에 대한 중첩을 하였다. 실제 파형과 비슷한 파형과 진동값을 예측하기 위해 만들기 위해 중량과 높이를 산정해야 한다. 중량과 높이는 발파해체공법으로 철거된 조선대학교 제1공학관을 기준으로 산정하였으며 T1, T2, T3는 건물의 가장자리에서 동일거리까지(13m) 임의의 축점을 선택하여 중첩모델링을 하였다.

중첩모델링 결과는 다음 Fig. 2, 3, 4와 같다.

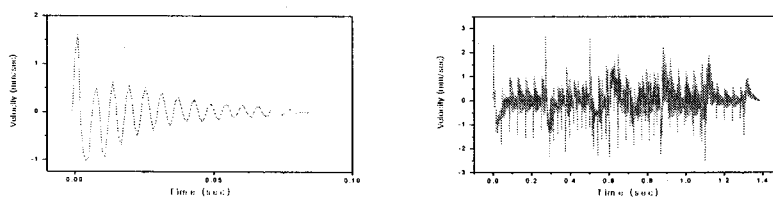


Fig. 2. T1 waveform and Superposition modeling waveform of T1

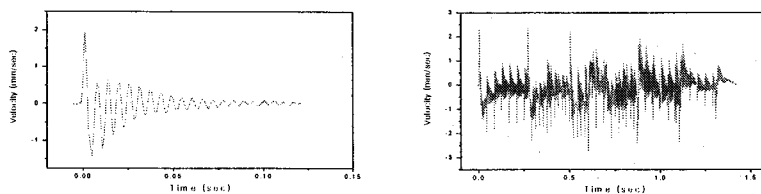


Fig. 3. T2 waveform and Superposition modeling waveform of T2

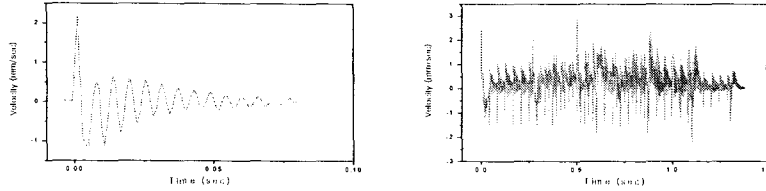


Fig. 4. T3 waveform and Superposition modeling waveform of T3

## 6. 결론

건물해체 시 충격진동에 대한 예측은 많은 경험식을 사용하고 있다. 각기 다른 높이에 있는 슬라브는 중량이 지면에 닿는 부분의 시간은 전체 층이 같은 조건이므로 자유낙하의 높이에 따른 시간차와 비슷한 양상을 보일 것이다. 자유낙하에 의한 시간차를 각 층의 높이에 적용함으로써 각 층의 슬라브 중량이 자유낙하시차에 의해 지면에 충격을 가할 것이다. 그러므로 건물해체 시 발생하는 충격진동을 예측하기 위해서 본 연구에서는 충격량을 환산거리 변수로 사용할 것을 제안하고 낙하충격실험을 통한 진동데이터의 거리별 감쇠율, 높이별 자유낙하시차 및 1ms 간격의 중첩모델링을 이용하여 충격진동을 예측하는 방법을 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 무게가 다른 블록을 낙하했을 때 발생하는 낙하충격진동을 1m, 2m, 3m에서 측정하였고, 측정결과로부터  $K$ ,  $n$  값을 구하기 위해 발파진동 예측식의 지발당장약량에 대해 기존의 위치에너지 대신 낙하중량의 충격량을 적용함으로써 거리별 감쇠율을 구할 수 있었고 중량 증가와 높이 증가를 같이 적용할때는 위치에너지를 산정했을때 보다 더 높은 결정계수로 나타났고 또한 실험자료에 의한 비교에서도 충격량을 적용했을 때 일치함을 나타냈으므로 환산거리 변수에는 충격량을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

$$V = 0.300 \left( \frac{D}{\sqrt{E}} \right)^{-0.96} \quad r^2 = 0.845$$

$$V = 0.319 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.31} \quad r^2 = 0.896$$

2) 낙하중량에 의해 지면에 충격진동이 발생할 때 충격면적에 의한 감쇠적용여부를 판단하여야 할 것이다. 블록으로 실험을 실시했을 때의 시험 결과를 보면 하중은 같고 지면에 닿는 면적을 2~4배정도로 했을 때 지반진동은 약 60~80%의 정도의 평균적인 감쇠가 이루어졌다. 이러한 결과는 블록이 지면에 닿을 때 발생하는 충격면적에 의한 감소로 생각할 수

있겠다. 면적이 넓을수록 동일한 충격량이 넓은 면에 충격을 가하기 때문에 감소할 수 있을 거라 판단된다. 하지만 회귀분석을 해본결과 상관계수와 결정계수가 낮게 도출되어 대표 값으로 쓰기에는 불충분하였다. 그러므로 향후 다양한 실험을 통해 충격면적에 대한 감쇠적용 여부를 판단하여야 할 것이다.

3) 낙하중량의 충격량을 구하기 위한 높이는 지면에 쌓이는 부산물과 자유낙하운동에서의 충격 시차를 이용하여 높이를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 건물 중량을 산정하는데 있어 전체중량을 지발시차와의 비율로 나눠서 시차의 최소단위 1ms에서 받을 수 있는 최대중량을 계산하여 실험데이터인 블록 한 개의 낙하충격진동 데이터와 무게를 비교하여 배수만큼 증폭시키고 1ms간격으로 1지발시차까지 중첩시킴으로써 실제 건물해체발파 시 낙하실험을 통한 거리별 감쇠율을 산정한다면 실제 해체발파 시 비슷한 진동값과 진동파형을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5) 이상의 연구결과로 볼때 충격량을 이용한 추정식에 의해 지반조건에 따른 낙하충격진동의 감쇠지수를 구한 값을 대표값으로 하여 동일 지반에서 한 번의 낙하충격 진동값을 측정하여 해체대상건물에 대한 높이, 중량, 낙하시차에 대하여 중첩모델링을 적용한다면 다른 지반조건에서도 충분히 충격진동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 강추원, 2005, 발파공학 A to Z, 구미서관, pp. 279-290, 444-445.
2. 코오롱건설주식회사, 1995, 건물발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발(건설교통부), 한국자원연구소, pp. 105-111, 173-176.
3. 한국지질자원연구원, 2003, 제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발, 과학기술부, pp. 222-223.
4. 임대규, 임영기, 2004, 발파해체시 낙하충격진동 예측에 관한 연구, 대한화약발파학회지, Vol. 22, pp. 43-45.
5. 김재국, 1997, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, pp. 252, 389-390.
6. 허진, 신 화약발파학, 기전연구사, pp. 265-68.
7. 임한욱, 강추원, 류창하, 1997, 화약 발파, 교육부, pp. 252.
8. 임한욱, 김재동, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, pp. 146-157.
9. Dowding, C.H., 1984, Blast vibration monitoring and control, PRENTICE-HALL, INC., pp. 7-22, 24-40.

10. Langefors, U. and B. Kihlstrom, 1978, The modern technique of rock blasting third edition, pp. 258-293.
11. Holmberg. R. & Persson. P., 1979, Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage, Proc. of IMM Tunnelling '79 Conference, pp. 3-6.
12. 양형식, 주재성, 1990, 노천굴 발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구, 한국자원 공학회지, Vol. 27, pp. 316-323.
13. 대한물리학교재편찬위원회, 2002, 대학물리학, 청문각, pp. 103-114, 133-149.
14. 고영선, 이기락, 김종우, 1996, 낙하충격에 의한 지반진동특성에 관한 연구, 産業科學研究, Vol. 14.
15. 장호민, 2004, 발파진동 파형 분리분석을 통한 다단발파 특성에 관한 연구, 조선대학교 석사학위논문, pp. 16, 45-48.
16. 김종인, 2006, 단일공 파형 중첩 모델링 자 룠에 의한 발파진동의 예측, 조선대학교 박사 학위논문.
17. 김건우, 2004, 통계학개론, 신영사.
18. 대한주택공사 주택도시연구원, 2006, 건축구조·토질기초의 A to Z, 지문당.