

연구논문

## 매질특성에 따른 충격진동평가에 관한 연구

송정언\* · 홍웅기\*\* · 김승곤\*

전북대학교 자원·에너지공학과\*, 서남대학교 환경·화학공학과\*\*

(2011년 8월 24일 접수, 2011년 9월 15일 승인)

## A Study on the Evaluation of Shock Vibration by a Medium Characteristics

Jeong-Un Song\* · Woong-Ki Hong\*\* · Seung-Kon Kim\*

Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Chonbuk National University\*

Department of Environmental & Chemical Engineering, Seonam University\*\*

(Manuscript received 24 August 2011; accepted 15 September 2011)

### Abstract

The ground vibration has effect on the human body and the nearby structure. However, it was very difficult to estimate the damage of structure caused by the vibration. Especially, ground vibration must be estimated on the bottom of structure because it was made up of several mediums. In this study, it was considered about the shock vibration on medium characteristics as calculating the peak particle velocity and analysing the vibration waveform. The results are as follows : Firstly, the correlation coefficient of PPV(Peak Particle Velocity) and SD(Scaled Distance) was very high at the vertical component, which was represented to 0.991 in general ground medium and each 0.989, 0.961, 0.925 in concrete medium. And also, the vibration waveform at the vertical component was very good in all mediums. Secondly, the vibration waveform at the longitudinal component was represented to a great amplitude and phase difference in all mediums. It was considered that the vibration waveform occurred the damping when particle velocity by shock vibration was propagated through other medium. Thirdly, the vibration waveform in concrete medium was represented to variation of amplitude in the order of RC medium, NC=H medium, NC=S medium at the vertical component. It was considered that the particle velocity propagated fast when a medium have a big strength and density.

Keywords : medium characteristic, shock vibration, peak particle velocity, damping

## I. 서론

도심지 내에서의 각종 건설공사에 기인한 지반의 진동은 공사장 주변에서 생활하고 있는 주민들의 민원의 대상이 되며, 또한 공사 현장과 인접한 구조물에 영향을 미칠 수 있다. 구조물에 영향을 미치는 진동의 원인은 크게 지진, 발파진동, 기계진동, 향타진동 등을 들 수 있는데, 특히, 구조물 피해는 지반진동에 의한 부등 침하와 구조물에 직접 전달되는 충격진동이 그 원인으로 된다(Drabkin *et al.*, 1996). 이러한 충격진동의 정도를 파악하기 위한 연구로서 각종 구조물 및 인체의 감응 정도에 미치는 소음·진동의 영향 및 수준 평가(김남수, 1999; 정지문과 양형식, 1999)가 진행되어 왔으며, 구조물에 대한 국외 허용규제 기준을 분석(류창하, 2005)하여 국내에 적용하려는 연구도 있었다. 또한, 공사 현장에서의 충격진동이 인접한 구조물에 미치는 영향에 대한 대부분의 연구(주재성, 1991; 서상근 등, 2000)는 진동속도 허용치로 허용 규제기준을 명시하는 것이었다. 하지만, 진동에 대한 허용 수준의 문제는 진동의 특성과 전파 매질인 지반의 특성에 따라 좌우되므로 구조물 기초의 매질특성에 따른 진동 평가가 요구된다.

본 연구는 각 공사 현장에 인접한 구조물의 기초에 영향을 미치는 지반에서의 충격진동 크기 및 그 변화의 정도를 평가하기 위해 작성되었다. 이를 위하여 각 매질특성에 따른 충격진동 실험을 수행하고, 충격진동 발생원과 이격 거리별 낙하하는 스틸 볼의 충격에너지를 이용하여 최대입자속도를 산출하였다. 아울러 매질에 따른 각 성분별 최대진동속도와 진동파형을 분석하여 그 충격진동 크기의 변화를 고찰하였다.

## II. 진동속도 추정식

충격에너지에 의한 최대 진동속도식(한국건설기술원, 1991; 서울특별시 종합건설본부, 1994)은 미광무공에서 제안된 Devine 식(Devine *et al.*,

1965)으로부터 폭약량으로 기인되는 에너지 항을 위치에너지 항으로 치환한 형태이고 환산거리(Scaled Distance)의 함수로 표현될 수 있으며, 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = K \left( \frac{D}{\sqrt{E}} \right)^n \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 최대 진동속도(mm/s),  $D$ 는 충격 발생원에서의 이격 거리(m),  $E$ 는 충격에너지(Joules),  $K, n$ 은 경험상수이다. 또한, 충격에너지는 스틸 볼이 낙하할 때 발생하는 위치에너지로 산정할 수 있으며, 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E = m \times g \times h \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 스틸 볼의 충격에너지(Joules),  $m$ 은 스틸 볼의 질량(kg),  $g$ 는 중력 가속도(m/sec<sup>2</sup>),  $h$ 는 스틸 볼의 낙하 높이(m)이다.

식 (2)에 의해 산출된 충격에너지( $E$ )와 충격진동 발생원에서의 이격거리( $D$ )로 환산거리(Scaled Distance)를 구할 수 있고, 산출된 환산거리와 측정된 진동속도 값들로 최소자승법에 의한 회귀분석을 수행하여 경험상수  $K$ 와  $n$ 을 산정할 수 있다.

## III. 실험 장치 및 계측 방법

충격진동 실험 장치는 전자석을 이용하여 1.0m 높이에서 스틸 볼을 고정시킬 수 있도록 제작되었고, 지반으로 진동이 균일하게 전파되게 하기 위한 매체로서 충격진동 발생원인 직경  $\Phi 80$ mm, 길이 30cm의 스틸 스틱을 낙하하는 스틸 볼의 충격 지점에 삽입하였다. 충격진동 실험에 사용된 스틸 볼은 각각 0.22kg, 0.28kg, 0.44kg, 0.88kg의 질량을 가진 구형 볼이고, 충격 지점에 각각 5회씩 총 20회를 낙하하였다. 충격진동 발생원으로부터 이격 거리는 0.5m, 1.0m, 1.5m로 나누어 충격진동을 계측하였다. Figure 1은 충격진동 실험 장치를 나타내고 있다.

충격진동의 크기를 측정하기 위한 진동 계측기기는 Canada Instantel사에서 제작된 BlastMate II DS-477 계측기기 2대, BlastMate III 계측기기 1



Figure 1. Image of Shock Vibration Test Device

Table 1. Measurement Condition of BlastMate Device

Trigger Source	GEO
Trigger Level	0.13 mm/sec
Record Time	1.0 second
Record Mode	SINGLE SHOT
MIC Weight	LINEAR

대를 사용하였다. BlastMate 진동 계측기기는 하나의 센서로 최대 진동속도(PPV)의 수직성분 (Vertical)과 진행성분(Longitudinal), 접선성분 (Transverse)을 동시에 측정할 수 있으며, 세 성분의 벡터 합인 PVS(Peak Vector Sum) 값을 측정할 수 있다. Table 1은 진동 계측기기의 계측 조건을 나타내고 있다.

계측 방법은 충격진동 발생원에서의 이격 거리 0.5m를 1point로 하고 BlastMate III 진동 계측기기를 충격진동 발생원과 일직선상으로 고정하였으며, 이격 거리 1.0m 및 1.5m를 2point와 3point로 하여 BlastMate II DS-477 진동 계측기기를 충격진동 발생원과 일직선상으로 고정하여 충격진동을 계측하였다. 다만, 충격진동 발생원과의 이격 거리가 1.0m, 1.5m 사이의 지점에서는 지반의 매질 조건

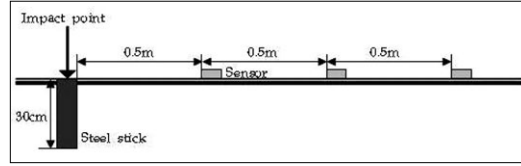


Figure 2. Description of Sensor Position on Ground Medium

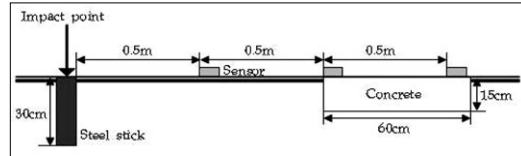


Figure 3. Description of Sensor Position on Each Concrete Medium

Table 2. Compounding Ratio of Materials

Material	Weight ratio			Cement/ Water ratio
	Cement	Sand	Water	
NC=S	1.0	14.0	2.0	0.5
NC=H	1.0	4.0	0.667	1.5
RC	1.0	2.45	0.485	2.1

만을 달리하였다. 매질 조건으로 사용된 콘크리트 매질은 15×15×60cm 규격으로 충격진동 실험을 할 때마다 각각의 콘크리트 매질을 동일한 계측 지점에 삽입 한 후 충격진동 실험을 실시하여, 각각의 다른 매질 위에서의 충격진동 데이터를 확보하였다.

지반의 매질 조건은 일반적인 지반 매질(Figure 2)과 연한 무근콘크리트 매질, 보통 무근콘크리트 매질, 보통 철근콘크리트 매질(Figure 3)로 분류하였는데, 각각의 콘크리트 매질들은 제작 당시의 콘크리트 배합비에 따라 연한 무근콘크리트 매질 (NC=S), 보통 무근콘크리트 매질(NC=H), 보통 철근콘크리트 매질(RC)로 명시하였다. 또한, 보통 철근콘크리트 매질은 직경  $\Phi$ 8mm 인 이형철선으로 4개의 주철근과 매질의 상·하단 6cm 위치에 2개의 띠철근이 삽입되어 있다. 충격진동 실험에 사용된 콘크리트 매질들은 Table 2와 같은 배합비로 제작되어 5년 이상 경과된 것으로서, 각각 물성이 상이한 콘크리트 매질들이다. Figure 2는 매질 조건이 일반적인 지반에서의 진동 계측기 센서 위치이고, Figure 3은 각각 서로 다른 콘크리트 매질 상태에서의 진동 계측기 센서 위치를 나타낸 것이다.

### IV. 실험 결과 및 고찰

#### 1. 매질별 진동속도 추정식

동일한 낙하 높이에서 서로 다른 질량을 가진 4

개의 스틸 볼을 낙하시켰을 때 각각 0.5m, 1.0m, 1.5m 이격된 3개의 측정 지점 1point, 2point, 3point에서 측정된 최대입자속도 값으로 회귀분석을 하여 결과를 도출하였다. 각각의 매질 조건에서 측정된 데이터는 각각 60개로 충격에너지의 크기와

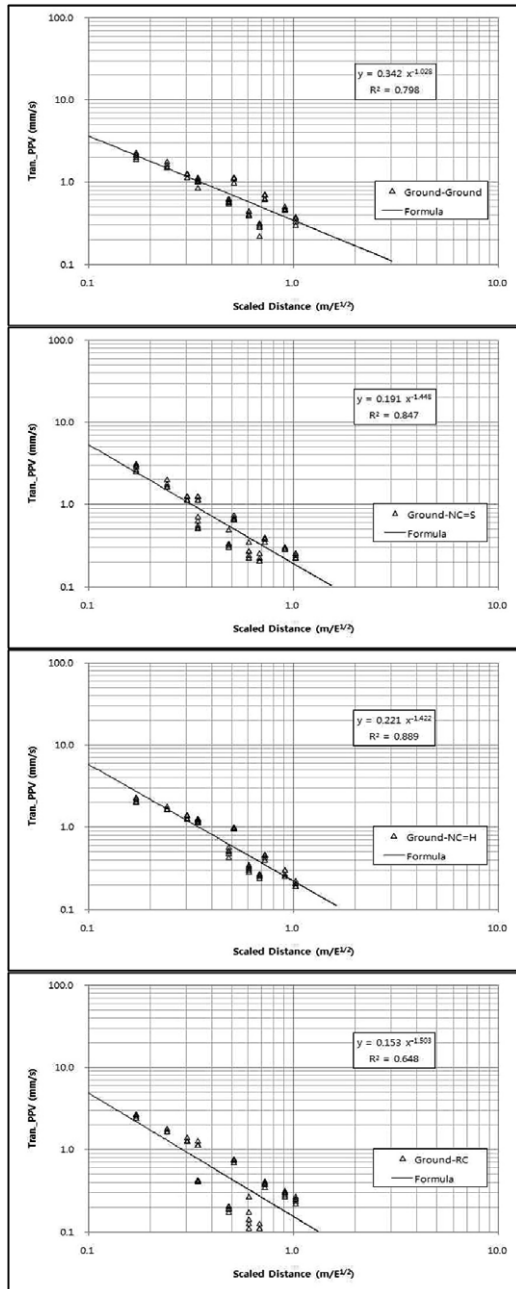


Figure 4. Relation between PPV(Tran.) and SD on Several Mediums

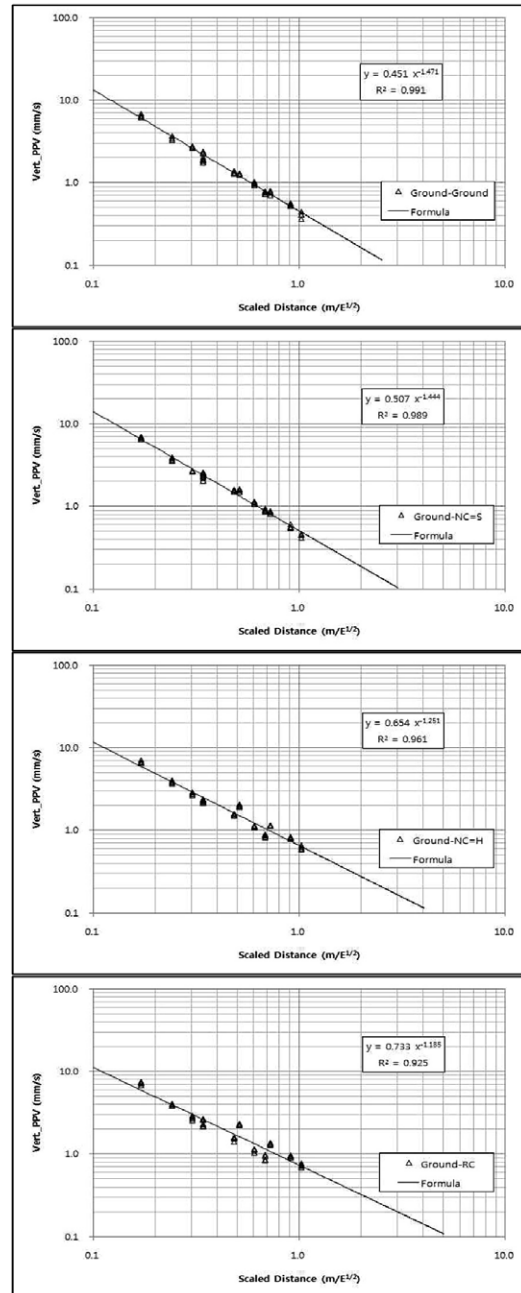


Figure 5. Relation between PPV(Vert.) and SD on Several Mediums

충격진동 발생원에서의 이격 거리에 따라 다르게 얻어졌다.

계측된 최대진동속도와 환산거리와의 각 성분별 상관계수를 살펴보면 먼저 Figure 4는 매질에 따른 점선성분으로서 일반 지반 매질에서 상관계수

$r=0.798$ , NC=S 매질에서  $r=0.847$ , NC=H 매질에서  $r=0.889$ , RC 매질에서  $r=0.648$ 로 나타났으며, NC=H 매질이 상관계수가 가장 양호하고, RC 매질에서는 상관계수가 낮은 것으로 나타났다. Figure 5는 각 매질에 따른 수직성분으로서 일반 지반 매질

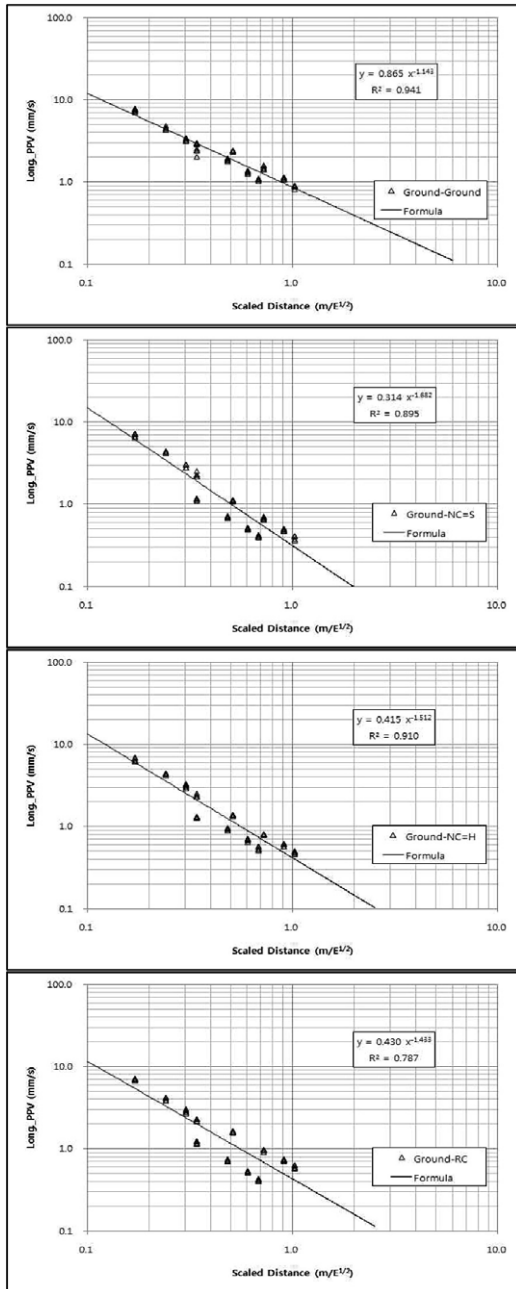


Figure 6. Relation between PPV(Long.) and SD on Several Mediums

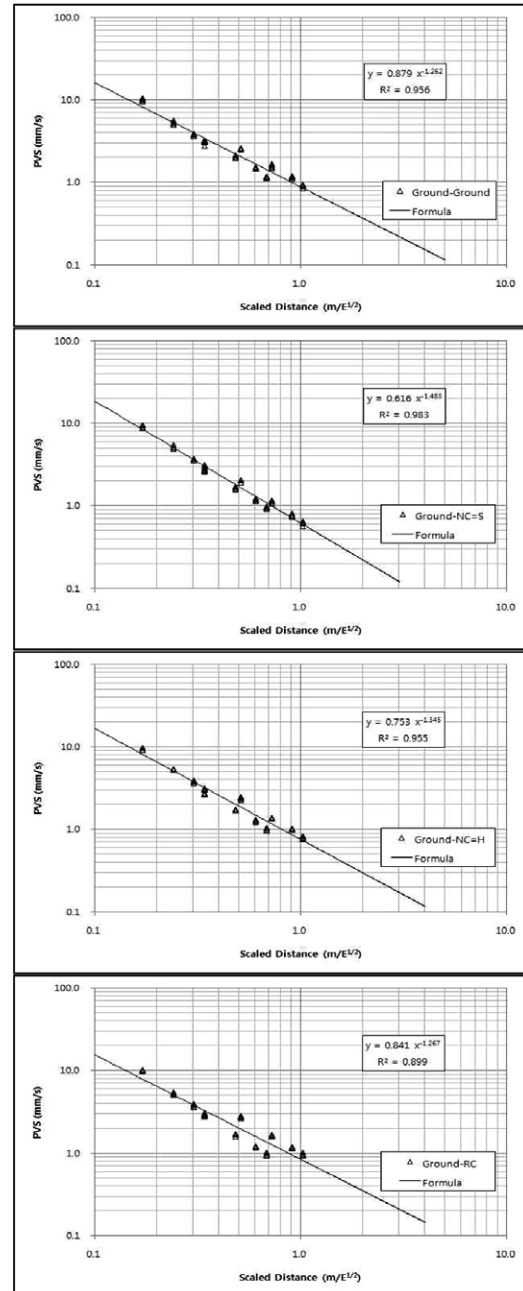


Figure 7. Relation between PVS and SD on Several Mediums

에서 상관계수  $r=0.991$ , NC=S 매질에서  $r=0.989$ , NC=H 매질에서  $r=0.961$ , RC 매질에서  $r=0.925$ 로 나타났으며, 일반적인 지반 매질에서 상관계수가 가장 높았고 RC 매질에서 상관계수가 가장 낮게 나타났다.

Figure 6은 각 매질에 따라 진행성분에서의 환산 거리에 따른 최대입자속도를 나타내고 있다. 일반 지반 매질에서의 상관계수  $r=0.941$ , NC=S 매질에서  $r=0.895$ , NC=H 매질에서  $r=0.910$ , RC 매질에서  $r=0.787$ 로 나타났으며, 일반 지반 매질에서 상관계수가 가장 양호하고 RC 매질에서 가장 낮게 나타났다. Figure 7은 각 매질에서 환산 거리에 따른 PVS(Peak Vector Sum)를 나타내고 있다. 환산 거리와 PVS 값의 상관계수는 일반 지반 매질에서 상관계수  $r=0.956$ , NC=S 매질에서  $r=0.983$ , NC=H 매질에서  $r=0.955$ , RC 매질에서  $r=0.899$ 로 나타났으며, NC=S 매질에서 상관계수가 가장 양호하고 RC 매질에서 상관계수가 가장 낮았다. 각각의 성분

별 상관계수를 비교해 보면, 전반적으로 모든 매질에서 수직성분의 상관계수가 0.925이상으로 가장 높게 나타났고, 접선성분의 상관계수가 가장 낮게 나타났다.

## 2. 진동파형 분석

충격진동 실험에 따른 진동파형 분석은 Blastware 8.0 프로그램으로 수행 하였으며, 충격에너지에 의한 진동파형만을 선택하여 분석하기 위해 기록시간 1.0초 중 0.0~0.15초 사이의 성분별 진동파형을 분석하였다.

Figure 8은 각 매질에 따른 접선성분에서의 진동파형을 나타낸 것이다. 충격진동 발생원과 이격 거리가 1.0m인 2point에서는 충격에너지가 가장 작을 때 매질에 따른 진동파형의 변화가 거의 없었고, 일반 지반 매질에서 충격에너지가 증가할수록 진동파형의 크기가 0.222mm/s, 0.413mm/s, 0.572mm/s, 0.857mm/s로서 전반적으로 증가하

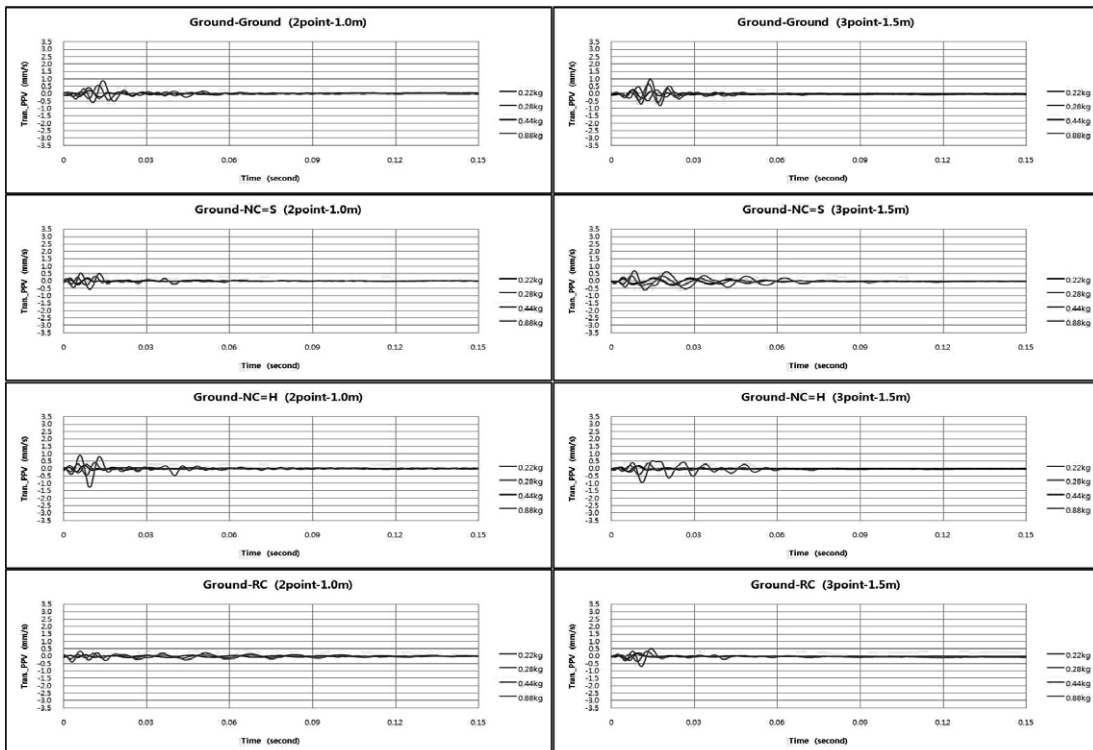


Figure 8. Comparison of Transverse Vibration Waveform on Several Mediums

는 경향을 알 수 있다. 충격에너지가 가장 클 때 진동파형의 크기는 각 매질에 따라 0.857mm/s, 0.524mm/s, 1.19mm/s, 0.413mm/s로 나타났으며, NC=H 매질에서의 진동파형의 크기가 1.19mm/s로 가장 높게 나타나는 원인은 매질 조건을 만들 때 다짐 상태에서 기인하는 것으로 판단된다. 충격진동 발생원과의 이격 거리가 1.5m인 3point에서는 충격에너지가 가장 작을 때 매질에 따른 변화가 거의 없었고, 충격에너지가 증가할수록 일반 지반 매질에서의 진동파형이 전반적으로 커지는 경향을 나타냈으며, 각 콘크리트 매질들에서의 진동파형은 거의 유사한 크기로 나타났다.

Figure 9는 각 매질에 따른 수직성분에서의 진동파형을 나타낸 것이다. 충격진동 발생원에서의 이격 거리가 1.0m인 2point에서의 진동파형은 충격에너지가 증가할수록 진동파형의 크기 변화만 나타날 뿐 각 매질에서 모두 유사한 진동파형의 크기를 나타냈다. 충격진동 발생원에서의 이격 거리가

1.5m인 3point에서의 진동파형은 충격에너지가 증가할수록 RC 매질에서의 진동파형의 크기가 0.638mm/s, 0.937mm/s, 1.37mm/s, 2.25mm/s로 가장 크게 나타났고, NC=H 매질에서는 0.603mm/s, 0.810mm/s, 1.16mm/s, 1.91mm/s, NC=S 매질에서는 0.445mm/s, 0.556mm/s, 0.857mm/s, 1.59mm/s, 일반 지반 매질에서는 0.365mm/s, 0.524mm/s, 0.778mm/s, 1.25mm/s의 순으로 진동파형의 크기 변화를 나타냈다. 이는 콘크리트를 전파하는 진동파형은 수직성분이 우세하고, 매질의 강도 및 밀도가 클수록 빠르게 전파되기 때문으로 판단된다.

Figure 10은 각 매질에 따른 진행성분에서의 진동파형을 나타낸 것이다. 충격진동 발생원과의 이격 거리가 1.0m인 2point에서 진동파형의 크기는 일반 지반 매질이 2.91mm/s로서 충격에너지의 증·감에 관계없이 다른 매질 조건의 진동파형 보다 가장 크게 나타났으나 각 콘크리트 매질들에서

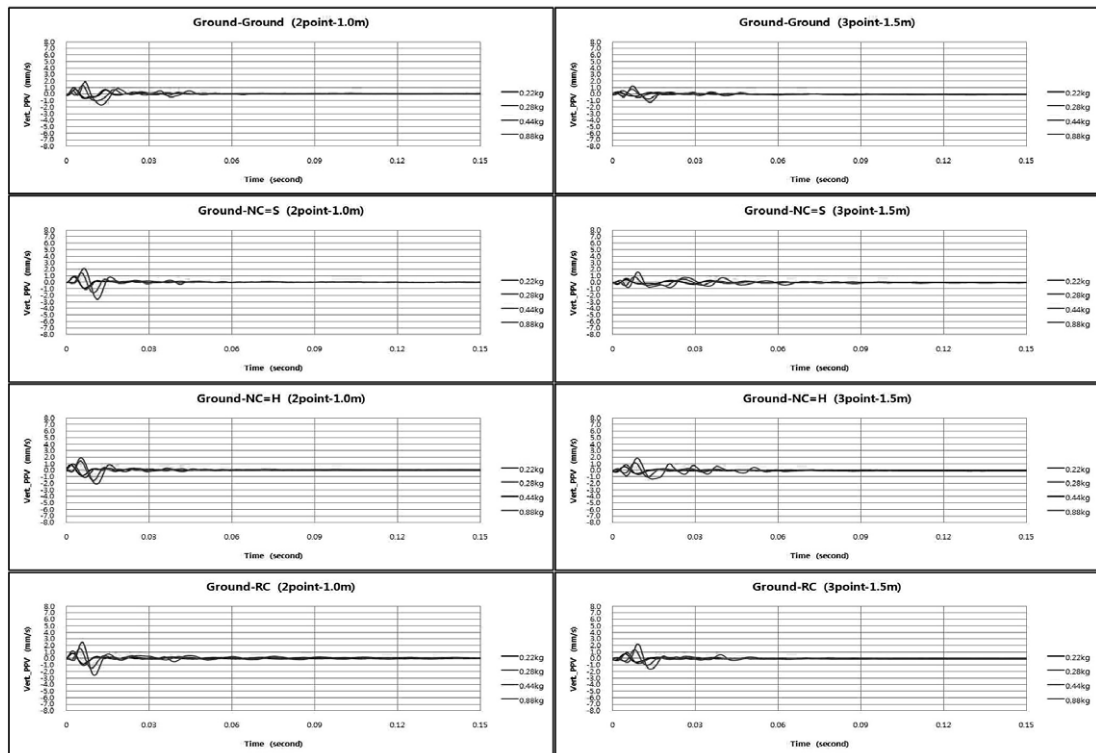


Figure 9. Comparison of Vertical Vibration Waveform on Several Mediums

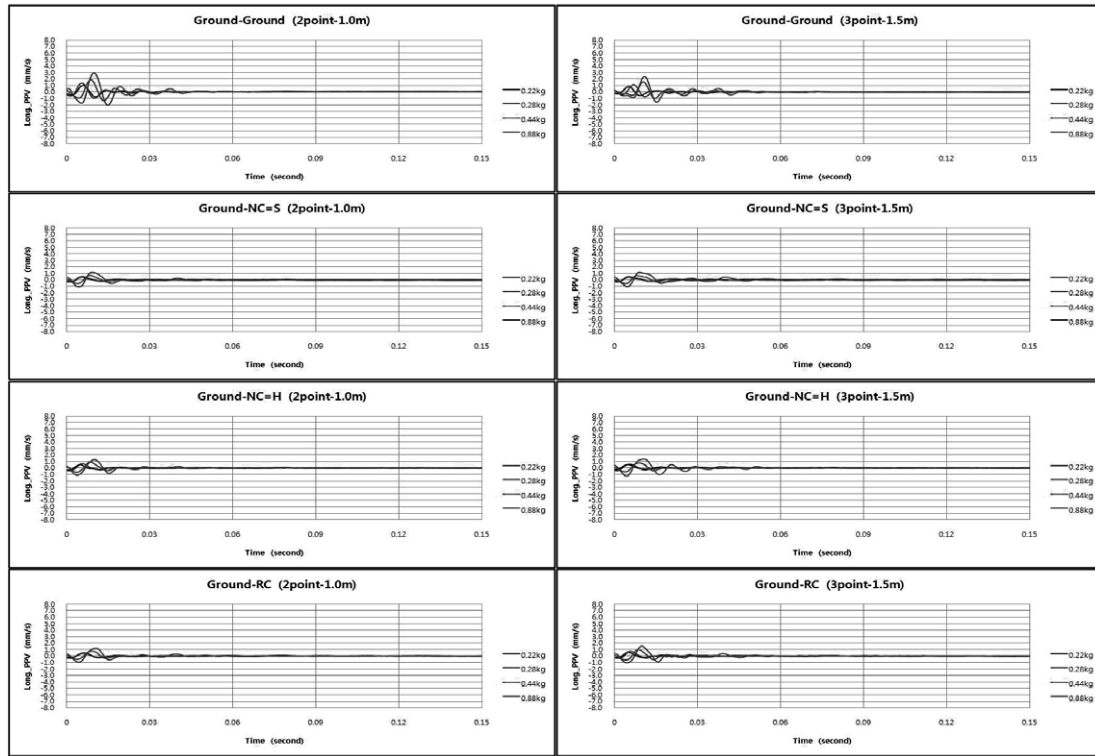


Figure 10. Comparison of longitudinal vibration waveform on several mediums

는 모두 유사한 진동파형을 보였다. 진행성분이 일반 지반 매질에서는 크게 나타나고, 각 콘크리트 매질들에서 작게 나타난 이유는 매질 조건이 달라지면서 입자속도의 감쇠가 발생하기 때문으로 판단된다. 일반적으로 진동은 진동 중심점으로부터 원거리로 갈수록 감쇠되는데, 이격 거리에 따른 진동의 감쇠는 기하학적인 요인과 매질의 특성에 의해 영향을 받으며, 기하학적 감쇠는 지반의 형태에 의해 좌우되고 매질에 의한 감쇠는 지반의 특성과 진동의 진폭에 관계된다(Woods and Jedele, 1985). 충격진동 발생원과의 이격 거리가 1.5m인 3point에서의 진동파형은 충격에너지의 증·감에 관계없이 일반 지반 매질에서는 2.40mm/s로서 다른 매질 조건에서의 진동파형보다 크게 나타났지만 2point에서의 진동파형보다 그 크기는 큰 차이를 보이지 않았다. 각 콘크리트 매질들에서의 진동파형은 모두 유사한 진동파형을 보였지만 RC 매질 1.56mm/s, NC=H 매질 1.33mm/s, NC=S 매질

1.14mm/s 순으로 약간의 위상차를 보였다.

일반적으로 접선, 수직, 진행 세 성분의 상대적 크기는 암반의 종류, 지형 및 발파 작업에서의 장악량에 따라 생성된 탄성파들의 상호 간섭에 따라 변하나 가장 큰 값을 나타내는 것이 수직성분이며, 때로는 진행성분이 수직성분과 같거나 큰 경우가 있고, 접선성분은 대부분 세 성분 중에서 가장 작은 값을 나타내는 것으로 알려져 있다(주재성, 1991; 박진우, 1995).

## V. 결론

금번의 연구는 각종 공사장에서 작업과정 중 부득이 하게 발생하는 충격진동이 인접한 구조물에 영향을 미치는 진동크기의 변화를 평가하기 위해 수행되었다. 그 평가의 일환으로 인위적인 충격진동을 발생시켜 매질특성에 따른 각 성분별 최대입자속도 및 진동파형을 분석하여 다음과 같은 결론



을 도출하였다.

1. 환산거리에 따른 최대입자속도의 상관계수를 비교한 결과, 일반 지반 매질에서는 0.991, 콘크리트 매질에서는 각각 0.989, 0.961, 0.925로 수직성분에서의 상관계수가 가장 높게 나타났으며, 진동파형 또한 모든 매질 조건에서 수직성분이 우세하게 나타났다.

2. 지반 매질일 때와 콘크리트 매질일 때의 진동파형을 비교해보면 진행성분에서 진폭 및 위상차가 크게 나타났는데, 이는 충격진동에 따른 지반 내에서의 입자들이 서로 다른 매질을 전파할 때 매질 조건이 달라지면서 입자속도가 감쇠하였기 때문으로 판단된다.

3. 콘크리트 매질에서의 진동파형은 수직성분에서 보통 철근콘크리트 매질, 보통 무근콘크리트 매질, 연한 무근콘크리트 매질 순으로 진폭의 크기 변화를 보였는데, 이는 콘크리트 매질을 전파하는 입자들은 매질의 강도 및 밀도가 클수록 빠르게 전파되기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 외부에서 충격진동이 발생되었을 때 가장 먼저 진동의 영향을 받는 인접한 구조물 기초에서의 매질특성에 따라 진동이 어떻게 변화하는지를 평가한 것으로서 실제 공사 현장에서 발생하는 다양한 진동들에 노출되어 있는 인접한 구조물의 기초 바닥에서 진동을 평가하는데 유용할 것으로 판단되며, 향후 분석된 진동파형을 이용하여 구조물 기초의 매질 내부에서 응력 변화를 정량적으로 평가하기 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

김남수, 1999, 건설소음·진동의 예측기법과 그 상용에 관한 연구, 전남대학교 박사학위논문.  
 류창하, 2005, 구조물에 대한 국외 발파진동 허용

규제기준 분석, 대한화약발파공학회지 22(3), 1~10.  
 박진우, 1995, 낙하충격에 의한 지반진동의 크기 및 주파수 특성에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.  
 서상근, 김태원, 장병순, 2000, 향타진동이 인접구조물에 미치는 동적영향 및 대처방안에 대한 연구, 부산대학교 생산 기술연구소논문집 25(3C), 41~48.  
 서울특별시 종합건설본부, 1994, 남산외인아파트 철거공사 안정성검토보고서, 서울특별시.  
 정지문, 양형식, 1999, 일상 환경변화를 고려한 구조물 진동피해의 수준 평가, 한국지반공학회논문집 15(5), 57~64.  
 주재성, 1991, 발파진동의 특성과 주변 구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 전남대학교 박사학위논문.  
 한국건설기술연구원, 1991, 향타진동과 말뚝-흙의 상호작용, 한국건설기술연구원.  
 Devine, JF., Beck, RH., Meyer, AVC., 1965, Vibration levels transmitted across a presplit fracture plane, USBM, 29.  
 Drabkin, S., Lacy, H., Kim, D.S., 1996, Estimating settlement of sand caused by construction vibration, Journal of Geotechnical Engineering, 122, 920~928.  
 Woods, R.D., Jedele, L.P., 1985, Energy attenuation relationships from construction vibration, Vibration Problems in Geotechnical Engineering, ASCE Convention in Detroit, 229~246.