

# 발파진동에 대한 구조물 안정성 평가 - 지하비축기지 건설 사례

## A Case Study on the Stability Assessment of Structures by Blast-induced Vibration

정용훈† · 이정인\* · 최용근\*\*

Yong-Hun Jong, Chung-In Lee and Yong-Kun Choi

**Key Words** : Underground Storage Cavern(지하비축공동), Blast-induced Vibration(발파진동), Peak Particle Velocity(최대진동 속도), Frequency Analysis(주파수 분석), Response Spectrum(응답스펙트럼)

### ABSTRACT

The test blasts were carried out by detonating some single blastholes at two upper sites of the underground storage cavern for the crude oil. One was performed at the entrance site of the construction tunnel and the other at the middle part of the underground storage cavern. Based on the blast-induced vibration measured by the test blasts, we suggested the propagation equations of blasting vibration that were capable of estimating the peak particle velocity. In addition, in order to assess the stability of the nearest ground storage tank, we did the frequency analysis and the response spectrum analysis with the particle velocity-time history and the particle acceleration-time history that were measured by the test blast carried out on the entrance site of the construction tunnel. In result, it was predicted that the displacement on the highest part of the tank shell was less than the allowable displacement.

### 기 호 설 명

$D$  : 발파원과 측정 지점 간의 거리  
 $D_u$  : 탱크의 허용 변위량  
 $E$  : 탱크 벽면의 탄성계수  
 $H$  : 탱크의 높이  
 $K, n$  : 지질, 암반, 발파 조건 등에 따른 상수  
 $P = 0.037085 + 0.0894302S - 0.05088S^2 + 0.012523S^3 - 0.0012S^4$   
 $PPV$  : 최대진동속도  
 $R$  : 탱크의 반지름  
 $S = H/R$  : 탱크의 반지름에 대한 유체 높이의 비  
 $W$  : 지발당 장약량  
 $g$  : 중력가속도  
 $\rho_s$  : 탱크 벽면의 밀도

$\omega_i$  : impulsive mass의 고유진동수

$\omega_s$  : sloshing mass의 고유진동수

### 1. 서 론

우리나라는 세계 5위의 석유 수입국, 세계 7위의 석유 소비국임에도 불구하고 높은 중동 의존도, 낮은 자주개발원유 확보율 등으로 석유위기시 대응능력이 주요 석유수입국들과 비교하여 낮은 편이다. 특히 원유 가격은 국제 정세와 자연 재해의 영향에 의해, 2001년의 연평균 26.0 US\$/배럴에서 2005년 6월의 월평균 56.4 US\$/배럴로 2배 이상 상승하였다(서부텍사스중질유 기준). 따라서 원유를 도입하여 국내 비축시설에 저장함으로써 국내 석유수급과 가격의 안정에 기여할 수 있다. 원유를 저장하는 방식은 일반적으로 지상 저장탱크를 활용하는 방법과 지하 원유비축기지를 활용하는 방식으로 구분된다. 특히 지하 원유비축기지는 공사비, 운영비, 유지비, 그리고 전략적 안전성의 측면에서 상대적으로 장점을 지닌다.

그러나 지하 원유비축기지의 건설과정 중 발파작업 동안 진동과 소음에 대한 민원이 발생할 우려가 있다. 이러한 우려를 제거하고, 주변 구조물의 발파진동에 대한 안정성을 확보하기 위해서, 실제 건설작업 이전에 주변 구조물에 대한

† 책임저자, 서울대학교 지구환경시스템공학부

E-mail : wizard@rockeng.snu.ac.kr

Tel : (02)880-7230, Fax : (02)877-0925

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부

\*\* (주)지오제니건설터트

안전 진단과 건설 대상부지에서의 시험 발파를 수행·분석하여, 대상부지의 진동전파 특성을 조사하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 지하 원유비축기지의 공사용터널 입구부와 저장공동 중앙부에서의 단일공 시험발파를 수행하여 계속한 진동속도 자료를 해석하여, 건설 과정에서 발생할 발파진동속도를 예측할 수 있는 발파진동식을 제안하였다. 제안된 발파진동식을 대상부지와 유사한 지질조건에서의 발파진동식과 비교하였다. 또한 발파진동의 주파수 분석과 응답스펙트럼 해석을 통한 인접한 지상 저장탱크의 안정성을 평가하였다.

## 2. 발파진동식의 산정

### 2.1 발파진동식

현재까지의 연구에 의하면 발파진동에 의한 구조물의 피해는 진동속도와 밀접한 관련이 있으며, 진동속도의 크기에 비례하는 것으로 알려져 있다<sup>(1,2,3)</sup>. 따라서 발파진동의 허용 기준은 진동속도의 최대값으로 나타내며 측정과 해석도 일반적으로 진동속도를 대상으로 한다.

발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정경험을 토대로 구조물 피해의 기준이 되는 최대진동속도를 지발당 장약량과 발파원과 측정 지점 간의 거리를 주요 변수로 하여 식 (1)과 같은 경험적 관계식으로 나타낼 수 있으며<sup>(1,3,4)</sup>, 이를 발파진동식이라 한다.

$$PPV = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n \quad (1)$$

식 (1)에서 거리와 지발당 장약량의 비인  $D/W^b$ 를 환산거리라 하며,  $b = 1/2$ 이면 체제공 환산거리,  $b = 1/3$ 이면 세체제공 환산거리라 한다.

### 2.2 유사 지질조건에서의 발파진동식

지하비축기지 건설 예정부지의 주 대상부지는 각섬석 화강암의 단일 암종으로 구성되어 있다. 따라서 화강암으로 구성된 암반에서 수행된 시험발파와 터널발파에 의해 발생한 발파진동속도 측정을 바탕으로 얻어진 발파진동식을 국내의 기존 문헌에서 조사하였다.

체제공 환산거리를 이용한 경우, 50% 평균 회귀분석식에서의  $K$ 값은 0.27~780의 범위 내에,  $n$ 값은 -1.964~-0.42의 범위 내에 분포한다. 95% 발파진동식에서의  $K$ 값은 1.17~1552.9의 범위 내에,  $n$ 값은 -2.058~-0.42의 범위 내에 분포하였다.

반면, 세체제공 환산거리를 이용한 경우, 50% 평균 회귀분석식에서의  $K$ 값은 0.80~1630의 범위 내에,  $n$ 값은 -2.163~-0.52의 범위 내에 분포한다. 95% 발파진동식에서의  $K$

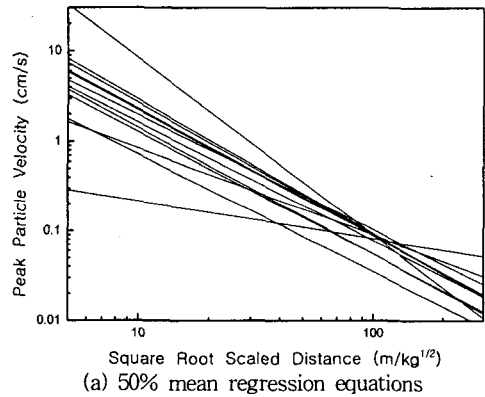
값은 1.59~3045.6의 범위 내에,  $n$ 값은 -2.163~-0.52의 범위 내에 분포하였다.

Fig. 1은 문헌조사에 의해 수집된 발파진동식을 체제공 환산거리 5~300  $m/kg^{1/2}$ 의 범위에 대하여 도시한 것이며, Fig. 2는 세체제공 환산거리 5~300  $m/kg^{1/3}$ 의 범위에 대하여 도시한 것이다.

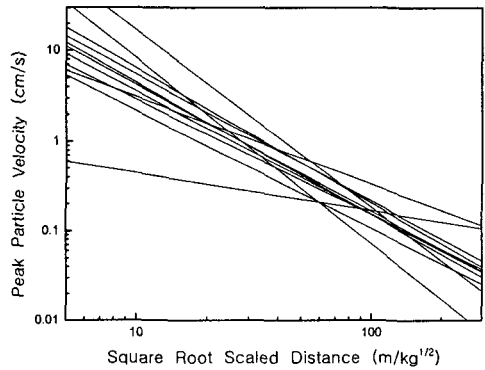
### 2.3 현장 조사 결과에 따른 발파진동식 추정

발파진동속도는 식 (1)과 같이 최대 지발당장약량과 발파원으로부터의 거리를 변수로 하는 환산거리의 함수로 표시될 수 있다. 본 연구에서 환산거리는 시험발파에서의 장약량과 작업조건을 고려하여 세체제공 환산거리를 적용하였다.

공사용터널 입구부에서의 시험 발파로부터 총 54개의 진동측정 자료를 수집한 후, 안전율을 고려하여 진동의 세 방향 성분의 벡터합 자료로 해석을 수행하였다. Fig. 3은 세체제공 환산거리에 따라 발파진동속도 벡터합 측정자료를 회귀분석한 결과로 결정계수  $R$ 값은 0.88의 높은 상관관계를 보였으며, 50% 평균 회귀분석식과 안전율을 고려한 95% 발파진동식은 각각 식 (2)와 식 (3)으로 계산되었다.

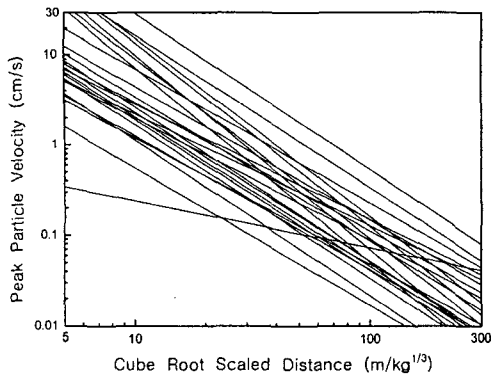


(a) 50% mean regression equations

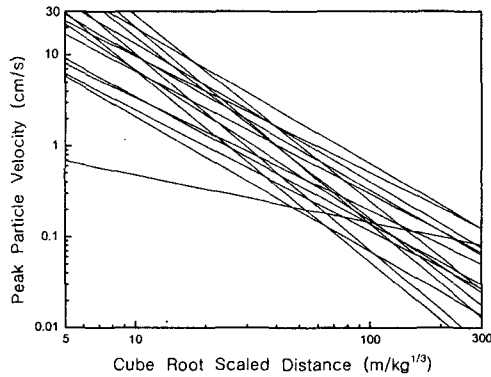


(b) 95% blasting vibration equations

Fig. 1 Propagation equations of blasting vibration in case of using the square root scaled distance



(a) 50% mean regression equations



(b) 95% blasting vibration equations

Fig. 2 Propagation equations of blasting vibration in case of using the cube root scaled distance

50% 발파진동식:

$$PPV(cm/s) = 181.35 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.558} \quad (2)$$

95% 발파진동식:

$$PPV(cm/s) = 309.04 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.558} \quad (3)$$

저장공동 중앙부에서의 시험 발파로부터 총 54개의 진동 측정 자료를 수집하여, 동일한 해석 과정을 수행함으로써, 50% 평균 회귀분석식과 안전율을 고려한 95% 발파진동식은 각각 식 (4)와 식 (5)로 나타났다. 이 때 결정계수 R값은 0.90의 높은 상관관계를 보였다 (Fig. 4).

50% 발파진동식:

$$PPV(cm/s) = 46.96 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.304} \quad (4)$$

95% 발파진동식:

$$PPV(cm/s) = 108.25 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.304} \quad (5)$$

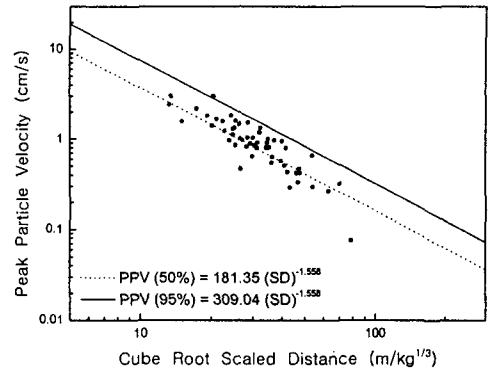


Fig. 3 Peak particle velocity (vector sum) with the cube root scaled distance (test blast was performed at the entrance of the construction tunnel)

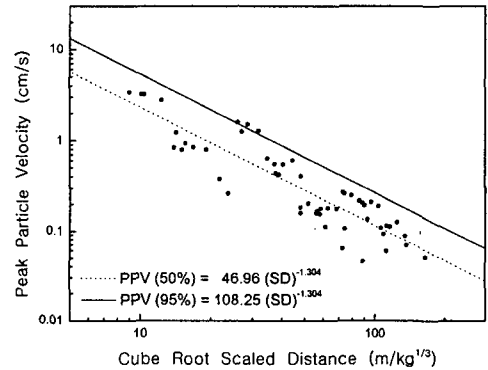


Fig. 4 Peak particle velocity (vector sum) with the cube root scaled distance (test blast was performed at the middle part of the underground storage cavern)

시험발파를 통해 공사용터널 입구부와 저장공동 중앙부에서 얻어진 발파진동식은 유사 암중에서 얻어진 국내 여러 현장의 발파진동식의 중간 정도에 해당하는 것으로 나타났다. 따라서 식 (2)~(5) 중에서, 안전율을 고려한 발파 설계 시 이용하게 되는 95% 발파진동식인 식 (3)과 (5)를 발파진동에 의한 안전성 평가에 사용할 것을 추천한다. 특히 두 식 중에서 주변 구조물과의 거리와 해당 구조물이나 인체에 대한 허용진동속도를 고려함으로써, 지하비축기지 건설작업 중 발파에 대한 보수적인 최대 지반당양약을 결정할 수 있다.

### 3. 시설물의 안정성 평가

지상 시설물의 피해 수준을 결정함에 있어서 시간 변화에 따른 발파진동속도가 중요한 기준이 되어왔다. 지반의 진동속도가 같더라도 진동을 유발시키는 파형의 주파수가 다르게 작용한다면, 그 시설물은 다르게 반응한다. 따라서

진동을 받은 시설물의 고유진동수와 감쇠특성을 살펴보고, 구조물의 변형을 야기하는 진동 주파수를 살펴보아야 한다.

### 3.1 주파수 분석

공사용터널 입구부에서의 시험발파에서 측정된 54개의 발파진동 자료에 대하여 각 방향성분별 FFT(Fast Fourier Transform)에 의한 주파수 분석을 수행하였다. FFT에 의한 주파수 분석의 결과를 이용하여 최대 진폭을 가지는 주 주파수를 결정하였다.

FFT에 의한 주파수 분석 결과, 발파원과 가장 가까운 측정지점과 가장 먼 측정지점 간의 거리 차이가 크기 않음으로써 각 방향성분별 주주파수의 감쇠 경향은 보이지 않았다. 발파진동의 방향성분별 주주파수 대역을 살펴보면, 접선방향성분은 0~110 Hz, 수직방향성분은 5~115 Hz, 그리고 진행방향성분은 5~85 Hz이었다(Fig. 5).

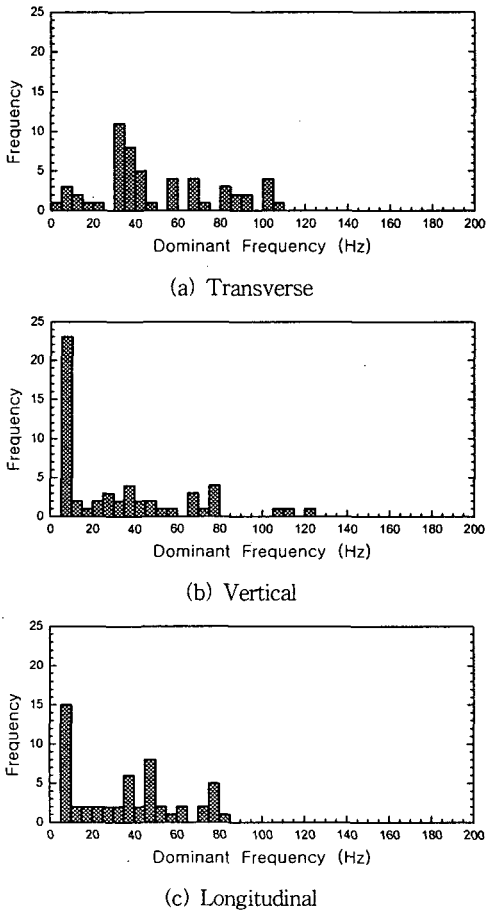


Fig. 5 Histogram of the dominant frequency by the directional components

### 3.2 응답스펙트럼 해석

#### (1) 지상 저장탱크의 진동 특성

지하 원유비축기지의 건설 작업동안 발생하는 발파진동에 의한 인근 지상 저장탱크의 안정성을 분석하고, 건설 기간동안의 저장탱크의 활동 가능성을 점검하였다.

발파진동으로 인한 지상 저장탱크의 응답스펙트럼을 해석하기 위해서, Haroun<sup>(6)</sup>이 제안한 다음의 식 (6)과 (7)을 이용하여 저장탱크의 고유진동수를 가정하였다.

impulsive mass의 고유진동수,  $\omega_i$

$$\omega_i = \frac{P}{H} \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} \quad (6)$$

sloshing mass의 고유진동수,  $\omega_s$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{1.84g}{R} \tanh(1.84S)} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)를 이용하여 다음의 3가지 경우에 대한 고유진동수와 고유주기를 계산한 결과는 Table 1에 제시하였다.

Case 1: 탱크에 원유가 80% 채워진 경우

Case 2: 탱크에 원유가 50% 채워진 경우

Case 3: 탱크에 원유가 20% 채워진 경우

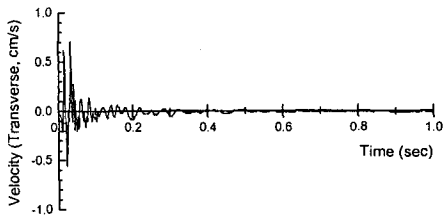
탱크에 유체가 저장된 경우 탱크 벽면의 자체 증량은 탱크 유체의 유효 질량에 비교하여 매우 작음으로 무시될 수 있고<sup>(6)</sup>, 탱크 벽면에서의 최대 변위는 유체의 sloshing에 의한 영향에 의해 발생하므로<sup>(7)</sup>, 본 연구에서는 원유의 저장 높이에 따른 sloshing mass의 고유진동수에 대한 최대 변위를 비교하였다.

#### (2) 측정된 발파진동속도 시간이력 적용

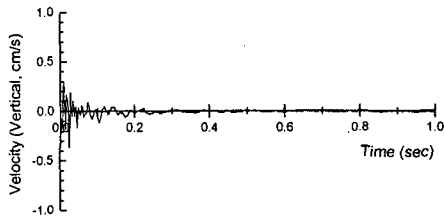
공사용터널의 입구부에서의 단일공 시험발파를 통해 얻어진 진동속도 시간이력(Fig. 6)과 진동가속도 시간이력(Fig. 7)을 입력변수로 사용하여, 구조물의 고유주기에 따른 방향성분별 응답스펙트럼을 구하였다(Fig. 8).

Table 1 Natural frequency and natural period by the height of the crude oil stored into the tank

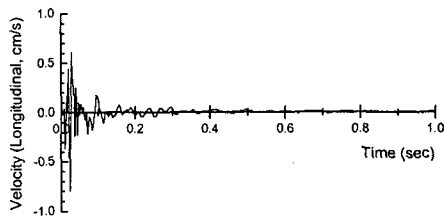
|        | Impulsive mass         |                      | Sloshing mass          |                      |
|--------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
|        | Natural Frequency (Hz) | Natural Period (sec) | Natural Frequency (Hz) | Natural Period (sec) |
| Case 1 | 0.009                  | 105.67               | 0.082                  | 12.16                |
| Case 2 | 0.013                  | 75.99                | 0.068                  | 14.64                |
| Case 3 | 0.027                  | 37.34                | 0.044                  | 22.50                |



(a) Transverse

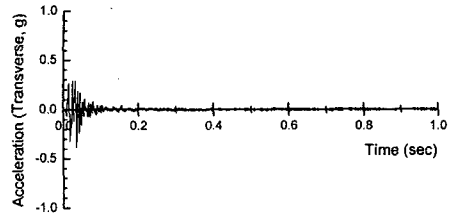


(b) Vertical

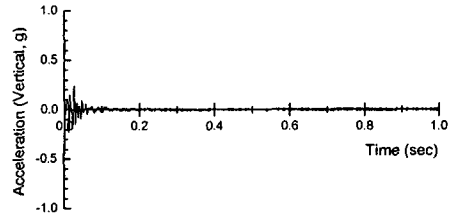


(c) Longitudinal

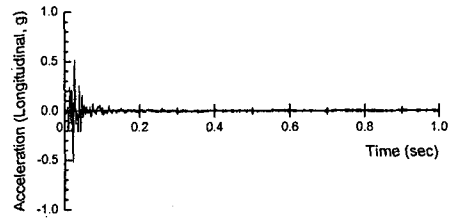
Fig. 6 Particle velocity-time histories by the directional components



(a) Transverse



(b) Vertical



(c) Longitudinal

Fig. 7 Particle acceleration-time histories by the directional components

지상 저장탱크의 안정성을 평가하기 위한 기준으로, 기존 연구<sup>(7)</sup>에서 사용된 식 (8)의 허용 변위량을 적용하였다. 이때 계산된 허용 변위량은 탱크 셸(tank shell)의 부동침하량을 기준으로 한 것으로, 모든 방향성분의 허용 변위량( $D_a$ )으로 가정하였다. 식 (8)에서, 저장탱크의 높이는 21.96 m이므로, 허용 변위량은 4.39 cm로 계산되었다.

$$D_a = \frac{H_t}{500} \quad (8)$$

Fig. 8에 도시된 방향 성분별 응답스펙트럼을 바탕으로, 저장탱크 최상단에서의 최대 변위를 예측한 결과를 Table 2에 제시하였다.

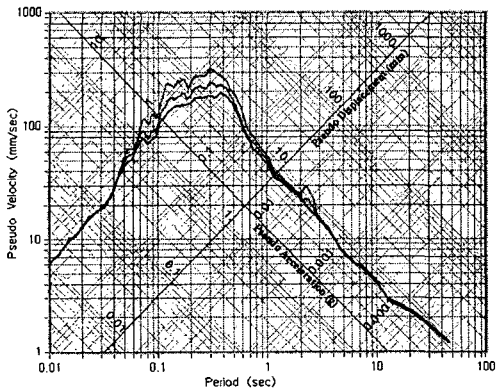
따라서 공사용터널 입구부에서의 단일공 시험발파에 의해 측정된 발파진동속도 시간이력과 발파진동가속도 시간이력을 이용한 저장탱크 최상단에서의 변위 검토 결과, 모든 방향성분에 대하여 허용 변위량을 초과하지 않을 것으로 예상되었다. 그러나 본 연구에서 사용된 진동속도 시간이력과 진동가속도 시간이력은 실제 건설작업 단계의 많은 발파공을 이용한 발파가 아닌 단일공 시험발파의 시험발파로부터 얻어진 것임을 명심해야 한다.

#### 4. 결론

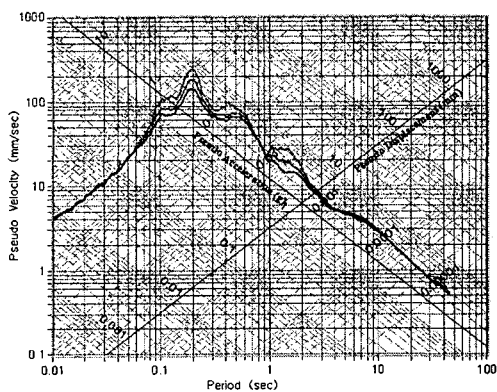
본 연구에서는 지하 원유비축기지의 건설과정 중 발파작업 동안 진동과 소음에 대한 민원이 발생할 우려를 제거하고, 주변 구조물의 발파진동에 대한 안정성을 확보하기 위해서, 실제 건설작업 이전에 건설 대상부지에서의 시험 발파를 수행·분석하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

(1) 지하 원유비축기지의 건설 대상부지의 두 지점에서 단일공 시험발파를 실시하였다. 측정된 발파진동 자료를 해석하여, 건설 과정에서 발생할 발파진동속도를 예측할 수 있는 발파진동식을 제안하였다.

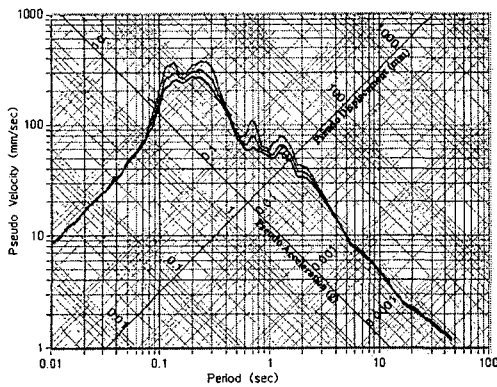
(2) 발파에 의한 시설물의 안정성을 평가하기 위해서, 공사용터널 입구부에서의 단일공 시험발파에서 측정된 자료를 이용하여 주파수 분석과 인접한 지상 저장탱크에 대한 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 측정된 발파진동의 주주파수 대역은 0~110 Hz (접선방향성분), 5~115 Hz (수직방향성분), 그리고 5~85 Hz (진행방향성분)이었다. 또한 측정된 발파진동 속도이력과 가속도이력을 이용한 응답스펙트럼 해석한 결과, 저장탱크의 최상단에서의 변위는 허용 변위량을 초과하지 않을 것으로 예상되었다.



(a) Transverse



(b) Vertical



(c) Longitudinal

Damping :  0.05     0.10     0.15

Fig. 8 Response spectrums by the directional components

### 후 기

본 연구는 (주)대우엔지니어링과 한국석유공사의 연구비 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사를 드린다.

Table 2 Peak particle displacement predicted on the highest of the tank shell (sloshing mass)

| Case   | Directional Component | Damping Ratio | Displacement (cm) |
|--------|-----------------------|---------------|-------------------|
| Case 1 | Transverse            | 0.05          | 0.631             |
|        |                       | 0.10          | 0.628             |
|        | Vertical              | 0.05          | 0.465             |
|        |                       | 0.10          | 0.459             |
|        | Longitudinal          | 0.05          | 0.748             |
|        |                       | 0.10          | 0.704             |
| Case 2 | Transverse            | 0.05          | 0.640             |
|        |                       | 0.10          | 0.629             |
|        | Vertical              | 0.05          | 0.431             |
|        |                       | 0.10          | 0.429             |
|        | Longitudinal          | 0.05          | 0.675             |
|        |                       | 0.10          | 0.655             |
| Case 3 | Transverse            | 0.05          | 0.781             |
|        |                       | 0.10          | 0.763             |
|        | Vertical              | 0.05          | 0.392             |
|        |                       | 0.10          | 0.394             |
|        | Longitudinal          | 0.05          | 0.760             |
|        |                       | 0.10          | 0.742             |

### 참 고 문 헌

- (1) Hendron, A. J. and Dowding C. H., 1974, Ground and Structure Response due to Blasting, Proceedings of the 3rd Congress of International Society for Rock Mechanics, Vol. 2, pp. 1359~1364.
- (2) Bollinger, G. A., 1980, Blast Vibration Analysis, Southern Illinois University Press.
- (3) Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W. and Dowding, C. H., 1980, Structure Response and Damage produced by Ground Vibrations from Surface Blasting, Report of Investigation 8507, U.S. Bureau of Mines.
- (4) Nicholls, H. R., Johnson, C. F., and Duvall, W. I., 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, Bureau of Mines Bulletin, 656 p.
- (5) Haroun, M. A., 1983, Vibration studies and test of liquid storage tanks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, pp. 179~206.
- (6) Shrimali, M. K. and Jangid, R. S., 2003, Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks, Journal of Vibration and Control, vol. 9, pp. 1201~1218.
- (7) 대우엔지니어링, 2002, 서산추가비축기지 제품탱크 내 진해석 검토서.