

발파진동에 대한 인접한 지상 저장탱크의 안정성 평가

Stability Assessment of an Adjacent Ground Storage Tank by Blast-induced Vibration

정 용 훈* · 이 정 인† · 최 용 근**

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

(2005년 9월 28일 접수 : 2005년 12월 14일 심사완료)

Key Words : Underground Storage Cavern(지하비축공동), Blast-induced Vibration(발파진동), Peak Particle Velocity(최대진동속도), 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 area 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 adjacent 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.

1. 서 론

우리나라는 세계 5위의 석유 수입국, 세계 7위의 석유 소비국임에도 불구하고 높은 중동 의존도, 낮은 자주개발원유 확보율 등으로 석유 위기시 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(서부 텍사스중질유 기준). 따라서 원유를 도입하여 국내

비축시설에 저장함으로써 국내 석유수급과 가격의 안정에 기여할 수 있다. 원유를 저장하는 방식은 일반적으로 지상 저장탱크를 활용하는 방법과 지하 원유 비축기지를 활용하는 방식으로 구분된다. 특히 지하 원유비축기지는 공사비, 운영비, 유지비, 그리고 전력적 안전성의 측면에서 상대적으로 장점을 지닌다.

이 연구 대상 지역인 지하 원유비축기지 예정부지 인근에는 사용 중인 지상 저장탱크, 민가, 정유공장 등을 포함한 다양한 구조물들이 존재하였다. 구조물의 발파진동에 대한 안정성을 확보하기 위해서, 사전에 주변 구조물에 대한 안전 진단과 건설 예정부지에서 시험 발파를 수행·분석하여, 대상부지의 진동전파 특성을 조사하여야 한다.

따라서, 이 연구에서는 지하 원유비축기지의 공사용터널 입구부와 저장공동 중앙부에서 각각 6회의 단일공 시험발파를 수행하였다. 계측한 진동속도 자료

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부
E-mail : cilee@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-7221, Fax : (02)877-0925

* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부

** (주)지오제니컨설턴트

를 분석하여, 건설 과정에서 발생할 발파진동속도를 예측할 수 있는 발파진동식을 산정하였고, 예정부지와 유사한 지질조건에서의 발파진동식과 비교하였다. 또한 발파진동의 주파수 분석과 응답스펙트럼 해석을 통한 인접한 지상 저장탱크의 안정성을 검토하였다.

2. 발파진동식의 산정

2.1 발파진동식

현재까지의 연구에 의하면 발파진동에 의한 구조물의 피해는 진동속도와 밀접한 관련이 있으며, 진동속도의 크기에 비례하는 것으로 알려져 있다^(1~3). 따라서 발파진동의 허용기준은 진동속도의 최대값으로 나타내며 측정과 해석도 일반적으로 진동속도를 대상으로 한다.

발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정경험을 토대로 구조물 피해의 기준이 되는 최대

진동속도(*PPV*)를 지발당 장약량(*W*)과 발파원과 측정 지점 간의 거리(*D*)를 주요 변수로 하여 식 (1)과 같은 경험적 관계식으로 나타낼 수 있으며^(1,3), 이를 발파진동식이라 한다.

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

여기서, *K*와 *n*은 지질, 암반, 발파 조건 등에 따른 상수이다. 식 (1)에서 거리와 지발당 장약량의 비인 *D/W^b*를 환산거리라 하며, *b*=1/2이면 제곱근 환산거리, *b*=1/3이면 세제곱근 환산거리라 한다.

2.2 유사 지질조건에서의 발파진동식

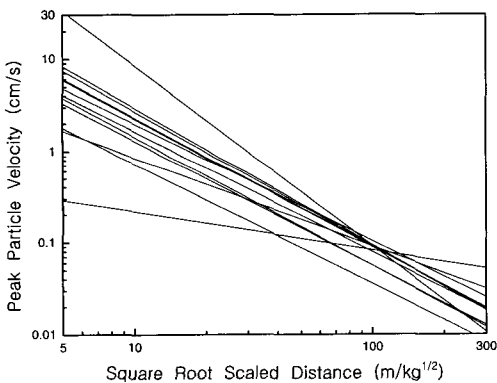
지하비축기지 건설 예정부지의 기반암은 각섬석 화강암으로 구성되어 있다. 이 연구에서는 시험발파에 의해 산정된 발파진동식의 타당성을 검증하는데 필요하여 현재까지 국내 화강암 지역에서 측정된 기존의 연구 결과들^(4~7)을 수집하여 정리하였다.

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

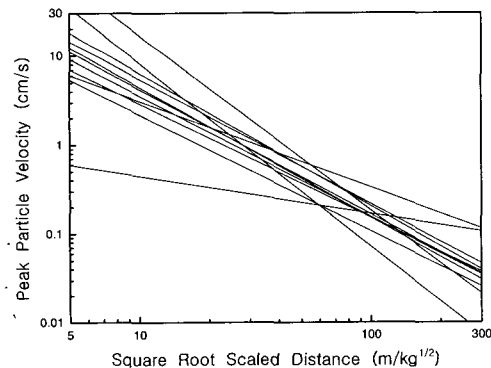
제곱근 환산거리를 이용한 경우, 50 % 평균 회귀 분석식에서의 *K*값은 0.27~780의 범위 내에, *n*값은 -1.964~-0.42의 범위 내에 분포하였다. 95 % 발파진동식에서의 *K*값은 1.17~1552.9의 범위 내에, *n*값은 -2.058~-0.42의 범위 내에 분포하였다. 반면에, 세제곱근 환산거리를 이용한 경우, 50 % 평균 회귀 분석식에서의 *K*값은 0.80~1630의 범위 내에, *n*값은 -2.163~-0.52의 범위 내에 분포하였다. 95 % 발파진동식에서의 *K*값은 1.59~3045.6의 범위 내에, *n*값은 -2.163~-0.52의 범위 내에 분포하였다.

2.3 현장 조사 결과에 따른 발파진동식 산정

시험발파는 지하비축기지 건설 예정부지의 면적을 고려하여 공사용터널 입구부와 저장공동 중앙부의 두 지점에서 각각 6회의 단일공 발파를 실시하였다. 발파공은 신선한 암반 내에 1.7~2.7 m의 심도로 천공하였다. 사용한 화약은 젤라틴다이아마이트 계열의 폭약(직경 25 mm, 중량 125 g/개)이었고, 공당 장약량은 0.250~1.000 kg의 범위였다. 발파진동을 측정하기 위하여 9개의 측정센서를 설치하였으며, 설치 위치는 세제곱근 환산거리가 10~100 m/kg^{1/3}의 범위에



(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

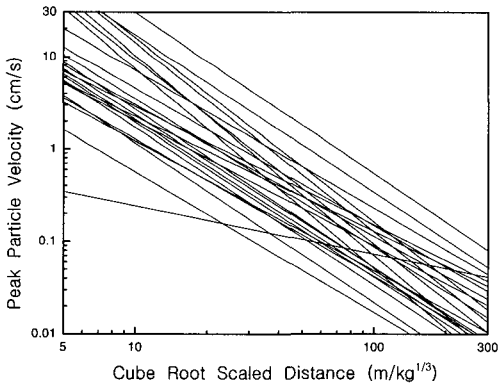
분포할 수 있도록 결정하였다.

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

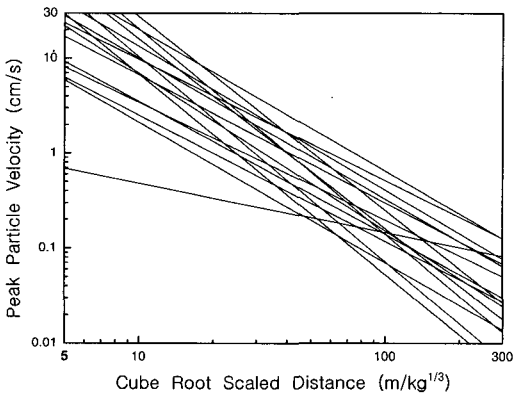
공사용터널 입구부에서의 시험발파로부터 총 54개의 진동측정 자료를 수집한 후, 안전율을 고려하여 진동의 세 방향 성분의 벡터합 자료로 분석을 수행하였다. Fig. 3은 세계공급 환산거리에 따라 발파진동속도 벡터합 측정 자료를 회귀분석한 결과로 결정계수 R값은 0.88의 높은 상관관계를 보였으며, 50 % 평균 회귀분석식과 안전율을 고려한 95 % 발파진동식은 각각 식 (2)와 식 (3)으로 산정되었다.

50 % 발파진동식 :

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



(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

95 % 발파진동식 :

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

저장공동 중앙부에서의 시험발파로부터 총 54개의 진동측정 자료를 가지고서 동일한 분석을 수행함으로써, 50 % 평균 회귀분석식과 안전율을 고려한 95 % 발파진동식은 각각 식 (4)와 식 (5)로 산정되었다 (Fig. 4). 이 때 결정계수 R값은 0.90의 높은 상관관계를 나타내는 0.90이었다.

50 % 발파진동식 :

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

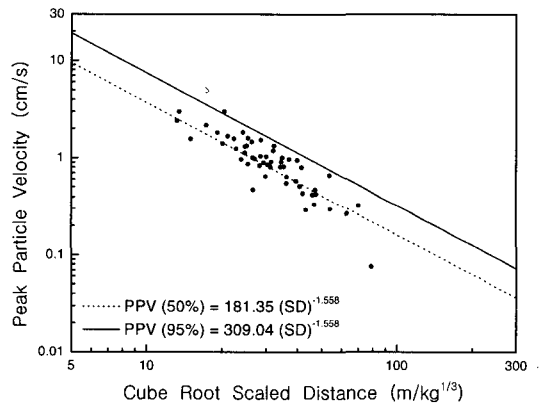


Fig. 3 Peak particle velocity (vector sum) with the cube root scaled distance (test blast was performed at the entrance of the construction tunnel)

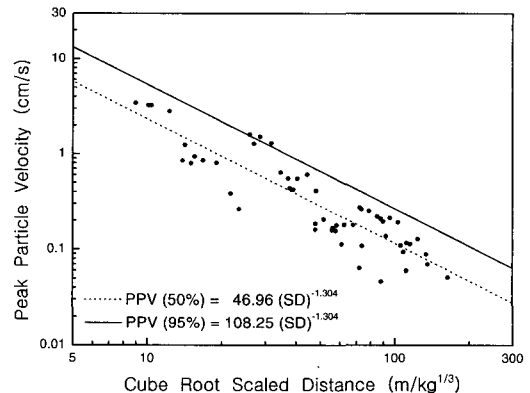


Fig. 4 Peak particle velocity (vector sum) with the cube root scaled distance (test blast was performed at the middle area of the underground storage cavern)

95 % 발파진동식 :

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

시험발파를 통해 공사용터널 입구부와 저장공동 중앙부에서 산정된 발파진동식은 Fig. 2의 유사 압중에서 얻어진 국내 여러 현장의 발파진동식의 중간 정도에 해당하는 것으로 나타났으며, 산정된 발파진동식 (2)~(5) 중에서, 안전율을 고려한 발파 설계시 이용하게 되는 95 % 발파진동식인 식 (3)과 (5)를 발파진동에 대한 안전성 평가에 사용해야 한다. 특히 두 식 중에서 주변 구조물과의 거리와 해당 구조물이나 인체에 대한 허용진동속도를 고려함으로써, 지하비축기지 건설작업 중 발파에 대한 보수적인 최대 지발당 장약량을 결정할 수 있다. 이 연구의 대상 부지에서 최대 지발당장약량을 25 kg으로 설정하였을 때, 주 저장 공동에서의 발파에 의해 발생하는 진동수준은 Fig. 5와 같이 예측되었다.

3. 시설물의 안정성 평가

지상 시설물의 피해 수준을 결정함에 있어서 시간에 따른 발파진동속도, 즉 발파진동속도 시간이력도

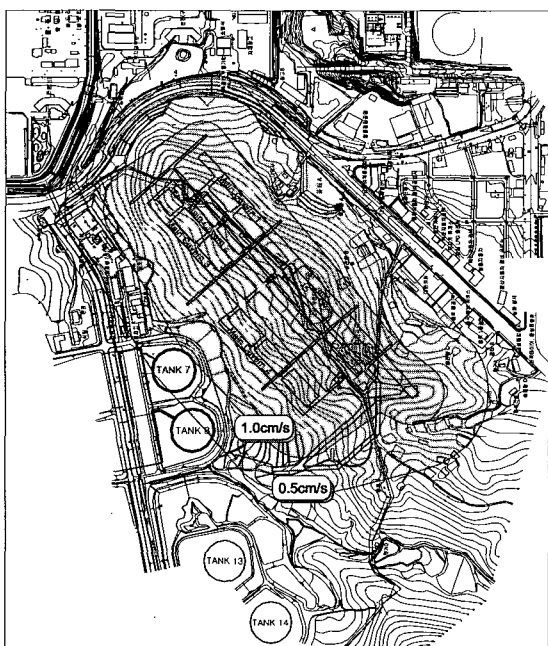


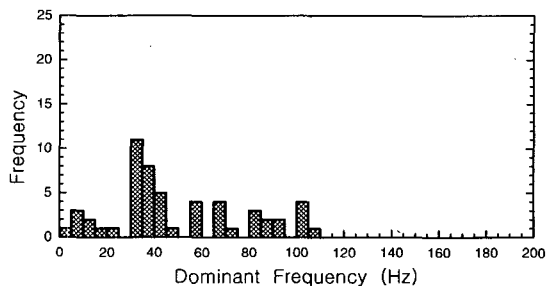
Fig. 5 Predicted peak particle velocity by blasting in the main storage cavern (maximum explosive charge per delay = 25 kg)

중요한 기준이다. 최대진동속도가 같더라도 진동을 유발시키는 파형의 주파수가 다르게 작용한다면, 지반 위에 위치한 시설물의 반응도 다르게 나타난다. 따라서 진동을 받은 시설물의 고유진동수와 감쇠특성을 살펴보고, 구조물의 변형을 야기하는 진동 주파수를 살펴보아야 한다.

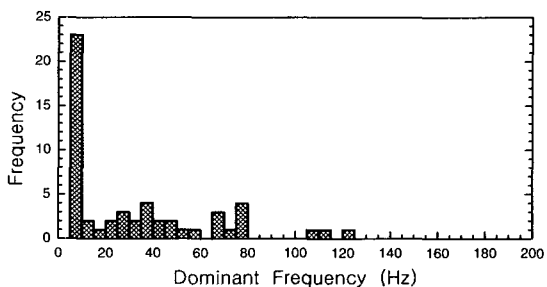
3.1 주파수 분석

공사용터널 입구부에서의 시험발파에서 측정된 54개의 발파진동 자료에 대하여 각 방향성분별 FFT (fast fourier transform)에 의한 주파수 분석을 수행하였다. FFT에 의한 주파수 분석의 결과에서 최대 진폭을 가지는 주주파수를 결정하였다.

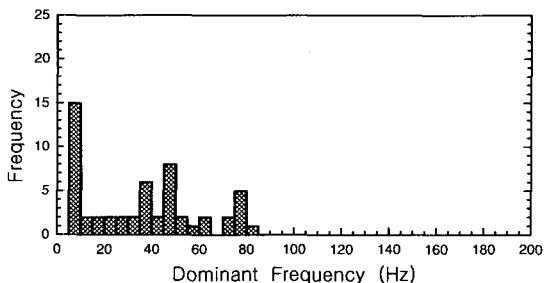
FFT에 의한 주파수 분석 결과, 발파원과 가장 가까운 측정지점과 가장 먼 측정지점 간의 거리 차이가



(a) Transverse



(b) Vertical



(c) Longitudinal

Fig. 6 Histogram of the dominant frequency by the directional components

크지 않음으로써 각 방향성분별 주주파수 대역의 거리에 따른 변화 경향은 보이지 않았다. 발파진동의 방향성분별 주주파수 대역을 살펴보면, 접선방향성분은 2~110 Hz, 수직방향성분은 5~115 Hz, 그리고 진행방향성분은 5~85 Hz이었다(Fig. 6).

3.2 응답스펙트럼 해석

(1) 지상 저장탱크의 진동 특성

발파진동으로 인한 지상 저장탱크의 응답스펙트럼 해석을 수행하기 위해서는 지상 저장탱크와 저장탱크 내의 원유에 고유진동수를 알아야 한다.

지상 저장탱크와 같은 유체 저장 구조물에 풍압, 지진, 진동 등의 외력이 작용하게 되면 그 결과로 구조물은 유체에 힘을 전달하고 유체는 다시 구조물에 작용을 하면서 유체와 구조물 사이의 상호 간섭이 발생하게 된다. 이 때 외력을 받는 유체 저장 탱크내의 유체 자유표면의 주기적인 운동, 즉 출렁거리는 현상을 sloshing이라고 한다⁽⁸⁾. 유체와 구조물 사이의 상호 간섭을 고려하면, 유체 저장 구조물의 유체는 sloshing mass(sloshing을 일으키는 저장탱크의 상부 유체)와 impulsive mass(저장탱크의 벽면과 함께 진동하는 저장탱크의 중간부 유체)로 구분될 수 있다⁽⁹⁾.

Haroun⁽¹⁰⁾이 제안한 다음의 식 (6)과 (7)을 이용하여 저장탱크 내의 유체인 impulsive mass와 sloshing mass의 고유진동수를 가정하였다.

Impulsive mass의 고유진동수, ω_i

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

Sloshing mass의 고유진동수, ω_s

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

여기서, E 는 탱크 벽면의 탄성계수, H 는 유체의 높이, ρ_s 는 탱크 벽면의 밀도, g 는 중력가속도, S 는 탱크의 반지름(R)에 대한 유체 높이(S)의 비($=H/R$)이며, P 는 다음의 식으로 계산된다.

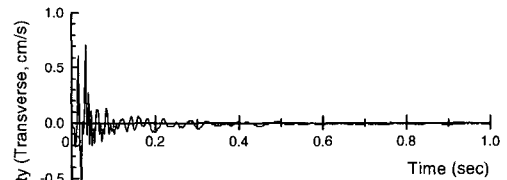
$$P = 0.037085 + 0.0894302S - 0.05088S^2 + 0.012523S^3 - 0.0012S^4 \quad (8)$$

지하비축기지 건설 과정 중 발생할 발파진동에 대한 지상 저장탱크의 안정성과 활용 가능성을 검토하

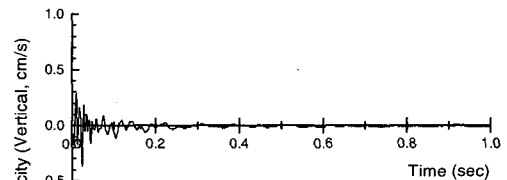
기 위해서, 지상 저장탱크에 원유가 채워진 비율에 따른 시나리오 해석을 수행하였다. 다음의 3가지 경우에 대하여, 식 (6)과 식 (7)을 사용하여 각각의 고유진동수와 고유주기를 계산한 결과를 Table 1에 제시하였다. 계산 결과, 채워진 원유의 비율이 감소함에 따라, impulsive mass의 고유진동수는 증가하였고, sloshing mass의 고유진동수는 감소하였다.

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

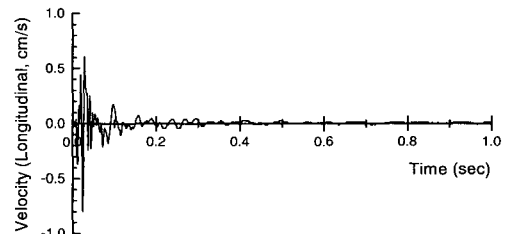
	Impulsive mass		Sloshing mass	
	Natural Frequency (Hz)	Natural Period (sec)	Natural Frequency (Hz)	Natural Period (sec)
Case 1	2.962	0.34	0.082	12.16
Case 2	4.119	0.24	0.068	14.64
Case 3	8.383	0.12	0.044	22.50



(a) Transverse



(b) Vertical



(c) Longitudinal

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

- Case 1 : 탱크에 원유가 80 % 채워진 경우
- Case 2 : 탱크에 원유가 50 % 채워진 경우
- Case 3 : 탱크에 원유가 20 % 채워진 경우

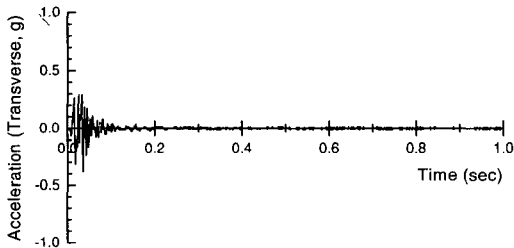
탱크에 유체가 저장된 경우 탱크 벽면의 자체 증량은 탱크 유체의 유효 질량에 비교하여 매우 작음으로 무시될 수 있고⁽⁹⁾, 탱크 벽면에서의 최대 변위는 유체의 sloshing에 의한 영향에 의해 발생하므로⁽¹¹⁾, 이 연구에서는 원유의 저장 높이에 따른 sloshing mass의 고유진동수에 대한 최대 변위를 비교하였다.

(2) 응답스펙트럼 해석 결과

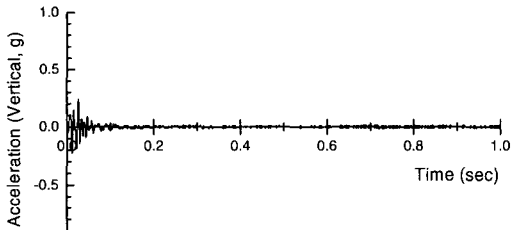
공사용터널 입구부에서의 단일공 발파를 통해 얻어진 진동속도 시간이력(Fig. 7)과 진동가속도 시간이력(Fig. 8)을 입력변수로 사용하여, 구조물의 고유주기에 따른 방향성분별 응답스펙트럼 해석을 수행하였다(Fig. 9).

지상 저장탱크의 안정성을 평가하기 위한 기준으로, 기존의 연구⁽⁸⁾에서 사용된 식 (9)의 허용 변위

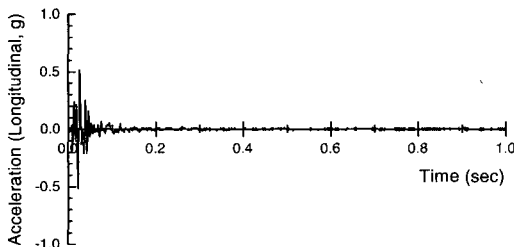
량을 적용하였다. 이 때 계산된 허용 변위량은 탱크 셸(tank shell)의 부등침하량을 기준으로 한 것으로, 모든 방향성분의 허용 변위량(D_a)으로 가정하였다.



(a) Transverse

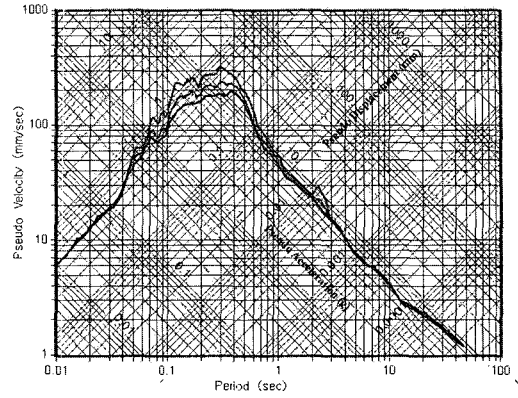


(b) Vertical

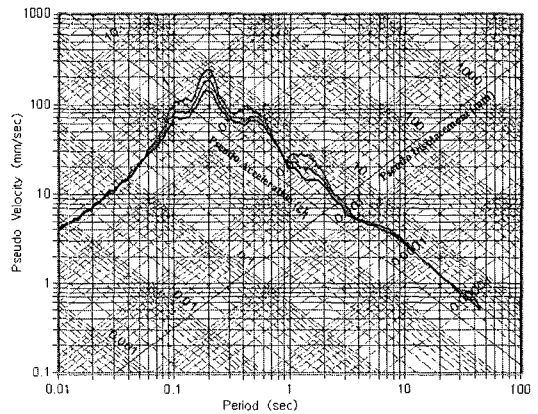


(c) Longitudinal

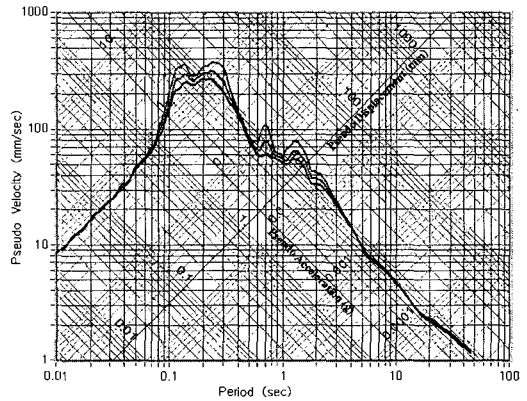
Fig. 8 Particle acceleration-time histories by the directional components



(a) Transverse



(b) Vertical



(c) Longitudinal

Damping : 0.05 0.10 0.15

Fig. 9 Response spectrums by the directional components

식 (9)에서, 저장탱크의 높이(H_t)는 21.96 m이므로, 허용 변위량은 4.39 cm로 계산되었다.

$$D_a = \frac{H_t}{500} \quad (9)$$

Fig. 9에 도시된 방향 성분별 응답스펙트럼을 바탕으로, 각기 다른 감쇄비 조건과 탱크에 원유가 채워진 비율 조건을 고려하여 저장탱크 최상단에서의 최대 변위를 예측한 결과를 Table 2에 제시하였다. 저장탱크 최상단에서의 방향 성분별 최대 변위는 모든 시나리오에서 0.781 cm 이하였다.

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 응답스펙트럼 해석의 입력변수로 사용된 진동속도 시간이력과 진동가속도 시간이력은 실제 지하비축기지 건설작업 단계의 많은 발파공을 이용한 발파가 아닌 단일공 발파에서 얻어진 것이다. 시공중 실제 발파에서 얻은 발파진동속도 시간이력과 발파진동가속도 시간이력을 이용한 동일한 방법의 응답스펙트럼 해석을 향후 수행함으로써, 이 연구 결과의 타당성을 검토할 수 있다.

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

4. 결 론

이 연구에서는 지하 원유비축기지의 건설과정 중 발파진동에 대한 지상 저장탱크를 포함한 주변 구조물의 안정성을 확보하기 위해서, 사전에 건설 예정부지에서 시험 발파를 수행·분석하였다. 주된 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 건설 과정에서 발생할 발파진동속도를 예측할 수 있는 95% 발파진동식은 다음과 같이 산정되었으며, 이는 예정부지와 유사한 지질 조건의 국내 여러 현장에서 산정된 발파진동식들의 중간 정도에 해당하였다.

공사용터널 입구부 (95% 발파진동식):

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

저장공동 중앙부 (95% 발파진동식):

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

(2) 측정된 발파진동의 주주파수 대역은 2~110 Hz(접선방향성분), 5~115 Hz(수직방향성분), 그리고 5~85 Hz(진행방향성분)이었다. 또한 측정된 발파진동속도 시간이력과 발파진동가속도 시간이력을 이용한 응답스펙트럼 해석을 수행한 결과, 탱크에 채워진 원유의 비율에 상관없이, 저장탱크의 최상단에서의 변위는 탱크 셸(tank shell)의 부등침하량을 기준으로 한 허용 변위량 4.39 cm를 초과하지 않을 것으로 예상된다.

후 기

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

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) Ryu, C. -H., Sunwoo, C., Shin, H. -S., Chung, S. -K. and Choi, B. -H., 1994, Blast Design of Hilly Rock Excavation Adjacent to Structures and Facilities, Tunnel and Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 4, pp. 38~46.

(5) Lee, C. -I., 1999, Review of Propagation Equations of Blasting Vibration in Korea and Reduction Cases of Blast-induced Vibration According to Cut-blast, Proceedings of the Seminar on the Construction Technology of Storage Facility, in Korea, pp. 77~99.

(6) Kang, C. -W., Choo, Y. -R. and Park, H. -S., 2001, A Study on the Application of True Maximum Vector Sum and Maximum Vector Sum in Vibration Monitoring of Blast, Explosives and Blasting Journal of Korean Society for Explosives and Blasting Engineering, Vol. 19, pp. 19~26.

(7) Lee, C. -I., 2004, Safety Analysis by Blast-induced Vibration, A part of the Report of Investigation on the ○○ Additional Storage Facility, Seoul National University, in Korea, Chapter 4.

(8) Lee, Y. -S., Kim, H. -S., Lee, J. -H. and Ko, S. -H., 2003, A Study on the Sloshing of the Rectangular Tank Partially Filled with Fluid Under Translational Motion, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 8, pp. 591~597.

(9) 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.

(10) Haroun, M. A., 1983, Vibration Studies and Test of Liquid Storage Tanks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, pp. 179~206.

(11) Daewoo Engineering Company, 2002, Earthquake-resistant Analysis of Product-oil Tank Within Seosan Additional Storage Facility, Report of Investigation, In Korea.