중추낙하로 유발된 지반진동에 대한 링월기초 액체저장탱크의 응답 분석

Response Analysis of Liquid Storage Tanks on Ringwall Foundation to Ground Vibration Caused by Falling Weight

임종진* · 하익수**

Lim, Jongjin*, and Ha, Ik-Soo**

Abstract

In this study, on-site tests were performed to analyze the response characteristics of cylindrical steel structures on the ring wall foundation to landfill ground vibration and provide significant safety precautions and reference values for site management. Vibrations were generated through free fall of the weight, and the vibration source energy was changed by adjusting the fall height of the weight. The ground vibration effect on landfill was analyzed by combining the three-axis measurement data to generate the peak particle velocity (PPV), and the dominant frequency results were obtained using the fast Fourier transform. The analyses of the PPV and dominant frequencies on the concrete pavement (20 cm thick), where the liquid storage tank was located, showed a different area of vulnerability to ground vibration on the tank. We also derived an expression to predict the PPV on the concrete pavement as a function of the vibration energy and the distance from the vibration source. The correlation between the PPV on the pavement and the PPV on the tank wall was analyzed. A reference value for on-site management reflecting the dominant frequency, which is a vibration characteristic value, was recommended.

Key words : Landfill, Ground Vibration, Ringwall Foundation, Peak Particle Velocity, Liquid Storage Tank

요 지

매립지 지반진동에 의한 링월기초 위의 원통형 강재 구조물의 응답거동 특성을 분석하고 현장 관리시 유의점과 기준치를 제시하기 위하여 현장시험을 수행하였다. 중추를 자유낙하시켜 진동을 발생시켰고, 중추의 낙하고를 조정하여 진동원의 에너지를 변화시켰다. 매립지반의 진동원에 의한 진동영향 분석을 위해 3축 방향 가속도계를 지반 지표면, 콘크리트 포장면, 탱크 벽면에 각각 설치하여 계측하였으며, 계측결과를 통해 최대입자속도(PPV)와 푸리에변환(FFT)에 의해 우세주파수(dominant frequency)를 도출하였다. 링월기초 액체저장탱크가 위치한 콘크리트 포장면(두께 20 cm)에서 진동에너지와 이격거리에 따른 함수로 PPV 예측식을 제안하였으며, 이로부터 산출한 포장면의 PPV와 탱크 벽면의 PPV와의 상관관계를 분석하여 진동특성값인 우세주파수를 고려한 현장관리 기준치를 제안하였다.

핵심용어 : 매립지, 지반진동, 링월기초, 최대입자속도, 액체저장탱크

1. 서 론

지반 진동은 지진과 같은 자연적인 원인뿐만 아니라 인공적인 원인으로 인해 발생한다. 이러한 지반의 진동은 기

설치된 구조물에 영향을 미치게 된다. 지반진동에 노출된 구조물은 진동의 강도 및 주파수, 구조물의 고유주파수 등에 따라서 큰 손상을 받을 수 있다(Siskind et al., 1980). 우리나라는 국토가 협소하여 기존 구조물 인근에서 공사에 의한

*정회원, 한국소방산업기술원 선임연구원·공학박사(E-mail: jjlceo@nate.com)

Member, Ph.D., Senior Research Engineer, Korea Fire Institute

**교신저자, 정회원, 경남대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-55-249-2669, Fax: +82-505-999-2165, E-mail: geotech@kyungnam.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University

진동이 자주 발생하며, 산업단지의 경우 주변 기계류 작동 등에 의해서도 진동이 야기된다. 액체저장탱크는 얇은 실린더 형태의 구조물로서 액체저장탱크의 진동응답특성은 저장된 액체에 의해 좌우되며 일반 구조물의 동적거동과는 다른 양상을 보인다.

진동으로부터 발생하는 유체의 동압력을 산정하기 위한 방법은 1930년대부터 해석적 방법으로 시작되었다. 초창기에는 액체저장탱크의 구조물은 강체로, 유체는 비압축성으로 간주하고 지반진동에 대한 유체의 압력을 해석하는 방법으로 유체-구조물 상호작용계의 거동분석을 시도하였다(Housner, 1963). 그러나 1964년 Niigata, 1964년 Alaska, 1966년 Parkfield 지진 등 1960년대 중반 잇따라 발생한 지진에서 강체로 가정된 탱크가 큰 손상을 받게 되었고, 이후에 Haroun and Ellaithy (1985)는 탱크벽면의 유연성을 추가하여 구조물과 유체의 상호작용을 해석하였다.

한편, 유체의 액면요동 효과(sloshing effect)는 일반적으로 선형 베르누이 방정식을 적용하여 고려하게 되는데, Chen et al. (1996)은 강성벽체 탱크에서 큰 진폭의 액면요동 거동을 해석하였다. 이후에는 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 자유수면 액면요동을 수치해석적 방법으로 접근하여 탱크의 거동을 해석하고 있다(Livaoğlu and Doğançin, 2006). Shekari et al. (2009)은 경계요소(boundary element)와 유한요소(finite element)를 결합하는 방법으로 유체동수압(hydrodynamic pressure)을 효과적으로 고려하였고, 유체-구조물 상호작용 해석을 통한 액체저장탱크의 면진효과(isolation effect)를 분석하였다. 액체 저장탱크에서 면진장치(base-isolation system)를 사용하는 경우 구조물의 응답이 저주파 대역으로 이동하여 저주파 특성을 나타내는 유체 자유수면 운동이 증폭되며, 면진장치가 보다 유연하게 설치될수록 저장탱크는 강체거동에 근접하여 거동하는 경향을 나타낸다(Kim et al., 2002). 최근에는 탄성정역학 및 탄성동역학이론을 활용하여 반무한체 경계요건을 고려하는 방법으로 Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM)를 이용한 액면요동 거동을 해석하고 있다(Lin et al., 2015). Amabili et al. (1998)과 Papaspyrou et al. (2004)은 유체가 일부 저장되어 있는 탱크의 응답거동을 해석하였으며, Tang (1994)과 Shivakumar and Veletsos (1995)는 유체의 불균질성을 고려하였고 층(layer)을 구분하여 액면요동 영향을 해석하였다.

그러나 상기 선행 연구들은 이론적 해석에 그쳤으며, 지반진동에 의한 현장시험 결과를 보여주지는 못했다. 또한 국내 대용량 유체저장 탱크(위험물안전관리법령의 100만 리터 이상 탱크)의 약 83%가 해안가 매립지반에 위치하고 있으며, Fig. 1과 같은 링월(ring wall) 형태의 특이한 기초가 적용되고 있으므로, 이러한 지반 및 기초조건을 갖춘 현장에서 지반진동에 의한 유체-구조물 상호 작용 파악을 위한 현장 실측시험이 필요하다. 지반의 구성, 기초의 특이성, 기초에

Fig. 1. Ring Wall Foundation

기초에 작용하는 힘들의 구성, 상부구조물의 유체-구조물 상호작용 등 여러 가지 조건들을 감안하여 지반진동 영향을 파악하기 위해서는 현장실험을 통한 결과분석이 가장 좋은 방법이다.

본 연구에서는 실제 링월기초 액체저장탱크가 건설된 매립지반에서 지반진동을 인위적으로 발생시켜, 지반과 탱크에 부착된 계측기로부터 진동 데이터를 획득하였다. 현장 시험 계측 데이터로부터 Peak Particle Velocity (PPV)와 우세(지배)주파수를 분석하여 액체저장탱크에 근접한 지반의 진동 영향을 예측할 수 있는 방법을 제안하였고, 탱크 운영 시 유의점과 관리기준치를 제시하였다. 다만, 중추낙하 진동실험은 액체 저장탱크에 가장 큰 진동영향으로 작용하는 인접 부지 확장에 따른 동다짐에 대한 영향을 파악하는데 가장 효과적인 실험이다. 본 연구의 범위는 이에 따른 진동 관리기준을 제시하는 것이다. 그러므로 본 연구의 결과는 다양한 진동원에 대한 액체저장탱크의 진동응답을 대변하는 일반화된 결론은 아니다.

2. 시험조건

중추 자유낙하로 발생하는 진동에 대해 주변지반과 시험 대상 탱크의 응답반응을 확인하기 위해 각 시험대상 위치에 3축의 가속도계를 설치하였다. 시험대상 지역의 지반조건, 액체저장탱크의 정보, 진동측정 방법은 다음과 같다.

2.1 지반조건 및 시험대상

액체저장탱크는 Fig. 2와 같이 울산광역시 온산국가산업단지에 위치하고 있으며, 항공사진에서 보듯이 해안매립지 위에 설치되어 운용 중에 있다.

현장실험이 진행된 곳은 2011년에 바다를 매립하여 새로 조성한 지역으로 지층은 지표면으로부터 매립토층, 퇴적토층, 풍화토층, 기반암층의 순서로 비교적 단순하게 분포하고 있다. 이 중 매립토층은 부지 조성 단계에서 매립되어 형성된 지층으로 지표면에서 약 20 m의 두께로 분포하고 있다. 매립에 사용된 토사는 외부 토취장에서 반입되었으며, 주로 실트질 자갈(GM)로 구성되어 있고 부분적으로 점토 내지 실트 성분과 자갈 섞인 실트질 모래(SM) 및 30 cm 내외의 호박돌도 불규칙하게 분포되어 있다. 매립토층의 표준관입

Fig. 2. Site Location and Aerial Photography

(a) Location of tank and vibration source

(b) Ground condition

Fig. 3. Tank Location and Ground Condition

시험 결과는 Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 자갈과 호박돌의 분포에 따라 편차를 보이고 있으나, 그 영향을 제외하면 대체로 10~15의 N값이 측정되었다. 매립토층은 2016년 동다짐으로 지반개량을 실시하였고, 개량 이후 1,500 mm × 1,500 mm 크기의 대형평판에 대한 실하중 재하시험에서 33.6~35.1 MN/m²의 지반반력계수가 확인되었다. 진동원의 위치는 포장이 완료되지 않은 상태의 원지반이고, 액체저장 탱크는 콘크리트 포장(콘크리트두께 20 cm)이 완료된 곳에 위치하고 있다.

실험은 Fig. 3(a)의 액체저장탱크 Tank 9에 대해서 진행되었다. 대상 탱크는 2017년에 완공되어 현재 가솔린(gasoline) 액체를 저장하여 운용 중에 있는 원통형 탱크이며 하부 구조는 링월형태의 기초로 시공되었다.

2.2 진동측정

진동을 발생시킨 중추는 각 변의 길이가 13 m인 정육면체 형상의 콘크리트 블록이며 무게는 5톤으로 제작되었고, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m 높이의 낙하고에서 자유낙하(Fig. 4 참조)를 통해 진동을 발생시켰다.

탱크의 높이별 진동응답을 측정하기 위해서 Fig. 5와 Table 1에 보인 바와 같이 탱크에 4개의 가속도계를 부착하였다. Fig. 5와 Table 1에서 L1~L4는 각각 가속도계가 설치된 위치의 지면에서부터의 높이를 의미하며, 11~14는 설치된 가속도 간의 간격을 나타낸다. 가속도계는 Fig. 6과 같이 벽면(shell)에 접선(tangential)과 법선(radial) 방향을 각각 X축, Y축으로, 연직방향을 Z축으로 하여 Y축이 진동원을 향하도록 부착하였다. 진동원으로부터 거리별 진동감쇠계수를 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 진동원으로부터 거리별

Fig. 4. Falling Weight and Free Falling

Fig. 5. Storage Tank and Accelerometer Location

Table 1. Tank Information and Accelerometer Location

Capacity (m ³)		30,000
Weight (ton)	Empty	798.5
	Oper.	30,798.1
	Test	32,892.1
L (m)		22.1
R (m)		21.5
Accelerometer location (m)	L1	2.9
	L2	8.9
	L3	14.9
	L4	21.5
	I1	2.9
	I2	6.0
	I3	6.0
	I4	6.6

Fig. 6. 3-Direction of Accelerometer

Fig. 7. Accelerometer Location on the Ground

로 13~17번 가속도계를 설치하였고, 13번 가속도계는 포장 이 없는 토사 위에 설치하였고, 14, 15번은 도로포장 위에, 16, 17번은 탱크단지의 포장 위에 설치하였다. 아울러, 토사 지표면에서의 진동감쇠계수를 추정하기 위하여, 토사 위에 만 6개의 가속도계를 설치하고, 토사의 진동응답을 파악하는 별도의 진동응답 실험을 수행하였다.

3. 진동감쇠 특성 분석

탱크에 담긴 액체는 석유화학 제품으로서 위험물로 분류되어 위험물안전관리법령을 준수하기 위해 콘크리트 포장 위에 건설되며, 수출입산업의 특성상 대부분 해안가 매립지에 위치하고 있다. 본 연구에서는 시험대상 지반의 각 위치에 설치된 가속도계 측정 자료로부터 Peak Particle velocity (PPV)의 경향을 도출하였고, 이로부터 액체저장탱크가 건설된 매립지반과 콘크리트 포장의 지반감쇠 특성을 분석하였다. 지반의 PPV는 각 방향별 입자속도 벡터합의 값 중 최대값을 의미하며, 진동 주파수와 함께 진동에 의한 구조물의 영향을 평가하는데 일반적으로 사용되고 있다(Mayne et al., 1984).

진동원에 의한 지반의 진동은 지반의 재료특성에 따른 감쇠 (intrinsic or material attenuation)와 진동원으로부터의 거리에 따른 기하학적 감쇠(geometrical or radiation attenuation)로 시간과 공간에 따라서 진폭이 감소한다. 중추의 낙하로 발생되는 진동은 추의 무게, 낙하고 등 낙하 시스템과 다양한 지반 조건들의 종속변수로 표현할 수 있으나, 조건을 단순화시켜 지반의 PPV를 Eq. (1)과 같이 중추의 에너지에 의한 효과를 정규화시킨 이격거리(scaled distance)의 거듭제곱함수(power function)로 나타낼 수 있다(Mayne et al., 1984).

$$PPV = a \times \left(\frac{D}{\sqrt{W \cdot H}} \right)^b \quad (1)$$

여기서, PPV : 최대입자속도(mm/sec)

D : 진동원 이격거리(m)

W : 중추의 무게(tonf)

H : 낙하 높이(m)

a, b : 진동특성 상수

상수 a는 초기 PPV의 함수이며, 상수 b는 거리에 따른 진동감쇠율의 함수이다. Eq. (1)을 분석해 보았을 때 a값은 진동원의 에너지 값과 반비례하고, b값은 진동이 전파되는 지반의 감쇠율과 비례한다고 해석할 수 있다. 앞서 언급한 식의 분석은 진동원에서 이격된 거리와 에너지에 따른 실험 결과를 나타낸 Fig. 8에서도 확인할 수 있다. Fig. 8을 분석하여 상수 a, b의 값을 분석한 Table 2의 결과에서 보듯이 콘크리트 포장면에서 에너지값이 작을수록 a값이 커짐을

Fig. 8. PPV with Energy Variation

Table 2. Coefficient a and b

Energy (tonfm)	Location	a	b
25	Conc.	463.5	-3.39
50	Conc.	233.5	-3.51
75	Conc.	155.0	-3.64
100	Conc.	114.9	-3.74
50~100	Soil	10.9	-1.24

확인할 수 있으며, 콘크리트 포장면(포장두께 20 cm)위와 지반면위에서의 b값이 다를 수 있다.

Mayne et al. (1984)은 본 논문의 지반과 유사한 매립지반에서 a값은 7~13, b값은 -1.2에서 -1.4 사이로 분석하였는데, Table 2와 같이 본 실험에서도 지반의 경우 콘크리트 포장 조건과는 달리 중추낙하 에너지에 상관없이 a값이 10.9, 그리고 b값이 -1.24로 나타났다. 콘크리트 포장면이 있는 곳에서는 진동감쇠가 더 크게 나타나는데, Table 2의 실험분석결과를 보면 콘크리트 포장면에서 b값은 토사 지반면보다 3배 이상 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 2의 결과에서 나타나듯이 콘크리트 포장면에서의 진동특성상수 중 b값은 -3.39에서 -3.74 사이의 값으로 분산이 크지 않아 Mayne et al. (1984)이 제시한 토사에서처럼 상수로 간주할 수 있으나, a값은 토사와는 달리 콘크리트 포장면에서는 에너지에 따른 변수로 간주할 수 있다. 실험결과를 통해, a값과 에너지 간의 상관관계를 Fig. 9와 같이 대수관계로 도시하여 추세선을 거듭제곱함수(power function)의 형태로 표시하였다.

a값을 고려할 때는 오히려 에너지값을 크게 하는 것이 진동영향에 유리한 결과가 나타났으며, Fig. 9의 결과와 같이 상수 a값과 진동원 에너지 사이의 상관관계를 다음의 Eq. (2)로 제안할 수 있다.

$$a = 11,801 \times E^{-1.004} \quad (2)$$

여기서, a : Eq. (1)의 상수값
E : 진동원 에너지(tonf · m)

Fig. 9. Correlation of a and Energy (E)

실험 결과를 일반화하기 위해서는 다양한 지반조건에 대해 실험을 진행해야 할 필요가 있으나, 국내에서 대용량 유체저장 탱크가 다수 분포하고 있는 본 시험대상과 유사한 매립지반(매립층 두께 20 m, 토사 분류 GM과 SM, N값 10~15)에 위치한 두께 20 cm 정도의 콘크리트 포장면에서는 감쇠율의 정도를 나타내는 b값은 적어도 -3 정도로 적용 가능할 것이다.

상기의 경우를 감안하여 PPV에 대한 보수적인 해석을 위해 b를 -3으로 적용하고 Eq. (2)를 Eq. (1)에 적용하면 본 연구에서와 같은 조건에서는 Eq. (3)과 같이 콘크리트 포장면의 PPV를 거리와 진동에너지로 표현할 수 있다.

$$PPV = 11,801 \times E^{0.5} \times D^{-3} \quad (3)$$

여기서, PPV : 최대입자속도(mm/sec)
D : 진동원 이격거리(m)
E : 진동원 에너지(tonf · m)

제안된 Eq. (3)을 활용하면 진동원 에너지와 이격된 거리를 알면 매립지반에서 콘크리트 포장(두께 20 cm)에서의 PPV를 예측할 수 있다.

4. 액체저장탱크의 진동응답

액체-구조물 상호작용을 고려한 해석적 방법이나 수치해석에서 탱크 벽면에 작용되는 최대의 유체동수압을 산정하기 위해서 탱크가 액체로 가득 채워져 있는 상태를 가정하고 해석을 수행한다. Tank9는 이러한 해석을 위한 가정에 가장 가까운 상태로, 실험 당시 저유고가 21.41 m로 운용 중 탱크가 최대로 채워져 있는 상태이다. Fig. 10은 진동에너지에 따른 Tank9의 높이별 응답 최대입자속도를 나타낸 것이다. 최대입자속도는 에너지의 크기에 비례해서 증가하지만, 높이에 비례하지 않고 탱크 높이의 약 2/3지점에서 가장

Fig. 10. PPV with Height on Tank9

값이 큰 일정한 역 C자형의 분포 경향을 나타냈다.

탱크 벽면에서 최대입자속도는 입자의 진동 때문에 발생하는 응력을 반영하며, 따라서 본 시험에서 진동영향으로 발생하는 최대입자속도는 유체동수압과도 상관성이 있다. Haroun (1983)은 강성과 연성의 원통형 탱크에 대한 해석적 접근을 통해서 유체의 진동으로 탱크 벽면에 작용하는 유체동수압을 Fig. 11과 같이 예측하였다. 강성벽면일 경우 높이에 따라 완만히 줄어들어 최상부에서는 유체동수압이 0이 되지만, 연성벽면일 경우 높이에 따라서 역전현상이 발생하는 것으로 예측하였다. Cho et al. (2004)은 탱크 하부의 지반이 느슨한 상태, 조밀한 상태, 기초와 고정인 상태에서 탱크 벽면에 작용하는 유체동수압을 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 수치해석을 통해서 Fig. 12와 같이 예측하였다. 이 외에 수치해석을 이용하여 연성 탱크(flexible tank) 내부의 액체로 인한 유체동수압을 예측한 연구결과들은 대체로 높이의 2/3 부근에서 최대의 유체동수압이 작용하는 것으로 예측하였다.

본 연구에서 측정된 탱크 벽면의 최대입자속도의 최대값은 14~15 m의 높이에서 측정되었으며, 이는 전체 높이의 약 2/3 위치에 해당하고, 최근의 다른 연구에서 최대 유체동수압의 예측 작용위치와 일치한다. 또한 최대입자속도가 가장 크게 나타나는 위치부터는 높이가 높아질수록 최대입자속도가 감소하는데 지반진동에 의한 액체의 동수압 중 유체의 질량으로 벽체에 충격을 가하는 충동모드(impulsive mode)가 상대적으로 크게 나타나기 때문인 것으로 보이며 이러한 경향은 선행 연구결과와도 일치한다(Veletsos, 1974).

탱크에 유체가 가득 채워있는 상태인 Tank9에서 높이별로 분석된 우세주파수 분포를 Fig. 13에 표시하였는데, 에너지 변화에 상관없이 동일한 높이에서 비슷한 우세주파수를 나타내고 있다. Fig. 13에서 제시된 우세주파수는, Fig. 6에서 ‘Y’ 방향인 벽체(shell) 방사방향의 가속도응답을 Fast Fourier

Fig. 11. Variation of Dynamic Hydro Pressure (Haroun, 1983)

Fig. 12. Dynamic Hydro Pressure on Various Ground Condition (Cho et al., 2004)

Fig. 13. Dominant Frequency with Height on Tank9

Transform (FFT) 분석하여 산정하였다. 높이별 분포를 보면 탱크 높이의 2/3지점에서 가장 작은 값을 보이고 1/3지점에서 가장 큰 값을 보이고 있는 S자형 패턴을 나타내고 있다. USBM RI 8507 (US Bureau of Mines, Report of Investigation

Fig. 14. Vibration Affect According to USBM RI 8507

8507) (Siskind et al., 1980) (Fig. 14 참조) 등 우세주파수가 작을 경우 허용 PPV의 값이 작아지는 것을 감안할 때, 최대입자속도와 우세주파수 두 가지 경우 모두의 결과는 탱크 높이의 2/3지점이 지반진동에 가장 취약함을 나타내고 있다.

Tank9에 대해서 진동영향 기준으로 널리 사용되고 있는 USBM RI 8507을 적용하여 지반진동에 의한 PPV값과 우세주파수 두 가지 모두를 고려 한 후, 진동영향을 분석한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 본 연구에서 Tank9의 경우도 RI 8507 기준으로 안전성을 판단해보면 구조물에 손상을 미치는 정도는 아닌 것으로 나타났다. 우세주파수가 10 Hz 이하에서도 PPV에 따라서는 응답결과가 충분히 안전영역에 해당될 수 있는 것으로 나타나, 근접공사에 대한 RI 8507의 우세주파수 10 Hz 이하 규제 기준은 매우 보수적인 것으로 판단되었다.

Fig. 14에서 탱크 높이별로 비교해보면 RI 8507 기준의 손상레벨선과의 상대적인 값(손상레벨선의 PPV 값에 대한 예측된 PPV값)을 비교해 보면 #7계측기 위치(탱크 높이의 2/3지점)에서의 값이 다른 위치에 비해 3.2~4.3배 정도 위험성이 높게 나타난다. 따라서 PPV값도 높게 나타나고 우세주파수도 불리하게 작용하는 탱크 높이의 2/3지점에서 액체저장탱크에 사용되는 stiffener girder 등의 보강 설계가 필요할 것이다.

근접 포장면에서의 PPV와 탱크 벽면의 각 지점에서 상관관계 분석결과를 Fig. 15에 나타내었다. 탱크 포장면에서 PPV값은 Eq. (3)을 이용해 산정하였으며, 탱크벽면과의 이격거리를 1 m로 하고 진동에너지는 탱크 벽면에서 측정된 PPV값의 경우와 동일하게 하였다.

Fig. 15의 상관관계를 통해 액체저장량이 고위인 탱크가 지반진동에 안전하기 위한 근접포장면의 PPV를 산정해 보았다. Fig. 14의 RI 8507 기준에 안정된 조건을 만족하기 위해서는 지반진동에 가장 취약한 위치인 #7(탱크 높이의 2/3지점)을 기준으로 보면 근접 포장면 PPV를 5.5 cm/sec 이하로 관리해야 할 것이다.

Fig. 15. Correlation of Tank Wall PPV and Concrete Paving PPV

권장관리 기준 PPV, 5.5 cm/sec를 산정한 방법과 절차를 요약 설명하면 다음과 같다. Fig. 14에서 ‘•’로 표시되는 #7 위치(저장탱크 높이의 2/3지점)에서의 우세주파수에 대해 굵은 선으로 표시된 RI 8507 기준선에 해당되는 탱크 벽면에서의 PPV를 읽고, 이 값을 Fig. 15에 표시·제시된 #7 위치에서의 포장면에서의 PPV와 탱크 벽면에서의 PPV 상관식인 ‘ $y=0.6411x$ ’의 ‘y’에 대입하면 ‘x’값 즉 포장면에서의 PPV를 산정한다. 동일한 방식으로 Fig. 14의 #7 위치에서의 나머지 2개 점의 주파수에 대한 ‘x’값인 PPV를 산정하고, 3개 값의 최소값을 권장관리 기준 PPV인, 5.5 cm/sec를 정하였다.

5. 결 론

매립층 두께가 약 20 m인 지반에 위치하고 있으며, 링월형태의 기초로 되어 있는 액체저장탱크에 대하여 지반진동에 대한 영향을 현장시험을 통해 분석해 보았다. 진동원은 중추를 낙하시켜 인위적으로 발생시켰으며, 액체저장탱크가 위치한 콘크리트 포장면(두께 20 cm)과 액체저장 탱크에 대하여 최대입자속도와 우세주파수를 분석하여 지반진동 발생 시 주의 깊게 모니터링 해야 할 부분과 설계에 반영해야 할 점들을 제시하였다. 또한 콘크리트 포장면에서 최대입자속도 예측식과 탱크벽면의 최대입자속도와 상관관계를 분석하여 현장관리 기준치를 제시하였다. 본 연구로 획득한 결론은 다음과 같다.

- (1) 토사와 콘크리트 포장면에서 측정된 거리별 최대입자속도로부터 각각의 진동 감쇠식을 산정하였다. 에너지의 감쇠비율을 나타내는 b값은 일반토사에서 -1.24, 콘크리트에서 3.39~3.74로 측정되어 콘크리트에서 표면과의 감쇠비율이 월등히 큰 것을 알 수 있었으며,

본 시험대상과 유사한 매립지반에서는 포장두께 20 cm의 콘크리트에서 b값은 -3 정도를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

- (2) 콘크리트 포장면에서 진동특성상수 a는 진동에너지에 비례하는 것으로 나타났으며, $a = 11,801 \times E^{-1.004}$ 의 상관관계를 나타내고 있으며, 이를 활용하여 콘크리트 포장면의 최대입자속도(PPV)를 진동원과의 이격거리(D, 단위: m)와 진동원 에너지(E, 단위: $\text{tonf} \cdot \text{m}$)의 함수로 하여, $\text{PPV} = 11,801 \times E^{0.5} \times D^{-3}$ 의 예측식을 제안할 수 있었다.
- (3) 탱크에 유체가 가득 채워져 있는 경우에 최대입자속도가 탱크 높이의 약 2/3지점에서 가장 값이 큰 역 C자형 분포 경향을 보였는데, 이는 탱크 높이의 2/3지점에서 최대의 유체동수압이 작용할 것으로 예측한 다른 연구결과와 일치하는 경향을 보였다. 우세주파수의 높이별 분포는 탱크 높이의 2/3지점에서 가장 작은 값을 보이고 1/3지점에서 가장 큰 값을 보이는 S자형의 일정한 경향을 나타냈다.
- (4) 탱크에 유체가 가득 채워져 있는 경우에는 지반진동 발생 시 탱크 높이의 2/3지점을 유의 깊게 모니터링 하여야 하며, 필요 시 액체저장탱크에 사용되는 *stiffener girder* 등의 보강 설계가 필요할 것으로 판단된다. 지반진동에 안정된 조건을 만족하기 위해서는 근접 포장면 PPV를 약 5.5 cm/sec로 제한할 필요가 있음을 확인하였다.
- (5) 액체저장탱크의 경우 근접 공사 등 지반진동의 영향의 규제치인 우세주파수 10 Hz는 보수성이 너무 큰 기준으로, 우세주파수와 함께 최대입자속도를 동시에 고려한 지반진동에 대한 안정성 평가 방법이 고려될 필요가 있음을 확인하였다.
- (6) 진동에너지가 100 $\text{tonf} \cdot \text{m}$ 이하일 경우에는 본 연구결과에서 분석한 콘크리트 포장면 최대입자속도와 탱크벽면의 최대입자속도 사이의 상관관계식의 활용이 가능할 것이며, 탱크에 직접 계측기를 부착하는 것을 꺼려하는 현장 상황에서 향후 탱크에 계측기를 직접 부착하지 않고 탱크와 인접한 곳에서 계측한 최대입자속도를 활용하여 지반진동에 대한 안전성을 개략적으로 판단할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 과학기술기반 지역수요 맞춤형 R&D지원 사업으로부터 지원받아 수행되었습니다 (CN20120GB001).

References

Amabili, M., Paidoussis, M.P., and Lakis, A.A. (1998).

- Vibrations of partially filled cylindrical tanks with ring-stiffeners and flexible bottom. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 213, No. 2, pp. 259-299.
- Chen, W., Haroun, M.A., and Liu, F. (1996). Large amplitude liquid sloshing in seismically excited tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 25, No. 7, pp. 653-669.
- Cho, K.H., Kim, M.K., Lim, Y.M., and Cho, S.Y. (2004). Seismic response of base-isolated liquid storage tanks considering fluid-structure-soil interaction in time domain. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 24, No. 11, pp. 839-852.
- Haroun, M.A. (1983). Vibration studies and tests of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 11, No.2, pp. 179-206.
- Haroun, M.A., and Ellaithy, H.M. (1985). Model for flexible tanks undergoing rocking, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 111, No. 2, pp. 143-157.
- Housner, G.W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, No.2, pp. 381-387.
- Kim, M.K., Lim, Y.M., Cho, S.Y., and Cho, K.H. (2002). Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers A*, Vol. 22, No. 3A, pp. 587-597.
- Lin, G., Liu, J., Li, J., and Hu, Z. (2015). A scaled boundary finite element approach for sloshing analysis of liquid storage tanks. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 56, pp. 70-80.
- Livaoğlu, R., and Doğançün, A. (2006). Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 22, No.3, pp. 421-439.
- Mayne, P.W., Jones Jr, J.S., and Dumas, J.C. (1984). Ground response to dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 6, pp. 757-774.
- Papaspyrou, S., Karamanos, S.A., and Valougeorgis, D. (2004). Response of half-full horizontal cylinders under transverse excitation. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 19, No. 7, pp. 985-1003.
- Shekari, M.R., Khaji, N., and Ahmadi, M.T. (2009). A coupled BE-FE study for evaluation of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 25, No.3, pp. 567-585.
- Shivakumar, P., and Veletsos, A.S. (1995). Dynamic response of rigid tanks with inhomogeneous liquids, *Earth-*

- quake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 24, No. 7, pp. 991-1015.
- Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., and Dowding, C.H. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*. Report of Investigations 8507, NY, US Bureau of Mines.
- Tang, Y. (1994). *Mechanical models for tanks containing two liquids*. No. ANL/RE/CP-80722; CONF-940752-6, Argonne National Lab., IL (United States).
- Veletsos, A.S. (1974). Seismic effects in flexible liquid storage tanks. *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 630-639.

<i>Received</i>	■	March 29, 2021
<i>Revised</i>	■	March 30, 2021
<i>Accepted</i>	■	April 6, 2021