

基礎分離된 液體貯藏탱크의 類似 動的實驗

Pseudo-Dynamic Tests on Base-Isolated Liquid Storage Tanks

김남식* · 이동근**

Kim, Nam Sik · Lee, Dong Guen

Abstract

Base-isolated liquid storage tanks under seismic loading were tested by the Pseudo-dynamic test method. Substructuring technique in which a mixed integration method was adopted and the liquid tanks were simply modeled as a discrete system. This study gave experimental verification on the advantage of mounting the liquid tanks on base isolators in order to reduce the hydrodynamic forces on the tank wall.

요 지

본 연구에서는 원통형 액체저장탱크(cylindrical liquid storage tank)를 대상으로 積層고무받침(LRB) 방식의 기초분리장치(base isolator)를 사용하였을 때의 진동감소효과를 분석하기 위하여 지진하중에 대한 유사동적실험(Pseudo-dynamic test)을 수행하였다. 유사동적실험을 효과적으로 수행하기 위하여 구조분할기법(substructuring technique)을 도입하여 액체저장탱크를 수치적으로 모형화하였으며 효율적인 수치적분방법을 실험알고리즘에 적용하였다.

1. 서 론

구조물이 지진하중에 의해 진동을 할 경우에는 구조물에 작용하는 관성력에 의해서 매우 큰 전단력이 구조물의 기초에 전달된다. 따라서 지진하중에 의해서 발생하는 구조물의 피해는 상부구조물의 진동을 감소시킴으로써 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 수동제어(passive control)장치 중에서 가장 널리 활용되는 積層고무받침(laminated rubber bearing)방식의 기초분리장치(base isolator)를 사용하여

상부구조물의 진동감소효과를 분석하고자 한다. 구조물의 기초에 설치되는 기초분리장치는 i) 상부구조물의 주기를 지진하중의 탁월주기(predominant period)범위 밖으로 이동시킴으로서 상부구조물의 진동을 최소화하며 ii) 기초분리장치의 힘-변위 이력곡선에서 얻어지는 이력감쇠(hysteretic damping)에 의한 에너지소산효과(energy dissipation effect)를 가져온다.

구조물의 진동을 감소시키기 위한 장치로서 고안된 적층고무받침방식의 기초분리장치는 정적 및 동적특성이 전단변형, 수직하중 및 가력속도(loading rate) 등에 따라서 변화하기 때문에 전체적인 거동

* 정희원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 정희원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

특성을 수치적으로 간편하게 이상화하기에는 어려움이 많다. 따라서 본 연구에 앞서 수행된 積層고무받침방식의 기초분리장치에 대한 정적 및 동적 특성실험⁽¹⁾을 통하여 비선형특성을 파악하였으며 기초분리시스템에 적용하기 위한 가능성을 검증하였다.

방사성폐기물 및 액화천연가스(LNG)의 저장을 위한 산업설비 등에 널리 활용되고 있는 액체저장탱크는 탱크구조물의 벽면과 액체와의 상호작용으로 인하여 다양한 거동특성을 가지고 있다. 특히 탱크구조물의 형상에 따라서 해석방법에 차이가 있으며 이러한 수치해석과정에서 상당히 복잡한 이론적인 접근을 필요로 한다. 본 연구에서는 적층고무받침방식의 기초분리장치에 의한 원통형 액체저장탱크(cylindrical liquid storage tank)의 진동감소효과를 분석하기 위하여 유사동적실험(Pseudo-dynamic test)에 의한 비탄성 지진응답실험을 수행하였다. 기초분리된 액체저장탱크에 대한 유사동적실험을 수행하기 위하여 구조분할기법(substructuring technique)을 도입하였다. 따라서 상부구조물에 해당하는 액체저장탱크는 컴퓨터내에서 수치적으로 모형화하였으며 기초분리장치에 대해서는 실제 실험으로부터 비선형특성을 파악하였다. 기초분리장치에 의해 지지된 액체저장탱크는 탱크 벽면의 유연성을 고려하여 액체의 거동을 3개의 성분으로 나타낸 Haroun⁽²⁾의 등가시스템모형(mechanical model)을 이용하여 이상화하였다.

본 연구에서는 기초분리장치를 적용한 액체저장탱크의 진동감소효과 및 효율성을 실험적으로 분석하기 위하여 지반충격하중 및 지진하중에 대하여 유사동적실험을 수행하였다. 유사동적실험 알고리즘 내에서 수치적으로 가정된 원통형 액체저장탱크를 형상에 따라 높은 탱크(tall tank)와 낮은 탱크(broad tank)로 구분하여 적용하였으며 각 탱크의 벽면에 작용하는 3가지 액체성분들의 관성력 및 탱크 밑면에 작용하는 밑면전단력을 기초가 고정된 액체저장탱크에 대한 수치해석결과와 비교하였다. 또한 상부구조물을 지지하고 있는 기초분리장치의 전체갯수를 변화시켜 상대적인 기초분리효과의 효율성을 실험적으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 기초분리장치의 제원

본 연구를 위하여 제작된 적층고무받침방식의 기초분리장치에 대한 일반적인 제원을 그림 1에서 나타내고 있다. 적층고무받침의 전체높이는 65 mm로서 고무층의 두께는 2.5 mm이며 수직강성의 보강을 위하여 두께 1.6 mm의 철판이 10개 삽입되었다. 또한 적층고무의 상하에 10 mm 두께의 철판을 일체로 제작하여 두께 40 mm의 덮개철판(mounting plate)과 볼트로 연결하였다. 제작에 사용된 합성고무는 경도가 약 60DURO 정도인 chloroprene이며 보강철판은 일반 구조용 압연강재(KS D 3503)이다. 정적 및 동적 특성실험뿐만 아니라 유사동적실험을 수행하기 위하여 제작된 실험장치는 그림 2에서 보는 바와 같이 설치하였다. 일반적으로 기초분리장치는 상부구조물의 자중 및 수평방향의 외력이 작용하기 때문에 실험에 사용된 2대의 유압식가력기(hydraulic actuator)를 각각 수직방향과 수평방향으로 작용하도록 설치하였다. 수직방향으로 하중을

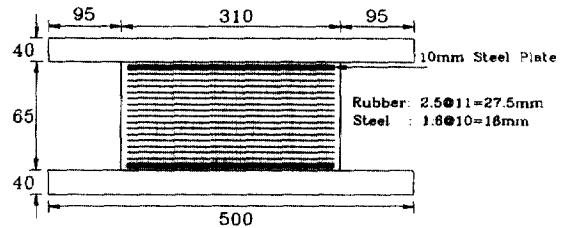


그림 1. 적층고무받침의 단면제원

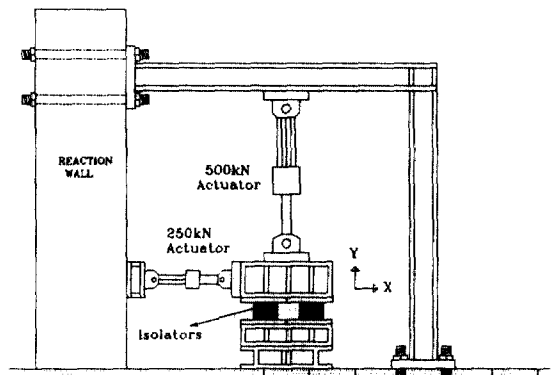


그림 2. 실험을 위한 가력장치

제어하기 위한 유압식가력기의 최대하중 및 최대변위는 각각 ± 500 KN, ± 150 mm이며 수평방향으로 변위를 제어하기 위한 유압식가력기의 최대하중 및 최대변위는 ± 250 KN, ± 250 mm이다. 수직방향 유압식가력기의 하중제어(force control)와 수평방향 유압식가력기의 변위제어(displacement control)가 동시에 독립적으로 작용하여 실험이 진행되었다.

3. 積層고무받침의 靜的 및 動的 特性

본 연구에서는 기초분리된 액체저장탱크에 대한 유사동적실험을 수행하기에 앞서서 적층고무받침방식의 기초분리장치에 대한 정적 및 동적특성실험⁽¹⁾을 수행하였다. 실험결과에서 얻어진 기초분리장치의 힘-변위 이력곡선으로부터 유효강성(effective stiffness)과 등가점성감쇠비(equivalent damping ratio)를 계산하였으며 이 값에 의하여 기초분리장치의 정적 및 동적 특성을 대표적으로 나타내었다. 실험으로부터 얻어진 기초분리장치의 정적 및 동적 특성을 간략히 설명하면 다음과 같다.

3.1 靜的 特性

수평전단변형(γ_H) 및 수직하중(P_V)을 각각 기초분리장치에 반복하중(cyclic load)으로 작용시킴으로써 수평 및 수직방향의 특성을 파악하기 위한 정적특성실험을 수행하였다. 여기서 정적특성실험은 장변방향으로 2개의 기초분리장치에 대하여 약 0.01 Hz 정도의 가력속도(loading rate)로 수행되었으며 다음에서 언급하고 있는 수직하중 및 계측된 강성은 1개의 기초분리장치에 해당하는 값이다.

(1) 수평방향의 靜的 特性

수평방향에 대한 특성실험은 최대전단변형을 10% (2.750 mm)부터 150%(41.250 mm)까지 7단계로 나누어 각 단계에서 최대전단변형에 도달하는 크기의 반복하중을 200 KN의 일정한 수직하중하에서 작용하도록 하였다. 그림 3은 특성실험에 대한 결과로서 최대전단변형의 크기변화에 따른 수평강성 및 등가감쇠비를 구한 것이다. 200 KN의 수직하중하에서 이론적으로 계산한 수평강성은 23.37 KN/cm로서 그림 3에서 얻어진 최대전단변형 30%에 해당하는 수평강성 23.84 KN/cm와 거의 일치한다. 실험결과로

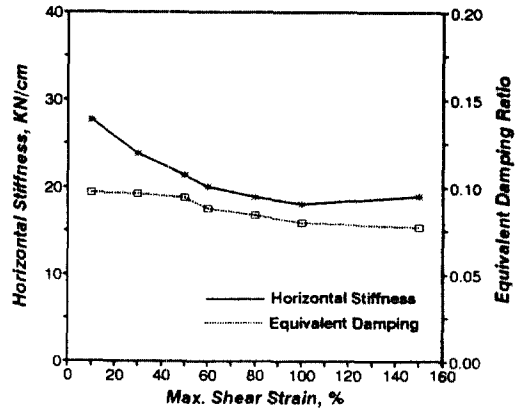


그림 3. 전단변형에 따른 수평강성 및 등가감쇠비 ($P_V = 200$ KN)

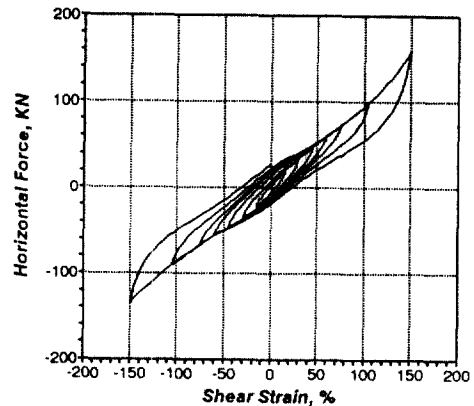


그림 4. 수평방향의 힘-변위 이력곡선($P_V = 200$ KN)

부터 최대전단변형이 약 60% 이상에서는 수평강성의 변화율이 비교적 줄어들고 있다. 그림 4는 수직하중이 200 KN일 때 전단변형을 10%에서 150%까지 증가시킴으로써 얻어진 기초분리장치의 힘-변위 이력곡선으로서 변형경화(strain hardening) 현상이 100% 이상에서 현저하게 나타남을 알 수 있다.

또한 수직하중을 250 KN 이내에서 7단계로 나누어 일정한 크기의 수직하중이 작용하는 각 단계마다 최대전단변형 80%(22.0 mm)에 도달하는 크기의 반복하중을 가하는 특성실험을 수행하였다. 특성실험으로부터 250 KN 범위내에서 수직하중의 변화가 기초분리장치의 수평강성에 큰 영향을 주지 않음을 관찰하였다.⁽¹⁾

(2) 수직방향의 靜的特性

수직방향에 대한 특성실험에서는 전단변형을 150%까지 8단계로 나누어 각 단계마다 전단변형이 작용한 상태에서 수직하중이 $100 \text{ KN} \pm 50 \text{ KN}$ 으로 변화하는 반복하중을 기초분리장치에 작용시켰다. 수직방향의 특성실험에 의해서 얻어진 기초분리장치의 수직강성은 100% 이내의 전단변형상태에서 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며 이 범위에서의 수직강성은 수평강성의 약 450배에 해당하는 값을 갖는다. 50%의 전단변형상태에서 이론적으로 계산한 수직강성은 9.54 MN/cm 이며 이에 해당하는 실험치는 9.59 MN/cm 로서 약 0.57%의 오차를 나타내고 있다. 한편 2.0 MN용량의 재료시험기에 의해 최대압축하중 1.8 MN 범위내에서 기초분리장치에 대한 압축재하실험이 수행되었다. 압축하중 100 KN 이상에서 일정하게 얻어진 수직강성은 10.39 MN/cm 로서 수직하중 150 KN 내의 범위에서 얻어진 수직강성 9.86 MN/cm 보다 약 5.4% 큰 값을 보이고 있다.

3.2. 動的特性

동적특성실험에서도 정적실험방법과 동일한 실험장치를 사용하였으며 200 KN의 일정한 수직하중상태에서 최대전단변형 30%(8.25 mm)에 해당하는 반복하중의 가력속도를 변화시켰다. 동일한 조건하에서 동적특성을 정적특성과 비교함으로써 기초분리장치에서 나타나는 변형속도(strain-rate)효과에 영향을 파악하고자 하였다. 따라서 동일한 반복하중에 대해서 가력속도를 0.05 Hz - 5.0 Hz까지 변화시키며 실시간(real time)에서 실험을 수행하였다.

그림 5에서는 정적실험에서 얻어진 특성값에 대한 동적실험결과들의 상대적인 비로써 기초분리장치에서 나타나는 변형속도효과를 관찰할 수 있다. 가력속도 0.01 Hz의 정적실험결과를 기준으로 수평강성 및 등가감쇠비 모두가 가력속도에 따라 증가하였으며 수평강성에 비하여 등가감쇠비의 증가율이 크게 나타남을 알 수 있다. 가력속도 0.05 Hz - 1.0 Hz의 범위내에서 얻어진 수평강성은 정적실험결과에 비하여 약 20% 정도 큰 값을 보이고 있으며 등가감쇠비는 약 30% - 50%정도 크게 나타났다.⁽¹⁾ 그러나 내진설계에 적용되는 기초분리장치의 유효진동수는

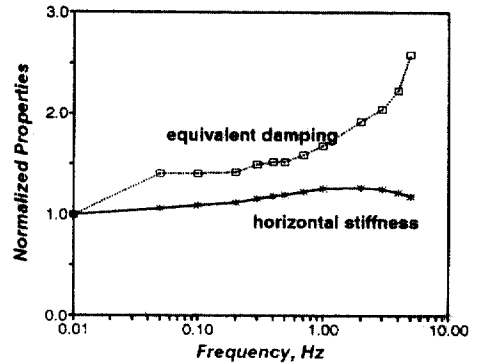


그림 5. 정적특성에 대한 동적특성의 상대적인 증가율 ($\gamma_{H,max} = 30\%$, $P_v = 200 \text{ KN}$)

일반적으로 0.25 Hz - 1.0 Hz범위이기 때문에 1.0 Hz 이하의 가력속도 범위내에서는 기초분리장치의 동적특성이 크게 변화하지 않는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 유사동적실험이 비록 실시간으로 진행되지는 않지만 약 0.1 Hz 정도의 가력속도에 해당하기 때문에 유사동적실험결과에서 발생하는 가력속도에 따른 오차는 작은 것으로 판단된다.

4. 基礎分離된 液體貯藏탱크의 模型化

4.1 液體貯藏탱크의 力學的 舉動

액체저장탱크에 대한 동적해석은 탱크구조물과 액체사이의 상호작용을 고려하여 수행되어야 하며 특히 탱크구조물의 벽면을 강체로 가정하여 모형화하는 경우와 벽면의 유연성을 고려한 경우는 해석결과에 차이가 나타난다. 액체저장탱크의 설계에 적용되는 일반적인 가정은 Housner에 의해서 제안된 방법으로서 탱크구조물의 벽면을 강체로 가정하였다. 그러나 실제로 탱크구조물의 벽면은 지진하중에 대해서 변형이 일어나며 이것은 결국 탱크구조물의 기초에 커다란 전단력을 발생시킨다. 따라서 Haroun⁽²⁾이 제안한 등가시스템모형을 사용하여 벽면의 유연성이 고려된 액체저장탱크에서 얻어지는 액체의 거동을 다음과 같은 3가지의 독립된 성분에 의해서 대표적으로 표현할 수 있다.

(1) 대류성분(convective component)

액체의 sloshing에 의해서 나타나는 대류성분은 일반적으로 고유주기가 길며 특히 낮은 탱크의 경우에는 높은 탱크에 비하여 탱크벽면에 미치는 작용력(hydrodynamic force)의 크기가 상대적으로 크게 나타난다. Haroun에 의해 제안된 식들은 액체의 sloshing 모드와 탱크 벽면의 진동모드사이에 상호 영향(coupling)이 미약하기 때문에 탱크 벽면을 강체로 가정하여 얻을 수 있다.

(2) 충격성분(impulsive component)

탱크구조물의 벽면이 변형함으로써 나타나는 충격성분은 높은 진동수특성을 가지며 발생한 가속도 성분이 탱크구조물의 기초에 커다란 밀면전단력을 전달한다. 이러한 현상은 낮은 탱크보다는 높은 탱크에서 더욱 두드러지게 나타난다.

(3) 강제성분(short period component)

탱크구조물의 하부에서 탱크벽면과 액체가 강체로 거동한다는 가정으로부터 얻어지는 강제성분은 지반과 일체로 거동함으로써 탱크의 기초에 밀면전단력을 발생시킨다.

4.2 基礎分離된 液體貯藏탱크의 理想化

본 연구에서는 기초분리된 액체저장탱크의 상부 구조물에 해당하는 액체저장탱크를 등가시스템모형을 적용하여 기초분리장치가 포함된 3개의 자유도를 가지는 기초분리시스템으로 이상화할 수 있다. 그림 6에서는 기초분리장치 및 액체저장탱크를 이상화한 각 성분들을 나타내고 있다.

그림 6에서 액체저장탱크의 대류성분, 충격성분 및 강제성분들의 집중질량은 각각 m_s , m_f 및 m_r 로서 표현되며 점성감쇠계수와 강성은 각각 c_s , c_f 및 k_s , k_f 로 나타내었다. 기초분리장치와 일체로 거동하는 강제성분의 집중질량 m_r 은 기초분리장치의 상부질량(base mass)에 해당되며 탱크구조물 벽면의 질량은 액체의 질량에 비하여 상당히 작기 때문에 포함시키지 않았다. 기초분리장치의 점성감쇠계수 및 강성은 각각 c_b 및 k_b 로 표시한다. 그림 6에서 H_s , H_f 및 H_r 은 액체의 각 성분이 벽면에 작용하는 집중질량의 작용높이를 나타낸다. 지진하중이 작용하는 지반에서의 수평변위를 u_g , 기초분리장치의 수평변위를 u_b , 액체저장탱크의 대류 및 충격 성분해당하는 수평변위를 각각 u_s 와 u_f 로 나타내면 식

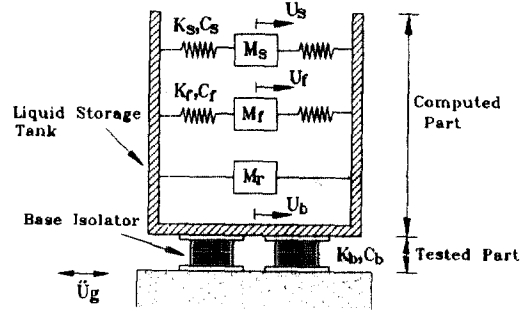


그림 6. 기초분리된 액체저장탱크의 이상화

1부터 식 3에서와 같은 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$m_s(\ddot{x}_s + \ddot{x}_b) + c_s\dot{x}_s + k_sx_s = -m_s\ddot{u}_g \quad (1)$$

$$m_f(\ddot{x}_f + \ddot{x}_b) + c_f\dot{x}_f + k_fx_f = -m_f\ddot{u}_g \quad (2)$$

$$m_s\ddot{x}_s + m_f\ddot{x}_f + (m_s + m_f + m_r)\ddot{x}_b + c_b\dot{x}_b + k_bx_b = -(m_s + m_f + m_r)\ddot{u}_g \quad (3)$$

위의 식에서 사용한 상대변위 x_s , x_f 및 x_b 는 그림 6에 나타난 각 자유도에서의 절대변위로 부터 식 4와 같이 가정하였다.

$$x_s = u_s - u_b, \quad x_f = u_f - u_b, \quad x_b = u_b - u_g \quad (4)$$

위의 식 1, 식 2 및 식 3으로부터 기초분리된 액체저장탱크에 대한 운동방정식을 행렬식으로 나타내면 식 5와 같다.

$$M^* \ddot{x}^* + C^* \dot{x}^* + K^* x^* = -M^* r^* \ddot{u}_g \quad (5)$$

여기서 M^* , C^* , K^* , x^* 및 r^* 는 다음과 같다.

$$M^* = \begin{bmatrix} m_s & 0 & m_s \\ 0 & m_f & m_f \\ m_s & m_f & m_s + m_f + m_r \end{bmatrix} \quad C^* = \begin{bmatrix} c_s & 0 & 0 \\ 0 & c_f & 0 \\ 0 & 0 & c_b \end{bmatrix}$$

$$K^* = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_f & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \quad x^* = \begin{bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_b \end{bmatrix} \quad r^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

식 5에서 구성한 운동방정식에 대한 수치적분해로부터 액체저장탱크의 기초에 전달되는 밀면전단력과 전도모멘트는 식 6 및 식 7에서와 같이 표현된다.

$$Q(t) = m_s \ddot{u}_s(t) + m_r \ddot{u}_r(t) + m_b \ddot{u}_b(t) \quad (6)$$

$$M(t) = m_s H_s \ddot{u}_s(t) + m_r H_r \ddot{u}_r(t) + m_b H_b \ddot{u}_b(t) \quad (7)$$

5. 類似動的實驗 概要

구조물의 내진성능을 평가하기 위한 새로운 실험 기법으로서 개발된 유사동적실험기법은 준정적실험(quasi-static test)장비를 이용하여 진동대실험(shaking table test)결과와 유사한 동적실험결과를 얻을 수 있다. 특히 대형구조물의 비탄성 지진응답실험을 위하여 폭넓게 활용되고 있다.⁽⁴⁾ 그러나 유사동적실험기법에서는 실제 시험체를 컴퓨터내에서 몇 개의 자유도를 가지는 구조물로 이상화하여 구성한 운동방정식을 수치적분하기 때문에 실험결과는 근사적인 동적응답을 나타낸다. 유사동적실험기법은 구성된 운동방정식으로부터 얻어진 변위를 유압식가력기로 시험체에 직접 제어하여 복원력(restoring force)을 변형된 시험체로부터 계속하며 관성력(inertia force)과 감쇠력(damping force)은 컴퓨터내에서 수치적으로 가정된 시험체의 질량과 점성감쇠비로부터 계산하여 다음 시간단계에서의 운동방정식의 해를 구한다. 특히 Dermitzakis et al.⁽⁵⁾ 및 Nakashima et al.⁽⁶⁾ 등에 의하여 최근에 연구가 진행되고 있는 구조분할기법을 적용한 유사동적실험기법은 실험대상구조물을 2개의 부분구조물(substructure)로 나누어 수치적으로 모델링하기에 어려운 부분구조물을 시험체로 제작하며 나머지 부분구조물은 컴퓨터내에서 수치적으로 모형화하여 실험을 수행하는 기법이다. 따라서 지반-구조물 상호작용, 기초분리시스템, 고층빌딩 및 교량구조물 등의 비탄성 지진응답실험을 위하여 구조분할기법을 적용한 유사동적실험기법의 응용이 가능하다.

본 연구에서는 기초분리된 액체저장탱크의 내진 성능 및 기초분리효과를 검증하기 위하여 구조분할 기법에 의한 유사동적실험기법을 적용하였다. 여기서 기초분리시스템의 상부구조물에 해당하는 액체 저장탱크를 등가시스템모형에 의해 수치적으로 이상화하여 유사동적실험 알고리즘내에서 선형시스템으로 가정하였으며 실제 물리적인 실험은 수치적인 모형화가 어려운 기초분리장치에 국한하였다. 이

과정에서 액체저장탱크는 수치적인 부분(computed part), 기초분리장치는 실험적인 부분(tested part)으로 구분하여 기초분리시스템에 대한 운동방정식을 구성하였으며 구조분할기법을 적용하기에 적합한 Hughes⁽⁶⁾의 implicit-explicit 적분법을 사용하였다.

5.1 類似動的實驗 알고리즘

유사동적실험기법은 컴퓨터를 통하여 수치적분을 함으로써 동적실험을 수행하는 실험기법으로서 각 시간단계에서 계산된 변위를 시험체에 유압식가력기를 이용하여 제어하며 변형된 시험체로부터 직접 계측된 복원력을 운동방정식에 대입하여 다음 시간 단계의 변위, 속도 및 가속도를 계산한다.

그림 7에서는 구조분할기법을 적용한 유사동적실험기법의 개략적인 수행절차를 나타낸다. 여기서 유사동적실험 알고리즘은 3가지 부분의 중요한 수행절차를 반복함으로써 실험을 진행한다. (1) 수치적분 알고리즘 - 구조분할기법을 적용한 유사동적실험에 효율적인 수치적분방법이 필수적으로 수반되어야 하며 구성된 운동방정식의 해를 구한다. (2) 변위제어 알고리즘 - 각 시간단계에서 계산된 변위를 D/A변환기(digital to analog converter)를 통하여 아날로그 신호로 변환한후 유압식가력기의 제어기에 입력되어 시험체와 연결되어 있는 유압식가력기를 제어한다. (3) 데이터 계측 알고리즘 - 변형된 시험체로부터 하중변환기(load transducer)를 통한 복원력 및 기타 시험체로부터 계속하고자 하는 아날로그 신호를 A/D변환기(analog to digital converter)를 거쳐 컴퓨터내에 저장한다.

일반적으로 유사동적실험기법에는 수행과정에서 수치적인 오차(numerical error)와 실험적인 오차

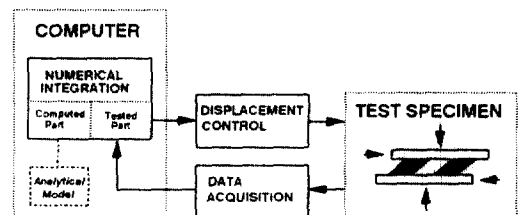


그림 7. 구조분할기법을 적용한 유사동적실험의 수행 절차

(experimental error)가 수반된다.⁽⁷⁾ 수치적인 오차는 적절한 수치적분방법의 선택 및 수치적 안정조건을 만족하는 시간간격(time interval)을 설정함으로써 오차를 최소화할 수 있다. 유사동적실험에서는 다양한 원인에 의해 실험결과에 에너지부가효과(energy addition effect) 또는 에너지소산효과가 내포된 실험적인 오차가 유발될 수 있다. 특히 계산된 변위와 제어가 완료된 후 측정된 변위의 차이에서 얻어지는 변위제어오차는 실험결과에 상당히 큰 영향을 미친다. 따라서 유사동적실험 알고리즘은 실험결과에 미치는 실험적인 오차의 영향을 최소화하도록 구성하여야 한다.

5.2 數値積分 알고리즘

적층고무받침방식의 기초분리장치에 의해서 기초 분리된 액체저장탱크를 선행시스템으로 가정하여 유사동적실험 알고리즘을 구성하였다. 구성된 유사동적실험 알고리즘내에 구조분할기법을 적용하여 선행시스템으로 가정된 상부구조물은 컴퓨터내에서 수치적으로 모형화하였으며 힘-변위 이력특성에 의존하여 커다란 비선형성을 갖고 있는 기초분리장치는 실험적으로 특성을 얻었다. 따라서 기초분리시스템의 상부구조물과 기초분리장치를 각각 수치적인 부분과 실험적인 부분으로 나누어 유사동적실험을 수행하였다.

구조분할기법을 적용한 유사동적실험에서는 주어진 조건에 적합한 수치적분알고리즘이 필요하며 효율적인 실험알고리즘의 구성이 필수적이다. 본 연구에서는 explicit 적분법과 implicit 적분법의 혼합된 형태로서 Hughes⁽³⁾에 의해서 제안된 implicit-explicit 적분법을 채택하여 실험알고리즘을 구성하였다. 따라서 기초분리시스템에 대한 운동방정식의 해는 수치적인 부분을 implicit 적분법에 의해 컴퓨터내에서 계산하며 실험적인 부분을 explicit 적분법에 의존한다.

식 5로부터 시간단계 $i+1$ 에서의 동적 평형방정식을 implicit-explicit 적분법을 적용하여 구성하면 식 8과 같이 나타낼 수 있다.

$$M^* \ddot{x}_{i+1} + C^L \dot{x}_{i+1} + C^E \dot{x}_{i+1} + K^L x_{i+1} + K^E x_{i+1} = -M^* r \ddot{u}_{gi+1} \quad (8)$$

여기서 \ddot{x}^* 와 \dot{x}^* 는 predictor 값에 해당하는 변위 및 속도벡터를 의미한다. 식 8에서 전체 감쇠행렬 $C^* (= C^L + C^E)$ 및 강성행렬 $K^* (= K^L + K^E)$ 는 아래의 식과 같이 implicit 부분과 explicit 부분으로 각각 나누어진다. 식 9와 식 10에서 실험적인 부분에 해당하는 C^E 및 K^E 는 실제 실험으로부터 구성되는 것으로 간주할 수 있다.

$$C^L = \begin{bmatrix} c_s & 0 & 0 \\ 0 & c_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C^E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_b \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$K^L = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K^E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 11부터 식 14까지는 implicit-explicit 적분법에 의한 시간단계 $i+1$ 에서의 변위와 속도에 대한 응답벡터로서 시간단계 i 에서의 응답벡터로부터 얻어진다.

$$\ddot{x}_{i+1}^* = \ddot{x}_i^* + \Delta t \dot{\ddot{x}}_i^* + \frac{\Delta t^2}{2} (1-2\beta) \ddot{\ddot{x}}_i^* \quad (11)$$

$$\dot{x}_{i+1}^* = \dot{x}_i^* + \Delta t (1-\gamma) \ddot{x}_i^* \quad (12)$$

$$x_{i+1}^* = \dot{x}_{i+1}^* + \Delta t^2 \beta \ddot{x}_{i+1}^* \quad (13)$$

$$\ddot{x}_{i+1}^* = \dot{\ddot{x}}_{i+1}^* + \Delta t \gamma \ddot{\ddot{x}}_{i+1}^* \quad (14)$$

유사동적실험 알고리즘에 사용된 implicit-explicit 적분법은 implicit Newmark 적분법과 explicit predictor-corrector 적분법을 혼합한 형태로서 적용에 앞서 수치적분법의 안정조건을 만족시키는 계수의 설정이 필요하다. 본 연구에서는 수치적인 부분에 대하여 Newmark β 적분법으로 표현되는 무조건적 안정(unconditional stability)조건인 $\gamma=1/2$, $\beta=1/4$ 로 가정하여 실험알고리즘을 구성하였다. 여기서 실험적인 부분을 구성하는 explicit predictor-corrector 적분법은 ω 를 실험적인 부분의 최고차 진동수라 하면 explicit 적분법의 안정조건($\omega \Delta t \leq 2$)을 만족하여야 한다.

유사동적실험 알고리즘에서는 실험적인 부분의 복원력을 식 8에 나타난 $K^E \dot{x}_{i+1}^*$ 항에 의해서 계산하는 것이 아니라 계산된 변위 \ddot{x}_{i+1}^* 를 시험체에

제어하여 직접 하중변환기를 통하여 계측하는 것이다. 유사동적실험의 최종적인 응답결과로서 corrector 값이 얻어지는데 여기서 predictor 값에 해당하는 변위를 시험체에 제어하기 때문에 수치적인 오차가 발생하지만 변위응답결과에 미치는 영향은 무시할 만 하다. 여기서 수치적인 부분은 감쇠행렬과 강성행렬을 가정함으로써 계산되며 실험적인 부분에 해당하는 기초분리장치는 실제로 계측된 복원력에 이력감쇠가 포함되기 때문에 식 15와 같이 표현할 수 있다.

$$R'_{i+1} = C^E \dot{x}'_{i+1} + E^E \ddot{x}'_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_{b,i+1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

따라서 식 8로부터 실험적인 부분의 감쇠력 $C^E \dot{x}'_{i+1}$ 항과 복원력 $E^E \ddot{x}'_{i+1}$ 항을 계측된 복원력 R'_{i+1} 으로 대체하면 식 16과 같다.

$$M^* \ddot{x}'_{i+1} + C^* \dot{x}'_{i+1} + K^* x'_{i+1} + R'_{i+1} = -M^* r''_{g,i+1} \quad (16)$$

식 16의 운동방정식을 사용하여 기초분리시스템에 구조분할기법을 적용하여 수행한 유사동적실험의 수치적분알고리즘을 설명하면 다음과 같다.

- i) 외부하중 $-M^* r''_{g,i+1}$ 을 계산한다.
- ii) Predictor 값에 해당하는 변위 및 속도 응답 벡터 \ddot{x}'_{i+1} , \dot{x}'_{i+1} 을 계산한다.
- iii) 시험체에 계산된 변위 $\ddot{x}_{b,i+1}$ 을 제어한다.
- iv) 시험체로부터 복원력 $R_{b,i+1}$ 을 계측한다.
- v) Corrector 값에 해당하는 변위, 속도 및 가속도 응답벡터 x'_{i+1} , \dot{x}'_{i+1} , \ddot{x}'_{i+1} 을 계산한다.

$$\ddot{x}'_{i+1} = (M^* + \frac{\Delta t}{2} C^* + \frac{\Delta t^2}{4} K^*)^{-1} (-M^* r''_{g,i+1} - K^* \ddot{x}'_{i+1} - R'_{i+1} - C^* \dot{x}'_{i+1})$$

$$\dot{x}'_{i+1} = \dot{x}'_{i+1} + \frac{\Delta t}{4} \ddot{x}'_{i+1}$$

$$x'_{i+1} = \dot{x}'_{i+1} + \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}'_{i+1}$$

- vi) 다음단계를 위하여 i 를 $i+1$ 으로 치환한다.

- vii) 실험이 완료할 때까지 i)부터 vi)를 반복하여 수행한다.

6. 基礎分離된 液體貯藏탱크의 類似動的實驗

6.1 基礎分離된 液體貯藏탱크의 類似動的實驗 概要

기초분리된 액체저장탱크에 대한 유사동적실험은 기초분리장치에 의해 지지된 액체저장탱크를 Haroun⁽²⁾이 제안한 등가시스템모형에 의해서 선형시스템으로 가정하여 수행하였다. 본 연구에서는 구조분할기법을 적용하여 상부구조물에 해당하는 액체저장탱크를 수치적인 부분으로 가정하였으며 기초분리장치에 대한 비선형특성은 실험적인 부분을 통하여 얻었다. 유사동적실험에 적용된 수치적분알고리즘은 앞서 언급한 implicit-explicit 적분법을 사용하였으며 실험적인 부분의 변위제어 및 복원력계측은 2개의 기초분리장치에 대하여 수행하였다. 따라서 액체저장탱크를 지지하고 있는 기초분리장치의 갯수가 많은 경우에 비선형 지진응답은 2개의 기초분리장치에 대하여 계측된 복원력 값으로부터 비례적으로 계산하였다. 수치적으로 가정된 액체저장탱크의 전체질량을 각각의 기초분리장치가 나누어서 부담하기 때문에 본 연구에서는 2개의 기초분리장치에 할당되는 상부구조물의 질량을 수직방향으로 유압식가력기에 의해 하중제어를 하였다. 그러나 제한된 유압식가력기의 용량때문에 실제 하중보다 작은 400 KN의 수직하중을 작용시켰다. 이것은 일정한 크기 이상의 수직하중에 대해서는 수직하중의 변화에 따라서 기초분리장치의 수평강성이 큰 영향을 받지 않는 것으로 분석된 특성실험결과⁽¹⁾로부터 타당성을 입증 할 수 있다.

유사동적실험 알고리즘내에서 수치적으로 가정된 액체저장탱크는 표 1에서와 같이 탱크구조물의 반경 (R)에 대한 높이(H)의 비에 따라 높은 탱크와 낮은 탱크로 구분하였으며 각각에 대해서 지지하고 있는 기초분리장치의 전체 갯수에 의해 4가지 형태(TF, TS, BF, BS)의 실험대상구조물에 대한 유사동적실험을 수행하였다. 이것은 동일한 상부구조물에 대해서 기초분리장치의 상대적인 강성을 변화시킴으로써 얻어지는 진동감소효과의 효율성을 관찰하기

표 1. 실험대상구조물의 특성 및 실험내용

TYPE	Test Model	No. of Isolators	Dimension	Convective Component	Impulsive Component	Short Period Component
Tall Tank	TF	40EA	t=2.54 cm R=7.32 m H=21.96 m m _i =6589 ton	f _s =0.250 Hz m _s =558.1 ton H _s =18.01 m k _s =13.83 KN/cm ξ _s =0.05	f _i =5.290 Hz m _i =2723.2 ton H _i =12.17 m k _i =30.13 MN/cm ξ _i =0.02	m _r =3305 ton H _r =9.71 m
	TS	100EA				
Broad Tank	BF	100EA	t=2.54 cm R=18.30 m H=12.20 m m _i =17942 ton	f _s =0.145 Hz m _s =7392.7 ton H _s =6.77 m k _s =61.49 KN/cm ξ _s =0.05	f _i =6.173 Hz m _i =5210.3 ton H _i =4.89 m k _i =78.43 MN/cm ξ _i =0.02	m _r =5339 ton H _r =4.94 m
	BS	300EA				

위한 것이다.

각각의 실험대상구조물에 대한 유사동적실험은 지반충격하중(ground pulse load) 및 지진하중에 대하여 수행하였다. 입력지진하중은 El Centro 남북방향으로서 최대지반가속도는 0.06 g 및 0.12 g이며 0.06 g의 지반충격하중에 대한 유사동적실험과 병행하여 수행하였다. 유사동적실험에 적용한 높은 탱크와 낮은 탱크에 대한 제원 및 특성치는 참고문헌 [2]의 예제를 인용하였으며 다음의 표 1과 같다. 기초분리시스템의 상부구조물에 해당하는 액체저장 탱크에서 대류성분과 충격성분의 점성감쇠비(viscous damping ratio)는 실험 알고리즘내에서 각각 5%와 2%로 수치적으로 가정하였다.

6.2 地盤衝擊實驗

지진응답실험에 앞서 지반충격하중에 의한 자유진동실험을 목적으로 구조분할기법을 적용한 유사동적실험을 수행하였다. 따라서 기초분리된 액체저장탱크를 3자유도의 기초분리시스템으로 이상화함으로써 얻어지는 각 모드의 고유진동수를 지반충격실험을 통하여 구하였다. 표 2에서는 기초분리된 액체저장탱크의 각 모드에서 얻어지는 고유진동수를 기초가 고정된 경우의 고유진동수와 비교하고자 한다. 표 1에서 나타난 f_s와 f_i는 각각 독립적으로 계산된 대류성분과 충격성분의 고유진동수이며 f_s, f_i 및 f_b는 기초분리된 액체저장탱크에 대한 유사동적

표 2. 지반충격실험결과에 의한 각 모드의 고유진동수

test model	Fixed Base Systems		Base-Isolated Systems		
	f _s (Hz)	f _i (Hz)	f _s '(Hz)	f _i '(Hz)	f _b '(Hz)
TF	0.250	5.290	0.229	6.640	1.070
TS	0.250	5.290	0.240	7.220	1.659
BF	0.145	6.173	0.140	7.420	1.031
BS	0.145	6.173	0.143	8.590	1.974

실험으로부터 얻은 각 모드의 고유진동수이다.

실험응답결과에서 나타난 기초분리장치의 최대 전단변형은 15% 이내이며 표 2로부터 기초분리장치에 해당하는 모드의 고유진동수 f_b'는 1.0 Hz - 2.0 Hz 범위내에 존재한다. 특히 TF와 BF에서의 고유진동수 f_b'는 기초분리시스템의 유효주기 범위에 해당하며 TS와 BS에서는 기초분리장치의 전체 강성이 다소 크게 나타났다. 기초분리에 의해서 액체의 각 성분들에 해당하는 고유진동수의 변화를 분석하면 기초분리시스템에서 일반적으로 얻어지는 상부구조물의 에너지차단효과(energy deflection effect)가 충격성분에서 나타나고 있으며 기초분리장치에 해당하는 모드의 고유진동수보다 낮은 진동수특성을 가지고 있는 대류성분은 기초분리에 의한 고유진동

표 3. 지진응답실험결과에 의한 최대응답치의 비교
(EI Centro 0.06 g)

test model	$ x_b _{max}$ (cm)	$ x_f _{max}$ (cm)	$ x_s _{max}$ (cm)	$ \ddot{u}_b _{max}$ (g)	$ Q _{max}$ (MN)
TF	1.287	0.027	3.949	0.025	1.748
TS	1.288	0.058	3.587	0.058	3.641
BF	1.356	0.023	3.513	0.033	3.544
BS	1.284	0.065	3.527	0.088	10.541

표 4. 지진응답실험결과에 의한 최대응답치의 비교
(EI Centro 0.12 g)

test model	$ x_b _{max}$ (cm)	$ x_f _{max}$ (cm)	$ x_s _{max}$ (cm)	$ \ddot{u}_b _{max}$ (g)	$ Q _{max}$ (MN)
TF	2.992	0.051	8.434	0.054	3.286
TS	2.996	0.119	6.759	0.120	7.701
BF	2.613	0.041	7.225	0.059	6.084
BS	2.465	0.120	7.144	0.159	18.754

수 변화가 거의 나타나지 않고 있다.

6.3 地震應答實驗

표 3과 표 4는 최대지반가속도 0.06 g 및 0.12 g의 지진하중에 대한 유사동적실험결과로서 기초분리된 액체저장탱크의 각 자유도에서 발생하는 최대 상대변위뿐만 아니라 기초분리장치에서의 최대 절대가

속도를 나타내고 있다. 또한 $|Q|_{max}$ 은 액체저장탱크의 기초에서 발생하는 최대 밀면전단력을 나타낸다. 지진응답실험결과로부터 동일한 액체저장탱크에 대하여 기초분리장치의 상대적인 강성 즉 f_b 에 따라서 충격성분과 강체성분의 최대 상대변위의 크기에 영향을 미치며 결과적으로 최대 밀면전단력의 크기를 좌우한다. 그러나 대류성분에서는 기초분리장치의 상대적인 강성변화에 의한 최대 상대변위의 차이가 두드러지게 나타나지 않고 있다. 기초분리장치에서의 최대 절대가속도가 증폭된 효과를 나타내고 있는 실험대상구조물 BS는 비효율적으로 설계된 기초분리시스템으로 판정할 수 있다.

그림 8과 그림 9는 최대지반가속도 0.12 g의 지진하중에 대하여 각각 높은 탱크(TF)와 낮은 탱크(BF)에 대한 유사동적실험결과로서 대류성분, 충격성분 및 강체성분에 해당하는 작용력은 각각 실험대상구조물 TF와 BF의 탱크벽면에 작용하는 전단력으로써 상대적인 크기를 비교하였다. 여기서 유사동적실험기법에서 필연적으로 수반되는 변위제어 오차에 의한 고차모드의 진동수특성이 액체성분들의 가속도응답에 실험오차로서 포함되어 있다.⁽⁷⁾ 따라서 대류성분과 충격성분에 대해서는 상대변위응답을 사용하여 전단력을 계산함으로써 실험오차의 영향을 줄일 수 있다. 그러나 기초분리장치와 일체로 거동하는 강체성분은 탱크 기초에서의 절대 가속도응답을 필요로 하기 때문에 low-pass filtering에 의해서 보정된 절대 가속도응답을 사용하여 전단력을 계산하였다.

대류성분의 작용력응답에서는 기초분리장치에 의

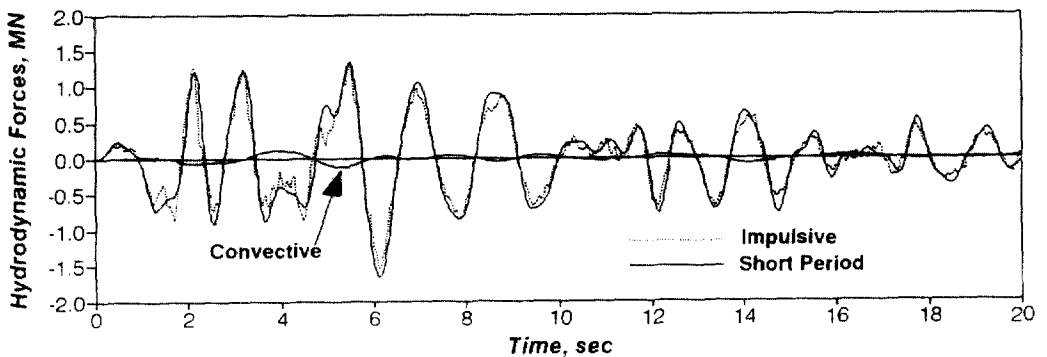


그림 8. 기초분리된 액체저장탱크(TF)에서 각 액체성분의 작용력응답결과(EI Centro 0.12 g)

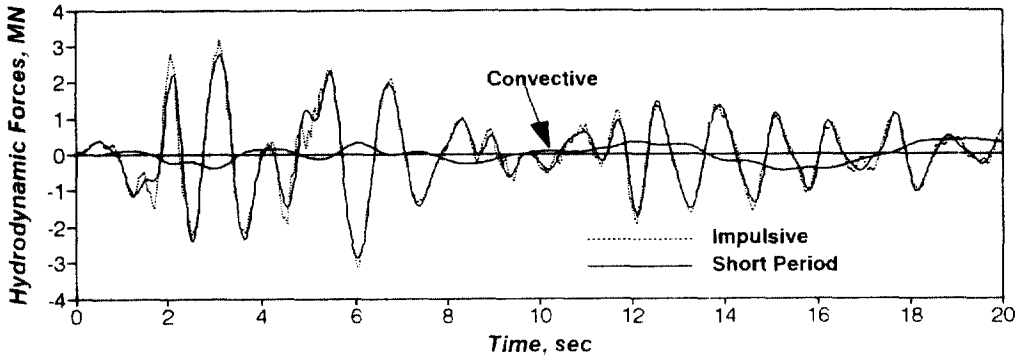


그림 9. 기초분리된 액체저장탱크(BF)에서 각 액체성분의 작용력응답결과(El Centro 0.12 g)

한 진동모드의 영향이 거의 나타나지 않았으며 대류성분의 진동모드가 지배적이다. 충격성분에 대한 응답에서는 충격성분에 해당하는 고차모드가 미약하게 나타나고 있으나 기초분리장치의 진동모드에 의해서 지배적으로 거동하고 있다. 기초분리장치의

거동에 직접 지배를 받는 강제성분의 작용력응답은 충격성분의 응답과 거의 일치하는 양상을 보이고 있다. 이것은 강제성분과 충격성분의 집중질량이 큰 차이가 없으며 기초분리장치의 진동모드가 두드러지기 때문이다.

표 5. 기초분리 유무에 따른 액체저장탱크의 각 액체성분의 작용력 및 기초에서의 밀면전단력 비교 (El Centro 0.06 g)

test model	Convective Force			Impulsive Force			Short Period Force			Base Shear Force		
	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor
TF	0.044	0.055	1.250	4.059	0.814	0.201	1.945	0.810	0.416	4.746	1.784	0.376
TS	0.044	0.050	1.136	4.059	1.748	0.431	1.945	1.880	0.966	4.746	3.641	0.767
BF	0.218	0.216	0.991	6.489	1.804	0.278	3.142	1.728	0.550	9.275	3.544	0.382
BS	0.218	0.217	0.995	6.489	5.098	0.786	3.142	4.608	1.466	9.275	10.541	1.136

표 6. 기초분리 유무에 따른 액체저장탱크의 각 액체성분의 작용력 및 기초에서의 밀면전단력 비교 (El Centro 0.12 g)

test model	Convective Force			Impulsive Force			Short Period Force			Base Shear Force		
	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor	fixed (MN)	isolated (MN)	reduction factor
TF	0.088	0.117	1.330	8.118	1.537	0.189	3.890	1.750	0.450	9.492	3.286	0.346
TS	0.088	0.093	1.057	8.118	3.585	0.442	3.890	3.890	1.000	9.492	7.701	0.811
BF	0.434	0.444	1.024	12.978	3.216	0.248	6.284	3.089	0.492	18.550	6.084	0.328
BS	0.434	0.439	1.011	12.978	9.412	0.725	6.284	8.325	1.325	18.550	18.754	1.011

표 5와 표 6은 지진하중에 대한 기초분리된 액체저장탱크의 유사동적실험결과로 부터 액체의 각 성분들이 탱크 벽면에 작용하는 최대 작용력 및 액체저장탱크의 기초에 작용하는 최대 밀면전단력을 나타내고 있다. 기초분리된 액체저장탱크의 전체 거동에 미치는 각 액체성분의 영향과 기초분리효과를 살피고자 본 연구에서는 기초가 고정된 액체저장탱크를 선형 수치해석하여 그 결과를 기초분리된 액체저장탱크에 대한 유사동적실험결과와 비교하였다.

낮은 진동수특성을 갖고 있는 대류성분의 최대 작용력은 기초분리의 유무 및 기초분리장치의 상대적인 강성에 관계없이 큰 변화를 나타내고 있지 않다. 특히 높은 탱크(TF, TS)의 경우에는 기초분리효과에 의해서 최대 작용력이 오히려 약간 증폭되는 경향을 보이고 있다. 따라서 기초분리장치에 감쇠비가 높은 합성고무를 사용하거나 납심(lead plug)을 삽입하여 이력감쇠를 증가시킴으로써 대류성분에 대한 진동감소효과를 유도할 수 있다. 탱크 기초에서의 밀면전단력에 가장 커다란 영향을 미치는 충격성분은 다른 성분보다 상대적으로 커다란 진동감소효과를 나타내고 있다. 기초분리장치와 일체로 거동하는 강제성분은 기초분리장치의 강성변화에 따라 진동감소효과의 차이가 상당히 다르게 나타나고 있다. 이것은 지반에서 작용하는 지진하중의 영향에 의해서 나타나는 기초분리장치의 응답특성이 직접적으로 강제성분의 작용력에 영향을 미치기 때문이다. 결과적으로 기초분리에 의한 상부구조물의 진동제어효과는 고차모드의 진동제어에 효율적이며 상부구조물과 기초분리장치의 상대적인 강성에 따라 크게 차이가 나타난다.

또한 표 5와 표6에서 기초분리된 액체저장탱크에 대한 최대 밀면전단력을 기초가 고정된 경우와 비교함으로써 기초분리효과의 효율성을 검증하였다. 표에서 보인 결과로부터 대류성분의 기초분리효과는 비효율적으로 나타났으나 다른 성분에 비하여 상대적으로 작용력이 작기 때문에 실험대상구조물 BS를 제외한 모든 실험응답결과에서 기초분리효과를 관찰할 수 있다.

그림 10부터 그림 14에서는 기초분리된 액체저장탱크의 기초에서 발생하는 지진하중에 대한 밀면

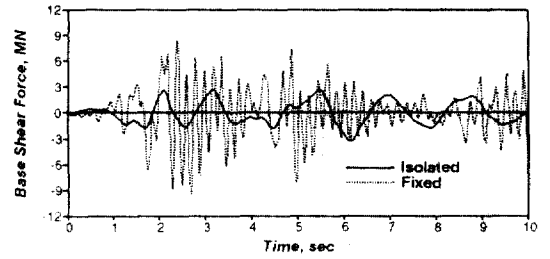


그림 10. 기초분리 유무에 따른 액체저장탱크의 밀면 전단력 비교(EI Centro 0.12 g, TF)

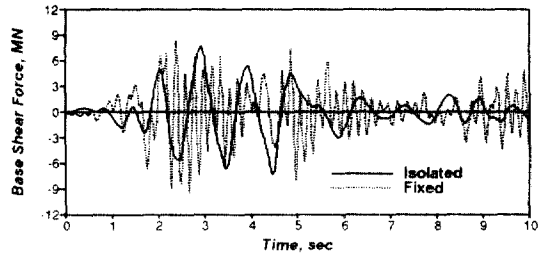


그림 11. 기초분리 유무에 따른 액체저장탱크의 밀면 전단력 비교(EI Centro 0.12 g, TS)

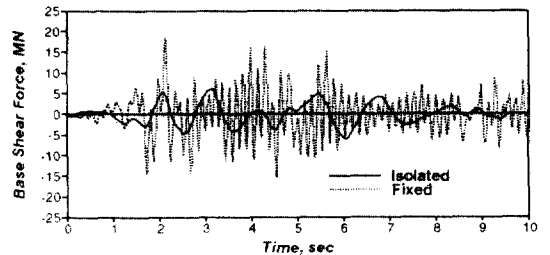


그림 12. 기초분리 유무에 따른 액체저장탱크의 밀면 전단력 비교(EI Centro 0.12 g, BF)

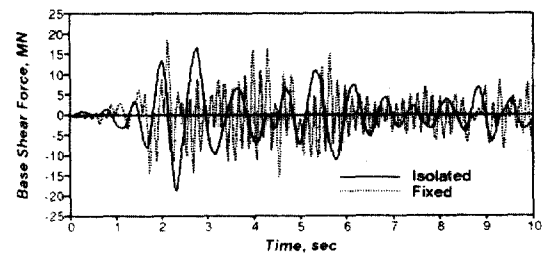


그림 13. 기초분리 유무에 따른 액체저장탱크의 밀면 전단력 비교(EI Centro 0.12 g, BS)

전단력응답으로써 기초가 고정된 경우의 수치해석 결과와 비교하였다. 유사동적실험으로부터 얻어진 기초분리된 액체저장탱크의 밀면전단력은 실험과정에서 계측된 기초분리장치의 복원력으로부터 구하였다. 탱크의 기초에 전달되는 밀면전단력은 기초 분리시스템의 유효주기 범위에 있는 TF 및 BF에서 상당히 끌어 들었으며 또한 응답특성은 기초분리장치에 해당하는 모드의 고유진동수가 지배적으로 나타나고 있다.

7. 結 論

기초분리된 액체저장탱크에 대한 지진응답특성을 얻기 위하여 본 연구에서는 구조분할기법을 적용한 유사동적실험을 수행하였다. 기초분리시스템의 상부 구조물에 해당하는 액체저장탱크의 형상과 기초분리장치의 상대적인 강성에 따라서 4가지 유형의 대상구조물을 결정하였다. 이에 대한 유사동적실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 기초분리시스템에서 일반적으로 얻어지는 상부구조물의 에너지차단효과가 충격성분에서 나타나고 있으며 대류성분은 기초분리에 의한 고유진동수 변화가 거의 나타나지 않고 있다.

2) 충격성분 및 강제성분에서는 기초분리장치의 상대적인 강성변화가 최대작용력의 크기에 커다란 영향을 미친다. 그러나 대류성분에서는 기초분리장치의 강성변화에 의한 영향이 두드러지게 나타나지 않고 있다.

3) 기초분리에 의한 진동감소효과는 고차모드에 해당하는 충격성분에서 가장 효과적으로 나타났다. 진동감소효과가 거의 나타나지 않은 대류성분은 기초분리장치의 이력감쇠를 증가시킴으로써 진동감소효과를 얻을 수 있다. 강제성분은 기초분리장치의 강성변화에 따라서 진동감소효과가 상당히 차이를 보이고 있다.

4) 기초분리시스템의 유효주기 범위내에 해당하는 높은 탱크(TF)와 낮은 탱크(BF) 모두에서 진동감소효과가 크게 발생하였다. 따라서 기초분리된 액체저장탱크의 진동감소효과는 기초분리시스템의 유효주기를 적절히 조절함으로써 효과적으로 얻을 수 있다.

5) 유사동적실험에서는 실험오차의 영향이 고차 모드에서 두드러지게 나타나며 응답결과에 누적되어 나타난다. 그러나 본 연구에서는 구조분할기법을 적용하여 유사동적실험을 수행함으로써 오차누적효과를 줄일 수 있었으며 또한 기초분리장치에 해당하는 진동모드가 응답결과에 지배적으로 나타나기 때문에 실험오차에 의한 영향을 줄일 수 있었다.

6) 기초분리장치의 이력특성이 변형속도효과에 의해서 변화하지만 일반적인 기초분리시스템의 유효주기범위에서는 큰 영향을 받지 않기 때문에 실시간보다 느린 속도로 진행되는 기초분리시스템에 대한 유사동적실험에서 변형속도효과에 의한 실험 오차는 상당히 작은 것으로 판단된다.

7) 본 연구에서는 기초분리된 액체저장탱크의 내진성능평가를 위한 동적실험기법으로서 구조분할기법을 적용한 유사동적실험기법을 도입하였다. 구조분할기법을 적용함으로써 기초분리시스템에 대한 동적실험이 경제적이며 비교적 간편하게 수행될 수 있다. 또한 유사동적실험결과로부터 기초분리에 의한 진동감소효과를 실험적으로 분석하였다.

感謝의 글

본 연구에 사용한 積層 고무받침은 유니슨산업(주)와 유니슨기술연구소의 도움으로 제작되었기에 이에 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. 김남식, 이동근, "積層 고무받침(laminated rubber bearing)의 靜的 및 動的 特性實驗", 大韓土木學會 論文集, 제13권, 제2호, 1993, pp. 85-93.
2. Haroun, M.A., "Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, 1983, pp. 179-206.
3. Hughes, T.J.R. and Liu, W.K., "Implicit-Explicit Finite Elements in Transient Analysis: Stability Theory", *Journal of Applied Mechanics, ASME*, Vol. 45, June, 1978, pp. 371-374.
4. Shing, P.B. and Mahin, S.A., "Pseudodynamic Test Method for Seismic Performance Evaluation: Theory and Implementation", *Earthquake Engineering Research Center*, Report No. UCB/EERC-84/

- 01, University of California, Berkeley, 1984.
5. Dermitzakis, S.N., and Mahin, S.A., "Development of Substructuring Techniques for On-Line Computer Controlled Seismic Performance Testing", *Earthquake Engineering Research Center*, Report No. UCB/EERC-85/04, University of California, Berkeley, 1985.
6. Nakashima, M., et al., "Integration Technique for Substructuring Pseudo Dynamic Test", *Proc. of the forth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, CA, Vol. 2, May 1990, pp. 515-524.
7. 김남식, 이상순, 정우정, 이동근, "동가에너지 보상을 통한 類似動的實驗의 보정", *大韓土木學會 論文集*, 제12권, 제4-1호, 1992, pp. 77-85.

(接受 : 1993. 6. 5)