

공간영역에서의 이미지 향상을 이용한 액체저장탱크의 수위응답 측정

Water Level Response Measurement of a Liquid Storage Tank Using Image Enhancement in Spatial Domain

김성완* · 장성진* · 전범규* · 박동욱†

Sung-Wan Kim*, Sung-Jin Chang*, Bub-Gyu Jeon* and Dong-Uk Park†

(Received February 17, 2023 ; Revised April 3, 2023 ; Accepted May 3, 2023)

Key Words : Liquid Storage Tank(액체저장탱크), Shaking Table Test(진동대 실험), Water Level Response(수위응답), Digital Image Processing(디지털 이미지 처리), Image Enhancement(이미지 향상)

ABSTRACT

To analyze the sloshing of fluid in a shaking table test, the water level response is generally measured by installing a water level gauge on the ceiling. However, depending on the measurement method used, there are limited measurement points and difficulties in measuring. In addition, it can cause severe noise. Therefore, a method for the simple and economical measurement of the water level response in a liquid storage tank is necessary. In this study, a method for measuring the water level response in a liquid storage tank using digital image processing was suggested, and a digital camcorder was used as a sensor for measuring the water level response, considering ease of use and economic feasibility. Image enhancement in the spatial domain was used to reduce noise in the fluid induced by the reflection of light and to sharpen the structure installed at the liquid storage tank. Therefore, a shaking table test was performed to validate the method of measuring the water level response in a liquid storage tank using digital image processing, and the result was compared to the result of measuring the response using a water level gauge.

1. 서론

최근 산업이 발전함에 따라 각종 산업현장이나 공공시설 등에서 쓰이는 액체저장시설들이 증가하고 있으며 시설관리를 위한 노력과 중요성이 강조되고 있다. 그중 액체저장탱크는 가정 용수, 냉난방 공조 장치 등의 소규모 저장탱크를 포함하여 각종 산업시설과

발전소의 대규모 연료와 유류를 저장하기 위한 탱크 등에 광범위하게 사용되고 있다. 따라서 액체저장탱크는 자연재해의 발생이나 재난에 대비하기 위한 기능을 유지해야 하며, 안전성이 확보되지 못하면 사회 전반적으로 심각한 경제적 피해가 발생할 수 있다⁽¹⁾.

액체저장탱크의 지진하중에 의한 손상은 저장탱크의 형상, 사용되는 재료, 보관하는 유체의 종류에 따라 다양하며 지진하중의 크기와 저장탱크의 동특성에

† Corresponding Author ; Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Research Professor
E-mail : kwenry@pusan.ac.kr

* Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Research Professor

‡ Recommended by Editor Hyuk Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

의해 결정된다. 액체저장탱크의 지진 안전성을 평가하기 위해서는 액체저장탱크의 동특성을 확인하는 것이 중요하며 다양한 연구들이 수행되었다. 액체저장탱크의 동특성은 저장탱크의 형상과 재질, 내부 유체의 종류, 수위 및 지진하중 등에 영향을 받는 것으로 나타났다^(2,3). 액체저장탱크에 지진하중이 작용하면 구조물 내부의 유체와 저장 구조물의 상호작용으로 인하여 구조물에 작용하는 유체의 동적 압력과 구조물의 동적 거동이 크게 증폭될 수 있다. 이는 액체저장탱크의 내부 유체의 슬로싱의 영향으로 구조적인 안전성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 진동대 실험을 이용하여 액체저장탱크의 슬로싱의 영향을 고려한 동적 거동을 정확하게 확인하는 것이 필요하다⁽⁴⁾.

다양한 분야에서 쓰이고 있는 액체저장탱크의 지진하중으로 인한 슬로싱 거동을 분석하기 위한 연구들이 수행되었다. 원자력 발전소의 압력용기를 대상으로 수직방향의 지진하중에 대한 슬로싱 거동을 분석하기 위하여 모형 액체저장탱크를 제작하였으며, 유체 표면의 수위응답을 측정하기 위하여 적외선 센서를 액체저장탱크의 상부에 설치하여 진동대 실험을 수행하였다⁽⁵⁾. 액체저장탱크의 수평방향의 진동만을 고려하여 슬로싱 거동에 대한 저감장치의 효과를 분석하고 이론적인 감쇠모델의 유효성을 평가한 연구도 수행되었다^(6,7). 또한 다양한 형상을 갖는 액체저장탱크의 슬로싱 거동을 분석하기 위해 원통형, 사각형, 원뿔형 및 피라미드형 등과 같은 모형 액체저장탱크를 이용하여 진동대 실험을 수행하고 유한요소해석 결과와 비교한 연구도 수행되었다⁽⁸⁾.

유체의 슬로싱 거동을 확인하기 위해서는 수위응답을 측정하는 것이 필요하다. 일반적으로 수위응답을 측정하기 위한 센서들은 수압, 동적 하중 및 기타 요인으로 인한 오작동 등의 단점이 있다. 또한 유체 표면의 다양한 외부요인에 따라 오류가 발생할 수 있다⁽⁹⁾. 따라서 액체저장탱크의 수위응답을 비접촉식으로 측정하는 방법이 필요하다.

비접촉적인 영상을 이용하여 수위응답을 측정하는 방법의 활용도가 증가할 것으로 예상되며, 액체저장탱크의 수위응답을 측정하기 위한 방법 및 알고리즘을 개발하기 위한 연구 또한 활발히 진행 중이다. 액체저장탱크의 축소모형을 제작하여 단축 방향에 대한 진동대 실험을 수행하였으며 디지털 카메라를 이용하여 유체의 슬로싱 거동을 측정하였다^(9,10). 석유화단지 및 석유저장소 등에 일반적으로 쓰이는 강제 액체

저장탱크의 슬로싱 저감장치 효과를 실험적으로 평가하기 위해 디지털 카메라를 이용하여 슬로싱 거동을 측정하였다⁽¹¹⁾.

이 연구에서는 디지털 이미지 처리를 이용한 액체저장탱크의 수위응답을 측정하는 방법을 제시하였으며 사용의 편의성과 경제성을 고려하여 수위응답을 측정하기 위한 센서로 디지털 캠코더를 사용하였다. 디지털 이미지 처리를 이용하여 수위응답을 측정하기 위해 디지털 이미지 상관법을 사용하였으며, 구조물의 경계선 강화 및 빛과 조명의 반사로 인한 유체의 노이즈 감소를 위하여 공간영역에서의 이미지 향상을 적용하였다. 디지털 이미지 처리를 이용하여 액체저장탱크의 수위응답을 측정하는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 진동대 실험을 수행하였으며 수위계에서 측정된 응답과 비교하였다.

2. 디지털 이미지를 이용한 수위응답 측정

2.1 공간영역에서의 이미지 향상

이미지 향상 기술의 목적은 원 이미지를 처리하여 그 결과를 특별한 응용 목적에 맞게 변환하는 것을 의미한다. 이 연구에서는 수위응답을 측정하기 위하여 필터처리를 적용하였으며, 필터처리는 공간영역에서의 이미지 향상을 적용하였다.

(1) 중간값 필터

평균처리 필터의 개념은 필터 마스크에 의해 정의된 이웃점들의 명암도 평균이며, 이미지 내의 모든 픽셀의 값을 교체함으로써 명암도에서 전이가 줄어든다. 일반적으로 랜덤 노이즈는 명암도에서 뚜렷한 전이로 이루어져 있으므로 평균처리 필터의 사용 목적은 노이즈 감소이다⁽¹²⁾. 따라서 평균처리 필터의 사용은 이미지의 선명도가 떨어지는 대신 랜덤 노이즈를 감소시키고 픽셀들의 끊어진 에지들을 연결하게 된다. 이 연구에서는 동적 하중으로 인한 수위의 비선형적인 거동으로 발생한 랜덤 노이즈를 감소시키고 불연속점들의 개선을 위하여 평균처리 필터 중에서 중간값 필터(R)를 사용하였으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)은 마스크에 의해 정의된 $m \times n$ 사이즈의 이웃점 내에 있는 픽셀들의 명암도 평균이며, 필터의 모든 계수가 $1/mn$ 대신에 모두 1이다. 필터 처리의 마지막에서 전체 영상은 $m \times n$ 로 나누며, $m \times n$ 크기의 마스크는 $1/mn$ 과 동일한 정규화 상수를 갖는

다. x_i 와 y_i 는 임의의 $m \times n$ 크기의 마스크에서 x, y 방향의 계수 1의 위치이다.

$$R = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{mn} x_i y_i \tag{1}$$

(2) 고역증대 필터

이미지에서 저주파 성분을 제거하지 않고 이미지 세부 사항을 나타내는 고주파 성분을 강조하는 것이 필요하며, 고역증대 필터는 고주파 성분을 향상하는 데 사용할 수 있다⁽¹³⁾. 이미지를 선명화하기 위해 이미지의 자신으로부터 흐려진 이미지를 빼주는 것으로 비선명 마스크처리라고 불리며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_s(x, y) = f(x, y) - \bar{f}(x, y) \tag{2}$$

여기서 $f_s(x, y)$ 는 비선명 마스크처리에 의해 얻어진 선명한 이미지를 나타내고, $\bar{f}(x, y)$ 는 $f(x, y)$ 의 흐려진 이미지이다. 고역증대 필터로 처리된 이미지 f_{hb} 는 임의의 (x, y) 에서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{hb}(x, y) = Af(x, y) - \bar{f}(x, y) \tag{3}$$

여기서 $A \geq 1$ 이고 \bar{f} 는 f 가 흐려진 이미지이며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{hb}(x, y) = (A-1)f(x, y) + f(x, y) - \bar{f}(x, y) \tag{4}$$

식 (2)를 식 (4)에 대입하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{hb}(x, y) = (A-1)f(x, y) - f_s(x, y) \tag{5}$$

일반적으로 고역증대 필터는 입력된 이미지가 다소 어두운 경우 전체적으로 밝게 조정함과 동시에 선명화하는 효과가 있다. 이 연구에서는 수위응답을 측정하기 위해 액체저장탱크에 설치된 구조물의 경계선의 선명화 및 빛과 조명의 반사로 인해 유체에 발생

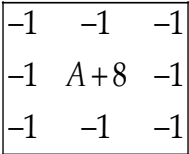


Fig. 1 High boost filter

한 노이즈를 감소하기 위하여 Fig. 1의 고역증대 필터를 사용하였다.

2.2 디지털 이미지 상관법

디지털 이미지 상관법은 변형이 발생하기 전과 후의 구조물의 표면에서 획득된 두 이미지의 명암도의 차이를 상관관계를 이용하여 구조물의 변위를 측정하는 방법이다⁽¹⁴⁾. 디지털 이미지는 여러 개의 픽셀로 구성되어 있으며 각 픽셀은 좌표와 명암도의 정보를 가지고 있다. 변형을 추적할 픽셀들을 한 개의 그룹으로 하여 그룹 전체의 픽셀을 비교하여 추적하며 이 그룹을 서브셋이라 한다. 참조 이미지에서 변위를 측정하기 위한 기준점의 수평 변위 및 수직 변위를 제공하기 위하여 변형된 이미지에 대하여 상관관계 과정이 반복적으로 수행한다. 참조 이미지의 서브셋과 변형된 이미지의 서브셋과의 상관관계는 식 (6)~ 식 (8)의 NCC(normalized cross correlation)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$C(u, v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)}{\bar{f} \bar{g}} \right] \tag{6}$$

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2} \tag{7}$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2} \tag{8}$$

u, v 는 참조 서브셋의 중심에 대한 x, y 방향의 변위 성분을 나타낸다. $f(x_i, y_j)$ 는 참조 이미지에서 분리된 서브셋의 명암도이며 $g(x'_i, y'_j)$ 는 변형된 이미지에서 분리된 서브셋의 명암도이다. (x, y) 및 (x', y') 는 참조 이미지 및 변형된 이미지에서 분리된 서브셋에서 픽셀의 수평 방향 및 수직 방향의 위치이다. M 은 서브셋의 중심에서 단변방향의 길이를 나타내며, 서브셋은 중심에서 $(2M+1) \times (2M+1)$ 의 크기이며 정사각형이다.

디지털 이미지에서 최소 단위는 1 픽셀이기 때문에 식 (6)에서 계산된 변위는 1 픽셀의 정수배로 표현된다. NCC를 이용하여 측정된 변위의 단위픽셀 이하 단위의 정확성을 향상하기 위하여 곡선 접합 방법을 이용하였다⁽¹⁵⁾. 곡선 접합 방법은 NCC를 이용하여 획득된 상관 계수의 최소값을 중심을 기준으로 3×3 행렬의 픽셀 위치는 식 (9)의 2차 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$C(x_i, y_j) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 \quad (9)$$

변위 u 및 v 는 접합 표면의 최대값이 발생하는 위치를 기반으로 정의되며 u 와 v 의 값을 찾으려면 식 (10)과 같이 2차 다항식을 미분하여 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(x, y)}{\partial x} &= a_1 + 2a_3x + a_4y = 0, \\ \frac{\partial C(x, y)}{\partial y} &= a_1 + 2a_5y + a_4x = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 최대 상관계수의 위치를 결정할 수 있으며 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}, \quad y = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \quad (11)$$

변형된 서브셋의 중심 위치 x, y 를 산정한 후 변위는 식 (12)를 이용하여 정의할 수 있다. 식 (12)에서 x_0 및 y_0 는 참조 서브셋의 중심이고 u 및 v 는 각각 x 및 y 방향에 대응하는 변위이다.

$$u = x - x_0, \quad v = y - y_0 \quad (12)$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n x(k)y(k+\tau) \quad (13)$$

2.3 이미지를 이용한 수위응답 측정 과정

Fig. 2는 디지털 이미지를 이용한 수위응답을 측정하기 위한 과정을 나타내었다. 획득된 영상을 시간 순서대로 이미지를 배열하며 명암도 이미지로 변환한다. 명암도 이미지를 공간영역에서의 이미지 향상 알고리즘인 식 (1)의 중간값 필터와 식 (5)의 고역증대 필터를 적용한다. 공간영역에서의 이미지 향상 알고리즘을 적용한 이미지에서 수위응답을 측정하고 싶은 지점인 기준점을 지정한다. 기준점을 포함한 서브셋이 변형된 이미지의 서브셋에서 최적으로 매칭되는

지점을 찾기 위하여 식 (6)을 이용하여 NCC를 계산하며, 식 (9)의 2차 다항식을 이용하여 단위픽셀 이하에서의 해상도를 향상한다. NCC를 이용하여 최적으로 매칭되는 정수로 표현된 픽셀값과 2차 다항식으로 산정된 1 픽셀 이하의 정보를 이용하여 식 (13)의 픽셀 기반의 수위응답을 해석하게 된다. 픽셀 단위의 수위응답은 구조물의 크기를 나타내는 픽셀을 이용하여 해상도를 계산할 수 있으며 이를 이용하여 실제 거리 단위로 변환할 수 있다.

3. 실험 구성

3.1 실험설정

이 연구에서는 진동대 실험에서 액체저장탱크의 슬로싱 거동이 효과적으로 발생할 수 있도록 실험체를 제작하였으며 지름은 2.0 m이며 높이는 1.5 m이다. 유체의 슬로싱 파형은 액체저장탱크의 높이에 따른 수위의 비로 결정되며 수위에 대한 액체저장탱크의 높이 비가 0.5~0.7인 경우에 크게 발생한다^(16,17). 따라서 슬로싱 거동을 고려하기 위하여 자유 수면의 높이는 0.8 m로 설정하였으며 수위에 대한 액체저장탱크의 높이 비는 0.53이다. 물은 비압축성이며 균질하므로 액체저장탱크 내부의 유체는 물을 사용하였으며 액체저장탱크와 유체의 상호관계보다 슬로싱 거동을 확인하기 위하여 20 mm 두께의 강재로 제작하였다. Fig. 3은 진동대에 설치된 액체저장탱크를 나타내었으며 Table 1은 사양을 나타내었다.

가속도 센서(PCB 356A17)는 높이 방향에 대하여 액체저장탱크의 아래에서 50 mm, 400 mm, 750 mm, 1100 mm, 1450 mm 지점에 5개를 설치하였다. 수위계(삼덕과학 CTH6)는 Fig. 4와 같이 지름이 2.0 m 액체저장탱크의 중심에서 각각 450 mm 지점에 총 5개의 수위계와 각 수위계의 중심에 4개의 자를 설치하였다. 수위계는 수면 레벨의 변화를 센서 와이어의 전기용량이 변화하는 것을 이용하여 수위를 측정하는 원리이다. 이 연구에서는 수위계의 최대 데이터 취득 속도인 20 Hz로 측정하였다. 디지털 캠코더(SONY HDR-CX130)는 1920 × 1080 픽셀을 초당 60 프레임으로 영상을 획득하였다. 디지털 캠코더는 수위계를 정확하게 정면을 보는 것이 아니라 기울어져 있기 때문의 각도의 변화의 보정이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 이동, 회전, 스케일 같은 선형적인 변환을 나타낼 수 있는 유사 변환 함수를 이용하여 각도를

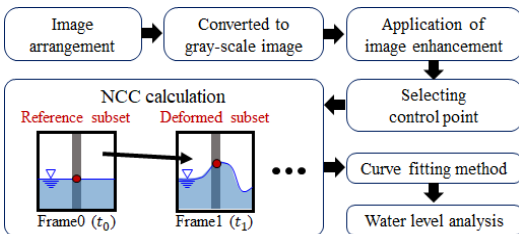


Fig. 2 Process for measuring water level response

보정하였다. 이 연구에서는 유체의 빛과 조명의 반사에 의해 발생한 유체의 노이즈 감소의 영향을 확인하는 데 목적이 있다. 따라서 유체의 빛과 조명의 반사에 대한 영향이 가장 큰 W4 지점에서 수위계에서 측정된 수위응답과 디지털 이미지 처리를 이용하여 측정된 수위응답을 비교하였다. 수위계에서 와이어의 전기변화량으로 수위응답이 측정되며, 이미지는 지지봉에서 수위응답이 측정되므로 측정 위치는 40 mm의 차이가 있다. 디지털 이미지 처리는 수위계 지지봉의 수면을 기준점으로 지정하여 수위응답을 측정하였으며, 지지봉과 수면의 경계선을 기준점으로 인식을 용

이하기 위하여 물에 잉크를 풀어 실험을 수행하였다. Fig. 5와 같이 액체저장탱크의 상부에 설치된 디지털 캠코더를 나타내었으며 액체저장탱크와 캠코더의 일체 거동을 위하여 볼헤드를 글루건과 록타이트를 이용하여 고정하였다.

3.2 이미지 향상 함수 적용

Fig. 6은 이 연구에서 적용한 공간영역에서의 이미지 향상을 나타내었다. Fig. 6(a)는 디지털 캠코더를 이용하여 획득된 영상을 이용하여 추출된 원 이미지이고 Fig. 6(b)는 원 이미지를 명암도로 변환한 이미지이다. Fig. 6(c)는 변환한 명암도 이미지에 식 (1)의 15×15 마스크 크기의 중간값 필터를 적용한 이미지 Fig. 6(d)는 중간값 필터를 적용한 이미지에 Fig. 1에서 $A=2$ 의 계수인 고역증대 필터를 적용한 이미지를 나타내었다. Fig. 6(d)에서 공간영역의 이미지 향상을 적용하면 수위계의 지지봉 주위의 빛과 조명의 반사로 인한 영향이 감소함을 확인할 수 있다.

Table 1 Specification of liquid storage tank

Diameter [d, m]	Height [h, m]	Wall thickness [t, m]	Water level [h _w , m]	h _w /h
2.0	1.5	0.02	0.8	0.53

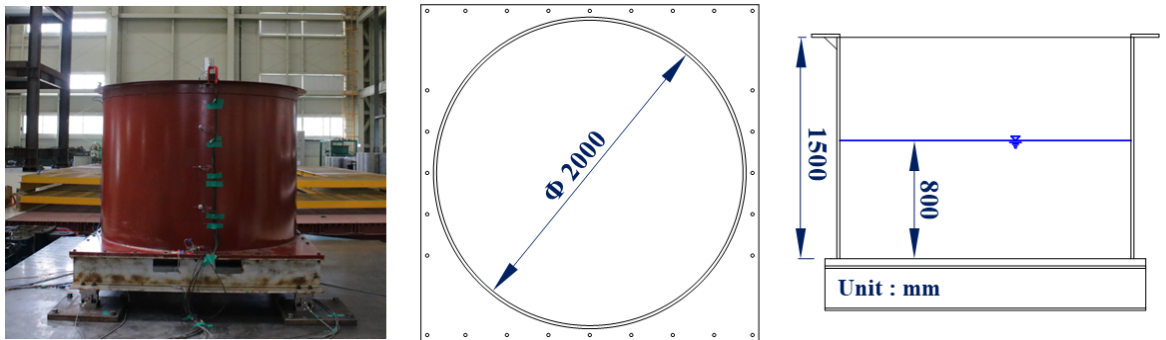


Fig. 3 Manufactured liquid storage tank

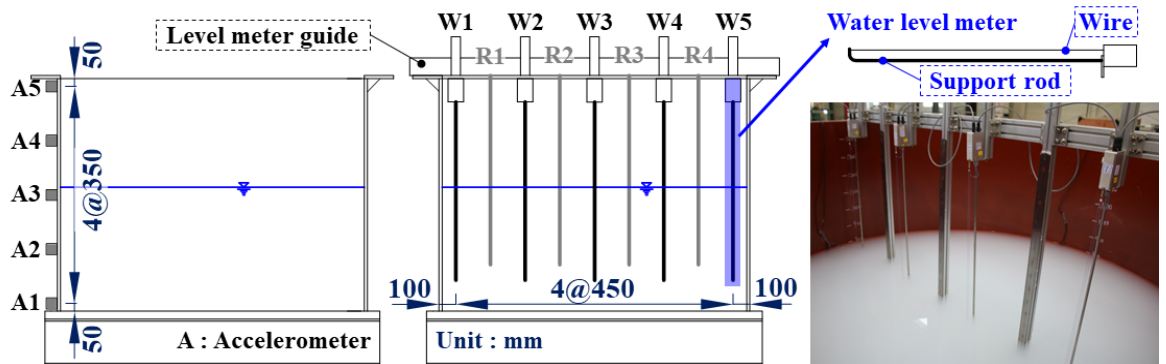


Fig. 4 Sensor installation position

4. 진동대 실험에서의 수위응답 측정

이 연구에서는 디지털 이미지 처리를 이용한 액체 저장탱크의 수위응답을 측정하는 방법을 검증하기 위하여 Table 2와 같이 진동대 실험을 수행하였다. 지진파를 가진하기 전에 액체저장탱크의 동특성을 확인하기 위하여 백색잡음 성분의 가진을 수행하였다. 진동대 실험은 액체저장탱크에 구조적인 영향을 미치지 않는 수준의 가속도 레벨에서(0.2 g) 백색잡음 성분을 가진하고 El centro 지진파의 가속도 수준을 변경하면서 수행하였다.

디지털 이미지 처리를 이용하여 기준점에 대한 수위응답의 시간이력을 추출하기 위해 Fig. 2에서 제시된 과정이 적용되었으며, 추출된 응답의 유사성을 확인하기 위하여 식 (13)의 상호상관함수를 이용하였다.



Fig. 5 Installed digital camcorder

식 (13)은 시간영역에서 두 신호 사이의 상호 연관성을 나타내는 것으로 2개의 신호의 유사성을 산정하는 함수이다. 여기서 $x(k)$ 는 수위계에서 측정된 응답, $y(k)$ 는 이미지 해석을 이용하여 측정된 응답, N 은 상호상관함수에 사용할 데이터의 수 τ 는 상호상관함수를 위하여 새롭게 정의 내려진 시간이다.

백색잡음 성분의 가진에서 입력된 하중에 대한 각각의 위치에서 측정된 x 방향 가속도의 전달함수와 위상각은 Fig. 7과 같으며, 액체저장탱크의 고유진동수는 35.88 Hz로 나타났다.

Fig. 8은 W4 지점에서 수위계에서 측정된 응답과 디지털 이미지 처리를 이용하여 측정된 응답을 비교하였다. Fig. 8(a)의 명암도 이미지는 수위계의 지지봉 주위에 유체의 빛과 조명의 반사 때문에 이미지 해석에서 기준점의 인식이 어려움을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 8(b)는 공간영역에서의 이미지 향상을 적용한 이미지는 유체의 빛과 조명의 반사로 인한 영향이 감소하므로 수위응답의 측정이 가능하였다. 따라서 공간영역에서의 이미지 향상을 적용하면 이미지 해석에

Table 2 Load cases for shaking table test

Load case	Seismic wave	Direction
1	White noise 0.2 g	X
2	El centro, 10 %	X
3	El centro, 20 %	X
4	El centro, 30 %	X
5	El centro, 40 %	X
6	El centro, 50 %	X

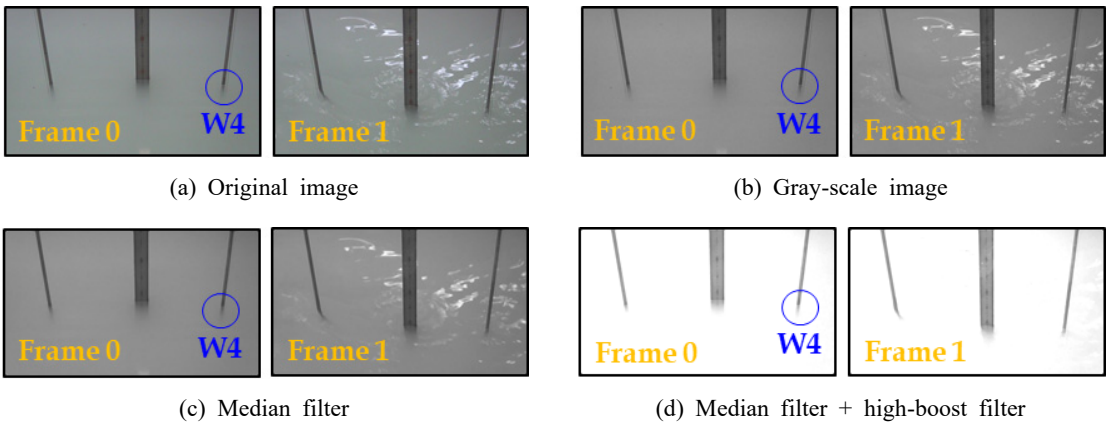


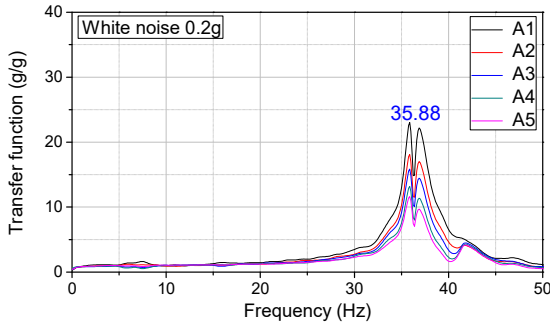
Fig. 6 Application of image enhancement in spatial domain

서 기준점의 인식이 용이함을 확인할 수 있었다.

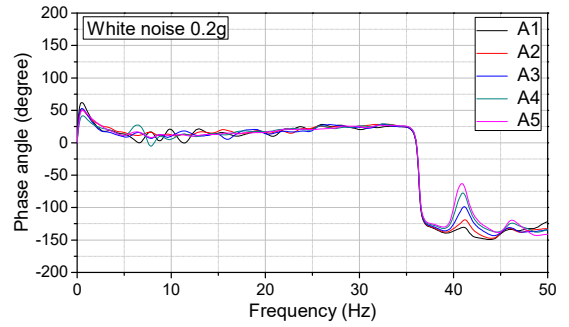
유체의 슬러싱 주파수는 백색잡음 성분의 가진에서 수위계에서 측정된 응답과 디지털 이미지 처리를 이용하여 측정된 응답을 이용하였다. 백색잡음 성분의 가진에서 측정된 수위응답에 대한 PSD(power spectral density) 함수는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9

에서 유체의 슬러싱 주파수는 수위계와 이미지 해석에서 약 0.64 Hz로 측정되었으며 0.1% 이내의 오차로 이미지 해석을 이용하여 측정된 수위응답의 신뢰성이 양호한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 W4 지점에서 수위계에서 측정된 응답과 디지털 이미지 처리를 이용하여 측정된 응답을 비교

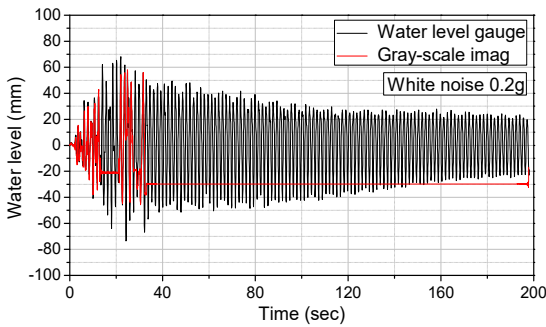


(a) Transfer function

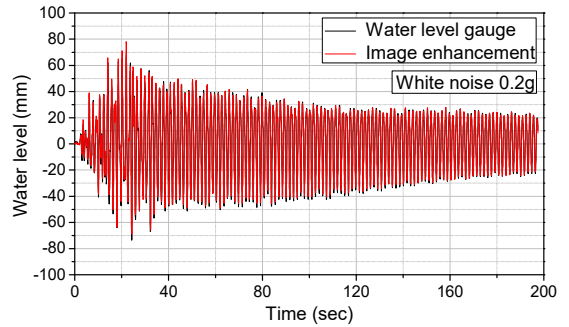


(b) Phase angle

Fig. 7 Transfer function and phase angle of acceleration responses in white noise test

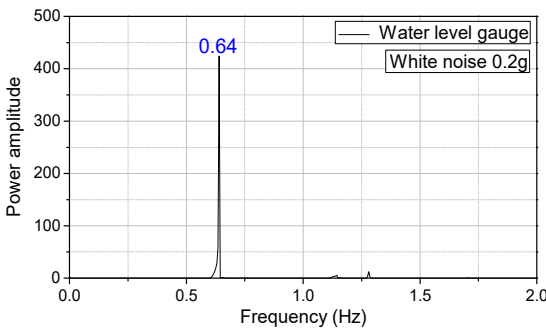


(a) Gray-scale image

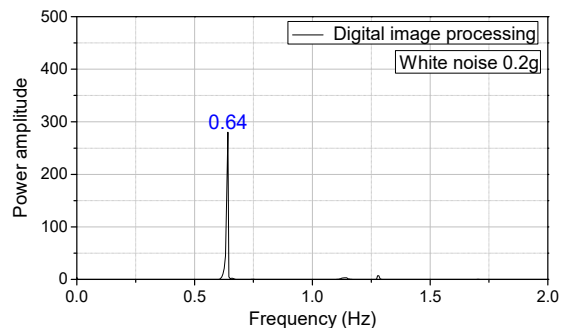


(b) Application of image enhancement

Fig. 8 Comparison of water level responses



(a) Water level gauge



(b) Image enhancement

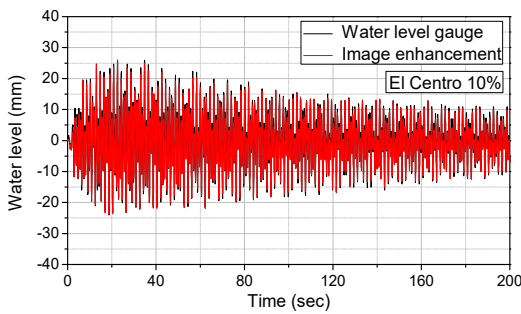
Fig. 9 Comparison of PSD functions of measured responses

하였으며 Fig. 10(a)는 시간이력을, Fig. 10(b)는 10초 ~ 80초 사이의 구간을 나타내었다. Fig. 10(c)에서 공간영역에서의 이미지 향상을 적용하면 유체의 빛과 조명의 반사로 인해 발생한 이미지 해석에서 발생할 수 있는 노이즈가 감소하였으며, 기준점의 인식이 용이함을 확인할 수 있었다. Table 3은 진동대 실험에서 수위계와 디지털 이미지 처리를 이용하여 추출된 응답의 상호상관계수를 나타내었다. 여기서 상호상관계수는 -1에서 1사이의 값을 가진다. 1일 경우는 완전히 일치함을 나타내며, -1일 경우는 모양은 동일하나 위상이 역전된 경우를 뜻하며, 0인 경우는 완전히 상

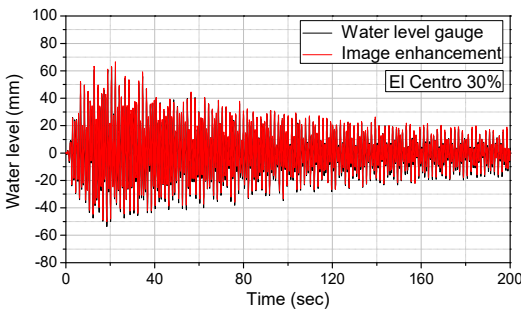
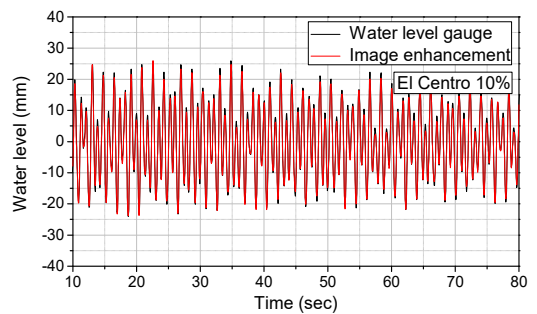
관관계가 없음을 나타낸다. Table 3에서 디지털 이미지 처리를 이용하여 추출된 수위응답은 수위계에서 측정된 수위응답의 상호상관계수가 0.96 이상이므로

Table 3 Similarity analysis for each load case

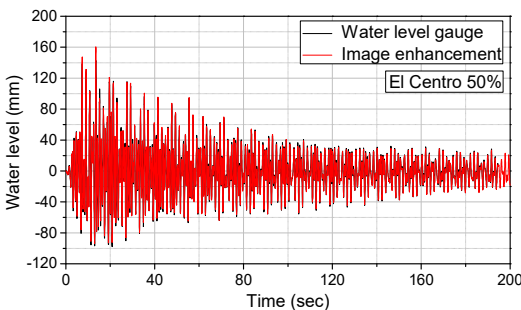
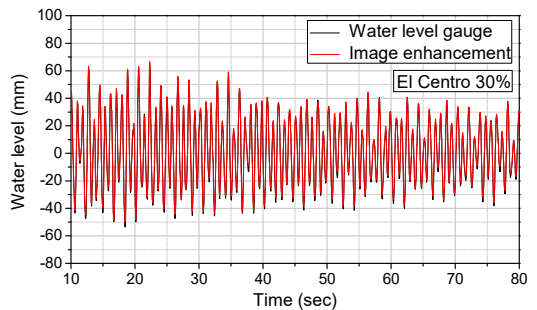
Load case	Cross correlation coefficient
1	0.97
2	0.96
3	0.98
4	0.97
5	0.97
6	0.97



(a) Load case 2



(b) Load case 4



(c) Load case 6

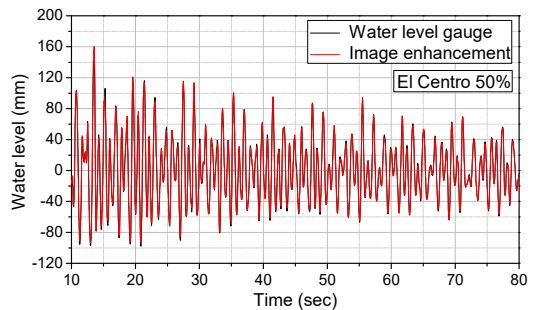


Fig. 10 Comparison of water level responses

유사성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 디지털 이미지 처리를 이용하여 측정된 수위응답의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 액체저장탱크의 진동대 실험에서 수위응답의 측정을 위해 적합한 방법으로 디지털 캠코더를 기반으로 하는 비접촉식 측정 방법을 제안하였다.

진동대 실험에서 디지털 이미지 처리를 이용하여 측정된 수위응답은 수위계에서 측정된 수위응답과 상호관계수가 0.96 이상으로 유사성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 디지털 이미지 처리를 이용하여 측정된 수위응답의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 디지털 이미지 처리 데이터를 분석해 얻어진 슬로싱 진동수는 수위계를 이용해 얻어진 슬로싱 진동수와 0.1 % 이내의 정확도를 가짐으로써 디지털 이미지 처리 데이터의 타당함을 확인할 수 있었다. 공간영역에서의 이미지 향상을 이용하면 유체의 빛과 조명의 반사로 인한 노이즈와 기준점 인식에 대한 오차를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 수위응답의 해상도를 향상하기 위하여 영상을 획득하면서 발생하는 열화, 측정 조건에 따른 빛과 조명의 변화, 단위 픽셀 이하에서의 정확도 등에 대한 추가적인 연구들이 필요할 것이다.

이미지를 이용하여 수위응답의 측정이 필요한 경우 이 연구에서 제안한 수위응답을 측정하는 방법을 이용할 수 있으며, 이를 이용하면 다양한 분야에서 경제적이고 간편하게 구조물 응답의 측정이 가능할 것이다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C1012093).

References

(1) Chang, J. I. and Lin, C.-C., 2006, A Study of Storage Tank Accidents, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 19, No. 1, pp. 51~59.
 (2) Curadelli, O., Ambrosini, D., Mirasso, A. and Amani, M., 2010, Resonant Frequencies in an Elevated

Spherical Container Partially Filled with Water: FEM and Measurement, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 26, No. 1, pp. 148~159.

(3) Amiri, M. and Sabbagh-Yazdi, S. R., 2012, Influence of Roof on Dynamic Characteristics of Dome Roof Tanks Partially Filled with Liquid, *Thin-Walled Structures*, Vol. 50, No. 1, pp. 56~67.

(4) Hatayama, K., 2008, Lessons from the 2003 Tokachi-oki, Japan, Earthquake for Prediction of Long-Period Strong Ground Motions and Sloshing Damage to Oil Storage Tanks, *Journal of Seismology*, Vol. 12, No. 2, pp. 255~263.

(5) Isaacson, M. and Premasiri, S., 2011, Hydrodynamic Damping due to Baffles in a Rectangular Tank, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 608~616.

(6) Maleki, A. and Ziyacifar, M., 2008, Sloshing Damping in Cylindrical Liquid Storage Tanks with Baffles, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 311, No. 1-2, pp. 372~385.

(7) Kolukula, S. S., Sajish, S. D. and Chellapandi, P., 2015, Experimental Investigation of Slosh Parametric Instability in Liquid Filled Vessel under Seismic Excitations, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 76, pp. 218~225.

(8) Faltinsen, O. M., Rognebakke, O. F. and Timokha, A. N., 2003, Resonant Three-dimensional Nonlinear Sloshing in a Square-base Basin, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 487, pp. 1~42.

(9) Goudarzi, M. A., Sabbagh-Yazdi, S. R. and Marx, W., 2010, Investigation of Sloshing Damping in Baffled Rectangular Tanks Subjected to the Dynamic Excitation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 1055~1072.

(10) Sangsari, M. K. and Hosseinzadeh, N., 2014, Shake table study of impulsive and convective damping coefficients for steel cylindrical tanks and comparison with API 650, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 129~137.

(11) Hosseinzadeh, N., Sangsari, M. K. and Ferdosiyeh, H. T., 2014, Shake table study of annular baffles in steel storage tanks as sloshing dependent variable dampers, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 32, pp. 299~310.

(12) Kumar, S., Kumar, P., Gupta, M. and Nagawat, A. K., 2010, Performance Comparison of Median and Wiener Filter in Image De-noising, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 12, No. 4, pp. 27~31.

(13) Srivastava, R., Gupta, J. R. P., Parthasarthy, H. and Srivastava, S., 2009, PDE Based Unsharp Masking, Crispensing and High Boost Filtering of Digital Images, *Proceedings of Second International Conference: Communications in Computer and Information Science, Contemporary Computing*, Vol. 40, pp. 8~13.

(14) Pan, B., 2018, Digital Image Correlation for Surface Deformation Measurement: Historical Developments, Recent Advances and Future Goals, *Measurement Science and Technology*, Vol. 29, No. 8, 082001.

(15) Schreier, H. W. and Sutton, M. A., 2002, Systematic Errors in Digital Image Correlation due to Undermatched Subset Shape Functions, *Experimental Mechanics*, Vol. 42, No. 3, pp. 303~310.

(16) Chen, Y. G., Djidjeli, K. and Price, W. G., 2009, Numerical Simulation of Liquid Sloshing Phenomena in Partially Filled Containers, *Computers & Fluids*, Vol. 38, No. 4, pp. 830~842.

(17) Baek, E.-R., Choi, H.-S., Park, D.-U., Kim, N.-S. and Kim, J.-M., 2017, Shake Table Test DB of the Liquid Storage Tank for Fluid Sloshing Analysis,

Transactions of the Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 5, pp. 545~554.



Sung-Wan Kim received his Ph.D. degree from Pusan National University with the title of Health Monitoring of Civil Structures Using Image Measurement System. He is currently the research professor in Seismic Research and Test Center.

His research interests include structural health monitoring and ambient vibration tests of civil infrastructures.



Dong-Uk Park received his Ph.D. degree from Pusan National University with the topic related with improvement of numerical model using wireless measurement on railway bridge. He is currently the verification manager in Seismic

Research and Test Center. His research interests encompass seismic evaluation of mechanical and electrical equipment and seismic performance of high frequency motion.