

열에너지 저장 검증 실험장치 축열조 슬로싱 해석

윤정*† · 신용훈* · 김현일* · 이형연* · 어재혁*

Sloshing Analysis for a Thermal Energy Storage Tank in the Thermal Energy Storage Experimental Verification Test Loop

Jung Yoon*†, Yong-Hoon Shin*, Hyeonil Kim*, Jaehyuk Eoh*

Key Words : Thermal Energy Storage(열에너지 저장), Thermal Energy Storage Experimental Verification Test Loop(열에너지 저장 검증 실험장치), Thermal Energy Storage Tank(축열조), Sloshing Analysis(슬로싱 해석)

ABSTRACT

KAERI is building the Thermal Energy Storage Experimental verification Test loop (TESET) to verify the performance of a thermal energy storage system, one of the core technologies for the realization of the Nuclear-Renewable Hybrid Energy System (NRHES). The high-temperature thermal energy storage tank, one of the main components of TESET, plays a role in storing high-temperature thermal energy, which is very important to secure its structural integrity at high temperatures. For this purpose, high-temperature material behavior characterization and 3D-based high temperature structural integrity evaluation have been conducted. In order to evaluate the effect of sloshing in the thermal energy storage tank where the free surface of working fluid fluctuates freely by an external dynamic load, the acceleration data measured in the El Centro, Gyungju, and Pohang earthquakes were used to calculate the pressure acting on the thermal storage tank wall surface, and the relationship between the seismic load and sloshing response component was analyzed. The results show that El Centro, which has the largest intensity and duration of seismic waves, has the largest energy of seismic waves compared to other cases, while Gyungju has higher energy in some high-frequency regions. It is also found in all the cases that the absolute value of pressure fluctuation increases as the convective pressure rises near the free surface.

1. 서론

신재생에너지의 비중 확대에 의해 기저부하를 담당하던 대용량 발전원인 원자력은 에너지 수요에 따른 유연한 발전이 요구되고 있으며, 지속가능한 성장을 위해서는 에너지 이용률을 극대화하기 위한 노력이 필요하다. 일반적으로 원자력 발전은 계통 영향에 대한 위험부담 및 발전비용 대비 낮은 연료비 비중으로 인해 출력 조정으로 얻을 수 있는 경제적인 이득이 크지 않아 일반적으로 부하추종 운전은 고려하지 않고 있으며, 필요 시 터빈으로 유입되는 증기량을 조절하는 방법으로 외부 부하변동에 대응한다. 따라서, 원자력의 열출력을 유지하면서 전기출력을 유연하게 조정하고 여분의

열에너지를 이용할 수 있는 시스템의 개발과 더불어 다양한 수요에 맞는 에너지 이용 효율 극대화 기술이 요구된다. 이를 위해 원자력-신재생 하이브리드 에너지 시스템 (Nuclear-Renewable Hybrid Energy System, NRHES)의 개발이 필요하며, 이에 따라 한국원자력연구원에서는 NRHES의 구현을 위한 핵심기술 중 하나인 열에너지 저장장치의 성능 검증을 위한 대용량-고온 열에너지 저장 검증 실험장치 (Thermal Energy Storage Experimental verification Test loop, TESET)의 구축을 진행하고 있다. TESET은 열에너지의 충전, 저장 및 이용과 관련된 일련의 운전을 모의하는 역할을 수행하며, 여분의 열에너지를 보관해 두었다가 필요 시 이용하는 방식으로 구성되고 운전된다.

* 한국원자력연구원 선진SMR기술개발부 (Advanced Reactor Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)

† 교신저자, E-mail : jyoona@kaeri.re.kr

TESET의 작동유체로는 높은 비등점과 우수한 열전달 특성을 가지는 액체 소듐을 사용하며, 시험장치를 구성하는 주요 기기로는 열원 역할을 하는 루프히터, 여분의 열에너지를 저장하는 기능을 수행하는 고온축열조, 저장된 열에너지를 이용하는 기능을 수행하는 소듐-공기 열교환기, 에너지를 잃은 소듐을 보관하는 저온축열조 및 소듐의 이송을 위한 전자펌프 등이 있다. 이 중에서 고온축열조의 경우는 여분의 열에너지를 장기간 저장함에 따라 고온에 장시간 노출되어야 하는 기기 특성상 고온에서의 구조건전성을 확보하는 것이 중요하다. 이에 따라 고온축열조의 내열강 재료인 Type 316L 스테인리스강에 대한 고온 재료거동 특성을 평가하였으며⁽¹⁾, 700°C 에서의 3차원 유한요소해석 기반 고온 건전성 평가를 수행하여 Type 316L의 구조건전성 및 적용성이 양호함을 검증한 바 있다⁽²⁾.

용기 내에서 자유액면을 가지는 유체가 외부 동하중에 의해 자유롭게 움직이는 슬로싱(Sloshing) 현상은 용기 벽면에 순간적인 충격 하중을 부가하면서 구조적인 손상을 유발할 수 있다. 이러한 슬로싱 현상은 외부에서 가해지는 하중의 진폭, 주파수, 용기 형상 및 유체 특성 등에 따라 그 크기가 달라질 수 있으나, 일반적으로 저주파 영역의 하중에서 더 크게 나타나며, 용기의 높이 대비 액위비가 0.5~0.7인 경우에 가장 심각하게 발생된다고 알려져 있다⁽³⁾. 용기에 가해지는 외부 동하중의 대표적인 예는 지진이며, 이때 용기 벽면에 가해지는 압력은 수평으로 작용하는 지진가속도와 용기 자체의 관성에 의해 발생하는 충격압력(Impulsive Pressure)과 충격압력에 의해 발생하는 유체의 운동에 의한 대류압력(Convective Pressure)로 나누어진다⁽⁴⁾. 충격압력은 가진되는 가속도에 비례하고 대류압력은 용기의 형상에 영향을 받으며, 지진 발생 시 이 두가지 압력이 복합적으로 작용하여 구조물에 영향을 주게 된다.

이에 따라 다양한 조건에서의 용기 내의 슬로싱에 의한 유체 거동을 진동대 실험을 통해 데이터베이스화 한 연구가 수행된 바 있으며⁽⁵⁾, 이를 활용하여 지진하중을 받는 정사각형 강재 액체저장탱크의 벽면 압력 응답을 수치적으로 해석한 연구도 수행된 바 있다⁽⁶⁾. 본 연구에서는 TESET 고온축열조를 대상으로 실제 발생했던 1940년 El Centro 지진, 2016년 경주지진 및 2017년 포항지진의 가속도 데이터를 활용하여 축열조 벽면에 작용하는 압력을 수치적으로 계산하고, 이를 통해 고온축열조의 지진하중과 슬로싱 응답 성분의 관계를 분석하였다.

2. 수치해석 방법론

2.1 지배방정식

본 연구에서는 고온축열조의 슬로싱 해석을 위하여 STAR-CCM+ 11.02.009를 사용하였으며, 사용된 주요 지배방정식 중 연속방정식 및 운동량방정식은 다음의 식과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho g + F \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, t 는 시간, u 는 속도, p 는 압력, g 는 중력가속도, $\bar{\tau}$ 는 스트레스 텐서, F 는 체적력이다.

다상유동을 위한 모델로는 VOF (Volume of Fluid)가 사용되었다. 이는 일반적으로 상간 경계면의 추적을 위해 사용하는 기법으로 제어체적에 존재하는 모든 상의 속도, 압력 및 온도 등을 공유한다고 가정하므로, 단상 유동에서의 질량, 운동량 및 에너지 전달을 위한 지배방정식을 동일하게 사용할 수 있다. 이때 물리량은 각 상의 체적분율의 함수로 계산되는 등가 유체의 물리량을 사용하게 된다.

$$\rho = \sum_i^n \rho_i \alpha_i \quad (3)$$

$$\mu = \sum_i^n \mu_i \alpha_i \quad (4)$$

$$C_p = \sum_i^n \frac{C_{pi} \rho_i}{\rho} \alpha_i \quad (5)$$

여기서, μ 는 점도, C_p 는 비열, α 는 체적분율이다.

또한 난류모델은 자유수면을 정확히 계산하는 데 유리하고 벽면에 작용하는 충격압력으로 인한 유동박리현상을 예측하는 데 적합한 $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt}(\rho w) = & \nabla \cdot (\rho D_w \nabla w) + \frac{\rho \gamma G}{\nu} - \\ & \frac{2}{3} \rho \gamma w (\nabla \cdot u) - \rho \beta w^2 - \\ & \rho (F_1 - 1) C D_{kw} + S_w \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt}(\rho k) = & \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G \\ & - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot u) - \rho \beta^* w k + S_k \end{aligned} \quad (7)$$

$$\nu_t = a_1 \frac{k}{\max(a_1 w, b_1 F_{23} S)} \quad (8)$$

여기서, w 는 소산율, k 는 운동에너지, ν_t 는 점성계수를 나타낸다.

2.2 해석 모델

슬로싱 해석의 대상이 되는 고온축열조의 열저장 용량은 1.25MWh이고 운전온도는 700℃이다. 이를 바탕으로 계산된 소듐의 양은 7,165kg이며, 축열조 내부 온도변화에 따른 압력변화 수용을 위해 소듐 체적의 약 20%에 해당하는 커버 가스 공간을 추가로 고려하여 계산된 축열조의 총 체적은 12m³이다. 이에 따라 시험장치가 들어설 공간 및 제작 단가 등을 고려하여 최종 결정된 고온축열조의 형상을 Fig. 1에 나타내었으며, 직경 3m, 높이 2m, 두께는 10mm이고 재질은 Type 316L 스테인리스강이다.

열저장에 사용된 작동유체는 액체 소듐 및 아르곤이며, 해석 시 사용된 물성치들은 모두 운전온도인 700℃에서의 값을 사용하였다. 축열조의 초기 액위는 최하부로부터 1.514m이며, 축열조는 강체로 가정하여 작동유체와의 상호작용을 고려하지 않으므로 해석 영역에서는 제외하였다. 커버가스인 아르곤의 초기 압력은 150kPa로 설정하였으며, 축열조 내부 벽면의 압력 측정을 위해 Fig. 1과 같이 17포인트의 측정점을 최대한 균등한 간격으로 설정하였다. 격자 생성 시 참고문헌 6에 제시된 진동대 시험 결과를 활용하여 비교검증된 방법론을 사용하여 검증하였다. 해석에 사용된 총 격자수는 약 375,000개이며, 소듐 액위 주변으로 격자를 좀 더 세밀하게 배치하였다. 또한, 벽면 부근의 격자는 Prism layer 형태로 배치하였으며, 벽면에서의 Y+는 약 30 정도이다. 슬로싱 해석에 사용된 주요 가정을 아래와 같이 정리하였다.

- Polyhedral mesher
- Prism layer mesher
- 3D, 1/2 symmetry
- Implicit unsteady
- Gravity
- Eulerian multiphase
- Volume of fluid (VOF)

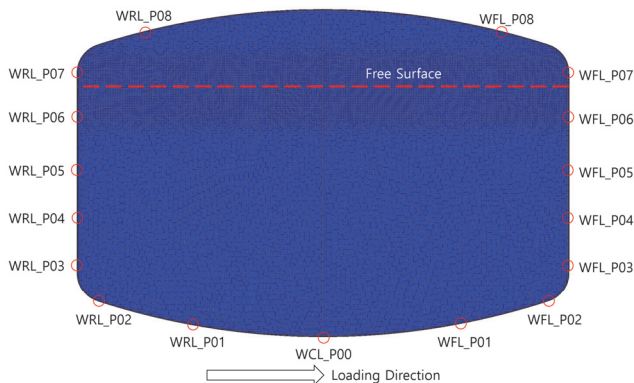


Fig. 1 Schematic of Thermal Storage Tank

- $k-\omega$ SST
- Calculation time : 50s

2.3 입력 지진파

축열조 슬로싱 해석을 위해 사용된 지진파는 본 실험장치가 설치될 대전 지역에서 발생했던 지진 데이터를 활용하는 것이 가장 적합하겠지만, 대전 지역은 지진이 빈번하게 발생되는 지역이 아니며 발생하는 지진 또한 대부분 약진이라서 보수적인 접근을 위해 지진하중에 의한 슬로싱 해석 시 대표적으로 많이 사용되며 지진에 의한 피해가 상당했던 1940년 미국 El Centro, 2016년 경주 및 2017년 포항에서 발생한 지진 시 계측된 값을 사용하였다. 이 중 El Centro 지진 계측 자료는 1940년 5월 18일에 발생한 지진의 E-W 방향 지진파이며, 2016년 9월 12일 경주 및 2017년 11월 15일 포항에서 발생한 지진의 계측자료는 국가지진종합정보시스템 (NECIS)에서 제공하는 지진자료 중 울산(USN2) 및 포항(PHA2) 관측소에서 계측된 E-W 방향의 지진파이다⁽⁷⁾. Fig. 2에 각 지진에 대한 시간에 따른 지반가속도를 나타내었다. 그 결과 El Centro의 경우 약 30초 가량 0.1g 이상의 강한 지진파가 나타났으며, 경주의 경우는 El Centro보다 좀 더 강한 피크 가속도가 나타났으나 그 지속시간은 약 7~8초로 상대적으로 짧다. 포항의 경우는 0.1g 이하의 상대적으로 낮은 지진파가 약 8초 가량 나타나 3가지 케이스 중 가장 낮은 지반가속도를 가짐을 알 수 있다 (단, 동일한 지진이라도 측정 관측소의 위치에 따라 지반가속도가 다르게 나타날 수 있음).

지진파의 주파수별 에너지를 확인하기 위하여 Fig. 3에 각 지진에 대한 주파수에 따른 Power Spectrum Density (PSD)를 나타내었다. 그 결과 지진파의 지속시간이 상대적

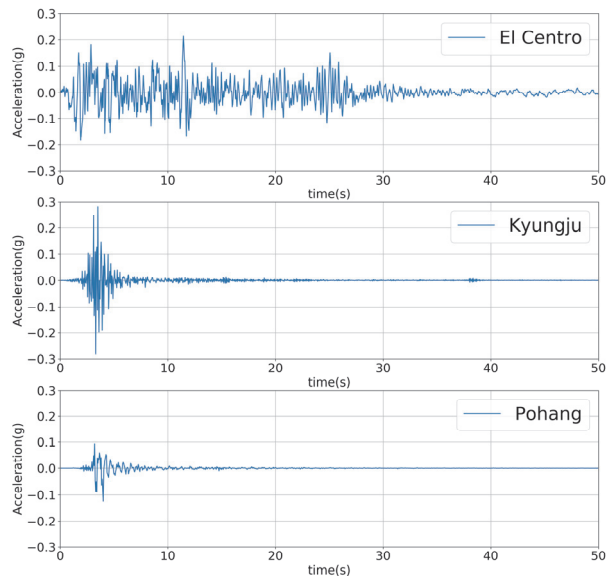


Fig. 2 Earthquake Data for El Centro, Kyungju, and Pohang

으로 긴 El Centro에서 대부분의 주파수에 대해 지진파의 에너지가 크게 나타나지만, 경주의 경우 특정 시간대에서 순간적으로 지반가속도가 크게 나타나면서 일부 고주파수 영역에서 El Centro의 경우보다 에너지가 크게 나타나는 구간이 있음을 확인할 수 있다.

3. 해석결과

Fig. 4에 시간대별 축열조 내부 압력 변화를, Fig. 5에 각

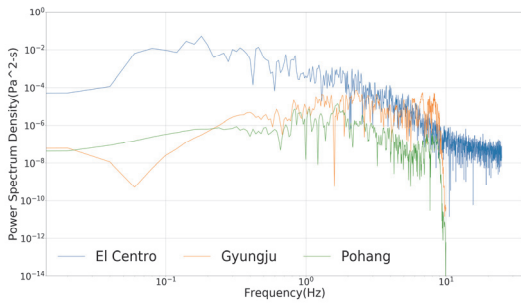


Fig. 3 Power Spectrum Densities of Ground Acceleration in the Actual Earthquake Data

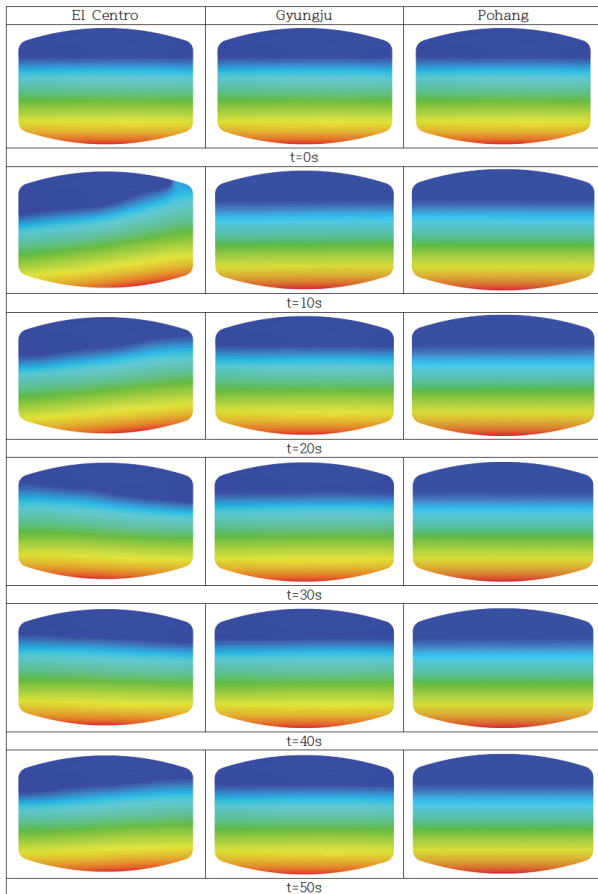
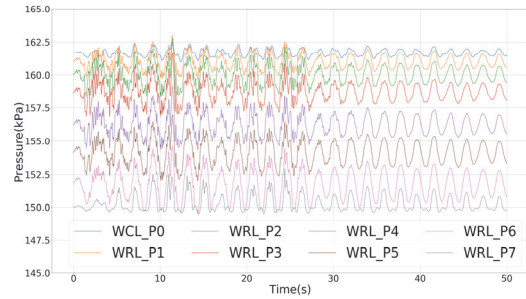


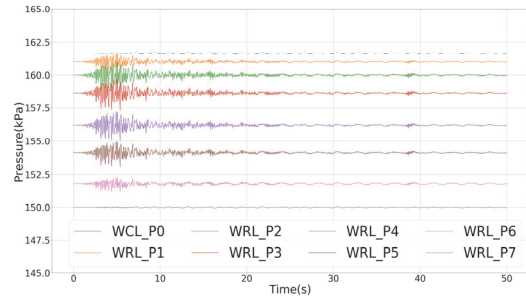
Fig. 4 Static Pressure Distribution at each case

측정점에서 측정된 시간에 따른 압력변화를 나타내었다. 여기서 WCL은 축열조 최하부 측정 포인트를, WRL은 축열조 좌측벽의 측정점을 의미하며(Fig. 1 참조), 일련번호는 아래에서부터 순서대로 부여하였다. 지진하중이 부여되지 않은 초기 조건에서는 순수하게 측정점에서의 정수압만이 측정되어 가장 낮은 위치의 일련번호인 P00번이 가장 높은 압력을 나타내며, 가장 높은 위치의 일련번호인 P08번이 가장 낮은 압력을 나타낸다. 즉, P00~P06번까지가 액체 소동에 의한 정수압이 작용하는 구간이다.

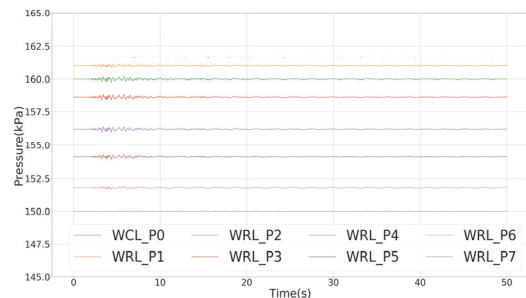
해석결과 지진파의 에너지가 가장 큰 것으로 나타난 El Centro의 경우 축열조에 작용하는 최대 압력이 163kPa (WRL_P2, 하부 경판 모서리 부분)으로 나타났으며, 경주 및 포항의 경우 최대 압력이 각각 161.7kPa, 161.66kPa로 나타났다. 또한 모든 경우에 대해서 정수압으로 인해 축열조 하



(a) El Centro



(b) Gyungju



(c) Pohang

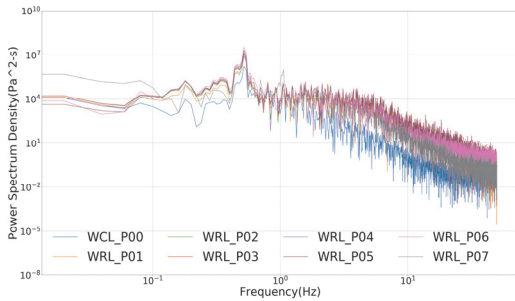
Fig. 5 Time-Pressure Curve from Each Earthquake Case

부로 갈수록 압력이 크게 나타나지만, 지진으로 인한 압력변동의 절댓값은 자유액면 부근으로 갈수록 더 커지는 것을 알 수 있다. 강한 지진파가 긴 시간 동안 지속되었던 El Centro의 경우 해석시간 전반에 걸쳐 모든 측정점에 대해 상대적으로 큰 압력변동을 나타내었으며, 포항의 경우가 가장 작은 압력변동을 나타냄을 알 수 있다. 또한 경주 및 포항의 경우 압력변동의 절댓값은 작지만, El Centro에 비해 전반적으로 (특히 10초 이내) 매우 짧은 주기의 압력변동이 나타나고 있음을 알 수 있다.

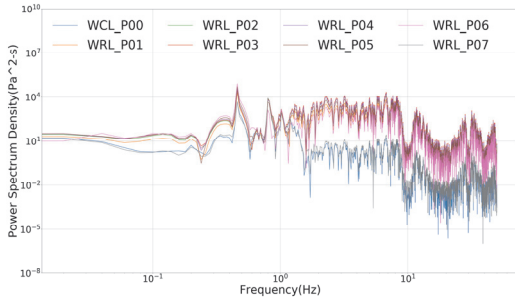
축열조 벽면에 작용하는 각 지진파의 주파수별 에너지를 확인하기 위하여 Fig. 6에 각 측정점에서 측정된 주파수별 PSD를 나타내었다. Fig. 3에서의 결과와 마찬가지로 지진파의 지속시간이 다른 지진파에 비해 상대적으로 긴 El Centro에서 대부분의 주파수에 대해 지진파의 에너지가 크게 나타

났다. 또한 짧은 주기의 압력변동이 나타나는 경주, 포항에서는 일부 고주파수 영역에서의 에너지가 증가함을 알 수 있다.

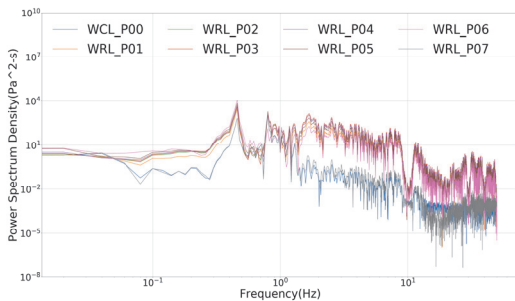
Fig. 7은 축열조 우측 벽면의 측정점 중 일부인 P00, P01, P03 및 P06에서의 주파수별 PSD를 나타낸다. 앞서 확인한



(a) El Centro

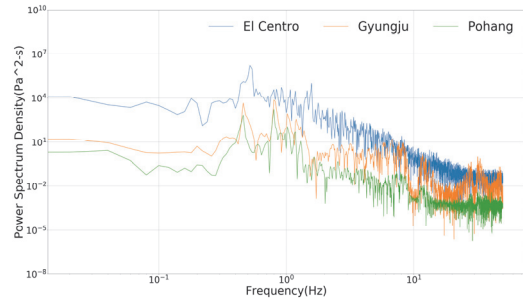


(b) Gyungju

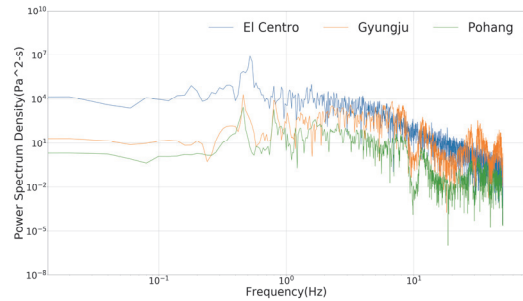


(c) Pohang

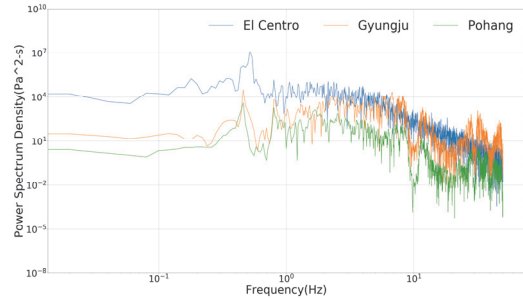
Fig. 6 Frequency-PSD Curve from Each Earthquake Case



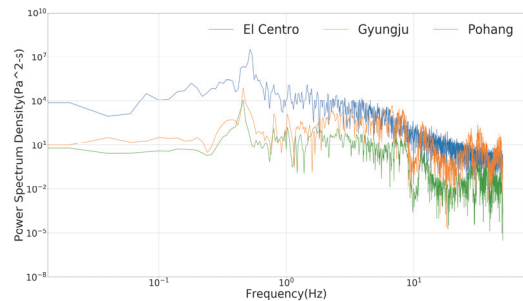
(a) WRL_P00



(b) WRL_P01



(c) WRL_P03



(d) WRL_P06

Fig. 7 Frequency-PSD Curves at the Front Wall

비와 같이 액면 부근으로 갈수록 압력변동의 절댓값이 커지는 현상으로 인해 축열조 벽면에 가해지는 에너지 또한 액면 근처로 갈수록 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

열에너지 저장장치의 성능 검증을 위한 대용량-고온 열에너지 저장 검증 실험장치 (TESET)의 주요기기 중 하나인 고온축열조에 대해서 실제 발생했던 1940년 El Centro 지진, 2016년 경주지진 및 2017년 포항지진의 가속도 데이터를 활용하여 축열조 벽면에 작용하는 압력을 수치적으로 해석하고, 이를 통해 고온축열조에 대한 지진하중과 슬로싱 응답 성분의 관계를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) El Centro의 경우 약 30초 가량 0.1g 이상의 강한 지진파가 나타났으며, 경주의 경우는 El Centro보다 좀 더 강한 피크 가속도가 나타났으나 그 지속시간은 약 7~8초로 상대적으로 짧다. 포항의 경우는 0.1g 이하의 상대적으로 낮은 지진파가 약 8초 가량 나타나 3가지 케이스 중 가장 낮은 지반가속도를 가짐을 확인하였다.
- 2) 지진파의 지속시간이 상대적으로 긴 El Centro에서 대부분의 주파수에 대해 지진파의 에너지가 크게 나타나지만, 경주의 경우 특정 시간대에서 순간적으로 지반가속도가 크게 나타나면서 일부 고주파수 영역에서 El Centro의 경우보다 에너지가 크게 나타남을 확인하였다.
- 3) 축열조 내부 벽면에 작용하는 정수압으로 인해 축열조 하부로 갈수록 압력이 크게 나타나지만, 액면 근처로 갈수록 대류압력의 영향이 커지면서 압력변동의 절댓값이 더 커지는 것을 알 수 있다.
- 4) 경주 및 포항의 경우 압력변동의 절댓값은 작으나, El Centro에 비해 전반적으로 매우 짧은 주기의 압력변동이 나타나고 있음을 알 수 있다.
- 5) 축열조 벽면에 작용하는 각 지진파의 주파수별 에너지를 확인한 결과, 지진파의 지속시간이 다른 지진파에 비해 상대적으로 긴 El Centro에서 대부분의 주파수에 대해 지진파의 에너지가 크게 나타났으며, 짧은 주기의 압력변동이 나타나는 경주, 포항에서는 일부 고주파수 영역에서의 에너지가 증가함을 알 수 있다.
- 6) 3)에서 제시한 결과와 같이 액면 부근으로 갈수록 압력변동의 절댓값이 커지는 현상으로 인해 축열조 벽면에

가해지는 에너지 또한 액면 근처로 갈수록 증가하는 것을 확인하였다.

- 7) 그림에도 불구하고 고온 저압에서 가동되는 본 축열조의 경우 설계압력이 5bar이고 슬로싱에 의해 축열조 벽면에 부가되는 압력이 매우 낮은 수준임을 감안할 경우, 지진 동하중에 의한 축열조의 구조적인 영향은 미미할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(2021M2D1A1084836)의 및 국가과학기술연구회(CAP20033-100)의 지원을 받아 수행됨.

References

- (1) Lee, H. Y., Ha, D. H., Lee, J. H., Eoh, J. H., 2022, "Performance Characteristics of the High-temperature Material Behaviors of Heat Resistant Materials in the Test Facility of Large-scale Thermal Storage Systems", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 46 (4), pp. 545~551.
- (2) Lee, H. Y., Ha, D. H., Lee, J. H., Eoh, J. H., 2022, "Design of Type 316L Stainless Steel Components in a 700°C Large-capacity Thermal Storage System", Trans. Korean Soc. Mech. Eng., Spring Meeting.
- (3) Chen, Y. G., Djidjeli, K., Price, W. G., 2008, "Numerical Simulation of Liquid Sloshing Phenomena in Partially Filled Containers", Computers & Fluids, Vol. 38 (4), pp. 830~842.
- (4) Housner, G. W., 1957, "Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 47 (1), pp. 15~35.
- (5) Baek, E. R., Choi, H. S., Park, D. U., Kim, N. S., Kim, J. M., 2017, "Shake Table Test DB of the Liquid Storage Tank for Fluid Sloshing Analysis", Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., Vol. 27 (5), pp. 545~554.
- (6) Yun, J. H., Kang, T. W., Yang, H. I., Jeon, J. S., 2018, "Earthquake-induced Wall Pressure Response Analysis of a Square Steel Liquid Storage Tank", EESK J. Earthquake Eng., Vol. 22 (5), pp. 261~269.
- (7) Korea National Earthquake Comprehensive Information System (NECIS), <https://necis.kma.go.kr>