

스테인리스 물탱크 내진설계를 위한 효율적 패널 형상

김성욱* · 김태은* · 오성룡* · 박지훈**

Efficient Panel Shapes for Seismic Resistance of Stainless Steel Water Tank

Kim, Sungwuk* · Kim, Tae-eun* · Oh, Sungryoung* · Ji-Hun Park**

Abstract: The seismic design of water tanks for fire protection is important to prevent secondary earthquake damages due to fires. In this study, the seismic performance of stainless steel water tanks was evaluated considering both static and dynamic water pressure effects, and the influence of different panel shapes was investigated through numerical analysis. First, a basic water tank model comprised of flat panels was built, and then water pressure distribution including sloshing effects was evaluated. In the result of structural analysis, many panels of the basic water tank exceeded a specified allowable stress for load combinations including earthquake loads. In order to reduce the bending stress of the panel by increasing the moment of inertial of the panel section, alternative shapes of a truncated quadrangular pyramid were developed. Five water tanks with different alternative panel shapes were built and analyzed for the same load combinations. Based on the results of the numerical analysis, a number of effective aspect ratios were selected and modified to increase economic feasibility through additional analysis and structural safety check.

키 워 드: 내진설계, 스테인리스 물탱크, 슬로싱, 패널 형상

Key Words: Seismic Design, Stainless Water Tank, Sloshing, Panel Shape

1. 서론

1.1 연구의 배경

최근 국내 지진의 규모와 발생 빈도가 증가하는 추세이다. 특히 경주 지진(2016)과 포항 지진(2017)으로 건축물 뿐만 아니라 비구조요소들의 붕괴로 인해 많은 피해가 발생하였다. 비구조요소는 건물의 하중을 지지하지 않는 구조물로서 건축물에 필요한 요소나 설비 등을 말한다. 비구조요소의 손상이 발생하면 건물의 기능들이 마비되고 직접적인 피해 뿐만 아니라 누수 및 누전 혹은 화재를 대처하지 못하는 2차 피해로 이어질 수 있다. 그렇기 때문에, 내진성능의 안전성이 충분히 확보가 되어야 한다.

비구조요소에 대한 내진설계 기준 강화 중 물탱크는 소화용 수조로 사용될 경우 2016년에 소방시설의 내진설계가 법제화되면서 내진설계의 대상이 되었다. 더불어 건축물의 내진설계기준(KDS 41 17 00)에 따르면 소화수조는 내진설계 중요도계수 1.5로서 주요 내진설계 대상으로 선정되어 있다.

국내 물탱크는 대부분이 일반수조와 소화수조를 겸용을 쓰고 있기 때문에 충분한 내진성능을 확보해야 한다. 하지만 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서는 유체의 슬로싱을 고려하

기 위한 기준이 명확히 제시되어 있지 않다. 슬로싱이란 저장탱크 내부 유체의 출렁거림 현상을 말한다. 이때, 물탱크의 주된 하중은 유체이므로 내진설계에 있어 지진발생시 생기는 동수압을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 물탱크의 내진성능 향상을 위해 슬로싱을 고려한 효율적인 스테인리스 물탱크의 내진설계 모델을 제시하고자 한다.

1.2 연구 목적

사각형 물탱크에서 주로 채택한 구조시스템인 내부보강형 물탱크 시스템은 내부에 설치된 내부보강재로 인해 발생하는 문제점인 보강재의 부식과 주기적인 내부 청소시 불편한 점 때문에 외부보강형 물탱크의 개발이 널리 요구되었다(한원일 외, 2011). 따라서 물탱크 내부의 금속보강재를 모두 제거하고 외부의 판넬 연결부에 보강프레임을 설치하여 수압에 저항하는 외부보강방식의 물탱크 수요가 점차 증가하고 있다(박세준 외, 2012). 이렇듯, 물탱크 내진설계에 있어 현재 내부 보강보다는 외부에 더 힘을 쏟는 추세를 보이고 있다. 이러한 외부보강형 물탱크는 보강을 위해 강성이 큰 강재가 소요되기 때문에 비용이 증가하게 되는 단점이 있다. 따라서 별도의 보강을 하기보다는 지진에 효율적으로 저항할 수 있는 조립식 물탱크의 패널형상에 연구를 집중하고자 하였다. 패널 단면의 형상비를 변형하여 구조해석을 통해 유효력을 도출하여 안전

* 인천대학교 도시건축학부 학사과정

** 인천대학교 도시건축학부 교수, 교신저자 (jhpark606@inu.ac.kr)

성 검토 후, 최적의 패널을 찾고자 하였다. 패널의 형상은 정사각형 평면에 돌출부를 형성하여 만들어진 사각뿔대의 형태로서 다양한 형상비의 차이를 비교하였다. 이때 나온 결과 중 최적의 패널에서 추가적으로 두께를 변경하여 경제성을 고려하였다.

2. 스테인리스 패널형 물탱크

2.1 구성요소

패널형 물탱크는 강판을 절단, 절곡, 프레스 등의 방법으로 가공한 규격화된 패널을 용접방식으로 접합하여 제작한 사각형태의 물탱크를 의미한다. 물탱크에는 청소 등의 관리를 위해 사람의 출입을 목적으로 한 맨홀과 물이 들어가고 나오는 입수구와 급수구, 내부 통기를 위한 통기구 등으로 구성되어 있다. 물탱크의 몸체인 바닥, 벽면, 천장은 패널로 이루어져 있으며 Fig. 1과 같이 내부보강을 위해 프레임으로는 ㄱ-형강을 사용하고 그 단부를 브라켓으로 보강한다.

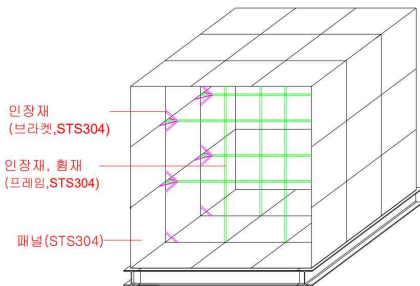


Figure 1. 물탱크 내부 상세도

2.2 패널형 물탱크의 취약부

앞의 2.1에서 언급하였듯이 물탱크의 부재들은 용접으로 접합한다. 패널의 경우, 절곡한 단부만 용접하며 내부보강재인 각형 앵글부재와 브라켓 부재의 경우, 벽체 연결부와 접 용접하는 경우가 많다. 때문에 지진시 슬로싱현상에 의한 동수압의 영향으로 용접부의 균열, 접합부 파괴가 발생하기 쉽다. 또한 실제 스테인리스 패널 조립식 물탱크의 실험대 실험을 통해 탱크 내부 보강재의 변형, 용접부의 균열 및 파괴로 인한 누수의 발생, 내부 동수압에 의해 외부 패널의 접합부가 벌어지는 파괴 현상을 확인하고, 지진파의 입력 방향에 다른 코너부의 취약성, 슬로싱에 의한 동수압과 탱크와 유체의 상호작용에 의한 면외변형(bulging) 현상에 의한 용접부의 취약성을 확인함을 보여주었다(백은림 외,

2020). 따라서 위에서 제시된 취약 부분을 고려한 물탱크의 설계가 필요하다.

3. 허용기준

3.1 용접부 강도

물탱크의 접합부는 용접 접합으로 가정하였으며 용접부는 벽면 패널 접합부에 그루브용접으로 프레임 및 브라켓 접합부에 필릿용접으로 적용하였다. 그에 대한 설계는 KDS 41 30 40에 따랐다.

3.2 패널의 휨강도

물탱크의 벽면 패널의 허용응력은 소성모멘트에 도달했을 때의 휨응력을 구한 값으로 한다. 따라서 허용기준은 소성모멘트를 탄성단면계수로 나누어서 결정한다. 그 값은 다음 식에 따라 산정할 수 있다.

$$\sigma < \phi F_y \left(\frac{Z_x}{S_x} \right) = \phi (1.5 F_y) \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 0.90이며 Z_x 는 소성모멘트이고 S_x 는 탄성계수이다. 패널의 휨응력은 일정한 폭에 대해서 직사각형 단면을 형성하기 때문에 $\frac{Z_x}{S_x}$ 는 1.5의 일정한 값을 갖게 된다. 패널의 강종은 STS 304로서 항복강도 F_y 는 KS에 규정된 205MPa를 사용하였다.

3.3 보강재의 인장강도

프레임 및 브라켓은 물탱크 내부 보강재로 물탱크의 패널들이 정수압에 의해 생기는 하중을 지지해 주고 변형을 잡아주는 역할을 한다. 이때 정수압은 내부에서 외부로 작용하는 하중이기 때문에 보강재는 인장강도에 대해서 검토를 할 필요성이 있다. 이때 설계인장강도 T_n 은 KDS 41 30 40의 기준에 따라 산정하였다.

$$\phi T_n = \phi A_n F_u \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 0.85이며 A_n 은 인장재의 순단면적, F_u 는 인장강도이다.

3.4 보강재의 휨강도

프레임의 경우 물탱크의 변형과 내부 유체의 거동으로 인한 휨에 대한 영향이 크기 때문에 휨강도에 대해 검토를 실시하였다. Γ 형강의 휨강도는 건축구조기준 KDS에서 별도의 기준이 없기 때문에 건축구조기준 KBC 2016을 참고하여 기준을 검토하였다. 물탱크에 사용된 프레임은 횡지지없이 설치된 단일 Γ 형강으로 단면의 주축을 기준으로 한 단면계수를 이용하여 설계하며 공칭휨강도 M_n 은 항복강도, 횡좌굴강도, 국부좌굴강도의 한계상태 중 최솟값으로 한다. 이때 국부좌굴강도는 콤팩트단면인 경우 국부좌굴강도를 고려하지 않아도 되며 본 연구에서 사용된 프레임의 경우 KBC 2016에 따라 조밀(compact)단면이므로 고려하지 않았다.

(1) 항복강도

$$M_n = 1.5M_y \quad (3)$$

(2) 횡좌굴강도

$$M_n = (1.92 - 1.17\sqrt{\frac{M_y}{M_c}})M_y \leq 1.5M_y \quad (4)$$

4. 설계하중

4.1 하중조합

하중조합은 건축구조기준(KDS 41 00 00)을 참고하였으며, 그 중 건축물의 설계하중(KDS 41 12 00)에 규정된 한계상태설계법 하중조합을 적용하였다.

$$1.4(D+F) \quad (5)$$

$$1.2(D+F)+1.6L \quad (6)$$

$$1.2D+1.0L \quad (7)$$

$$1.2(D+F)+1.0E+1.0L \quad (8)$$

$$0.9(D+F)+1.0E \quad (9)$$

여기서 D는 고정하중이며, F는 정수압이고, L은 활하중, E는 지진하중이다. 식(8) 및 식(9)에 포함된 유체하중 F는 KDS 41 12 00에 기재된 하중조합에서 정수압을 반영하기 위해 추가되었다. 여기서 F의 하중계수는 ASCE/SEI 7-22에서 지진하중을 포함하는 하중조합의 경우에 유체하중은 D와 동일한 하중계수로 조합하도록 규정하고 있음을 참고하였다.

4.2 지진하중

지진하중은 지진이 발생 시 중량을 가지는 모든 물체가 가지는 가속력에 의해 생기는 것이다. 이를 고려하여 벽체와 물탱크에 담긴 유체를 나누어 하중을 계산하였다. 하지만 슬로싱이라는 개념을 추가로 다루고 있기 때문에 유체 파트에서는 벽체와 함께 거동하는 충격성분(Impulsive) 지진하중과 슬로싱이 일어나는대류성분(Convective) 지진하중으로 나뉜다. 지진하중 관련 식들은 ACI Committee 350 (2006)와 IITK-GSDMA GUIDELINES for EISMIC DESIGN OF LIQUID STORAGE TANKS를 참고하여 활용하였다. 그리고 건축물내진설계기준(KDS 41 17 00)을 참고하여 지진구역계수인 Z와 위험도 계수인 I의 값을 산정하였다. 이때 I는 2,400년 재현주기에 해당하는 2.0을 사용하였고 Z는 0.11로 적용하였다.

다음 식 (10)은 높이 y 에서 벽면에 작용하는 단위 높이 당 지진하중 P_y 값을 구하는 식이다.

$$P_y = \sqrt{(P_{iy} + P_{wy})^2 + P_{cy}^2 + (p_{vy}B)^2} \quad (10)$$

여기서 P_{iy} 는 동수압 중 충격성분 지진하중이며, P_{wy} 는 벽체의 지진하중이고, P_{cy} 는 동수압중 대류성분 지진하중, P_{vy} 는 지반가속도의 수직성분으로 인한 추가 동수압을 나타낸다.

이때 P_{cy} 는 다음과 같은 식 (11)로 구할 수 있다.

$$P_{cy} = \frac{\frac{P_c}{2} \left[4H_L - 6h_c - (6H_L - 12h_c) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2} \quad (11)$$

여기서 P_c 는 대류성분 지진하중의 밀면전단력, H_L 은 유체의 수심, h_c 는 물탱크 바닥면에서부터 유체의 무게중심까지의 높이이다.

바닥면에 가해지는 수직방향 동수압은 다음 식 (12)로 산정할 수 있다.

$$p_{ib} = Q_{ib}(x)(A_h)\gamma_l g H_L \quad (12)$$

여기서 x 는 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 물탱크를 지진력 방향과 평행하게 잘랐을 때 생기는 단면 바닥의 중심부부터의 수평 거리이다. Q_{ib} 는 바닥면에 대한 동수압의 계수이며, A_h 는 수평 설계 진도이고, γ_l 은 유체의 밀도, g 는 중력 가속도이다.

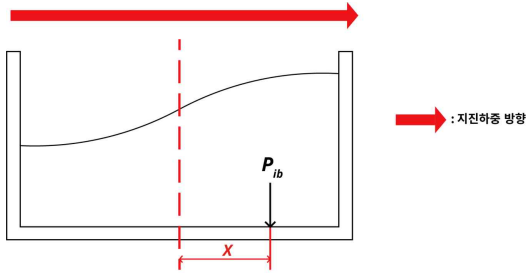


Figure 2. 수직방향 동수압

5. 기본 해석모델

5.1 기본모델

가장 보편적인 보강 방법으로는 패널에 요철을 주는 것이며 요철은 패널의 단면2차모멘트를 크게 함으로써 패널의 휨응력을 감소시키는 역할을 한다. 따라서 패널에 대한 별도의 특별한 보강이 없는 경우 대부분의 패널형 스테인리스 물탱크에서는 요철이 적용되어 있다. 하지만 본 연구에서는 패널 요철의 영향을 확인해 보기 위해 먼저 요철이 없는 평평한 패널을 적용한 물탱크의 구조해석을 진행하였다.

평판의 패널을 가진 기본 물탱크의 크기는 3m(L)×3m(B)×3m(H)로, 재질은 내식성과 위생이 우수해 많이 쓰이고 있는 STS 304로 하였다. 설계수위는 총 높이의 80%인 2.4m로 하였다. 물탱크 패널의 크기는 1m×1m이며 패널의 두께의 경우 단체표준에 따라 물탱크의 높이가 3m일 경우 패널의 최소 두께는 2.5mm이지만 단체표준에서는 지진하중을 고려하지 않았으며 패널을 평면으로 설정하여 구조적으로 불리한 점을 고려하여 3mm로 설정하였다. 패널형 물탱크는 패널을 절곡하여 패널끼리 용접 방식으로 접합하는데, 이때 생기는 절곡부를 리브로 지칭한다. 수압에 의한 물탱크 벽면의 변형 감소를 위한 프레임은 ㄱ-30×30×3 (STS 304)으로 설정하였으며, 프레임과 패널의 접합을 위한 보조철물인 브라켓은 F.B 30W×330L×3mm (STS 304)로 하였다. 수조 고정 방법은 정착용 받침인 H형강에 고장력볼트로 고정하였다. 위의 내용을 토대로 하여 만든 물탱크의 형태는 Fig. 3 및 4와 같다.

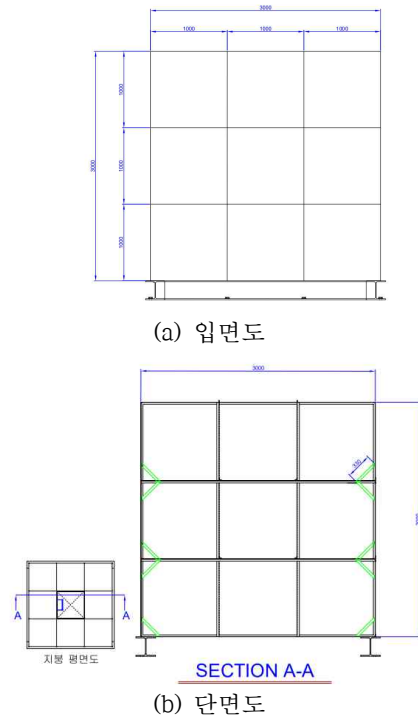


Figure 3. 물탱크 도면

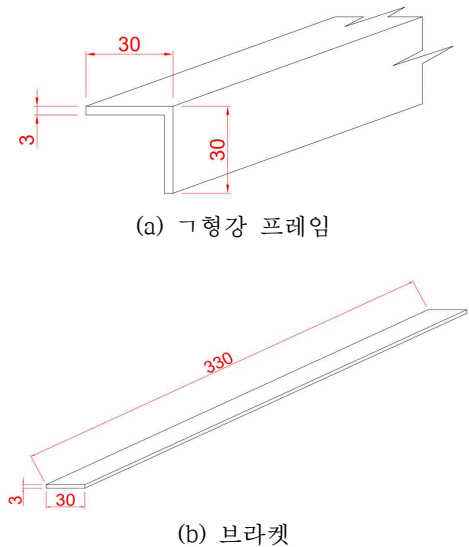


Figure 4. 물탱크의 기타 부재 도면

5.2 모델링

STS304 재질의 평판의 패널을 가진 기본 물탱크를 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 모델링하였다(MIDAS, 2010). 패널과 패널의 접합을 위한 리브 중 세로 리브는 패널 두께의 2배인 직사각형으로, 가로 리브는 위, 아래 패널 두께의 합인 직사각형 단면으로 가정하였다. 물탱크의 모서리부에서 생성되는 리브는 45°로 배치하였다. Fig. 5는 MIDAS에 이를 구현한 모습이다.

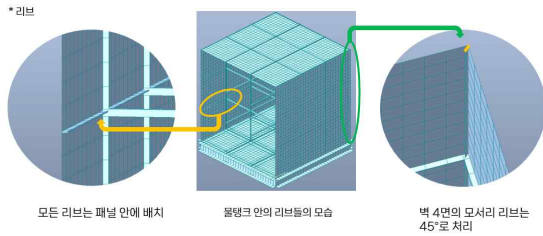


Figure 5. 물탱크의 리브 배치

프레임의 경우 Fig. 6과 같이 세로 4개와 가로 8개의 프레임이 배치가 되었으며 브라켓은 Fig. 7과 같이 각 프레임과 벽면부 모서리에 배치가 되었다.

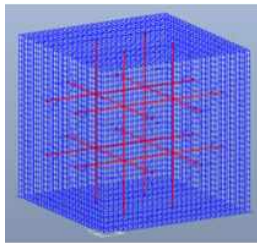


Figure 6. 물탱크의 프레임 배치

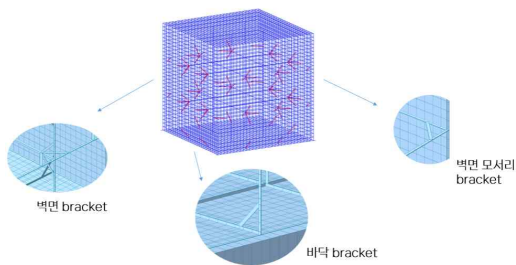


Figure 7. 물탱크의 브라켓 배치

물탱크의 지점은 Fig. 8과 같이 구현하였다. 고정력 볼트로 정착용 받침과 연결된 부분은 Fig. 8에서 원으로 표기된 부분이며 편지지로 설정하였고, 나머지 절점은 수직자유도만 구속하였다.

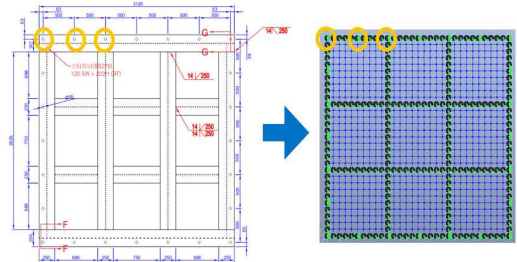


Figure 8. 물탱크 모델의 지지조건

물탱크에 작용하는 하중은 다음과 같이 진행하였다. 고정하중은 self weight 기능을 활용하여 물탱크의 자중을 구현하였다. 활하중은 물탱크의 지붕에만 작용하는 것으로 고려해 지붕 활하중의 크기인 1.0kN/m²을 등분포하중으로 분포하였다. 유체하중의 수평압력은 크기 23.5kN/m²를 높이에 반비례한 삼각형 분포의 형태를 가지며 물탱크의 안쪽에서 바깥 방향으로 적용하도록 하였고, 수직압력은 같은 크기를 바닥에 중력 방향인 등분포하중으로 하였다. 벽체 지진하중은 물탱크의 4개의 면 중 2개의 면을 택하여 한 방향으로 하중이 작용하도록 하였다. 물탱크의 활하중, 정수압 및 지진하중 분포는 각각 Fig. 9, 10 및 11와 같다.

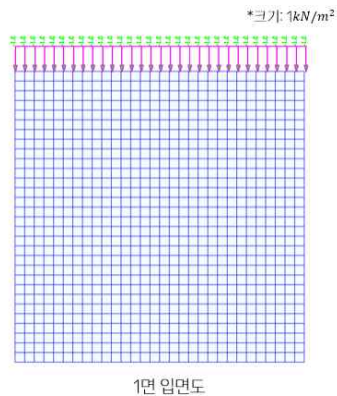


Figure 9. 지붕 활하중 분포

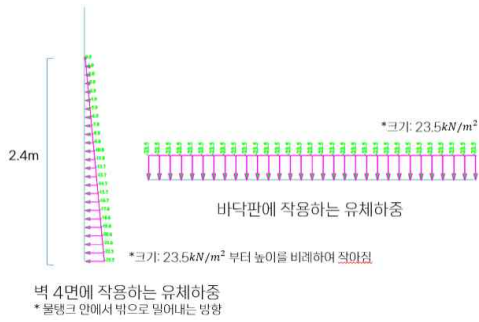


Figure 10. 벽면의 유체하중 분포

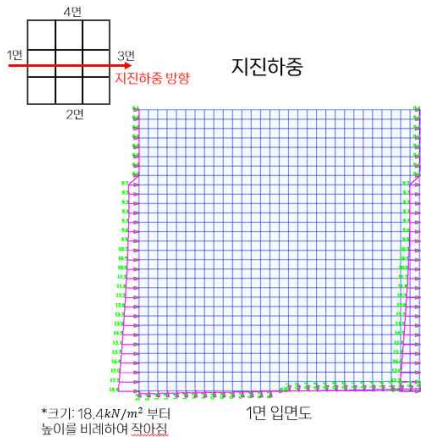


Figure 11. 벽면의 지진하중 분포

5.3 구조해석 및 검토

구조해석 시 하중조합은 주요 부재에 대해서 검토한 결과 나머지 하중조합 대비 식 (9)이 비중이 큰 유체하중 F와 지진하중 E가 포함되고 그 계수가 가장 높아 제일 불리한 하중조합으로 판단하여 이를 위주로 검토하였다. 용접부의 경우 벽면과 프레임, 브라켓으로 나뉜다. 프레임과 브라켓은 작용하는 하중의 영향이 미미하기 때문에 물탱크 변형으로 인해 생기는 부재의 부재력을 MIDAS로 측정하여 검토를 실시하였다. 벽면 용접부는 패널의 모든 접합 면을 용접하였으므로 패널 한 개에 작용하는 사용하중을 산정하여 구조해석을 실시하였다. 패널 한 개에 작용하는 하중은 지진하중과 정수압이 있고 최대하중이 작용하는 가장 아랫단의 패널을 기준으로 하였으며 그 크기는 지진하중과 정수압의 분포하중을 비례식을 활용하여 Fig. 12와 같이 산정하였다.

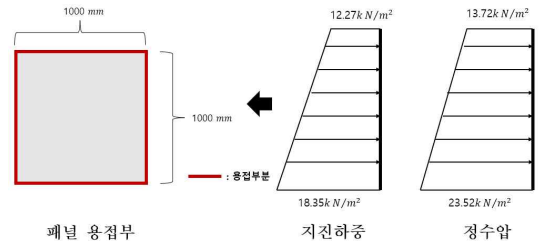


Figure 12. 용접부의 하중

인장재와 휨재는 MIDAS를 통해 각 부재에 작용하는 인장력과 휨모멘트를 확인하여 구조해석을 진행하였다. 이때 인장력과 휨모멘트는 아래 Fig. 13 및 14와 같이 분포하였다. 지진하중과 유체하중이 중첩되는 3면의 벽체와 바닥을 연결하는 브라켓에서 가장 큰 인장력이 작용했다. 가로 프레임 중 최하단에 설치되어있고 지진하중과 유체하중이 중첩되는 3면 방향에서 가장 큰 휨모멘트가 발생하였다.

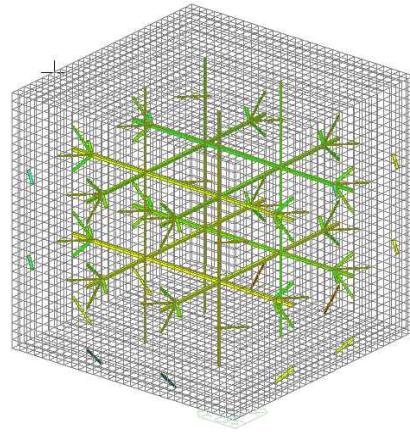


Fig 13. 프레임 및 브라켓 인장력 분포

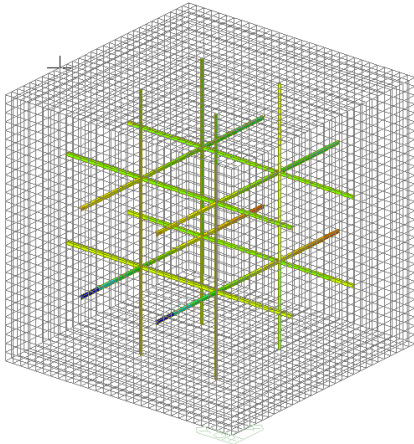


Fig 14. 프레임 휨모멘트 분포

Table 1은 3장의 허용 기준을 통해 구한 설계 강도로 구조해석을 통해 구한 소요강도를 나누어 내력비를 구한 값을 정리한 것으로 인장재와 휨재, 용접부 모두 내력비가 1보다 작아 기본 물탱크에서 안전함을 확인할 수 있었다.

Table 1. 각 부재의 내력비

명칭	설계강도	소요강도	내력비 (소요강도 / 설계강도)
인장재 (프레임)	29.8kN	12.7kN	0.43
인장재 (브라켓)	15.7kN	10.2kN	0.65
휨재 (프레임)	0.144 kN·m	0.0767 kN·m	0.53
벽면 용접부	1476kN	33.9kN	0.02
프레임 용접부	122kN	25kN	0.21
브라켓 용접부	51.5kN	20.5kN	0.40

물탱크 모델링에서 1m×1m 크기의 패널 1개를 100mm×100mm의 요소들로 나누어 구현하였다. MIDAS는 탄성해석을 기반으로 하였기 때문에 물탱크의 실제 응력 흐름과 차이가 있을 수 있다. 따라서 구조해석 결과로 산출된 응력이 아닌 패널에서 가장 응력이 많이 생기는 위험단면을 지정해 Fig. 15와 같이 단면당 유효응력을 산출하고 이를 평균화하는 과정을 거쳐 패널의 허용휨응력과 비교분석했다. 지진하중과 유체하중이 중첩되어 가장 큰 응력을 가지는 3면의 응력 분포도를 살펴보았을 때 Fig. 16과 같이 각 패널의 중심보다 가장자리에 더 큰 응력이 발생하는

것을 볼 수 있었다. 이에 따라서 Fig. 17과 같이 각 패널의 가장자리를 따라 시계방향으로 위험단면을 설정하였다.

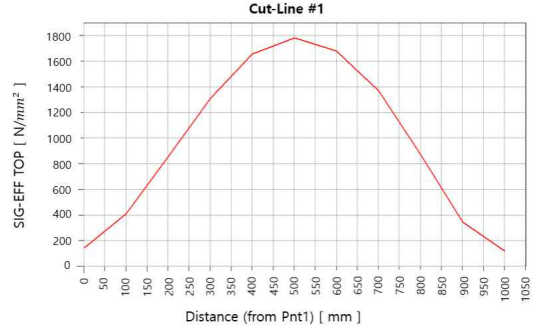


Figure 15. 위험단면 1번의 유효응력분포

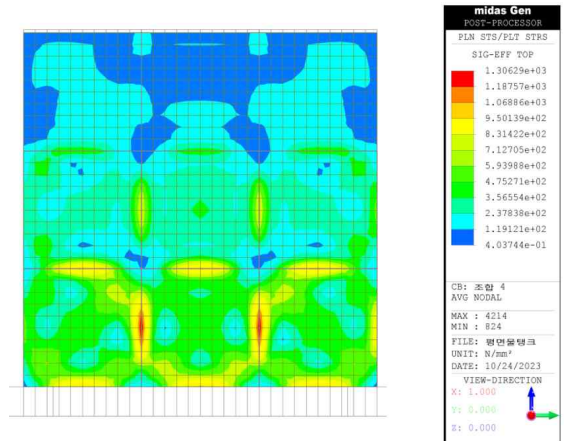


Figure 16. 기본 물탱크 응력 분포도

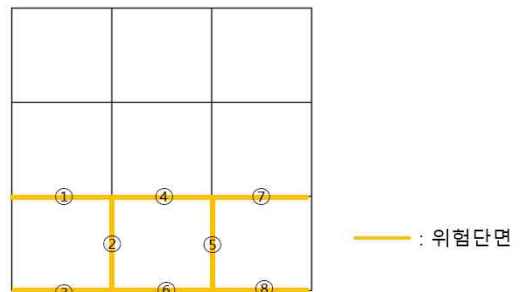


Figure 17. 기본 물탱크 위험단면

Table 2. 기본 물탱크 응력 평균화

위험 단면	TOP (MPa)	BOTTOM (MPa)
1	574	536
2	721	720
3	595	564
4	530	487
5	719	719
6	610	559
7	570	573
8	590	559

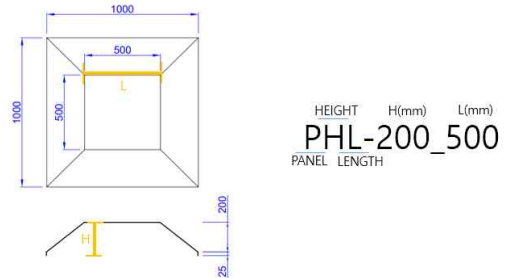


Figure 18. 패널 명칭 예시

Table 2는 Fig. 16에서 정한 위험단면의 응력을 평균화한 값을 정리한 표이다. TOP은 판요소의 요소좌표계 z축 방향의 상단면을 의미하고, BOTTOM은 하단면을 의미한다. 구조해석 결과 최대휨응력은 721MPa으로 내력비가 2.6으로 나왔다. 또한 최대휨응력뿐만 아니라 모든 위험단면이 패널의 허용기준 277MPa을 초과하였다.

6. 대안 모델

6.1 패널 설계

평면 패널의 물탱크를 검토한 결과 용접부와 인장재, 휨재에 대해서는 안전성이 확인되었지만 벽면의 휨응력에 대한 값이 허용기준을 초과하는 것을 확인하였다. 따라서 패널에 대한 보강이 필요하며 패널의 요철은 특별한 보강을 따로 진행하지 않은 경우 불가피한 사항이라고 보여진다. 이에 본 연구에서는 패널 요철의 형상 비에 따라 휨응력에 어떠한 영향이 있는가에 대해 확인하기 위해 요철의 깊이(H)와 너비(L)를 다르게 한 5가지 유형을 선정하여 비교분석하였다. 5가지 모델은 편의상 Fig. 18과 같이 임의의 명칭을 정하였고 Fig. 19에서 보여주는 바와 같이 패널의 형태는 패널 제작의 용이성에 대한 고려와 요철의 깊이와 너비를 명확하게 정의하기 위해 깊이와 너비를 직관적으로 확인할 수 있는 사각뿔대의 형태로 선정하였다. 패널의 두께의 경우 기본 모델에서 언급한 바와 같이 구조적 안정성을 위해 3mm로 하였다.

명칭	패널 정면도 및 단면도
PHL-200_500	
PHL-100_500	

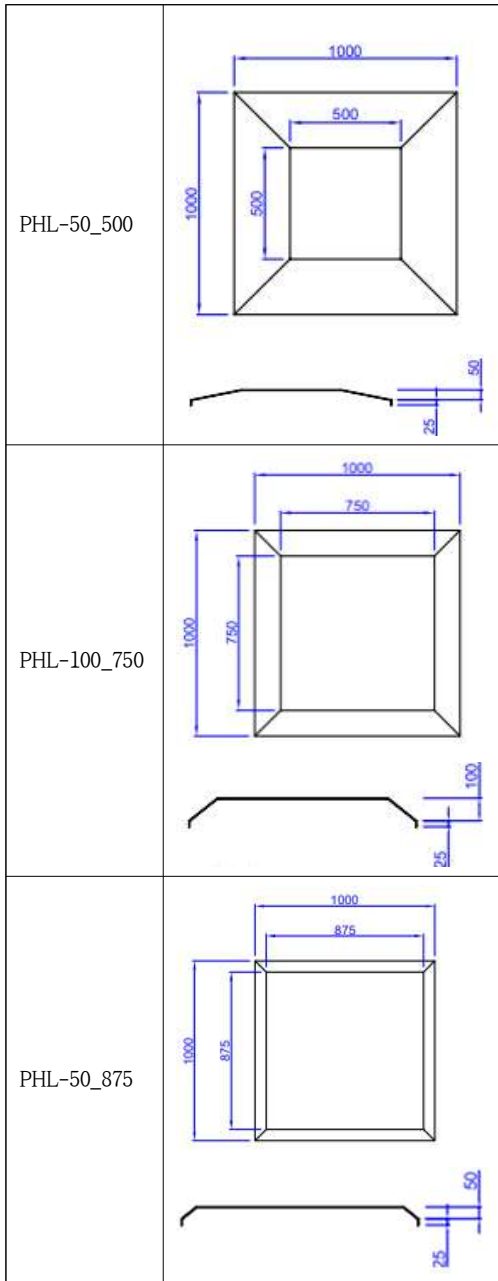


Figure 19. 대안 패널 도면

여기서 패널은 PHL-200_500을 기준으로 요철의 높이(H)와 요철의 폭(L)의 비를 다르게 하였다. PHL-200_500은 안전성에 여유를 두기 위해 위험단면의 응력 평균화를 하기 전에, 요소에 적용되는 응력의 최대값을 기준으로 했을 때 허용값을 만족하는 최소 높이로 결정하였다. 요철의

높이는 강재의 소요량과 용이한 시공을 위해 PHL-200_500 보다 줄이는 방향으로 하였다. PHL-100_500과 PHL-50_500은 PHL-200_500에서 높이에 대한 변화만 주어 높이에 대한 비교를 수행하였고 PHL-100_750과 PHL-50_875에서는 단면의 기울기는 유지하면서 높이를 줄여 요철의 높이와 폭에 대한 비교를 수행하였다.

6.2 모델링

Fig. 20은 앞서 선정된 5가지 패널로 물탱크 모델링을 수행한 그림이다. 각 패널들은 벽면에 적용을 하였으며 바닥판은 기초패드와 맞닿는 부분이기 때문에 요철을 물탱크 내부 방향으로 요철을 주었다. 또한 바닥판의 경우 기초패드로 지지되고 있어 상대적으로 안정적이기 때문에 5개의 모델 전부 PHL-100_500으로 통일하여 요철의 형상 비에 대한 영향분석은 벽면에서 중점적으로 확인할 수 있도록 모델링하였다. 물탱크 천장의 경우 하중이 거의 들어가지 않기 때문에 요철을 주지 않고 평면 패널로 모델링을 수행하였다.

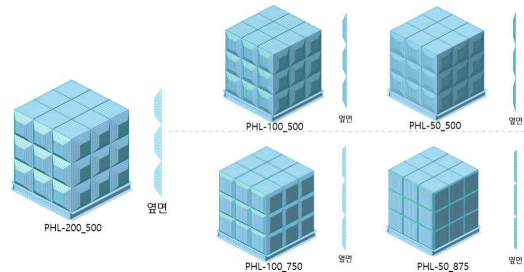


Figure 20. 대안 패널 물탱크

6.3 구조해석

패널 형상비에 따른 모델들은 패널을 제외하 나머지 용접부와 힌재, 인장재는 기본 물탱크와 똑같은 조건이며 그 안전성은 5장에서 확인을 하였기 때문에 본 내용에서는 검토를 생략하고 패널의 휨응력에 대해 중점적으로 검토를 실시하였다. 구조해석은 기본 물탱크와 같은 방식으로 응력이 집중되는 단면을 확인하여 위험단면을 지정하였다. 그리고 응력을 평균화해서 검토를 실시하였으며 위험단면은 Fig. 21과 같다. 패널의 휨응력은 Table 3과 같이 지진하중과 정수압이 최대로 작용하는 벽면의 가장 아랫단에서 최대 응력이 발생하였다. 응력을 확인한 결과 PHL-100_750과 PHL-50_875에서 허용응력을 넘었고 나머지 모델에서는 허용응력을 만족하는

결과가 나왔다. 응력은 요철의 높이나 너비가 증가할수록 단면2차모멘트도 증가하여 패널의 휨응력이 점차 감소할 것으로 예상하였으나 응력검토 결과 휨응력은 요철의 높이에 반비례했지만 요철의 너비에 대해서는 비례하는 결과가 확인되었다.

Table 3. 대안 패널의 휨응력

모델명	응력 (MPa)	허용응력 (MPa)	내력비 ($\frac{\text{소요강도}}{\text{설계강도}}$)	평가
PHL-200_500	165	277	0.59	O.K
PHL-100_500	209		0.76	O.K
PHL-100_750	357		1.29	N.G
PHL-50_500	211		0.76	O.K
PHL-50_875	487		1.76	N.G

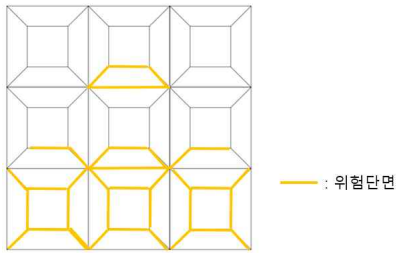


Figure 21. 대안 모델 위험단면

6.4 패널 두께 변경

앞선 6.3의 패널의 휨응력에 대한 해석 결과 패널의 요철은 높이(H)를 높이고 너비(L)는 늘리지 않는 것이 패널의 휨응력을 줄이는 데 효과적인 것을 확인하였다. 따라서 모델은 구조적으로 안전하며 기준 모델인 PHL-200_500에서 높이를 줄인 PHL-100_500과 PHL-50_500을 대안 모델로 선정하였고 물탱크의 사용성과 경제성을 고려하여 패널의 두께를 줄이는 방향으로 대안 모델을 설계하였다. 두께 변경은 물탱크의 응력분포를 확인하였을 때 패널의 단수가 높아질수록 응력은 작아지므로 패널의 단수별로 두께를 변경하였으며 Fig. 22는 층별 두께변경에 대한 예시이다.

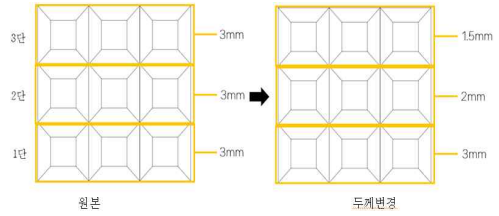


Figure 22. 패널의 층별 두께변경 예시

Table 4. 최종 모델 휨응력

패널 모델명		
PHL-100_500		
패널의 두께 변경안		
1단	2.5mm	
2단	2.0mm	
3단	1.5mm	
소요응력	허용응력	평가
273MPa	277MPa	O.K

Table 4는 패널의 두께 변경을 한 최종 모델의 응력을 확인한 표이며 두께 변경 결과 PHL-50_500은 두께를 높이별로 0.5mm씩만 줄여도 응력값이 허용치를 넘어 부적합 하였다. 반면 PHL-100_500은 1단에서 2.5mm, 2단에서 2.0mm, 3단에서 1.5mm까지 두께를 줄일 수 있었으며 응력은 273MPa로 허용기준을 만족하였다.

패널의 두께가 증가하고 패널의 개수가 많아지면 이 연구의 물탱크보다 더 큰 크기의 물탱크에 적용할 수 있으며 또한 요철의 높이를 줄이는 것도 가능할 것으로 보인다. 이 부분에 대한 후 연구가 필요하다.

7. 결론

본 연구에서는 STS 304를 사용한 패널형 스테인리스 물탱크의 내진설계에 효율적인 패널 형상을 도출하였다. 이를 위해 슬로싱을 고려한 지진하중을 적용하여 패널 요철의 형상 비에 따라 응력 값이 어떠한 변화를 나타내는지 확인하기 위해 서로 다른 패널 형상비를 갖는 5가지 모델을 비교분석 하였다. 모델은 기준이 되는 모델에서 요철의 깊이가 다른 2가지 모델과 요철의 깊이와 너비가 다른 2가지 모델로 구성하였다. 최종적으로 위 결과들을 통해 물탱크의 경제성과 사용성을 고려하여 가장 적절한 패널을 선정하고 패널의 두께를 높이 별로 차등화하여 이상적인 대안 모델을 제안하였다. 위 과정들을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 기본 물탱크(평면 패널)의 응력 값을 확인한 결과 패널의 휨응력이 721MPa로 매우 높은 값이 나와 내력비 2.6으로 허용기준인 277MPa를

초과하는 것으로 확인했다. 이로써 패널에 대한 특별한 보강이 없을 경우 패널의 요철을 주어 휨응력을 저감하는 것이 필수적임을 알 수 있다.

(2) 5가지의 모델의 패널 요철의 깊이와 너비에 대한 비교한 결과 요철의 깊이만을 바꾼 PHL-100_500과 PHL-50_500은 허용기준을 만족하였지만 요철의 깊이와 너비를 모두 바꾼 PHL-100_750과 PHL-50_875는 허용기준을 만족하지 못하였다. 이 결과는 요철의 높이를 높일수록 패널의 응력을 감소시킬 수 있지만 너비를 증가시키는 것은 응력에 불리한 조건임을 보여 준다.

(3) PHL-100_500과 PHL-50_500에서 가장 안전 측의 응력 값이 나왔으며 PHL-100_500을 1단에서 2.5mm, 2단에서 2.0mm, 3단에서 1.5mm의 두께로 저감하는 것이 허용기준을 만족하는 가장 효율적인 설계안으로 확인되었다.

REFERENCES

- 대한건축학회, 2016 건축구조기준 및 해설, 대한건축학회, 2016
- 박세준, 허원호, 원성환, 안병건, 김상효. (2012). 진동대실험을 통한 외부보강형 판넬조립식 물탱크의 내진성능평가 . 2012년도 가을 학술발표회 논문집, v.16(n.2), 308-311.
- 백은람, 최형석, 오상훈. (2020). 스테인리스 물탱크의 내진성능 향상을 위한 기술개발 현황 및 사례. 한국강구조학회지, 30-33.
- 한원일, 황규호, 신주영, 김상효. (2016). 외부보강형 물탱크용 프레임과 물탱크 패널의 합성 거동에 관한 연구 . 2016년도 가을 학술발표회 논문집, v.20(n.2), 36-37.
- ACI Committee 350, “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary (350-06),” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2006.
- ASCE/SEI 7-22, “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures” , ASCE, 2021.
- KDS 41 12 00, “Building Design Load” , Korea Construction Standards Center. 2022.
- KDS 41 17 00, “Seismic Design Standards for Buildings” , Korea Construction Standards Center. 2019.
- KDS 41 30 40, “Design Criteria for Cold-Formed Stainless Steel” , Korea Construction Standards Center. 2022.
- MIDAS Information Technology. MIDAS Gen Analysis and design. Seoul: c2010

