

ESS 물탱크 엠보싱 패널의 최적 절곡깊이

김민준* · 정제평**

Kim, Min June*, Jeong, Je Pyong**

Optimal Rise Depth of the ESS Water Tank using Embossed Panel

ABSTRACT

This study is on the optimal rise depth of embossed panel for the ESS water tank. The thickness of panel is reduced at pressing operation, it could be calculated by volume conservation condition. The analysis of panel using STS304 material conducted by FEM. As a result of structural analysis, it was found that the optimal rise depth of arch embossed panel is recommended to be 70~90mm and the optimal rise depth of pyramid embossed panel is recommended to be 150~200mm. The proposed value of optimal rise depth could be a useful to the economic design of ESS water tank panel.

Key words : ESS, Stainless water tank, Embossed panel, Arch structure, Volume conservation condition

초 록

본 연구는 ESS 물탱크 패널의 최적 절곡깊이 산정에 관한 연구이다. 스테인레스 패널에 프레스 작업을 하게 되면 엠보싱부분의 패널 두께가 감소되며, 감소된 패널 두께는 체적보존의 가정을 이용하여 계산하였다. 해석을 위해 STS304 재료를 사용하였으며, 유한요소해석을 통해 결과를 산출하였다. 유한요소해석결과 아치엠보싱 패널의 최적 절곡깊이는 70~90mm로 평가 되었으며, 피라미드 엠보싱패널은 150~200mm로 평가 되었다. 최적절곡깊이의 제안 값은 ESS 물탱크 패널의 경제적 설계에 효과적일 것으로 판단된다.

검색어 : 에너지 저장 시스템, 스테인레스 물탱크, 엠보싱패널, 아치구조, 체적 보존 가정

1. 서론

최근 세계적으로 ESS 시장은 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 초기 시장형성 단계에 있다. 여기서 ESS (Energy Storage System)는 친환경적으로 생산된 전기를 축열 형태의 에너지로 저장한 후 필요한 시점에 에너지를 효율적으로 사용하는 것을 말한다(Ma, 2012). 국내에서는 풍력발전기를 이용한 ESS연구가 제주도에서 조성된 풍력발전단지에서 이용되고 있다(Kang et al., 2012).

Fig. 1의 ESS 물탱크는 불규칙적으로 생산된 친환경 에너지를 가뭄과 전력난에 대비해 축열 에너지 형태로 저장하여 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 물탱크 제작을 위한 재료는 FRP (Fiber Reinforced Plastics), PDF (Polyethylene Double Frame), STS (Stainless Steel)등이 사용되고 있다. 청결유지 및 위생관리에 우수한 스테인레스(STS)는 FRP 재료의 6배, 연강재의 1.5배의 강도를 발휘하며 스테인레스 자체의 내식성으로 녹 발생이 억제되는 장점이 있어 대용량 물탱크에 많이 사용되고 있다(Kim et al., 2011).

Fig. 2는 일반강관과 스테인레스강관의 물가변동곡선이다. 일반강관의 가격은 톤당 평균 115만원이며, STS304 패널의 가격은 톤당 평균 376만원이다. 이는 일반강관 가격보다 약 3.3배 이상 가격차이를 보이는 고가의 재료임을 알 수 있다. 이처럼 가격이 고가인

* 정희원 · 호남대학교 토목환경공학과 석사과정 (Honam University · valueeng@hanmail.net)

** 종신회원 · 교신저자 · 호남대학교 토목환경공학과 조교수 (Corresponding Author · Honam University · safecon@honam.ac.kr)

Received June 12, 2015/ revised September 16, 2015/ accepted January 1, 2016



Fig. 1. STS Tanks with Embossed Panels

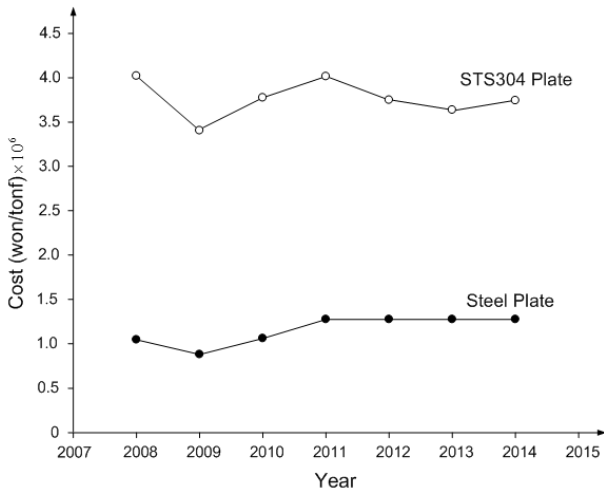


Fig. 2. Material Cost of Steel Plate

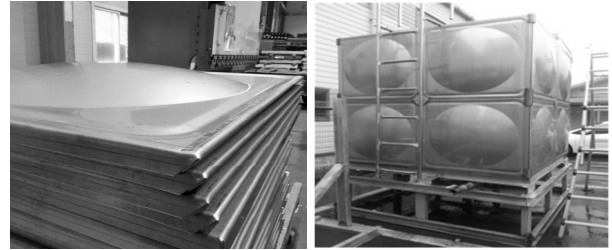
재료비를 줄이기 위해 두께가 얇은 스테인레스 패널에 엠보싱을 도입하여 높은 수압에서도 저항 할 수 있는 고강도 스테인레스 패널 연구가 필요한 상황이다.

최근 연구(Joo et al., 2011)에 따르면, 수압에 지배받는 물탱크는 휨응력과 전단응력이 발생하며, 주로 휨응력에 두께가 결정된다. 이러한 이유로 Fig. 3의 스테인레스 물탱크 제작과정에서 Fig. 3(a)의 스테인레스 평면 패널을 Fig. 3(b)처럼 엠보싱 패널을 제작한다. 이와 같이 아치형상의 구조는 평판과 마찬가지로 단면에 휨모멘트, 전단력 및 축력이 일어나지만 수평 반력에 의하여 연직 하중에 의한 휨모멘트를 현저하게 감소시키기 때문에 주로 축방향 압축력에 저항하는 구조적 장점을 가지고 있다(Hibbeler, 2009). 스테인레스 패널의 프레스 작업을 하게 되면 엠보싱 패널 두께가 감소된다. 그러나 물탱크 제작시 평면 패널을 엠보싱패널로 재성형 과정에서 절곡깊이를 고려한 연구가 미비한 상황이다. 본 연구에서는 체적보존 가정을 이용해 두께변화식을 정식화 하였고, 유한요소 해석을 이용해 엠보싱 절곡깊이 변화에 따른 처짐분석을 통해 최적 절곡깊이를 제안하였다.



(a) STS304 Flat Panel

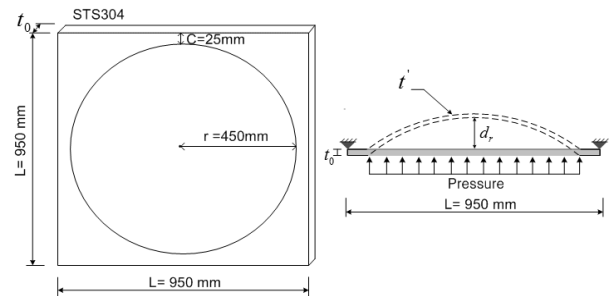
(b) Embossed Panel



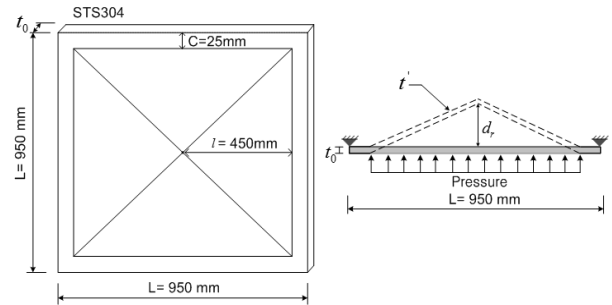
(c) Edge Bending Work

(d) STS Water Tank Structure

Fig. 3. STS Stainless Steel Water Tank Production Process



(a) Arch Embossed Panel



(b) Pyramid Embossed Panel

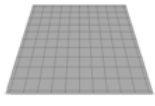
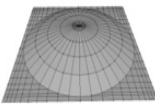
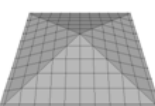
Fig. 4. Analysis Condition

2. 해석방법

2.1 패널 제원

본 연구에서 사용된 패널은 Table 1과 같이 STS 304 강재의 제원을 사용하였다(Kore Institute of Steel Construction, 2007). 패널의 형태는 평면, 아치, 피라미드로 구분하였고, 두께는 4가지로

Table 1. Material Property of STS Panel

| Shape | Name | Spec | t_0 (mm) | f_y (MPa) | f_u (MPa) | E (MPa) |
|--|------|--------|------------|-------------|-------------|---------|
|  Flate | F1.5 | STS304 | 1.5 | 280 | 640 | 193,000 |
| | F2.0 | STS304 | 2.0 | 280 | 640 | 193,000 |
| | F2.5 | STS304 | 2.5 | 280 | 640 | 193,000 |
| | F3.0 | STS304 | 3.0 | 280 | 640 | 193,000 |
|  Arch | A1.5 | STS304 | 1.5 | 280 | 640 | 193,000 |
| | A2.0 | STS304 | 2.0 | 280 | 640 | 193,000 |
| | A2.5 | STS304 | 2.5 | 280 | 640 | 193,000 |
| | A3.0 | STS304 | 3.0 | 280 | 640 | 193,000 |
|  Pyramid | P1.5 | STS304 | 1.5 | 280 | 640 | 193,000 |
| | P2.0 | STS304 | 2.0 | 280 | 640 | 193,000 |
| | P2.5 | STS304 | 2.5 | 280 | 640 | 193,000 |
| | P3.0 | STS304 | 3.0 | 280 | 640 | 193,000 |

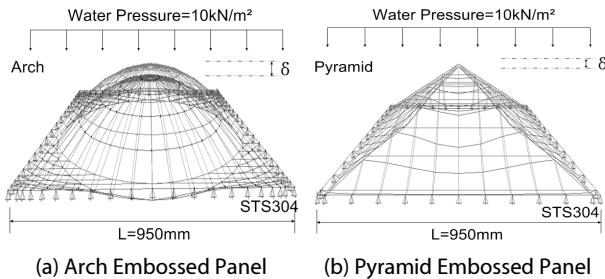


Fig. 5. Structural Analysis Modeling

전체 12가지 패널 조합으로 구성하였다.

패널은 가장 많이 사용되고 있는 1m×1m을 사용하였으며, Fig. 3(c)의 그림과 같이 4변을 한 변당 25mm 절곡시키기 때문에 구조해석에 사용된 STS304 패널은 한변이 950mm 인 정사각형이며 아치엠보싱 부분의 반지름(r)은 450mm, 피라미드엠보싱 부분의 길이(l)는 450mm를 사용하였다. 엠보싱 바깥쪽 길이(C)는 25mm, 두께(t_0)는 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm로 모든 패널에 동일한 기하 제원을 사용하였다. Fig. 4에서 프레스 작업을 거친 패널의 변화된 두께는 t' , 아치와 피라미드로 절곡된 깊이를 절곡깊이(rise depth) d_r 로 표현하였다. 패널의 경계조건은 내부에 절접부 용접으로 격자배치된 L형강을 고려해 양단힌지를 사용하였다.

2.2 구조해석 모델링

절곡된 패널은 Fig. 5와 같이 아치엠보싱패널과 피라미드엠보싱패널의 2가지 형태로 구성된다. 3차원 모델링에 사용된 패널은 등방성, 탄성, 균질재료의 조건을 이용하여, 사각형(4-Node) 쉘요소를 사용하였으며, 아치엠보싱패널의 쉘요소 개수는 424개이며, 피라미드엠보싱은 164개로 나누었다. 아치엠보싱 패널의 사각

형 요소 크기는 가로($b=11$ cm), 세로($a=7$ cm)로 최대 형상비(b/a)는 1.57이며, 피라미드 엠보싱패널은 가로($b=10$ cm), 세로($a=10$ cm)로 최대 형상비(b/a)는 1.0으로 모델링하였다(Heo et al, 2000). 하중은 엠보싱 패널 표면에 단위수압 10kN/m²을 재하하였으며, 4면의 모서리 부분에 양단힌지 경계조건을 사용하였다(Petit 2002; Clayton, 2002).

3. 정식화 과정

패널에 프레스 작업을 하게 되면 엠보싱 부분의 두께는 감소하게 된다. 이를 체적보존의 가정을 이용해 아치엠보싱과 피라미드 엠보싱패널의 두께변화식을 제안하였다.

3.1 아치 엠보싱 패널

아치 엠보싱패널의 두께는 Fig. 6에서 절곡깊이 d_r 과 패널의 평면반지름 r_0 로 구성된 절곡깊이반지름 r 을 Eq. (1)로 계산할 수 있고, 아치엠보싱 표면적은 밑면을 제외한 빗금 친 구 표면의 넓이를 구하기 위해 ϕ 는 0(z축에서 시작)에서 $\arccos(r - d_r/r)$ 의 범위와 θ (x축에서 시작)는 360°회전하므로, 0에서 2π 까지의

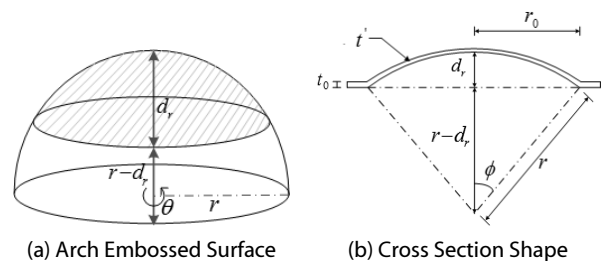


Fig. 6. Thickness of Arch Embossed Panel

표면적 S Eq. (2)를 정리하여 Eq. (3)의 식을 유도할 수 있다(Kern 1948; Lee 2006). 절곡된 패널의 밑면을 제외한 반구의 표면적 Eq. (3)과 패널두께의 곱은 평면패널과 체적보존의 가정($V_0 = V'$)으로 Eq. (4)를 이용해 두께 변화식 Eq. (5)를 새롭게 유도할 수 있다.

$$r = (r_0^2 + d_r^2) / 2d_r \quad (1)$$

$$S = \int_0^{2\pi} \int_0^{\arccos(\frac{r-d_r}{r})} r^2 \sin \phi \, d\phi \, d\theta \quad (2)$$

$$S = r^2 \left(\frac{-r + d_r}{r} + 1 \right) 2\pi \quad (3)$$

$$\pi \cdot r_0^2 \cdot t_0 = S \cdot t' \quad (4)$$

$$t' = \left(\frac{r_0^2}{r_0^2 + d_r^2} \right) t_0 \quad (5)$$

3.2 피라미드 엠보싱 패널

피라미드 엠보싱 패널은 Fig. 7과 같이 절곡깊이 d_r 과 길이 $L/2$ 로 구성된 대각선 길이 h_0 는 Eq. (6)으로 계산할 수 있고, 절곡된 피라미드패널의 밑면을 제외한 표면적 S Eq. (7)과(Kern, 1948) 패널두께의 곱은 평면패널과 체적보존의 가정($V_0 = V'$)으로 Eq. (8)을 이용해 두께 변화식 Eq. (9)를 새롭게 유도할 수 있다.

$$h_0 = \sqrt{d_r^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (6)$$

$$S = L \times \sqrt{L^2 + 4d_r^2} \quad (7)$$

$$L^2 \cdot t_0 = S \cdot t' \quad (8)$$

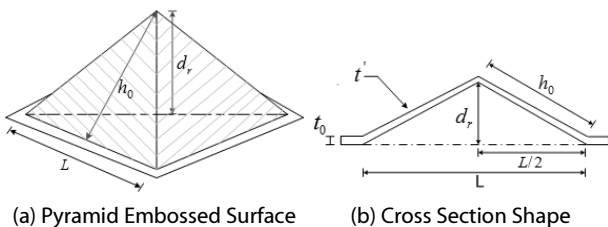


Fig. 7. Thickness of Pyramid Embossed Panel

$$t' = \frac{L}{\sqrt{L^2 + 4d_r^2}} t_0 \quad (9)$$

3.3 패널 두께 변화량

아치엠보싱과 피라미드 엠보싱패널의 두께변화식으로 평면 패널 두께와 최대로 절곡깊이가 발생했을 때 두께 변화량을 Fig. 8에 도시화 하였다.

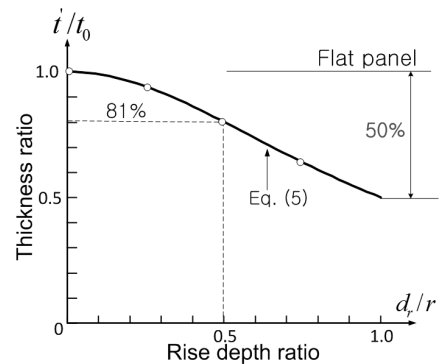
Figs. 8(a) and 8(b)는 엠보싱 형태에 따른 절곡깊이와 두께변화비를 나타낸 것이다. 해석 결과 평판패널 대비 아치엠보싱은 최대 50% 감소하였으며, 피라미드 엠보싱은 최대 30% 감소한 것을 보여주고 있다.

4. 해석결과

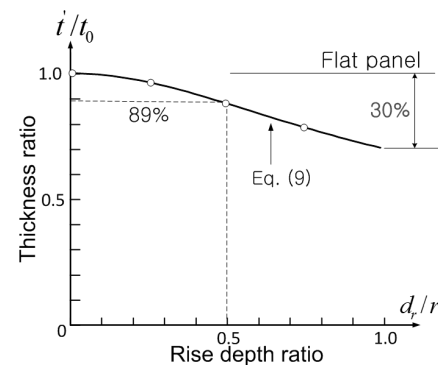
4.1 Patch Test

본 연구에서는 3차원 구조해석결과와 신뢰성을 위해 패치시험 (Patch Test)으로 오차를 확인하여 셸요소 형상을 결정하였다.

패치시험을 위해 절곡깊이는 70mm, 두께 2mm의 아치엠보싱 패널을 사용하였다. 셸요소는 사각형요소(4-Node)와 삼각형요소 (3-Node)를 사용하여 모델링 하였으며, 사각형요소 수는 200개,



(a) Arch Embossed Panel



(b) Pyramid Embossed Panel

Fig. 8. Thickness Ratio by Embossed Panel

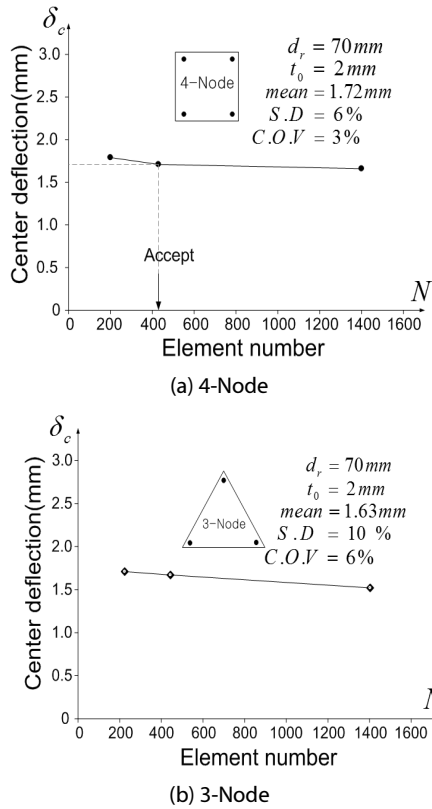


Fig. 9. Results of Patch Test

424개, 1400개, 삼각형요소 수는 224개, 444개, 1403개로 분할하여 분석하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이 사각형요소의 평균 처짐은 1.72mm, 표준편차(S.D) 6%, 변동계수(C.O.V) 3%의 오차가 발생하였다. 삼각형요소의 평균 처짐 1.63mm, 표준편차(S.D) 10%, 변동계수(C.O.V) 6%의 오차가 발생하였다. 이 같은 결과로 본 연구에서는 오차가 적게 발생한 사각형 쉘요소를 이용하여 3차원 유한요소 모델링을 사용하였다.

4.2 처짐

평면패널 4개 종류와 패널 두께 변화를 고려한 엠보싱 패널종류 8개, 전체 12개의 패널을 형태와 두께에 따라 처짐을 분석하였다.

아치엠보싱은 수압에 의해 엠보싱부분 전체가 연직방향으로 처지는 형상으로 변형하였다. Fig. 10은 아치 엠보싱 패널의 절곡깊이에 대한 중앙 점의 수직처짐의 결과다. U형 곡선분포형태의 최저점이 모든 패널에서 발생하였으며, 패널의 두께가 두꺼울수록 최적 절곡깊이는 수평방향으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 피라미드 엠보싱 패널은 삼각형면의 중앙점과 피라미드 중앙 꼭짓점에서 처짐을 검토하였다. 최대처짐은 삼각형면 중앙에서 최대 처짐이 발생하였다.

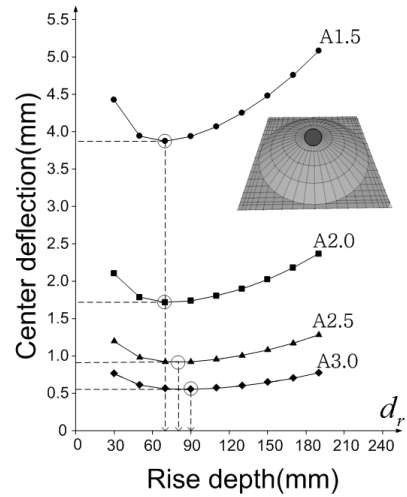


Fig. 10. Rise Depth vs. Center Deflection Graph of Arch Embossed Panel

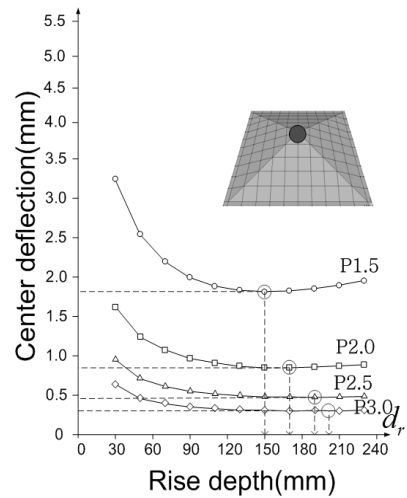


Fig. 11. Rise Depth vs. Center Deflection Graph of Pyramid Embossed Panel

Fig. 11은 피라미드 엠보싱 패널의 절곡깊이에 대한 패널의 꼭짓점의 수직 처짐의 결과다. 그래프는 경사가 완만한 U형 곡선분포형태의 최저점이 모든 패널에서 발생하였으며, 패널의 두께가 두꺼울수록 최적 절곡깊이는 수평방향으로 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 12는 피라미드 엠보싱 패널의 절곡깊이에 대한 피라미드패널 삼각형면 중앙에서 최대 수직 처짐의 결과다. 그래프는 수평방향으로 절곡깊이가 130mm까지는 증가한 후 감소하여 150mm에서 최저점을 이루고 다시 증가하는 곡선분포형태로 발생하였다. 이러한 현상은 주로 낮은 아치에서 발생하는 현상으로 150mm 이하에서 피라미드 엠보싱 패널은 스냅-스루(snap-through) 현상이 발생하여 비선형 처짐이 크게 증가한다(Jang, 1999). 스냅-스루현상을

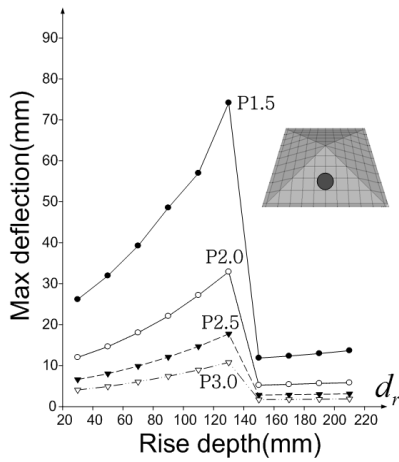
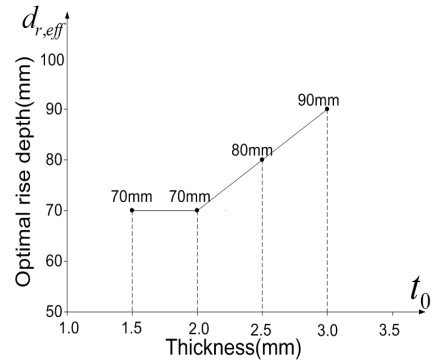


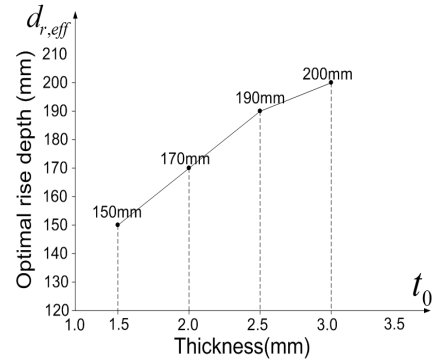
Fig. 12. Rise Depth vs. Maximum Deflection Graph of Pyramid Embossed Panel

고려해 피라미드엠보싱 패널에서는 절곡깊이를 150mm 이상 절곡 시켜야 한다.

Table 2는 12개 패널의 해석 결과를 나타낸 것이다. 절곡깊이가 없는 평면패널의 경우 두께가 증가할수록 처짐은 감소하였으며, 4개의 평면패널 중 최대 처짐은 두께 1.5mm에서 554mm로 발생하였다. 아치엠보싱패널 중앙점 처짐과 최대 처짐의 결과는 동일하게 산출되었다. 피라미드엠보싱 패널은 중앙점 처짐과 최대 처짐의 위치가 다른 곳에서 발생하였다. 중앙점 처짐은 아치엠보싱보다 약 2배 적게 발생하였지만 삼각형면의 중앙에서 발생된 최대 처짐은 약 3배 크게 발생하였다. 이와 같은 처짐 값을 이용해 아치엠보싱 패널과 피라미드 엠보싱 패널의 최적 절곡깊이 $d_{r,eff}$ 를 평가하였다.



(a) Arch Embossed Panel



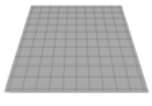
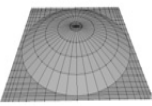
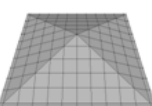
(b) Pyramid Embossed Panel

Fig. 13. Optimal Rise Depth as the Thickness

4.3 최적 절곡깊이

Fig. 13은 패널의 두께에 따른 최적절곡깊이의 결과를 나타낸 것이다. 절곡깊이와 중앙점 에서 가장 적게 발생한 처짐의 결과로 최적 절곡깊이를 산정하였다. 그 결과 아치엠보싱의 최적절곡깊이

Table 2. Analysis Results

| Shape | Name | t_0 (mm) | t' (mm) | $d_{r,eff}$ (mm) | δ (mm) | |
|--|------|---------------|--------------|---------------------|---------------|---------|
| | | | | | Center | Maximum |
|  Flate | F1.5 | 1.5 | - | 0 | 554 | 554 |
| | F2.0 | 2.0 | - | 0 | 234 | 234 |
| | F2.5 | 2.5 | - | 0 | 120 | 120 |
| | F3.0 | 3.0 | - | 0 | 69 | 69 |
|  Arch | A1.5 | 1.5 | 0.976 | 70 | 3.87 | 3.87 |
| | A2.0 | 2.0 | 1.952 | 70 | 1.71 | 1.71 |
| | A2.5 | 2.5 | 2.423 | 80 | 0.92 | 0.92 |
| | A3.0 | 3.0 | 2.883 | 90 | 0.55 | 0.55 |
|  Pyramid | P1.5 | 1.5 | 0.697 | 150 | 1.81 | 11.85 |
| | P2.0 | 2.0 | 0.797 | 170 | 0.84 | 5.397 |
| | P2.5 | 2.5 | 0.931 | 190 | 0.47 | 2.986 |
| | P3.0 | 3.0 | 1.080 | 200 | 0.38 | 1.829 |

는 70~90mm, 피라미드 엠보싱의 최적절곡깊이는 150~200mm로 판단되며, 패널 이 두꺼울수록 최적절곡깊이가 증가하는 경향을 보였다.

5. 결론

본 연구는 ESS 물탱크의 엠보싱패널 제작과정에서 최적 절곡깊이를 산정한 연구로, 스테인레스 패널을 프레스 작업을 하게 되면 엠보싱 패널의 두께가 감소되는 것을 고려해 체적보존을 가정하여 아치엠보싱 패널과 피라미드 엠보싱 패널의 두께 변화 식을 산정하였다. 유한요소 해석으로 12개종류의 패널에 따라 탄성구간에서 처짐결과 분석을 통해 최적절곡깊이를 산정하였다. 해석결과, 아치 엠보싱 패널의 최적 절곡깊이는 70~90mm로 평가되며, 피라미드 엠보싱 패널의 최적 절곡깊이는 150~200mm로 평가되었다. 본 연구에서는 탄성구간에서의 처짐 분석으로 최적 절곡높이를 산정하였다. 향후 다양한 재료의 비선형해석과 시험적 보완이 필요하다고 판단된다.

References

- Clayton, T. C., Donald, F. E. and John, A. R. (2002). *Engineering Fluid Mechanics*, Wiley, pp. 15-60.
- Hibbeler, R. C. (2009). *Structural Analysis SI*, PEARSON, pp. 61-102.
- Heo, J. M., Kim, H. K. and Kim, J. S. (2000). "The finite element analysis of shell structures using improved shell element." *Journal of the Korea Society of Computational Structure*, Vol. 13, No. 4, pp. 449-460.
- Jang, S. P., Kim, M. Y. and Kim, S. P. (1999). *Elastic Stability*, Seoul National University Press, pp. 52-120 (in Korean).
- Joo, J. W., Kim, M. K. and Kang, S. I. (2011). "Structural analysis of externally reinforced FRP water tank." *Journal of the Institute of Construction Technology*, Vol. 30, No. 1, pp. 115-123.
- Korea Institute of Steel Construction (2007). *Steel Structure Design Criteria*, Goomibook, pp. 82-150 (in Korean).
- Kern, W. F. and Bland, J. R. (1948). *Solid Mensuration with Proofs 2nd*, Wiley, New York, N.Y., pp. 50-406.
- Kang, M. S., Jin, K. M., Kim, E. H., Oh, S. B. and Lee, J. M. (2012). "A study on the determining ESS capacity for stabilizing power output of haeng-won wind farm in Jeju." *Journal of the koreansolar energy society*, Vol. 32, No. 1, pp. 25-31.
- Kim, Y. S., Park, J. G., Ahn, D. C. and Kim, Y. H. (2011). "Review of formability and forming property for stainless steel." *Transaction of Materials Processing*, Vol. 20, No. 3, pp. 193-205.
- Lee, B. K., Kim, S. K. and Lee, T. E. (2006). "Application of numerical differentiation in structural analyses of arch structures." *Journal of the Korea Society of Computational Structure*, Vol. 19, No. 4, pp. 441-447.
- Ma, S. S. (2012). "ESS supply business model and roadmap plan." *Journal of the Electrical World/Monthly Magazine*, pp. 33-43.
- Petit, N. and Rouchon, P. (2002). "Dynamics and solutions to some control problems for water- tank systems." *Tr. Automatic Control., IEEE*, Vol. 47, No. 4, pp. 594-609.