

## LNG 저장탱크 보강재의 구조해석 및 최적설계<sup>§</sup>

김성주\* · 진교국\* · 하성규\*† · 서흥석\*\* · 윤인수\*\*

\* 한양대학교 기계공학과, \*\* 한국가스공사

### Structure Analysis and Design Optimization of Stiffeners in LNG Tanks

Chengzhu Jin\*, Kyo-Kook Jin\*, Sung Kyu Ha\*†, Heung Seok Seo\*\* and Ihn Soo Yoon\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* LNG Tank Technology Center, KOGAS R&D Division

(Received March 16, 2010; Revised January 2, 2012; Accepted January 9, 2012)

**Key Words:** Stiffener(보강재), Structural Analysis(구조해석), Perlite Pressure(펄라이트압력), Analytical Solution(해석적방법), Optimization(최적화)

**초록:** 본 연구에서는 액화천연가스(LNG 즉 Liquefied Natural Gas) 저장탱크의 보강재(stiffener) 설계를 위한 주요 설계인자들의 특성을 파악하고 구조 최적설계를 수행하였다. 보강재가 결합된 LNG 저장탱크의 내조는 외부의 펄라이트(perlite)의 압력에 의해 좌굴되지 않도록 설계되는데, 기존의 보강재 설계방법에서는 펄라이트 압력이 내조 높이에 무관하게 동일하다고 가정하여, 보강재의 과도한 설계를 초래하였다. 본 연구에서는 펄라이트의 물성값에 따른 펄라이트 압력분포의 영향을 살펴보고, 최적설계를 통해 기존 설계보다 보강재의 재료비용이 15.3% 절감됨을 알 수 있었다.

**Abstract:** This paper describes the structural analysis and optimization of stiffeners used in inner tanks for liquid natural gas (LNG) storage, so that the costs can be minimized while the critical buckling load of the inner tank still exceeds the external pressure exerted by the perlite. The original calculation of perlite pressure applied to the inner tank was based on Zick's code, which led to the overestimation of the external pressure, and consequently, an oversized stiffener. In this study, the effects of the material properties of perlite on the external pressure distribution are scrutinized, and the optimum dimensions of a single stiffener are finally obtained through a series of parametric studies. A 15% decrease in the cost of the stiffener compared with the original design is achieved.

- 기호설명 -

- A : 블랑켓(blanket)의 복원력
- c : 블랑켓(blanket)의 압축률
- $E_p$  : 펄라이트의 탄성계수
- E : 내조 탱크의 탄성계수
- h : 내조 상단에 있는 여분의 펄라이트 높이
- K : 펄라이트 수평압력과 수직압력의 비
- $R_E$  : 내조와 외조의 반경차에 의한 유효반경
- $R_o$  : 탱크 외조의 반경
- $R_i$  : 탱크 내조의 반경
- t : 블랑켓(blanket)의 초기두께
- $\Delta r$  : 탱크의 총 이동량

- $\rho_0$  : 펄라이트의 밀도
- $\mu$  : 펄라이트와 내조사이의 마찰계수

### 1. 서론

한국가스공사에서는 현재 완전방호식의 LNG 저장탱크(Full containment LNG storage tank)를 운영하고 있다. 여기서, 완전방호식이란 내조(inner tank)와 외조(outer tank)가 각각 독립적으로 LNG 를 저장할 수 있는 기능을 갖는 이중구조의 탱크를 말한다.<sup>(1)</sup>

Fig. 1 에서는 완전방호식 LNG 저장탱크의 단면도를 나타내었다. 반경이 약 40m 인 내조의 경우에는 두께 10mm~30mm 의 9% 니켈강으로 제조되었고 내조 바깥쪽은 스프링성질을 갖는 블랑켓(blanket)이 감싸고 있다. 이 블랑켓은 9% 니켈강 내조의 수축과 팽창을 흡수하여 열응력이 발생하

<sup>§</sup> 이 논문은 2010년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2010. 3. 4.-5., 서울대) 발표논문임.

<sup>†</sup> Corresponding Author, [sungha@hanyang.ac.kr](mailto:sungha@hanyang.ac.kr)

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

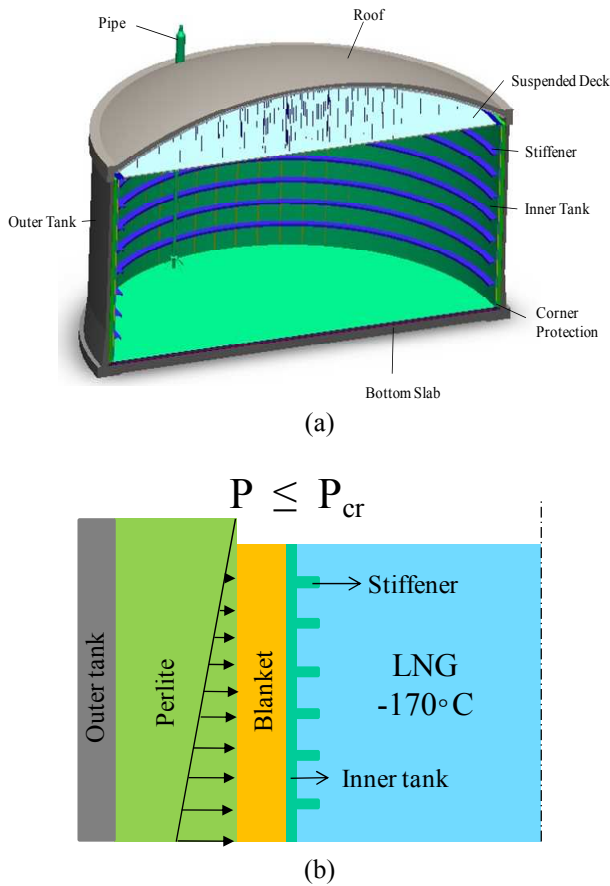


Fig. 1 (a) Whole structure of LNG tank (b) Cross section of LNG tank

지 않게 하는 역할을 한다. 따라서 내조의 설계시에는 열응력은 고려하지 않고 단지 액체의 하중을 견딜수 있도록 설계한다. 또한 블랑켓과 외조 사이의 빈 공간에 펄라이트(perlite)를 충전하여 극저온의 LNG 온도가 외조에 전달되지 않도록 한다.

펄라이트의 압력은 블랑켓을 통해 내조에 전달되는데 이로 인해 내조의 좌굴 현상을 초래하게 된다. 이러한 좌굴현상을 방지하기 위해 보강재(stiffener)가 내조의 안쪽 또는 바깥쪽에 원통을 따라서 설계하여 저장탱크가 바람, 진공, 펄라이트의 압력 또는 다른 특정 하중의 영향을 받을 때 내조의 진원도를 유지하도록 한다.

보강재의 경우, 우선 높이에 따른 펄라이트의 하중 분포를 구하고 보강재가 결합된 내조의 좌굴 임계하중(critical buckling load)이 펄라이트 하중보다 크게 설계한다. 현재 보강재의 설계에 적용되는 Zick 코드<sup>(2)</sup>는 펄라이트의 압력이 높이에 무관하게 일정하다고 가정하였다. 이는 내조의 상단에 설치되는 보강재의 과도한 설계를 초래하였다.

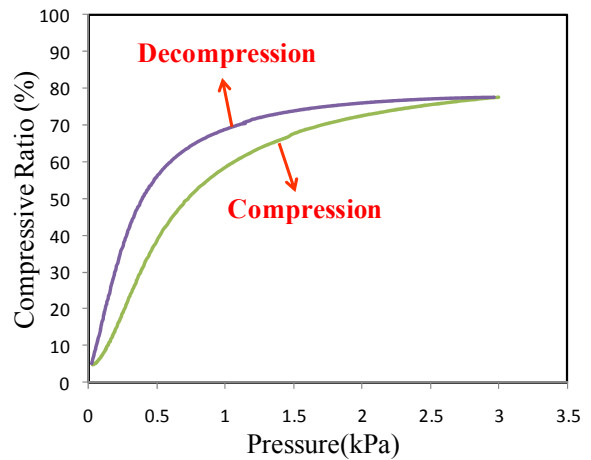


Fig. 2 Pressure versus compression ratio of the blanket

따라서 본 논문에서는 높이에 따라 변하는 펄라이트의 압력식을 구하고 펄라이트의 물성치들이 압력에 미치는 영향을 관찰하였다. 또한 높이에 따라 변하는 압력식을 사용하여 보강재의 최적설계를 수행하였으며 기존 보강재의 설계와 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 하중의 전달경로 분석

펄라이트의 압력은 블랑켓을 통하여 내조에 전달된다. 블랑켓은 내조의 수축과 팽창을 흡수하여 열응력을 방지하는 작용을 하며 스프링 성질을 갖고 있어 외부압력이 작용하면 변형을 일으키지만 점차 사라지면 원래의 상태로 복원하려는 특성이 있다. 내조가 수축하거나 팽창했을 때, 내조와 외조 사이에 채워지는 펄라이트의 양에 따라 블랑켓의 두께는 변화한다. Fig. 2는 펄라이트 압력이 블랑켓에 작용할 때 하중-압축률 그래프이다. 이를 통해 최종적으로 내조가 받는 압력을 얻을 수 있다.

### 2.2 펄라이트 압력

기존 보강재의 설계에 사용되는 Zick 코드에서는 아래와 같은 식을 사용하여 펄라이트 압력을 구하였다.

$$P = \rho g \times \frac{R_o^2 + \left[ R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c) \right]^2}{4R_E \mu} \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 펄라이트의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $R_o$ 는 탱크외조의 반경,  $R_i$ 는 탱크내조의 반경,  $\Delta r$

는 탱크의 총 이동량,  $A$  는 블랭킷의 복원력,  $t$  는 blanket 의 초기두께,  $c$  는 블랭킷의 압축률,  $R_E$  는 유효반경,  $\mu$  는 펠라이트와 내조 사이의 마찰계수이다. 식 (1)에서 보면 펠라이트 압력은 내조 높이에 무관하게 일정하다.

본 연구에서는 펠라이트와 같이 작은 입자의 특성들을 고려한 Janssen 식<sup>(3)</sup>을 사용하였다.

$$P(y) = \frac{R_o^2 - \left[ R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c) \right]^2}{4R_E\mu} \times \rho g \left[ 1 - \exp \left( - \frac{4R_E\mu K(y+h)}{R_o^2 - \left( R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c) \right)^2} \right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $K$  는 펠라이트의 수평과 수직 압력의 비례계수,  $h$  는 내조 상단에 있는 여분의 펠라이트 높이이다. 식 (2)에서 보면, 압력  $P$  는 높이  $y$  에 따라 변한다. 만약 내조와 펠라이트 사이의 마찰계수  $\mu$  를 무시하면 식 (2)는 식 (1)과 동일하다.

Janssen method 에서는 높이에 따라 펠라이트의 밀도가 일정하다고 가정하였다. 하지만 높이에 따라 펠라이트가 받는 수직 압력이 다르고 이 압력에 의해 펠라이트의 밀도변화가 생기게 된다. 본 논문에서는 높이에 따른 펠라이트의 밀도 변화를 고려한 압력식을 다음과 같이 유도하였다.

$$P_h(y) = \frac{K\rho_0g}{s} \left[ 1 - e^{-s(y+h)} \right] \quad (3)$$

$$s = \frac{4R_E\mu K}{R_o^2 - \left[ R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c) \right]^2} - \rho_0g \frac{1+K}{E'}$$

$$E' = \frac{E_p}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

여기서,  $E_p$  는 펠라이트의 탄성계수이다. 식 (3)에서 볼 수 있는 바와 같이  $E_p$  가 무한히 크다고 가정하면 압력에 의한 밀도의 변화를 무시할 수 있으므로 식 (3)은 식 (2)와 같게 된다.

식 (3)에서 보면  $K$ ,  $\mu$ ,  $E_p$  등 펠라이트의 물성과 관계되는 인자들은 펠라이트 압력에 영향을 주기 때문에 보강재 설계에 영향을 미친다.

### 2.3 내조의 좌굴 임계하중

내조의 두께는 내조의 반경 또는 높이에 비해서 아주 작기 때문에 내조의 밑바닥은 내조에 거의

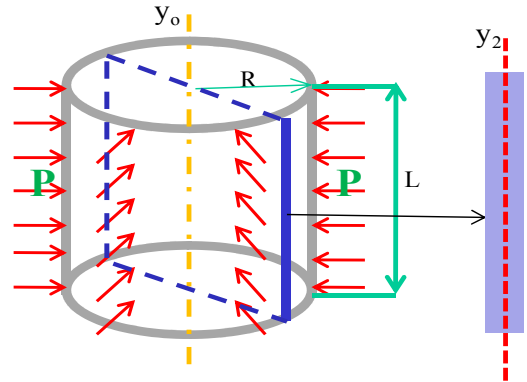


Fig. 3 Cross section of inner tank

보호작용을 일으키지 못한다.<sup>(4)</sup> 따라서 내조탱크의 좌굴 임계하중은 그와 동일한 반경을 가진 링의 임계하중계산으로부터 구할 수 있다.<sup>(5,6)</sup>

$$q_{cr} = \frac{3EI}{R^3} \quad (4)$$

여기서,  $E$  는 내조의 탄성계수,  $R$  은 내조의 반경이고, Fig. 3 에서 보면, 관성 모멘트  $I$  는 내조의 단면의 무게중심을 지나는 축  $y_2$  에 대한 관성 모멘트이다.

### 2.4 보강재의 설계변수

식 (4)에서 좌굴 임계하중  $q_{cr}$  가 외부하중과 같을 때, 내조의 좌굴을 방지할 수 있는 최소 관성모멘트를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{min} = \frac{qR^3}{3E}$$

$$q = \int_{s_1}^{s_2} P(s) ds \quad (5)$$

여기서,  $q$  는 외부 하중,  $P$  는 펠라이트 압력,  $s$  는 내조의 높이이다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 최소 관성모멘트와 압력 사이의 관계식 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$I_{min} = \frac{R^3 \int_{s_1}^{s_2} P(s) ds}{3E} \quad (6)$$

Fig. 4 에서는 내조에 보강재가 결합된 모양을 나타내었다. 각 내조 마디의 보강재는 일정한 부분의 좌굴을 방지하고 있다. 이때, 내조 마디에 해당하는 관성모멘트로부터 좌굴 임계하중을 구할 수 있다.

Fig. 5 와 같이 마디의 길이를  $L_1$ , 내조두께를  $t_1$ ,

보강재의 길이를  $L_2$ , 두께를  $t_2$ , 라고 하면,  $x$ ,  $y$  축을 기준으로 한 좌표계에서 마디의 기하적 중심의  $x$  좌표는 다음과 같다.

$$x_c = \frac{L_2 t_2 (L_2/2 + t_1/2)}{L_1 t_1 + L_2 t_2} \quad (7)$$

평행축 정리를 이용하면,  $y_c$  축을 기준으로 한 전체 관성 모멘트  $I$ 는 내조의 마디에 해당하는  $I_1$ 과 보강재에 해당하는  $I_2$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 \quad (8)$$

$$I_1 = \frac{1}{12} t_1^3 L_1 + x_c^2 t_1 L_1 ;$$

$$I_2 = \frac{1}{12} L_2^3 t_2 + \left( \frac{L_2}{2} + \frac{t_1}{2} - x_c \right)^2 L_2 t_2$$

위의 식들에서 보면 보강재를 설계하는 주요 인자들로 는 마디의 길이  $L_1$ , 보강재의 길이  $L_2$  및 보강재의

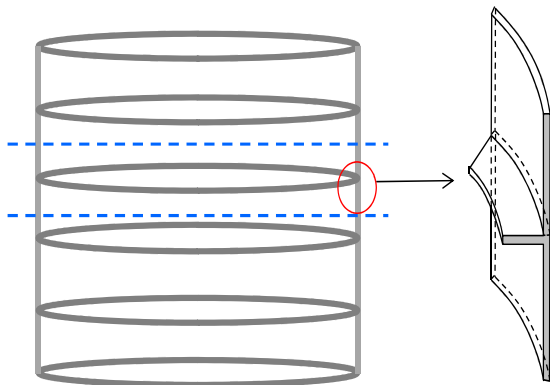


Fig. 4 A part of inner tank with one stiffener

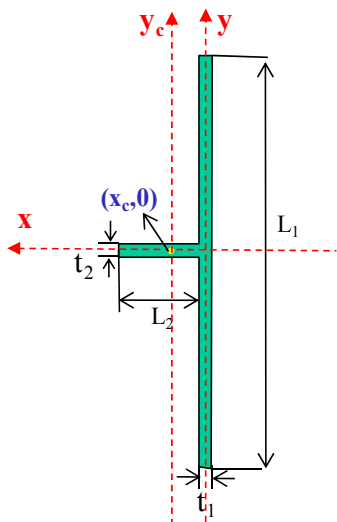


Fig. 5 Parameters of stiffener and inner tank

두께  $t_2$  가 있다. 보강재의 위치가 결정되면 매 보강재가 감당하는 마디의 길이  $L_1$  은 결정되기 때문에 본 연구에서는  $L_2$  와  $t_2$  를 설계변수로 정하였다.

### 2.5 보강재의 최적설계를 위한 정식화

본 연구의 목적은 탱크의 내조의 좌굴을 방지할 수 있도록 보강재를 설계하는 동시에, 보강재의 재료를 최소화 하는 것이다. Table 1 과 같이 보강재의 최적설계를 위한 정식화를 하고 최적설계를 수행하였다. 최적설계는 Microsoft Excel 상용 프로그램을 사용하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 펄라이트 압력에 미치는 요소의 영향

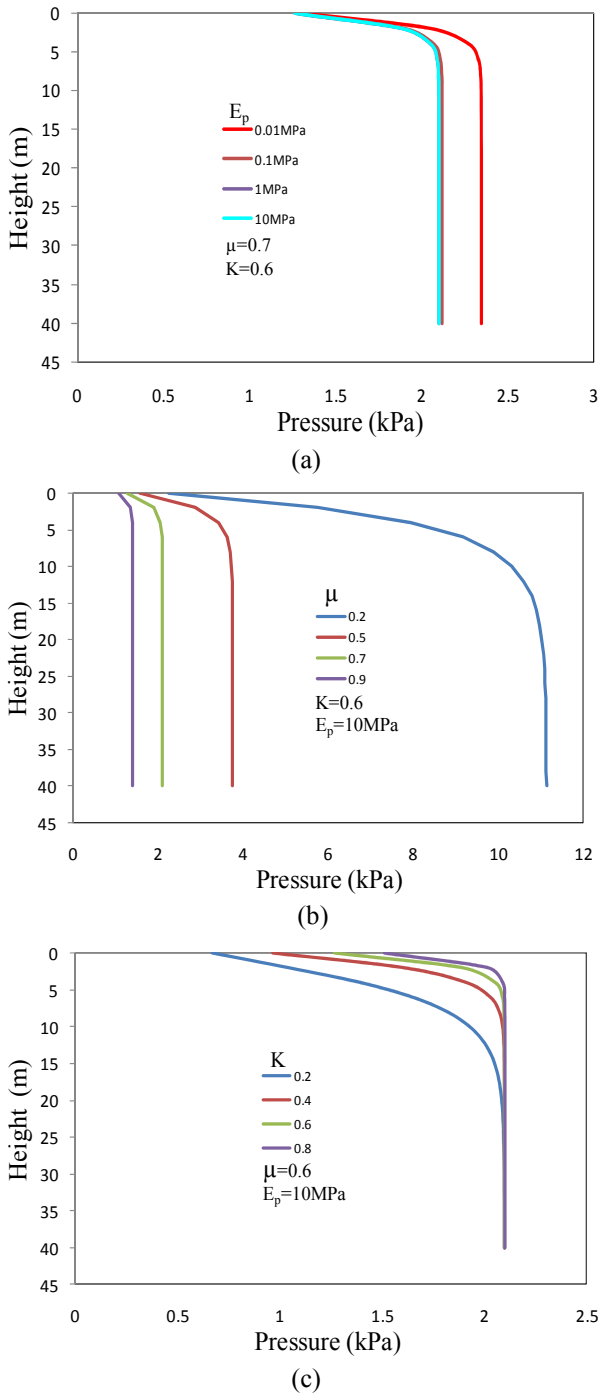
본문에서 언급했던바와 같이 내조에 작용하는 펄라이트 압력은 펄라이트의 물성값들의 영향을 받는다. 본 논문에서는  $K, \mu, E_p$  값들이 펄라이트 압력에 주는 영향을 알아보았다.

Fig. 6(a)는  $\mu=0.7, K=0.6$  일 때, 펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트 탄성계수  $E_p$  의 영향을 나타낸 것이다.  $E_p$  가 증가할수록 펄라이트 압력은 작아지고  $E_p$  값이 각각 0.1MPa, 1MPa, 10MPa 일때는 압력분포가 거의 일치하다. 이는 펄라이트의 탄성계수가 커질수록 외부압력이 펄라이트의 밀도변화에 주는 영향이 점점 작아 지기 때문이다.  $E_p$  가 일정한 값보다 크면 펄라이트의 밀도변화는 거의 없으며 펄라이트 압력분포는 일치하게 된다. 펄라이트의 탄성계수가 0.1MPa 보다 클 것으로 예측되므로,  $E_p$  가 압력에 주는 영향이 미미하다고 볼 수 있다.

Fig. 6(b)는  $E_p=10MPa, K=0.6$  일 때, 펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트와 내조 사이의 마찰계수  $\mu$  의 영향을 나타내는데  $\mu$  가 클수록 펄라이트 압력이 작아지게 되는 것을 알 수 있다. 이는 펄라이트와 내조 사이의 마찰 계수가 커지면 내조가 펄라이트를 더 많이 지지해 주기 때문이다.

Table 1 Formulation of design problem

Design variables	Length of stiffener $L_2$
	Thickness of stiffener $t_2$
Object	Minimize volume of stiffener
Constraints	$q_{cr}(L_2, t_2) \geq q(E_p, K, \mu)$
	$t_2 \geq 0.01m$



**Fig. 6** Effects of parameters on pressure: (a) perlite Young's modulus  $E_p$  (b) coefficient friction factor between perlite and inner tank  $\mu$  (c) proportion between horizontal and vertical pressure  $K$

Fig. 6(c)는  $E_p=10\text{MPa}$ ,  $\mu=0.7$  일 때, 펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트 수평과 수직 압력의 비례계수  $K$ 의 영향을 나타낸다.  $K$ 가 클수록 수직 방향의 압력으로부터 수평 방향의 압력으로 전달되는 정도가 더 크기 때문에 내조에 가해지는 압

**Table 2** Parameters and values

Parameters	Values
Perlite density ( $\text{kg/m}^3$ )	60
Radius of inner tank ( m )	42
Radius of outer tank ( m )	43.2
Effective coefficient factor of friction	0.7
Proportion between horizontal pressure and vertical pressure	0.6
Thickness of blanket ( m )	0.4
Height of upper residual perlite ( m )	1.6
Poisson ratio	0.3
Young's modulus of 9% Ni steel ( GPa )	210
Blanket compression hysteresis factor	0.6
Young, modulus of perlite ( MPa )	10
Height of upper residual perlite ( m )	1.6

**Table 3** Perlite pressure according to depth

y ( m )	Pressure ( kPa )
0	1.298
2	1.941
4	2.072
6	2.095
8	2.1
10	2.1
12	2.1
14	2.1
16	2.1
18	2.1

력은 커지게 된다. 그리고  $K$  값은 탱크 상단 부분의 압력 분포에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 2는 최적 설계에서 사용한 형상 치수 및 물성치이다. Fig. 6과 Table 3에서 보면 내조 상단으로부터 약 6m 깊이까지 펄라이트 압력이 변하다가 수렴하게 되므로, 보강재의 위치에 의하면 위로부터 첫 번째 보강재의 기존 설계가 과도하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 상단으로부터 첫 번째 보강재에 대해서 최적 설계를 수행하였다.

### 3.2 보강재의 최적화

Fig. 7은 내조 상단으로부터 첫 번째 보강재의 길이  $L_2$ 에 따른 체적의 변화 그래프이다. 모든 길이에서 보면 Zick 코드로 구한 보강재 체적값이 기존 Janssen 방식으로 구한 보강재 체적값보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 Zick 코드는 내조상단 부분에 가해지는 펄라이트의 압력이 일정하

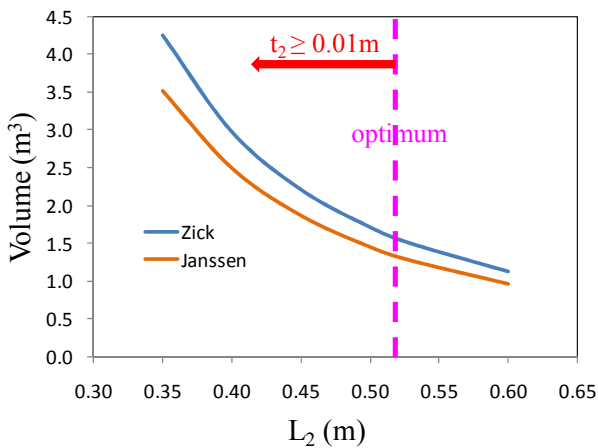


Fig. 7 Length versus volume of the stiffener

다고 가정하였기 때문에 펄라이트의 압력 분포가 Janssen 방식으로 구한 압력보다 크기 때문이다. 그리고 보강재의 길이가 커짐에 따라 전체적인 체적은 감소하는 것을 볼 수 있다. 보강재의 두께가 시공상 0.01m 과 같거나 0.01m 보다 커야 한다는 구속조건을 이용하면, 재료가 제일 적게 드는 보강재의 치수는 길이가 0.515m, 두께가 0.01m 이다. 이때, 보강재의 체적은 Zick 코드를 이용하여 구한 체적보다 15.3% 줄어들었다.

#### 4. 결론

보강재의 설계에 가장 큰 영향을 미치는 펄라이트의 압력을 다각적으로 고찰하고 좌굴 해석을 통해 다음과 같은 설계 지침을 얻을 수 있었다.

(1) 펄라이트의 탄성계수, 펄라이트와 내조 사이의 마찰 계수 및 펄라이트 수평과 수직 압력의 비례 계수는 펄라이트의 압력 분포에 대해서 영향을 미친다.

(2) 내조 상단에 작용하는 펄라이트의 압력은 상단에서부터 약 5m 까지는 일정하지 않고 그 이

후부터는 일정하다.

(3) 내조 상단에 위치하는 보강재는 압력 분포를 고려하면 기존보다 크기를 줄일 수 있어 비용 절감이 가능하다.

결론적으로 지금까지 LNG 저장탱크 보강재 설계에 적용해 온 코드는 탱크 상단 부분 보강재의 과도한 설계가 이루어진 것을 알 수 있다. 펄라이트의 실질적인 압력 분포를 고려한다면 기존 설계의 보강재보다 무게를 약 15.3% 절감하는 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Yoon, I. S., Lee, Y. Y. and Hong, S. H., 1994, "Finite Element Analysis of Membrane for LNG Storage Tank," *The Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 10, pp. 2797~2804, 1225~5963.
- (2) Zick, L. P., 1971, "Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports," *Welding Research Supplement*, pp. 959~970.
- (3) Sperl, M., 2006, "Experiments on Corn Pressure in Silo Cells-Translation and Comment of Janssen's Paper from 1895," *Granular Matter*, Vol. 8, No. 2, pp. 59~65.
- (4) Timoshenko, S. P. and Gere, J. M., 1961, *Theory of Elastic Stability*, McGRAW-Hill, Kogakusha, pp. 82~98, 268~294, 457~487.
- (5) Timoshenko, S. P. and Wolnowsky-Krieger, S., 1959, *Theory of Plates and Shells*, McGRAW-Hill, Kogakusha, pp. 466~496.
- (6) Kollár, L. and Dulácska, D., 1984, *Buckling of Shells for Engineers*, John Wiley & Sons, pp. 41~51.