

원통 확장부를 갖는 구형 LNG 탱크의 동적 설계하중 산출식 개발

신상훈¹, 고대은^{2*}

¹경운대학교 항공기계공학과, ²동의대학교 조선해양공학과

Development of Equations for Dynamic Design Loads of Sphere Type LNG Tank with Cylindrical Extension

Sang-Hoon Shin¹, Dae-Eun Ko^{2*}

¹Department of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요 약 LNG 운반선용 구형 탱크의 제작을 위해서는 탱크의 크기에 따라 별도의 공장 설비가 필요하며 시설 투자의 한계로 인해 현실적으로 조선소에서 다양한 크기의 완전 구형 LNG 탱크를 제작하는 것은 매우 어려운 일이다. 다양한 용량의 LNG 탱크 제작을 위해서는 기존 구형 탱크의 중앙부에 원통 형태의 확장부를 삽입하여 적재 용량을 키우는 방법이 효과적이다. 본 연구에서는 원통 확장부를 갖는 구형 LNG 탱크에 대하여 수평 가속도에 의한 동적 압력분포 산출식을 유도하였다. 본 논문에서 유도한 압력 분포 산출식을 이용함으로써 원통 확장부를 갖는 구형 탱크를 화물창 형식으로 하는 LNG 운반선의 구조설계 시 구조 안전성 평가를 위한 동적 설계하중을 간편하게 구하여 해석에 적용할 수 있다. 또한, 이미 개발되어 있는 원통 확장부를 갖는 구형 LNG 탱크의 정적 하중에 대한 설계하중 산출식과 결합함으로써 정적 및 동적하중을 모두 고려한 정도 높은 간이해석법의 개발이 가능하며, 이를 통해 초기 건적 시 많은 시간과 비용을 소요하는 유한요소 해석을 대신하여 짧은 시간에 정도 높은 물량 산출이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract The number of shops needed for the fabrication of a sphere type cargo tank for an LNG carrier is proportional to the size of the tank to be constructed. Due to the limitations of facility investment, it is difficult to fabricate various size tanks with a perfectly spherical shape in the (factory). An efficient method of increasing the capacity of the cargo tank is to extend the conventional sphere type LNG tank vertically by inserting a cylindrical shell structure. In this study, equations for the dynamic pressure distribution due to horizontal acceleration are derived for a sphere type LNG tank with central extension. The derived equations can be easily applied to the design and structural assessment of a sphere type LNG tank with central extension. Furthermore, the results of this study can be combined with the static design loads previously reported by Shin & Ko [9], in order to establish a simplified analysis method which enables a precise initial estimate to be obtained, thereby obviating the need for a time consuming finite element analysis.

Keywords : Cylindrical extension, Dynamic pressure distribution, Initial estimate, Simplified analysis method, Sphere type LNG tank

1. 서론

LNG 운반선의 화물창 형식에 있어서 구형(sphere type) 탱크는 높은 안전성 등 많은 장점을 갖고 있으나,

탱크의 곡률 반경에 따라 별도의 공장 설비가 필요하다는 단점이 있다. 별도의 대규모 시설 투자 없이 다양한 용량의 탱크 제작을 위해서는 구형 탱크 중앙부에 원통 확장부(cylindrical extension)를 삽입하는 방법이 효과적

*Corresponding Author : Dae-Eun Ko(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr

Received January 24, 2017

Accepted May 12, 2017

Revised (1st February 24, 2017, 2nd March 3, 2017)

Published May 31, 2017

인 방안이 될 수 있다. 국내에서는 이러한 형식의 화물창을 적용한 LNG 운반선의 건조 실적이 없고 각 선급 규정에도 관련 사항이 없으나, 구조의 안전성에 대한 설계 기술이 검증된다면 향후 적용 가능성은 크다고 판단된다.

구형 탱크 관련 연구로는 유한요소해석에 의한 초기 설계[1], 간이해석법에 의한 초기 설계[2], 피로 강도[3], 균열 진전[4], 열 및 저온 특성[5-7], 슬로싱[8] 등 비교적 많은 연구가 수행되어 왔으나, 중앙 원통부를 갖는 구형 탱크에 대한 연구는 거의 찾아보기 어렵다.

원통 확장부를 갖는 구형 LNG 탱크의 구조 설계를 위해서는 이러한 탱크 구조에 작용하는 정적 하중과 동적 하중을 모두 고려해야 한다. 정하중은 주로 화물 중량과 내압에 의한 것으로, Shin & Ko[9]는 원통 확장부를 갖는 구형 탱크의 정적 하중들에 대한 설계하중 산출식을 개발하고 이를 검증한 바 있다. 한편, 동적 하중은 파랑중 선박의 운동에 의해 발생하는 가속도에 기인하는 것으로 아직까지 원통 확장부를 갖는 구형 탱크의 동적 압력분포에 대한 연구는 수행된 바가 없으며, 원통 확장부를 갖는 구형 탱크를 화물창 형식으로 하는 LNG 운반선의 수주 및 건조에 대비하여 구조 안전성 평가에 필수적인 동적 압력분포에 대한 연구가 필요하다.

가속도 중 수직 가속도는 정적 하중에 해당하는 화물 중량과 유사하게 축대칭의 동적 압력분포를 유발한다. 반면, 종방향 가속도, 횡방향 가속도와 같은 수평 가속도는 자오선뿐만 아니라 원주 방향의 위치에 따라서도 압력의 크기가 변화한다. 본 연구에서는 수평 가속도에 의한 동적 압력분포 산출식을 유도하였다.

2. 동적 압력분포식 유도 방법

수평 가속도에 의한 동적 압력분포식을 유도하기 위한 방법으로, 본 연구에서는 우선 수평 가속도와 중력 가속도가 동시에 작용할 때 합가속도에 의한 압력을 계산하고 이로부터 중력 가속도에 의한 압력 항을 제거하는 과정으로 수행하였다.

중력 가속도에 수평방향 가속도(a_H)가 더해지면 Fig. 1과 같이 회전중심축 단면의 중심점인 점 O 를 중심으로 β 만큼 기울어진 축방향으로 합가속도(a_R)가 작용하게 된다. 가속도 성분을 중력 가속도 g 로 나누어 무차원화시키면 식 (1)~(3)이 도출된다.

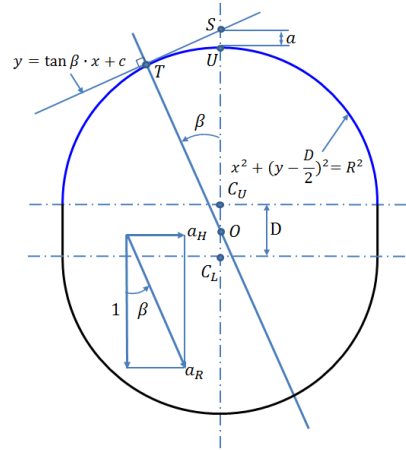


Fig. 1. Resultant acceleration

$$\cos\beta = \frac{1}{a_R} \quad (1)$$

$$\sin\beta = \frac{a_H}{a_R} \quad (2)$$

$$a_R = \sqrt{a_H^2 + 1} \quad (3)$$

점 T 에서의 접선의 기울기는 $\tan\beta$ 이며, 접선과 상반구의 반원이 점 T 에서 접하므로 선분 $\overline{SO}$ 의 길이에 해당하는 c 값은 $R\sec\beta + D/2$ 이고, 따라서 선분 $\overline{SU}$ 의 길이인 a 는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = R(\sec\beta - 1) \quad (4)$$

식 (4)에 식 (1)과 (3)을 대입하면 식 (5)가 된다.

$$a = R(\sqrt{a_H^2 + 1} - 1) \quad (5)$$

3. 수평 가속도에 의한 동적 압력분포

3.1 상반구의 동적 압력분포

상반구에서 수두 계산의 편리성을 위해 Fig. 2에 나타난 바와 같이 단면의 중심점 O 에서 탱크의 임의의 한 점까지의 거리인 R_f 를 도입한다. R_f 는 점 O 를 기준으로 하는 각도 μ 의 함수이다.

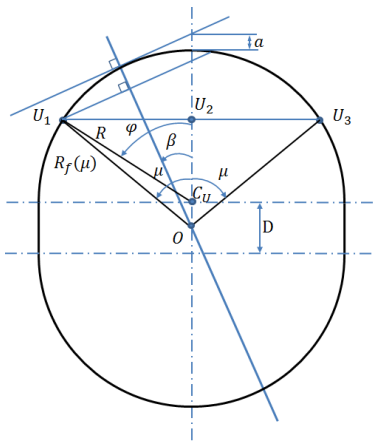


Fig. 2. Water head in the upper hemisphere

단면의 중심점 O 로부터의 거리가 $R_f(\mu)$ 로 일정한 점들은 상반구에서 원 형태의 수평단면을 이루게 된다. Fig. 2에 보인 상반구의 한 점 U_1 위치를 출발점으로 하여 수평단면의 원주를 따라 반시계 방향으로 돌아가는 각도를 θ 로 정의하면, θ 가 $0, \pi/2, \pi$ 일 때의 위치인 U_1, U_2, U_3 에서의 수두(h_U)는 식 (6)~(8)과 같이 구해진다.

$$h_{U, \theta=0} = \left(R + \frac{D}{2} + a\right) \cos \beta - R_f(\mu) \cos(\mu - \beta) \quad (6)$$

$$h_{U, \theta = \frac{\pi}{2}} = \left(R + \frac{D}{2} + a\right) \cos \beta - R_f(\mu) \cos \mu \cos \beta \quad (7)$$

$$h_{U, \theta = \pi} = \left(R + \frac{D}{2} + a\right) \cos \beta - R_f(\mu) \cos(\mu + \beta) \quad (8)$$

식 (6)에 식 (1)과 (2)를 대입하면 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{U, \theta=0} = \left(R + \frac{D}{2} + a\right) \frac{1}{a_R} - R_f(\mu) \left(\cos \mu \frac{1}{a_R} + \sin \mu \frac{a_H}{a_R}\right) \quad (9)$$

또한, $R_f(\mu) \cos \mu = R \cos \varphi + D/2$ 이고 $R_f(\mu) \sin \mu = R \sin \varphi$ 이므로 식 (9)는 다음과 같이 표현된다.

$$h_{U, \theta=0} = \frac{1}{a_R} (R + a - R \cos \varphi - a_H R \sin \varphi) \quad (10)$$

같은 방법으로, 식 (7)과 (8)은 각각 식 (11)과 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$h_{U, \theta = \frac{\pi}{2}} = \frac{1}{a_R}(R + a - R \cos \varphi) \quad (11)$$

$$h_{U, \theta=\pi} = \frac{1}{a_R} (R + a - R \cos \varphi + a_H R \sin \varphi) \quad (12)$$

위의 식 (10)~(12)를 참고하면, 상반구에서의 수두는 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에서 다음과 같은 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$h_U = \frac{1}{a_R} (R + a - R \cos \varphi - a_H R \sin \varphi \cos \theta) \quad (13)$$

합가속도는 무차원화한 값이므로 위의 수두 값에 $\rho g a_R$ 을 곱하면 압력이 된다. 따라서 상반구에서의 합가속도에 의한 압력은 다음과 같이 구해진다.

$$P_U = \rho g (R + a - R \cos \varphi - a_H R \sin \varphi \cos \theta) \quad (14)$$

식 (14)에는 상반구에서의 중력가속도에 의한 압력 $\rho g R(1 - \cos \varphi)$ 이 포함되어 있으므로 이를 제거하면, 수평 가속도에 의한 압력은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{HU} = \rho g(a - a_H R \sin \varphi \cos \theta) \quad (15)$$

3.2 원통부의 동적 압력분포

Fig. 3에서 선분 $\overline{J_1C_1}$, 선분 $\overline{SC_2}$, 선분 $\overline{J_2C_3}$ 의 길이는 $R+a+z$ 이고, 선분 $\overline{J_1E_1}$, 선분 $\overline{J_2E_2}$ 의 길이는 $R\tan\beta$ 이다. 따라서 선분 $\overline{E_1C_1}$ 의 길이는 $R+a+z-R\tan\beta$ 이고, 선분 $\overline{E_2C_3}$ 의 길이는 $R+a+z+R\tan\beta$ 임을 알 수 있다.

Fig. 3에 보인 원통부의 한 점 C_1 위치를 출발점으로 하여 수평단면의 원주를 따라 반시계 방향으로 돌아가는 각도를 θ 로 정의하면, θ 가 $0, \pi/2, \pi$ 일 때의 위치인 C_1, C_2, C_3 에서의 수두(h_C)는 식 (16)~(18)과 같이 구할 수 있다.

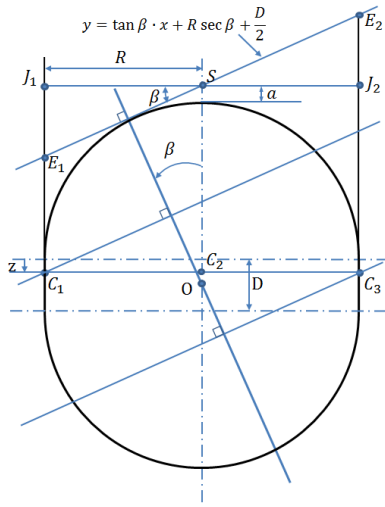


Fig. 3. Water head in the cylindrical part

$$h_{C, \theta=0} = (R + a + z - R \tan \beta) \cos \beta \quad (16)$$

$$h_{U, \theta=\frac{\pi}{2}} = (R + a + z) \cos \beta \quad (17)$$

$$h_{U, \theta=\pi} = (R + a + z + R \tan \beta) \cos \beta \quad (18)$$

식 (16)~(18)에 식 (1)과 (2)를 대입하면 식 (19)~(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{C, \theta=0} = \frac{1}{a_R} (R + a + z - a_H R) \quad (19)$$

$$h_{C, \theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{a_R} (R + a + z) \quad (20)$$

$$h_{C, \theta=\pi} = \frac{1}{a_R} (R + a + z + a_H R) \quad (21)$$

식 (19)~(21)을 참고하면, 원통부에서의 수두는 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에서 다음과 같은 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$h_C = \frac{1}{a_R} (R + a + z - a_H R \cos \theta) \quad (22)$$

원통부에서의 합가속도에 의한 압력은 식 (22)에 $\rho g a_R$ 을 곱하여 다음과 같이 구해진다.

$$P_C = \rho g (R + a + z - a_H R \cos \theta) \quad (23)$$

식 (23)에는 원통부에서의 중력가속도에 의한 압력 $\rho g (R + z)$ 이 포함되어 있으므로 이를 제거하면, 수평가속도에 의한 압력은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{HC} = \rho g (a - a_H R \cos \theta) \quad (24)$$

3.3 하반구의 동적 압력분포

Fig. 4에 보인 하반구의 한 점 L_1 위치를 출발점으로 하여 수평단면의 원주를 따라 반시계 방향으로 돌아가는 각도를 θ 로 정의하고, θ 가 $0, \pi/2, \pi$ 일 때의 위치인 L_1, L_2, L_3 에서의 수두(h_L)를 구해보자. 하반구에서의 수두는 상반구에서의 수두 유도 과정과의 유사성을 이용하여 구할 수 있다.

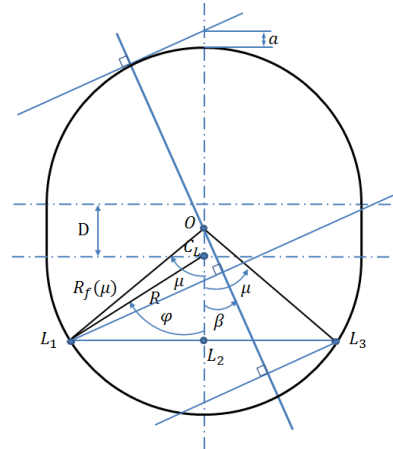


Fig. 4. Water head in the lower hemisphere

Fig. 2와 4를 비교하면, $\theta = 0$ 인 L_1 위치에서 상반구의 수두 계산 시에는 $R_f(\mu) \cos(\mu - \beta)$ 값을 감하지만, 하반구에서는 $R_f(\mu) \cos(\mu + \beta)$ 을 더해주어야 한다. 또한, $\theta = \pi/2$ 인 L_2 위치에서 상반구의 수두 계산 시에는 $R_f(\mu) \cos \mu \cos \beta$ 값을 감하지만, 하반구에서는 그 값을 더해주어야 한다. 마지막으로, $\theta = \pi$ 인 L_3 위치에서 상반구의 수두 계산 시에는 $R_f(\mu) \cos(\mu + \beta)$ 값을 감하지만, 하반구에서는 $R_f(\mu) \cos(\mu - \beta)$ 을 더해주어야 한다. L_1, L_2, L_3 각 위치에서의 수두(h_L)는 식 (25)~(27)과 같다.

$$h_{L, \theta=0} = \left(R + \frac{D}{2} + a\right) \cos \beta + R_f(\mu) \cos(\mu + \beta) \quad (25)$$

$$h_{L, \theta=\frac{\pi}{2}} = \left(R + \frac{D}{2} + a\right) \cos \beta + R_f(\mu) \cos \mu \cos \beta \quad (26)$$

$$h_{L, \theta=\pi} = \left(R + \frac{D}{2} + a\right) \cos \beta + R_f(\mu) \cos(\mu - \beta) \quad (27)$$

식 (25)~(27)을 3장에서와 같은 방법으로 정리하면 식 (28)~(30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{L, \theta=0} = \frac{1}{a_R} (R + a + D + R \cos \varphi - a_H R \sin \varphi) \quad (28)$$

$$h_{L, \theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{a_R} (R + a + D + R \cos \varphi) \quad (29)$$

$$h_{L, \theta=\pi} = \frac{1}{a_R} (R + a + D + R \cos \varphi + a_H R \sin \varphi) \quad (30)$$

식 (28)~(30)을 참고하면, 하반구에서의 수두는 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에서 다음과 같은 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$h_L = \frac{1}{a_R} (R + a + D + R \cos \varphi - a_H R \sin \varphi \cos \theta) \quad (31)$$

하반구에서의 압력은 식 (31)에 $\rho g a_R$ 을 곱하여 다음과 같이 구해진다.

$$P_L = \rho g (R + a + D + R \cos \varphi - a_H R \sin \varphi \cos \theta) \quad (32)$$

식 (32)에는 하반구에서의 중력가속도에 의한 압력 $\rho g (R + R \cos \varphi + D)$ 이 포함되어 있으므로 이를 제거하면, 수평 가속도에 의한 압력은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{HL} = \rho g (a - a_H R \sin \varphi \cos \theta) \quad (33)$$

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 설계 및 건조 경험이 없는 원통 확장부를 갖는 구형 LNG 운반선용 탱크를 대상으로 이의 설계를 위한 동적 하중 조건을 다루었으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 파랑중 선박의 운동에 기인한 가속도 중 수평 가속도에 의해 탱크에 발생하는 동적 압력분포 산출식을 도출하였다. 원통 확장부를 갖는 구형 LNG 탱크의 상반구, 원통 확장부, 하반구에 작용하는 수평 가속도에 의한 동적 압력은 각각 본문의 식 (15), (24), (33)과 같이 분포한다.
- 2) 본 논문에서 유도한 압력분포 계산식을 이용함으로써 원통 확장부를 갖는 구형 탱크를 화물창 형식으로 하는 LNG 운반선의 설계 및 구조해석 시 동적 하중을 간편하게 적용할 수 있다.
- 3) Shin & Ko[9]의 정적 하중에 대한 설계하중 산출식과 결합하여 기존 완전 구형 탱크에서 수행한 것과 같은 정도 높은 간이해석법의 개발이 가능할 것으로 판단되며 이에 대한 추가 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] J. W. Kim, "A LNG Pressure Vessel Design", Journal of the Korean Welding Society, vol. 18, no. 4, pp. 28-37, 2000.
- [2] S. H. Shin, "A Study on Simplified Analysis for the Initial Tank Design of Spherical Type LNG Carriers", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 52, no. 2, pp. 125-134, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.3744/SSNAK.2015.52.2.125>
- [3] I. S. Nho, Y. Y. Nam and H. S. Lee, "Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (1st Report) - Fatigue Strength Analysis Based on the S-N Approach", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 30, no. 2, pp. 132-140, 1993.
- [4] I. S. Nho, Y. Y. Nam and H. S. Lee, "Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (2nd report) - Fatigue Crack Propagation Analysis Based on the LBF Theory", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 30, no. 4, pp. 74-82, 1993.
- [5] Y. M. Kim, S. C. Ko, B. I. Chun and K. K. Kim, "A Study on the Thermal Design of the Cryogenic LNG Carrier", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, vol. 17, no. 4, pp. 1-10, 1993.
- [6] Y. Y. Nam, I. S. Nho and H. S. Lee, "Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (3rd report) - Safety assessment of tank system against cryogenic temperature", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 30, no. 4, pp. 83-92, 1993.
- [7] S. D. Lee, S. O. Song, J. W. Lee, C. S. Kim and D. Y. Choi, "A Study on the Thermal Characteristics of MOSS Type LNG Carrier", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, vol. 22, no. 1, pp. 28-34, 1998.
- [8] B. J. Noh, "Sloshing Load Analysis in Spherical Tank of

LNG Carrier", Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, June, pp. 22-30, 2005.

- [9] S. S. Shin and D. E. Ko, "Development of Equations for Static Design Loads of Sphere Type LNG Tank with Cylindrical Extension", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 8, pp. 5060-5066, 2015.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.8.5060>

신 상 훈(Sang-Hoon Shin)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2000년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2017년 2월 : 현대중공업(주) 선박연구소
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경운대학교 항공기계공학과 교수

<관심분야>

구조물의 설계/강도평가, 최적화기법 연구 및 최적설계

고 대 은(Dae-Eun Ko)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2008년 2월 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계