

실해역 상태를 고려한 LNG 선박의 SLOSHING 해석

박종진[†]*, 김문성*, 김영복*, 하문근*

삼성중공업 조선해양연구소*

Numerical Sloshing Analysis of LNG Carriers in Irregular Waves

Jong Jin Park[†]*, Mun Sung Kim*, Young Bok Kim* and Mun Keun Ha*

Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries, Co., Ltd*

Abstract

The present study is concerned with the numerical analysis of the sloshing impact pressure of the Liquefied Natural Gas (LNG) carriers in rough sea. The reliable predictions of the both random tank motions in irregular waves and violent fluid flow in the LNG tanks are required for practical sloshing analysis procedure of LNG carriers. The three-dimensional numerical model adopting SOLA-VOF scheme is used to predict violent free surface movements of LNG tank in irregular motions. For accurate input motion of tank, a three-dimensional panel method program called SSMP (Samsung Ship Motion Program) is applied for seakeeping analysis. Comparison studies of sloshing analysis are carried out for No.2 tank of 138K and 205K LNG carriers to verify the safety of the LNG containment system of the proposed 205K large LNG carrier.

※Keywords: Sloshing Impact Pressure(슬로싱 충격압), Liquefied Natural Gas Carrier(액화천연가스 운반선), Seakeeping Analysis(내항 해석), Free Surface(자유수면), Irregular Motion(불규칙 운동), Panel Method(판요소법)

1. 서론

최근 선박의 대형화에 따라 LNG 화물창내의 슬로싱(Sloshing) 충격압에 대한 관심이 증대되고 있다. 슬로싱에 의한 유동은 주로 Tank 의 형상,

크기, 해상 상태등에 따라 변한다. 현재 LNG 선박의 대형화에 가장 중요시되는 부분은 Sloshing 충격압에 의한 LNG 화물창 내의 손상 가능성에 관한 내용이다.

이러한 문제점을 미리 예측하고 회피하기 위해서는 정도 높은 슬로싱 해석법이 요구된다. 기존의 슬로싱 해석법은 주로 규칙파(regular wave)중 Motion 을 기반으로 안정성 평가를 수행을 하여

†주저자, E-mail : jjuk.park@samsung.com

Tel : 055-630-6188

왔다. 당사에서는 실제 해상상태 및 선박의 불규칙파(irregular wave)중 Motion 을 고려한 슬로싱 해석법을 개발하였다. 삼성중공업주에서 개발한 SHI-SLOSH 는 SOLA-VOF 법을 사용하여 과도한 자유수면 유동을 계산할 수 있다. 또한 실제 해상상태중의 선박의 6 자유도 운동을 고려한 irregular 슬로싱 해석이 가능하다.

최근에는 LNG 선박의 대형화에 따른 탱크내의 슬로싱 충격압을 줄이고자 국내외에서 많은 실험과 해석이 진행되고 있다. 이를 줄일 수 있는 방법으로는 tank 의 개수를 기존의 4 개에서 5 개로 증가시키는 방법이 있다. 탱크의 개수를 증가시킴으로 각각의 탱크 용량을 상대적으로 줄이고 액체 화물의 운동 에너지를 줄임으로써 슬로싱 충격압을 최소화 하고자 하였다.

본 연구에서는 당사에서 개발한 Sloshing 해석 프로그램을 이용하여 기존의 138K LNG 선과 205K 대형 LNG 선의 비교 계산을 수행하였다.

2. 전산해석 방법

본 연구에서 tank 내의 LNG 유동은 3 차원 비압축성 유동으로 가정하였다. 이를 만족하는 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이며, 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\vec{f}}{\rho} + \nu\nabla^2\vec{V} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

여기서 \vec{V} 는 내부 유체의 속도, ρ 는 유체 밀도, ν 는 동점성 계수이다. \vec{f} 는 체적력을 나타내며, 이를 통해 Tank 의 6 자유도 운동을 표현할 수 있다.

지배방정식은 시간에 대해서는 전진 차분법을, 공간에 대해서는 대류항을 제외하곤 중앙 차분법을 이용하였다. 대류항은 계산의 안정성을 위하여 풍상 차분법(Upwind scheme)을 이용하였다. 자유수면에서는 운동학적, 역학적 경계조건을 만족하였으며, SOLA-VOF 법을 이용하여 과도한 자유수면 운동을 표현하였다. 자세한 해석방법은 Hirt et

al. (1975) 과 Nichols and Hirt (1971) 등에 잘 표현되어 있다.

3. 3 차원 Irregular 슬로싱 해석 방법

이전의 해석방법은 주로 2 차원 regular 해석을 통한 슬로싱 충격압의 발생여부를 주로 검토하였다. 최근 선박의 대형화에 따른 슬로싱 해석의 중요성이 증대되고 이에 따라 실제 해상상태를 감안한 3 차원 irregular 해석법의 중요성이 증가되었다. 당사에서는 대형 LNG 선박의 개발에 irregular 해석법을 이용하였으며 해석방법을 간략히 설명하면 다음과 같다.

- A. 대상 선박의 운동해석
- B. 운동해석결과와 운항상태를 고려한 선박의 irregular 운동 재현
- C. 재현된 irregular 운동을 이용한 LNG tank 의 자유수면을 포함한 전산해석.
- D. 계산 시간마다 걸리는 최대 충격압 해석

여기서 운동해석은 주로 당사가 개발해서 사용하고 있는 SSMP(Samsung Ship Motion Program) 을 이용하여 수행하며, 경우에 따라서는 타 기관에서 해석된 운동결과를 이용할 수 있다. 주어진 운동해석 결과를 이용한 자유수면을 포함한 탱크 내의 유동해석은 SHI-SLOSH 전산해석 프로그램을 이용하여 해석한다.

4. 선박의 운동 해석

파랑중 운행하는 선박은 파도로 부터의 외력과 선박 자체의 복원력의 상관관계로 운동을 하게 되고 액화 화물을 운반하는 LNG 선의 경우 저장 탱크 내부의 유체 유동으로 인해 선체에 충격을 주어 손상을 주는 경우가 있다. 따라서 정확한 선박 운동응답의 추정이 화물창 내부의 슬로싱 해석을 위한 기초자료가 되기 때문에 보다 정확한 운동응답 추정이 요구되며, 특히 안전한 LNG 선을 건조하기 위한 필수 요소중 하나이다.

임의의 입사각을 갖는 파랑중 선박의 6 자유도

운동응답을 추정하기 위해 3 차원 패널 코드 (김문성 등 1997, 하문근 등 1997)를 사용하였다. 단순화된 경계조건과 선형화된 포텐셜 유동으로 파랑 강제력과 동유체력 계수를 계산하였다. 조파 감쇠력이 적은 roll 운동의 경우 Ikeda 공식 (Ikeda et al. 1978)을 이용하여 점성 감쇠력, 박리 감쇠력, 빌지킬 감쇠력, 양력 감쇠력을 고려하였다.

미소파고를 갖는 규칙파에서 선형 주파수 영역 운동방정식은 선체의 운동응답이 선형적이고 조화적이라는 가정으로부터 6 자유도 연성 선형미분 방정식은 아래와 같다.

$$\sum_{i=1}^6 [-\omega_e^2 (M_{ij} + A_{ij}) - i\omega_e B_{ij} + C_{ij}] \xi_j = F_i \quad (3)$$

for $i=1,2,\dots,6$

여기서 M_{ij} 는 선박의 질량 행렬이고, A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} 는 각각 부가질량, 감쇠력, 복원력 행렬이다.

Fig. 1은 Bow quartering sea ($\beta = 150 \text{ deg.}$)인 경우에 138K LNG 선의 운동 R.A.O 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 선수 사파의 경우, 입사하는 파력에 대해 6 자유도 운동이 발생하므로 정도 높은 해석을 위해서는 6 자유도 운동이 모두 고려된 3 차원 슬로싱 해석이 필요하다 (Gravory 2005).

5. 선박의 Irregular 운동

선박이 대양을 운행 중에는 실제 해상상태에 따

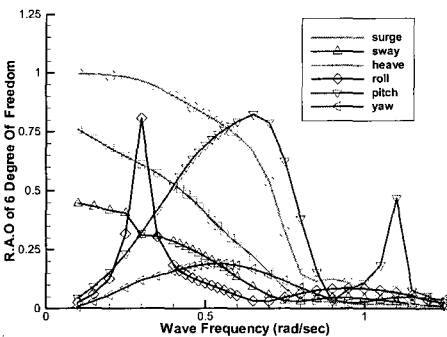


Fig. 1 R.A.Os of quartering sea condition of 138K LNGC (Ship Speed = 14.6knots)

라 여러 형태의 파(Wave)를 접하게 되고 이에 따라 선박은 irregular 운동을 하게 된다. 본 연구에서는 운동해석 결과 (Motion R.A.O)와 해상의 wave spectrum 을 이용하여 선박의 실제 운동을 재현하여 슬로싱 해석을 하였다. 사용된 wave spectrum 은 식(4)와 같이 Bretschneider wave spectrum 을 이용하였다 (Lloyd 1989).

$$S(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega_w^4}\right) \quad (4)$$

여기서

$$A = 172.75(H_{1/3}^2 / T^4), \quad B = 691/T^4 \quad (5)$$

만약 선박이 U 의 속도를 가지고 운항한다면, 선박이 느끼는 조우 주파수(Encounter frequency)는 다음과 같이 표현된다.

$$S(\omega_e) = S(\omega_w) \frac{1}{1 - (2\omega_w U / g) \cos \beta} \quad (6)$$

여기서 g 는 중력 가속도, β 는 선박과 파의 조우각 (Encounter angle)이다. 실제 해상에서 선박이 느끼는 Spectral density function 은 식 (7)와 같이 Wave spectral density function 과 Response amplitude operator $H(\omega_e, \theta)$ 를 이용하여 구할 수 있다.

$$S_\phi(\omega_e, \theta) = S(\omega_e) \cdot G(\theta) |H(\omega_e, \theta)|^2 \quad (7)$$

식(7)은 Frequency domain function 이고 이를 이용하여 실제 시간에 따른 함수로 변환 할 수 있다. 여기서 $G(\theta)$ 는 방향에 따른 Spreading function 이다. 선박의 시간에 따른 운동은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta_j(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \cos(\omega_i t + \varepsilon(\omega_i)) \sqrt{2S_j(\omega_i, \theta)} \delta\omega \quad (8)$$

여기서 j 는 선박 운동의 6 자유도를 나타내며, 식 (8)를 이용해 선박의 시간에 따른 슬로싱 해석을 수행한다.

Fig. 2 는 138K LNG 선의 Bow quartering sea condition ($\beta = 150 \text{ deg.}$)에서 시간에 따른 선박의 Irregular 6 자유도 운동을 보여주고 있다. 그림에서 종축의 병진운동(surge, sway, heave)은 meter 단위, 회전운동(roll, pitch, yaw)은 degree 단위를 나타낸다.

6. 탱크 형상

Table 1 및 Fig. 3 은 계산에 사용된 138K 와 205K LNG 선의 2 번 탱크의 주요 제원 및 형상을 보여주고 있다. Table 1 에서 보듯이 205K LNGC 의 경우 탱크 개수를 4 개에서 5 개로 증가시킴으로 인해 각 탱크 길이가 138K 보다 작음을 알 수 있다. 이러한 방법으로 205K LNG 선의 슬로싱 충격압을 상대적으로 줄이고자 하였다.

7. 계산 조건 및 결과

138K 와 205K LNG 선박에 대해 3 차원 Irregular 슬로싱 해석을 수행하였다. 일반적으로 높은 Filling level (Design condition)에서는 Beam sea 에서의 충격압이 다른 입사 조건에 비해 상대적으로 작다 (Tveitness et al. 2004). 본 연구에서는 계산의 효율성을 위해 Head Sea (180 deg.)와 Quartering sea condition(150 deg.)인 경우에 대해 계산을 수행하였다. 계산은 총 세가지 경우에

Table 1 Comparison of tank dimensions of 138K and 205K No.2 Tanks

Ship Type	138K 4 tanks	205K 5 tanks
Tank No.	No.2 Tank	No.2 tank
Length (m)	42.84	39.44
B (m)	37.40	43.36
H (m)	26.86	28.56

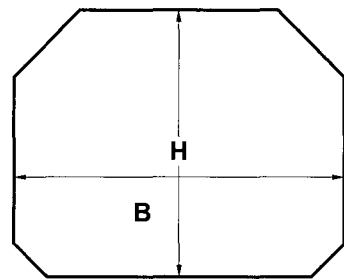


Fig. 3 Cross section of No.2 tank.

Table 2 Calculation conditions of 138K and 205K LNG carriers

Tank Shape	138K and 205K
Wave Heading	180(deg.) and 150 (deg.)
Sea State	40 years of North Atlantic
Filling Level	95% of Tank Height
Ship Speed	2/3 of design Speed

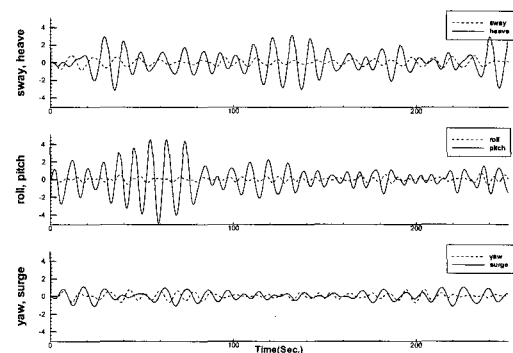


Fig. 2 Generated irregular motion of 138K LNG carrier (Ship Speed = 14.6Knots)

대해 수행하였으며 사용된 조건은 Table 2 에 나타나 있다.

탱크 내부의 유동해석을 위한 격자 간격은 x, y, z 방향으로 모두 1 m 를 사용하였다. 각각의 계산 Time step 은 0.0045 초로 고정하여 계산을 수행하였다. 총 계산시간은 모든 조건에 대하여 250 초 동안 계산을 수행하였다.

Fig. 4 는 Quartering sea condition 에서 시간에 따른 138K 탱크 내에 걸리는 최대 충격압을 보여주고 있다. Fig. 2 와 Fig.4 의 결과에서 보듯이 대체로 선박의 운동이 큰 시간대에 최대 충격압이

걸림을 알 수 있다. Fig. 5 은 Head sea condition 에서 138K 의 시간에 따른 충격압 계산 결과를 보여주고 있다.

Table 3 은 138K 와 205K 의 3 차원 Irregular 슬로싱 해석결과를 비교하고 있다. Table 3 에 보여주는 압력 결과는 제일 큰 2 개의 압력을 평균한 값을 보여 준다. 결과에서 보듯이 138K LNG 선박의 경우 Quartering Sea condition 이 Head Sea Condition 보다 충격압이 더 큼을 알 수 있다. 이 결과는 Fig.4 와 Fig.5 에 잘 나타나 있다.

계산 결과에서 보듯이 205K Large LNG 선의 경우 138K 경우보다 충격압이 작음을 알 수 있다. 확실한 결론은 위해서는 추후 더 많은 계산이 필요하지만, 본 연구의 결과를 바탕으로 205K LNG

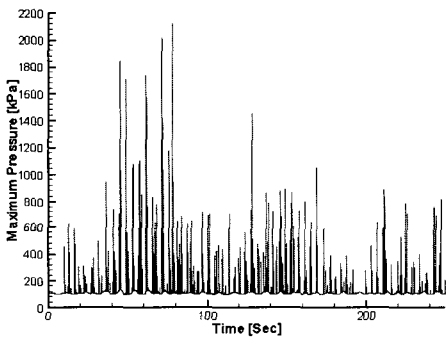


Fig. 4 Maximum Pressure along Time (Quartering Sea Condition, 150 deg.)

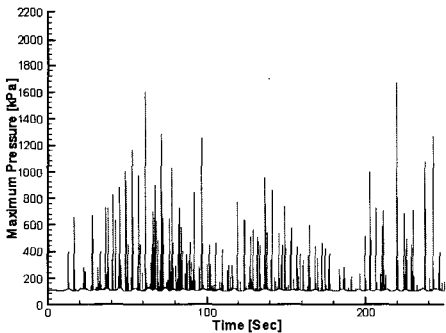


Fig. 5 Maximum Pressure along Time (Head Sea Condition, 180deg.)

Table 3 Comparison of maximum pressure of two different tanks

	Filling [%H]	Heading [deg.]	Tz [s]	Hs [m]	Pressure Aver. 2 [Kpa]
138k	95	180	9.5	14.2	1636
	95	150	9.0	13.8	2063
205k	95	150	8.5	12.8	1273

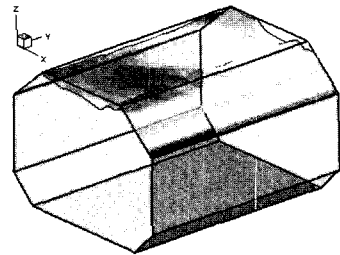


Fig. 6 Free Surface Contours of 138K LNGC (Quartering Sea Condition 150 deg.)

선이 슬로싱 충격압에 138K 와 비교하여 안전하다고 평가 할 수 있다.

Fig. 6 은 Quartering sea condition 에서 138K LNG 탱크의 3 차원 자유수면 형상을 보여주고 있다. 선박의 6 자유도 운동에 의한 자유수면의 비선형성을 잘 보여 주고 있다.

8. 결론

본 연구에서는 138K 와 205K LNGC 의 3 차원 슬로싱 해석을 통하여 205K 대형 LNG 선의 안전성을 평가하였다. 본 연구의 주 목적은 실제 해상에서 두 선박의 탱크내의 충격압을 상호 비교함으로써 제안된 대형 LNG 선박의 안정성을 초기에 평가하는 것이다. 두 선박에 걸리는 충격압을 실제로 걸리는 충격압을 정량적으로 평가 하고자 하는 목적은 아니다. 실선에서의 값을 정확히 추정하기 위해서는, 실선 계측치와의 비교와 검증이 추가로 요구된다.

총 3 가지 조건에 대해 계산을 수행 하였으며

결론은 다음과 같다. 138K의 경우 Quartering sea 가 Head sea 보다 더 큰 충격압을 보임을 알 수 있다. Quartering sea condition 의 경우 205K LNGC 가 138K LNGC 보다 더 적은 충격압을 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 205K LNG 선이 안전하다고 평가 할 수 있다. 이러한 결과를 확증하기 위해서는 더 많은 계산과 실험이 필요하다.

이러한 전산 해석방법은 당사의 Large LNG 선 및 LNG-FSRU/FPPO 등과 같은 신형식 선박 개발의 초기 단계에서 유용하게 사용되고 있다.

참 고 문 헌

- 김문성, 하문근, 전호환, 1997, " LNG 선의 운동 응답 해석에 관한 연구," 제 34 차 KTTC 내항성/조종성 분과 Workshop, 대우중공업.
- 하문근, 백부근, 김문성, 강신영, 1997, " 시간영역에서 GAS 운반선의 슬로싱 해석," 대한조선학회 추계 연구발표회.
- Gravory, T., 2005, " Innovative Tools Open Up New Prospects For Liquid Motion Model Tests," Gastech 2005, Spain.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D. and Romero, N.C., 1975, " SOLA Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows" Los Alamos Scientific Lab. Report LA-5852.
- Ikeda, Y., Himeno, Y. and Tanaka, H., 1978, " Component of Roll Damping of a Ship at Forward Speed," Journal of the Society Naval Architects of Japan, Vol. 143, pp. 113-125.

- Lloyd, A.R.J.M, 1989, Seakeeping: Ship Behavior in Rough Weather, Ellis Horwood Ltd, U.K.
- Nichols, B.D and Hirt, C.W., 1971, " Improved Free Surface Boundary Conditions for Numerical Incompressible Flow Calculation," Journal of Computational Physics, No. 2, pp. 434-448.
- Tveitnes, T, Ostvold T.K, Pastoor, L.W and Sele H.O., 2004, " A Sloshing Design Load Procedure for Membrane LNG Tankers," Proceedings of 9th PRADS, pp. 426-432.



< 박 종 진 >



< 김 문 성 >



< 김 영 복 >



< 하 문 근 >