

LNG 운반선의 진동 특성

김 문 수*

(한진중공업 기술연구소)

1. 머리말

LNG 운반선은 액화 천연 가스(liquefied natural gas)를 -162°C 상태로 생산기지에서 저장기지로 운반하는 선박으로 모스(moss)형과 멤브레인(membrane)형이 있다.

모스형은 주로 일본과 국내에서는 현대중공업이 건조하고 있으며, 구형 탱크를 선체에 탑재하는 선형으로 방열재로는 폴리스티렌 발포체 또는 폴리우레탄 발포체를 시공하며, 누수 방지를 위해 알루미늄 합금 또는 9% 니켈강을 사용한다. 구형 탱크는 원통형 스커트(skirt)로 지지되며, 스커트 상부는 탱크와 같은 저온, 하단부는 상온 상태로 안전한 온도 구배를 갖고 있어 안전성 측면에서 유리하고 유지 보수가 용이하다고 한다. 멤브레인형은 이중 선체의 화물창 내벽에 방열재를 설치하는 선형으로, 주로 유럽에서 건조하고 있으며, Gaz transport형과 technigaz형이 있다.

Gaz transport형은 방열재인 'perlite'를 충전한 단열박스를 1차 시공하고, 그 위에 invar강(invariable steel, 36% 니켈)을 설

치하며, 그 위에 2차 단열박스와 invar강을 시공하는 선형으로 국내에서는 대우조선과 한진중공업에서 건조하며, technigaz형은 방열재인 강화된 폴리우레탄 발포체와 plywood를 시공하고 그 위에 triplex(Al 합금 위에 glass를 도포한 것)을 설치하고, 그 위에 2차 방열재와 파형(corrugated) 스테인레스강판을 설치하는 선형으로 이 파형 스테인레스강이 저온에 의한 신축을 흡수하며, 국내에서는 삼성중공업이 건조하고 있다. 멤브레인형은 모스형 보다 용적효율이 높고 운항시 시계확보가 좋다고 한다.

기체에 압력을 가하고 온도를 내리면 액체가 되어 부피가 줄어드는데, LNG는 온도만 -162°C 로 낮추어 액체로 만들면, 부피가 $\frac{1}{600}$ 로 줄어든다. 운송중 하루 약 0.15% 정도가 기화되는데, 화물창을 일정한 압력이 하로 유지하기 위해 이 기화 가스(boiled of gas)를 추진 연료로 사용하는 터빈 추진 시스템을 갖추고 있으며, 최저온 -162°C 로 유지하기 위한 화물창 설비 및 양하역 시스템을 갖춘 LNG 운반선은 부가가치가 매우 큰 선박이다.

* E-mail : kimmsy@hbc.co.kr

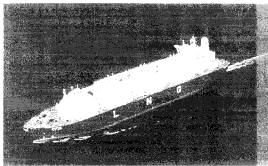


그림 1 모스형 LNG선



그림 2 멤브레인형 LNG 선

표 1 선박의 주요 제원

	Item	Ship A	Ship B
Dimension	Length over all	268.5 m	280.6 m
	L.B.P	257.0 m	268.5 m
	Breadth	43.0 m	43.0 m
	Depth	27.0 m	26.2 m
	Design draft	11.0 m	11.3 m
Propulsion engine	Type	Turbine	Turbine
	Power (PS)	28,000	38,900
	MCR	83 rpm	83 rpm
Propeller	Number of blades	5	6
	Diameter	8.3 m	8.5 m
	Exp. area ratio	0.658	0.775
	Pitch ratio at 0.7R	0.909	0.963
	Skew angle	24.5	30.0
Dead weight	Ballast condition (Ton)	74,400	83,840
	Full load condition (Ton)	99,850	105,800

한진중공업에서 건조한 Gaz transport 멤브레인형 LNG 운반선에 대한 진동 문제점 및 특성을 소개하고자 하며, 주요 제원은 표 1과 같다.

2. LNG선의 진동특성

일반 상선의 진동의 주요 기진원은 주기관과 프로펠러이지만 LNG선은 프로펠러뿐

이므로 기진원은 비교적 단순하나 선체의 진동양상은 복잡하다.

화물창은 이중 선체로 일반 상선보다 튼튼하나, 선미형상이 급경사가 완만하여 프로펠러에 의한 기진력이 상대적으로 크다.

일반 상선은 기관실이 거주구 하부에 있는 일체형이 대부분이지만, LNG선은 기관실과 거주구가 독립된 구조물로서 연성진동을 일으켜 진동모드는 복잡하게 된다.

2.1 선체진동

한진중공업에서 건조한 A선은 거주구와 기관실이 C 갑판에서 연결되어 있으며, 그림 3과 같은 유한요소 모델을 이용해 진동 해석을 수행하였다.

선체 고유진동수 및 진동모드를 찾기 위해 자유진동해석을 수행한 결과는 그림 4, 5

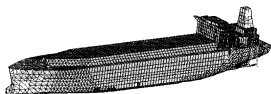


그림 3 유한요소모델

특 집 선박진동

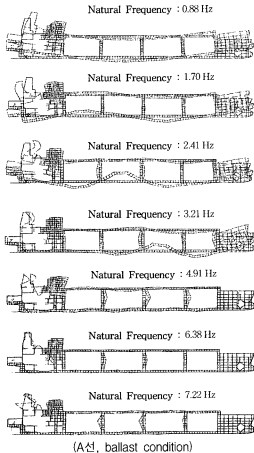


그림 4 진동 해석 모드

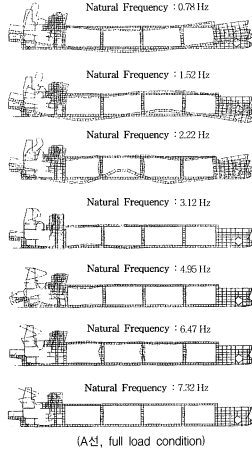


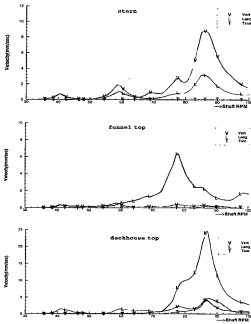
그림 5 진동 해석 모드

와 같으며, 프로펠러 기진력에 의한 강제 진동응답 해석 결과는 그림 6, 7과 같다.

경하상태(ballast condition)에서의 진동해석 결과를 보면 거주구의 고유진동수 7.22 Hz가 프로펠러 회전수 86.6 rpm에서 공진할 가능성이 있고, 또 그림 8에서 처럼 거주구의 진동응답도 84 rpm부터 급격히 증가하나, 계산오차를 고려하면 진동문제를 일으키지 않을 가능성, 즉, 공진회전수 86.6 rpm이 더 높은 곳으로 이동할 가능성이 있어서 시운전 후 진동 계측 결과에 따라 방진대책

을 수립하기로 하였다.

그림 8의 가진기 실험을 한 결과는 거주구의 고유진동수가 423 cpm(cycle/min)으로, 즉 84.6 rpm에서 공진하고 있으며, 약 100 cpm 간격으로 선미, 연돌 및 거주구가 서로 연성진동하고 있음을 보여 준다. 그림 9는 전체선박진동 계측시 거주구가 80 rpm부터 급격히 진동수준이 증가하고 있음을 보여준다.



(A선, ballast condition)
그림 6 강제 진동 응답 해석

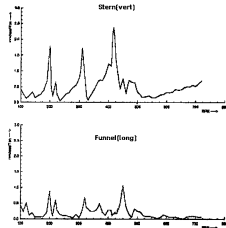
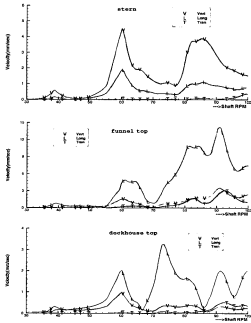


그림 8 가진기 실험(A 선)



(A선, full load condition)
그림 7 강제 진동 응답 해석

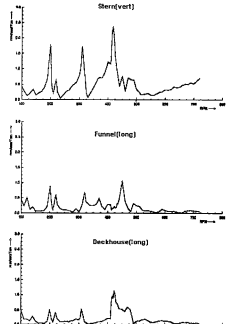
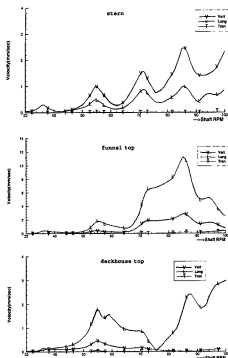
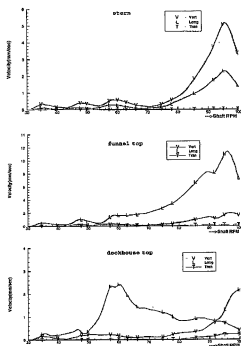


그림 9 전체 선박 진동실험(A 선)



(A선, ballast condition, 방진대책후)
그림 10 강제진동 응답해석



(B선, full load condition)
그림 11 강제진동 응답해석

C 갑판에서 거주구와 기관실의 연결 갑판을 분리하면 기관실과 연돌의 하부구조가 취약해져서 기관실과 연돌의 진동이 커질 가능성이 있었다.

그림 10은 거주구의 후미 끝 감벽에 맞추어 기관실을 보강할 경우 진동수준을 계산한 결과를 보여주고 있으며, 가스 충전 전 진동 계측 결과도 거주구에서 4 mm/sec 이하로 확인되었다.

B선은 거주구와 기관실 상부를 변경하여 연결하지 않았고, 또 프로펠러 날개수를 6익으로 하였으므로 전 선체 진동 문제는 발생하지 않았으며, 그림 11은 B선의 강제진동 응답해석 결과를 보여준다.

2.2 배관진동

LNG 운반선은 스틸 보일러에서 배관을 통해 전달되는 스틸에 의해 터빈에서 추진력을 얻는데, 정지시 상온(20 °C)과 운전시 525 °C의 온도 차이로 인한 열팽창 문제와 양하여 배관의 저온에 의한 수축 문제 때문에 배관을 선체에 완전히 구속할 수 없다. 배관의 응력문제를 고려하여 선체에 스프링 행거(spring hanger) 등으로 지지하지만 프로펠러에 의한 기진력이 선체에 작용하므로 배관의 응력해석 뿐만 아니라 진동해석도 필요하며, 해석결과에 따라 진동절연체 등으로 구속한다. 그림 12는 배관 진동 해석모델이며, 시운전시 배관진동을 계측한 결과는 만족할 만한 수준이었다.

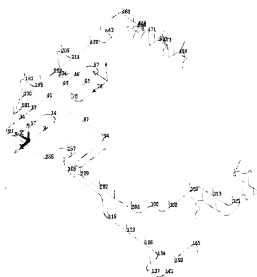


그림 12 배권진동 해석 모델

2.3 스팀 터빈 진동

B선의 3차선 시운전시 고압 스팀 터빈에 심각한 진동이 발생하여 터빈 임펠러의 불평형에 혐의를 두고 평형잡이를 하였으나 전혀 문제가 없었다. 또, 터빈의 지지부에 햄머에 의한 가진 실험을 하였으나 공진문제를 일으킬만한 진동 성분도 없었고, 터빈 주변에 설치된 접근용 발판과 배관에 의한 진동 유발 문제를 점검하는 등 터빈 진동을 일으킬만한 요인들을 모두 제거하고 재시운전을 하였으나 똑같은 진동 문제가 발생하였다. 그래서 터빈을 완전히 분해하여 검사한 결과 임펠러에 스팀을 분사하는 노즐 제작이 잘못되어, 임펠러에 스팀이 입사하는 각도가 도면과 일치하지 않아 발생한 진동 문제였다. 노즐을 수리한 후 재시운전 때에는 진동 문제가 전혀 없었다. 제작사의 제작 잘못이긴 하지만 이런 진동 문제는 처음 발생한 것으로 생각된다.

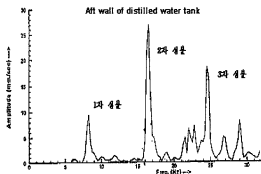


그림 13 증류수 탱크 외벽의 진동계측 수준

2.4 기타 진동 문제

프로펠러 상방에 침수 탱크와 증류수 탱크가 좌우에 설치되어 있는데, 프로펠러 날개수의 2배, 3배되는 진동성분이 계속되었다. 통상 각 배수차 진동을 고려하여 프로펠러 날개수의 2배가 되는 가진 주파수보다 탱크 외벽 고유진동수가 높은 곳에 있도록 하지만, 프로펠러 상부에 있는 탱크 외벽들의 고유진동수들은 프로펠러 날개수의 3배보다 높은 곳에 있도록 보강해야 할 것으로 판단된다.

그림 13은 B선의 증류수 탱크 벽의 진동계측레벨을 나타내며, 프로펠러 날개수의 2배차가 제일 크지만 3배차 성분도 크게 나타났다.

3. 맺음말

일반 상선의 진동 기준은 거주 구역에서 속도 단위로 통상 9 mm/sec이지만 LNG선의 진동기준은 4 mm/sec로 매우 엄격하므로 설계시에 충분한 진동검토가 필요하다.

LNG 선을 건조한 경험을 통하여 진동관점에서 중요한 내용을 아래와 같이 정리해

보았다.

(1) LNG선의 선미 선형이 급경사와 완만하여 프로펠러에 의한 선체표면 기진력이 일반 상선에 비해 크므로 선형을 날씬하게 하여 프로펠러에 의한 진동응답을 줄여야 한다.

(2) 기관실과 거주구가 서로 진동영향을 미치지 않도록 배치하는 것이 중요하며, 기관실(스틸터빈) 하부를 충분히 보강해야 한다.

(3) 스템 및 양하역 배관의 응력 및 진동 해석이 필요하며, 그 결과에 따라 스프링 행거 및 진동 절연체 등을 설치해야 한다.

(4) 전기모터 추진 및 가스터빈 등으로 추진 방식을 바꾸면 진동 문제도 많은 부분이 해결될 수 있을 것으로 생각되나, 경제적인 측면을 고려하여 이를 충분히 연구검토할 필요가 있다.

참 고 문 헌

(1) The report of vibration analysis for N016, N054, 한진중공업.

(2) The report of vibration measurement for N016, N054, 한진중공업.

(3) 선박실계연구회 Proceeding, 2000년도 동계, 2000년 하계, 1998년 하계.

(4) 무중의 국적 LNG선 시대, 해사 프레스, 1997.

(5) List of containment systems granted with a Burea Veritas concept approval by BV, Training session of week 49 (December 1992), Paris.

(6) Principal of gas carrier design and construction, SIGTTO, Bermuda, 1986.

(7) Vibration control in ships by Veritec, DnV, 1985.