한국소음진동공학회 창립10주년 기념 소음진동학술대회논문집, pp.868~875.

멤브레인형 LNG선의 진동에 관한 고찰

최 종 필*, 김 문 수*, 이 기 문*, 권 종 현*

Abstract

이 연구의 목적은 당사에서 제작한 멤브레인형 130,000M^{3}와 135,000M^3 LNG 운반선의 진동특성을 파악하고, 거주구역의 진동수준을 예측하기 위함이다.

우선 공진 회피의 관점에서 최적의 프로펠러를 선택하기 위해 간단한 계산을 수행한 후, 주변 해수를 고려한 선박 전체를 모델링하여 3차원 유한요소해석을 수행한다.

이 계산은 보다 정확한 고유진동수를 결정하고, 프로펠러 기진의 주파수 범위에서 관련된 모드 형상을 결정하며, 선박 거주구에서 기대되는 진동수준을 잘 예측할 수 있다.

다음으로 선박이 진수되고 전체구조가 조립된 후 안벽에서 불평형 가진기를 이용해 가진기테스트를 실시하고, 해상시운전 중에도 동일한 방법으로 테스트를 실시한다.

시험은 고유진동수의 항으로 선박의 실제진동응답과 계산결과와의 좋은 비교를 가능하게 한다. 추가적으로 실제 엔진을 구동해 RPM을 최저에서 최고까지 천천히 변경하면서 실제 운항 중 진동응답을 계측함으로서 고유진동수를 예측하여 해석결과 및 가진기 시험결과와 비교한다.

1. 서론

대형 운반선의 구조는 거주구의 동적거동에 대한 특별한 주의를 가지고 설계된다. 승무원의 안락함과 선박의 구조적 안전성을 위해 진동수준의 감소가 선주에 의해 더욱더 강력하게 요구되어지고 있다. 만족할만한 진동수준을 얻기 위한 방법은 첫째, 가능한 한 가장 낮은 기진력을 얻는 것이고, 둘째, 선체와 거주구의 고유진동수와 프로펠러와 엔진의 기진 주파수 사이의 공진 현상을 피하기 위한 구조설계를 하는 것이다.

그러나 기진력을 줄이는 방법을 출력의 저하를 동반해야하므로 사실상 운송 기기에서는 기대하기 어렵다 그러므로 초기설계단계에서부터 방진대책을 마련하기 위해 여러 가지 계산을 수행하고 이를 확인하기 위해 시험을 실시한다.

*(주)한진중공업 산업기술연구소

이 논문은 당사에서 건조한 130,000M^3 , 135,000M^3 멤브레인형 LNG Carrier에 대해서 해석 및 계측 결과를 나타내었다.

이하에서 편의상 130,000M^3 를 Type 1, 135,000M^{3}를 Type 2라고 한다.

2. 선박의 주요제원

이들 선박의 주요제원들은 Table 1과 같다.

Table. 1 선박의 주요 제원

	Item	Type 1	Type 2
Hull	Length over all	268.5 m	280.6 m
	L.B.P	257.0 m	268.5 m
	Breadth (mould)	43.0 m	43.0 m
	Depth(mould)	27.0 m	26.2 m
	Draught (designed)	11.0 m	11.3 m
Main Engine	Type	Turbine	Turbine
	Power	28,000 SHP	38,900 SHP
	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	24.5

3. 초기계산

3.1 기진 주파수

일반적으로 디이젤 기관의 경우에는 주요 기진원이 기관과 프로펠러이지만, 이 선박은 증기 터어빈에 의해 추진되므로 고려해야할 주요 기진원은 오직 프로펠러뿐이다.

그러므로 가능한 가장 낮은 기진력을 가지고, 계약 속도에 도달하기 위해서 효율성과 압력변동을 모두 고려한 프로펠러에 대한 연구가 계속 행해지고 있다.

이들 선박의 프로펠러에 의한 기진 주파수의 1차와 2차 성분은 Table 2에 나타내었다.

Table.2 프로펠러 기진 주파수

		4-blade propeller	5-blade propeller	6-blade propeller
Normal service speed (80RPM)	1st harmonic	5.3 Hz	6.67 Hz	8.0 Hz
	2nd harmonic	10.6 Hz	13.3 Hz	16.0 Hz
100% propulsive power (83RPM)	1st harmonic	5.5 Hz	6.9 Hz	8.3 Hz
	2nd harmonic	11.1 Hz	13.8 Hz	16.6 Hz

3.2 2차원 선체 고유진동수계산

첫 공진주파수와 관련된 bending mode (vertical and transversal)의 계산은 inertia와 area를 가진 빔요소로 만든 유한요소 모델을 사용하였으며, 몇 개의 대표적인 프레임의 전단면과 bending inertia와 hull girder를 따라 분포된 하중(cargo, added mass water 등)을 고려한다.

(2자유도를 가진 21개의 노드, 20개의 빔요소)

고유모드 계산은 hull girder 고유진동수를 결정하기위해 IRCN 개발한 프로그램인 PREVPN과 VPN을 사용하였으며 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 2차원 고유진동계산결과

		Nodes				
Loading case	Mode	2	3	4	5	6
Disp.=61036ton Mean draught =10.78m	Verrt.	0.94Hz	1.76Hz	2.59Hz	3.41Hz	4.20Hz
	Trans.	1.33Hz	2.38Hz	3.47Hz	4.54Hz	
Disp.=48280ton Mean draught =9.39m	Vert.	0.99Hz	1.85Hz	2.73Hz	3.56Hz	4.41Hz
	Trans	1.44Hz	2.55Hz	3.69Hz	4.81Hz	

4. 3차원 전선 유한요소 계산

진동 수준의 정확하게 예측하기 위해 전체 선박과 주위 해수를 고려해, 만재상태와 경하상태 각각에 대해 3차원 유한요소계산을 수행하고, 자유진동해석결과를 이용하여 프로펠러 단위 기진력에 대한 강제진동응답을 계산하였다.

4.1 운동방정식

Newton의 제2법칙에 따라 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t)$$

또한 선박은 유체중에서 운동하므로 부가수 질량효과를 고려하여 윗 식을 다시 쓰면 다음과 같게된다.

$$(M_s + M_A)\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t)$$

여기서, M_s : 선박의 질량

M_A : 부가수 질량

C : 감쇠

K : 강성

$F(t)$: 기진력

4.2 Loading conditions and hydrodynamic masses

이 계산은 두가지 하중조건하에 계산하였다.

Table 4 하중조건

	Type 1	Type 2
Full load Disp.(ton)	99,849	99,560
Ballast Disp(ton)	74,379	82,170

부가수질량효과는 "Approximation method for quick determination of added mass together with computer program specfication by DnV"를 이용해 계산하였고, 또 진동모드에 따른 부가수 질량효과가 다르게 나타나므로 아래의 수정계수를 사용하여 진동해석을 하였다.

Table 5 진동모드에 따른 부가수 질량 수정 계수(J_V)

		Node				
		2	3	4	5	6
Jv	Ballast cond.	0.7510	0.6801	0.6214	0.5663	0.5228
	Full load cond.	0.7510	0.6801	0.6214	0.5663	0.5228

4.3 댐핑

일반적으로 Damping에는 여러 요소가 있으나, 선박이 유체 중에 있으므로 운동 주파수에 따른 Damping factor를 아래와 같이 가정한다.

Table 6 Damping factor

Freq. (Hz)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D.F (%)	0.8	0.83	0.91	1.04	1.23	1.47	1.77	2.12	2.53	2.99	3.50

실제 댐핑 값은 개개의 모드 형상에 의존하며 고차모드에 대해서 일반적으로 증가한다. 이 연구를 위한 감쇠계수는 편의상 2.0%로 가정하여 계산하였다.

4.4 기진력

선체진동의 주요가진원은 주기관 및 프로펠러이지만, 본선은 터어빈 기관으로 선체진동에 영향을 미치는 기관기진력이 거의 발생하지 않으므로 프로펠러 유기 선체표면 기진력에 대한 영향만 고려한다. 프로펠러 유기 선체표면 기진력은 프로펠러 팁 직상방의 선체표면에 상하방향으로 작용하는 것으로 가정하였고, 진동응답, 즉 Mobility(Velocity/Force)는 1kN의 힘에 의해 발생하는 진동속도(mm/sec)를 나타내며, 단위는 (mm/sec)/kN이다.

4.5 강제진동응답의 계산을 위한 위치

진동평가를 위해서 몇군데의 node 점을 요구하는데 , 선박에서는 진동평가를 위한 주요 포인트인 선미부와 거주구, 연돌을 대상으로 강제진동응답을 계산하였다.

4.6 모델링

계산을 위해 전 선체의 주요 구조부재들을 유한요소로 모델링하였으며, 각종 기기류, 배관류 및 의장품들은 질량효과만을 고려하고 강성은 무시하였다

Loading condition에 따른 Fuel oil, Ballasting Water, Cargo, Added mass등도 유한요소로 모델링하여 질량효과를 고려하였다.

유한요소 모델은 Fig.1에 나타낸다.

- 노드수 : 10586
- 멤브레인 요소수 : 19494
- 빔요소수 : 2448
- 트러스트 요소수 : 42
- Mass 요소수 : 100

총 요소수 :22084개

- 실제 자유도수 63204
- MDOF 수 200

4.7 계산

자유진동계산을 위해서는 Modal analysis의 Reduced method를 이용해 진동모드 및 고유진동수를 계산하였고, 이 결과를 이용하여 Harmonic analysis의 Mode Superposition method로 진동응답을 계산하였다.

프로펠러 유기 선체표면 기진력 효과를 고려하기위해 프로펠러 Tip 직상방의 선체 표면에 상하방향의 단위힘에 의한 진동응답을 나타내었다. .

4.8 결과

자유진동계산의 결과는 Table 7, 강제진동해석결과는 Table 8에 각각 나타내었으며, 주요 진동모드는 Fig. 2 ~15에 나타내었다.

Table.7 자유진동 해석결과

Mode	Ballast Cond.(Hz)		Full Load Cond.(Hz)	
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2
1	0.900	0.809	0.800	0.712
2	1.068	1.702	0.946	1.535
3	1.842	2.534	1,647	2.341
4	2.345	2.812	2.035	2.505
5	2.869	3.337	2.600	3.133
6	3.215	3.761	2.894	3.584
7	3.445	5.592	3.201	5.288
8	3.725	5.621	3.369	5.358
9	4.436	5.972	4.197	5.707
10	5.163	7.521	4.866	7.321
11	5.385	9.115	4.949	8.280
12	5.923	9.631	5.413	9.315
13	6.008	10.940	6.070	10.359
14	7.231	11.661	6.651	10.920
15	8.559	12.647	7.455	12.016
16	9.504	13.449	8.448	12.541
17	9.838	16.459	8.770	13.680
18	10.302	17.751	10.594	15.527
19	10.969	18.018	10.960	16.798
20	11.942	19.444	11.298	18.551

Table 8 강제진동해석 결과

(Level : mm/sec)

Location	Dir.	Ballast Cond.				Full Load Cond.			
		Type 1		Type 2		Type 1		Type 2	
		Level	Freq. (Hz)	Level	Freq. (Hz)	Level	Freq. (Hz)	Level	Freq. (Hz)
Stern	Vert.	0.3	0.9	0.14	11.7	0.2	0.8	0.1	10.9
		0.2	7.9	0.07	5.6	0.1	6.7	0.2	10.4
Funnel	Long.	0.5	6.2	0.31	9.1	0.2	6.7	0.3	9.3
		0.3	5.3	0.21	7.5	0.2	6.1	0.2	7.3
D/H	Long.	0.2	7.3	0.1	5.6	0.1	6.7	0.1	5.4
		0.1	6.3	0.03	9.1	0.01	8.5	0.1	10.9

5. 시험

시험은 해상시운전시 경하상태에서 실제운항 조건에서 전선진동시험을 실시하고, 선박을 정지한 상태에서 가진기를 이용해 가진시험을 실시하였다.

5.1 시험조건

시험조건은 Table 9와 같다.

Table 9 시험조건

		Type 1	Type 2
Draft(m)	Fore	9.070	9.977
	Aft.	9.770	9.146
	Mean	9.420	9.562
Displacement(Ton)		75,860	82,173

5.2 전선 진동 시험

전선진동 시험은 실제 프로펠러 기진에 의한 응답을 확인하기위해 프로펠러의 회전수를 점차 증가 시키면서 각 계측부의 진동응답을 계측하였으며, 그 결과는 Table 10과 Fig.16에 나타내었다.

Table 10 전선진동시험 결과

Location	Dir.	Type 1		Type 2	
		Level	Freq. (Hz)	Level	Freq. (Hz)
Stern	Vert.	2.1	6.4	3.6	7.2
		6.5	6.8	4.0	7.6
		5.7	6.9	4.1	8.0
		8.7	7.1	4.1	8.3
Funnel	Long.	2.1	6.4	2.8	6.0
		1.4	6.9	13.8	7.2
		2.3	7.1	12.5	8.0
D/H	Long.	2.4	6.4	1.2	6.5
		4.9	6.8	4.4	7.6
		8.0	6.9	4.3	8.3
		14.6	7.1		

5.3. 가진기시험(Exciter test)

불평형 기진기를 이용해 가진기의 회전수를 변경하면서 선체 지정부위의 진동레벨을 계측하여 선체의 강제 진동응답을 통해 고유진동수를 추정하였다.
결과는 Table 11과 Fig.17에 나타내었다.

Table 11. 가진기 시험 결과

Location	Dir.	Type #1		Type #2	
		Mobility (mm/sec/ Tonf)	Freq. (Hz)	Mobility (mm/sec /Tonf)	Freq. (Hz)
Stern	Vert.	1.8	3.3	0.8	7.0
		1.7	5.2	1.0	7.3
		2.4	7.0	0.8	8.5
Funnel	Long.	0.9	3.3	1.1	6.0
		0.7	5.3	2.9	7.0
		0.5	6.2	2.0	7.3
		1.1	7.5	2.0	7.5
Deckhouse	Long.	0.5	3.3		
		0.4	3.7	0.5	7.0
		0.5	5.2	0.6	7.42
		1.1	7.0		

6. 결론

당사에서 건조한 LNG선은 일반상선에 탑재되는 디이젤기관과 달리 터어빈 기관을 사용하므로 보일러와 이에 따른 기기들로 인해 선루와 독립된 앤진 케이싱과 편넬구조를 가지며 또 선미 mooring deck는 기관실 및 화물창에 비해 높이가 낮고 구조적으로 취약하여 선미, 연돌 및 선루가 서로 연성진동을 일으켜 복잡한 진동문제를 야기하는 구조적 특성을 가지고있어, 여러번의 계산을 통해 설계단계에서 선루진동의 여지를 없애고, 연성진동의 공진가능성을 최소화하는 선체구조로 설계하였다.

그리고일반적인 선박의 경우 주요기진원과의 공진점을 회피하는 방진설계를 원칙으로 하지만 LNG선의 경우에는 B.O.G Rate등에 의해 출력이 변화하는 경우도 있기 때문에 사용회전수 범위가 넓어서 공진 가능 주파수가 다양하므로 이에대한 충분한 검토가 필요하다.

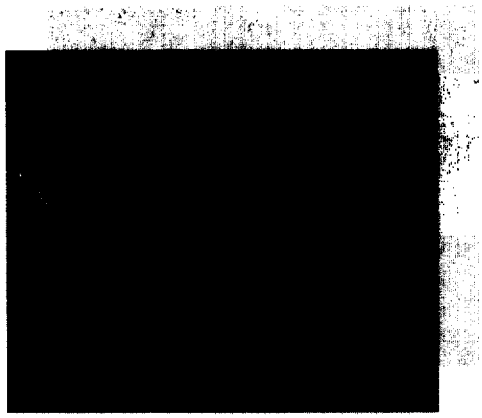

Fig. 1 유한 요소 모델

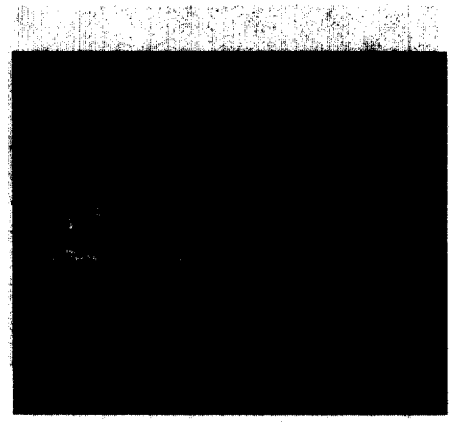

Fig. 2 Mode of Ballast Cond.(Type 1)

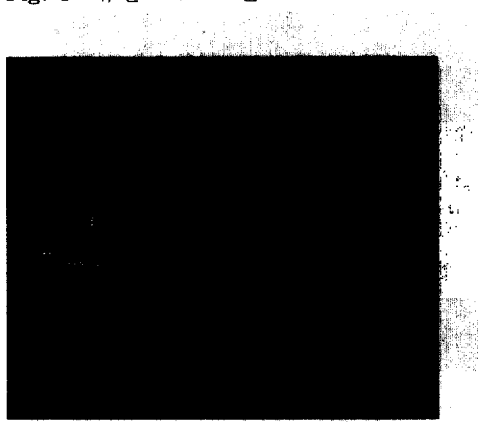

Fig. 3 Mode of Ballast Cond.(Type 1)

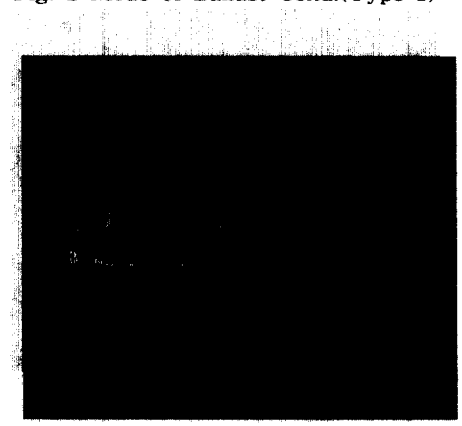

Fig. 4 Mode of Ballast Cond.(Type 1)

Fig. 5 Mode of Load Cond.(Type 1)

Fig. 6 Mode of Load Cond.(Type 1)

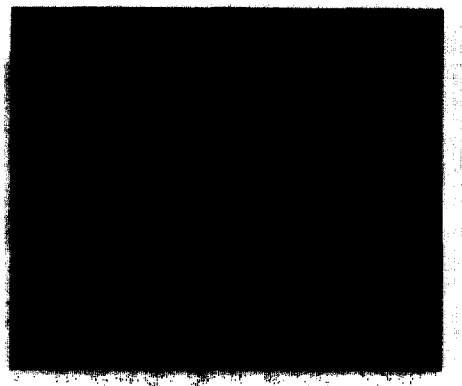

Fig. 7 Mode of Load Cond.(Type 1)

Fig. 8 Mode of Ballast Cond.(Type 2)

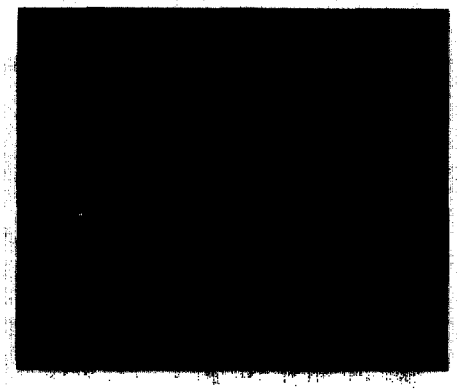

Fig. 9 Mode of Ballast Cond.(Type 2)

Fig.10 Mode of Ballast Cond.(Type 2)

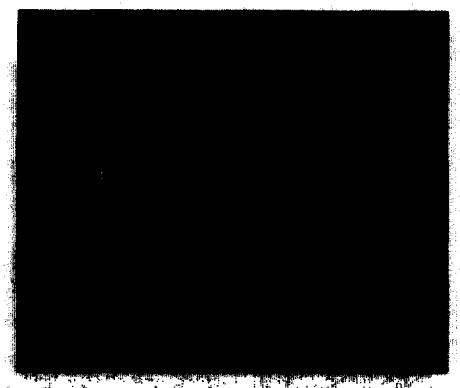

Fig.11 Mode of Ballast Cond.(Type 2)

Fig.12 Mode of Load Cond.(Type 2)

Fig. 13 Mode of Load Cond.(Type 2)

Fig. 14 Mode of Load Cond.(Type 2)

Fig. 15 Mode of Load Cond.(Type 2)

Fig.16 전선 진동 시험시의 진동 응답 레벨

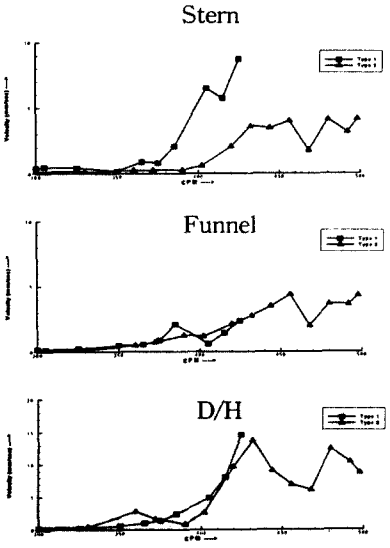
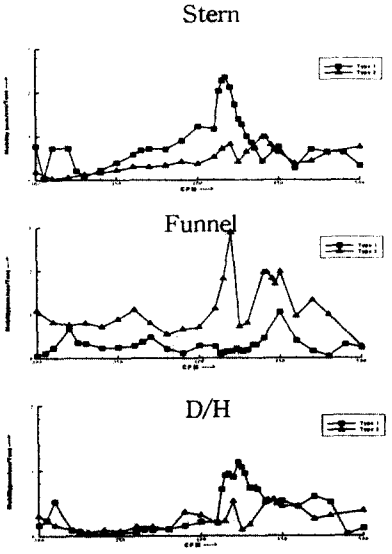
Fig.17 가진기 시험시의 진동 응답 레벨