

선박 명음(Singing)현상의 규명과 대책에 관한 연구

°주원호* · 김동해* · 배종국*

A Study on the Identification and Countermeasure of Singing Phenomenon in Ships

W.H.JOO, D.H.KIM, J.G.BAE

Abstract

Recently, the singing phenomenon was encountered during the sea trials of high speed catamaran and 46,000 TDW product carrier and remedied after various treatments, which were based on the reduction of vortex shedding strength and the avoidance of resonance, respectively. And, the numerical approach for structure-acoustical problem like singing phenomenon was established using MSC/NASTRAN and SYSNOISE. In this paper, the effectiveness of numerical approach was verified through the control of singing noise. And the results according to the modification were also discussed. Finally, the future works were described to enhance the numerical approach pattern for singing phenomenon.

1. 서론

실선의 명음(singing)현상은 캐비테이션, 유속변동, 선 회실속(stall), 축과 베어링의 마찰 및 와류이탈(vortex shedding) 등의 다양한 원인에 의한 것으로 조사되었으나, 최근에는 주로 날개 끝단부에서 박리된 와류이탈 주파수와 끝단부의 고유진동수와의 공진현상에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 현상은 수중익을 갖는 여객선이나 프로펠러 추진 선박에서 자주 발생하여 제품의 품질 저하를 초래하는 경우가 있으나, 날개의 국부적인 영역에서 유체의 유동특성과 구조의 진동특성이 서로 강한 연성관계를 형성하여 소음을 발생하기 때문에 그 현상을 명확하게 규명하고 대책을 수립하는 것은 매우 어렵다. 따라서 이를 극복하기 위해서는 유체-구조 연성문제를 고려하여 명음현상을 파악하고, 대책수립에 기여할 수 있는 해석적 방법의 정립과 실선의 명음수준

을 저감하기 위한 효과적인 제어방안의 수립이 요구된다.

최근 수중익을 갖는 고속 쌍동 여객선과 46,000톤 정유 운반선 두척의 시운전 중 과도한 소음수준을 갖는 명음(singing)이 발생하였으며, 각각 기진력 감소 및 공진회피 등의 관점에서 날개 끝단부를 수정하여 명음을 제거하였다. 이 과정에서 원인규명과 대책수립을 위해 MSC/NASTRAN과 SYSNOISE를 이용하여 주파수 영역에서 단위기진력에 대한 계의 수중방사파위를 계산함으로써 수중익이나 프로펠러에서의 와류이탈에 의한 명음발생 가능성을 파악하는 해석적 방법을 마련하였다.

따라서 본 연구에서는 두척의 실선을 대상으로 마련된 해석적 방법의 효율성을 검증하였으며, 명음을 제거하기 위해 적용한 날개 끝단부 수정방법 즉, 기진력 감소 및 공진회피 관점에 따라 나타나는 현상과 결과를 비교해 보았다. 또한 설계단계에서 수중익이나 프로펠러의 명음

* 현대중공업(주) 선박해양연구소

발생을 예측하고 이를 효율적으로 처방할 수 있는 기법을 정립하기 위해 향후 필요한 내용을 기술하였다.

2. 모델링

실선의 수중익이나 프로펠러에서 발생하는 명음은 날개 끝단부에서 박리된 와류 이탈 주파수와 국부 진동모드와의 공진현상에 의해 발생하는 유체-구조 연성문제로서, 문제의 특성을 규명하고, 대책을 마련하기 위해서는 이를 해석적으로 접근할 수 있는 기법의 정립이 필요하다.

유체구조 합성문제를 정의하기 위해서는 구조에 유한요소법을, 유체장에 경계요소법을 적용하여 정식화하는 방법이 여러 가지 장점 때문에 많이 이용된다. 이는 구조물의 진동에 의한 유체의 관성효과를 고려하여 고유모드를 추출하고, 이를 기저로 하여 진동응답을 계산해 낸다. 그러나 실선의 명음 현상은 와류이탈 기진력에 의해 구조물에 진동이 발생하고, 발생한 진동에너지가 수중음향에너지로 변환되어 단일주파수 성분의 소음으로 발생하는 구조음향 연성 메커니즘을 갖고 있다. 따라서 부가수질량의 효과만 고려한 구조물의 진동응답수준 평가만으로는 명음 발생가능성을 예측하고 제어수단을 강구하는데 무리가 따른다. 따라서 수중에서 구조물의 진동에너지가 음향에너지로 변환되는 관계 즉, 각 모드의 수중방사효율을 고려하여 평가하는 것이 요구된다.

고유진동해석

구조음향 연성계에 유한요소법과 경계요소법을 적용하여 각각 구조와 유체를 모델링하고, 이를 정규화하여 정식화하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{K} - \omega^2 \hat{M} & \hat{C} \\ \hat{C}^T & \frac{1}{\rho_F \omega^2} H(\omega) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_u \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{F}_S \\ F_F \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 \hat{F}_S 는 구조 기진력(structural excitation)이며, F_F 는 음향기진력(acoustic excitation)이다. 일반적으로 부가수질량 효과가 크게 나타나는 주파수영역에서는 음향 입피턴스의 실수부에 해당하

는 음향방사(radiation damping)가 상대적으로 매우 작게 나타난다. 이를 고려하여 음향방사에 의한 음향기진력이 매우 작다고 가정하면 (1)의 두 번째 줄은 다음과 같다.

$$\mu = -\rho_F \omega^2 H(\omega)^{-1} \hat{C}^T x_u \quad (2)$$

(1)식과 (2)식을 이용하여 고유치 해석을 위한 행렬식으로 정식화하면 다음과 같다.

$$(\hat{K} - \omega^2(\hat{M} + \hat{M}_a)) x_u = 0 \quad (3)$$

여기서 \hat{M}_a 는 부가수질량 행렬이며, 관계식은

$$\hat{M}_a = \rho_F \hat{C} \text{Re}(H(\omega)^{-1}) \hat{C}^T \quad (4)$$

이다. 본 연구에서는 MSC/NASTRAN을 이용하여 고유치해석을 수행하였다.

강제진동해석

와류이탈 기진력(F)은 아래식에 의해 산정된다.

$$F = \frac{1}{2} \rho_f V^2 L_f L_s C_L \quad (5)$$

여기서 V 는 유입속도, L_f 는 와류간의 높이, L_s 는 와류가 발생하는 길이, C_L 는 양력계수이다. 그러나 이 기진력은 복잡한 유동현상을 갖는 수중익이나, 프로펠러에서 그 정량적인 값을 추정하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 와류가 발생하는 영역에 단위 힘을 적용하여 MSC/NASTRAN에 의해 강제진동해석을 수행하였다.

수중방사효율

구조물의 진동에 의해 수중에서 방사되는 음향파워는

$$W_o = \frac{1}{2} \int_S \text{Re}(p v_n^*) dS \quad (6)$$

로 정의되며, 이를 기초로 하여 [1]의 수중방사효율 개념을 도입하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{W_o}{W_i} \quad (7)$$

여기서 W_i 는 진동하는 물체와 동일한 속도와 면적을 갖는 무한 강체의 방사파워를 의미하며, 관계식은 다음과 같다.

$$W_i = \frac{1}{2} \rho_f \int_S v_n^2 dS \quad (8)$$

가 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 480 Hz 주파수를 갖는 기진력만 존재하면 과도한 소음이 발생할 가능성을 확인하였다. 이에 따라 Strouhal number(S_t)를 이용하여 해당 수중의 날개끝단부의 기하학적 형상에 의해 와류이탈 주파수(f_c)가 480 Hz 근처에서 존재할 수 있는지를 살펴보았다.

$$f_c = \frac{S_t \times U_o}{h}, \quad S_t = 0.185 \quad (8)$$

여기서 U_o 는 유체의 유입속도, h 는 끝단부의 두께(4.13 mm)와 난류 경계층의 높이의 합이다. 그 결과 480 Hz에 대응하는 h 가 6.3 mm로 계산되었으며, 이는 페인트의 두께를 고려하면 본 대상계에서 와류 이탈 기진력이 480 Hz에서 발생할 가능성이 충분한 것으로 확신할 수 있었다. 따라서 일련의 해석과 계측으로부터 본 대상계에서 발생한 소음은 명음(singing)에 의해 발생된 것으로 규명되었다. 이를 제거하고자 Ronald Ross [2]에 의해 제기된 방법 즉, 날개 끝단부의 두께와 형상을 변화시켜 와류이탈에 의한 기진력을 감소하는 방법을 채택하였다.

Table 1. Modification of trailing edge

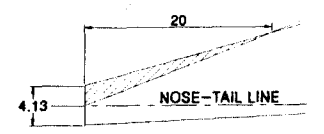
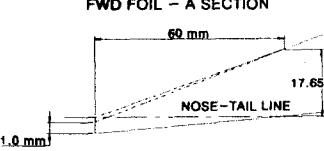
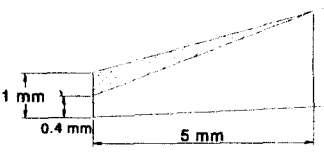
	Geometry	Noise
1	<p>FWD FOIL A SECTION TRAILING EDGE</p> 	<p>Speed(knot) : 22-29</p> <p>Frequency : 505 Hz</p>
2	<p>FWD FOIL - A SECTION</p> 	<p>Speed(knot) : 19-23</p> <p>Frequency : 510 Hz</p>
3		<p>Perfect removal</p>

Table 1에 보인 바와 같이 3차례에 걸쳐 날개 끝

단부를 수정하여 명음을 제거할 수 있었다. 1차 수정에서는 수정후 페인트 작업을 재차 하는 관계로 큰 효과가 없었으며, 2차수정시는 5~7dB의 저감 효과를 얻을 수 있었으나, 수정면이 수중의 길이방향으로 일정하지 않은 관계로 보다 넓은 운항구간에서 소음이 발생하였다. 최종적으로는 끝단부의 두께를 0.4 mm로 수정하므로써 명음을 제거할 수 있었으나, 가공상의 어려움이 존재하였다.

46,000톤 점유운반선

대상선은 설계하중조건으로 시운전을 수행하던 중 64 rpm에서 소음이 발생하기 시작하여 MCR에서는 매우 높은 수준의 소음이 발생하였다. 또한 발라스트조건에서는 이러한 소음이 발생하지 않았다. 소음의 주파수 특성을 파악하기 위해 steering gear room에서 공기음과 고체음을 계측하였으며, 그 결과는 Table 2와 Fig. 5에 나타내었다.

Table 2 Airborne noise measured in steering gear room

RPM	Noise level (dB)							dBA
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
NCR	90.0	84.0	83.6	93.6	83.4	76.5	65.2	94.0
MCR	91.8	87.2	85.4	93.4	87.2	77.0	68.0	94.9

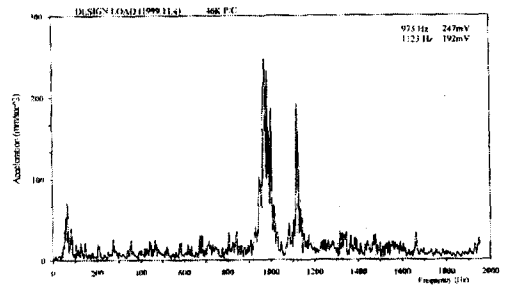


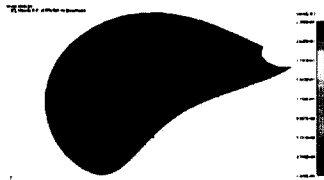
Fig. 5 Structure-borne noise measured in the steering gear room (MCR)

이상의 계측결과에서 보는 바와 같이 NCR(110 rpm)과 MCR(114 rpm)에서는 1 kHz 주위의 975 Hz와 1123 Hz에서 과도한 소음이 발생하고, 저 rpm구간에서도 그 수준은 작지만 특정 주파수에서

소음이 발생하는 것으로 판단되었다. 이 원인을 파악하기 위하여 프로펠러 구조모델을 사용하여 850 Hz에서 1,200 Hz의 주파수범위에서 구조음향해석을 수행하였다. 추출된 프로펠러 후면의 국부진동 모드는 Table 3과 같으며, 950 Hz에서의 모드를 Fig. 6에 나타내었다.

Table 3 Local vibration mode of trailing edge

Natural freq.(Hz)		Location
Predicted	Measured	
900	-	0.95 r/R
950	975	0.90 ~ 0.95 r/R
1060	-	0.85 ~ 0.90 r/R
1120	1123	0.90 ~ 0.95 r/R



(a) Whole mode shape



(b) Enlarged mode shape of trailing edge
Fig. 6 Local mode of trailing edge

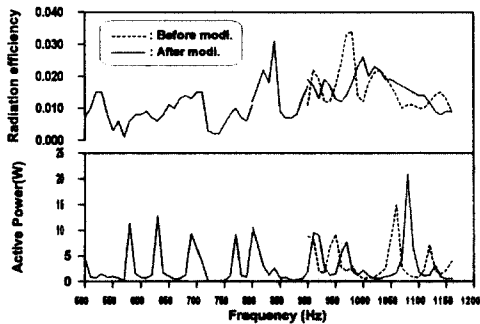


Fig. 7 Underwater radiation power and efficiency

또한 해당 주파수 범위에서의 주파수별 수중방사 파워와 방사효율을 Fig. 7에 나타내었다. 이들 결과를 살펴보면 주요 피크는 900 Hz, 950 Hz, 1060 Hz 및 1120 Hz에서 발생하였으나, 그 발생부위는 다르게 나타나고 있다. 이를 계측결과와 비교하면 프로펠러의 후면 0.90 ~ 0.95 r/R위에서 발생한 와류의 이탈 주파수가 해당 국부모드와 공진되어 명음현상에 의한 과도한 소음이 발생한 것으로 판단되었다. 따라서 주요 운항속도 구간에서 명음을 제거하고자 공진회피관점에서 Fig. 8과 같이 프로펠러 후면을 쉐기형으로 수정하는 것을 검토하였다.

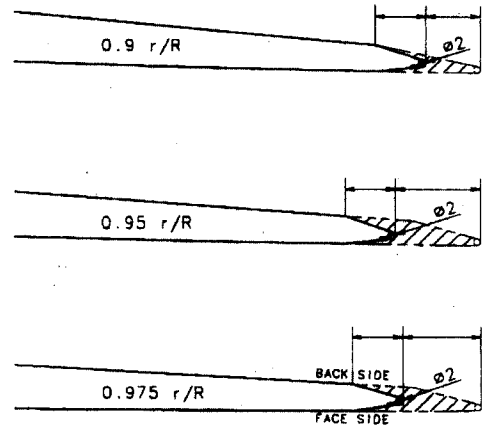


Fig. 8 Modification of propeller trailing edge

이는 너클부위에서 와류의 이탈이 발생할 가능성이 높고, 이때의 와류 이탈 주파수는 600 Hz ~ 900 Hz 사이에 존재할 것으로 판단되었기 때문이다.

수정후 해석결과를 Table 4와 Fig. 7에 나타내었다. 수정후의 해석결과는 수정전에 명음이 발생한 주파수에 비해 전반적으로 약 10 ~ 20 Hz 증가한 상태에서 존재하였으나, 와류 이탈 주파수가 900 Hz 이하에서 존재할 가능성이 크고, 수중음향 방사효율이 수정전에 비해 약 1/2 수준으로 감소함에 따라 이 주파수 구간에서 명음이 발생할 가능

성은 매우 작아보였다. 그러나, 수정후 900 Hz 아래에서 수정전과 동일한 위치에서 국부진동모드를 갖는 주파수가 630 Hz, 770 Hz 및 920 Hz에서 존재하였다. 이들 주파수를 갖는 와류가 수정후의 너클부위 두께 증가로 인하여 저 rpm 영역에서 발생할 가능성이 있는 것으로 판단되었으나, 이 주파수에서의 방사효율이 기존 소음이 발생한 주파수 구간의 방사효율보다 매우 작기 때문에 소음이 발생할 가능성은 있으나, 그 수준은 매우 작을 것으로 추정되었다.

Table 4. Local mode of trailing edge after modification

Natural freq.(Hz)		Location
Predicted	Measured	
580	-	0.80 ~ 0.85 r/R
630	655	0.95 r/R
690	-	0.80 ~ 0.85 r/R
770	780	0.95 ~ 0.975 r/R
920	920	0.95 r/R
970	990	0.90 ~ 0.95 r/R
1080	-	0.85 ~ 0.90 r/R
1130	-	0.90 ~ 0.95 r/R

수정후 결과를 파악하기 위해 후속 호선의 시운전시 steering gear room에서 교체음 및 공기음을 계측하였으며, 그 결과를 Table 5와 Fig. 9에 나타내었다.

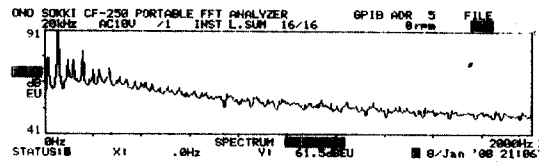
Table 5. Comparison of the measured results

(a) Structure-borne noise (cm/sec^2)

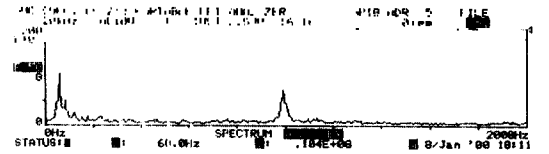
	Before modif. (Hz)		After modif. (Hz)	
	975	1123	990	1125
NCR	260	193	72	14
MCR	247	192	52	16

(b) Airborne noise

Modif	Noise level (dB)							dBA
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Before	90.0	84.0	83.6	93.6	83.4	76.5	65.2	94.0
After	89.2	91.8	92.4	88.5	82.4	73.4	63.0	90.0

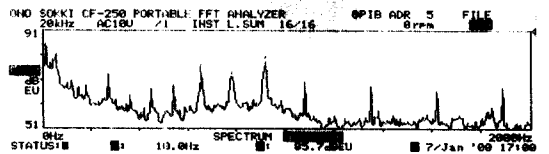


(a) Airborne noise

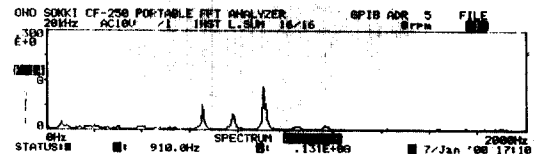


(b) Structure-borne noise

Fig. 9 Noise measured in the steering gear room (110 rpm)



(a) Airborne noise



(b) Structure-borne noise

그림 10. Noise measured in the steering gear room (75 rpm)

이상으로부터 프로펠러 수정후는 수정전에 비해 1 kHz의 공기음 수준이 약 5 dB 감소하였으며, 단지 교체음 수준상으로는 990 Hz 주파수 성분이 존재하기는 하지만 그 수준 자체는 크지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 계측결과에 의해 NCR과 MCR 근처에서는 명음현상이 거의 사라진 것으로 추정되었으나, 앞서 Table 4와 Fig. 10에서 보인 바와 같이 수정전에는 크게 문제가 되지 않았던 주파수

영역 즉, 72 rpm에서 86 rpm까지는 655 Hz, 780 Hz 및 910 Hz에서 낮은 수준의 명음이 발생하고 있으며, 해석결과를 기준으로 평가하면 이는 프로펠러 반경방향(0.9 ~ 0.95 r/R)의 날개 끝단부 너클 부분의 두께가 증가되면서 와류이탈 주파수가 하향 이동한 것으로 판단된다.

따라서 공진회피 관점에서 수정을 시도할 경우 이러한 부분에 대해서도 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- 명음과 같은 구조음향문제를 규명하기 위해 기존의 유체구조 연성문제 해법에 수중방사효율 개념을 도입하여 수치해석적 방법을 구체화하였다.
- 해석적 방법의 효용성을 두척의 실선 명음현상을 통해 검증하였으며, 명음을 제어하기 위해 적용한 끝단부 수정방법 즉, 기진력 감소 및 공진회피 관점에 따라 나타나는 현상과 그 결과를 비교해 보았다.

또한 초기설계단계에서 수중익이나 프로펠러의 명음발생을 효율적으로 예측할 수 있는 수단을 정립하기 위해서는 아래의 연구가 요구된다.

- 46,000톤 정유운반선의 경우는 적절한 Strouhal number를 프로펠러 명음 제어과정으로 통해 추정할 수 있었다. 이러한 결과를 초기설계단계에서 얻을 수 있다면 보다 효율적으로 명음발생을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 일련의 모델시험 또는 실선의 계측결과를 정리하여 실선에서의 값을 파악해 두는 것이 요구된다.
- 전산유체역학을 적용하여 와류의 이탈 패턴과 그 세기를 평가하여 초기설계 단계에서 명음의 수준을 예측할 수 있는 토대를 마련하는 것이 또한 요구된다.

참고문헌

1. Fahy, Sound and Structural Vibration, Academic Press, 1987
2. Donald Ross, Mechanics of Underwater Noise, Pergamon Press, 1976
3. W.H.JOO, J.G.Bae, and K.Y.Chung, "Singing Noise Control of High Speed Passenger Catamaran with Hydrofoils", Inter-Noise 99, 1999
4. N. Sasaki, "Experimental Study on Karman Vortex Street Shedding from the Trailing Edge of the Wing", The West Japan Society of Naval Architecture, 1999
5. Blake, W.K., Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Vol. II, Academic Press, 1986