

전달함수 기반의 선박 수중방사소음 해석 프레임워크 구현

김국현[†]
동명대학교 조선공학과

Implementing Framework for Transfer Function-based Ship Underwater Radiated Noise Analysis

Kookhyun Kim[†]
Department of Naval Architecture, Tongmyong University

Abstract

The transfer function method is a widely used in the analysis of underwater radiated noise of ships because it is simple to implement and gives a simple way in the design stage requiring trade-off studies on various kinds of noise sources. In this study, a framework is implemented based on the transfer function method. The framework is interfaced to a software providing transfer functions of hull force to underwater radiated noise. The transfer function-based underwater radiated noise analysis approach is reviewed and the implemented framework structure is described. As an example, a numerical calculation of a virtual ship is carried out and its results are investigated in terms of applicability to real ship design project.

Keywords : Underwater radiated noise(수중방사소음), Transfer function method(전달함수법), Software framework(소프트웨어 프레임워크)

1. 서론

수중방사소음(underwater radiated noise; URN)은 잠수함, 수상함 등과 같은 군사적 목적의 선박에 있어서는 생존성과 직접적인 연관성을 갖는 스텔스 성능에 영향을 미치는 인자 중 하나이며, 일반상선, 특수목적선 등과 같은 상업 목적의 선박에 있어서는 해양탐사효율 극대화 및 해양생물자원 보호측면에서 고려되어야 할 중요한 성능 중 하나이다. 이에 선박 설계 및 건조단계 뿐만 아니라 운용 상태에 대해 적용 가능한 효율적인 URN 평가를 위한 수치해석적 방법과 계측방법이 개발되어 적용되고 있다.

URN 평가를 위한 대표적인 수치해석적 방법으로는 유한요소법(finite element method), 경계요소법(boundary element method) 등의 저주파수 영역 해석방법(Wang, et al., 2000)과 파워흐름해석(power flow analysis, Lee & Hong, 2001), 통계적 에너지해석(statistical energy analysis, Bae, et al., 1993) 등의 고주파수 해석방법이 있다. 또한, 계측방법으로는 실선에 대한 개별장비 기여도 측정방법(overside noise measurement), 운항 중 측정방법 등이 있다(Griffiths, 2001).

한편, 상기 언급한 평가방법들은 매우 유용한 평가도구로 활용되고 있음에도 불구하고 소음원의 종류나 운용조건에 따라 소음

원 수준이 변화할 경우 URN에 대한 재해석에 많은 노력이 요구된다. 이러한 노력을 최소화하기 위해 전달함수법(transfer function method)이 효과적으로 적용될 수 있다(Morrison, et al., 2000). 전달함수법은 선박 URN의 생성 메커니즘을 소음원과 전달경로로 분리하여 해석을 수행하는 방법으로, 소음원 수준과 부수적인 전달경로 효과에 각기 소음원 설치 위치에서의 단위 기진력에 대한 URN 수준을 의미하는 전달함수를 더하여 URN을 평가하는 방법이다. 따라서, 이 방법은 대상선박의 소음원 수준에는 변화가 있거나 설계상의 변경사항이 미미하여 전달함수를 계산할 필요가 없거나 선박설계 초기단계에서 전달함수 추정치가 불가능하여 대상선박과 유사한 실적선의 전달함수를 적용해야 하는 경우 매우 유용하다. 이러한 장점으로 NATO 국가들에서는 전달함수 기반의 URN 해석방법과 절차를 체계적으로 정립하고 인적요류를 최소화하기 위한 프로그램을 개발하여 선박설계에 적용하고 있으며(Rottier, 1999), 국내에서도 2000년 이후로 전달함수법이 군함의 URN 해석에 부분적으로 적용되고 있다(Jeon & Ryu, 2000).

본 연구에서는 전달함수법을 이용한 URN 해석 이론과 절차를 정리하고 이를 바탕으로 사용이 용이하고 각종 URN 해석 프로그램과의 데이터 교환이 가능하도록 프레임워크를 구현한다. 또한 가상의 선박에 대한 URN 해석을 통해 구현된 프레임워크의 실무 적용 타당성을 확인한다.

2. 전달함수를 이용한 선박 URN 해석

전달함수를 이용한 선박 URN 해석은 소음원 수준 산정, 지지 구조물 특성 평가, 전달함수 산정, URN 해석 등의 절차에 따라 수행된다. 특히, 지지구조물 특성은 Fig. 1에 보인 바와 같이 소음원과 장비받침대의 구속방식에 따라 그 평가방법과 세부절차가 상이하다. 예를 들어 소음원이 받침대로 강지지(rigidly mounted)되어 있는 경우에는 받침대 동적 강성(dynamic stiffness)이 지지구조물의 특성을 지배하며, 소음원이 받침대에 탄성지지(resiliently mounted)되어 있는 경우에는 마운트 동적 강성과 코히어런스(coherence) 효과가 지지구조물의 특성을 지배한다. 본 장에서는 Morrison, et al.(2000)이 제안한 방법을 기준으로 전달함수 기반의 URN 해석이론을 정리한다.

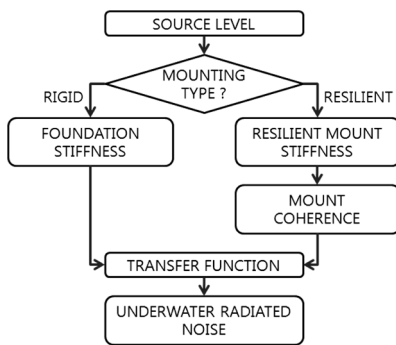


Fig. 1 Transfer function-based URN analysis procedure

2.1 강지지구조

소음원이 받침대에 강지지되어 있는 경우 URN은 식 (1)으로 산정한다.

$$L_p = L_a + K + TF + C \quad (1)$$

여기서, L_p 는 해당 소음원에 의한 URN 수준(dB re. $1\mu Pa$ @1m), L_a 와 K 는 소음원 가속도 레벨(dB re. $1m/s^2$)과 받침대의 동적 강성(equivalent stiffness, dB re. $1kN/m$)을 각각 의미한다. 또한, TF 는 단위 힘에 대한 URN 수준을 의미하는 전달함수(dB re. $1\mu Pa/kN$ @1m)이며, C 는 단위환산, 기진력 전달 축 수, 소음원 수 등을 포함하는 보정계수로 식 (2)와 같다.

$$C = -40\log_{10}(2\pi f) + 10\log_{10}N_a N_s \quad (2)$$

여기서, f 는 주파수(Hz)이며, N_a 와 N_s 는 기진력 전달 축 수와 소음원 수를 각각 나타낸다.

한편, 소음원이 받침대에 강지지되어 있는 경우 받침대 동적 강성은 식 (3)과 같이 저주파수 영역에서는 받침대 동적 강성과 동일한 반면, 특정 주파수 이상의 고주파수 영역에서는 받침대와 장비의 결합으로 인해 주파수에 따라 일정한 기울기로 증가

하는 특성을 보인다.

$$K = \begin{cases} K_o & \text{for } f < f_c \\ K_o + 5\log_{10}(f/f_c) & \text{for } f > f_c \end{cases} \quad (3)$$

여기서, K_o 는 받침대 동적 강성(dB re. $1kN/m$), f 는 주파수(Hz), f_c 는 받침대의 강성특성을 구분하는 기준 주파수(Hz)를 의미한다.

전달함수는 실적선의 측정자료로부터 획득하거나 수치해석 결과를 활용하여 추정 가능하다. 그러나, 초기설계단계와 같이 자료획득이 어려운 경우에는 무한평면에 대한 전달함수를 의미하는 식 (4)를 이용하여 추정이 가능하다(Su & Vasudevan, 1997).

$$TF = 20\log_{10} \left| \frac{k}{2\pi \{1 - i\omega h \rho_s / \rho c\}} \right| \quad (4)$$

여기서, k 는 파수(wavenumber, $=\omega/c$), ω 는 각주파수(angular frequency, $=2\pi f$ [rad]), h 는 평판의 두께(thickness, m), ρ_s 는 평판의 밀도(kg/m^3)를 각각 의미하며, ρ 와 c 는 물의 밀도(water density, kg/m^3)와 수중음파속도(sound speed in water, m/s)를 각각 나타낸다.

2.2 탄성지지구조

소음원이 받침대에 탄성지지되어 있는 경우에 대한 URN은 다음과 같이 산정한다.

$$L_p = L_a + K_m + M_c + TF + C \quad (5)$$

여기서, L_p , L_a , TF , C 는 식 (1)에서 정의한 바와 같고 K_m 은 탄성마운트 동적강성(dB re. $1kN/m$)을 나타낸다. 또한 M_c 는 마운트 코히어런스 인자(mount coherence factor, dB)를 의미한다.

탄성마운트 동적 강성은 저주파수 영역에서는 소음원이 강체 거동(rigid body motion)을 하고, 고주파수 영역에서는 탄성체 거동(elastic body motion)을 하는 것으로 간주하여 다음과 같이 평가한다.

$$K_m = \begin{cases} 20\log_{10}(2\pi f_0)^2 \frac{M}{N} - 60 & \text{for } f < f_r \\ 20\log_{10}(2\pi f_0)^2 \frac{M}{N} - 52 & \text{for } f > f_c \end{cases} \quad (6)$$

여기서, M 은 소음원의 중량(kg), N 은 마운트 개수를 의미하며, f_0 는 탄성마운트 고유진동수(Hz)를 나타낸다. 또한 f_r 과 f_c 는 소음원이 강체거동을 하는 주파수 영역의 상한과 탄성체거동을 하는 주파수 영역의 하한을 각각 나타내며, 추정이 어려운 경우에는 유사실적선 자료를 활용한다. 한편, 강체거동에서 탄성체거동으로 변환되는 천이 주파수 구간에 대해서는 저주파수 영역의 강성과

고주파수 영역의 강성을 선형 보간하여 적용한다.

마운트 코히어런스 인자는 소음원과 받침대를 연결하는 복수 마운트의 힘 전달특성을 반영한다. 즉, 각각의 마운트를 통한 힘 전달이 저주파수 영역에서는 코히어런트(coherent)한 반면, 고주파수 영역에서는 인코히어런트(incoherent)하게 나타나는 것으로 간주한다. 식 (7)은 저주파수 영역과 고주파수 영역에서의 코히어런스 인자를 산정하는 식이며, 저주파수 영역과 고주파수 영역 사이에서는 각각의 코히어런스 인자를 선형 보간하여 적용한다.

$$M_c = \begin{cases} 20\log_{10}N & \text{for } f < f_l \\ 10\log_{10}N & \text{for } f > f_u \end{cases} \quad (7)$$

여기서, N 은 식 (6)에서 정의한 바와 같으며, f_l 과 f_u 는 마운트의 코히어런스 선형보간 주파수 구간의 하한과 상한 주파수를 각각 나타내며, 추정이 어려울 경우에는 유사실적선 자료를 활용한다.

(A) Frequency Band Definition

- Freq. Band Type(1/1, 1/3...)
- Frequency Range

(B) Project File Definition

- Project File Name (New/Open)

(C) Noise Source List

- Source
 - Name/Number/Description
- Mounting
 - Type: upper/below/rigid
 - Number
 - Resonance Frequency
 - Coherence etc.

(D) Source Level

- Import Source Level
- Foundation Stiffness(Ref./Mod.)

(E) Transfer Function

- Import or Calculate Transfer functions

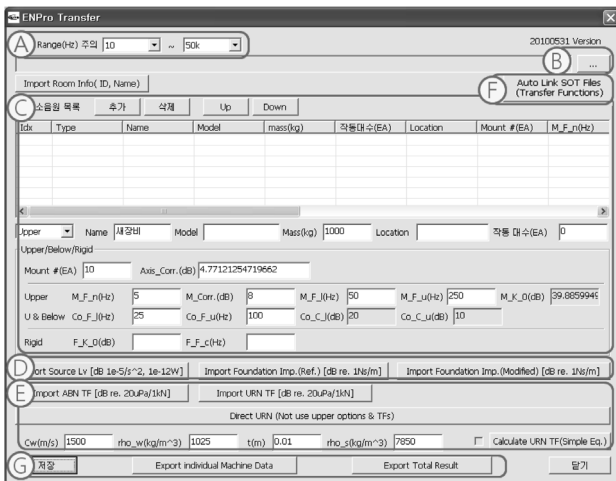
(F) Batch Job for Importing

- Batch job for Transfer Function Importing from Any S/W

(G) Data Storing

- Save Project file
- Export Source DB
- URN Calculation

(a) organization and function



(b) window view

Fig. 2 The implemented frame work

3. 프레임워크 구현

앞서 정리한 전달함수법을 기반으로 URN 해석을 위한 프레임워크를 구현하였다. 구현된 프레임워크는 Fig. 2에 보인 바와 같이 크게 7개의 세부기능으로 구성되어 있다. 주파수 밴드 정의(frequency band definition, (A))에서는 주파수 밴드의 종류와 관심 주파수 구간을 정의하며, 프로젝트 파일 정의(project file definition, (B))에서는 프로젝트명을 새롭게 정의하거나 기존 프로젝트의 파일명을 지정한다. 또한 소음원 목록 및 특성(noise source list and characteristics, (C))에서는 소음원의 이름, 수량, 기타 설명자료를 추가할 수 있으며, 해당 소음원의 마운트 형식, 수량, 공진주파수, 코히어런스 인자, 소음원 수준 등을 정의한다. 소음원 수준(source level, (D))에서는 소음원별 소음원 수준과 받침대 동적 강성을 함께 입력할 수 있으며, 받침대 동적 강성이 변경될 경우 소음원 수준, 전달함수 등을 자동으로 보정도록 구성하였다. 전달함수(transfer function, (E))에서는 외부로부터 산정된 소음원별 전달함수를 읽어오거나 식 (4)를 이용해 내부적으로 계산하도록 하였으며, 일괄업무(batch job, (F))에서는 소음원 수가 다수인 경우, 전체 소음원에 대한 전달함수를 외부 프로그램과 연계하여 일괄적으로 읽을 수 있도록 효율성을 제고하였다. 마지막으로 데이터 저장(data storing, (G))에서는 이상의 작업을 프로젝트파일로 저장하거나 각각의 소음원에 대한 기어도 및 전체 URN 해석결과를 외부파일로 출력할 수 있도록 하였다.

4. 전달함수를 이용한 URN 해석 예

구현된 프레임워크의 선박 설계 업무로의 적용성을 검토하기 위해 2종의 소음원을 탑재하고 선체외판 두께가 일정한 가상의 선박을 대상으로 URN해석을 수행하였다. 이때 해석에 사용된 소음원별 가속도 레벨은 Fig. 3에 도시한 바와 같으며, 전달함수는 선체 외판을 구성하는 평판의 두께 h 를 $0.01m$ 로 가정하고 식 (4)로부터 산정한 값을 적용하였다(Fig. 4).

Table 1은 소음원별 탑재 수량과 마운트 형식을 정리한 것이다. 마운트 형식 및 특성에 따른 URN 변화특성을 고찰하기 위해

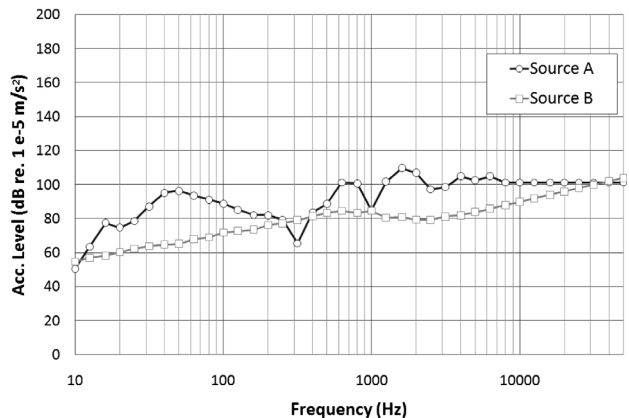


Fig. 3 Acceleration level of the sources

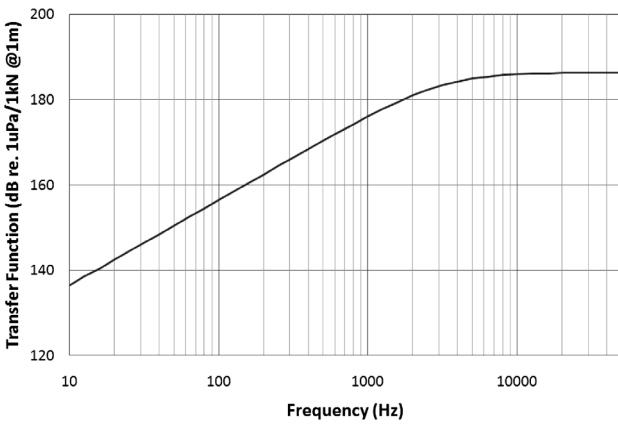


Fig. 4 Transfer function of the objective ship

Table 1 Sources considered in the analysis

Source	Source A	Source B
Number, N_s	2 EA	2 EA
Mounting Type	Rigid/Resilient	Rigid

Source B가 받침대와 강지지되어 있는 것으로 가정한 상태에서 Source A의 마운팅 방식이 강지지인 경우와 탄성지지인 경우에 대한 해석을 수행하였다. 특히, Source A에 적용되는 탄성마운트의 공진주파수를 10Hz와 5Hz로 구분하여 해석을 수행함으로써 탄성마운트 선정에 따른 URN 변화특성도 함께 검토하였다. 이때, 강지지인 경우와 탄성지지인 경우에 대한 해석인자들은 Table 2 와 Table 3에 각각 나타내었다.

Table 2 Rigid mount characteristics of the Sources

Foundation stiffness, K_o	110 dB
Reference frequency, f_e	50 Hz

Table 3 Resilient mount characteristics of the Source A

Number, N	10 EA	
Natural frequency, f_o	5, 10 Hz	
Mount stiffness related	f_r	50 Hz
	f_e	250 Hz
Mount coherence factor related	f_l	25 Hz
	f_u	100 Hz

Fig. 5는 Source A와 Source B가 모두 강지지되어 있는 경우에 대한 URN 해석결과를 보인 것으로, Source A의 영향이 지배적으로 나타나고 있으며, 이는 소음원 수준을 제외한 모든 해석인자들이 동일하므로 Fig. 3에 나타난 소음원 수준차이가 해석결과에 그대로 반영되었기 때문이다.

한편, Fig. 6은 Source A가 탄성지지되어 있고 Source B가 강지지되어 있는 경우에 대한 URN 해석결과이다. 이로부터 저주파수 영역에서는 Source A의 영향이 지배적인 반면 고주파수 영역에서는 Source B의 영향이 지배적으로 나타나고 있음을 확인

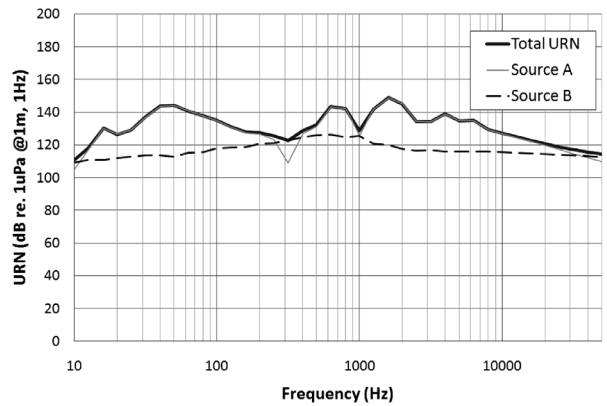
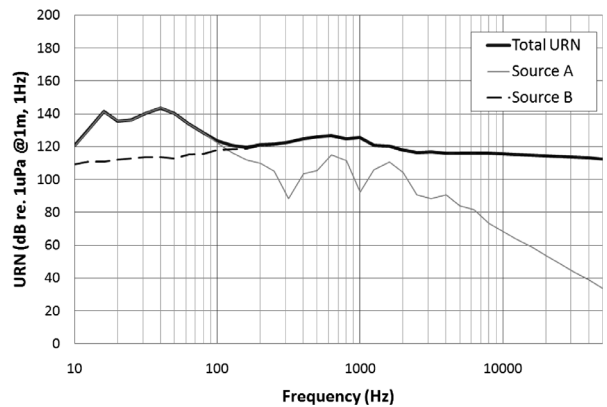
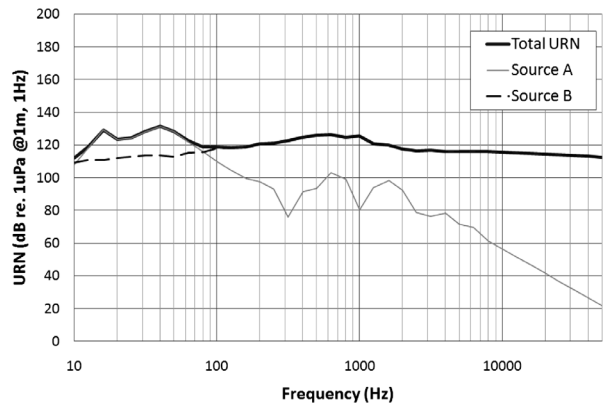


Fig. 5 URN analysis result in case of rigid mounted sources



(a)



(b)

Fig. 6 URN reduction effect by using resilient mount for which the first natural frequencies are (a) 10Hz and (b) 5Hz, respectively

할 수 있다. 이는 Source A에 설치된 탄성마운트가 저주파수 영역보다 고주파수 영역에서 진동감소효과가 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 탄성마운트의 1차 고유진동수가 10Hz에서 5Hz로 낮아질수록 탄성마운트 진동감소 효과가 커짐도 확인할 수 있다. 따라서 탄성마운트를 이용한 URN 감소효과를 극대화하기 위해서는 가능한 한 유연한 탄성마운트를 선정하는 것이 바람직할 것

으로 판단된다.

이상의 결과로부터 전달함수 기반의 URN 해석방법을 바탕으로 구현된 프레임워크를 이용해 선박 URN 해석 및 설계 시 소음원 수준 및 감소대책 수립을 위한 trade-off 수행에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결론

본 연구에서는 전달함수 기반의 URN 해석방법 및 절차를 정리하고, 이를 바탕으로 선박 URN 평가를 위한 프레임워크를 구현하였다. 또한 구현된 프레임워크를 이용해 가상의 선박에 대한 URN 해석을 수행하고, 소음원의 지지구조 특성에 따른 URN 특성을 살펴보았다. 이를 통해 본 연구결과가 선박 설계 실무에 실용적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 한편, 본 연구결과를 바탕으로 선박 URN 해석기술을 고도화하기 위해서는 기존 URN 해석프로그램과의 입출력자료 표준화, GUI를 포함한 사용자 편의성 증대 등을 고려한 전문 프로그램으로의 확장개발과 함께 본 연구에서 고려한 각종 해석인자들에 관한 세부연구가 병행되어야 할 것으로 사료한다.

참고 문헌

- Bae, S.R. Joen, J.J. & Lee, H.G., 1993. Waterborne Noise Prediction of the Reinforced Cylindrical Shell Using the SEA Technique. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 3(2), pp.155-161.
- Griffiths, G. Enoch, P. & Millard, N.W., 2001. On the radiated noise of the Autosub autonomous underwater vehicle. *ICES Journal of Marine Science*, 58, pp.1195-1200.
- Jeon, J.J. & Ryu, J.S., 2000. An Analysis on the Underwater Radiated Noise of the Submerged Cylindrical Shell. *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, 22-24 June 2000, pp.825-830.
- Lee, H.W. & Hong, S.W., 2001. Development of Sound Radiation Analysis System Using the Results of Power Flow Finite Element Method. *Journal of Acoustical Society of Korea*, 20(7), pp.21-30.
- Morrison, J.L. Milne, H.K. & McKenna, I.H., 2000. *Underwater Radiated Noise; Comments and Recommendations on Gearbox Mounting Arrangement*. BAESYSTEMS.
- Rottrier, P.J., 1999. *Xspect Demo User Guide*. British Aerospace.
- Su, J.H. & Vasudevan, R., 1997. On the Radiation Efficiency of Infinite Plates Subject to a Point Load in Water. *Journal of Sound and Vibration*, 208(3), pp.441-455.
- Wang, W.H. Liou, J.H. Sutton, R. & Dobson, B., 2000. Machine Vibration Induced Underwater Acoustic Radiation. *Journal of Marine Science and Technology*, 8(1), pp.30-40.



김국현