한국소음진동공학회 2011년 춘계학술대회논문집, pp.588~593

선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램 개발

Development of Integrated HVAC Noise Analysis Program for Ships

한주범* · 홍석윤† · 송지훈** · 김노성*** · 천승현***

Ju-Bum Han, Suk-Yoon Hong, Jee-Hun Song, Nho-Seong Kim and Seung-Hyun Chun

Key Words : HVAC System(HVAC 시스템), HVAC Noise(HVAC 소음), Duct Noise(덕트 소음), Fluid Flow Noise(유동 소음), Pressure Drop(압력 손실)

ABSTRACT

The Main design parameters of ship HVAC systems are pressure drop and noise analysis of ducts. The Noise prediction for HVAC(Heating, Ventilating and Air Conditioning) systems are normally performed by empirical method suggested by NEBB(National Environmental Balancing Bureau, 1994), but NEBB's method is not suitable for the ship HVAC systems. In this paper, numerical analysis methods are used to develop a noise prediction method for the ship HVAC systems, especially for large ducts. To develop regression formula of attenuation of sound pressure level in large duct, Boundary Element Method(BEM) is used. Using dynamic loss coefficient which is suggested by ASHRAE fitting data base and numerical methods of HVAC noise analysis, integrated HVAC noise analysis of Program is developed. The developed program can present pressure drop and noise analysis of the ship HVAC systems. To verify the accuracy and convenience of the developed program, prediction of HVAC system for Semi-Submersible Drilling RIG is carried out and the results are compared with measurement of noise level during sea trial.

1. 서 론

최근 국내 조선 관련 업계에서도 해양특수선, 크루즈선에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 크루즈선의 경우 HVAC(Heating, Ventilation and Air-Conditioning) 시스템이 다른 어느 선박보다 중요시 되고 있으며, 이에 대한 연구는 국내의 경우 시작 단계이며, 이를 계기로 선박용 HVAC 시스템에 대한 관심은 상당히 높아지고 있다.

일반적인 HVAC 시스템 설계 항목으로는 각 덕트의 압력손실(Pressure Loss)과, 각 Room 별 소음해석(Noise Analysis)등이 있다. 배관 요소들로 이어져 있는 HVAC 시스템은 특성상 팬(Fan), 공조기 등에서 발생하는 1 차 소음과 배관요소 내에서 유동의 난류 등에 의해 발생하는 2 차 소음이 배관을 통해 출구단까지 쉽게 전달되는 문제가 있다. 이러한 이유로 프로펠러 및 엔진 등 주요 구조 및 공기 소음원으로부터 멀리 위치한 선실에서는 HVAC 시스템의 소음이 주요 소음원으로 여겨진다. 그리고 선박에서 HVAC 시스템은 설치 이후 수정이 매우 어렵기 때문에 초기 설계 단계부터 높은 수준의 소음 예측이 요구된다. 특히 소음에 관하여 매우 엄격한 기준치를 가지는 여객선의 경우 더욱 정확한 HVAC 시스템의 소음예측이 필요하다.

일반적으로 HVAC 시스템의 소음예측을 위하여 National Environment Balancing Bureau(NEBB)에서 제시한 경험적 계산 방법[1] 을 이용한다. 이 방법의 경우 건축용 HVAC 시스템의 소음예측을 목적으

† 홍석윤; 서울대학교 조선해양공학과
E-mail : syh@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-8757, Fax : (02) 888 - 9298
* 서울대학교 조선해양공학과
** 전남대학교 조선해양공학과
*** 대우조선해양 진동소음 R&D

로 제작되었는데 선박의 경우 건축용 HVAC 덕트(Duct)와 비교하여 상대적으로 크기가 큰 덕트가 사용되므로 이런 부분은 NEBB 의 방법이 잘 반영하지 못하는 한계점이 있다.

선박 HVAC 시스템의 특징이라고 볼 수 있는 대형 덕트는 그 크기로 인하여 실험 및 관련 연구가 없는 상황이다. 기존에 연구되지 않았던 대형 덕트의 단위길이당 음압감소량을 구하기 위하여 수치해석 기법인 경계요소법(BEM; Boundary Element Method), 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)을 사용하였으며, 이로부터 대형 덕트의 사이즈에 따른 추정식을 개발하였다. 경계요소법 상용해석코드인 SYSNOISE 와 전산유체역학 상용해석코드인 FLUENT 를 사용하여, 대형 덕트의 유동해석을 수행한 후 이를 통해 얻어지는 이중극소음원을 경계조건으로 하여 SYSNOISE 를 통해 음향 해석하였다. 본 논문에서 연구 대상이 된 대형 덕트는 단면이 1m x 1m 이상의 사이즈의 사각덕트만을 선정하였다.

본 논문에서는 NEBB 에서 제안하는 경험적 계산방법과 대형 덕트의 단위길이당 음압감소량을 통해 HVAC 소음해석을 할 수 있고, ASHRAE fitting Data Base[2]에서 제안하는 동적손실계수를 이용하여 덕트의 압력손실을 계산할 수 있는 선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램을 활용하여 실선의 HVAC 소음해석을 수행하였으며, 계측결과와의 비교를 통해 프로그램의 신뢰성을 검증하였다.

2. 선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램의 해석적 방법

2.1 대형 덕트의 단위길이당 음압 감소량

덕트에서의 음압감소에 영향을 미치는 것은 덕트 벽면에 의한 흡음이다[3]. SYSNOISE의 임피던스(Impedance) 경계조건을 활용하면 덕트의 흡음률을 알 경우에 덕트내에서의 음압 감소량을 구할 수 있다. 하지만 덕트를 구성하는 물질이 동일하더라도 덕트 단면적(A)과 덕트 단면 둘레의 길이(P) 비율에 따라서 서로 다른 흡음률을 가지게 된다[4].

P와A의 비율이 서로 다른 덕트의 흡음률을 계산할 수 있는 방법이 없기 때문에 이를 구하기 위해서 Table 1[4]에 정리된 단위길이당 음압 감소량 값을 기준으로 하여 흡음률 값을 0부터 0.01씩 증가시켜가며 실험 결과와 같은 해석 값을 보여주는 흡음률 값을 찾는다.

해석에 사용한 모델은 Fig 1과 같은 대형 덕트로 길이는 덕트의 특성이 잘 나타날 수 있도록 5m로 충분히 길게 하였다. 요소수는 모든 해석 모델에 대해서 하나의 파장에 6개의 요소가 포함될 경우 신뢰성 있는 해석이 가능하다는 조건에서 신뢰성 있는 해석 가능 주파수가 855Hz가 되는 수준으로 나누었다.

모델의 경계조건은 Fig 1과 같이 덕트의 한쪽 끝단은 스피커가 있는 것과 같은 조건을 주기 위해서 진동판넬(Vibrating Panel) 조건을 주었고, 다른 쪽 끝 단의 임피던스는 반사파가 없이 무한히 이어지는 덕트라는 조건을 주기 위하여 공기의 임피던스를 설정하였다. 그리고 나머지 덕트벽면은 흡음률 값을 입력하였다. Fig 2에는 단위길이당 음압 감소량 결과를 얻기 위한 해석 절차를 표시하였다.

SYSNOISE 해석 후, 대상 덕트 모델의 중앙선을 필드포인트(Field Point)로 잡고, 그 필드포인트의 길이방향 음압의 변화 값을 전체 길이로 나눔으로써 대형 덕트의 단위길이당 음압감소량을 구하였다.

Table 1 Sound attenuation in unlined rectangular ducts

	Attenuation (dB/ft)		
P/A(1/ft)	63 Hz	125 Hz	250 Hz
8.0	0.35	0.19	0.09
4.0	0.31	0.24	0.10
3.0	0.35	0.29	0.13
2.0	0.20	0.20	0.10
1.0	0.20	0.20	0.10
0.7	0.10	0.10	0.05

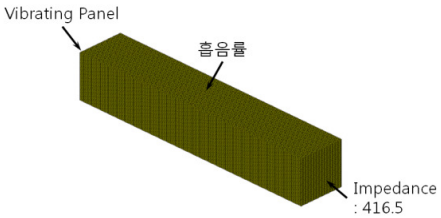

Fig 1 Boundary condition of duct model to analyze attenuation of sound pressure level

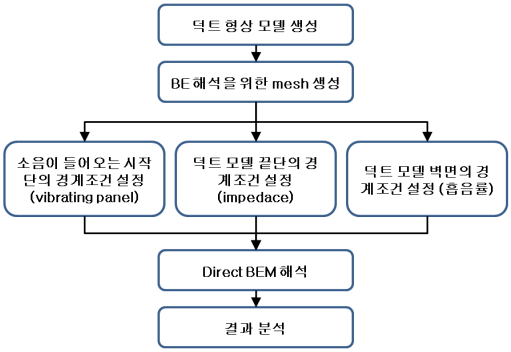

Fig 2 BE analyze procedures

Table 2는 Table 1의 실험 결과를 참조로 하여 해석한 결과를 나타내며, 이를 바탕으로 P/A를 변수로 하는 각 주파수별 흡음률 근사식을 식 (1)-(4)와 같이 유도하였다.

$$\alpha_{63} = 0.1387e^{-0.048(P/A)} \quad (1)$$

$$\alpha_{125} = 0.1341e^{-0.055(P/A)} \quad (2)$$

$$\alpha_{250} = 0.0738e^{-0.085(P/A)} \quad (3)$$

$$\alpha_{500} = 0.012 \quad (4)$$

식 (1)-(4)의 흡음률 근사식을 이용하여 대형 덕트의 경계요소해석을 수행하였으며, Table3과 같이 덕트의 크기별 따른 단면 비율에 따른 단위 길이당 음압 감소량을 구하였다. 이를 이용하여 대형 덕트의 주파수별 단위 길이당 음압 감소량을 식(5)-(9)와 같이 나타내었다. 식(5)-(7)은 P/A가 2.667이하인 경우, 식(8)은 P/A가 1.53이상 2.667 이하인 한 경우, 식(9)는 P/A가 1.53미만인 경우에 적용할 수 있다.

Table 2 Absorption coefficient calculated from results of SYSNOISE

P/A	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
26.316	0.04	0.035	0.009	0.0095
13.115	0.07	0.0535	0.0175	0.012
9.836	0.102	0.085	0.039	0.014
6.557	0.088	0.088	0.0425	0.012
3.281	0.126	0.126	0.066	0.016
2.187	0.129	0.127	0.061	0.0085

Table 3 Size of analysis model and P/A

mm x mm	P/A	mm x mm	P/A
1500x1500	2.667	2100x2100	1.905
1500x1650	2.545	2100x2250	1.841
1500x1800	2.444	2250x2250	1.778
1500x1950	2.359	2250x2400	1.772
1500x2100	2.286	2400x2400	1.667
1650x1650	2.424	2600x2600	1.538
1650x1800	2.323	2600x2800	1.484
1650x2100	2.165	2600x3000	1.436
1650x2250	2.101	2600x3400	1.357
1650x2400	2.045	2800x2800	1.428
1800x1800	2.222	2800x3000	1.38
1800x1950	2.137	2800x3400	1.302
1800x2250	2.000	3000x3000	1.333
1800x2400	1.944	3000x3400	1.254
1950x1950	2.051	3400x3400	1.176
1950x2100	1.978		

$$ATT_{63} = 0.1342(P/A) + 0.0279 \quad (5)$$

$$ATT_{125} = 0.0986(P/A) + 0.0947 \quad (6)$$

$$ATT_{250} = 0.9346(P/A)^5 - 9.3906(P/A)^4 + 37.163(P/A)^3 - 72.282(P/A)^3 + 69(P/A) - 25.663 \quad (7)$$

$$ATT_{500} = -0.9146(P/A)^5 + 9.3906(P/A)^4 - 42.187(P/A)^3 + 89.037(P/A)^2 - 92.622(P/A) + 37.99 \quad (8)$$

$$ATT_{500} = 0 \quad (9)$$

여기서 ATT는 단위길이당 소음감소량(dB/m)이고, 아래첨자는 주파수를 나타낸다.

2.2 덕트의 압력손실

덕트의 압력 손실이란 덕트내의 공기속도와 덕트형상에 의해 발생되는 마찰 또는 와류에 의한 압력손실을 말하며, 이는 마찰손실과 동적손실의 합으로 정의할 수 있다.

마찰손실은 유체점성과 층류흐름에서의 분자들, 난류흐름에서의 다른 속도로 움직이는 유체층에 인접한 각각의 입자들간의 운동량의 교환으로 인해 발생한다. 마찰손실은 식(10)과 같이 Dracy의 법칙

으로 나타 낼 수 있다.

$$\Delta p_f = \frac{fL}{D_h}\frac{\rho V^2}{2} \qquad (10)$$

여기서 L은 덕트의 길이, D_h는 덕트의 지름, V는 속도, ρ는 밀도를 나타내며 f는 무차원화된 마찰계수를 의미한다. 무차원화된 마찰계수는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_h} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0.25} \qquad (11)$$

여기서 ε은 재료의 절대 거칠기 계수, Re는 레이놀즈수를 의미한다.

유체의 급격한 방향 및 속도의 변화로 인해 난류흐름이 발생하는 곳에서는 비슷한 길이의 직관 덕트보다 더욱 더 큰 전압손실이 발생한다. 이러한 직관마찰보다 더 큰 초과손실양을 동적손실이라고 하며, 식 (12)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta p_j = C\frac{\rho V^2}{2} \qquad (12)$$

여기서 C는 동적손실계수를 의미하는데, 동적손실계수는 무차원화되어 있으며, 덕트 요소별로 실험을 통해 결정된다. 그러나 이러한 동적손실계수는 모든 덕트 요소들에 대해 나와있지 않기 때문에 ASHRAE Fitting Database에 등재된 데이터만을 활용하였다[4].

3. 선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램 개발

앞서 연구한 대형 덕트의 소음특성과 NEBB에서 제시한 경험적 계산 방법, ASHRAE Fitting Database에서 제안하는 동적손실계수를 이용하여 선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램을 개발하였다.

선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램은 덕트를 모델링 할 수 있는 프로그램인 Tribon으로 제작한 덕트망을 Import하여 Fig 3과 같은 덕트 모델을 구현 할 수 있다.

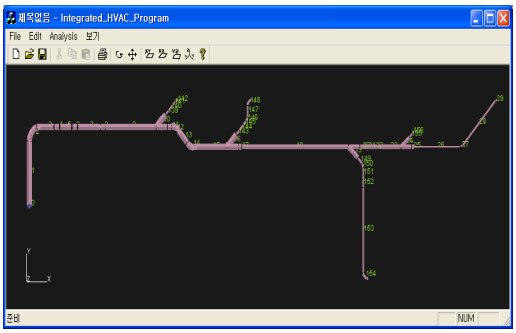

Fig 3 Imported Duct Model

선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램은 모델링 결과를 바탕으로 HVAC 소음해석 및 압력손실을 해석할 수 있으며, 해석 결과를 보기 위한 전처리 및 후 처리 기능을 제공하여 HVAC 시스템 및 격실에서의 소음 수준과 각 덕트의 압력손실을 쉽게 확인 할 수 있도록 하였다. Fig 4는 HVAC 소음해석 결과의 컬러맵(Color map)을 나타내며 Fig 5는 각 덕트의 압력 손실 값을 나타낸다.

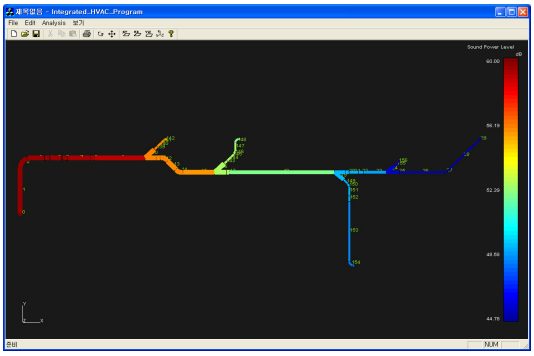

Fig 4 Noise Analysis Result of HVAC

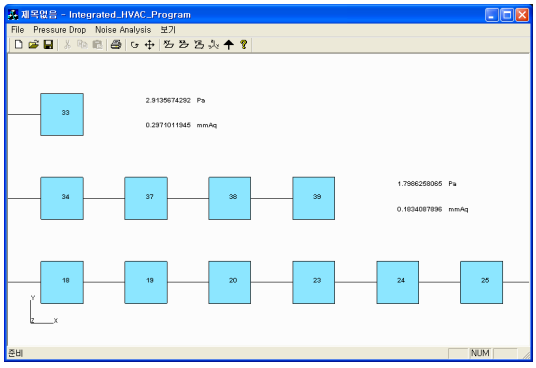

Fig 5 Pressure Drop Result of Duct

4. 소음해석결과와 계측결과와의 비교

선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램을 사용하여 Fig 6과 같이 Semi-Submersible Drilling RIG의 Navigation Deck, 3rd Accommodation Deck, 2nd Accom-modation Deck을 대상으로 HVAC 소음해석을 수행하고 시운전 중의 계측결과와 비교 하였다.

해석결과 및 계측결과는 Fig 7, Table 9와 같다. 해석 결과와 계측결과를 비교하면 해석결과가 전체적으로 더 작은 것을 확인 할 수 있는데, 계측이 주기관 운행 중일 때 수행되었기 때문에 주기관 소음의 영향으로 인해 계측결과가 해석 결과보다 더 크게 나오는 것으로서 경향상 맞는 결과라고 할 수 있다. HVAC Room은 HVAC 소음이 다른 구간에 비해 영향이 크기 때문에 해석결과와 계측결과의 차이가 0.7 dB(A)로 상대적으로 적은 차이를 보인다는 것을 확인하여 해석의 정확성을 확인할 수 있었다.

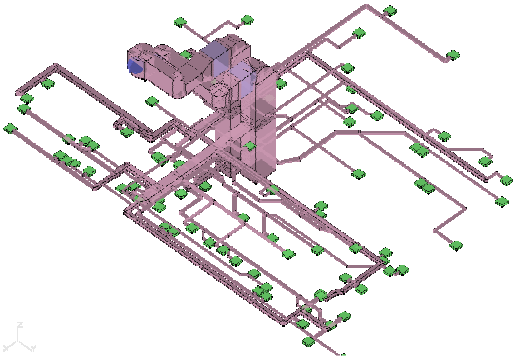

Fig 6 Model of HVAC System

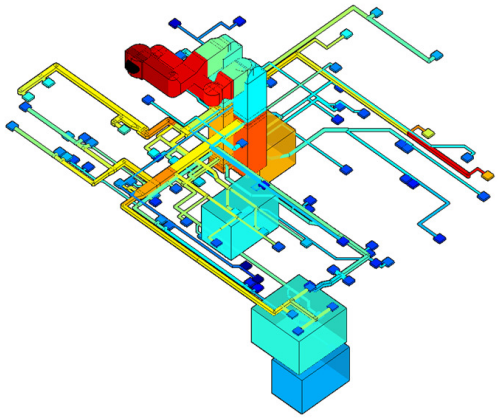

Fig 7 Noise Analysis Result of HVAC System

Table 9 Comparison of noise analysis and measurment

	해석결과 (dB(A))	계측결과 (dB(A))
Helideck Lounge	54.1	58.7
Conf. Room	52.8	57.3
HVAC Room	76.8	77.5
Cabin	44.9	47.4

5. 결론

선박에 주로 사용되는 대형 덕트의 소음해석을 수행하기 위해 수치해석기법인 경계요소법과 전산유체역학을 이용하여 대형 덕트의 단위길이당 소음감소량을 구하였다. 대형 덕트의 소음특성과 NEBB 가 제시한 경험적 방법, ASHRAE Fitting Database 에서 제안하는 동적손실계수를 이용하여 선박용 통합 HV-AC 소음해석 프로그램을 개발하였다. 개발한 선박용 통합 HVAC 소음해석 프로그램은 선박에 사용되는 HVAC 시스템의 소음해석을 수행할 수 있으며, 덕트의 압력손실을 계산할 수 있다. 개발한 프로그램을 이용하여 Drilling Rig 의 HVAC 소음해석을 수행하였으며, 계측결과와의 비교를 통해 프로그램의 신뢰성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 대우조선해양㈜, BK21 의 지원으로 수행하였으며, 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) David, W., Bevirt, P. E., 1994, Sound and vibration design and analysis, National Environmental Balancing Bureau.

(2) ASHRAE, 1994, Duct fitting database.

(3) Irwin, J. D., Graf, E. R., 1979, Industrial noise and vibration control, Prentice-Hall, Inc.

(4) Raynolds, D. D., Beldsoe, J. M., 1989, Sound attenuation of unlined and acoustically lined rectangular ducts, ASHRAE Transcations, Vol. 95, Pt1

(5) Cumming, A., 2001, Sound transmission through

duct walls, Journal of Sound and Vibration, Vol. 239, p.731~765

(6) Cumming, A., 1978, Low frequency acoustic transmission through the walls of rectangular ducts, Journal of Sound and Vibration, Vol.61, p.327-345

(7) Hong, J. M., Choi, T.M., 2001, Prediction of HVAC System Noise by Acoustic Power Balancing Method, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference. pp. 1306~1312.