

공조시스템 유기 격실 소음 예측 프로그램 개발

Development of Cabin Noise Prediction Program Induced by HVAC System

。 김병희* · 조대승[†] · 권종현**

Byung-Hee Kim, Dae-Seung Cho and Jong-Hyun Kwon

Key Words : HVAC system(공조 시스템), NEBB Empirical Method(NEBB 경험식 방법), Acoustic power balancing method(음향파워 평형방법), Attenuation(감쇠), Transmission(투과), Cabin Noise(격실 소음)

ABSTRACT

In this paper, we introduce noise prediction program of HVAC system to assist low-noisy design of ship's cabin. The developed program calculates sound power levels at HVAC components considering primary and secondary noise generated by fan and duct element, duct element noise attenuation, and duct break-in noise based on the authentic empirical method suggested by NEBB and acoustic power balancing method. Sound pressure level at cabin with or without ceiling system is evaluated by the diffuse-field theory considering diffuser and duct break-out sound powers. Moreover, the program provides intuitive pre- and post-processors using modern GUI functions to help efficient modeling and evaluation of cabin and HVAC component noise. To validate the accuracy and convenience of the program, noise prediction for a HVAC system is demonstrated.

1. 서 론

대형 상선 및 고급 여객선의 선실 소음수준은 선체 구조부재의 진동으로 전달되는 고체 전달음, 격실 경계면을 투과하여 전달되는 공기 전달음 및 공조시스템(HVAC system)의 배관으로 전달되는 소음에 의해 결정된다. 특히, 공조 시스템 소음의 경우 팬, 공조기 등의 기기 구동에 의한 1차 소음은 물론 유속을 갖는 공기가 뎅퍼(damper), 엘보우(elbow), 분기판(junction), 확산기(diffuser) 등의 각종 배관 요소를 통과할 때 발생하는 2차 소음으로 인해 고체 전달음 및 공기 전달음의 기여도가 적은 선실의 주요 소음원으로 간주되고 있다.⁽¹⁾ 따라서, 공조 시스템의 각 위치별 음향파워를 정도 높게 예측할 수 있어야만 격실 소음의 예측 정확도 향상과 함께 효과적이고도 경제적인 선실 방음설계를 도모할 수 있다.

공조 시스템의 소음해석은 파동음향학, 통계적 에너지해석기법, 경험적 방법 및 음향파워 평형방법(acoustic power balancing method) 등을 이용하여 수행할 수 있다.

* 책임저자 ; 정희원, 부산대학교 조선해양공학과

E-mail : daecho@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-2482, Fax : (051) 512-8836

* 정희원, 부산대학교 대학원 조선해양공학과

** 정희원, 한진중공업(주) 기술연구소

이들 각각의 방법은 나름대로 장·단점이 있으나 일반적으로 소음예측의 편이성과 효율성이 뛰어난 경험식 방법이 가장 널리 활용되고 있다.

경험식 방법은 이론 해석 또는 실험 등의 방법으로 구한 각 배관요소의 음향 발생 및 전달 특성을 이용하여 팬 또는 공조기로부터 배관 출구단까지의 각 위치별 음향파워를 순차적으로 계산한다. 이 방법은 비교적 간단하게 소음예측이 가능하여 국내 조선사 등에서도 미국 조선학회에서 제시한 경험식 방법⁽²⁾을 토대로 개발된 공조 시스템 소음 예측 프로그램⁽³⁾을 사용하고 있다. 그러나, 기존의 프로그램은 복잡한 배치를 갖는 공조 시스템의 모델링이 용이하지 않을 뿐만 아니라 격실의 음향특성을 고려할 수 없으며, 각 배관요소에 대한 음향특성치 자료가 1980년대 이전의 것으로서 최신의 연구 결과가 반영되어 있지 않다.

한편, 각 배관 요소에서의 음향 발생 및 감쇠는 물론 인접한 배관 요소간의 음향파워 전달과 반사를 고려할 수 있는 음향파워 평형방법^(4,5)은 복수 개의 팬 또는 공조기가 존재하거나 순환(loop) 관로 등이 있어 경험식 방법으로 해석하기 어려운 배치를 갖는 공조 시스템에 대한 소음예측이 가능하다. 그러나, 상기 방법의 적용에 필요한 각 배관요소별 음향 전달 및 반사특성 규명에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 효율적이고도 경제적인 저소음 선실 설계

를 도모하고자 3차원 GUI(graphic user interface)을 이용한 모델링과 결과 확인 기능을 제공하고, 팬과 공조기 등에서 발생된 1차 소음, 배관 요소 내부에서의 공기 유동으로 인한 2차 소음과 감쇠, 배관 break-in과 break-out 소음 및 격실 음향 특성 등을 고려한 공조 시스템 유기 격실 소음 해석 프로그램을 개발하였다.

개발된 프로그램은 HVAC 구성 요소 및 격실을 음향 발생, 전달 및 반사 특성에 따라 점(point) 요소, 배관(duct) 요소, 챔버(chamber) 요소 및 격실(room) 요소로 분류한다. 또한, HVAC 구성 요소에 대한 음향 특성치는 NEBB에서 제시한 경험식을 이용해서 산정하거나 사용자가 지정할 수 있다. 한편, 공조 시스템 각 구성 요소에서의 음향파워 계산은 최신의 공신력 있는 경험식 방법으로 평가되는 미국 National Environmental Balancing Bureau (NEBB)⁽⁶⁾의 방법과 음향파워 평형방법을 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다. 아울러, 공조시스템 유기 격실 소음은 확산기(diffuser)의 경우 점 소음원, 배관 break-out 음향파워는 선 소음원으로 간주하여 확산음장이론으로 계산하되, 배관 break-out 소음의 경우 천정 유형에 따른 투과손실을 고려할 수 있다. 개발된 프로그램의 정확도와 편의성은 수치계산을 통해 검증하였다.

2. 공조 시스템 소음해석

2.1 NEBB 경험식 방법

본 연구에서 적용한 NEBB 경험식 방법은 미국 공조협회(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE)에서 제시한 자료^(7,8)를 중심으로 미국 정부기관 주도에 의해 마련된 것으로서 공조 시스템 소음예측에 적용할 수 있는 최신의 공신력 있는 경험식 방법에 해당한다.

상기 방법은 팬과 같은 장비의 음향 파워는 물론 유속을 갖는 공기가 댐퍼(damper), 엘보우(elbow), 분기관(junction), 확산기(diffuser) 등의 각종 배관 요소를 통과할 때 발생하는 공기 동역학적 음향파워를 유속, 배관 형상 등의 정보를 이용해서 중심주파수 기준 63Hz부터 8kHz까지 1/1 옥타브 밴드별로 산정할 수 있는 경험식을 제공한다. 또한, 플래넘 챔버(plenum chamber), 직선 배관, 엘보우, 소음기, 배관 출구단에서의 음향 전달손실 계산 방법과 분기단에서의 음향파워 분배 방법을 정의하고 있으며, 배관 경계면을 투과하여 입사 또는 방사되는 음향파워를 산정할 수 있는 방법 등을 소개하고 있다.

상기 NEBB 경험식 방법은 팬과 같은 1차 소음원으로부터 배관 출구단까지 순차적으로 연결된 공조 시스템의 각 위치별 음향파워레벨 또는 음압레벨을 비교적 정밀하게 평가할 수 있으나, 2개 이상의 1차 소음원 또는 순환(loop) 관로 등이 있는 공조 시스템에 대해서는 적용하기 어렵다.

또한, 엘보우, 분기관 등에서 발생된 2차 소음이 공기 흐름 경로의 역방향으로 전달되는 음향파워를 고려할 수 없다는 단점이 있다.

2.2 음향파워 평형방법^(4,5)

음향파워 평형방법은 각 배관 요소에서는 물론 인접한 배관요소 결합부에서의 음향파워의 감쇠, 투과 및 반사 효과를 반영하여 공조 시스템 전체 음향파워 평형 관계식

$$BW = \Pi \quad (1)$$

여기서,

B: 각 배관요소의 음향 파워 감쇠, 전달 및 반사 특성을 나타내는 $2m \times 2m$ 행렬

W: 배관 요소의 결합점 좌우에서의 음향파워를 나타내는 $2m \times 1$ 벡터

\Pi 팬과 같은 1차 소음원과 배관 내부의 공기 동역학적 2차 소음 및 배관 외부에서 입사되는 소음에 의한 음향발생파워를 나타내는 $2m \times 1$ 벡터

m: 배관 결합점의 개수

을 도출하여, 각 결합점에서의 음향파워를 산정하는 방법이다.

상기 방법은 원리적으로 파동효과가 적은 고차모드 주파수 영역에서 공조 시스템 소음을 정도 높게 해석할 수 있다. 또한, 경험식 방법의 적용이 곤란한 순환 관로 및 복수 개의 1차 소음원이 있는 공조시스템에 대해서도 적용 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 현재 본 방법의 적용에 필요한 플래넘 챔버, 엘보우, 분기관 등의 배관 요소에 대한 정밀한 음향 전달 및 반사 특성 평가에 관한 연구 자료가 부족한 실정이다..

3. 격실 소음해석

공조 시스템 소음은 공기 공급구인 확산기와 배관 break-out 소음이 천정부를 투과하여 격실에 전달된다. 본 연구에서는 확산기와 배관 break-out 소음으로 인한 격실 내 임의 지점에서의 음압레벨을 확산음장이론에 의거하여 다음과 같이 산정하였다.

확산기

$$L_{pl} = L_{w1} + 10 \log \left\{ \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right\} \quad (2)$$

배관 break-out 소음

$$L_{pl} = L_{w1} + 10 \log \left(\frac{1}{\pi r L} + \frac{4}{R} \right) - TL_c \quad (3)$$

여기서, L_{w1} 는 확산기 토출부에서의 음향파워레벨, L_{w1}

은 배관 break-out 소음의 음향파워레벨, r 은 소음원으로부터 수음점까지의 거리(m), R 은 실정수, L 은 해당 격실의 천정부를 통과하는 배관 길이(m), TL_c 은 격실 천정부 재료와 시공 방법에 따른 투과손실(dB)이다. 한편, L_{Ww} 는 다음과 같이 산정⁽⁶⁾하였다.

$$L_{Ww} = L_W + 10 \log \frac{A_o}{A_i} - TL_d \quad (4)$$

여기서, L_W 는 배관 내부에서의 음향파워레벨, A_i 는 배관 내부 단면적(m^2), A_o 는 배관 외부에서의 음향 방사 면적(m^2)이고, TL_d 는 배관 내부에서 외부로 투과되는 소음의 전달 손실(dB)이다.

하나의 격실에 다수의 확산기 또는 배관 break-out 소음의 전달 경로가 있는 경우의 격실 음압레벨은 각각의 전달 경로에 대해서 계산된 음압레벨을 대수 합하여 계산할 수 있다.

4. 공조 시스템 소음예측 프로그램

본 연구에서는 전술한 NEBB 경험식 방법과 음향파워 평형방법을 선택적으로 적용할 수 공조 시스템 소음예측 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 상기 2가지 방법에 의한 소음해석 프로그램, 배관요소의 흡음률과 투과 손실 자료 관리를 위한 데이터베이스 프로그램 및 이의 통합 운영과 모델링 및 소음예측 결과 확인을 위한 전·후처리 프로그램으로 구성되어 있다.

한편, 소음예측을 위한 공조시스템 구성 요소들은 다음과 같은 4가지 요소들을 이용해서 모델링하도록 하였다.

점(point) 요소

공조시스템 구성 요소의 위치를 지정하기 위한 좌표 정의와 함께 음향파워 평형방법에서 요구되는 배관 단부 및 단면적 변화부에서의 반사율을 지정하기 위한 요소이다.

직선 배관(duct) 요소

2개의 점 요소를 이용해서 직선 배관과 소음기의 위치를 지정하고, 이들의 전달 감쇠량과 배관 break-in 및 break-out 소음 산정에 필요한 형상 및 음향 특성치를 정의하기 위한 요소이다.

챔버(chamber) 요소

팬과 같은 1차 소음원, 감쇠만 발생하는 플래텀 챔버 및 감쇠와 함께 2차 소음이 동시에 발생하는 뎁퍼, 확산기, 굴곡부, 분기관 등의 위치와 형상 및 음향 특성치를 정의하기 위한 요소이다.

격실 요소

공조시스템이 연결된 격실과 이의 음압레벨 산정에 필요한 특성치를 정의하기 위한 요소이다.

개발된 프로그램에서는 직선 배관과 챔버 요소의 음향특성치를 NEBB 경험식으로 산정하거나 계측치 등을 사용자가 별도로 지정할 수 있다. Fig. 1에는 트리 형태로 분류된 요소별 자료입력 창을 예시하였다.

Type	Description	Element	Parameters
1 Duct	PF16	NE30 estimation	Type: Duct
2 Duct	PF12	NE30 estimation	Inside Duct Diameter(1/m): 0.160000
3 Duct	PF10	NE30 estimation	Inside Duct Depth(2/m): 0.160000
4 Duct	PF8	NE30 estimation	Using Thickness(1/m): 0.000000
5 Duct	PF15/12	NE30 estimation	Description: Duct1
6 Duct	PF12/9	NE30 estimation	Description: Duct2
7 Duct	PF20	NE30 estimation	Description: Duct3
8 Unifrect	HuOut1	NE30 estimation	Breakout: FALSE
9 Unifrect	HuOut2	NE30 estimation	Breakout: FALSE
10 Unifrect	HuOut3	NE30 estimation	Breakout: FALSE
11 Unifrect	HuOut4	NE30 estimation	Breakout: FALSE

Fig. 1 Window to define HVAC system element properties

한편, 개발된 프로그램은 3차원 GUI 기능을 이용한 공조 시스템 구성 요소 및 격실의 모델링 기능과 함께 소음예측 결과를 소음 맵, 차트 및 문자로 확인할 수 있는 기능을 제공한다. 개발된 프로그램의 주화면과 이를 이용한 공조 시스템 소음예측 순서도는 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다.

5. 수치계산 예

본 연구에서 개발한 공조 시스템 유기 격실 소음예측 프로그램의 편의성과 유용성을 검토하고자 NEBB에서 계산 예로 제공하고 있는 Fig. 4에 나타낸 공조 시스템에 대해 소음예측을 수행하였다.

상기 공조 시스템은 총 17개의 결합점을 이용하여 8개의 직선 배관 요소와 1차 소음원인 팬, 2차 소음을 유발하는 분기관, 엘보우 등의 배관요소를 모델링하기 위한 7개의 챔버 요소, 배관 단부의 점 요소 2개 및 1개의 격실 요소로 모델링하였다.

수치계산에 적용된 팬의 음향파워레벨과 소음기와 VAV 유니트(terminal volume regulation unit)의 삽입순서에 대한 자료는 Table 1에 나타내었으며, 격실에 대한 특성치 자료는 Table 2에 나타내었다. 배관요소는 모두 라이닝이 되지 않은 원형 배관이며, 팬의 공급 공기량은 3,302 L/sec 이고, 부 배관을 통과하는 공기량은 337 L/sec 이다. 또한, 분기부, 확산기, 굴곡부에서의 2차 발생 소음과 각 요소의 감쇠량 및 전달율은 NEBB 경험식으로 산정한 값을 사용하였다. 한편, 음향파워 평형방법에 의한 소음해석시 반사율 산정에 필요한 VAV유니트의 내부 표면적과

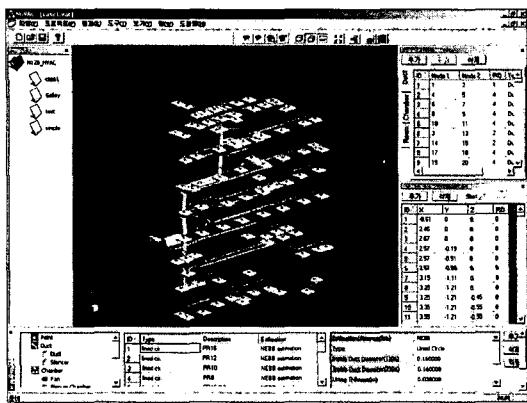


Fig. 2 Main window of the developed program

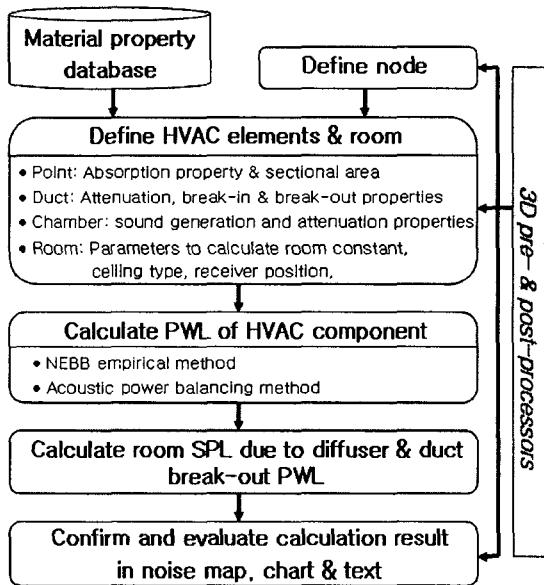


Fig. 3 Procedures to calculate HVAC system and room noise

흡음 특성치는 자료 입수가 곤란하였다. 이에 VAV 유닛은 내부 표면적이 5 m^2 이고, 음향학적으로 전형적인 부드러운 재질의 내부 표면재를 갖는 플래넘 챔버로 모델링하였다.

상기 공조 시스템에 대해 중심주파수 125 Hz와 1 kHz 옥타브 밴드 음향파워 레벨과 총합 음향파워 레벨을 NEBB 경험식 방법과 음향파워 평형방법(PBM)으로 계산한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이로부터 NEBB 경험식 방법과 음향파워 평형방법에 의한 계산결과는 대부분의 위치에서 1 dB 내외의 차이를 나타내나 VAV 유닛부터 확산기까지의 1 kHz 대역에서의 음향출력레벨 산정 결과가 최대

5dB까지의 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 음향파워 평형방법에 있어서 챔버 요소로 모델링된 VAV 유닛의 반사율 산정에 영향을 미치는 내부 표면적과 흡음율에 대한 정확한 자료가 적용되지 않았기 때문인 것으로 판단한다. 한편, 배관 단부에서 양자간의 결과가 부합성이 높은 것은 타 요소로부터 전달된 소음보다 확산기의 2차 발생소음이 지배적이기 때문인 것으로 판단한다.

상기 공조 시스템에 연결된 결실에서의 음압레벨 계산 결과는 Fig. 6에 옥타브 밴드 중심주파수 별로 나타내었는데 NEBB 경험식 방법과 음향파워 평형방법에 의한 결과 차이는 총합 음압레벨 기준으로 0.2 dB(A) 이내이다. 이는 상기 두 방법에 의해 평가된 확산기에서의 음향파월레벨 값이 거의 동일하였기 때문이다.

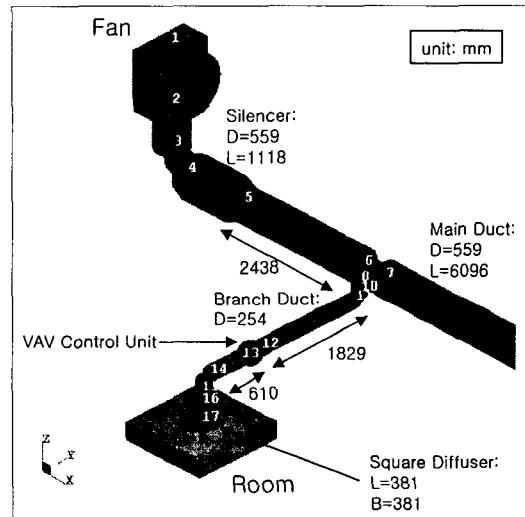


Fig. 4 A HVAC system and its nodes to define elements

Table 1 Fan, silencer and VAV unit properties for the HVAC system noise prediction

dB	Octave Band Center Freq. (Hz)							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Fan (PWL)	92	86	80	78	78	74	71	71
Silencer	3.9	6.8	14.6	11.5	12.5	7.5	7.5	6.5
VAV	0.0	5.0	10.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0

Table 2 Room properties for the HVAC system noise prediction

Room type	Office
Dimension (m)	6.4×5.0×2.3
Absorption property of boundary wall	Typical hard surface
Source to receiver distance (m)	1.0

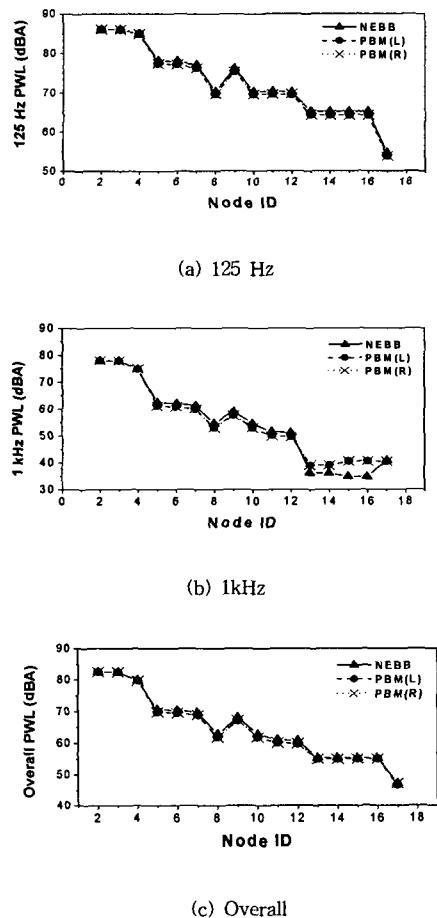


Fig. 5 Sound power levels in duct elements of the HVAC system

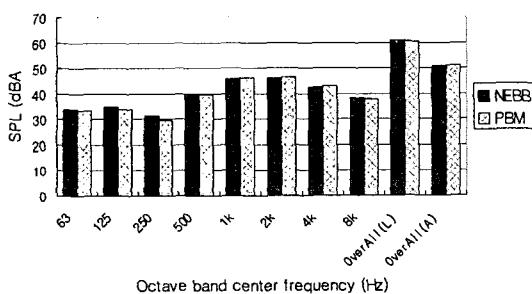


Fig. 6 Sound pressure levels in the room of the HVAC system

6. 결 론

본 연구에서는 NEBB 경험식 방법과 음향파워 평형방법 및 확산음장이론을 이용해서 공조 시스템에 의해 유기되는

격실 소음을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 일련의 수치 계산을 수행하여 개발된 프로그램의 효율성과 유용성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서 적용한 NEBB 경험식 방법은 단일 1차 소음원을 갖고 순환구조를 갖지 않는 통상적인 공조 시스템의 공신력있는 소음예측에 적용할 수 있다.

(2) 음향파워 평형방법은 파동 효과가 적은 배관내의 소음전달 현상을 엄밀하게 반영할 수 있을 뿐만 아니라 소음원의 개수, 배관 구성 요소 및 이의 배치에 상관없이 거의 모든 유형의 공조 시스템의 소음해석에 적용할 수 있다. 그러나, 음향파워 평형방법에 의한 소음예측의 정확도를 향상시키기 위해서는 굴곡부, 분기관 등에서의 음향 반사 및 전달율을 보다 정밀하게 산정할 수 있는 방법에 관한 추가적인 연구가 요구된다.

(3) 본 연구에서 개발한 프로그램은 공조 시스템의 모델링 및 소음예측 결과 확인에 3차원 GUI 기능을 지원하고, 배관 요소는 물론 격실의 음압레벨을 산정할 수 있어 공조시스템의 효율적인 소음예측과 함께 경제적이고도 효과적인 저소음 선실 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- (1) 한국 선급, 1997, 선박 진동·소음 제어지침.
- (2) Fisher, R.W., Burroughs, C.B. and Nelson, D.L., 1983, Design Guide for Shipboard Airborne Noise Control, SNAME TR3-37.
- (3) 해사기술연구소, 1990, “선내 소음예측 프로그램 개발”, BSII1747-1262 · D.
- (4) 西村正治, 林泰道, 北川和夫, 1991, “音響パワーバランスに基づいたダクト騒音豫測法の開発”, 三菱重工技報, Vol. 28 No. 3.
- (5) 조대승 등, 2001, “음향파워 평형방법을 이용한 HVAC 시스템 소음예측”, 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 1306~1312.
- (6) National Environmental Balancing Bureau, 1994, Sound and Vibration Design and Analysis, Maryrand.
- (7) ASHRAE, 1987, Sound and Vibration Control, ASHRAE Systems and Applications Handbook.
- (8) ASHRAE, 1967, Sound Control, ASHRAE Guide and Data Book, Ch. 14.
- (9) Reynolds, D.D., 1981, Engineering Principles of Acoustics - Noise and Vibration Control, Allyn and Bacon.