한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp. 1300~1305.

# GUI Modeling을 기반으로한 선박의 HVAC System 소음 해석

이철원*, 김노성*, 최수현*

# The Noise Analysis of Ship HVAC System Based on GUI Modeling

°Chul-Won Lee, No-Sung Kim, Su-Hyun Choi

## ABSTRACT

One of the main noise sources in cabin onboard ships is HVAC system. Up to now, the HVAC system designer manually calculates the HVAC system noise, or uses the program that is generally based on text user interface. In such a case, it is difficult to use the program and also to obtain the flow induced noise. In this study, the HVAC noise analysis program has been developed, which is based on GUI user interface that include 3-D modelling and model modification modules. For calculation of the insertion loss of HVAC system elements, NEBB experimental data and plane wave theory are used. And in order to obtain the flow rate information in each HVAC elements which is used to calculate the flow induced noise calculation, Global Converging Newton-Rapson Method is used.

## 1. 서론

최근의 선박건조에 있어서의 주요한 특징중 하나는 기존에 중요시 여겨지던 구조적 안정성, 유체역학적 내항성과 더불어 선내 탑승자들의 안락함을 위한 저진동 저소음 설계의 필요성이며 이는 여객선등 일부 고부가가치 선박에 있어서는 가장 중요한 요소로서 대두되어지고 있다.

선박에 있어 선실내부의 가장 큰 소음원중 하나는, 특히 여객선등 저소음 선박의 경우 HVAC System이다. 기존의 HVAC System 소음 저감 대책은 주로 설계자의 경험 및 수 계산에 의존해 왔으며 이 경우 정확한 Flow Induced Noise는 계산이 거의 불가능 하다. 또한 기존의 HVAC System 소음계산 Program의 경우 주로 Text 기반의 User Interface 형태로 이용이 까다롭고 설계 변경의 반영 및 최적화에 이용하기 불편하다.

본 연구는 HVAC System 설계자의 간편한 소음해석을 위하여 GUI Interface, System 정보의 3차원 출력 및 GUI 기반의 System 변경 지원을 목적으로 하였다.

GUI Interface는 Windows MFC를 이용하였으며 Open GL Graphic Library를 이용하여 System 정보를 3차원으로 출력하도록 하였다. 또한 Open GL Picking Library를 이용하여 GUI 기반에서 Model을 변경 가능하도록 하였다.

본 연구에서 HVAC System의 소음은 Fan 으로부터 Duct를 타고 선실내로 유입되는 Duct Borne Noise와 Duct 각 구성요소에서 유체의 흐름으로 인하여 발생되는 Flow Induced Noise로 구분 하였다. 또 HVAC System 구성요소의 Insertion Loss 계산은 NEBB(National Environmental Balancing

* 대우조선 선박해양기술연구소 진동소음연구팀

Bureau) 자료 와 Plane Wave Theory를 바탕으로 하였으며 Flow Induced Noise 계산을 위한 유량 정보는 Newton-Rapson Method를 이용하였다.

## 2. MFC를 이용한 GUI Modeling

### 2.1 System 정보 입력 Algorithm

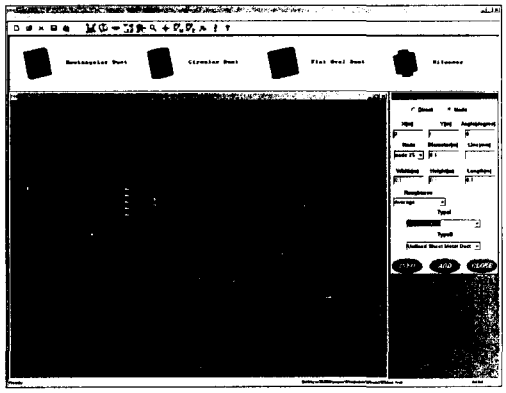

Fig. 1 The Screen for System Informatin Input

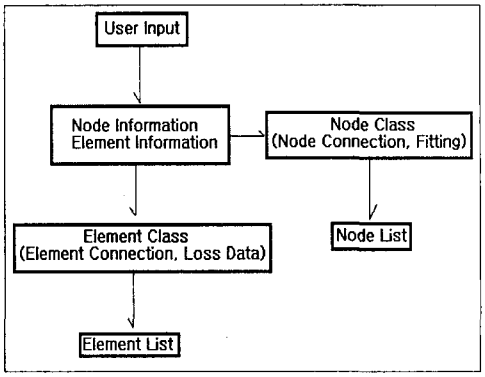


Fig. 2 The Algorithm for saving System Information

본 연구에서 HVAC System의 Model은 크게 Node와 Element로 구성 하였다.

Element는 HVAC System 구성요소들의 기하학적인 형상, 음향 특성치, Node와의 연결 정보를 저장하며 Node는 각 Element의 연결 정보, 점 요소의 음향 특성치를 저장한다.

System 정보의 입력은 Fig.1에 나타난 바와 같이 MFC Dialog Box에서 이루어지며 입력된 정보는 Fig.2와 같이 Node 정보와 Element 정보로 구분되어 각각의 Class에 저장된다. 각각의 Class는 상위 Level의 List Class에 Pointer 형태로 다시 저장되어 Memory Loss 없이 연속적으로 저장된다.

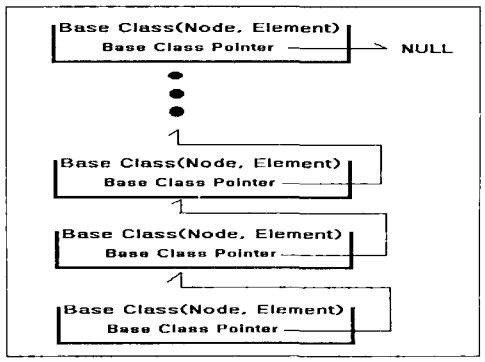


Fig. 3 The Structure of List Class

HVAC System에서는 Branch가 존재함으로 인하여 각 구성요소를 연결 순서대로 저장하는 것이 불가능 하다. 또한 사용자의 자유로운 System 변경 및 구성요소의 추가와 삭제를 고려할 때 일반적인 배열 형태로 저장하는 것 또한 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 Fig.3에서와 같은 Pointer 기반 구조의 List Class를 이용하였다.

### 2.2 경로 검색 Algorithm

본 연구의 주 목적인 HVAC System의 GUI 환경에서 Model Modification 지원과 Flow Induced Noise 계산을 위한 유량 계산을 위하여서는 System 구성 요소간의 연결 상태 정보를 필요로 한다.

본 연구에서는 상술한 바와 같이 List Class에 각 구성 요소를 무작위로 저장하였으므로 경로 검색 (Path Search) Algorithm을 필요로 한다.

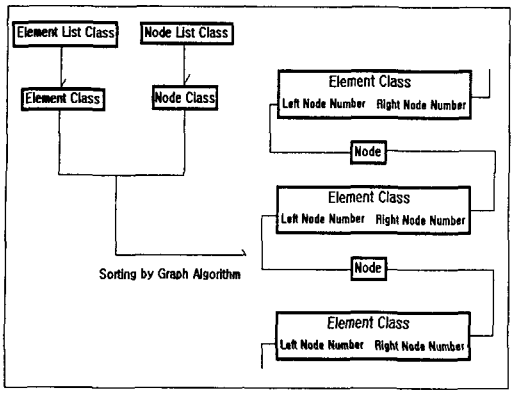


Fig. 4 The Algorithm for Path Search

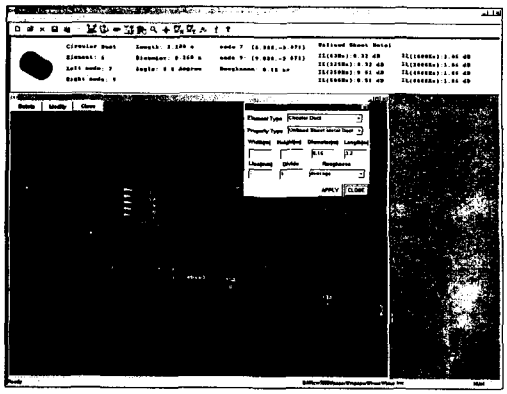

Fig. 5 The Screen for Model Modification

경로 검색은 Main Fan 요소로부터 각각의 Branch 끝단 요소까지 수행되며, Fig.4에 나타낸 바와 같이 Graph Sorting Algorithm을 이용하였다. 각각의 Main Fan과 Branch 끝단 요소를 연결하는 경로 정보는 Element와 Node 정보를 저장하는 List와 같은 구조의 Path List Class에 저장되어 이용된다.

### 2.3 Display & Modification Algorithm

저장된 System 요소들의 3차원 Graphic 처리를 위하여 Open GL Graphic Library를 이용하였으며 System 요소들의 변경을 위해서는 Open GL Picking Library를 이용하였다.

구성요소들의 화면 출력은 경로 검색 Algorithm을 이용하여 저장된 Path List로부터 이루어 진다.

구성요소들이 출력되는 좌표는 사용자의 System 요소 입력을 간소화 하고 System 변경을 자유롭게 하기 위하여 Fan 요소를 원점으로 하여 상대 좌표로 설정하였으며 화면에 출력되어지는 순간의 좌표는 Path List를 이용하여 Fan 요소로부터의 상대 좌표로 구해진다.

각각의 요소들의 출력 형태는 기본 크기의 형태를 미리 저장한 후 각각의 다양한 크기의 요소들을 Open GL Graphic Library의 회전, 병진, 축소, 확대 Routine을 이용하여 출력하도록 하였다.

System 요소들의 변경을 위해서는 Open GL Picking Library를 이용하여 각 요소들이 화면에 출력 되기전 좌표를 Buffer에 저장 후 사용자가 화면에서 한 요소를 Click 할 경우 Fig.5 와 같이 그 요소가 선택되어 지도록 하였다.

## 3. Noise Analysis

### 3.1 Duct Borne Noise

본 연구에서 HVAC System의 주 소음원인 Fan 소음의 Duct를 통한 전달 현상인 Duct Borne Noise의 계산을 위하여 NEBB(National Environmental Balancing Bureau)의 실험 Data의 Regression 값을 이용하여 각 요소들의 Insertion Loss를 구하였으며 일부는 Duct 내부의 음장은 Duct 길이가 충분히 길다면 Plane Wave라고 가정하여 Plane Wave Theory로부터 구하였다.

한 예로서 식 1)은 Unlined Rectangular Sheet Metal Duct의 Insertion Loss를 나타낸다.

$$63 \le f \le 250$$

$$P/A \ge 10 \quad IL = 55.8 * [0.305 \frac{P}{A}]^{-0.25} f^{-0.85} L$$

$$P/A < 10 \quad IL = 5.38 * [0.305 \frac{P}{A}]^{-0.73} f^{-0.58} L$$

$$f > 250$$

$$IL = 0.066 [0.305 \frac{P}{A}]^{0.8} L$$

P: Length of the Duct Perimeter

A: Duct Cross-Sectional Area

L: Duct Length

f: Frequency 1)

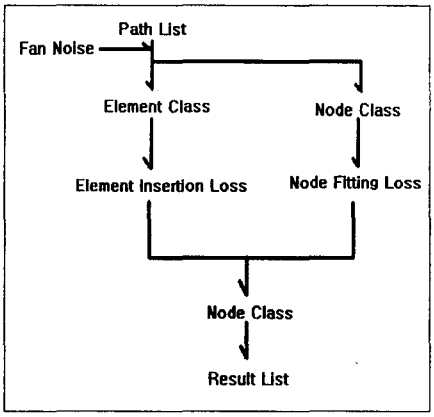


Fig. 6 The Algorithm for Duct Borne Noise Solver

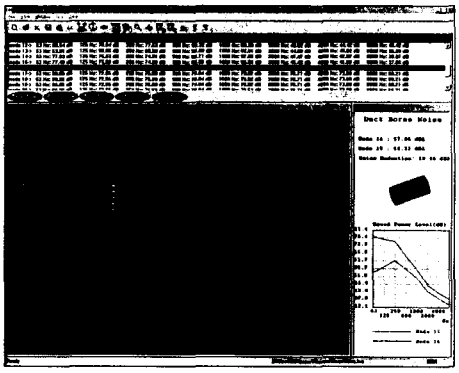

Fig. 7 The Screen for Duct Borne Noise Results

Duct Borne Noise는 Fig.6에 나타낸 바와 같이 Path List로부터 Fan에서 각 Branch에 이르는 경로 정보를 얻어 각 Element의 Insertion Loss와 각 Node의 연결 상태로부터 Sound Power Division 값을 얻어 각 Node 위치에서 Noise 값을 구하여 이를 Node Class에 Noise 결과를 저장하는 새로운 Result List를 만들어 저장하도록 한다. 계산된 각 Node에서의 Noise 값은 Fig.7과 같이 나타내진다.

### 3.2 Flow Induced Noise

HVAC System내에 유체의 흐름으로 인해 발생하는 Flow Induced Noise 계산은 크게 세단계로 구성하였다. 첫 번째 단계는 입력된 System 정보로부터 각 요소에 흐르는 유량 및 압력을 계산하는 과정이며, 두 번째는 첫 단계로부터 얻은 유량 및 압력 정보로부터 각 구성 요소에서 발생 하는 Noise를 계산하는 과정, 그리고 마지막으로는 발생한 Noise가 System에 전파된 경우 각 요소에 부가되어지는 Noise 양을 계산하는 과정이다.

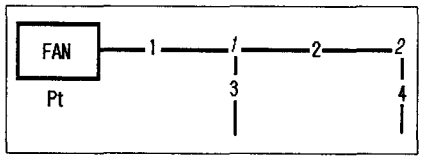


Fig. 8 The Illustrative Fan System

Fan System에서 System의 Governing Equation은 Bernoulli Equation으로부터 다음과 같음을 알 수있다.

$$\sum \triangle P_i - P_T = 0$$

$\triangle P_i$: Total Pressure Loss at section i

$P_T$: Fan Total Pressure 2)

식 2)에서 $\triangle P_i$는 각 section에서의 Pressure Loss를 나타내며, 이는 Duct Element의 Friction Loss, Node 에서의 Fiitting Loss, 높이 차에 기인한 Thermal Gravity Effect로 구성되며 다음과 같다.

$$\triangle P_i = K(Q)\, Q^2 \qquad 3)$$

식 3)에서 Q는 각 요소에 흐르는 유량이며 $K(Q)$는 유량과 각 요소의 형상 및 재질에 의해 결정되어 지는 값이다.

전체 System의 작동 유체를 비압축성 유체로 가정할 경우 각 Node에서 유량은 다음을 만족 해야만 한다.

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out}$$

$Q_{in}$ : Volume Flow entering a Node

$Q_{out}$: Volume Flow exiting from a Node 4)

식 2)와 식 4)로부터 Fig.8에 나타난 System의 유량은 다음과 같은 식으로부터 얻어 질 수 있음을 알 수 있다.

$$F_1 = \triangle P_1(Q_1) + \triangle P_3(Q_3) - P_T = 0$$

$$F_2 = \triangle P_1(Q_1) + \triangle P_2(Q_2) + \triangle P_4(Q_4) - P_{T=0}$$

$$F_3 = Q_1 - Q_3 = 0$$

$$F_4 = Q_2 - Q_4 = 0$$

5)

식 5)는 $\triangle P_i$가 식 3)과 같은 형태로 이루어져 있으므로 Nonlinear Equation이다. 식 5)와 같은 형태의 HVAC System의 Governing Equation을 풀기 위하여 본 논문에서는 Global Conversing *Newton-Rapson Method*를 이용하였다.

Taylor 정리로부터 식 5)의 $F_i$는 다음과 같이 나타 낼 수 있음을 알 수 있다.

$$F_i(\vec{Q} + \delta\vec{Q}) = F_i(\vec{Q}) + \sum \frac{\partial F_i(\vec{Q})}{\partial Q_j} \delta Q_j + O(\delta Q^{-2})$$

6)

이때 식 5)의 해는 Objective Function을 $f(\vec{Q}) = \|F\|$로 할 경우 이의 최소 값을 만족하는 $\vec{Q}$이다. 식 6)으로부터 Objective Function을 감소 시키는 Descent Direction Vector $\delta\vec{Q}$는 다음과 같다.

$$\delta\vec{Q} = -J^{-1}F$$

J: Jacobian Matrix of F 7)

식 7)로부터 식 5)의 해는 Global Conversing Newton Method로부터 다음과 같다.

$$\vec{Q}_{n+1} = \vec{Q}_n + \lambda\delta\vec{Q} \quad 8)$$

식 8)에서 $\lambda$는 각 iteration step에서 Objective Function을 최소로 하는 값으로서 Objective Function이 일정 값으로 수렴할 때 까지 반복하여 계산한다.

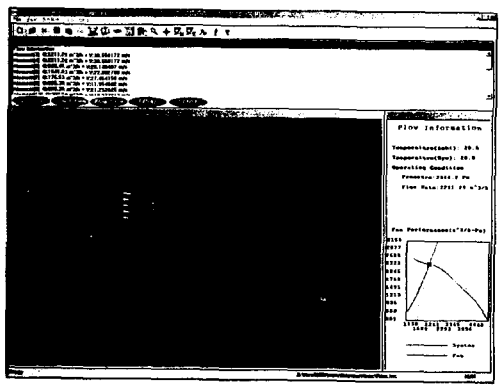

Fig. 9 The Screen for Flow Calculation Results

첫 단계에서 얻어진 각 요소에서 유량 정보는 Fig.9와 같이 나타내어 지며, 이 결과로부터 각 요소에서 유체의 흐름에 의해 발생하는 Flow Induced Noise는 Duct Borne Noise와 마찬가지로 *NEBB(National Environmental Balancing Bureau)*의 실험 Data의 Regression 값을 이용하여 구하였다. 마지막 단계로서 구해진 각 요소의 Noise를 Duct Borne Noise Routine에 Noise Source로 입력하여 각 요소로 전달 시켜 최종적인 Flow Induced Noise를 구하도록 하였다.

## 4. 실선 검증

Fig. 10 The Example Model of HVAC System

본 연구에서 개발한 Program은 Plane Wave Theory를 바탕으로 하였다. 따라서 실험실 규모의 소규모 FAN System에서는 다중 mode 형태의 음장이 지배적이므로 실험을 통한 검증은 불가능할 것으로 판단되어, 실제 선박의 HVAC System의 소음 계측치를 이용하여 Program의 유용성을 검증하여 보았다.

| freq(Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Level(dB) | 99 | 97 | 96 | 94 | 92 | 88 | 84 | 80 |

Table. 1 Fan Noise Power Level

Table.1은 System에 사용된 Fan의 Noise Power Level을 나타낸다. Table.1의 값을 바탕으로 얻은 cabin에서의 Duct borne Noise Power Level은 다음의 Table.2와 같다.

| freq(Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Level(dB) | 55 | 59 | 64 | 60 | 57 | 48 | 44 | 40 |

Table. 2 Duct Borne Noise Power Level

| Pa | 2523 | 2500 | 2285 | 2000 | 1500 | 1000 | 500 | 381 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m^3/h | 1490 | 1538 | 2500 | 3076 | 3750 | 4423 | 4903 | 5000 |

Table. 3 Fan Performance

Table.3 는 Fan의 특성 data로서 이로부터 얻은 cabin에서의 Flow Induced Noise Power Level은 다음의 Table.4 와 같다.

| freq(Hz) | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Level(dB) | 20 | 28 | 35 | 40 | 43 | 44 | 42 | 40 |

Table. 4 Flow Induced Noise Power Level

위의 결과로부터 cabin의 Noise Level은 54 dBA 임을 알 수 있다. 이값은 Flow Induced Noise 영향의 추가로 인해 설계 단계에서 수계산에 의한 예측치 50 dBA 보다 높은 값을 얻었으며 실제 선박에서 계측치 56 dBA에 근사한 값을 주었다.

## 5. 결론

본 연구는 Windows MFC를 이용한 GUI Interface, Open GL Graphic Library를 이용한 System 정보의 3차원 출력 및 Open GL Picking Library를 이용하여 GUI 기반의 System 변경 지원이 가능한 HVAC System 소음 계산 Program을 개발 하였다.

본 연구에서는 HVAC System의 소음을 Fan으로부터 Duct를 타고 선실내로 유입되는 Duct Borne Noise와 Duct 각 구성요소에서 유체의 흐름으로 인하여 발생되는 Flow Induced Noise로 구분 하여 선실내 소음 정도를 계산하였다. 또한 Global Converging Newton-Rapson Method를 이용하여 선실내 유입되는 유량을 계산하도록 하였다.

본 논문에서 이용된 음장 이론은 사용자의 간편한 이용을 위하여 System 내의 음장을 Plane Wave로 가정하였으나 차후 보다 정확한 해석을 위하여서는 Multi-Mode Wave Theory를 이용한 음장 해석이 필요하다 하겠다.

## 참고문헌


[1]Ellis Horowitz, *Fundamental of Data Structures in C* (Computer Science Press, 1993)

[2]William H. Press, *Numerical Recipes in C* (Cambridge University Press, 1992)

[3]Barry Clark, *Sound And Vibration Design And Analysis* (NEBB, 1994)

[4]*ASHRAE Handbook* (ASHRAE, 1999)

[5]Jerry M. Mendel, *Lessons In Estimation Theory For Signal Processing, Communication, And Control* (Prentice Hall, 1995)