

< 논 문 >

역 행렬 계산을 이용한 실 소음원의 모델링

Acoustic Source Modeling by Using ISC(Inverse Source Calculation)

최재웅* · 이희준** · 강종민* · 강신일**

Jae-Woong Choi, Hee-Joon Lee, Jong-Min Kang and Shin-Il Kang

(1998년 2월 20일 접수 ; 1998년 4월 8일 심사완료)

Key Words : Coherent Source(상관 음원), Incoherent Source(비상관 음원), ISC(Inverse Source Calculation), ASQ(Air-borne Source Quantification), Matrix Inversion(역행렬), Noise Source Modeling(소음원 모델링)

ABSTRACT

The noise sources, structure-borne and/or air-borne, in machinery can be defined by their locations and strengths. However the locations of that noise sources are well known in many cases. In those cases, the problem can be defined as an inverse problem to know the strengths of the noise sources which are replaced by the monopole sources. According to the characteristics of the noise sources in the frequency domain, the modeling scheme is classified by the coherent or incoherent source. This paper expands the basic concept to the case of the complex noise sources, in which the set of coherent and incoherent noise sources are matched with the noise of a real vehicle. The error factors in the experiment and the optimal number of the monopole sources to match the real sound field are also investigated. The results of the noise source modeling of heavy machinery show that the incoherent and coherent/incoherent source models are applicable to the high frequency and the low frequency region, respectively. The noise source model also enables the noise source analysis to rank the contribution of real source group such as engine, T/M, exhaust, etc.

1. 서 론

최근의 산업이 컴퓨터 모사실험에 의해 현상을 분석하고 대안을 제시하는 방향으로 전환되면서, 소음 관련 분야도 소음을 예측하는 방법론을 도입하고 적용하는 사례가 늘고 있다. 이러한 시도에 사용되는 해석 방법으로는 경계요소법 및 통계적

에너지 해석법 등을 들 수 있으며, 이들은 소음원의 크기를 입력 조건으로 각종 차폐구조를 소음제어요소로 하여 소음의 정도를 예측한다⁽¹⁾. 본 연구에서는 이러한 해석을 위한 입력으로서의 소음원 모델링 과정을 연구목적으로 하였다.

일반적으로 경계 요소법의 소음원은 단극음원의 크기나, 구조물 표면의 표면 속도장을 입력으로 하며, 통계적에너지 해석법은 소음원의 에너지 또는 파워어를 소음원의 입력으로 요구한다. 이러한 요구에 부응하기 위한 소음원 규명법으로는 표면 속도장을 직접 측정하는 방법을 우선적으로 고

* 정희원, 삼성중공업 중앙연구소 E-CIM 센터

** 삼성중공업 중앙연구소

려할 수 있으나, 엔진 등의 복잡한 형상에 대해서는 적용이 곤란하다. 따라서 간접 측정에 의한 소음원 규명법을 적용함이 타당하다.

간접측정에는 단품실험이 가능한 경우 음장가시화 기법인 음향 홀로그래피 방법⁽²⁾을 적용하여 소음원의 파워 예측 및 가상 음원 평면에서의 속도장 예측이 가능하다. 그러나 완성 차량 조건에서 각 소음원의 특성을 규명하기는 불가능하며, 단품이라 할지라도 표면에 굴곡이 심한 경우에는 표면에서의 속도장 예측이 매우 불투명해진다.

간접측정의 비교적 간단한 이론은 LMS사에 의해 제시된, 실 소음원을 몇개의 단극음원으로 대체하는 ASQ 방법⁽³⁾이다. 이 방법은 비록 표면 속도장을 얻기에는 적합하지 않으나, 실 소음원을 단극음원으로 치환하여 경계요소법이나, 통계적 에너지 해석법에 적용 가능한 소음원의 형태로 모델링을 할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구는 이 방법에 근거를 두고 진행 하였다.

LMS 사에 의해 제시된 소음원 모델링 기법은 크게 가상 단극음원 사이의 상관관계가 있다고 보는 경우와 없다고 보는 2가지 경우에 관한 소음원

모델링 방법으로 요약된다. 그러나 실 차량의 소음원 조건을 고려하면, 상관관계의 소음원과 비상관 관계의 소음원이 동시에 존재하고 있으므로 이 방법을 개선하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 STSF⁽⁴⁾에 적용하고 있는 추가 마이크로폰을 이용하는 개념을 도입하였고, 행렬 계산에 의한 단극 음원 사이의 상관행렬로부터 각 단극음원의 크기를 정의할 수 있는 개념을 새로이 도입하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 가상 단극음원을 이용한 소음원 모델링 과정을 체계화한다는 의미에서, LMS사에 의해 제안된 방법⁽³⁾ 및 개선한 방법을 ISC(Inverse Source Calculation)으로 정의 하고, ISC의 관점으로 기술하였다. 이는 단극음원으로서의 소음원 모델링 과정이 소음원과 전달함수를 이용한 응답 계산 과정으로부터 응답과 전달함수를 이용한 소음원 모델링의 역 과정으로 이해할 수 있기 때문이다. 3장에서는 이들을 중장비에 적용하여 실 차량 조건에서의 실 소음원 모델링을 하는 경우에 필요한 각종 오차요인들을 규명하였다. 제4장은 본 연구의 결론이다.

Table 1 소음원의 크기결정 과정

Step	내 용	비 고
STEP 1 : 측정점의 위치 결정	<ul style="list-style-type: none"> ▷ 실제 소음원의 표면에 가상 소음원의 위치결정(N) ▷ 관심 차량을 둘러싸는 가상 표면에 임의의 측정점 설정(M) 	M ≥ N (여기서 M에는 예측값 검증에 위한 추가 측정점이 포함된다.)
STEP 2 : 전달함수의 측정	<ul style="list-style-type: none"> ▷ 선정된 외부 측정점에 단극음원 설치 ▷ 선정된 가상 소음원의 위치에 마이크로폰 설치 ▷ 상반성 정리를 이용한 전달함수 측정 	모든 외부 측정점(M)에 단극음원을 이동시키면서 전달함수 측정
STEP 3 : 외부 소음 측정	<ul style="list-style-type: none"> ▷ 관심 장비를 둘러싼 가상 표면의 측정점(M)에서 실 소음원을 작동 시킨 후 음압 측정 <ul style="list-style-type: none"> · 상관 소음원 모델링 법: 위상을 고려한 측정 · 비상관 음원 모델링 법: 음압레벨의 측정 · 상관/비상관 음원 모델링 법: 기준 마이크로폰을 이용한 위상을 고려한 측정 	2.2절 참고
STEP 4 : 소음원의 크기계산	▷ 측정된 값을 이용한 소음원의 크기 계산 (가상 소음원의 수에 따라)	반복적으로 오차의 경향을 판단하여 최적의 소음원의 수 결정
STEP 5 : 가상 소음원의 최적의 개수 선정	▷ 음압레벨(SPL)을 이용한 예측된 소음원의 크기 검증	

2. Theory: Inverse Source Calculation(ISC)

2.1 기본개념

앞서 언급한 가상 단극음원에 기초한 소음원 규명법은 Table 1 과 같은 5개의 단계로 수행 되어진다. 여기서 모든 측정은 소음원의 특성을 고려하여 이루어져야 하는데, 소음원의 특성은 소음원들 사이의 상관관계에 의하여 결정된다. 즉 소음원은 주파수 영역에서의 상관성에 따라 상관 소음원(coherent source) 및 비상관 소음원(incoherent source)으로 구분되며, 이들의 적절한 조합에 의한 부분 상관 소음원(partial coherent source)의 형태로 파악된다. 여기서 coherent source 라 하면, 하나의 소음원이 다른 하나의 소음원과 같은 일정한 크기와 위상 차이를 갖는 소음원을 의미하며, 이것은 순음성분의 음원인 경우에 쉽게 나타난다. 반면에 incoherent source는 소음원 사이의 상관관계가 전혀 없는 경우로서 광대역 주파수 대역을 갖는 서로 다른 소음원의 경우에 관찰된다. 따라서 소음원 사이의 간섭에 의한 영향이 전혀 없게 된다.

이러한 신호의 특성에 의해 상관관계를 갖는 소음원(coherent source)에 대하여는 소음원 모델링 기법이 크기와 위상을 고려한 형태로 이루어져야 되고, 비상관 음원(incoherent source)에 대하여는 위상의 영향을 배제한 형태로 방법론이 결정되어야 한다.

그러나 대부분의 실제 상황은 상관 및 비상관 음원의 조합에 의한 경우로 볼 수 있으므로 이러한 경우에 추정 가능한 방법을 도입하였다. 각 방법의 자세한 관계식은 2.5절에 기술한다.

2.2 STEP 1: 측정점의 위치 결정

실 소음원을 N 개의 가상 소음원(단극음원)으로 모델링 하기 위해서는 orifice 소음과 같은 공

기기인 음의 경우는 orifice 소음원의 중심에 위치 설정이 되거나, 진동장에 의한 구조기인 소음은 가상 단극음원의 위치 정의가 쉽지 않다. 이론적으로는 진동장의 방사특성에 따라, 즉 진동 모드의 anti-node에 단극음원을 배열할 수 있으나 주파수에 따른 구조진동 모드의 형상에 따라 anti-node 지점이 변화하므로 적절한 소음원의 수(N_{opt})와 위치에 관한 주관적 판단이 매우 중요하다. 따라서 가능한 충분한 가상 소음원의 수(N)를 정의하고 이로부터 소음원 규명과정에서 적절한 소음원의 수(N_{opt})를 결정하는 과정이 필요하다.

소음원의 수를 규명하기 위한 외부 측정점(M)은 STEP 4의 소음원 규명법에 따라 차이가 있으나, 그 위치는 관심 대상물을 둘러싸는 폐곡면 상에 설정된다. Table 2는 각 소음원 규명법에 따른 최소 측정점의 수를 의미한다. 즉 상관 음원(coherent source) 모델링 법의 경우는 크기와 위상을 갖는 N 개 이상의 음압관계가 필요하고, 비상관 음원(incoherent source) 모델링 법의 경우는 N 개 이상의 음압레벨(SPL:Sound Pressure Level)을 필요로 한다. 또한 이들의 조합인 경우에는 비 상관 음원의 수보다 많은 기준 마이크로폰(N_{ref})을 포함한 측정점이 필요하다.

여기에 소음원 예측 결과 확인을 위한 추가적인 측정점(α)을 확보하여 적절한 소음원의 수(N_{opt}) 결정과정에 활용한다.(STEP 5)

2.3 STEP 2: 전달함수의 측정

전달함수는 STEP 1에서 정의한 가상 소음원의 위치에 소음원(체적속도 Q_i)이 있을 때 외부 측정점에서의 응답(음압 P_j)을 측정하여 (P_j/Q_i)으로 정의한다. 따라서 가상 소음원의 위치에 단극음원을 설치하여야 한다. 그러나 실제 조건에서 엔진 표면 등에 소음원을 위치시키기 위하여는

Table 2 외부 측정점의 수

소음원 규명법	외부 측정점의 수(M)	비고
상관음원(coherent sources)	$N + \alpha$	α : 검증을 위한 추가 측정점 N_{ref} : reference 측정점의 수
비상관 음원(incoherent sources)	$N + \alpha$	
상관/비상관 음원(coherent/incoherent sources)	$N + N_{ref} + \alpha$	

기하학적으로 매우 작아야 하고 복잡한 표면에 쉽게 접촉시킬 수 있는 장치가 필요하므로 현실적으로 매우 곤란하다.

이에 따라 본 과제에서는 음향학적 상반성 원리 (reciprocity theorem)를 도입하여 전달함수를 구하는 방법을 채택한다. 이는 단극음원 (Q_j)을 외부 측정점에 설치하고 내부 가상 소음원의 위치에 마이크로폰을 설치하여 얻은 음압 (P_{ji})을 이용하여 전달함수 (P_{ri}/Q_{rj})를 구한 결과가 (P_j/Q_i)과 같다는 이론이다.

따라서 모든 전달함수는 상반성 정리에 의해

$$h_{ij} = \frac{P_{ri}}{Q_{rj}} \Big|_{Q_n=0} = \frac{P_j}{Q_i}, \quad k \neq j$$

$$i=1, 2, \dots, N$$

$$j=1, 2, \dots, M \quad (1)$$

으로 구해진다. 여기서 Q_{rj} 는 외부 측정점 j 에 위치한 단극음원의 체적속도이고, P_{ri} 는 엔진룸 내부 가상 소음원의 위치 i 에서 측정된 음압이다.

2.4 STEP 3: 외부 음압의 측정

실 소음원이 작동되고 있는 조건에서의 외부 음압 측정은 소음원 규명조건(소음원의 상관관계에 따른)에 따라 다르게 결정된다. 즉, 상관 음원 모델링 법의 경우는 외부 측정점에서 위상의 정보를 포함한 음압신호를 측정해야 하는데, 신호처리 상의 평균신호를 이용하기 위해 M 개 중의 하나를 기준 마이크로폰으로 설정하고, 이 마이크로폰과 다른 마이크로폰 사이의 cross spectrum을 측정하고, 이 신호를 기준 마이크로폰의 auto spectrum의 제곱근으로 나누어 $[M \times 1]$ 벡터의 복소 위상을 갖는 음압벡터를 얻는다.

비상관 음원의 경우는 앞서 구한 cross spectrum이 이론적으로는 존재하지 않는 경우로서 M 개 지점에서의 auto spectrum을 측정하여 $[M \times 1]$ 벡터의 scalar 음압레벨 벡터를 얻는다.

상관/비상관 음원의 경우는 앞서 언급한 각 reference microphone (N_{ref})과 ($M-N_{ref}$)개의 마이크로폰 사이의 cross spectrum을 측정하여 $[M \times N_{ref}]$ 의 상관행렬을 만든다. 여기서 N_{ref} 는 비 상관 음원의 수보다는 많아야 하는데, 그 이유는 STEP 4에서 설명한다.

2.5 STEP 4: 소음원의 크기 계산

앞서 기술하였듯이 소음원의 상관관계에 의해 3가지 경우로 소음원 규명법을 정의할 수 있다.

(1) 상관 음원 (Coherent sources) 모델링 법 내부 소음원을 Q_j 라 하고, 외부에서의 측정 음압을 P_i , 이들 사이의 전달함수를 h_{ij} 라 할 때 복소위상을 고려한 일반관계식은

$$P_i = \sum_{j=1}^N h_{ij} Q_j, \quad i=1, 2, \dots, M \quad (2)$$

또는

$$P = [H]Q \quad (3)$$

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_M]^T, [M \times 1] \quad (4)$$

$$Q = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_N]^T, [N \times 1] \quad (5)$$

$$[H] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} [M \times N] \quad (6)$$

이 된다. 따라서 소음원의 크기 Q_j 는

$$\{Q\} = inv([H])\{P\} \quad (7)$$

와 같이 전달함수 행렬의 역을 이용하여 구할 수 있다. 이때 전달함수의 역행렬은 전달함수 행렬의 특성에 따라 다음과 같이 구분된다.

① Case 1, $M=N$

$[H]$: invertible

$$\{Q\} = [H]^{-1}\{P\} \quad (8)$$

② Case 2, $M > N$: Over determined

$[H]^H [H]$: invertible

$$\{Q\} = ([H]^H [H])^{-1} [H]^H \{P\} \quad (9)$$

③ Case 3, $M < N$: Under determined

전달함수의 역이 존재하지 못한다.

여기서 상 첨자 (H)는 complex conjugate transpose를 의미하고, 상 첨자(-1)은 역행렬을 의미한다. 이 역행렬은 단극 소음원의 크기 및 위상의 변화가 소음원과 마이크로폰 사이의 거리

에 따라 나타나므로 식 (6)의 전달함수 행렬이 i 및 j 열은 ($i=j$)인 경우를 제외하고는 비례하지 않으므로 항상 H 의 역행렬은 ① 또는 ②의 경우에 존재한다. 따라서 $M \geq N$ 의 조건을 만족하여야 한다.

(2) 비상관 음원(Incoherent sources) 모델링 법 앞의 경우와는 달리 소음원 사이의 상관관계가 전혀 없는 경우에는 소음원 규명법 상의 위상 정보가 무의미해진다. 따라서

$$\{|P\}^2 = [H]^2 \{|Q\}^2 \quad (10)$$

$$\{[P\}^2\} = [|P_1|^2 |P_2|^2 \dots |P_M|^2]^T, [M \times 1] \quad (11)$$

$$\{[Q\}^2\} = [|Q_1|^2 |Q_2|^2 \dots |Q_N|^2]^T, [N \times 1] \quad (12)$$

$$[H]^2 = \begin{bmatrix} |h_{11}|^2 & |h_{12}|^2 & \dots & |h_{1M}|^2 \\ |h_{21}|^2 & |h_{22}|^2 & \dots & |h_{2M}|^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |h_{M1}|^2 & |h_{M2}|^2 & \dots & |h_{MM}|^2 \end{bmatrix}, [M \times N] \quad (13)$$

의 관계식으로 기술할 수 있고, 이에 따른 소음원의 크기는

$$\{|Q\}^2 = inv([H]^2) \{|P\}^2 \quad (14)$$

으로 결정된다. 따라서 전달함수 행렬의 역행렬을 구하는 과정은 상관 음원 모델링 법의 경우와 동일하여 $M \geq N$ 의 조건으로 실 소음원의 크기결정이 이루어짐을 알 수 있다.

(3) 상관/비상관 음원(Coherent/Incoherent sources) 모델링 법

이상에서 유도한 모든 과정은 소음원의 주파수 성분은 항상 상관 또는 비 상관관계가 있다는 가정에서 출발한다. 그러나 광대역 주파수 성분을 갖는 소음원이 여러 개 상관 및 비 상관관계로 존재하는 경우는 상관관계를 갖는 소음원 및 상관관계를 갖지 않는 소음원들을 동시에 추정해야 하는 문제로 귀결된다. 따라서 다수의 실제 소음원이 존재하는 경우에는 이러한 부류로 생각할 수 있어서 소음원 규명에 주의를 요한다.

이론적인 측면에서 본다면, 이러한 소음원들은 외부 측정점에서의 음압을 동시에 측정하여 상관 음원 모델링 기법을 적용하고, 이 결과를 기대값

을 나타내는 연산자 $E[\cdot]$ 을 이용하여 소음원을 규명하는 것이 가능하다. 그러나 현실적으로 다수의 마이크로폰을 이용한 동시측정의 한계(마이크로폰의 수 및 샘플링 주파수 등)가 있으므로 정상상태에서의 순차적 측정을 필요로 한다. 이러한 경우 항상 일정한 위치에 고정되어 있어야 하는 reference microphone (N_{ref})은 비 상관인 소음원의 수(N_{inc})보다 많아야 한다. 이것은 식 (15)의 소음원의 상관행렬인 $E[\{Q\}\{Q\}^H]$ 가 이론적으로 비 상관 음원의 수에 해당하는 rank를 갖게 되기 때문이다. (여기서 상관관계를 갖는 소음원은 1개의 소음원으로 표현된다.) 따라서 외부 측정점에서의 cross spectrum 행렬 $E[\{P\}\{P_r\}^H]$ 은

$$E[\{P\}\{P_r\}^H] = [H]E[\{Q\}\{Q\}^H][H_r]^H, [M \times N_{ref}] \quad (15)$$

$$\{P_r\} = [P_{r1} P_{r2} \dots P_{rN_{ref}}]^T, [N_{ref} \times 1] \quad (16)$$

$$[H_r] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_{ref}} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_{ref}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN_{ref}} \end{bmatrix}, [M \times N_{ref}] \quad (17)$$

으로 표현되며, $[H_r]$ 은 전달함수 관계로서 reference microphone의 위치에 소음원이 있을 때 내부 측정 음압과의 전달함수 관계를 의미한다. 또한 $\{P_r\}$ 은 실소음원을 이용한 측정에서 reference microphone의 위치에서 수집된 신호를 의미한다. 이로부터 음원상관행렬 $E[\{Q\}\{Q\}^H]$ 은

$$E[\{Q\}\{Q\}^H]^E = (([H]^H[H])^{-1} [H]^H) E[\{P\}\{P_r\}^H] ([H_r]([H_r]^H[H_r])^{-1})^T [N \times N] \quad (18)$$

이 된다. 따라서 행렬의 크기는 $M \geq N, N_{ref} > N_{inc}, N \geq N_{inc}$ 의 관계를 갖는다.

그런데 각각의 단극음원의 특성을 표현하기 위해서는 음원 상관행렬은 식 (9) 또는 식 (14)과 같은 벡터형태로 변화 되어야 한다. 이상적인 조건에서의 식 (18)은 대각요소는 식 (14)와 같은 auto spectrum으로 이루어지고, 그 외의 요소들은 간섭을 나타내는 cross spectrum으로 이루어진다. 따라서 각 단극음원의 크기는 대각행렬로부터

$$|Q| = \sqrt{E[Q, Q^*]} \quad (19)$$

와 같이 정의된다. 그런데 위상에 관한 정보는 비상관 음원의 경우에는 무의미하고, 상관음원의 경우에는 초기 위상의 차이가 중요하게 된다. 따라서 상관음원의 경우를 고려한 위상 정보를 구하기 위해, 음원 사이의 상관관계가 일정하다는 deterministic 과정으로 가정하고 기대값을 나타내는 연산자를 제거하면 다음과 같이 단극음원의 위상을 정의할 수 있다.

$$\angle Q_i = \angle \left(\sum_{j=0}^N Q_i Q_j^* \right) - const \quad (20)$$

여기서

$$\angle \left(\sum_{j=0}^N Q_i Q_j^* \right) = \angle(Q_i) + \angle \left(\sum_{j=0}^N Q_j^* \right) \quad (21)$$

이므로 모든 $\angle Q_i$ 에 대하여 $\angle \left(\sum_{j=0}^N Q_j^* \right)$ 만큼의 일정한 위상차가 발생하는 조건이므로 식 (20)의 상수를 이 값에 일치시키면 원하는 위상의 정보를 얻을 수 있으며, 이를 보정하지 않는 경우에도 각 단극음원 사이의 위상에 관한 상대적 변화는 일정하게 되므로 단극음원의 크기 및 위상의 정보를 얻게 된다.

2.6 STEP 5: 예측된 소음원의 크기 검증 및 가상 소음원의 최적의 개수 결정(N_{opt})

이 단계는 STEP 4에서 가정된 소음원의 수에 따라 추정된 소음원의 크기를 이용하여 α 개의 추가 측정점에서 음압을 예측하고 이 예측 결과 (SPL)를 실제 측정된 음압레벨 (SPL_m)과 비교하여 오차가 최소화 되는 소음원의 수 (N_{opt})를 찾아내는 단계이다. 즉

$$\{\bar{P}_\alpha\} = [H_\alpha]\{Q\} \text{ 또는 } \{|\bar{P}_\alpha|^2\} = [H_\alpha]^2\{|Q|^2\} \\ \text{: 예측된 음압 (23)}$$

$$SPL = 10 \log \left(\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{N_i} \left((\bar{P}_{\alpha ij})^2 / P_{ref}^2 \right) \right) \\ \text{: } \alpha \text{ 지점 예측음압 평균레벨 (24)}$$

$$SPL_m = 10 \log \left(\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{N_i} \left((\bar{P}_{\alpha ij})^2 / P_{ref}^2 \right) \right) \\ \text{: } \alpha \text{ 지점 측정음압 평균레벨 (25)}$$

이 되며, P_{ref} 는 기준 소음레벨로 20×10^{-6} Pa이다. 계산은 특정 지점만의 효과를 배제하기 위하여 최소 3점 이상의 측정점 (α)을 이용하여 평균을 취하고 있다. 여기서 N_i 는 예측 또는 측정된 음압레벨 스펙트럼의 고려되는 중심주파수의 수를 의미한다.

이외에도 이론적인 소음원의 수 결정 과정으로 식 (18)의 추정된 음원행렬의 rank 확인법 및 AIC, Minnorm 등의 방법이 있으나, 이들을 적용한 결과는 항상 수렴하는 값을 찾기가 어려워, 위와 같은 방법으로 손쉽게 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

2.7 실험에 따른 오차의 범위

실험에서 주의할 사항으로는, 전달함수 측정을 위한 소음원의 위치와 외부음압 측정을 위한 마이크로폰의 위치가 동일 위치에 있도록 해야 한다는 점이다. 그러나 실제 구현에 있어서 측정 시 존재하는 오차는 피할 수 없으며, 이때 음압레벨의 변화보다는 위상의 변화가 크게 문제시 될 것으로 판단된다. 따라서 상관 음원 모델링 법이나, 상관/비상관 음원 모델링 법에서는 매우 신중한 측정이 필요하다. 만일 발생할 수 있는 실험오차의 한계를 약 ϵ 이라 하고, 이러한 오차가 무시 가능하다고 판단되는 이 오차의 10배 이상의 파장을 갖는 주파수 범위 (f_c , Hz)를 구하면,

$$f_c = \frac{c}{10\epsilon} \text{ Hz} \quad (26)$$

의 관계를 만족하고, 이러한 범위 내에서 상관 음원 모델링 법 및 상관/비상관 음원 모델링 법의 적용이 가능할 것으로 보인다. 만일 $\epsilon = 5$ cm이고, 음속이 $c = 340$ m/sec 인 경우를 고려하면 $f_c = 680$ Hz 와 같다.

고주파 대역에서는 단극음원 사이의 위상의 영향을 무시할 수 있으므로 비상관 음원 모델링 법의 적용이 타당하며, 이 때는 위상의 영향을 배제한 계산이 수행되므로 위치 설정에 의한 오차는 크지 않을 것으로 판단된다.

3. Application: 증장비의 소음원 모델링

3.1 소음원의 위치 결정

앞서 언급한 소음원 모델링 과정을 실 로더의

소음원 모델링에 적용하기 위하여 증장비인 로더의 소음원 규명 실험을 실시 하였다. 이때 실 소음원을 20개의 가상 단극음원으로 생각하였고, 고려할 수 있는 비상관 음원의 수는 6개로 가정 하였다. 실 로더의 주요 소음원으로는 엔진(engine), 동력전달계(T/M: transmission), 냉각팬, 소음기의 구조음, 배기계 끝단 소음이 고려되며, 이들을 적절한 수의 단극음원으로 모델링 하였다. 따라서 각 소음원의 파워 및 이에 따른 기여도 분석이 가능하였다.

3.2 전달함수 측정 용 소음원의 크기 결정

전달함수 측정 용 단극음원으로는 Horn driver를 이용하였다. 이 Horn driver의 특성인 체적속도(Q)는 단극음원을 둘러싸는 폐곡면에서 측정하여야 하나, 현실적으로 센서를 단극음원의 입구에 설치하여야 하는 어려움이 있어, 여기서는 Fig. 1과 같은 실험장치를 고안 하였다. 즉, 소음원의

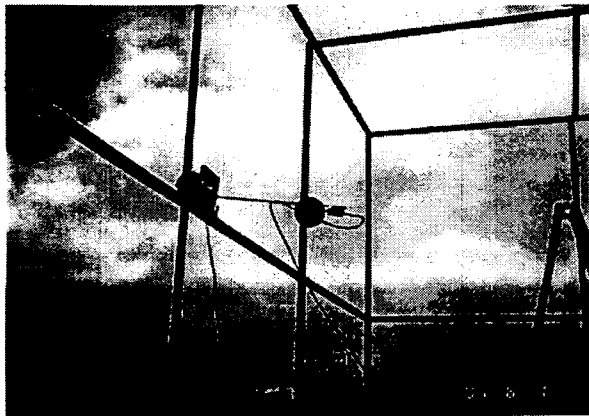


Fig. 1 Experimental setup for measurement of the volume velocity of the horn driver

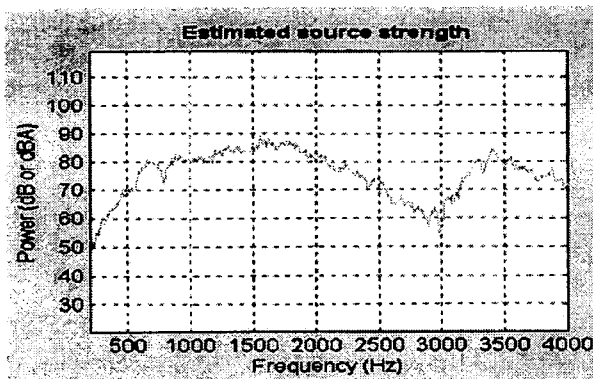


Fig. 2 Volume velocity of the horn driver

끝단으로부터 일정 거리 떨어진 위치에서 소음의 크기인 음압레벨(P)을 측정하고 이를 단극음원의 무지향 성질을 이용하여 소음원의 체적속도 및 파워(Π)로 환산하였다.

$$Q = \frac{2\lambda r}{\rho_0 c} P \quad (27)$$

$$\Pi = \frac{\pi}{2} \rho_0 C \left(\frac{Q}{\lambda} \right)^2 \quad (28)$$

여기서 Q는 체적속도의 peak 값(m^3/sec), λ 는 파장, r은 Horn driver 끝단과 마이크로폰 사이의 거리, ρ_0 , c는 공기의 밀도와 음속을, P는 마이크로폰에 수신된 음압신호이다.

Fig. 2는 이렇게 얻은 Horn driver의 파워를 보여 주고 있다. 전반적으로 산과 골을 형성하고 있으며, 약 50 dB이상의 파워를 갖고 있다. 200 Hz 부근의 골 부분에서의 음압레벨은 약 10 dB 정도의 신호대 잡음비(S/N ratio)를 갖도록 단극음원의 소음레벨을 결정 하였다. 따라서 200 Hz ~ 4000 Hz 사이에서의 전달함수 측정은 충분한 S/N ratio를 확보하고 있다고 볼 수 있다.

3.3 전달함수 측정 실험

전달함수 측정은 상반성 원리에 의하여 실시하였다. 이를 위해 외부 소음원은 Fig. 1과 같이 각 격자점에 설치 하여 반복실험을 수행하였다. 실제 소음원의 위치에서 측정하여야 하는 음압은 Fig. 3과 같이 마이크로폰 지그를 이용하여 가능한 소음원에 근접할 수 있도록 하였다.

3.4 외부 음압 측정

외부 측정점의 위치는 Fig. 4와 같이 철제 형격자를 만들어 사용 하였다. 실험은 주변에 장애물이 없는 운동장에서 실시 하였다. 또한 상관/비상관 음원의 영향을 고려하기 위하여 6개의 reference microphone을 이용하였다.

3.5 소음원의 크기 계산

소음원의 크기는 가상 단극음원의 조합으로 계산되며, 가상 단극음원의 수는 소음원 모델링에 이용하지 않은 3개 측정점에서의 예측 음압레벨의 평균값이, 측정값과 가장 잘 일치하는 경우의 값으로 결정한다. 따라서 최대 20개의 가상 단극음원으로 모델링이 가능한 실험 내용을 이용하여, 5

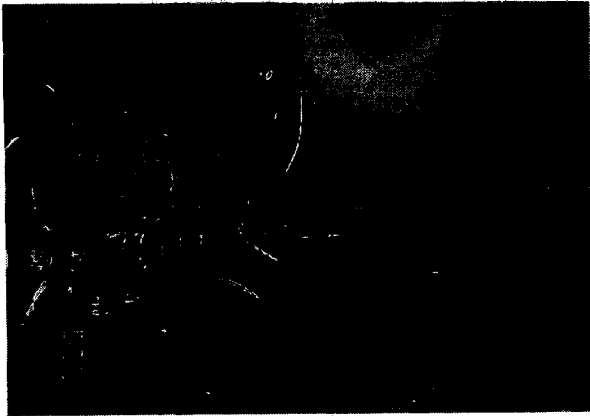


Fig. 3 Microphone position for the measurement of the transfer function (noise source position for exhaust shell: upper middle)

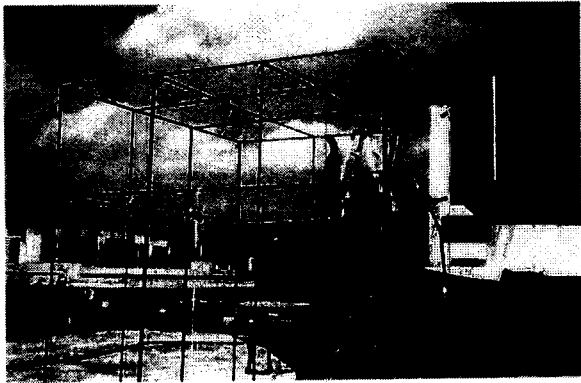


Fig. 4 Jig for the measurement of the external sound pressure and an example for the reference microphones

가지의 단극음원의 조합(Table 3)에 대하여 소음원의 크기를 예측하였다. Fig. 5는 단극음원의 수에 따른 상관음원 모델링 기법을 적용한 결과로서, 전체 소음원의 크기(--o--o--)와, 예측된 소음원 특성을 이용하여 얻은 소음원 모델링에 이용하지 않은 3 지점에서의 예측 음압레벨의 평균값(--◇--◇--)과, 측정 평균값(--□--□--)을 보여 준다. 이 경우에는 12개의 단극음원으로 모델링 하였을 때 검증점에서의 음압레벨이 실험값과 가장 유사하고, 이 때의 전체 소음원의 파워는 약 107.9 dBA가 된다. 이때 파워 값은 상관 음원 모델링 및 상관/비상관 음원 모델링의 경우에는 예측된 단극음원의 위상차를 무시한 결과로서 실제와는 다소 차이가 있게 된다. 그러나 3차원 상에 분포되어 있는 단극음원 사이의 거리가 일정하

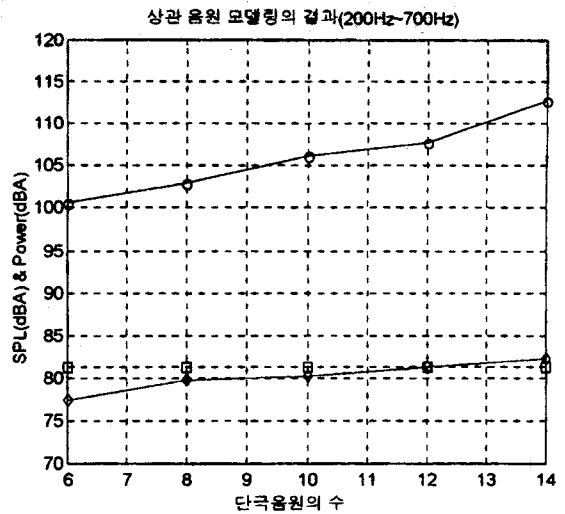


Fig. 5 Results of the coherent source modeling: Total source power and average measured/estimated SPL(sound pressure level) at the extra measurement points (200Hz ~ 700Hz, --o--o-- : Total source power (dBA), --□--□-- : measured SPL(dBA), --◇--◇-- : estimated SPL(dBA))

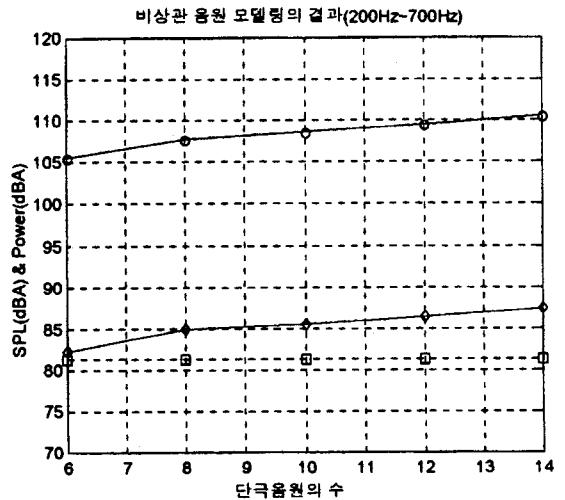


Fig. 6 Results of the incoherent source modeling: Total source power and average measured/estimated SPL (sound pressure level) at the extra measurement points (200Hz ~ 700Hz, --o--o-- : Total source power (dBA), --□--□-- : measured SPL (dBA), --◇--◇-- : estimated SPL(dBA))

지 않으므로 간섭의 영향이 서로 상쇄되는 현상을 고려할 수 있어 소음원의 전체 파워에 상응하는 값으로 인정할 수 있을 것이다.

Fig. 6은 비상관 음원 모델링 기법을 저주파 대역에 적용한 결과로서 상관음원 모델링 기법에 비해 서로 독립인 단극음원의 특성을 이용하여 모델링 하는 방법이므로, 이때 얻은 소음원의 전체 크기는 실제값으로 인정할 수 있다. 상관 음원 모델링 기법에 비해 약 2 dB 정도 낮은 소음레벨을 보이고 있으며, 약 6개의 단극음원으로 모델링이 가능함을 보여주고 있다. Fig. 7을 고주파 대역에 적용한 비상관 음원 모델링 기법의 결과이다. 이 경우에도 6개의 단극음원으로 원하는 소음원 모델

링이 되어짐을 보여주고 있다.

Fig. 8을 상관/비상관 음원 모델링의 경우로 6개의 단극음원으로 전체 계의 저주파 대역의 위상을 고려한 소음원 모델링 이루어짐을 보이고 있다.

Table 4는 각 방법의 최소 오차를 갖는 단극음원의 수를 이용한 소음원 모델링에서, Table 3에

Table 3 Number of monopole sources which can replace the real sources

Ns	소음원에 따른 단극음원의 수				
	Engine	T/M	Fan	Exhaust shell	Exhaust orifice
16	7	3	4	1	1
14	5	3	4	1	1
12	3	3	4	1	1
10	3	1	4	1	1
8	3	1	2	1	1
6	2	1	1	1	1

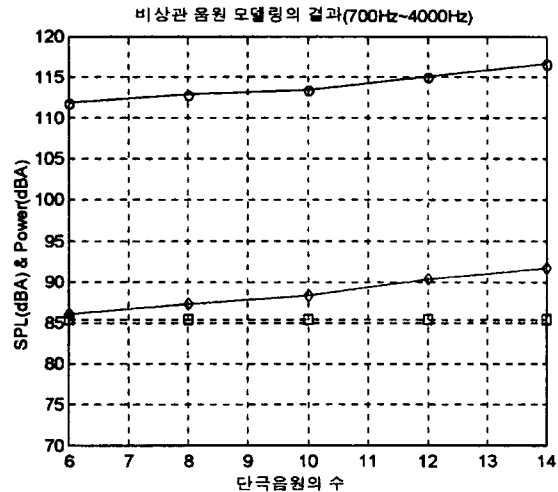


Fig. 7 Results of the incoherent source modeling: Total source power and average measured/ estimated SPL (sound pressure level) at the extra measurement points (700Hz ~ 4000Hz, ---o---o--- : Total source power (dBA), -□- -□- : measured SPL (dBA), --◇--◇-- : estimated SPL(dBA))

Table 4 Contribution analysis of each noise source

	상관음원 모델링		비상관음원 모델링	
	상관음원 모델링	비상관음원 모델링	상관/비상관음원 모델링	비상관음원 모델링
주파수범위(Hz)	200~700	200~700	700~4000	200~700
단극음원 수	12	6	6	6
Engine	101.4 (22.8)	99.3 (23.8)	109.0 (50.6)	100.8 (30.5)
T/M	99.4 (14.3)	100.2 (28.9)	106.4 (27.5)	99.9 (24.9)
Fan	104.4 (45.3)	100.3 (29.6)	101.9 (9.9)	98.9 (20.0)
Exhaust shell	100.1 (16.8)	96.8 (13.2)	101.5 (9.0)	99.5 (22.8)
Exhaust orifice	85.1 (0.5)	92.0 (4.3)	96.4(2.8)	87.9 (1.5)
Total	107.9 (100)	105.6 (100)	112.0 (100)	106.0 (100)

() : 기여도

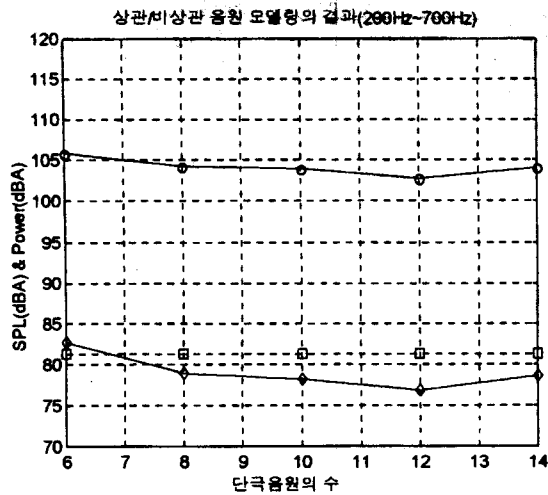


Fig. 8 Results of the coherent/incoherent source modeling: Total source power and average measured / estimated SPL(sound pressure level) at the extra measurement points (200Hz ~ 700Hz.---o---o---:Total source power (dBA), -□-□- : measured SPL(dBA), --◇--◇-- : estimated SPL(dBA))

기술된 각 실 소음원 군의 소음원의 크기 및 기여도를 보여준다. Fig. 9는 상관/비상관 소음원 모델링 방법을 적용한 경우의 각 소음원 군의 파워 분포를 보여주고 있으며, 냉각계의 날개 통과음과 엔진의 폭발음에 대한 조화음의 영향이 200 Hz ~ 300 Hz 사이에서 강조되고 있음을 알 수 있다. 고주파 대역에서는 엔진 및 T/M 계통의 소음이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.(Table 4)

4. 결 론

본 논문에서 중장비 등과 같은 복잡한 소음원의 특성을 단극음원의 조합으로 모델링하는 방법을 기술 하였다. 이를 위해 소음원의 위치를 알고 있다는 가정을 이용하는, 전달함수와 외부 음압을 이용한 ISC 방법을 도입 하였다. 이 방법은 상관 음원 모델링 법과 비상관 음원 모델링법으로 알려져 있었으며, 본 논문에서는 실 소음원의 모델링에 필요한 상관 소음원과 비상관 소음원이 동시에 존재하고 있는 경우에도 적용 가능한 방법을 유도 하고, 앞서의 2가지 방법의 결과와 비교하였다. 논문의 구성은 소음원 모델링의 전 과정을 체계적으로 정리하기 위하여 소음원 모델링의 관점에서

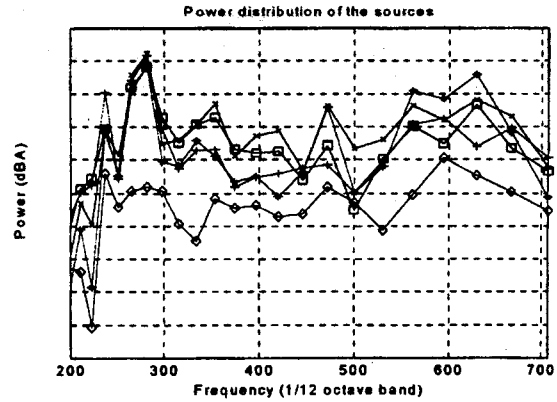


Fig. 9 Power contribution of each noise source estimated by the coherent/incoherent source modeling (---x---x--- : Engine,--++---+--- : T/M, ----*----*---- : Fan, ---□---□--- : Exhaust shell, ---◇---◇--- : Exhaust orifice)

기술하였으며 중장비의 소음원 모델링의 예를 통하여 실 문제의 적용 가능성을 보였다.

적용한 결과를 종합해 보면 저주파 대역에서의 위상을 고려한 소음원 모델링에는 상관/비상관 음원 모델링 방법을 활용하면 상관 음원 모델링 기법에 비해 상대적으로 적은 수의 단극음원으로 모델링이 가능하며, 이 결과는 단극음원 사이의 간섭의 영향을 고려한 모델링이 되어 경계요소법의 해석에 활용될 수 있다. 또한 전체 소음레벨에 관심을 갖는 경우에는 비상관 음원 모델링 기법을 적용하여 얻을 수 있었고, 이 결과는 통계적 에너지 해석의 입력으로 활용될 수 있으며, 각 실 소음원 군의 기여도 분석에도 활용이 가능함을 알았다.

향후 최적의 가상 소음원 개수를 결정하는 방법 및 예측 에러를 최소화하는 방법 등에 관한 구체적 연구가 필요하다.

후 기

본 연구과제 수행에 도움을 주신 시험기술팀에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 강종민, 최재용, 이희준, 강신일, 1997, BEM과 SEA의 통합적응에 의한 차량의 방사 소음 예측, 한국음향학회회계학술대회논문집

- (2) Maynard, J.D., Williams E.G., and Lee Y., 1985 "Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and Development of NAH." J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, No. 4, pp. 1395~1413
- (3) LMS presentation material on ASQ(Air-

- borne Source Quantification)
- (4) Hald J., 1989, "STSF-a Unique Technique for Scan-Based Near-Field Acoustic Holography Without Restrictions on Coherence," Technical Review No. 1, B&K Publication.

A - PVC '97 Proceeding 보급 안내

제 7 차 아시아 - 태평양지역 진동학술대회(A-PVC '97)가 한국소음진동공학회와 대한기계학회가 공동 주관으로 1997년 11월 9일부터 13일 까지 5일간 경주 현대호텔에서 15개국 350여명이 참석한 가운데 성황리에 개최되었다.

본 국제학술대회에서는 기초연설 3건과 진동, 제어, 소음분야의 논문 234편 등 총 237편이 발표되었다. 아울러 본 학술대회에서 발표된 논문들이 게재된 Proceeding (I, II)을 회원 여러분께 보급코자 하오니 필요한 회원께서는 학회로 연락 주시기 바랍니다.

- ▶ 연락처 : TEL : (02)3474-8002, 8003, FAX : (02)3474-8004
- ▶ 보급가 : 1SET(2권)에 5만원(1권은 3만원) ; 등기송료 포함