

3 차원 구형탐촉자를 이용한 소음원 탐지

°나 회 승* . 김 영 국** . 최 강 윤** . J.C. PATRAT***

Noise Source Localization using 3 Dimensional Spherical Probe

H S Na, Y G Kim, K Y Choi and J.C. PATRAT

Key Words : Diffraction Phenomena (회절현상), Inverse Modeling of Diffraction Phenomena (회절현상의 역모델링), Multilayer Perceptron(다층 퍼셉트론)

ABSTRACT

This paper proposes a spherical probe allowing acoustic intensity measurements in three dimensions to be made, which creates a diffracted field that is well-defined, thanks to analytic solution of diffraction phenomena. Six microphones are distributed on the surface of the sphere along three rectangular axes. Its measurement technique is not based on finite difference approximation, as is the case for the 1D probe but on the analytic solution of diffraction phenomena. In fact, the success of sound source identification depends on the inverse models used to estimate inverse diffraction phenomena, which has non-linear properties. In this paper, we introduce the concept of nonlinear inverse diffraction modeling using a neural network and the idea of 3 dimensional sound source identification with several tests.

1. 서론

소음원 규명은 음향학적인 이론에 근거하여 소음의 전파 특성인 전달함수(transfer function)를 구하고, 이에 기초한 역 전달함수(inverse transfer function)를 찾아낸 후 실험상에서 구한 음압 데이터와 역전달함수를 이용하여 소음원을 규명하는 것이다.

본 논문에서는 원형구의 회절현상(diffraction phenomena)을 이용하여 소음원을 규명하는 방법을 제시하고자 한다. 음의 회절은 장애물 뒤쪽으로 음이 전파하는 현상이며, 파장과 장애물의 크기에 따라 다양한 현상을 나타낸다. 대부분의 소음계측에서는 계측장비의 회절현상에 의해 측정오차가 발생하며, 마이크로폰은 이러한 현상을 최소화하도록 설계하고 있다. 특히 회절현상은 장애물, 탐촉자의 형상이 복잡할수록 해석이 어렵기 때문에

회절현상을 감소시키는 설계가 매우 중요하다. 예를 들어 2D, 3D 인텐시티 탐촉자의 경우, 이러한 회절현상은 입사파의 각도와 주파수에 따라 측정 음압의 크기, 위상차를 변화시키며, 특히 위상차의 오차는 소음원의 위치를 규명하는데 오차를 유발할 수 있다. 마이크로폰은 물리적 특성상 저주파 한계를 가지고 있다. 인텐시티 프롭은 입사파의 방향을 탐지할 수 있는 대표적인 방법이나 유한차분(finite difference)에 기초하기 때문에 프롭의 간격에 따라 고주파한계를 갖고 있다. 즉 회절현상이 작아도 고주파수 한계성을 갖고 있다. 그러나 본 논문에서 제시한 방법은 이론해를 갖는 회절현상을 이용하기 때문에 유한차분에 의한 고주파한계를 고려할 필요가 없다.

본 연구는 구표면에서의 회절 현상을 하나의 전달함수로 보고, 이를 바탕으로 역전달함수인 회절현상의 역모델(inverse model)을 수치적으로 모델링한다. 회절현상은 저주파수에서 선형적인 특성을 나타내는 반면 고주파수로 갈수록 비선형성이 증가하므로 이를 모델링하기 위해서는 비선형 기법이 적용되어야 한다. 주파수범위를

한국철도기술연구원 E-mail : hsna@krri.re.kr

** 한국철도기술연구원

*** Univ. of Poitiers, France

범위에 대해 선형화를 수행할 수 있으나, 이는 계산량이 많고 역해를 구할 때 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 그러나 신경회로망은 수렴성, 입력데이터의 배열, 학습시간과 신경회로망 자체의 파라미터를 선정하는데 시행착오가 발생하는 반면 학습후에는 적은 계수로 비선형성을 모델링할 수 있기 때문에 계산시간감소와 같은 장점이 있다. 회절현상을 역 모델링하기 위하여 선형과 비선형을 동시에 모델링할 수 있는 신경회로망(neural network) 기법과 이를 이용한 효율적인 학습구조를 제안하였다. 역 모델을 이용하여 소음원의 위치를 규명하는 몇가지 조건 및 알고리즘을 제시하고, 시뮬레이션을 수행하여 효율성을 검증하였다.

2. 평면파 입사시 원형구에서의 회절현상

본 연구에서는 3 차원공간의 소음원을 탐지하기 위하여 원형구 표면에 6 개의 마이크로 폰을 설치한 3D 구형 프롭을 제시한다. Fig. 1 은 x, y, z 축에 각각 2 개의 마이크로 폰을 설치한 3D 구형 프롭 모델이다.

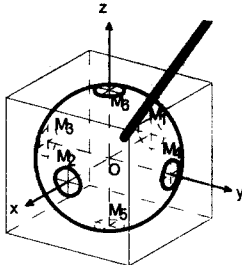


Fig. 1 3 dimensional spherical prob

다음은 소음원 탐지에 필요한 회절현상을 이론적으로 유도하였으며, 평면파가 원형구에 입사한다고 가정하였다. 원형구가 강체라는 가정하에 원형구의 모든점 M 과 시간 t 에 전체음압 $p_t(M,t)$ 와 전체속도 $\vec{u}_i(M,t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$p_i(M,t) = p_i(M,t) + p_d(M,t) \quad (1)$$

$$\vec{u}_i(M,t) = \vec{u}_i(M,t) + \vec{u}_d(M,t) \quad (2)$$

$$\vec{u}_i(M_0,t)\vec{n} = -\vec{u}_d(M_0,t)\vec{n}$$

여기서 i 는 입사파의 물리량을 나타내며, d 는 회절파의 물리량을 나타낸다.

원형구에서 방사되는 회절파의 Helmholtz 식은 다음과 같다.

$$\Delta p_d(M,t) + k^2 p_d(M,t) = 0 \quad (3)$$

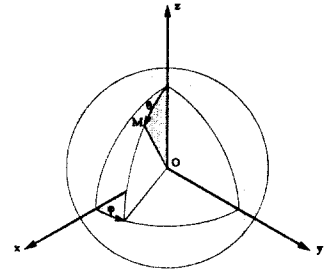


Fig. 2 Spherical coordinate

Fig. 2 와 같은 구좌표에서 회절파는 변수분리에 의해 반경항 $R(r)$ 과 각도항 $p(\theta)$ 로 분리되며, 회절파의 음압은 Helmholtz 식으로부터 Hankel 함수 h_m 과 Legendre 함수 P_m 을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다. 평면파가 입사각 θ_0 로 입사할 경우 입사파의 음압은 다음과 같다.

$$P_i(M,t) = P_0 e^{-i(krcos\theta + \omega t)} \quad (4)$$

여기서 P_0 는 입사음압의 진폭이다.

평면파가 입사할 경우 경계조건에 의한 회절파의 음압은 다음과 같다.

$$p_d(M_0,t) = -\sum_{m=0}^{\infty} \frac{P_0 (2m+1) i^m P_m(-\eta) j_m(ka)}{h_m(ka)} h_m(ka) e^{-i\omega t} \quad (5)$$

여기서 j_m 는 Bessel 함수이고, $\|\vec{OM}_0\| = a$ (a 는 원형구의 반경), $\eta = \cos\theta$ 이다. 따라서 원형구 표면에서의 전체음압 $p_t(M_0,t)$ 은 다음과 같다.

$$p_i(M_0,t) = \frac{P_0}{(ka)^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(2m+1) i^{m+1} P_m(-\eta)}{h_m(ka)} e^{-i\omega t} \quad (6)$$

원형구의 음압 회절효과를 알기 위하여 다음과 같이 이득 G 계수를 정의한다.

$$G = \frac{|p_i(M_0,t)|}{|p_i(M_0,t)|} \quad (7)$$

마이크로 폰 M_1 과 M_2 사이의 위상차 $\Delta\phi_{12}$ 는

다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\phi_{12} = \text{ARG}[P(M_2, t)] - \text{ARG}[P(M_1, t)] \quad (8)$$

Fig. 3은 평면파의 입사각이 $0^\circ \sim 110^\circ$ 사이일 때 주파수에 대한 이득 G 계수를 나타낸 것이다. 여기서 구형프롭의 반경 a 는 0.015m 이다. 고주파로

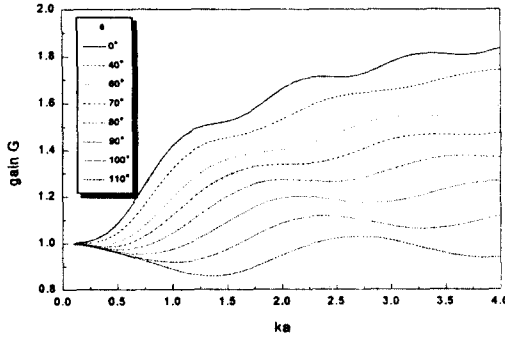


Fig. 3 Gain Factor G

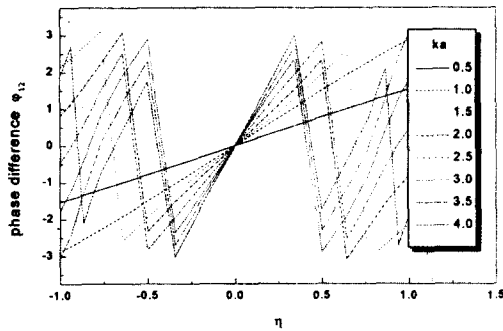


Fig. 4 Phase difference $\Delta\phi_{12}$ of two microphones

갈수록 회절효과가 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 평면파의 입사각과 주파수에 대한 마이크로폰 M_1 과 M_2 사이의 위상차 $\Delta\phi_{12}$ 를 나타낸 것이다. 저주파대역에서는 선형성을 보이나 고주파로 갈수록 비선형특성을 갖고 있다.

다음은 이론에 근거한 회절 현상으로부터 수치적 방법을 이용하여 역회절현상을 모델링한다. 특히 높은 파수의 경우, 회절효과는 비선형성이 존재하므로 선형뿐만 아니라 비선형영역에서도 회절현상을 역모델링할 수 있는 신경회로망을 이용하였다.

3. 신경회로망을 이용한 회절현상의 역 모델링

본 연구에서는 다층 퍼셉트론(multilayer perceptron)과 오류역전파 알고리즘(Error back-propagation)을 이용한 회절현상의 역모델링(inverse modeling)을 제안하였으며 모델링에 적용할 학습 구조는 Fig. 5와 같다. 역회절모델은 입출력을 갖는 black box로 다층퍼셉트론의 가중치에 의해 모델링된다.⁽⁸⁾ 다층퍼셉트론은 입력층, 출력층, 1개의 은닉층으로 구성되어 있다. 기준 모델(reference model)은 회절현상이며 이를 역 모델링하기 위해 기준모델의 출력을 입력으로 사용하였다. 따라서 입력은 각 마이크로폰 사이의 위상차와 소음원의 파수이며 출력은 소음원의 입사각도이다. 여기서 $\beta_{12} = \text{unwrapping}(\Delta\phi_{12}) = f(\eta, \alpha)$ 이다.

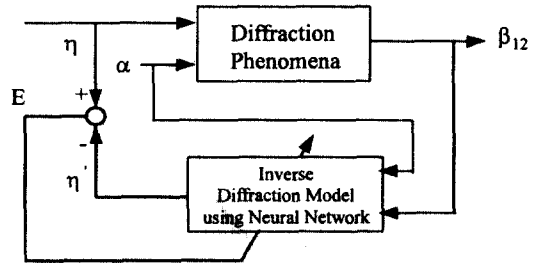


Fig. 5 Block diagram for inverse modeling of diffraction phenomena

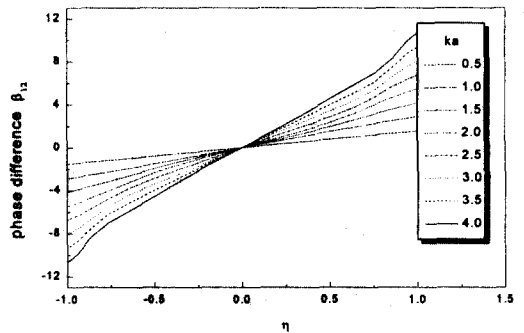


Fig. 6 Unwrapping the phase difference for continuous learning data

Fig. 4에서 위상차 $\Delta\phi_{12}$ 은 불연속성을 나타내므로 학습을 위하여 Fig. 6과 같은 연속성을 갖는

β_{12} 로 재구성하였다. 이를 이용하여 학습을 수행하였다.

회절현상의 역모델을 학습하기 위하여 신경회로망의 입력층은 2개, 은닉층은 10개, 출력층은 1개의 뉴런을 각각 사용하였다. 은닉층의 뉴런수는 학습의 정확도와 학습시간에 관련되므로 시행착오적으로 결정하였다. 학습은 50,000회까지 수행되었으며, Fig. 7은 학습후 회절현상을 역모델링한 결과이다.

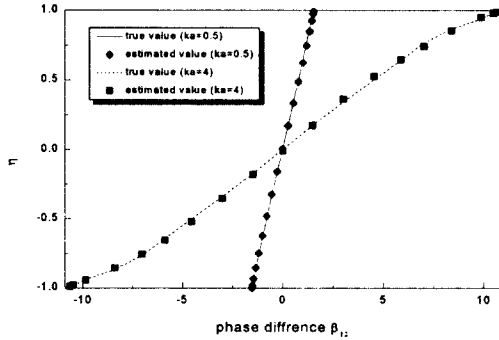


Fig. 7 Inverse modeling of diffraction phenomena using neural network.

신경회로망은 선형성을 갖고 있는 저주파수 대역뿐만 아니라 고주파수에서 나타나는 회절현상의 비선형성을 효과적으로 모델링하였다. 이 방법은 30개의 가중치로 복잡한 회절현상의 역모델을 간단히 구할 수 있다. 신경회로망은 수렴성, 입력데이터의 배열, 학습시간과 신경회로망 자체의 파라미터를 선정하는데 시행착오가 발생하는 반면 학습 후에는 적은 계수로 비선형성을 모델링하기 때문에 계산시간감소와 같은 장점이 있다.

이러한 가중치를 이용하여 위상차와 주파수에 대한 입사각을 구할 수 있고, 추정된 입사각으로 소음원을 규명할 수 있다.

4. 회절현상의 역모델을 이용한 소음원

탐지기법

다음은 회절현상의 역모델을 이용한 소음원 탐지기법을 4 단계로 기술하였다.

Step 1. 소음원 탐지 실험에서 3D 구형 프롭을 이용하여 x, y, z 축에 대한 자기 스펙트럼(auto spectrum)과 상호 스펙트럼(cross spectrum)을 측정

한다. 상호 스펙트럼으로부터 두 마이크로폰 사이의 위상차 $\Delta\phi_j$ 를 구한다 ($j=x, y, z$). 두 마이크로폰 사이의 이득계수차 Δg_j 는 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta g_j = G_j^2 - G_j^1 \quad (9)$$

여기서 G_j^2, G_j^1 는 마이크로폰 1, 2의 자기 스펙트럼(auto spectrum) 크기이다.

Step 2. 역회절 모델과 측정된 위상차로부터 소음 입사각도의 후보군을 계산한다.

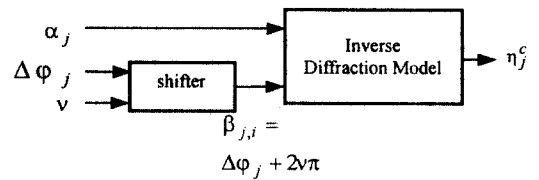


Fig. 8 Block diagram of determining the candidate incidence angle η_j^c .

Step 3. 이득계수차 검색을 이용하여 입사각도 후보군의 수를 축소한다.

Terminate if $N(\text{입사각도 후보군의 수})=1$
Else 이득계수차 검색을 이용

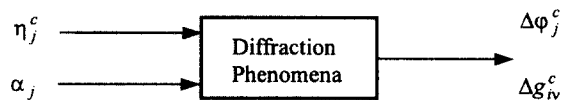


Fig. 9 Block Diagram of Diffraction Problem

이득계수차 검색 조건은 다음과 같다.

$$\Delta g_i \cdot \Delta g_n^c > 0 \quad (10)$$

Step 4. 입사각의 기하학적 조건을 이용하여 입사각도를 구한다.

Terminate if $N(\text{입사각도 후보군의 수})=1$
Else 입사각의 기하학적 조건을 이용

입사각의 기하학적 조건은 다음과 같다.

$$(\eta_x^c)^2 + (\eta_y^c)^2 + (\eta_z^c)^2 \approx 1 \quad (11)$$

입사각의 기하학적 조건을 이용하여 구한 입사각도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_x^c &= \cos\theta_x \\ \eta_y^c &= \cos\theta_y \\ \eta_z^c &= \cos\theta_z \end{aligned} \quad (12)$$

5. 시뮬레이션

다음은 회절현상의 역모델을 이용한 소음원 탐지기법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에서 주파수 및 입사각 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= k \cdot a = 0.5, 1.5 \\ \text{Incidence angle} &= 0^\circ, 180^\circ \end{aligned}$$

Fig 10, 11, 12, 13 은 위와 같은 시뮬레이션조건에서 회절현상의 모델, 역모델과 4 절의 4 단계 소음원탐지 절차에 의해 구한 결과이다. 실선은 이론값이며, *는 시뮬레이션조건에서 구한 결과이다. 소음원의 위치 추적이 효과적으로 수행되었음을 보여주고 있다.

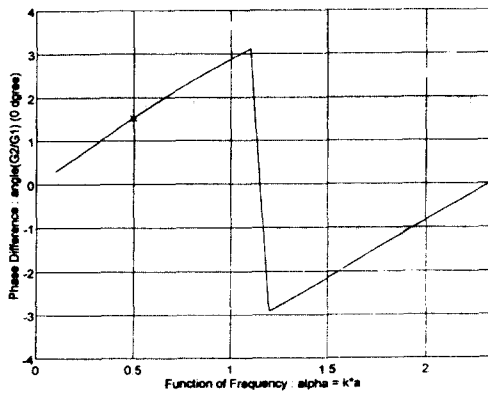


Fig. 10 Estimation of incidence angle (0° , $\alpha=0.5$)

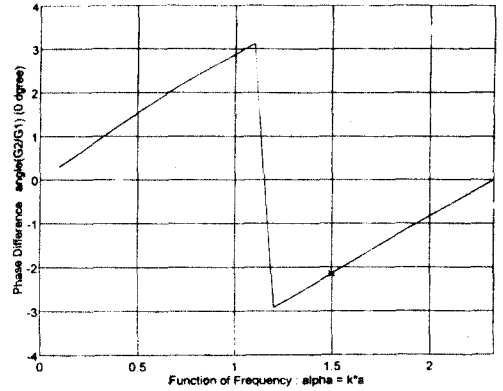


Fig. 11 Estimation of incidence angle (0° , $\alpha=1.5$)

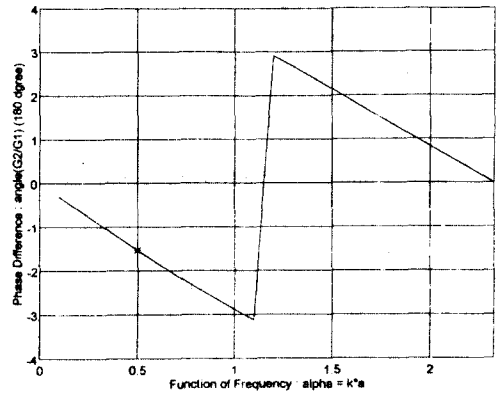


Fig. 12 Estimation of incidence angle (180° , $\alpha=0.5$)

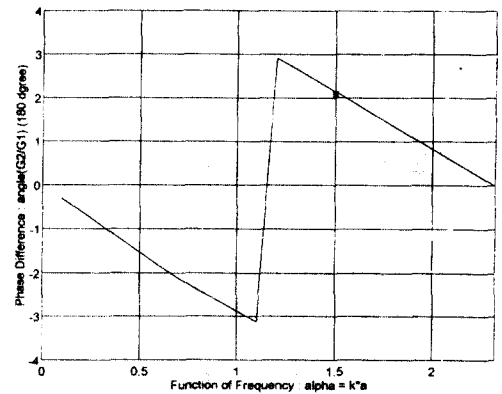


Fig. 13 Estimation of incidence angle (180° , $\alpha=1.5$)

6. 결론

본 논문에서는 회절현상을 이용한 소음규명 방법을 제시하였다. 구형 프로브의 회절현상은 이론적으로 쉽게 접근할 수 있으며, 이를 기초로 소음규명을 위한 회절현상을 역모델링할 수 있었다. 회절현상은 고주파로 갈수록 비선형성이 증가하기 때문에 회절현상의 역 모델링을 위하여 신경회로망 기법을 사용하였다. 회절현상의 역 모델을 이용한 소음원 탐지기법을 4 단계로 제시하였으며, 시뮬레이션을 수행하여 그 타당성을 검증하였다.

본 연구는 이러한 회절현상의 역 모델링을 이용하여 향후 실험에서 소음원 규명에 적용되리라 기대된다.

참고문헌

- (1) Fahy, F. J., 1988, *Sound Intensity*, Elsevier Applied Science.
- (2) Maynard, D., Williams, E. G. and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustic Holography and Development of NAH," *J. Acoust. Am.*, Vol. 78, pp. 1395-1413.
- (3) 나 회승, J.C.PATRAT, 1999, "신경회로망을 이용한 평면파 입사시의 역회절현상 모델링," 한국소음진동공학회지춘계학술대회 논문집
- (4) Morse, P. M., Ingard, K. U., *Theoretical Acoustic*, Mac Graw Hill.
- (5) Rumelhart, D., McClelland, J. and the PDP Research Group, 1986, *Parallel Distributed Processing*, Vols. 1 and 2, Cambridge MA, the MIT Press.
- (6) Lippman, R. P., 1987, "An Introduction to Computing with Neural Nets", *IEEE ASSP Magazine*, pp.4-22.
- (7) Coste, O. and Patrat, J. C., 1990, "Diffraction Autour d'une Sphère Appliquée à une Sonde Intensimétrique Tridimensionnelle", 1^{er} Congrès Français d'Acoustique.
- (8) Miller, W. T., Glanz, F. H., and Kraft, L. G., 1987, "Application of a General Learning Algorithm to the Control of Robotic Manipulators," *International Journal of Robotics Research* 6, pp. 84-98.