

빔형성 방법을 이용한 경사 반사계수 측정

Measurement of Oblique Incidence Reflection Coefficient Using Beamforming Method

주 형 준* · 강 연 준†

Hyung Jun Ju and Yeon June Kang

(2002년 12월 20일 접수 : 2003년 5월 26일 심사완료)

Key Words : Beamforming Method(빔형성 방법), MUSIC Method(다중신호분리 방법), Spatial Smoothing Technique(공간 평균법), Reflection Coefficient(반사계수)

ABSTRACT

A method using beamforming algorithm has been developed to measure oblique incidence reflection coefficients of sound absorption materials. MUSIC(multiple signal classification) method detects the angles of incidence and reflection. By separating the incident and reflected waves using beamforming method, the reflection coefficient is calculated. Spatial smoothing technique is also used to reduce the coherence between the incident and reflected waves. Numerical and experiment results are performed to verify the accuracy of proposed method.

1. 서 론

빔형성 방법(beamforming method)이란 원하는 방향의 신호를 강화시키고 원하지 않는 신호는 감소시키는 일종의 공간상의 필터이다.^(1,2) 이 빔형성 방법을 이용하여 입사파와 반사파를 분리하여 반사계수를 측정하였다. 이 논문에서는 두 가지 경우에 대하여 실험하여 보았다. 첫번째는 임피던스 튜브 내에서의 수직 입사에 대하여 측정하였고 두번째는 자유음장 내에서의 경사 입사에 대해 측정하였다. 비균질 흡음재에서는 경사입사 반사계수를 예측하기 어렵기 때문에 실험적으로 직접 측정할 필요가 있다. 경사 입사에 대하여 측정할 때는 MUSIC(multiple signal classification) 방법⁽³⁾을 사용하여 입사파와 반사파의 방향을 확인하여 실험 장치 설치상의 오차를 줄였다.

MUSIC 방법은 크로스 스펙트럼(cross-spectrum)의 고유치 분리 방법(eigenvalue decomposition)을 이용하여 신호에 직교하는 노이즈 서브스페이스(noise subspace)를 구성하여 신호의 방향을 탐지하는 방법이다. 그러나 MUSIC방법은 상관관계에 있는 신호에서는 현저한 성능 저하를 보인다. 왜냐하면 비상관관계의 신호에서만 크로스 스펙트럼 행렬의 기저벡터들이 서로 독립적이어서 신호들과 노이즈(noise) 사이의 직교성이 유지되기 때문이다. 이와 같은 이유 때문에 상관성을 줄이는 방법을 사용한다. 여기서는 공간 평균법(spatial smoothing)⁽³⁾을 사용하여 상관성을 줄인 크로스 스펙트럼 행렬을 사용한다. 위의 두 가지 경우의 측정과 모의실험을 통해 빔형성 방법을 이용한 반사계수 측정법의 유용성을 알아본다.

2. 이 론

2.1 공간 평균법(spatial smoothing)을 사용한 MUSIC(multiple signal classification) 방법
입사파와 반사파가 존재하는 공간에서 어레이 마이크로폰에 받은 신호는 식 (1)과 같다.

† 책임저자, 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-1691, Fax : (02) 883-1513
* 정회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{P}}_i & \hat{\mathbf{P}}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_i \\ s_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{r} 은 마이크로폰에서 받은 신호를 푸리에 변환 (Fourier transform) 을 한 값이다. $\hat{\mathbf{P}}_i, \hat{\mathbf{P}}_r$ 은 입사파와 반사파의 방향 벡터이고 s_i, s_r 은 입사파와 반사파의 신호이다. n_i 는 i 번째 마이크로폰의 노이즈를 나타낸다. 좌표는 Fig. 1과 같다. 입사파와 반사파 사이의 상관관계 때문에 마이크로폰의 크로스 스펙트럼이 두개의 두드러진 고유치를 가지지 않게 된다. 따라서 그에 해당하는 노이즈 서브 공간(noise subspace) 직교성이 떨어진다. 이와 같은 이유로 입사파와 반사파의 상관성을 줄이는 방법이 필요하다. 여기서는 공간 평균법을 사용한다. 공간 평균법은 N 개의 어레이 마이크로폰을 M 개의 서브어레이 마이크로폰으로 나누어 각각에서 구한 크로스스펙트럼을 평균하여 상관관계를 줄이는 과정이다. 마이크로폰을 늘이지 않고 평균횟수를 늘이기 위해 공액복소수이고 뒤로부터 (backward) 구한 크로스 스펙트럼도 합동이므로 평균할 수 있다. 이와 같은 방법은 전후 공간평균법 (forward-backward spatial smoothing)이라고 한다. 수식은 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{S}} = \frac{1}{2(N-M+1)} \left(\sum_{k=0}^{N-M} \mathbf{S}_k + \sum_{k=0}^{N-M} \mathbf{J} \mathbf{S}_k^* \mathbf{J}^T \right) \quad (2)$$

여기서 N 은 총 어레이 마이크로폰의 개수이고 M 은 서브 어레이 마이크로폰의 개수이다. 그리고 \mathbf{J} 은 역 대각행렬이다.

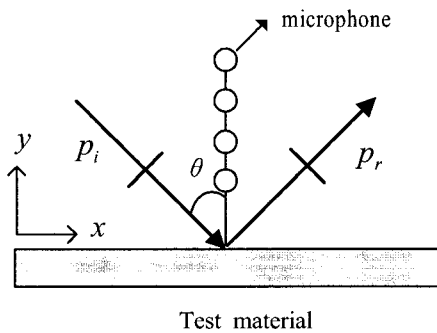


Fig. 1 Geometry of a linear array and related notation

공간 평균법 (spatial smoothing) 을 사용하여 상관관계에 있는 입사파와 반사파의 상관성을 줄인 다음 고유치 분리법을 사용하면

$$\mathbf{S}_{rr} = \sum_{k=1}^M \lambda_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H \quad (3)$$

여기서 λ_k 와 \mathbf{v}_k 는 공간 평균법에 의해 변환된 크로스 스펙트럼 행렬의 k 번째 고유치 (eigen value) 와 고유벡터 (eigen vector) 이다. 여기서 M 은 공간평균법에 사용된 서브어레이 (subarray) 마이크로폰의 개수이다. 조금의 연산을 통하면 다음과 같음을 알 수 있다. ⁽³⁾

$$\mathbf{v}_k^H \cdot \hat{\mathbf{P}}_i = 0, \quad \mathbf{v}_k^H \cdot \hat{\mathbf{P}}_r = 0, \quad \text{for } 3 \leq k \leq M \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_i = [\hat{\mathbf{p}}_1 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{p}}_M]^T, \quad \hat{\mathbf{P}}_r = [\hat{\mathbf{p}}_1 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{p}}_M]^T \quad (5)$$

여기서 $\hat{\mathbf{P}}_i$ 와 $\hat{\mathbf{P}}_r$ 는 입사파와 반사파의 방향벡터로 이루어진 행렬이다. 위의 성질을 이용하여 시도벡터 (trial vector) 가 입사파나 반사파의 신호와 평행 (parallel) 하면 MUSIC 파워가 최대가 되는 성질을 이용하여 입사각과 반사각을 다음의 MUSIC 파워를 계산함으로써 알 수 있다

$$P_M = \frac{1}{\sum_{n=3}^M |\mathbf{b}^H \mathbf{v}_n|^2} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{b} 는 시도벡터 (trial vector) 이다.

2.2 어댑티브 널링 (adaptive nulling) 방법

빔형성 방법 중 여기서는 어댑티브 널링 (adaptive nulling) 방법을 사용한다. 어댑티브 널링 방법은 다음 세가지 조건을 만족 시키는 빔 조종 벡터 (beam steering vector) 를 구성한다.

$$\text{maximize } |\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{p}_i|, \quad \text{maximize } |\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{p}_r| \quad (7)$$

$$\text{subject to } |\mathbf{a}_i| = 1, |\mathbf{a}_r| = 1 \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{p}_r = 0, \quad \mathbf{a}_r \cdot \mathbf{p}_i = 0 \quad (9)$$

여기서 \mathbf{a}_i 와 \mathbf{a}_r 은 입사파와 반사파의 빔조종 벡터이고 \mathbf{p}_i 와 \mathbf{p}_r 은 입사파와 반사파이다. 첫번째 조건

은 원하는 신호와의 내적은 최대화 하고 두번째 조건은 그 크기가 단위벡터가 되도록 하며 세번째 다른 방향의 신호와의 내적은 영(zero)가 되도록 하는 것이다. 위의 세가지 조건을 만족시키는 빔 조종 벡터를 구성하는 방법은 다음과 같다.

우선 입사파의 신호를 구하기 위한 빔 조종벡터를 만들기 위해서 다음과 같은 과정을 거치게 된다. 우선 식 (9)를 만족시키기 위해서는 빔 조종벡터는 반사파와 직교성을 가져야 한다. 그 조건을 만족시키기 위해서 N 번째 마이크로폰에 입사하는 반사파의 방향 벡터는 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{p}}_N = \exp -jk(\cos\theta_r x_N + \sin\theta_r y_N) \quad (10)$$

여기서 k 는 파동수(wave number)이고 θ_r 은 반사각이다.

위의 벡터들로 이루어진 행렬을 구하면

$$\hat{\mathbf{P}}_r = [\hat{\mathbf{p}}_1 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{p}}_N]^T \quad (11)$$

위 행렬을 고유치 분리법(eigenvalue decomposition)하면 다음과 같게 된다.

$$\hat{\mathbf{P}}_r = \mathbf{Q}_1 \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}_2 \quad (12)$$

여기서 \mathbf{Q}_1 은 $N \times N$ 의 $\hat{\mathbf{P}}_r \hat{\mathbf{P}}_r^T$ 의 고유벡터의 열로 이루어진 행렬이다. 반사파에 직교하는 조건을 만족시키기 위해 빔 조종벡터는 다음과 같다고 하자

$$\mathbf{a}_i = \sum_{k=2}^N \alpha_k \mathbf{e}_k \quad (13)$$

여기서 \mathbf{e}_k 는 k 번째 고유벡터이고 α_k 은 아직 구하지 않은 복소수이다.

식 (7)과 식 (8)을 만족시키기 위해서는

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{p}_i = \sum_{k=2}^N \alpha_k \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{p}_i = \sum_{k=2}^N \alpha_k \mathbf{p}_k^e = \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p}^e \quad (14)$$

$$\sum_{k=2}^N |\alpha_k \mathbf{e}_k|^2 = 1 \quad (15)$$

여기서 $\boldsymbol{\alpha}$ 는 α_k 로 이루어진 벡터이고 \mathbf{p}^e 는 \mathbf{p}_k^e 로

이루어진 벡터이다. 식 (7)을 만족하기 위해서는 $\boldsymbol{\alpha}$ 는 다음과 같아야 한다.

$$\boldsymbol{\alpha} = [\mathbf{p}_2^e \quad \dots \quad \mathbf{p}_N^e]^T \quad (16)$$

마지막으로 식 (8)을 만족하기 위해서는

$$\mathbf{a}_i = \sum_{k=2}^N \mathbf{p}_k^e \mathbf{e}_k / \left| \sum_{k=2}^N \mathbf{p}_k^e \mathbf{e}_k \right| \quad (17)$$

다음과 같이 얻어진 빔형성 벡터로 마이크로폰 신호에 내적하면 다음과 같이 입사파를 구할 수가 있다.

$$q_i = \mathbf{a}_i \cdot [\hat{\mathbf{P}}_i \quad \hat{\mathbf{P}}_r][s_i \quad s_i]^T = c_i s_i \quad (18)$$

앞의 복소수 상수는 $c_i = \mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{P}}_i$ 이다.

반사파를 구하는 방법도 입사파와 같은 방법으로 구할 수 있다.

따라서 반사 계수는 다음과 같다.

$$R = s_r / s_i \quad (19)$$

여기서 s_i , s_r 는 빔형성 방법을 이용하여 구한 입사파와 반사파이다.

2.3 이론적인 경사반사 계수

매질 1에서 매질 2로 입사하는 경우 두 매질의 특성 임피던스(characteristic impedance)가 Z_1 , Z_2 이고 파동수가 k_1, k_2 이라고 하면 입사각 θ 에 따른 반사계수는 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$R(\theta) = \frac{Z_2 \cos\theta - Z_1 [1 - (k_1/k_2)^2 \sin^2\theta]^{1/2}}{Z_2 \cos\theta + Z_1 [1 - (k_1/k_2)^2 \sin^2\theta]^{1/2}} \quad (20)$$

테스트 물질의 특성 임피던스와 복소수 파동수는 전달함수 방법으로 다음과 같이 구해질 수 있다.⁽⁵⁾

$$Z_c = \pm \left(\frac{Z_b Z_b' (Z_s - Z_s') - Z_s Z_s' (Z_b - Z_b')}{(Z_s - Z_s') - (Z_b - Z_b')} \right)^{1/2} \quad (21)$$

$$k = \frac{1}{2jd} \ln \left(\frac{Z_b + Z_c}{Z_b - Z_c} \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} \right) \quad (22)$$

여기서 Z_b, Z'_b 은 서로 다른 백킹(Backing) 임피던스 이고 Z_s, Z'_s 은 서로 다른 백킹 조건에서의 표면 임피던스이다. 그리고 d 는 테스트 물질의 두께이다.

3. 수직입사 반사계수 측정

3.1 실험 장치

샘플 2개에 대해 임피던스 튜브내에서의 수직입사 반사계수를 측정하였다. 본 실험에서는 두 마이크로폰 방법과(two-microphone method)⁽⁵⁾ 비교하여 보았다. 빔형성 방법도 역시 두 마이크로폰 방법과 같이 두개의 마이크로폰을 사용하였다. 실험 장치는 Fig. 2와 같다.

샘플은 Fig. 3과 같이 폴리우레탄 재질 2개를 사용하였다.

3.2 측정치 비교

샘플 2개에 대해 반사계수를 측정하여 보았다. 두 마이크로폰 방법과 빔형성 방법을 이용하여 구한 반사계수를 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. 결과에서와 같이 두 마이크로폰과 빔형성 방법의 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 평균 개수는 200번이며 측정 시간은 0.5초이며 시간 샘플 개수는 2048개이다.

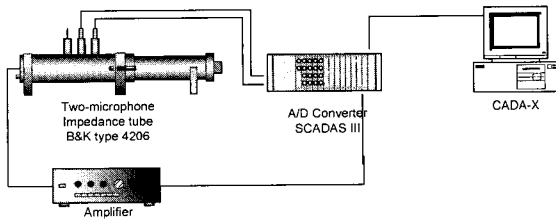
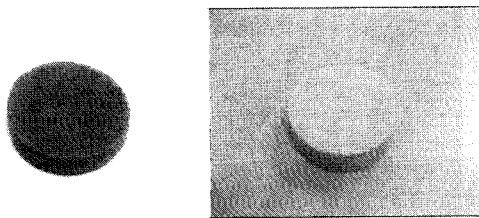
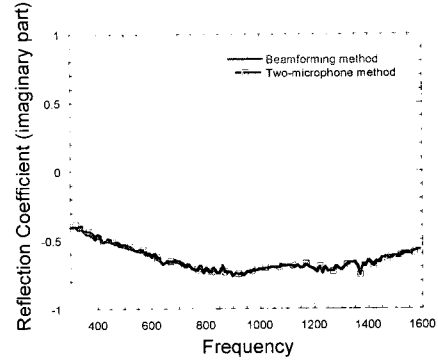
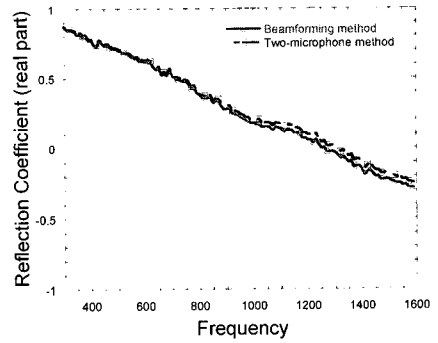


Fig. 2 Experiment setup(for normal incidence)

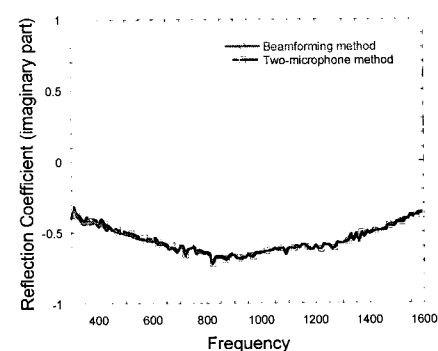
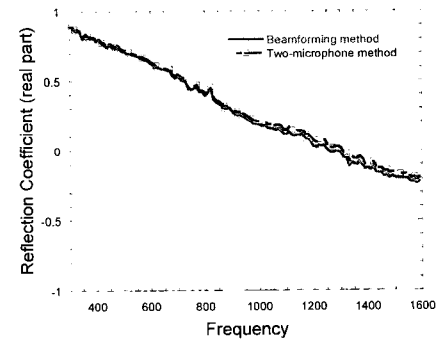


(a) sample 1 (b) sample 2

Fig. 3 The pictures of sample



(a) sample 1



(b) sample 2

Fig. 4 Comparisons of reflection coefficient using beamforming and two-microphone method

4. 경사입사 반사계수 측정

4.1 실험 장치

실험 장치는 Fig. 5와 같다 4 cm 간격의 4개의 선형 마이크로폰 어레이를 사용하였다. 소스(source)로는 램덤 신호를 발생하는 스피커를 사용하였다. 스피커는 원거리에 두어 평면파로 가정할 수 있도록 하였다. 그리고 샘플과 마이크로폰 어레이의 거리는 4 cm 이다.

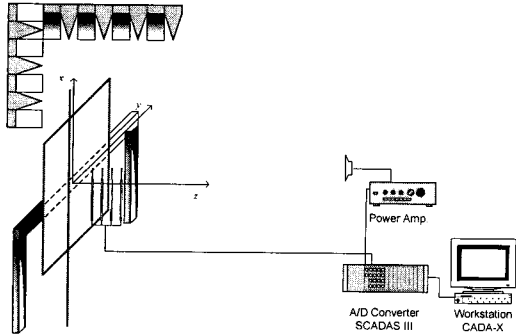
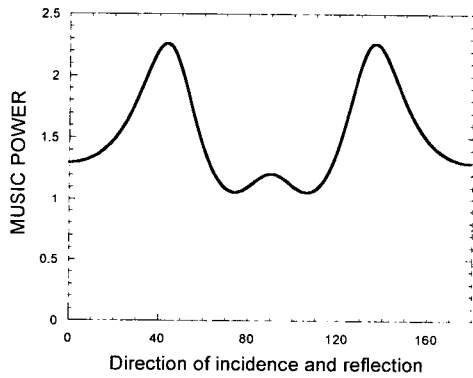


Fig. 5 Experimental setup(for oblique incidence)

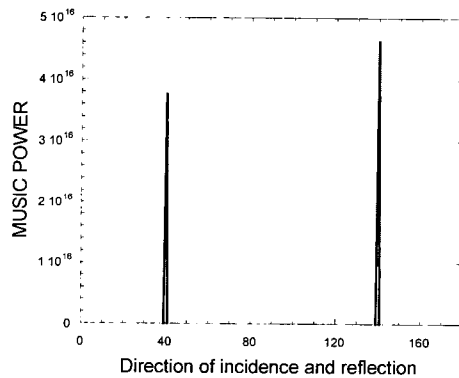
공간 평균법(spatial smoothing)을 이용하여 상관성을 줄인 어레이 크로스 스펙트럼 만들어 MUSIC (multiple signal classification)을 사용하였다. 공간 평균법에 사용된 서브 어레이의 개수는 3개를 사용하였다. 실험 장치상 입사파와 반사파의 각도 오차는 반사계수 측정에 큰 영향을 주기 때문에 MUSIC 방법을 사용하여 입사각과 반사각을 측정하여 실험 장치상 오차를 줄였다.

4.2 모의 실험 결과

샘플 1에 대해 모의 실험을 해 보았다. 샘플의 두께는 3 cm이고 표면 임피던스(surface impedance)를 사용하여 모의실험을 해 보았다. 램덤신호를 사용하



(a) MUSIC without spatial smoothing



(b) MUSIC with spatial smoothing

Fig. 6 Comparisons of numerical MUSIC results with and without spatial smoothing(angle of incidence 40°, angle of reflection 140°)

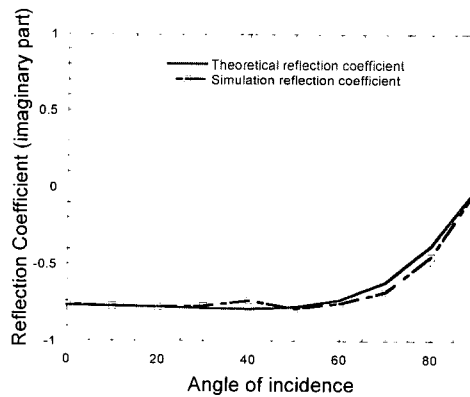
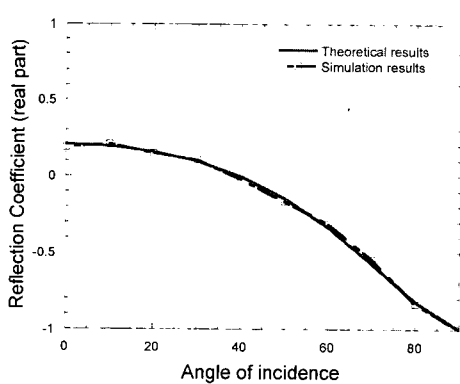


Fig. 7 Comparisons of the theoretical and numerical results (frequency = 1000 Hz, average number = 20, SNR = 10 dB)

였고 SNR(signal to noise ratio)는 10 dB일 경우에 대하여 모의실험을 해보았다. 먼저 공간평균(spatial smoothing)을 이용하여 MUSIC 방법으로 입사파와 반사파의 방향을 탐지한다. Fig. 6은 공간 평균법을

사용하였을 때와 사용하지 않았을 때를 비교한 모의 실험 결과이다. 그림에서와 같이 공간평균법을 사용하지 않았을 때는 MUSIC 방법을 이용하여 입사각과 반사각이 잘 탐지되는 것을 알 수 있다. 여기서 MUSIC

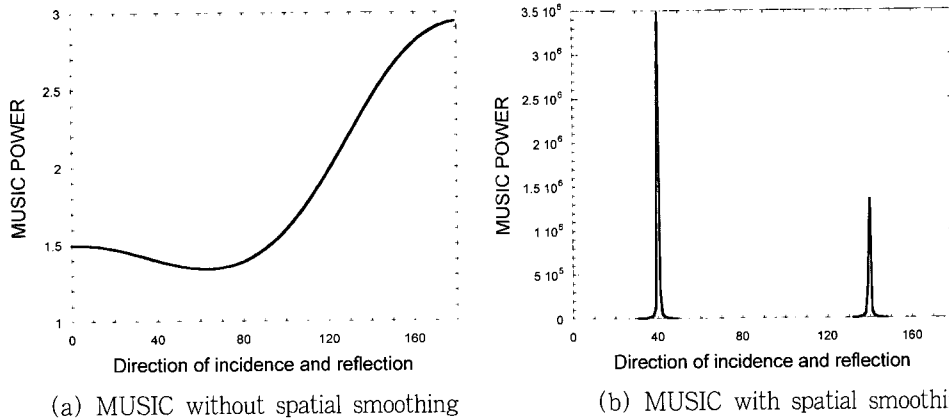


Fig. 8 Comparisons of experimental MUSIC results with and without spatial smoothing(angle of incidence 40°, angle of reflection 140°)

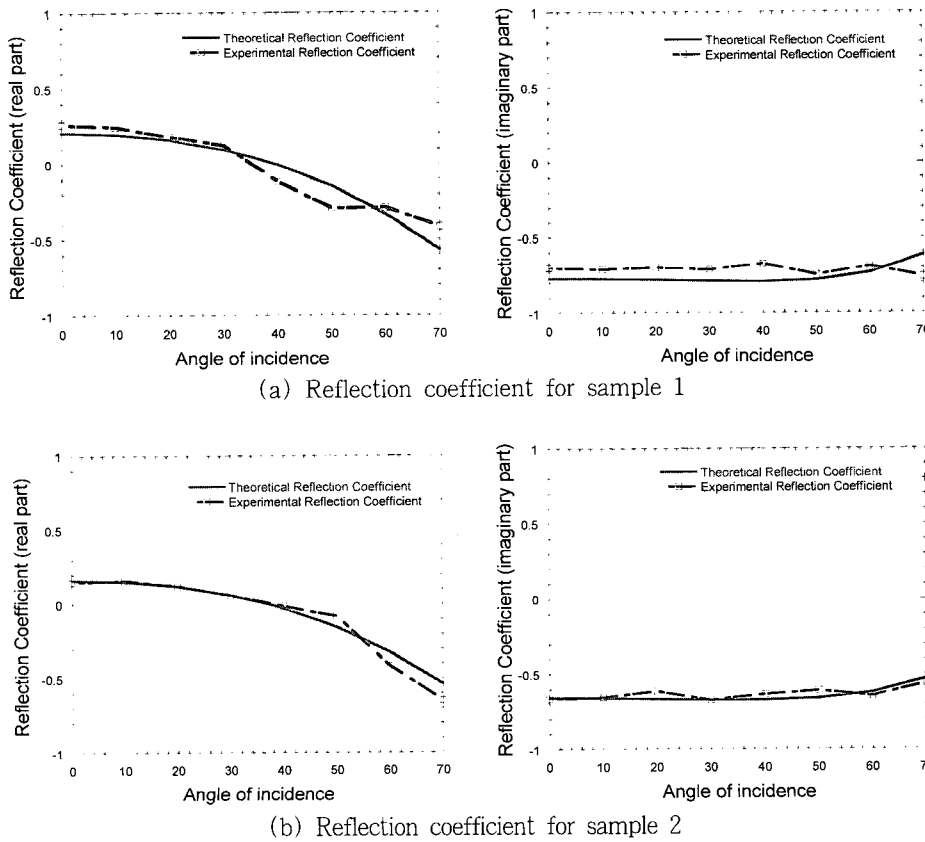


Fig. 9 Comparisons of the theoretical and experimental results(frequency = 1000 Hz, average number = 20)

파워의 크기는 물리적 의미를 지니는 것이 아니라 첨두치에서 입사파와 반사파의 방향을 나타내는 것이다. 빔형성 방법으로 측정된 반사계수와 이론적인 값을 비교한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

4.3 실험 결과

샘플 1과 샘플 2에 대하여 경사입사 반사계수를 측정하여 보았다. 무향실 내에서 램덤 신호 스피커를 사용하여 측정하여 보았다. 스피커는 원거리(far-field)에 두어 평면파 조건을 만족시키도록 하였다. Fig. 8은 실험에서의 공간평균법을 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때의 뮤직(MUSIC)결과이다. 그림에서와 같이 공간 평균법을 사용하지 않았을 때는 입사각과 반사각을 탐지하지 못하는 데에 비해 공간 평균법을 사용하였을 때는 입사각과 반사각을 잘 탐지하는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 9는 입사각에 따른 샘플 1과 2의 이론적인 반사계수와 실험치를 비교한 것이다. 모의 실험과 마찬가지로 이론적인 반사계수와 실험에서 측정된 반사계수가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 샘플은 3 cm 두께를 사용하였으며 전달함수 방법을 이용하여 특성 임피던스와 복소수 파동수를 구할 수 있다.⁽⁶⁾ 샘플은 하드백킹(hard backing) 조건이다. 평균 횡수는 50번이고 측정시간은 0.5초이고 샘플개수는 2048이다.

5. 결 론

본 논문에서는 빔형성 방법을 사용하여 반사계수 측정을 제안하였다. 임피던스 튜브 내에서의 수직입사 반사계수를 측정하여 기존의 방법과 비교하여 이 방법의 신뢰성을 확인시켰다. 또한 경사입사의 경우 공간 평균법과 MUSIC 방법을 사용하여 입사각과 반사각을 측정하여 실험 장치 설치상 오차를 최소화 하고 빔형성 방법을 이용하여 반사계수를 측정하였다.

이론적인 값과 모의실험, 실제 실험과의 비교를 통하여 이 방법을 신뢰성을 확인했다.

후 기

이 논문은 BK21과 KISTEP의 지원으로 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

- (1) Burdic, W. S., 1984, Underwater Acoustic System Analysis. (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ).
- (2) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing: Concepts and Techniques. (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ).
- (3) Joseph, C., Liberti, Jr. and Theodore S., 1999, Rappaport, Smart Antennas for Wireless Communications, Chapter 9. (Prentice-Hall, Upper Saddle River).
- (4) Tamura, M., 1990, "Spatial Fourier Transform Method of Measuring Reflection Coefficients at Oblique Incidence. I: Theory and Numerical Examples," J. Acoust. Soc. Am. 88, pp. 2259~2264.
- (5) Allard, J. F., 1993, Propagation of Sound in Porous Media(Elsevier Applied Science, New York).
- (6) Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T. and Sybert, A. F., 1989, "Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Material," J. Acoust. Soc. Am. 86, pp. 637~643.
- (7) 이명준, 황의석, 조영만, 강연준, 2001, "음향 홀로그래피에서 빔형성을 이용한 부분 음장 분리," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 6 호, pp. 200~207.