

음선 추적법 기반 TRM을 이용한 반사 및 굴절 환경 속의 소음원 탐색에 대한 연구

Source finding in reflection and refraction environment using based on ray tracing method TRM

문상일† · 이재형* · 최종수*

Sang Il Moon, Jae Hyung Lee, Jong Soo Choi

Key Words : Ray tracing method(음선 추적법), Fermat's principle(페르마의 원리), Time reversal method(시간 반전 기법), Source finding(음원 탐색)

ABSTRACT

The goal is to find the position of the sound source with the TRM at reflections and refractions environment. The Fermat's principle applied to the ray tracing method are expected to follow the acoustic path in order to obtain acoustic distance and transmittance to. Utilizing them in the TRM was confirmed rear reflectance affect on estimated position, resolution and side lobe. And the TRM performance were superior to one of the beam forming techniques.

기 호 설 명

- S : 음향학 경로 길이
- s : 기하학 경로 길이
- c_0 : 기준 음속
- n : 굴절률
- \vec{M} : 마하수 벡터
- \vec{v} : 전파 속도 벡터
- $\theta = \arccos(v_x/v)$
- $\phi = \arctan(v_z/v_y)$
- $\tilde{R} = \tilde{p}_r/\tilde{p}_i$: (압력) 반사율
- $\tilde{T} = \tilde{p}_t/\tilde{p}_i$: (압력) 투과율

집속하는 기술로 구현하기 쉬우면서도 왜곡에 강하여 다양한 환경에서 적용할 수 있다. 다만, 성능을 제대로 발휘하기 위해서는 주어진 매질에서 파동의 특성을 정확히 계산해야 한다. 파동 방정식은 정확하나 복잡하다. 반면 기존의 음선 추적법은 단순한 것이 장점이나 정확도에 한계가 있다.

이전의 연구⁽¹⁾에서는 오일러-라그랑주 방정식을 음선 추적법에 적용하여 복잡한 매질의 음장을 해석하였으나 알고리즘 상의 제약으로 인해 실용적이지 못하였다. 또한 반사 및 굴절의 영향을 무시하였다.

따라서 이번 연구에서는 오일러-라그랑주 방정식 보다 단순한 법칙을 통해 안정성을 확보하였으며 반사 및 굴절의 영향을 보정하였다.

1. 서 론

시간 반전 기법(TRM)은 음원을 찾거나 에너지를

2. 음향학 거리

흐르는 매질에서는 음파가 전달될 동안 유속에 의해 떠내려가므로 음파의 고유거리와 경로의 기하학적 길이가 달라진다. Fig. 1의 소리는 검은 화살표 방향으로 전파되려 하지만 유속에 의해 연두색 화살표 방향으로 진행한다. 일정한 유속과 굴절률을

† 교신저자 ; 충남대학교 항공우주공학과 대학원
E-mail : gunloc@daum.net
Tel : (042)821-7774, Fax : (042)825-9225

* 충남대학교 항공우주공학과

가진 매질에서 음파가 진행한 고유 거리 S 와 기하학 거리 s 사이의 관계는⁽²⁾

$$S = \frac{nv s}{\vec{M} \cdot \vec{v} + \sqrt{v^2 - |\vec{M} \times \vec{v}|^2}} \quad (1)$$

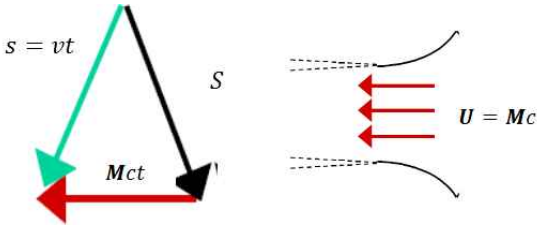


Fig. 1 Sound propagation path in a uniform stream
일정하지 않은 유속과 굴절률을 가진 영역에서(Fig. 2)

$$S = \int_{s_1}^{s_2} \frac{nv ds}{\vec{M} \cdot \vec{v} + \sqrt{v^2 - |\vec{M} \times \vec{v}|^2}} \quad (2)$$

를 음파가 전달된 음향학 거리(acoustic distance) 혹은 음향학 경로 길이(APL : Acoustic Path Length)로 정의한다. 소리의 확산 특성은 이 거리를 따른다.

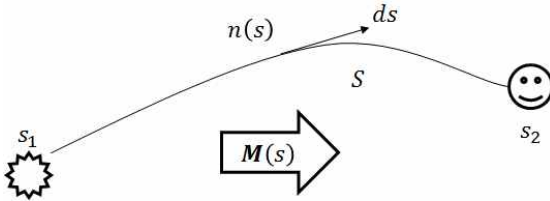


Fig. 2 Sound propagation path in a random stream

3. 음선 추적법

음선 추적법은 음파를 선(ray)으로 취급하여 음선이 매질을 투과 혹은 반사하여 센서에 도달하는 경로를 기하학적으로 계산하는 기법이다. 음선은 파면에 비해 굴절, 반사를 취급하기 편하나 파동성(회절, 간섭)을 무시하므로 규모가 파장보다 충분히 큰 시스템에만 적용할 수 있다.

기존의 음선 추적법은 많은 음선을 취급하므로 오랜 계산 시간이 소요되는 단점이 있다.(Fig. 3)⁽³⁾ 하지만 '페르마의 원리'를 따르는 경로를 탐색하여 음선의 수를 최소화 할 수 있다.(Fig. 4)

3.1 페르마의 원리

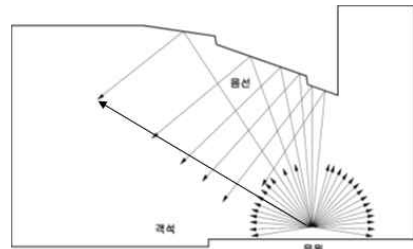


Fig. 3 Conventional ray-tracing method

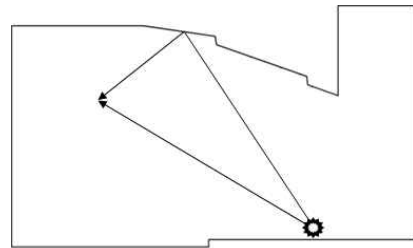


Fig. 4 Fermat's principle apply to ray-tracing method

페르마의 원리는 소리는 시작점과 종말점 사이를 최단 시간으로 이동할 수 있는 경로를 택한다는 것으로 최소 시간의 원리(principle of least time)로도 불리는 음향학과 광학의 기본 원리이다. Fig. 5(A)는 반사 법칙으로 기하학적으로 가능한 경로 중에 입사각과 반사각이 같은 경로가 최단임을 보여준다. Fig. 5(B)는 스넬의 법칙으로 기하학적 최단 경로(직선)가 아닌 최단 시간 경로로 굴절하는 법칙이다.

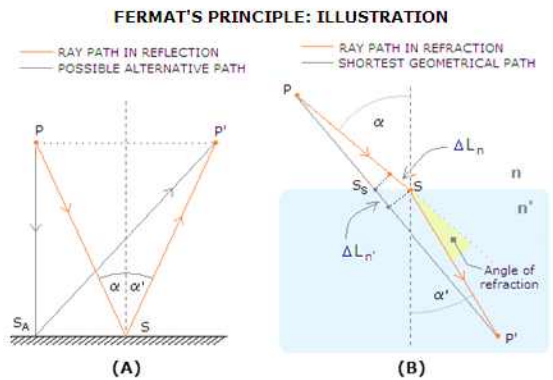


Fig. 5 (A) Specular reflection (B) Snell's law by Fermat's principle

3.2 유동 매질에서의 스넬의 법칙

페르마의 원리는 모든 매질에 적용되지만 이번 연구에서는 몇 가지 가정을 만족하는 매질(Fig. 6 and Fig. 7)에서 따르는 법칙을 유도하고자 한다.

- $\vec{M} = M(y, z) \hat{i}$: 한 방향 유동이며 유동 방향으로 일정한 유속
- $n = n(y, z)$: 유동 방향으로 일정한 굴절률
- 매질 계면은 $y=0$ 평면이고 굴절점의 좌표는 $\vec{r} = (x, 0, z)$

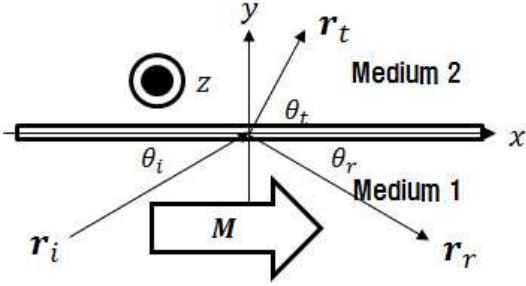


Fig. 6 Top view of sound propagation through shear layer

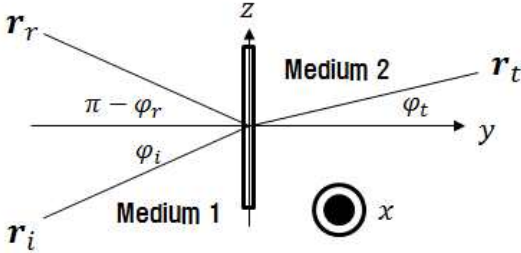


Fig. 7 Front view of sound propagation through shear layer

식 (1)을 시간으로 나누고 위의 가정에 따라 정리하여 x 방향 속도를 얻는다.

$$c \cos \theta = v \cos \theta / (M \cos \theta + \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta}) \quad (3a)$$

$$v \cos \theta = c \cos \theta (M \cos \theta + \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta}) \quad (3b)$$

굴절점은 전파시간을 최소화 하므로

$$\frac{\partial}{\partial(x, z)} \left(\frac{x - x_i}{v_i \cos \theta_i} + \frac{x_t - x}{v_t \cos \theta_t} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\left(\cos \theta - \frac{M}{M \cos \theta + \mu} \right) / \mu = \text{constant} \quad (5)$$

$$\sin \theta \sin \phi / \mu = \text{constant} \quad (6)$$

where $\mu \equiv \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta}$

식 (5)와 식 (6)의 연립방정식이 단일 방향 유동 매질에서의 스넬의 법칙이다.

3.3 유동 경계를 통한 투과/반사율

유동 매질에서 입사/반사/투과파는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i = \tilde{p}_i e^{j[\omega t - k(X_i x - Y_i y - Z_i z)]} \quad (7a)$$

$$p_r = \tilde{p}_r e^{j[\omega t - k(X_r x - Y_r y - Z_r z)]} \quad (7b)$$

$$p_t = \tilde{p}_t e^{j[\omega t - k(X_t x - Y_t y - Z_t z)]} \quad (7c)$$

계면($y=0$)에서 두 매질의 압력이 같아야 하므로 X, Z 가 같아야하며 경계면에서의 보존법칙인 스넬의 법칙이 여기에 해당한다. 따라서

$$p_i + p_r = p_t \quad (8)$$

$$p(\vec{r}) = \tilde{p} e^{j[\omega t - (\vec{k} \cdot \vec{r} - \frac{k M x}{M \cos \theta + \mu}) / \mu]} \quad (9)$$

입사파와 반사파의 마하수가 같으므로

$$\theta_i = \theta_r, \phi_i = \pi - \phi_r \quad (10)$$

경계면의 수직 속도가 동일해야 하므로 반사율은⁽⁴⁾

$$\tilde{R} = \frac{\sin \theta_i \cos \phi_i / \mu_i - \sin \theta_t \cos \phi_t / \mu_t}{\sin \theta_i \cos \phi_i / \mu_i + \sin \theta_t \cos \phi_t / \mu_t} \quad (11)$$

식(7)과 식 (8)에 의해 투과율은

$$\tilde{T} = \frac{2 \sin \theta_i \cos \phi_i / \mu_i}{\sin \theta_i \cos \phi_i / \mu_i + \sin \theta_t \cos \phi_t / \mu_t} \quad (12)$$

Fig. 8은 마하수 0.1 \rightarrow 0 경계를 투과하는 소리의 반사율이다. 가로축은 $\cos \theta_i$, 세로축은 \tilde{R} 이다.

4. 시간 반전 기법

음원에서 방출된 소리는 시간이 지나면 수신기에 도달할 것이다. 그러나 시간이 역행하면 음원으로 소리가 되돌아가야 물리법칙을 만족할 것이다.

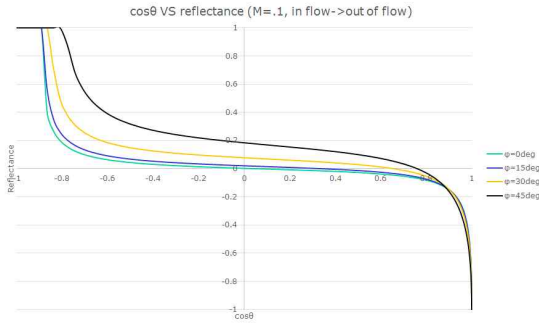


Fig. 8 Cosine of incidence angle VS. Pressure reflectivity ($\cos\theta = 1$ means propagation to downstream direction)

이러한 성질을 이용해 수신기에서 녹음된 신호가 되돌아가는 곳을 찾는 기술이 TRM이다.⁽⁵⁾ 시간이 역행하므로 전파 과정의 왜곡이 거꾸로 일어나기에 어떤 매질에서도 음원을 정확히 찾을 수 있다.(Fig. 9)

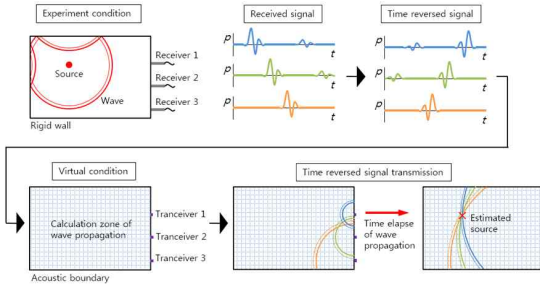


Fig. 9 Schematic of source finding using TRM

4.1 TRM을 이용한 음원 탐색

TRM은 크게 수신 phase와 송신 phase로 나눌 수 있다.

수신 phase에서 n 번째 수신기에 들어오는 음압은 $p_n(t)$ 으로 나타낼 수 있다. 각각의 수신기는 진폭과 위상만을 알 수 있으며 그 외의 정보는 알 수 없다. 시간의 흐름과 유동 정보는 모두 정상이다.(Fig. 10)

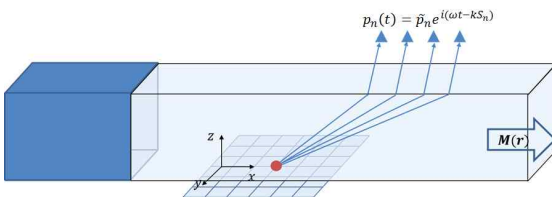


Fig. 10 Reception phase of TRM

송신 phase에서 각각의 수신기는 녹음된 신호를 송신한다. m 번째 예상 음원에 모이는 TR압력 q_m 은 모든 수신기로부터 전달된 음파의 합이다.(Fig. 11)

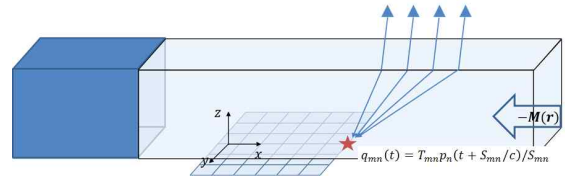


Fig. 11 Transmission phase of TRM

$$q_m(t) = \sum_n T_{mn} p_n(t + S_{mn}/c_0) / S_{mn} \quad (13)$$

투과율과 APL은 음선 추적법으로 구하며, 시간과 유동은 역행하는 것으로 간주하여 APL에 의한 위상차는 음수가 되고 투과율은 같은 기하학적 조건에 역방향 유동을 넣어서 푼다.

4.2 빔형성 기법과의 비교

TRM은 지연-합 빔 형성(Delay and Sum beam forming) 기법과 매우 유사하다. 지연-합 빔 형성 기법의 빔파워는⁽⁶⁾

$$q_m(t) = \frac{1}{N} \sum_n p_n(t + S_{mn}/c_0) \quad (14)$$

지연-합 빔 형성 기법은 무풍, 균일 매질을 가정하므로 복잡한 매질에서 왜곡이 발생하며 이를 따로 보정해주어야 한다. 보편적으로 Amiet식 보정⁽⁷⁾이 활용된다. 하지만 Amiet식 보정은 음원의 위치를 알고 써야하므로 미지의 음원을 찾는 본 연구에는 적합하지 않다.

5. 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 조건

기하학적 조건은 Fig. 12에서 보는 바와 같다. 파란 점이 음원(0,0,0)m이고 뒤의 바둑판 모양이 어레이 수신기, 초록색이 풍동 출구를 뜻하며 유속은 34.5m/s($c_0 = 345$ m/s)이다. 반사판의 영향을 알아보기 위해 일부 조건에서는 어레이 반대편의 파란 네모 위치(0,-0.2,0)m에 완전반사판을 설치하였다. 음원은 1kHz 정현파를 발산한다.

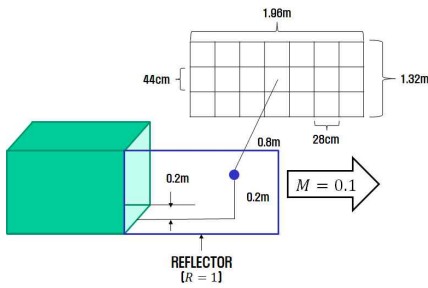


Fig. 12 Simulation condition

5.2 반사벽의 영향

Table 1 3dB resolution(Ref. vs No ref.)

3dB res.	Reflector	No reflector
(0,0)mm	(204,229)	(184,212)
(-200,0)mm	(210,227)	(185,212)

Table 2 Side lobe rejection(Ref. vs No ref.)

SLR.	Reflector	No reflector
(0,0)mm	10.82dB	10.48dB
(-200,0)mm	12.22dB	11.47dB

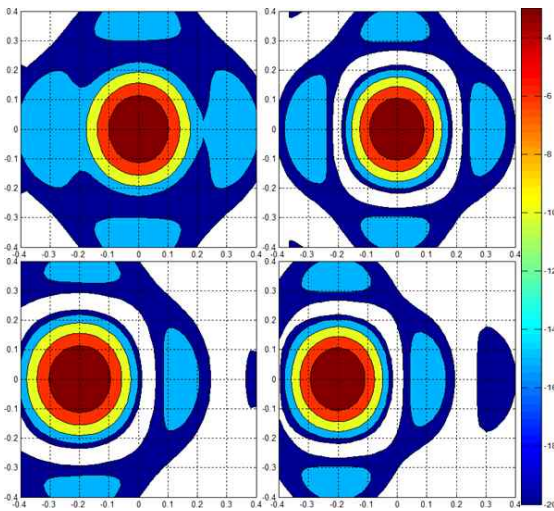


Fig. 13 square TR pressure distribution (row: upper; source at (0,0,0), lower; source at (0,-0.2,0). column: left; reflector, right; no reflector. Length unit: m, Contour unit: dB)

반사판으로 인해 부엽(Side-lobe)이 감소하면서 3dB 해상도(resolution)가 미세하게 무더진다. 하지만 이러한 변화에도 정확히 음원의 위치를 찾았다.

5.3 TRM vs DNS 빔 형성

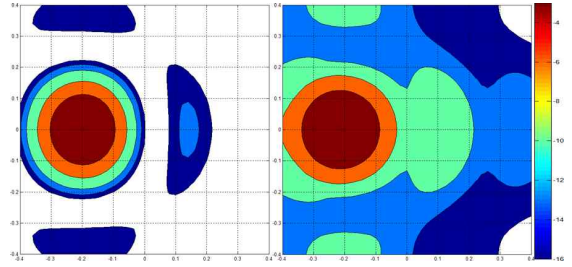


Fig. 14 Compare TRM and DNS beam forming by simulation (source at (0,-0.2,0), reflector. left: TRM, right: DNS beam forming. Length unit: m, Contour unit: dB)

Table 3 3dB resolution(TRM vs DNS), SIM

3dB res.	TRM	DNS
(-200,0)mm	(210,227)	(252,252)

Table 4 Side lobe rejection(TRM vs DNS), SIM

SLR.	TRM	DNS
(-200,0)mm	12.22dB	6.77dB

반사판이 있고 음원이 (-200,0)mm 지점에 있는 경우에 TRM과 지연-합 빔 형성 기법의 결과를 확인하였다. TRM이 해상도와 부엽 특성 모두 뛰어나다. 반면 DNS 빔 형성 기법에는 비대칭적인 왜곡이 나타나 실제보다 20mm 상류 지점을 가리켰다.

6. 실험 결과

6.1 실험 장비도

Fig. 16와 같이 음원(0,0,0)에서 1m 떨어진 곳에 31개의 수신기로 된 나선형 어레이를 설치하였다. Fig. 15는 실제 장비가 설치된 모습이다.⁽⁸⁾

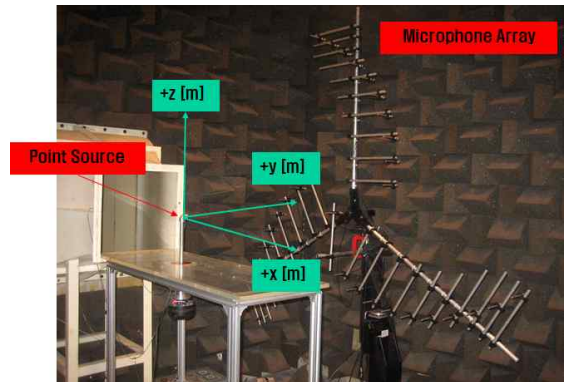


Fig. 15 Experimental apparatus

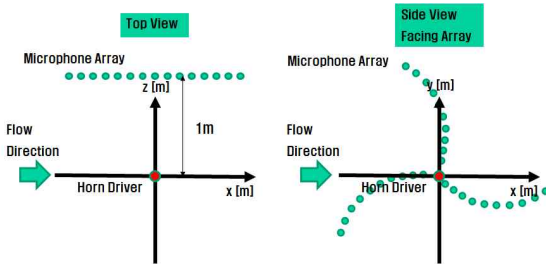


Fig. 16 Array shape and position

6.2 실험 결과

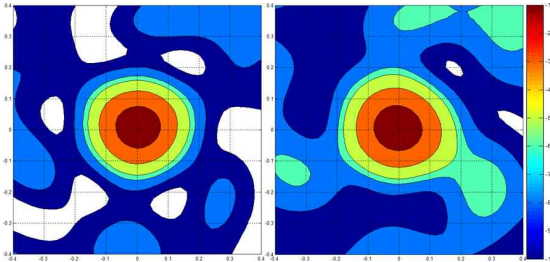


Fig. 17 Compare TRM and DNS beam forming by experiment (source at (0,0,0), no reflector. left: TRM, right: DNS beam forming. Length unit: m, Contour unit: dB)

Table 5 3dB resolution(TRM vs DNS), EXP

3dB res.	TRM	DNS
(0,0)mm	(254,235)	(276,256)

Table 6 Side lobe rejection(TRM vs DNS), EXP

SLR.	TRM	DNS
(0,0)mm	6.18dB	5.08dB

양쪽 모두 정확한 위치를 지정하였지만 TRM의 성능이 약간 뛰어남을 확인하였다. 하지만 시뮬레이션 결과보다 차이가 적는데 통제 가능한 이유로 유속 감소, 수신기 위치 및 형상을, 그 외에는 잡음이나 조화파를 생각할 수 있다.

7. 결 론

페르마의 원리를 단순화하여 이전보다 쉽게 음원을 탐색할 수 있었다. 정량적으로 말하면 8.5억 개 이상의 경로(=수신기의 수*가상 음원의 수*주파수의 수)를 보통의 컴퓨터에서 10분 정도에 처리할 수 있었다. 반사판의 영향은 모든 경우에 부엽을 저감시키면서 해상도를 미세하게 약화시켰다.

또한 TRM이 굴절 및 반사 환경에서 기존의 빔

형성 기법 중 하나보다 유용함을 밝혀내었다.

그리고 이 연구는 연속파에 대해 이루어졌으므로 펄스 음원 등의 비주기 음원에 대해서도 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2014년도 현대자동차그룹 미래기술 연구과제인 ‘자동차 하부에서 발생하는 공력 소음원 측정 방법 개발’의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Moon, S. I. and Choi J. S., 2014, Time reversal acoustics using Ray tracing method described by Fermat's principle, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2014.4, pp. 96~100.
- (2) Mueller, T. J. (Ed.), 2002, Aeroacoustic Measurements, Springer-Verlag, Berlin.
- (3) Kim, J. S., 2008, Architectural acoustic design(3rd Ed.), Sejin book, Seoul.
- (4) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 2000, Fundamental of Acoustics(4th Ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (5) Mathias Fink, 2008, Time-reversal waves and super resolution, Journal of Physics: Conference Series 124
- (6) Kim, K. H., 2010, Noise source localization using comparison between candidate signal and beamformer output in time domain, KAIST
- (7) Amiet, R. K., 1978, Refraction of Sound by a Shear Layer, Journal of Sound and Vibration (1978) 58(4), 467-482.
- (8) Kim, W. J., Rhee, W. and Choi J. S., 2008, Study on Shear Layer Correction of Microphone Array Measurement in the Wind Tunnel Test, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 18, No. 6, pp. 612~618.