

회절 현상을 이용한 소음원 탐지

나희승 · 최강윤

(한국철도기술연구원 고속철도 연구지원팀)

1. 머리말

오늘날 환경오염은 생활의 편의를 위한 문명의 부산물로 지구촌 곳곳에서 주민의 생활 질을 저해하는 요인으로 등장하여 심각한 사회문제를 야기시키고 있다.

특히 소음 및 진동공해는 일상생활중에서 가장 빈번히 접하는 환경 오염으로 도시인의 심리적, 정신적, 신체적 피로를 가중시키고 있다. 따라서 정온한 생활환경 유지는 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있으며, 육상 교통수단에 의한 소음은 승객들의 괴적인 생활환경욕구를 감안할 경우 더욱더 관심사로 등장할 것이다.

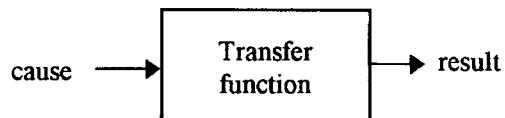
음을 방사하는 소음원 탐지는 음향학적 제반문제들을 해결하기 위한 전제조건으로써 그 중요성이 인정되고 있다. 교통소음의 입장에서도 소음 규제를 만족하는 정도로 소음을 낮추기 위해서는 소음원을 정확히 파악하는 것이 소음 차단이나 전달경로 변경등을 통한 저감대책의 선결조건이 됨을 알 수 있다.

소음원의 위치 및 주파수별 공간상의 특성을 파악하기 위한 방법으로는 진동하는 물체의 진동 주파수 분석과 함께 소음분석을 하여 소음원을 유추하거나, 음향인텐시티 탐촉자(acoustic intensity)를 이용하여 음원을 파악하는 방법이 있다⁽¹⁾. 이 밖에도 마이크로폰 어레이(microphone array)를 이용한 소음원 특성파악 및 음장 가시화방법을 들 수 있는데, 그 중 대표적인 방법으로 음향 흔로그래피(acoustic holography)^(2,3) 및 방위각 추정 방법론 (beamforming method)⁽⁴⁾이 있다. 이러한 소음원 규명방법론들은 각각 이론

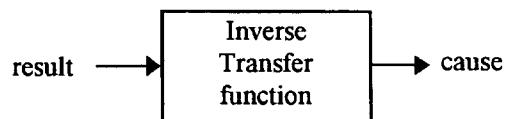
의 근간이 다르고, 특성 또한 구별되어지므로 응용분야도 각각 다를 수 있다.

이러한 소음 규명론을 일반적인 개념으로 보면 그림 1과 같다. 음향학적인 이론에 근거하여 소음의 전파 특성인 전달함수(transfer function)를 구할 수 있다면, 이에 기초한 역 전달함수(inverse transfer function)를 수학적, 수치적으로 찾아 낼 수 있다. 따라서 실험상에서 구한 음압 데이터를 바탕으로 역 전달함수를 이용하여 소음원의 위치를 규명할 수 있다.

본 원고에서는 여러 소음 규명론에서 간과하기 쉬운 회절현상(diffraction phenomena)에 대해 알아보고, 이러한 회절현상을 이용한 소음원 규명을 제안하고자 한다⁽⁵⁾. 즉 소음 규명론의 일반적인 개념으로 생각하면 회절 현상을 하나의 전달함수로 보고, 이를 바탕으로 역전달함수인 역회절현상 (inverse diffraction phenomena)을 수치적으로 모델링한다. 이 방법은 실제 실험에서 계측된 음압과 역회절



a) Transfer function



b) Inverse Transfer function

그림 1 Concept of sourcr location

모델을 이용하여 소음원을 규명하는 방법이다. 소음원탐지의 문제점 가운데 하나는 소음원의 가시화일것이다. 이 논문에서는 3차원 공간에서 사용자가 쉽게 인식할수 있는 두가지 소음원 가시화 방법을 소개한다 간단한 실험을 통하여 이 방법의 효율성을 검증해 보고, 이를 바탕으로 TGV객실내에서의 소음원 규명을 수행한다

2. 원형구에서의 회절현상(diffraction phenomena)과 역전달함수인 역회절현상(inverse diffraction phenomena)의 모델링

음의 회절은 장애물 뒤쪽으로 음이 전파하는 현상이다 음의 회절은 파장과 장애물의 크기에 따라 다르며, 파장이 크고 장애물이 작을수록 회절 효과가 크다. 대부분의 소음 계측에서는 회절현상에 의해 측정오차가 발생하며, 마이크로 폰은 이러한 현상을 최소화하게 설계 되고 있다. 특히 장애물 (마이크로 폰)의 형상이 복잡할수록 회절현상은 복잡하며, 이론식을 구하기 어렵기 때문에 회절현상을 감소시키는 설계가 매우 중요하다. 회절현상은 음압의 크기 및 위상을 변화키며, 소음원을 규명하는데 측정오차를 유발할 수 있다. 예를 들어 2D, 3D인텐시티 탐촉자의 경우, 지지대의 복잡한 형상에 의해 복잡한 회절현상이 발생되며, 이는 측정 값(음압크기 및 위상차)의 신뢰도를 떨어뜨릴수 있다. 결국 회절현상에 의한 위상차의 오차는 정확한 소음원의 위치를 결정하는데 오차를 유발할 수 있다.

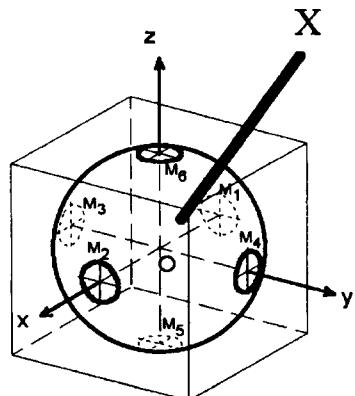


그림 2 3D spherical prob.

본 연구에서는 원형구에서의 회절현상이 이론적으로 단순하다는데 착안하여, 원형구 표면에 6개의 마이크로 폰을 설치해 3D 원형프롭을 제작한다 그림 2는 x, y, z축에 각각 2개의 마이크로 폰을 설치한 3D 원형 프롭이다. 제작된 3D 원형 프롭을 이용한 소음원탐지를 간단히 정리하면 다음과 같다.

(1) 음향학에 기초하여 원형구에서의 회절현상을 이론적으로 유도한다. 그림 3은 회절현상을 전달 함수로 나타낸 블록선도이다. 이 경우 입력은 소음원의 입사각도와 파수이며 출력은 각 마이크로 폰 사이의 위상차이다.

(2) 이론에 근거한 회절 현상으로부터 수치적 방법을 이용하여 역회절현상을 모델링 한다. 그림 4는 역회절현상을 역전달 함수로 나타낸 블록선도이다. 이경우 입력은 각 마이크로 폰사이의 위상차와 소음원의 파수이며 출력은 소음원의 입사각도이다.

(3) 소음원 탐지 실험에서 3D 원형 프롭을 이용하여 x, y, z축 각각에 대해 상호 스펙트럼(cross spectrum)을 측정한다. 상호스펙트럼으로 부터 마이크로폰 사이의 위상차를 구한다.

(4) (2)에서 구한 역회절 모델과 (3)에서 측정한 위상차로부터 소음원의 입사각도를 계산한다.

(5) 사용자가 알기쉽게 계산된 입사각도와 두가지 소음원 가시화기법을 이용하여 소음원의 위치를 재구성한다.

다음은 원형구에서의 회절현상을 이론적으로 유도한다^(5~7). 원형구 모든점 M과 시간 t에 전체음압 $P_t(M, t)$ 과 전체속도 $\vec{u}_t(M, t)$

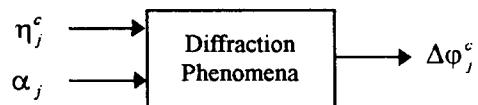


그림 3 Block diagram of diffraction problem

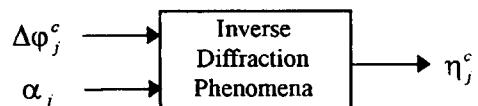


그림 4 Block diagram of inverse problem

는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} P_i(M, t) &= P_i(M, t) + P_d(M, t) \\ \vec{u}_i(M, t) &= \vec{u}_i(M, t) + \vec{u}_d(M, t) \end{aligned} \quad (1)$$

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

원형구가 강체라는 가정하에 강체표면 M_0 에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\vec{u}_i(M_0, t) \cdot \vec{n} = -\vec{u}_d(M_0, t) \cdot \vec{n} \quad (2)$$

원형구로 부터 방사되는 회절파의 Helmholtz식은 다음과 같다.

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

그림 5는 구좌표를 나타내며 대칭성에 의해 다음과 같이 간략화할 수 있다.

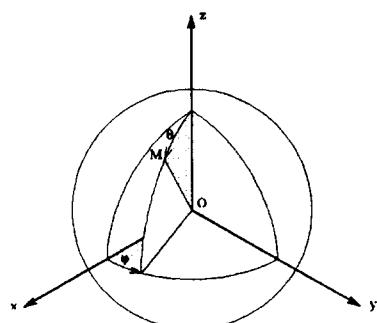
$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) \\ &+ \frac{1}{r^2} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

회절파는 변수분리에 의해 반경항 $R(r)$ 과 각도항 $P(\theta)$ 으로 다음과 같이 분리 된다.

$$P_d(M, t) = R(r) P(\theta) e^{-i\omega t} \quad (5)$$

따라서 식 (3)은 다음과 같이 유도된다. (C 는 상수)

$$\begin{aligned} \frac{1}{R(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] + k^2 r^2 \\ = \frac{-1}{P(\theta) \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\sin \theta \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta} \right] \end{aligned} \quad (6)$$



where
 $0 \leq \theta \leq \pi$
 $0 \leq \phi < 2\pi$
 $r = \|OM\|$

그림 5 Spherical coordinate

$$\frac{1}{R(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] + k^2 r^2 = C \quad (7)$$

$$\frac{-1}{P(\theta) \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\sin \theta \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta} \right] = C \quad (8)$$

회절파의 음압은 Helmholtz식으로부터 핸켈함수(hankel function)와 급수전개를 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다

$$P_d(M, t) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m P_m(\eta) h_m(\alpha) e^{-i\omega t} \quad (9)$$

여기서 $\eta \cos \theta$, $\alpha = kr$ 이다.

다음은 평면파가 입사각 θ 로 입사할 경우 입사파의 음압은 다음과 같다. (그림6)

$$P_i(M, t) = P_0 e^{-i(kr \cos \theta + \omega t)} \quad (10)$$

이경우 원형구 표면에서 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_i(M_0, t)}{\partial r} = -\frac{\partial P_d(M_0, t)}{\partial r} \quad (11)$$

평면파가 입사할 경우 경계조건에 의한 회절파의 음압은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_d(M_0, t) \\ = -\sum_{m=0}^{\infty} \frac{P_0 (2m+1) i^m P_m(-\eta) j_m(ka)}{h_m(ka)} h_m(\alpha) e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\|OM_0\| = \alpha$ (α 는 원형구의 반경).

따라서 원형구 표면에서의 $p_t(M, t)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_t(M_0, t) &= \frac{P_0}{(ka)^2} \\ &\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(2m+1) i^{m+1} P_m(-\eta)}{h_m(ka)} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (13)$$

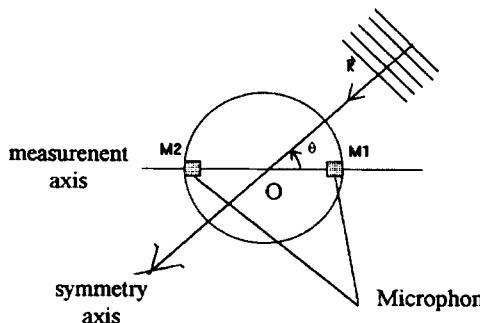


그림 6 Plane wave model

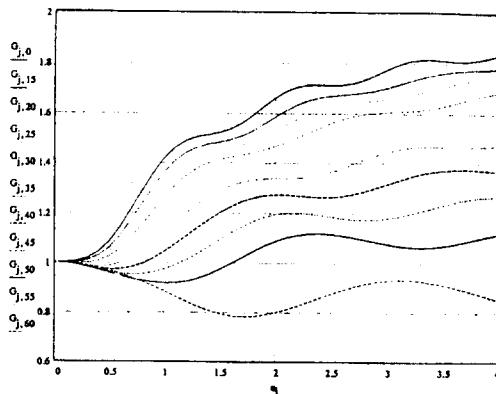
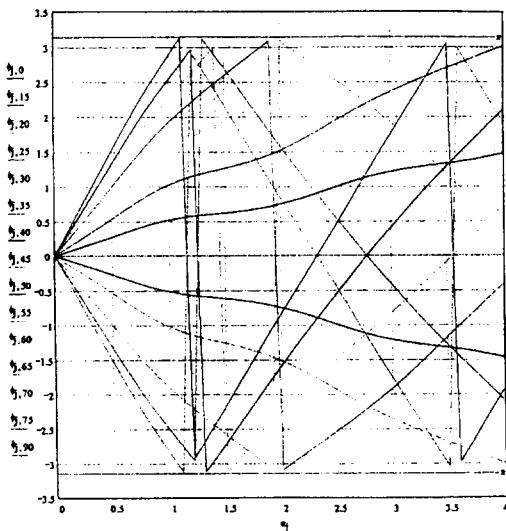


그림 7 Gain factor G

그림 8 Phase difference $\Delta\phi$ between two microphone

원형구의 음압 회절효과를 알기위하여 다음과 같이 이득 G계수를 정의한다.

$$G = \frac{|P_t(M_0, t)|}{|P_i(M_0, t)|} \quad (14)$$

참고로 마이크로 폰 M1과 M2사이의 위상차 $\Delta\phi_{12}$ 는 다음과 같이 구 할수 있다.

$$\Delta\phi_{12} = \text{ARG}[P(m_2, t)] - \text{ARG}[P(m_1, t)] \quad (15)$$

그림 7은 평면파의 입사각이 $0^\circ \sim 60^\circ$ 사이일때 이득 G계수를 나타낸것이다.

고주파로 갈수록 회절효과가 크다는것을 알수 있다. 그림 8은 평면파의 입사각이 $0^\circ \sim 90^\circ$ 사이일때 마이크로 폰 M1

과 M2사이의 위상차 $\Delta\phi_{12}$ 를 나타낸 것이다. 저주파대역에서는 선형성을 보이나 고주파로 갈수록 비선형특성을 갖고있음을 알 수 있다.

다음은 이론에 근거한 회절 현상으로부터 수치적 방법을 이용하여 역회절현상을 모델링 한다. 입사각을 알경우 그림 3과 같이 이론적인 회절현상으로 부터 두 마이크로 폰의 위상차를 구할수 있었다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다

$$\Delta\phi = F(ka, \cos\theta) \quad (16)$$

즉 두 마이크로 폰의 위상차는 ka와 입사각 θ 의 함수임을 알 수 있다 역으로 두 마이크로 폰의 위상차를 알경우 수치적방법에 의해 음파의 입사각을 구할 수 있을것이다. 즉 그림 4와 같이 역전달함수인 역회절현상을 모델링하면, 두 마이크로 폰의 위상차를 측정하여 음사의 입사각을 탐지할 수 있다

$$\cos\theta = F^{-1}(ka, \Delta\phi) \quad (17)$$

여기서 입사각 θ 는 ka와 두 마이크로 폰의 위상차의 함수임을 알 수 있다.

소음원 탐지시 원형구 표면에서의 회절효과를 알기위해 입사각을 계산하면 다음과 같다.

먼저 회절효과를 무시할경우 평면파에 의한 두 마이크로 폰의 위상 차는 식 (15)에 의해 다음과 같은 선형 식을 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = F(ka, \cos\theta) = 2ka \cos\theta \quad (18)$$

따라서 식 (18)로부터 입사각 θ 를 구하면 다음과 같다

$$\cos\theta = F^{-1}(ka, \Delta\phi) = \frac{\Delta\phi}{2ka} \quad (19)$$

위와 같이 선형식일 경우 간단히 역전달함수를 식 (19)와 같이 구할수 있다.

다음은 회절효과를 고려할 경우 평면파에 의한 두 마이크로 폰의 위상차를 알아본다 이 경우 비선형 식이 유도되기 때문에 낮은 파수 범위 ka << 1에서의 선형화를 시도하면 식 (15)에 의해 다음과 같다

$$\Delta\phi = F(ka, \cos\theta) = 3ka \cos\theta \quad (20)$$

마찬가지로 식 (20)으로 부터 입사각 θ 를 구하면 다음과 같다

$$\cos\theta = F^{-1}(ka, \Delta\phi) = \frac{\Delta\phi}{3ka} \quad (21)$$

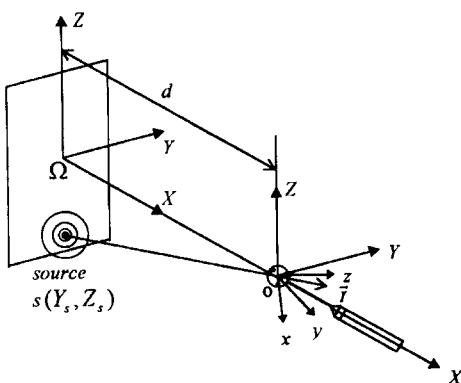


그림 9 Front plan visualisation technique

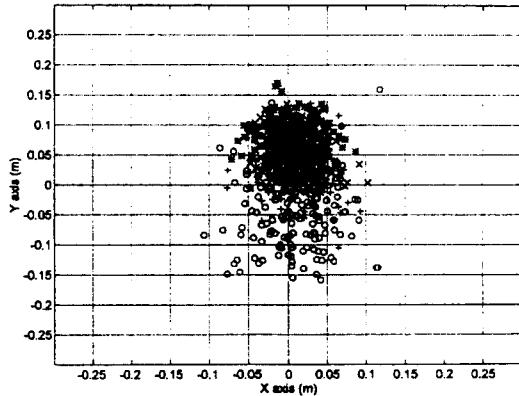


그림 11 Localization of source in front plane (audio speaker)

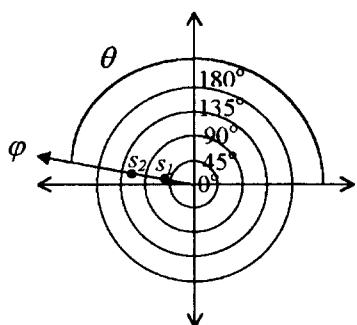
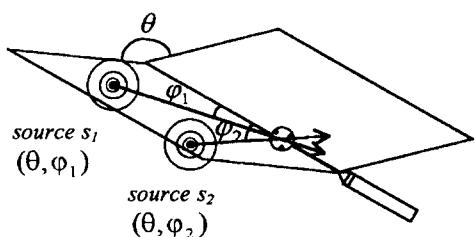


그림 10 Polar visualisation technique

낮은 파수범위에서 역전달함수인 역회절현상을 식 (21)과 같이 간단히 구할 수 있다 식 (19)와 식 (21)을 비교해 보면, 회절현상이 존재할 경우 입사각이 0.167가량의 오차를 보인다. 따라서 회절효과를 고려해야만 정확한 소음원의 위치를 탐지할 수 있다. 특히 높은 파수의 경우, 회절효과는 비선형성이 존재하므로 수치적 방법에 의존하여 역회절현상을 모델링해야만 한다. 참고로 수치적 방법에 기인한 오차도 고려해야 할 대상일 것이다.

3. 소음원 가시화

소음원 탐지의 어려움중의 하나는 소음원의 가시화이다. 이 장에서는 3차원 공간에서 사용자가 쉽게 인식할 수 있는 두가지 소음원 가시화 방법인 (1) 앞 평면 가시화 기법과 (2)극좌표 가시화 기법을 소개한다.

그림 9는 앞 평면 가시화 기법을 나타낸 것이다. 이 방법은 소음원이 3D원형 프롭의 앞 평면 (Y_s, Z_s)에 위치할 때 $Y-Z$ 평면에 가시화하는 방법이다. 그러나 소음원이 위, 아래 및 뒤에 존재할 경우, 이 방법으로 가시화가 어렵다. 따라서 모든 공간에서 입사하는 소음원을 나타낼 수 있는 극좌표 가시화 기법은 그림 10과 같다. 예를 들어 두 소음원이 동일한 θ 와 다른 φ_1, φ_2 의 각도로 입사할 때 소음원 s_1, s_2 는 그림과 같이 극좌표 가시화 기법에 나타낼 수 있다.

4. 실험

3D원형 프롭을 이용한 소음원 탐지의 실제 적용 가능성을 검증하기 위하여 일반적인 오디오 스피커를 소음원으로 실험을 수행하였다. 이 스피커는 boomer, medium, tweeter로 구성되어 있다. 소음성분은 랜덤신호를 이용하였다. 그림 11은 앞 평면 가시화 기법을 이용한 실험결과이다 (o : 0~1500 Hz, + : 1500~3000 Hz, X : 3000~4500 Hz, : 4500~6000 Hz). boomer스피커에 의해 저주파 소음이 아래쪽에서 발생됨을 알 수 있

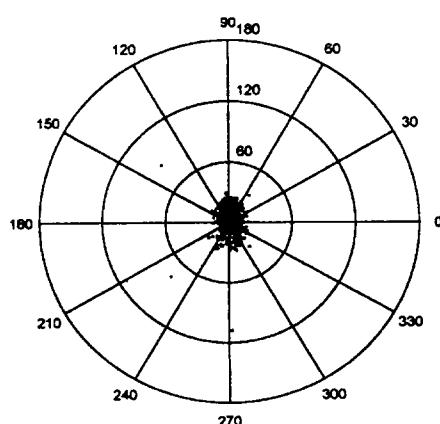


그림 12 Localization of source in polar (audio speaker)

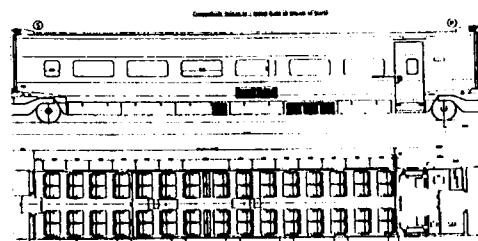


그림 13 TGV passenger car for experiments

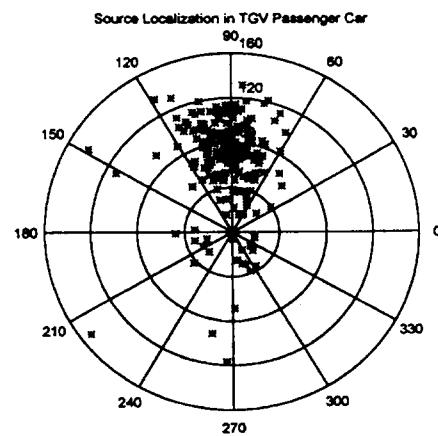


그림 14 Localization of source in polar (internal speaker)

다. Medium과 tweeter로부터 중고주파의 소음이 위쪽에서 발생되고 있다. 그림 12는 극좌표 가시화 기법으로 나타낸 소음원의 위치이다.

다음은 TGV객차내에서의 소음원 탐지실험을 수행하였다. TGV객차는 그림 13과 같다.

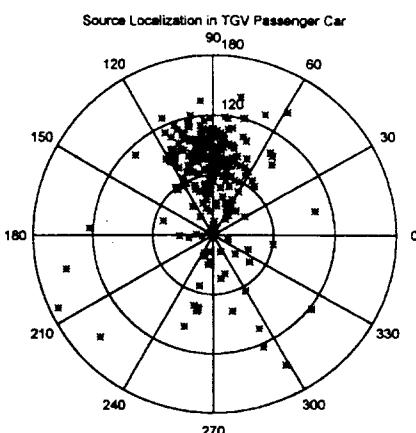


그림 15 Localization of source in polar (internal & external speaker)

실외에는 소음원으로 양쪽 대차(bogie)에 대형스피커를 장착하였으며, 실내에는 TV위치에 소형스피커를 설치하였다. 소음성분은 실내 스피커의 경우 랜덤신호, 실외 스피커의 경우 280 km/h에서의 기록소음을 이용하였다. 그림 14는 실내 스피커만이 구동되고 있는 경우이다. 소음이 TV위치에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 그림 15는 소음이 실내 및 실외에서 발생되고 있는 예이다. 이 경우도 TV위치에서 주된소음이 발생되고 있으며, 대차로부터 발생되어오는 소음이 다소 감지되고 있음을 알 수 있다. 그림 16은 실외소음만이 발생될 경우 객차 연결 통로에서 측정한 경우이다. 대부분의 소음이 바닥과 객차 연결부로부터 전달되고 있음을 알 수 있다. 소음원이 대차에 위치하고 있음을 유추할 수 있다.

5. 맷 음 말

본 원고에서는 소음계측기에서 흔히 발생할 수 있는 회절현상을 이용하여 소음원을 탐지하는 기술을 소개하였다. 구형 프로브의 회절 현상은 이론적으로 쉽게 접근할 수 있으며, 이를 기초로 소음원 탐지를 위한 역회절 현상을 모델링 할 수 있었다. 3차원 공간에서 사용자가 쉽게 인식할수 있는 두가지 소음원 가시화 방법인 앞 평면 가시화 기법과 극좌표 가시화 기법을 소개하였다. 3D원형 프롭을 이용한 소음원 탐지의 실제 적용 가능성을 검증하기 위하여, 오디오 스피커와 TGV객차를 대상으로 다양한 실험을 수행하였다.

참고 문헌

- (1) F.J. Fahy, Sound Intensity, 1988, 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) 김시문, 권희상, 김양한, 1995, "원통면 음향 홀로그래피를 이용한 음장예측의 오차 해석 및 적용 방법," 한국소음진동공학회지, 제 5 권, 제 1 호, pp. 37~48.
- (4) Choi, J.-W. and Kim, Y.-H, 1995, "Spherical Beamforming and MUSIC Methods for Estimation of location and Strength of Spherical Sound Sources," Mech. Systems and Signal Proc., Vol. 9, No. 5, pp 569~588.
- (5) P M Morse, K U Ingard, Theoretical Acoustic, McGraw Hill.
- (6) O Coste, J C Patrat, Scattering of a Spherical Wave Applied to a 3D Sound Intensity Probe, Internoise 1991, Sydney
- (7) Ocoste, Jcpatrat, Diffraction Autour d'une Sphere appliquee une sonde intensimetrique tridimensionnelle, 1^{er} Congres Francais d'Acoustique, Lyon 1990.