

스파크 음원을 이용한 철도소음전파 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Train Noise Propagation Using the Spark Discharge Sound Source

주진수* 김재철**
Joo, Jin-Soo Kim, Jae-Chul

ABSTRACT

With the historical opening of the express rail, Korea has joined the league of France, Japan, Germany and Spain and entered into the super high-speed train era. Opening of the express rail will not only bring about enormous changes to the lives of Koreans, but it will also have a huge influence on the economic, social and cultural aspects of the country. With construction of the Seoul - Busan KTX line, railway passenger transportation capacity and freight transportation capacity will increase.

Fast, safe, convenient and environmentally friendly, the express rail is a product of the latest technology and will secure its position as the newest and most preferred method of transportation for the next generation. As the traffic noise, train noise from KTX will become a social problems with the acceleration of speed and increase in the lines. In order to predict the train noise propagation from KTX, this paper presents the sound source system, the calculation model and the scale model experiment. Noise level unit patterns of a KTX that take the rolling noise, the motor noise and aerodynamic noise into consideration are simulated by the scale model experiment and numerical analysis.

1. 서 론

1.1 연구배경

고속철도의 개통은 빠른 속도를 통한 시간단축으로 전국을 2시간대 생활권으로 연결시켜 국민들의 생활에 커다란 변혁을 가져올 뿐만 아니라 경제적·사회적·문화적으로도 많은 영향을 미치게 될 것이다. 또한 빠르고, 안전하고, 편안하며, 친환경적이고, 첨단 기술의 집약체인 고속철도는 자체대량 대표할 만한 새로운 교통수단으로 자리매김 할 것이다.

그러나 고속철도의 개통은 현대 생활에 많은 편리함을 줄 수 있으나, 환경 친화적 교통 시스템 측면에서 철도교통의 가장 취약한 소음과 진동은 도로교통소음과 함께 심각한 사회문제의 측면도 충분히 예상할 수 있다.

환경 친화적인 철도를 위해서는 철도소음 전파경로에 대한 소음저감 방안이 필수적이라 할 수 있으나 철도소음 전파경로에 대한 효과적인 대책을 세우기 위해서는 무엇보다도 수용면에서의 정확한 소음예측이 요구된다.

수용면에서의 정확한 철도소음의 해석과 예측에는 수학적 해석방법이 이용되기도 하지만 소음의 전파경로 등을 고려하면 현실적으로 한계성을 갖고 있다. 그러나 현상의 직접적인 파악이라는 측면에서 뛰어난 시뮬레이션 기술은 물리적 요소군 확대 또는 축소된 상사모형을 이용하여 실험현상을 파악하는 축적모형 실험방법이 있다.)

* 한일장신대학교 교수, 일반회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

1) 江守一郎, D. J. シェーリング: 「模能實驗の理論と應用」, 技報堂

본 연구에서는 철도차량의 주행소음 가운데 주요 소음원이 되는 전동음, 동력소음 및 공력소음의 소음전파 예측을 위한 기초 연구로서 축척모형 실험용 음원을 개발하는데 연구목적이 있다. 이를 위하여 축척모형실험 기술과 디지털 신호처리 기술을 응용하고, 또한 컴퓨터를 이용하여 고속철도 소음전파에 대한 수치해석을 실시하여 모형실험 결과와 비교·검토 한다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 고속철도 소음 전파예측 방법으로서 축척모형 실험 방법을 개발하기 위하여 지표면에서의 흡음·반사 및 장애물의 회절 등을 고려하는 철도소음 전파예측 모델을 작성하여 수치해석을 실시하였다. 예측 계산 모델은 회절음장 등을 나타낼 때에 이용되는 속도 포텐셜에 의하여 표현되므로 약간 복잡하나, 음원의 주파수특성, 지표면의 음향특성 등의 다양한 입력조건에 대하여 임의의 설정이 가능한 계산모델을 설정하였다.

또한 4ch.용 스파크 발생기를 설계·제작하며, 동력차, 동력객차, 객차 3량의 철도모형을 제작하여 6개의 음원 전극을 설치하여 1/20 축척모형실험을 하였다. 음원 전극은 지향성을 부과하지 않은 무지향성 전극을 사용하였음을 밝혀 둔다. 모형실험은 전동음만 고려한 경우와, 전동음과 동력소음을 고려한 경우, 전동음과 공력소음을 고려한 경우로 구분하고 방음벽을 설치한 조건과 설치하지 않은 조건에 대하여 철도소음의 unit pattern을 구하는 실험을 하였다. 방음벽에 대해서는 음향적으로 반사성 방음벽과 흡음성 방음벽에 대한 검토를 하였다. 마지막으로 이상과 같은 조건에 대하여 예측계산모델에 의한 수치해석 결과와 모형실험결과와 비교·검토하였다.

2. 고속철도 소음전파 예측모델

본 연구에서는 철도소음 전파예측을 위한 음원모델로 점음원이 일정한 간격으로 나열되어 있는 점음원열 모델을 가정하였다.

음원으로는 대차 중심에 전동음, 동력차 선단에 공력소음, 동력객차에 동력소음을 설정하였으며, 측정축 레일 상부에 위치하는 것으로 한다. 이때 전동음원 위치는 측정축 휠과 휠사이의 중심점으로 하고, 동력객차와 동력소음원 높이는 동력객차 그릴 중심 높이인 레일면 상부 2.6m로 하였으며, 차량 선단부의 공력소음원 높이는 레일면 상부 4.5m로 하였다.

소음전파 예측모델은 지표면에 의한 초과감쇠를 고려하며 방음벽에 의한 회절계산이 가능한 계산모델로서 음원모델은 $\cos^n\theta$ 의 지향성 점음원열 모델로 가정하였다. 따라서 음원으로부터 거리 r_i 떨어진 각 측정점에서의 소음레벨 시간변화 곡선인 unit pattern을 구하는 소음레벨 L_p 는 식(1), 식(2), 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$L_p = 10 \log \left[\sum_j \left[10^{\frac{L_w}{10}} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi r_i^2} \cos^n \theta_i \left| \frac{\phi_1}{\phi_0} \right|^2 \right]_f \right] \quad (1)$$

$$\phi_0 = e^{ikr_a}/r_a \quad (2)$$

$$\phi_1 = \begin{cases} U_{11} + Q_P U_{12} + Q_S U_{21} + Q_S Q_P U_{22} & (\text{방음벽유}) \\ \frac{e^{ikr_a}}{r_a} + Q \frac{e^{ikr_b}}{r_b} & (\text{방음벽부}) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 L_w 는 각 음원의 파워레벨 (1옥타브 밴드), f 는 1옥타브 밴드 중심주파수, N 은 음원 개수, i 는 음원번호, Q 는 구면파 반사계수, Q_S, Q_P 는 음원측 또는 수음측 지표면에서의 구면파 반사계수, r_a, r_b 는 각 음원 또는 허상음원에서 측정점까지 직선거리, U_{ij} 는 각 음원 S_i 에서 수음점 P_j 로의 전파하는 기하 광학파 U_g 와 회절파 U_d 의 합에 의한 속도포텐셜^{2) 3)}, n 은 지향성을 나타내는 계수, θ 는 각 음원과 수음점이 이루는 각도, ϕ 는 속도 포텐셜을 나타낸다.

1) 川井孝雄, "Locally reacting な境界面上の音の傳播に關する研究." 日本音響學會誌, 39卷, 1983

2) J. J. Bowman, T. B. A. Senior, and P. L. E. Uslenghi, Electromagnetic and acoustic scattering by simple shape, 1969

3) J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction." J. Opt. Soc. Am. 52, 1962

3. 측력모형실험

3.1 실험개요

모형실험을 위하여 고속전도 차량모형을 설계·제작하였다. 모형실험의 목적에는 선분류상 계산의 간편성이나 소음원에서 고려하는 주파수 4kHz(고속모형실험 주파수 80kHz)를 고려하여 1/20th 하였다.

고속모형 실험을 위한 전도차량이나 마차면, 방음벽 등의 경제적인 재료에는 유효적으로 방사성이 강한 방사원을 가정하여 원형수제 세공된 Color Formax 모드를 사용하고, 고속전도 고속모형의 표면을 웨이드레이퍼로 정리한 후 내인진으로 마감하였다.

고속모형실험을 위하여 진동유원용 전도4개와 동력 소음원용 전도 1개, 공력 소음원용 전도 1개 등 모두 6개의 음원전자를 제작하였으며 고속전도 고속모형의 음원위치에 설치하여 실험을 실시하였다. 또한 고속전도 소음 전파예측을 위한 모형실험용 음원을 개발하기 위하여 기존 연구(2)를 바탕으로 하기는 기본적으로 4개의 동력 스피커 발생기를 설계·제작하여 모형실험에 이용하였다.

본 연구에서는 (2)번에 스피커 발생기의 기본 구성 원리에 입각하여 제작한 모형실험용 4제원 스피커 발생기를 나타냈다. 스피커 발생기 제작에서는 4개의 고전압 발생장치 상호간 전기적인 영향을 최소화 할 수 있도록 하였으며, 4개의 음원전자를 모형실험에 적합한 시간 간격으로 동시에 조원할 수 있도록 하였다.

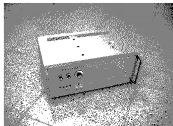


그림1. 4채널 스피커 발생기

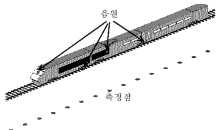


그림2. 모형실험 음원상과 측정상

3.2 실험방법

모형실험은 평면상 지평의 원모를 가정하고 진동유원(4개의 대차상 대상으로 함)을 대상으로 하는 실험, 진동유원(3개 대차)과 함께 동력소음(1개 동력 소음원)을 대상으로 하는 실험, 진동유원(3개 대차)과 공력소음(1개 공력 소음원)을 대상으로 하는 실험으로 나누어 실시하였다.

또한 모형실험은 환경소음 문제를 생각하는 경우 고속전도에서 배출할 수 없는 방음벽 연구에 대해서도 고속모형실험의 원용 가능성을 알아보기 위하여 방음벽을 설치하지 않는 경우와 설치한 경우로 나누어 실시하였다.

(2)번은 모형실험의 음원원 위치와 측정점 위치를 나타냈다. 모형실험에서는 음원을 고정 상태로 하고 측정용 마이크로폰을 측정점에 따라 옮겨 가면서 실험하였다. 그림3은 방음벽이 없는 경우의 모형실험 장면은 나타내며 (2)번(4) 방음벽을 설치한 상태의 모형실험 장면을 나타냈다. (2)번(5) 실험에 사용한 동력차, 동력객차 및 객차로 구성된 고속전도 모형과 동력객차 선두부에 설치한 동력 소음원(다원호로 표시한 부분)을 나타냈다.

4. 수치해석 및 모형실험 결과

4.1 수치해석 계산예

수치해석에서는: 측력모형 실험조건에 맞추기 위하여 계산조건을 3.1과 같이 진동유원용 고려한 계산조건



그림3. 무형설치 측면

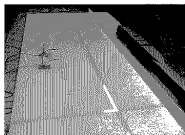


그림4. 방음벽 설치 무형설치

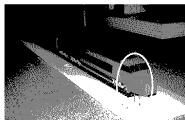


그림5. 고음역대 무형 및 공역 수용형

표1. 수지재시 조건

	흡입높이(m)/흡입수			방음벽 (m)	수음점 (m)
	전동흡	공력소음	동력소음		
제1조건1	0.5/1			높이 2.4 거리 5	높이 1.5 거리 10
제1조건2	0.5/2		2.6/1		
제1조건3	0.5/3	4.5/1			

그림5. 고음역대 무형 및 공역 수용형

1차 전동흡과 공력소음을 고려한 제1조건2 그리고 전동흡과 동력소음을 고려한 제1조건3으로 하였다. 흡입의 위치는 측정된 방향의 원모양 위에 위치하는 것으로 가정하였으며, 흡입계수 및 높이는 표1과 같다. 각 제1조건에 대해서는 원모 중심에서 5m 떨어진 곳에 높이 2.4m의 방음벽이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 검토하였다. 또한 수음점은 원모 중심에서 거리 10m, 높이 1.5m로 가정하였으며, 모든 흡입의 음향 파워레벨은 동일한 크기를 갖는 것으로 설정하였다.

제1조건은 방사성이 강한 표본으로 가정하여 지표면 방사계수 제1조건에 흡입지향 $\sigma=20.000$ 으로 가정하였으며, 식(1)에서 음원의 지향성 계수는 $n=2$ 로 가정 하였다.

그림6은 제1조건1에 대하여 방음벽이 없는 조건과 방음벽이 설치된 조건을 계산한 결과를 비교하여 나타낸다. 원모에서 수음점까지의 거리가 10m로서 4개의 전동흡을 가정할 때와 중심점에서 흡입레벨이 상승하는 것을 알 수 있으며, 또한 방음벽을 설치한 경우 동일한 수음점에서 위치가 수음점 평면에 왔을 때 최대 12dB 정도 적감하는 계산결과를 나타냈다.

그림7은 제1조건2에 대한 계산결과로서 동력 소음원은 동력 및 방향의 대차 중심선 상부의 기계실 공간 부에서 발생하는 소음을 가정한 결과이다. 그림7에 대하여 동력선 기계실에 대한 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림8은 제1조건3에 대한 계산결과로서 그림7과 비슷한 흡입레벨 unit pattern을 보이므로 있으나, 방음벽 설치에 따른 계산결과는 동력차량 일종의 공력음원의 영향으로 서로 다른 흡입레벨 변화를 나타내고 있다. 이상을 보면 제1조건3의 수음점 흡입레벨이 다른 제1조건에 비하여 높게 나타나고 있는데 이는 수음점에서 방음벽을 통하여 동력소음원이 직접 보이기 때문에 직접 전달음의 영향 때문이다. 그림6 ~ 그림8에서 소음레벨 변화의 정상부분은 서로 같아와 그림7보다 높게 나타난 이유는 전동흡의 흡입수 차이에 의한 것이다.

4.2 모형설치 결과

표2에 전동흡(실형조건A), 전동흡+동력소음(실형조건B), 전동흡+공력소음(실형조건C) 등의 모형실형조건에 대한 음원과 음원 위치를 나타낸다. 여기서는 각 조건에 대한 모형설치 결과와 식(1)을 이용한 수치해석 결과를 함께 비교하여 검토하였다. 또한 방음벽을 설치한 조건에 대해서도 함께 검토하였다. 수치해석에서 음원의 지향성 계수는 $n=2$ 로 하였으나, 공력소음에 대해서는 무지향성인 $n=0$ 에 대해서도 검토하였으며, 지표

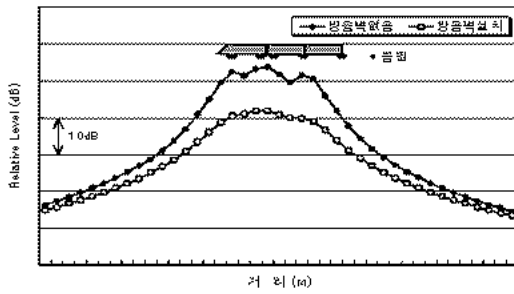


그림6. 계산조건 ①에 대한 계산결과

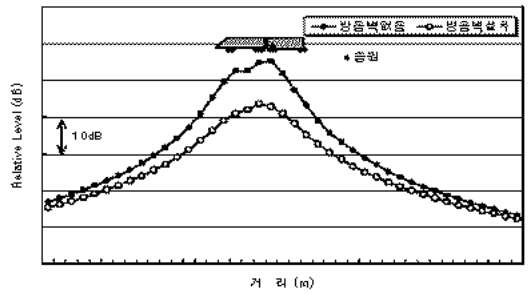


그림7. 계산조건 ②에 대한 계산결과

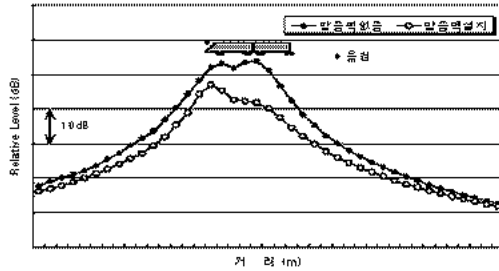


그림8. 계산조건 ③에 대한 계산결과

표2. 모형실험 및 수치해석 조건 (실물환산길이)

	음원높이(m)/음원수			방음벽 (m)	수음점 (m)
	전동음	공력소음	동력소음		
실험조건A	0.16/4			높이 2 거리 2.6	높이 2 거리 20
실험조건B	0.16/3		2.6/1		
실험조건C	0.16/3	4.5/1			

면 반사계수 계산에서 흐름저항은 $\sigma=20000$ 으로 하였다.

그림9에 실험조건A에 대한 모형실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타낸다. 두 결과를 보면 방음벽이 없는 조건에서 실험결과와 계산결과가 서로 잘 일치하는 결과를 보이고 있으나, 방음벽이 설치된 조건에서는 두 결과에 차이가 나타남을 알 수 있다. 이에 대하여 일본의 신간선 차량하부 소음에 대한 방음벽 차음 효과의 연구결과를 이용하여 검토한 결과 열차가 정면에 있을 때 회절감쇠량은 약 14dB ~ 15dB 정도로서 모형실험결과에 가까운 결과를 나타냈다. 그림10은 실험조건B에 대한 모형실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 것으로 실험결과와 계산결과가 서로 잘 대응하는 결과를 나타냈다. 그림11과 그림12에서의 축척모형 실험결과는 수치해석에 의한 계산결과에 비하여 전동음과 동력소음의 음원위치에서 음압레벨 변화가 명확히 나타나는 해석결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

그림11은 실험조건C의 방음벽 설치조건에 대한 모형실험과 수치해석에 결과이다. 수치해석은 공력소음의 저항특성을 $n=2$ 인 조건과 $n=0$ 에 대하여 검토하였다. 모형실험결과와 계산결과를 비교하면 $n=0$ 으로 설정한 계산결과에 근접하는 결과를 나타냈다. 이는 모형실험에서 동력차 앞부분의 상단 높이에 위치하는 공력 소음원 음원전극이 무지향성 음향방사 특성을 갖고 있기 때문이며 방음벽이 설치되어 전동음이나 동력소음 등의 하부 소음원 영향이 적은 경우 상부의 공력소음이 주소음원이 되므로 무지향성 $n=0$ 의 계산결과에 근사한 결과를 나타냈다.

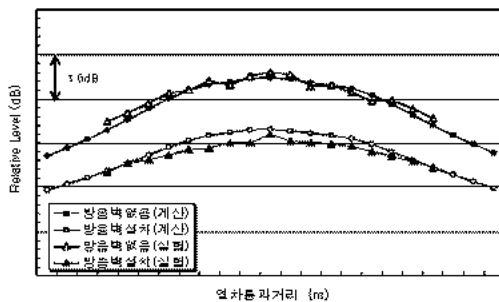


그림9. 실험조건A에 대한 결과

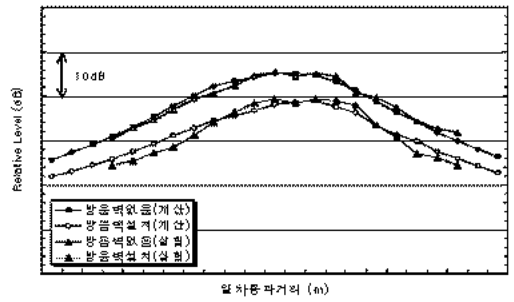


그림10. 실험조건B에 대한 결과

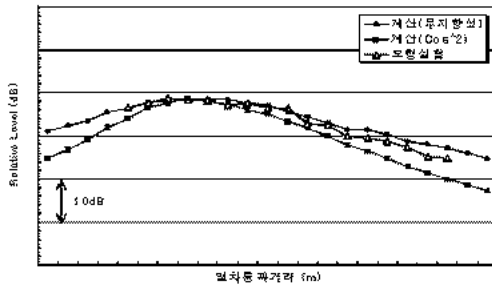


그림11. 실험조건C에 대한 결과(방음벽 설치한 경우)

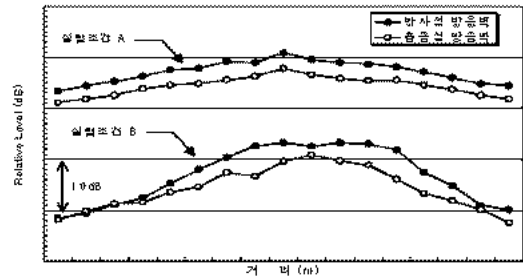


그림12. 방음벽 영향특성에 따른 실험결과

4.3 방음벽 음향특성에 따른 모형실험 결과

방음벽의 선로측 표면이 반사성 재료로 구성된 경우와 흡음성 재료로 만들어진 방음벽에 대하여 검토하였다. 흡음성 방음벽으로는 방음벽 선로측 표면에 부직포를 양면테이프로 부착하여 실험에 사용하였다.

그림12의 상부 그림은 실험조건A에 대한 실험결과로서 흡음성 방음벽의 경우에 하부소음이 주소음원이 되어 열차 통과시간 전체에서 소음이 저하하는 결과를 나타냈다. 또한 그림12의 하부그림은 실험조건B에 대한 결과로서 동력소음원이 전동음원보다 높고 위치하고 있어 소리의 전달경로 차가 가장 큰 측정점 정면 위치에서 방음벽 효과가 크게 나타나는 결과를 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 축척모형실험 기술과 디지털 신호처리 기술을 응용하여 고속철도소음 전파예측을 위한 방법을 연구하였다. 축척모형실험을 위하여 1/20 고속철도 축척모형을 제작하였으며, 음원으로는 4채널 스파크 펄스 방전기를 제작하여 전동음, 동력소음 및 공력소음을 가정한 음원전극을 제작하였다. 축척모형실험에서는 전동음만 고려한 경우와, 전동음과 동력소음을 고려한 경우, 전동음과 공력소음을 고려한 경우로 나누어서 방음벽을 설치한 조건과 설치하지 않은 조건에 대하여 실험을 하였으며, 실험결과는 수치계산 모델식에 의하여 검토되었다.

이상의 검토에서 모형실험 결과는 수치해석 결과와 매우 근접하게 나타났으며, 모형실험 결과에서는 수치 해석 결과에 비하여 음파의 간섭현상에 의한 월도차량의 음원 위치가 분명하게 나타났다. 또한 흡음성 방음벽은 반사성 방음벽에 비하여 차음효과가 크게 나타나는 결과를 확인할 수 있었다. 음원 높이가 방음벽보다 높은 공력소음에 대한 검토결과에서는 무지향성 음원전극 영향이 크게 나타나 수치계산에서는 공력소음의 지향특성을 $n=0$ 로 설정하는 것이 축척모형 실험결과와 좋은 대응관계를 나타냈다.

이상의 연구를 통하여 본 연구에서 검토한 축척모형 실험 시스템이 고속철도 소음전파 예측에 활용할 수 있는 기초를 수립하였다. 그러나 고속철도소음의 파동적인 해석을 통한 정확한 예측을 위해서는 고속철도의 소음원별 음향파위와 음향방사특성에 대한 연구와 축척모형 실험 시스템에 결합하기 위한 다양한 조건에 대한 연구가 필요하다. 이와 함께 본 연구의 모형실험에서는 무지향성 음원전극을 대차하부에 설치하여 사용하고, 수치계산에서는 지향특성을 $n=2$ 로 하였으나 정확한 연구를 위해서는 음원전극에 지향성을 부과하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 스파크 발생기의 음원 채널수를 실제의 고속철도 음원수에 맞추는 연구를 병행하며, 실제 고속철도 주행소음에 대한 자료를 수집하여 모형실험결과와 비교할 수 있는 연구를 수행할 필요가 있다.

참고문헌

1. E. J. Rathe, " Railway noise propagation," Journal of Sound and Vibration, 51(3), 1977
2. D. H. Cato, " Prediction of environmental noise from fast electric trains," J. S. V., 46(4), 1976
4. P. J. Remington, " Prediction of the effectiveness of noise control treatments on urban rail elevated structures," Journal of the Acoustical Society of America, 78, 1985
5. D. Hohenwater, " Railway noise propagation models," Journal of Sound and Vibration, 141(3), 1990
6. K. Nagakura, Y. Zenda, "Method of Predicting wayside noise level of Shinkansen," The 7th Western Pacific Regional Acoustics Conference, 2000
10. Hideo Shibayama, 福永一保, 城戸健一, "測定用パルス放電音源の提案," 日本音響學會誌 40(3), 1984