

# 워터 터널에서의 수중소음 계측을 위한 하이드로폰 어레이 시스템 개발

°이무열, 강관형, 부경태

## Development of Hydrophone Array System for Underwater Sound Measurement in a Water Tunnel

Mu-Yeol Lee, Kwan Hyoung Kang and Kyung Tae Boo

### ABSTRACT

Water tunnel에서 반향음의 영향을 효과적으로 배제하고 수중 소음원의 위치 및 소음 수준을 계측하기 위하여 하이드로폰 어레이 시스템을 개발하였다. 계측 시스템의 신호 대 잡음비를 개선하기 위해 48채널의 하이드로폰 어레이를 사용하였고, 당사 고유의 하이드로폰 설치 방법을 개발하였다. 개발된 설치 방법은 터널 벽면의 난류 변동 압력의 영향을 감소시켜 200Hz~1kHz 영역에서 통상적인 설치 방법 대비 약 20dB의 신호 대 잡음비 개선 효과를 얻었다. 또한 40kHz 이상의 주파수까지의 수중 방사 소음 계측을 위하여 100ks/s의 고속 동시 데이터 획득 장치를 개발하였다. 개발된 하이드로폰 어레이 시스템은 성능 시험을 통하여 20kHz 이내의 주파수 영역에서 단일 소음원의 위치를 비교적 정확하게 찾아낼 수 있었다.

### 1. 서론

우리나라는 현재 선박 수주량 및 건조 능력 측면에서 세계 1위를 차지하고 있다. 그러나 국내적으로는 인건비의 상승으로 인한 수익률 저하가 점차 문제 되고 있으며, 대외적으로는 중국의 경우 기존의 대련 조선소 외에 푸둥, 장양, 엔타이 조선소가 대형 도크를 건설 중에 있어 가까운 장래에 매우 위협적인 경쟁국이 될 것으로 판단된다.

당사는 기존의 주력 선종에서의 경쟁력 유지와 함께 중장기적으로는 호화 여객선과 같은 고부가가치 선박으로의 주력 선종 확대에 많은 노력을 기울이고 있다. 일례로 당사는 최근 국내 조선사중 최초로 3만톤급 고속 초대형 여객선을 4척 수주 하여 현재까지 1척을 성공리에 인도한 바 있다. 여객선에 있어서 ISO

규정은 60dB 이하의 낮은 소음 수준을 요구하고 있어 향후의 지속적인 여객선 및 호화 유람선의 수주를 위해서는 저소음, 저진동 프로펠러 개발과 함께 수중 소음 및 유동 유기 진동 문제에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

한편, 잠수함, 어뢰와 같은 수중운동체에 있어서 정속성은 작전 능력 및 생존율과 밀접하게 관련되어 있다. 이로 인하여 세계적으로 수중 소음 관련 연구는 사실상 민간보다는 해군을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다. 단적인 예로 미해군은 군함의 수중 소음 관련된 시험 평가를 위하여 최근 NSWC (Naval Surface Warfare Center)를 중심으로 약 2억불의 거액을 투자하여 대형 워터 터널인 LCC(Large Cavitation Channel)를 1991 년도에 건설한 바 있다[1].

수중 소음의 계측· 제어 기술은 자국의 군사 무기 체계와 밀접한 관련에 있는 특수성으로 인하여 관련 내

용의 대외적인 기술 이전이 거의 불가능하다. 따라서 결국 우리나라도 자체적으로 기술 개발을 통하여 기술 경쟁력을 확보해 나갈 수밖에 없다. 국내에서는 최근 들어 국방과학 연구소 및 수중소음 특화연구센터를 중심으로 본격적인 수중 소음 관련 연구가 진행되고 있다.

당사는 1997년도 약 150억원을 투자하여 수중 유동 유기 진동 및 소음 관련 실험을 위해 필수적인 대형 워터 터널을 세계적인 규모로 건설하였으며 현재 호선 시험과 대외 용역 업무에 성공적으로 사용되고 있다. 당사의 터널은 낮은 배경 소음 수준은 물론 고속 유동하에서 대형 모형에 대한 시험이 가능하여 향후 국내 수중 방사 소음 및 진동 관련 연구에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

워터 터널은 음파의 굴절, 산란, 반사, 투과 등의 현상으로 인해 일반적인 방법으로는 소음원 위치 파악은 물론 소음 강도의 정확한 계측이 매우 어렵다. 당사는 이러한 난점을 상당 부분 극복할 수 있는 고성능 하이드로폰 어레이 시스템 개발에 지난 수년간 10억원 이상을 투자하여 왔으며 최근에는 기초적인 성능 시험을 수행한 바 있다. 본 논문에서는 당사 하이드로폰 어레이 시스템의 성능과 개발 과정에 있어서의 주요 성과 및 현안 문제 등에 관하여 논하고자 한다.

## 2. 삼성 캐비테이션 터널

삼성 캐비테이션 터널(Samsung Cavitation Tunnel, 이하 '삼성 터널')은 국내 최대 규모의 압력조절이 가능한 워터 터널이다(Fig.1 참조). 터널의 종방향 길이는 36m, 높이는 13.3m이다. 소음 시험이 수행되는 소형 시험부는 길이가 6m, 단면이 1.2m×1.2m이며, 설계상 최대 유속은 28m/s이다. 대형 시험부는 길이가 12m, 단면이 3.0m×1.4m, 최대 유속이 12m/s이다. 소형 시험부에서는 통상 0.4bar에서 3.5bar의 압력 범위에서 시험이 수행된다. 시험부의 경계층 영역을 제외한 영역에서의 유속 불균일도는 1% 미만, 난류 강도는 0.5% 미만이다.

삼성 터널에서는 그동안 하이드로폰을 종형(bell type) 치구 내부에 설치하여 수중 소음을 계측하여 왔다(Fig. 2(a) 참조). 그런데, 이러한 설치방법은 터널 진동의 영향을 크게 받으며, 터널 벽면을 흐르는 유체에

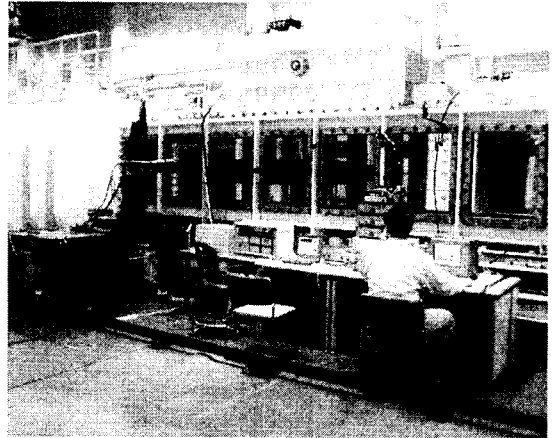


Fig. 1 Samsung Cavitation Tunnel

의하여 발생하는 난류 변동 압력의 전파로 인하여 신호 대 잡음비가 현저히 저하되는 문제점이 있었다. 이러한 문제점의 해결을 위해 8개의 하이드로폰을 소형 음향 챔버(acoustic chamber)에 설치하는 챔버형 설치 방법을 개발하였다(Fig. 2(b)).

터널 벽면에 발생하는 난류 변동압력의 영향을 최소화하기 위해서는 센서와 벽면 사이의 간격(stand-off distance)을 크게 하는 것이 유리하다. 반면, stand-off distance가 증가하게 되면, 챔버 내부의 공진 현상이 발생할 뿐 아니라 챔버의 끝단 부분에서는 회절의 영향을 강하게 받게 된다. 본 연구에서는 벽면 난류 변동 압력이 센서에 전달되는 정도를 이차원 탄성과 방정식을 해석하여 최적의 stand-off distance를 결정하였다[2]. 그리고 챔버와 터널 사이의 관측창은 물과 음향 임피던스(acoustic impedance)가 유사한 소재를 사용하였다. 또한, 챔버에는 터널의 진동 전달의 차단을 위한 방진 장치가 설치되었다.

경험적으로 챔버에 대략 동전 크기 정도의 기포만 존재하여도 넓은 주파수 범위에서 응답특성이 매우 심각하게 왜곡될 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 기포는 외부에서 유입되었을 수도 있으나, 통상적으로 미소 체적의 용존 기포가 매크로한 크기로 성장하여 생성되게 된다. 이러한 문제의 발생을 최소화하기 위하여 챔버 내부에는 탈기된 물로 채운다.

Fig. 3은 유속이 6.4m/s인 경우에 대하여 기존 종형 설치 방법과 챔버형 설치 방법을 사용하였을 때의 배경 소음 계측 결과를 비교한 것이다. 하이드로폰은 B&K 8103, 전하형 증폭기(charge amplifier)는 B&K 2692

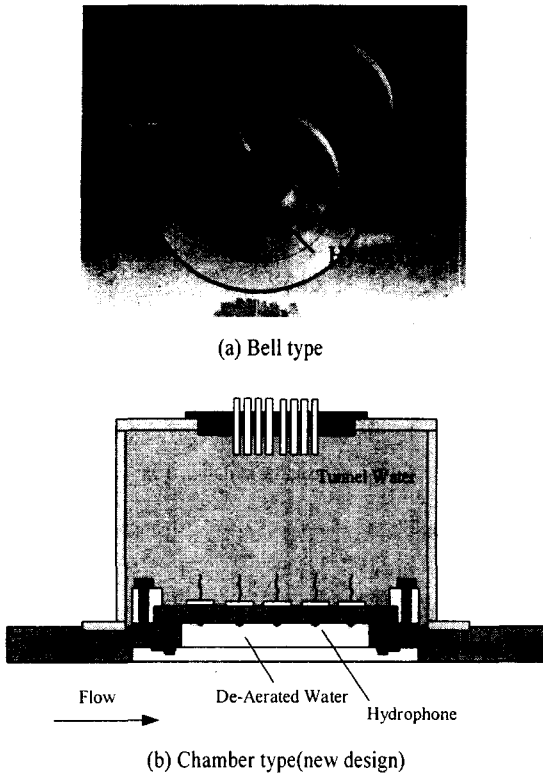


Fig. 2 Installation methods of hydrophones

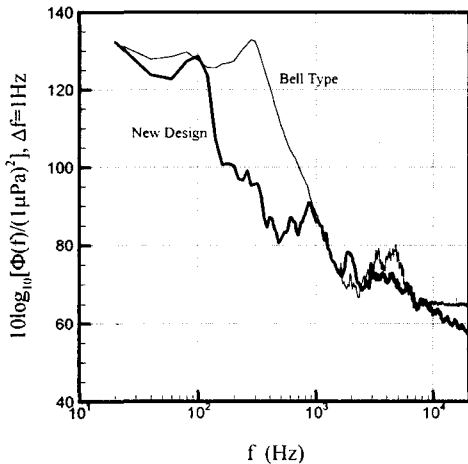


Fig. 3 Background noise measured by two methods

(NEXUS)를 사용하였고, 신호 분석기는 Nicolet사의 COMPASS를 사용 하였다. Fig. 3을 통하여 200 ~ 600Hz 영역에 있어서 챔버형 설치 방법이 종형 설치 방법에

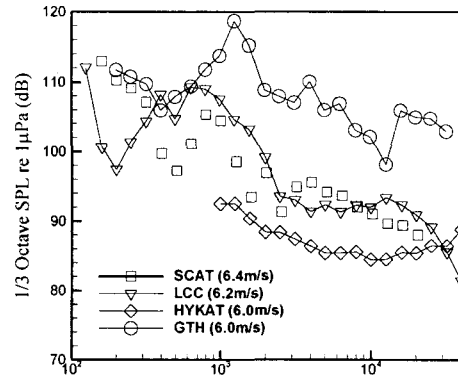


Fig. 4 Background noise of world's low-noise water tunnels

비해 약 20dB 낮은 값을 보여줌을 알 수 있다. 이것은 챔버형 설치 방법이 벽면 난류 변동 압력의 영향을 매우 효과적으로 차단했음을 나타낸다. 통상적으로 프로펠러의 회전수에 비례하는 소음 성분들이 100Hz ~ 2kHz의 주파수 영역에 존재 하므로, 추진기 소음의 계측을 고려할 때 매우 고무적인 개선이 이루어졌다고 볼 수 있다.

Fig. 4는 유속 6.4m/s에서 챔버형 설치 방법을 이용하여 계측한 배경 소음과 세계의 대표적 저소음 대형 워터 터널인 미국의 LCC(Large Cavitation Channel), 독일의 HYKAT(Hydrodynamic Cavitation Tunnel), 프랑스의 GTH(Grand Tunnel Hydrodynamique)의 배경 소음과의 비교 결과이다[1]. 참고로, LCC와 HYKAT은 대형 음향 챔버에 설치된 하이드로폰으로 계측한 결과이며, GTH는 flush mounting 방식을 사용한 결과이다. 터널의 배경 소음 계측 결과는 각 기관 마다의 계측 방식에 크게 의존한다. 따라서 각기 다른 방식을 이용하여 계측된 결과를 직접 비교한다는 것은 다소 무리가 있을 수 있다. 반면 LCC의 경우는 삼성 터널과 마찬가지로 챔버 내부의 특정 센서를 이용하여 얻어졌으며, 챔버의 stand-off distance가 약 0.2m로 삼성 터널에 비하여 수 배가 크다. 따라서 적어도 터널 벽면의 난류 변동 압력의 영향은 상대적으로 매우 낮았을 것으로 판단된다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 500Hz 미만의 영역에서는 삼성 터널의 배경 소음이 LCC에 비하여 평균 8dB 정도 높게 나타나고, 500Hz~2kHz 영역에서는 평균 5dB 정도, 10kHz 이상에서는 평균 3dB

정도 삼성 터널의 배경 소음이 낮은 것으로 나타난다. 즉, 삼성 터널의 배경 소음이, 저소음화를 위해 대규모 투자를 한 것으로 알려진 LCC의 배경 소음과 비슷한 수준을 가지고 있음을 알 수 있다. 한편, GTH에 비해서는 거의 전 주파수 영역에서 삼성 터널의 배경 소음이 낮게 나타나고, HYKAT보다는 높은 배경 소음을 보이고 있음을 알 수 있다. 이로부터 당사의 배경 소음이 매우 낮은 수준임을 알 수 있다.

### 3. 하이드로폰 어레이 시스템

수중 운동체에서 발생하는 방사 소음의 제어를 위해서는 최우선적으로 정확한 계측 기법에 의하여 모형체의 어느 부분에서 어떤 특성을 갖는 소음이 발생되고 있는가를 파악할 수 있어야 한다. 유동 유기 방사 소음의 제어는 이러한 소음이 어떤 형태의 유동 현상에서 기인한 것인가를 판단하여, 수중 운동체 형상의 변형이나 기존의 적절한 유동 제어 방법을 동원하여 이루어질 수 있다.

그러나 공기 중에 비하여 수중에서 소음원의 위치를 파악한다는 것은 상대적으로 어려움이 많다. 이를 위하여 이용될 수 있는 것이 빔 형성 기법이다. 빔 형성 기법이란 다수의 하이드로폰으로 어레이를 구성하여 소음원으로부터 각각의 하이드로폰에 도달하는 소음 신호의 위상차를 이용하여 소음원의 위치 및 강도를 계측하는 기술을 의미한다.

#### 3.1 시스템 사양 및 구성

다수의 하이드로폰을 사용함으로써 얻을 수 있는 장점 중의 하나는 잡음이 많은 환경에서 계측 신호로부터 잡음의 영향을 효과적으로 감소시켜, 높은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있다는 것이다. 즉, random noise는 어레이를 구성하는 각각의 하이드로폰 신호를 합산(sum)하는 과정에서 상쇄 되는 반면, 상관도가 높은 방사 소음 성분은 증폭되는 효과를 얻을 수가 있다. 어레이를 구성하는 하이드로폰의 개수가  $n$ 개이고, co-

herent signal과 incoherent noise가 존재할 경우의 어레이의 이득(AG)은 아래와 같다[3].

$$AG = 10 \log \frac{(S/N)_{array}}{(S/N)_{one\ element}} = 10 \log n \quad (1)$$

이 때 어레이의 beam pattern은 센서의 간격이나 배열 방법에 따라 달라진다. 예를 들어, 평면파 가정하에 센서를 직선으로 배열할 경우 얻게 되는 half power bandwidth(w)는 아래와 같다[4].

$$w = \left| \sin^{-1} \left( \sin \theta_s + \frac{1.392}{kL} \right) - \sin^{-1} \left( \sin \theta_s - \frac{1.392}{kL} \right) \right| \quad (2)$$

위에서  $L$ 은 어레이의 크기(aperture size),  $k$ 는 파수(wave number),  $\theta_s$ 는 실제 음원에서 전파되는 음파의 진행 방향과 하이드로폰 어레이의 수직 방향 사이의 각도이다. 식 (2)로부터 어레이의 공간적 분해능이 주파수가 높을수록, 어레이의 크기가 클수록 좋아짐을 알 수 있다.

설계 사양은 Table 1과 같고, 전체 시스템은 Fig. 5와 같이 구성되어 있다. 하이드로폰은 B&K 8103, 전하형 증폭기는 B&K 2692(NEXUS)를 사용하였다. 데이터 획득 장치의 자세한 구성은 3.4절에서 언급하기로 한다.

Table 1 Specification of hydrophone array system

Dimension of Acoustic Chamber (H×W×D, m)		0.8×0.6×0.4
Hydrophone Array	Hydrophone spacing	30 mm
	No. of hydrophones	48ea
	Design frequency	20 kHz
	Half power bandwidth	about 0.1 m
	Aperture size	about 1.2 m
Data Acquisition & Analysis System	Interface	VME
	No. of channels	52
	Max. sampling freq.	100 kS/s
	Analysis method	Beamforming

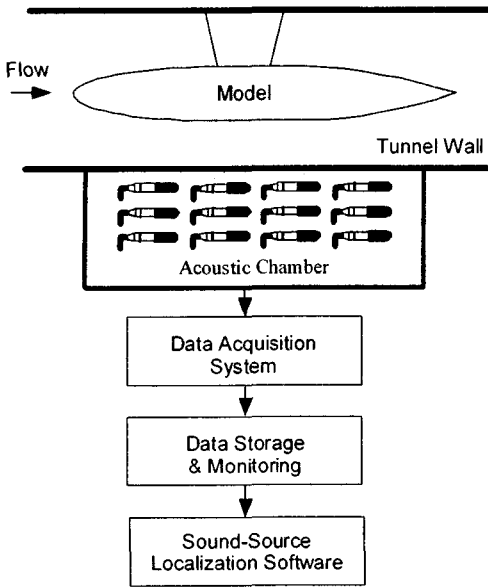


Fig. 5 Schematic diagram of hydrophone array system

### 3.2 음향 챔버(Acoustic Chamber)

LCC 나 HYKAT 의 경우 시험부에 시험부와 비슷한 크기의 음향 챔버가 설치되어 있으나, 당사의 수조는 공간상의 제약으로 인해 큰 규모의 챔버를 설치할 수 없다. 이에 당사에서는 공간상의 제약을 극복하기 위하여, 시험부의 관측창 크기에 맞도록 자체 설계한 Semi-Flush Mounting 방식을 사용하여 신호 대 잡음비 개선 효과를 얻을 수 있었다. Semi-Flush Mounting 방식은 2절에서의 챔버형 설치 방법의 확장된 형식이며, Fig. 3 에서 200Hz~600Hz 영역의 터널 벽면 난류 변동압 성분 노이즈를 20dB 정도 감소시키는 사실로부터 신호 대 잡음비의 개선 효과를 확인할 수 있다. Fig. 6은 공동 수조 시험부의 측면에 음향 챔버가 설치된 모습을 보여주고 있다.

### 3.3 하이드로폰의 배열 방법

하이드로폰 어레이는 음향 챔버 내부에 위치한 signal conditioning plate 위에 설치가 되며, 본 계측시스템에서는 어레이를 두 개의 윈도우에 적용하여 유동 방향의 공간적 해상도를 높이도록 설계되었다. 하이드로폰의 배열방법은 Plus(+)형, Cross(X)형, 그리고 Circle(O)형으

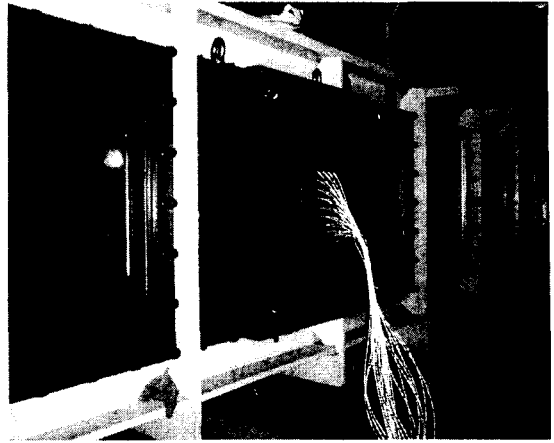
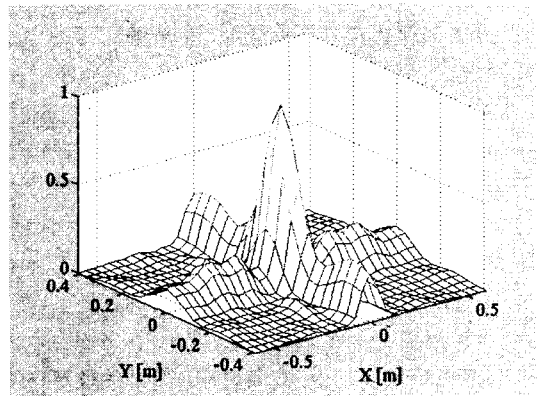
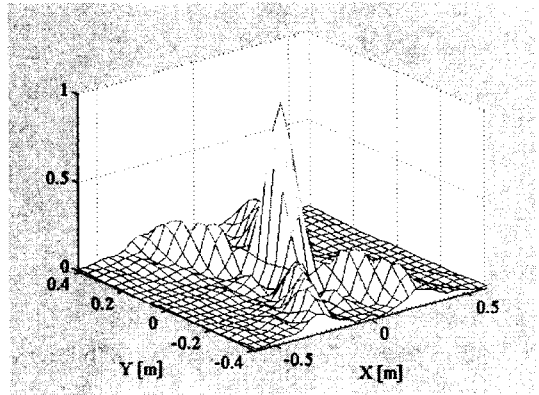


Fig. 6 Installation of acoustic chamber



(a) Plus(+) type



(b) Cross(X) type

Fig. 7 Beam pattern of hydrophone array

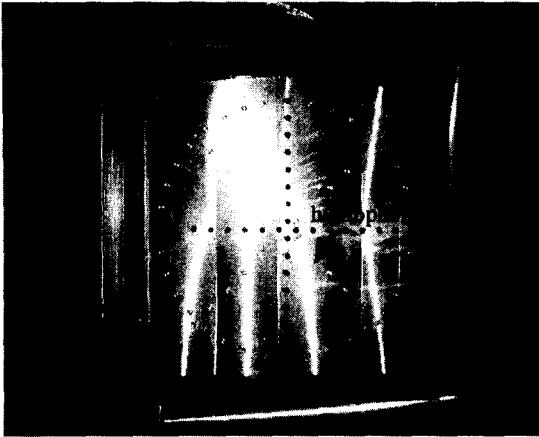


Fig. 8 Installation of plus type hydrophone array

로 변경할 수 있으며, Fig. 7은 Plus 형 배열과 Cross 형 배열의 beam pattern을 나타내고 있다. Fig. 7로부터 주엽(main lobe) 이외에 부엽(side lobe)이 나타나기 때문에 여러 개의 음원이 있을 경우에는 분해능이 떨어지게 됨을 알 수 있다.

설계 사양으로부터 빔 형성 기법의 적용 주파수 범위 20kHz를 만족하기 위하여 하이드로폰의 배열 간격을 선정하게 된다. Fig. 8은 배열 간격이 30mm인 Plus 형태의 배열이 적용된 음향 챔버의 설치 모습을 보여주고 있다.

### 3.4 데이터 획득 장치(Data Acquisition System)

빔 형성 방법을 통한 소음원의 정확한 위치 파악을 위해서는 어레이로부터 입력되는 48채널 소음 신호를 동시에 고속으로 획득할 수 있는 데이터 획득 장치가 필요하다. 특히, 각 센서로부터 나온 신호들간에 앰프나 A/D board 및 컴퓨터에서 위상차의 왜곡이 최소화 되어야 한다. 이를 위해 요구 사양의 만족과 사용자의 편리성 및 향후의 확장성을 고려하여 VME bus를 기반으로 채널당 100KS/s의 48채널 고속 동시 신호 획득 시스템을 구성 하였다. 또한, 캐비테이션 소음과 같은 광대역의 주파수 성분을 갖는 소음의 계측 및 분석을 위하여 1MS/s의 성능을 갖는 4채널의 A/D board도 별도로 설치되어 있다. 한편, A/D board는 ICS-110B와 ICS-130 board를 사용하였고, 필터는 Frequency Device사의 VM8PF, VME PC는 SBS사의 VP7을 사용 하였다. 대량 데이터의 고속 저장을 위해서는 RAID 방식의 HDD 어레이가 사용되었다.

### 3.5 소음원 규명 방법(Sound Source Localization)

공기 중에서는 소음원을 규명하기 위한 방법으로 홀로그래피나 인텐시티 방법 등이 적용 되고 있으나, 수중에서는 측정점의 제한으로 인해 센서 어레이를 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 이렇게 센서 어레이로부터 얻어진 소음 신호로부터 빔 형성 방법 (beamforming method)이나 상호 상관 스펙트럼법 (crosspower spectrum method) 혹은 정합 필터 배열 처리 (matched-filter array processing) 등의 분석 방법을 통해 소음원을 규명하게 된다.

소음원의 위치 및 소음 수준을 규명하기 위하여 본 연구에서는 빔 형성 방법을 사용하였다[4]. 워터 터널에서는 소음원이 센서로부터 근거리에서 존재하게 되어 평면파 입사의 가정을 적용하기에 어려우므로, 본 연구에서는 구면파 가정을 사용하여 알고리즘을 구현하였다. 또한, 통상의 빔 형성 방법의 적용과는 달리 반사가 심한 반향음장 내에서 소음원의 위치를 파악하기 위해서 반사파에 의한 간섭의 영향을 최소화할 수 있는 신호 처리 기법이 적용되었다. 이를 위해 각종 반향음의 영향을 random noise로 가정하는 방법과 Green's function을 이용하여 덕트 내의 모드들로 표현하는 방법, 그리고 가상 음원으로부터 나오는 음파들의 합으로 나타내는 방법(image source method) 등을 적용하여 소음원의 위치 추정 방법을 구현하였다.

### 3.6 성능 시험 결과

Plus(+) 형태의 하이드로폰 어레이에 대하여 단독 소음원이 존재할 경우에 대한 특정 주파수에서의 소음원의 위치 추정의 정확도를 검토하였다. 합수 발생기는 HP 33120A, 소음원은 Gearing & Watson사의 D/17 그리고 파워 앰프는 B&K 2713을 사용하였다. Fig. 9는 음원이 터널 내부에 설치된 모습을 나타내고 있다. Figs. 10 (a), (b)는 4.2kHz와 9.3kHz에서의 음원 추정 결과를 보여주고 있다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 주파수에 대하여 소음원의 위치를 매우 정확하게 찾아 내고 있다.

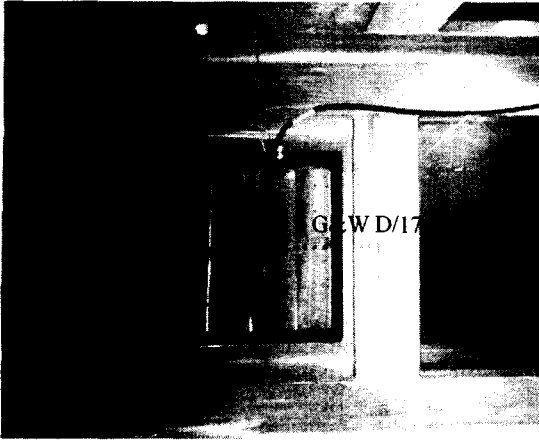
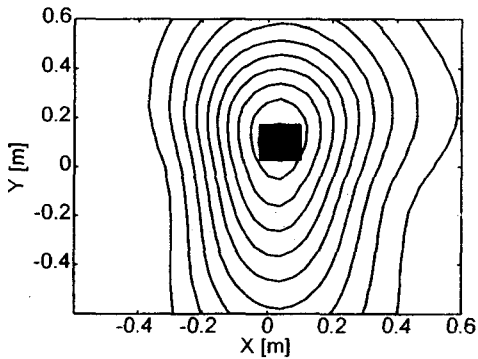
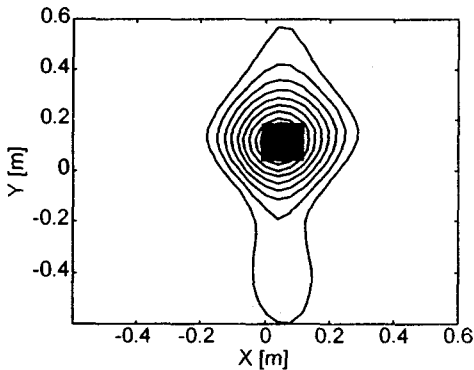


Fig. 9 Experimental set-up to confirm the accuracy of source localization



(a)  $f = 4.2$  kHz



(b)  $f = 9.3$  kHz

Fig. 10 Result of source localization

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 개발된 하이드로폰 어레이 시스템은 단일 소음원의 위치를 정확하게 찾아내고 있음을 알 수 있었다. 그런데, 낮은 주파수 영역에서는 공간분해능의 제한으로 인해 단일 소음원이 아닌 경우 소음원의 위치 추정에 오차가 포함되고 있다. 따라서 공간 분해능의 향상 및 반향 음장의 보다 적절한 고려를 위해서는 하이드로폰 배열 방법의 변화 및 정합 필터 배열 처리 방법의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

본 계측 시스템을 실제 수중 운동체에 대하여 적용하기 위해서는, 유동이 있는 조건 하에서의 성능 시험이 필요할 것으로 판단된다. 이를 위해 유동 중에서 위치 이동이 가능한 소음원 설치 장치를 제작 중에 있으며, 금명간 보다 상세한 성능시험이 이루어질 수 있을 것으로 전망된다.

워터 터널에서의 소음계측은 많은 반향음의 영향이 나타난다. 이에 소음원의 위치 및 소음 수준의 보다 정밀한 계측 결과의 분석 및 계측 결과에 대한 자유 음장으로의 확장을 위해서는 워터 터널의 음향학적 특성 파악이 필요할 것으로 판단된다. 현재 수치 해석 및 내부 음장 계측을 통한 캐비테이션 터널의 음장 특성을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다.

#### 감사의 글

본 연구의 수행에 있어 많은 유익한 조언을 해준 국방과학연구소 신구균 박사, 홍진숙 연구원, 한국과학기술원 김양한 교수, 서울대학교 성우제 교수에게 사의를 표한다. 또한 계측 장치의 제작과 성능 시험에 적극적인 협조를 아끼지 않은 당사의 김진학씨, 김운식씨에게 심심한 감사를 전한다. 본과제의 일부는 과학기술부의 국가지정연구실 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

#### 참고 문헌

- [1] Philip A. Abbot and Stephen A. Celuzza, "The Acoustic Characteristics of the Naval Surface Warfare Center's Large Cavitation Channel(LCC)", Proc. of Conference on Flow Noise Modeling, Measurement, and Control, The

1993 ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, pp. 137-150, 1993.

- [2] 성우재 외, 공동수조 수중방사소음 계측장비 설계, 삼성중공업(주) 조선플랜트연구소 연구보고서, 2001.
- [3] Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, 1983.
- [4] 김양한 외, 빔 형성 방법을 이용한 캐비테이션 터널 내의 소음원 규명, 삼성중공업(주) 조선플랜트연구소 연구보고서, 2001.