

# 매설형 하이드로폰 시스템의 구조-음향 연성 해석

## Structural-acoustic Coupled Analysis of Buried Hydrophone System

서 희 선\* · 조 요 한\* · 조 치 영\*

Hee-Seon Seo, Yo Han Cho and Chee Young Joh

(2007년 4월 25일 접수 ; 2007년 8월 6일 심사완료)

**Key Words** : Hydrophone(하이드로폰), Fluid-structure Interaction(구조-음향 연성), Acoustic Scattering(음향산란)

### ABSTRACT

A study was carried out to investigate the fluid-structure interaction phenomena of buried hydrophone system that exposed complex loads due to handling, transportation and installation. The buried hydrophone system has necessarily neighborhood structures for installation. Because of the neighborhood structure, acoustic field is deformed. We analyze the piezoelectric-structural-acoustic coupled problem and the results to use a finite element analysis software, ANSYS, which has an coupled field analysis capability. The effect of the component of hydrophone system is revealed altogether in pressure distribution. So, we classify and analyze the problem by four different compositions for decomposition.

### 기 호 설 명

- $c$  : 유체 음속
- $F$  : 세라믹 작용력
- $[H_f]$  : 유체 압축성 행렬
- $I$  : 전류
- $[K_{uu}]$  : 기계적 강성행렬
- $[K_{\phi\phi}]$  : 전기적 강성행렬
- $[K_{u\phi}]$  : 세라믹 강성벡터
- $[L]$  : 고체-유체 연성행렬
- $[M]$  : 질량행렬
- $[M_f]$  : 유체 질량행렬
- $P$  : 압력벡터

- $\Phi$  : 전압
- $\phi$  : 유체경계에서 압력구배
- $\rho$  : 유체 밀도
- $U$  : 변위

### 1. 서 론

항만은 해군함정 및 군사시설이 밀집되어 있을 뿐만 아니라 수출물자 운송의 대부분을 차지하는 해상 운송 인프라의 거점으로 유사시 적 수중세력이 침투하여 직접 공격 및 기뢰 부설에 따른 해상교통로 차단시 군사적, 경제적 손실이 막대하다. 따라서 해상 교통로, 주요항만 및 기간산업을 보호할 수 있는 능력을 확보하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 수중으로 은밀히 침투하려는 잠수함/정을 원거리에서 조기에 탐지하여 대처할 수 있는 수중 경보시스템이 요구된다<sup>(1,2)</sup>.

수중으로 침투하는 세력의 원거리 탐지 수단 또는 피아 식별을 위한 방법으로 함 자체에서 발생하는 음파를 감지하는 방법이 일반적으로 사용되고 있는

† 교신저자: 정희원 국방과학연구소  
 E-mail : shseo@add.re.kr  
 Tel : (055) 540-6081, Fax : (055) 542-3737  
 \* 정희원, 국방과학연구소

며, 아직까지는 가장 유력한 탐지 수단이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 세계적으로 선배열 형태의 음향센서가 널리 사용되고 있다. 하지만 선배열 음향센서가 해저 면에 포설된 경우는 어로작업 및 태풍과 같은 인공적/자연적 재해로부터 센서와 수중케이블이 파손될 수 있기 때문에 해저퇴적층 깊이 1m 이상으로 매설되어야 한다<sup>(3)</sup>.

해저 매설 작업을 위해서는 해저 광케이블 설치용 특수선박 및 수중 무인잠수정(ROV), 케이블 매설 쟁기(plow) 등이 필요하며, 이러한 특수한 장비를 이용하여 센서의 매설 작업이 수행되는 과정에는 인장력, 비틀림, 마모, 굽힘, 압착력, 수압 등의 복합적인 외력이 선배열 음향센서에 가해지게 된다. 따라서 선배열 음향센서는 취급, 운송, 설치 중에 받는 복합적인 하중을 견딜 수 있는 강인한 구조로 설계되어야 한다. 뿐만 아니라 선배열 음향센서가 해저에 매설되면 정비 및 수리를 위한 인양 작업이 사실상 불가능하므로 장기적인 운용환경에 적합하도록 해수에 의한 내부식성과 내수압 특성을 갖는 구조설계가 요구된다<sup>(3)</sup>.

이러한 요구조건을 만족하는 선배열 음향센서의 구조는 내 해수성을 갖는 음향호스 내에 하이드로폰이 위치하게 되고, 설치 및 기타 취급과 관련하여 필요한 장력을 견디기 위한 장력 요소로 구성된다. 따라서 구조물의 형상 및 재질에 따라 산란 음장의 크기와 방향성에 대해 관심을 갖고 연구하는 것이 필요하다<sup>(4,5)</sup>. 이 연구에서는 이러한 구조를 갖는 매설형 선배열 음향센서를 구현하기 위해 필연적으로 수반되는 주변 구조물의 영향을 압전-구조-음향 특성이 연성된 하이드로폰 시스템에 대해 연성 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

## 2. 구조-음향 연성 해석모델

### 2.1 시스템 개요

Fig. 1은 선배열 음향센서의 단면을 도식적으로 보인 것이다. 중심에 위치한 하이드로폰은 사용하고 자 하는 주파수 범위에서 일정한 수신 특성을 갖도록 설계되어야 한다. 일반적으로 반경 방향으로 분극된 튜브 형태의 압전 세라믹 진동자에 폴리우레탄 또는 에폭시 등의 재료로 외부를 몰딩하여 사용한다. 하이드로폰에 인가되는 음향 신호는 전기적 신호

로 변환되어 전치 증폭기 또는 바다 소음 제거 필터 등의 전처리 과정을 거친 후 디지털 신호로 변환한다. 다음으로 여러 채널의 신호를 하나의 신호로 변환한 후 신호처리부에 광케이블 등의 전송선을 이용하여 전송되게 된다. 따라서 내부 유체는 전기적으로 절연 특성이 유지되는 것이 필요하고, 또한 수신되는 음향신호의 손실을 방지하기 위해 즉, 음향 투과 손실을 최소화하기 위해 임피던스가 물과 비슷한 기체를 사용하여 충진하게 된다. 서론에서 언급한 바와 같이 설치 및 기타 취급과 관련하여 필요한 장력을 확보하기 위해 이 연구에서는 하이드로폰의 상부와 하부에 알루미늄 구조물을 이용하여 장력 특성을 확보하였다. 또한 해수에 의해 발생할 수 있는 부식을 방지하기 위해 내해수성이 뛰어난 재료인 폴리에틸렌 호스 내에 하이드로폰 시스템을 장착하였다.

이러한 수중 음향문제를 해석하기 위해서는 압전현상을 포함하고 있는 하이드로폰과 이를 둘러싸고 있는 오일 및 폴리에틸렌 튜브 외부의 유체와 주변 구조물을 동시에 모델링해야 한다. 이와 같이 모델링된 하이드로폰 특성은 구조물의 탄성법칙, 유체에서의 Helmholtz 방정식, 탄성체와 압전 재료에서의 Poisson 방정식을 이용하여 식(1)<sup>(6)</sup>과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} [K_{mm}] - \omega^2 [M] & K_{m\phi} & -[L] \\ K_{m\phi}^T & K\Phi\Phi & 0 \\ -\rho^2 c^2 \omega^2 [L]^T & 0 & [H_f] - \omega^2 [M_f] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \Phi_0 \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ -I \\ j\omega \\ \rho c^2 \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

또한, 하이드로폰 시스템은 수중에서 사용될 때 많은 개수의 하이드로폰이 배열되어 사용되지만 이

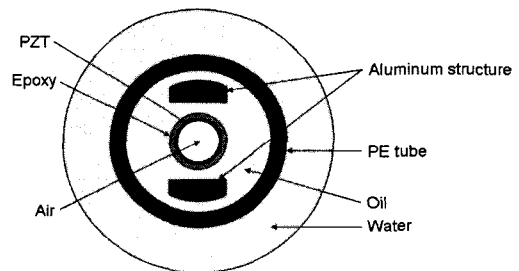


Fig. 1 Schematic diagram of hydrophone system

연구에서는 하나의 하이드로폰 시스템에 대하여 길이 방향에 수직한 단면 방향의 특성에 국한하여 해석하고 분석을 수행하였다.

### 2.2 연성 해석 모델

이 연구에서 사용하고자 하는 해석 모델은 일반적으로 하이드로폰 시스템의 주파수 특성을 측정하기 위한 수중 음향시험의 구성과 유사한 모델이 되도록 설정하였다. Fig. 2는 해석하고자 하는 하이드로폰 시스템의 모델을 도식적으로 표현한 것이다. 왼쪽의 그림은 전체 해석 영역을 표현한 것이고, 오른쪽의 그림은 유한요소로 모델링한 전체 해석영역 중 하이드로폰 시스템 주변을 확대하여 보인 것이다.

음원은 점 음원으로 선택하여 일반적으로 측정에서 널리 사용되는 표준 음원을 모사하였다. 단순히 하이드로폰의 출력 특성을 해석할 때에는 선 음원을 사용하지만 이 연구처럼 주변 구조물의 영향을 분석하기 위해서는 점음원을 사용하여 최대한 평면파 음장을 구현하였다. 또한 원거리 음장을 구현하기 위해 하이드로폰 시스템의 크기와 해석하고자 하는 주파수의 파장에 비하여 충분히 큰 이격 거리인 1m(3 kHz에서  $2\lambda$ )로 설정하였다. 해석 영역 범위는 반경이 1.35m인 물과 하이드로폰 시스템으로 구성하고 유체의 경계에서는 무한 요소를 사용하여 경계에서의 반사로 인한 해석오류를 줄이고자 하였다<sup>(7)</sup>. 해석 영역의 중심에는 하이드로폰 시스템이 위치하도록 하였으며, 호스의 내부와 외부는 유체에 접하고 있으므로 경계에서 오일러 법칙을 만족하도록 하는 유체-구조 경계 조건(FSI, fluid-structure interface)을 부가하였다. 호스의 내부는 유체로 충전되어 있

으며, 중심에는 하이드로폰이 위치하고 있다. 하이드로폰의 외부는 몰딩재로 구성되어 유체-구조 경계 조건을 포함하고 있으며, 내부의 압전세라믹은 전기-기계 결합요소를 사용하여 모델링하였다. 하지만, 압전세라믹 내부의 공기는 큰 임피던스 차이로 인하여 해석에 영향을 주지 않으므로 진공 상태로 간주하여 해석 범위에 포함하지 않았다. 한편, 장력 특성 확보를 위한 알루미늄 구조물도 유체-구조 경계 조건을 포함하여 모델링 하였다.

해석을 위해 모델링 된 요소의 크기는 해석하고자 하는 파장에 의해 결정된다. 이 연구에서는 해석하고자 하는 공간이 크고, 주파수 범위가 넓어 주파수 범위를 3단계로 구분하여 해석 모델을 세분화하여 모델링 하였다. 모델링 된 요소의 최대 크기는 해석하고자 하는 주파수 중 파장이 가장 짧은 경우에도 1/30 이하가 되도록 결정하였다. 예로서 가장 높은 주파수 범위의 해석 모델의 경우는 65만개 이상의 요소가 사용되었다.

### 3. 유한요소 해석결과

#### 3.1 구성 형태에 따른 음장 특성

하이드로폰 시스템의 성능은 음향 입력에 대한 하이드로폰의 전기적 출력으로 표현되게 된다. 이 경우 주변 구조물의 영향이 혼재되어 나타나므로 각 부품의 영향을 분리하여 분석하기 곤란하다. 즉, 주파수 별로 각 부품이 음장 특성에 타월하게 영향을 미치는 현상을 파악하고, 문제점이 있는 부품에 대한 수정 설계를 진행하기 어려운 결과를 얻게 된다. 따라서 이 연구에서는 하이드로폰 만 있는 경우, 하이드로폰과 호스만 있는 경우, 하이드로폰과 장력 구조물만 있는 경우, 모두를 포함하는 하이드로폰 시스템의 4가지 경우로 분리하여 해석을 진행하였다.

Fig. 3에서 Fig. 6은 유체-구조-압전 현상이 연성된 4가지 해석 모델에 대한 결과로서 하이드로폰 시스템을 포함하는 주변 유체의 일부분만을 확대하여 음장 분포를 보인 것이다. 구조물의 변위를 함께 보이지 않은 것은 변위의 형상은 음압의 분포를 통해 유추가 가능하기 때문에 대부분 생략하였다. 특별히 관찰이 필요한 경우에 대해서는 따로 다루는 것이 필요할 것이다.

Fig. 3은 공간 내에 하이드로폰만 있는 경우에 대

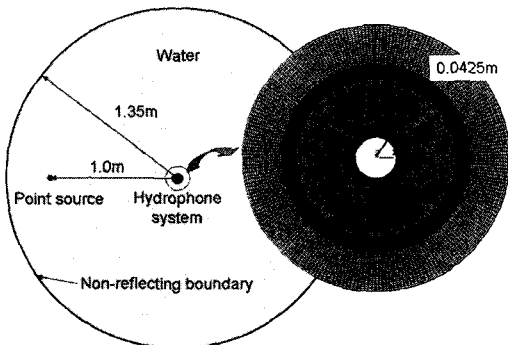


Fig. 2 Numerical model of acoustic source and hydrophone system

한 해석 결과로서 가장 낮은 주파수의 경우는 하이드로폰의 크기에 비해 파장이 충분히 크기 때문에 평면파 형태의 음파 진행이 하이드로폰에 의해 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 이 경우가 가장 이상적인 하이드로폰의 크기에 해당한다. 하지만 현실적으로 하이드로폰의 감도는 하이드로폰의 크기와 비례하는 특성을 가지므로 하이드로폰 자체의 크기로 인한 산란 특성을 일정 부분 포함 하여도 주파수에 대한 평탄도를 얻을 수 있는 범위까지 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 일정 주파수 이상에서 나타나는 산란 특성이 하이드로폰의 출력 특성으로 얼마나 영향을 주는지에 대한 검토가 필요하다.

Fig. 4는 공간 내에 하이드로폰과 호스가 있는 경우에 대한 해석 결과로서 하이드로폰에 비하여 상대적으로 유연한 호스의 모드가 (c)와 (d)의 결과에서 관측되는 것을 볼 수 있다. 따라서 호스의 진동을 제한하는 설계 반영이 필요하다는 사실을 확인할 수 있다. Fig. 5는 공간 내에 하이드로폰과 장력 구조물이 있는 경우에 대한 해석 결과로서 하이드로폰과

장력 구조물의 전체 크기가 산란 현상에 영향을 주고 있음을 볼 수 있다. 즉, 하이드로폰 자체에 비하여 산란 현상에 의한 특성 변화가 낮은 주파수부터 관측됨을 알 수 있다. 이로부터 장력 구조물의 경우는 설치 및 기타 취급과 관련된 하중을 면밀히 분석하여 최소화하는 설계가 필요함을 알 수 있다. Fig. 6은 공간 내에 하이드로폰 시스템의 모든 요소가 함께 있는 경우에 대한 해석 결과로서 호스의 모드, 장력 구조물에 의한 산란 현상이 종합적으로 관찰되고 있다.

### 3.2 하이드로폰 주변 음압 분포

Fig. 7에서 10은 4가지 해석 모델에 대한 하이드로폰 둘레에 작용하는 압력을 보인 것이다. 0° 위치는 음원과 반대 방향의 위치를 의미하고 180°는 음원과 마주하는 위치에 해당한다. Fig. 7의 경우는 주변 구조물이 존재하여도 하이드로폰 주변의 모든 방향에서 거의 일정한 크기의 음압이 인가되는 것을 볼 수 있다. 이것은 주변 구조물이 하이드로폰의 출

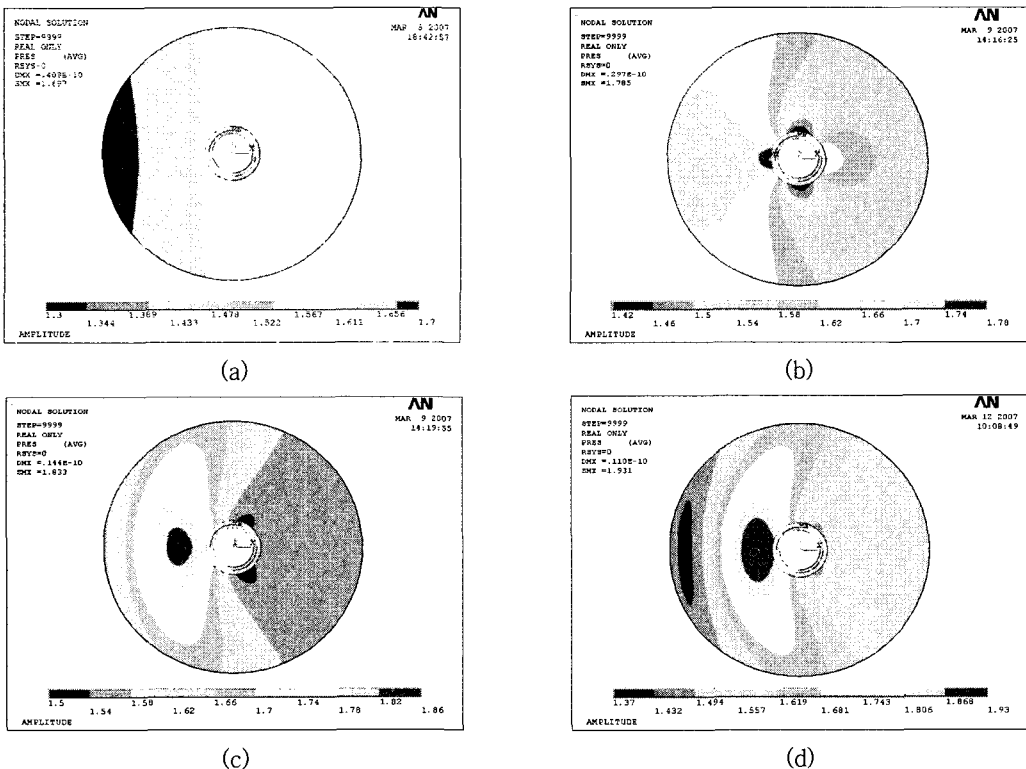
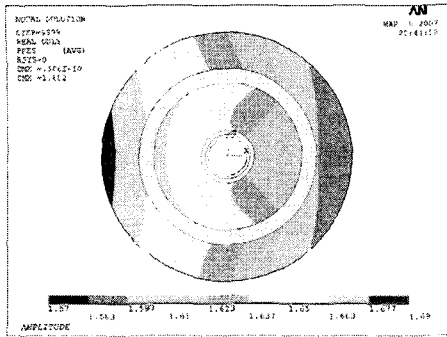
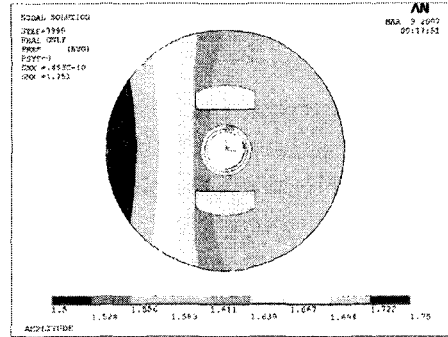


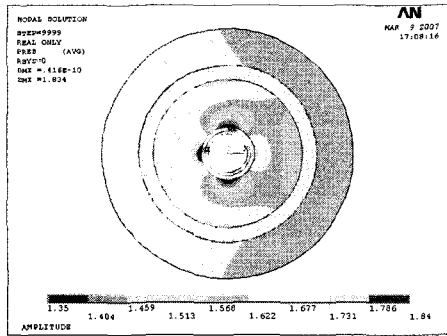
Fig. 3 Pressure distribution of single hydrophone at: (a) 3 kHz, (b) 6 kHz, (c) 9 kHz and (d) 12 kHz



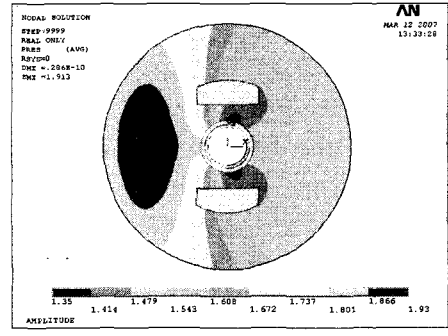
(a)



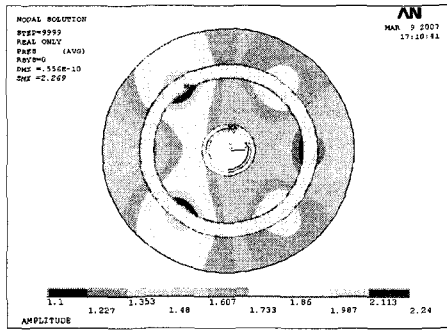
(a)



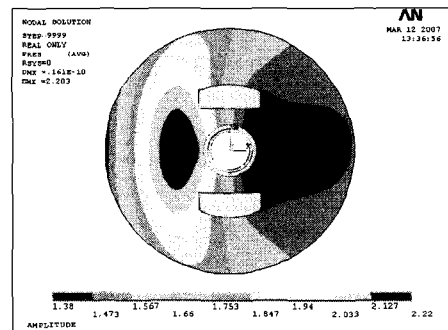
(b)



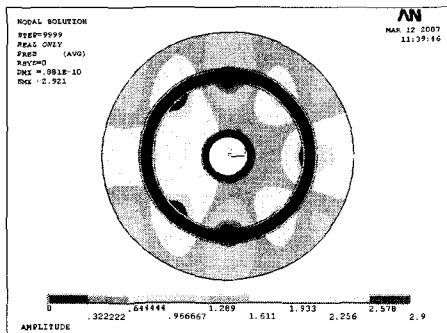
(b)



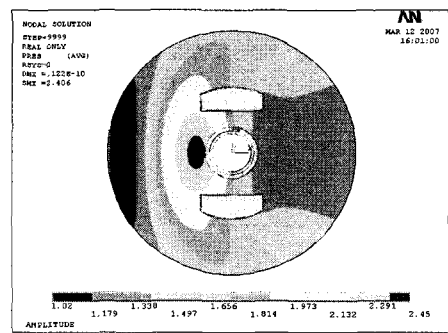
(c)



(c)



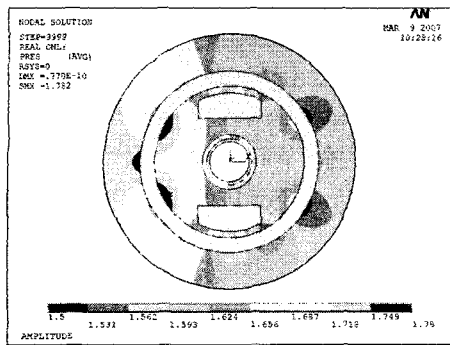
(d)



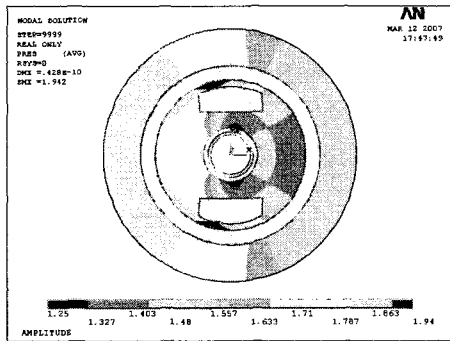
(d)

Fig. 4 Pressure distribution of hydrophone and hose at: (a) 3 kHz, (b) 6 kHz, (c) 9 kHz and (d) 12 kHz

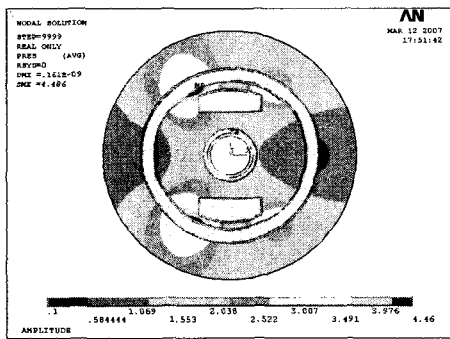
Fig. 5 Pressure distribution of hydrophone and package at: (a) 3 kHz, (b) 6 kHz, (c) 9 kHz, and (d) 12 kHz



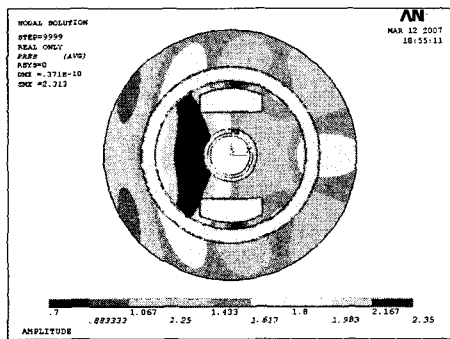
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Pressure distribution of hydrophone system at: (a) 3 kHz, (b) 6 kHz, (c) 9 kHz and (d) 12 kHz

력 특성에 전혀 영향을 주지 않는 주파수 범위에 있음을 의미한다.

Fig. 8의 경우는 6 kHz에서 하이드로폰 주변에 인가되는 음압을 보인 것으로 음원과 나란한 방향에서는 큰 음압이 인가되고, 음원과 90° 위치에서는 작은 음압이 인가되어 하이드로폰이 럭비공 형태를 형성될 것이라 예측할 수 있다. 하지만 이 경우에도 주변 구조물이 하이드로폰에 미치는 영향은 하이드로폰 자체의 해석 결과와 비교하여 보면 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 9의 경우는 하이드로폰과 호스가 있는 경우 하이드로폰과 장력 구조물이 있는 경우를 비교하면 하이드로폰 주변의 음압 분포가 많은 차이를 보임을 알 수 있다. 이로부터 9 kHz 이상에서는 장력 구조물에 의한 산란 현상이 하이드로폰의 출력 특성에 영향을 주는 것으로 예측할 수 있다. 또한, 호스가 추가적으로 설치되면 방향성 특성이 매우 다르게 변하는 것을 볼 수 있으며, 이로부터 높은 주파수에서 사용되는 하이드로폰 시스템은 주변 구조물의 설계에 세심한 주의를 기울여야 함을 알 수 있다. Fig. 10의 경우를 살펴보면 호스의 영향에 의해 음원과 마주하는 면을 제외한 다른 각도에서 압력 분포의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 부가적인 구조물이 추가되는 경우에도 많은 차이를 보임을 알 수 있다. 특별히 모든 구조물이 포함된 결과를 9 kHz의 결과와 비교하여 보면 방향성 특성이 매우 다르게 얻어진 것을 알 수 있는데 이는 주변 구조물의 모드가 형태와 연성되어 나타나는 현상으로서 각 부품이 어느 주파수에서부터 영향을 주는 지 확인 할 수 있다.

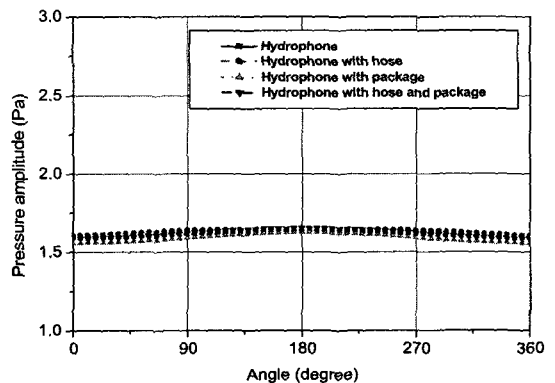


Fig. 7 Pressure distribution around hydrophone with respect to the angle at 3 kHz

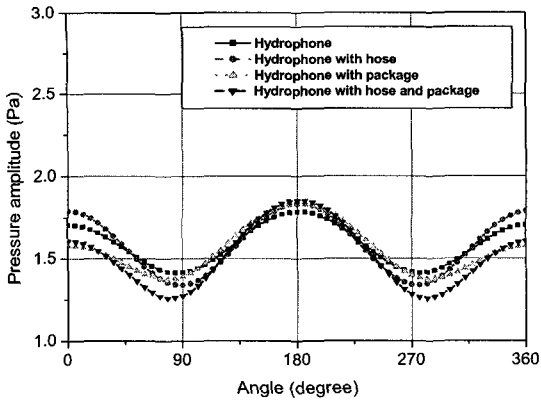


Fig. 8 Pressure distribution around hydrophone with respect to the angle at 6 kHz

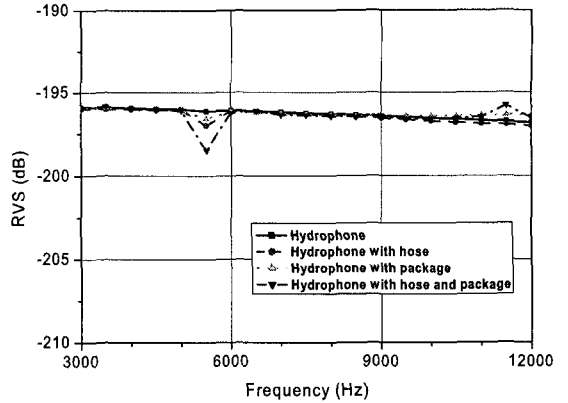


Fig. 11 Receiving voltage response(RVS) of hydrophone

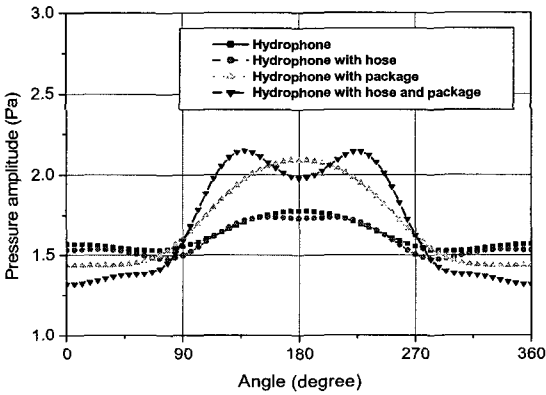


Fig. 9 Pressure distribution around hydrophone with respect to the angle at 9 kHz

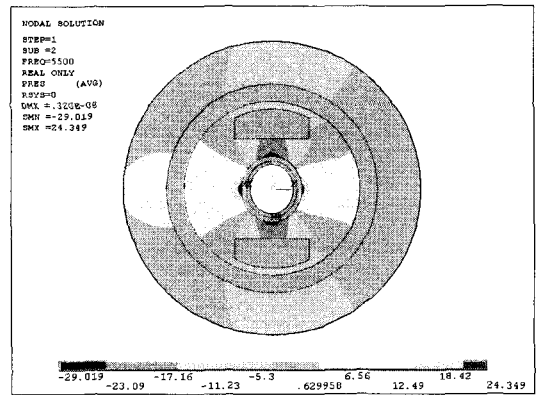


Fig. 12 Pressure distribution of hydrophone system at 5.5 kHz

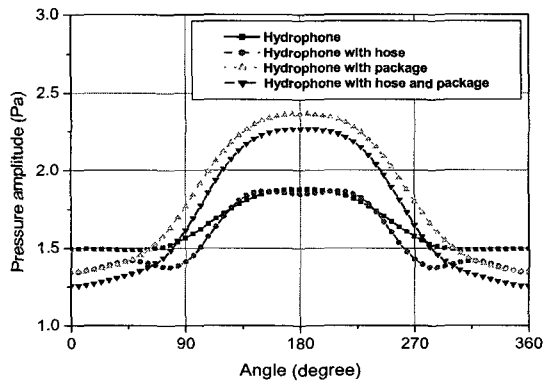


Fig. 10 Pressure distribution around hydrophone with respect to the angle at 12 kHz

### 3.3 하이드로폰 출력 특성

하이드로폰 시스템의 최종 결과는 주변 구조물의 영향이 모두 포함되어 출력 전압으로 나타나게 된

다. Fig. 11은 4가지 해석 모델에 대한 하이드로폰의 출력 전압을 하이드로폰 둘레에 작용하는 평균 압력에 대해 계산하여 표현한 것이다. 주변의 많은 구조물로 인한 영향에도 불구하고 하이드로폰의 출력 특성은 비교적 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 하이드로폰이 반경 방향으로 분극되어 있으므로 반경 방향의 모드에 해당하는 압력이 인가되는 경우를 제외한 나머지 경우는 평균적으로 작용한 음압이 하나의 출력인 전압 형태로 보여지기 때문이다. 하지만 5.5 kHz와 배수에 해당하는 주파수에서는 약간의 출력 차이를 보이고 있다. 이 경우는 하이드로폰이 모드가 나타나는 주파수로 생각할 수 있으나, 전기-기계 결합계수가 낮은 모드인 렉비공 형태의 변형을 보인다. 실험적으로는 하이드로폰을 설치하는 매우 유연한 구조물의 댐핑 작용으로 인해 그 특성을 관측하기는 매우 어려울 것으로 판단된

다. Fig. 12는 5.5 kHz에서 음장 분포를 보인 것이다. 하이드로폰의 좌우로 크고 작은 음압이 인가되어 하이드로폰이 럭비공 형태로 변형하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 취급, 운송, 설치 중에 복합적인 하중이 인가되는 상황으로 인하여 필연적으로 수반되는 주변 구조물의 영향을 압전-구조-음향 특성이 연성된 하이드로폰 시스템에 대해 연성 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 주파수 별로 각 부품이 음장 특성에 미치는 영향을 파악하고, 문제점이 있는 부품에 대한 수정 설계를 진행하기 위해 하이드로폰 만 있는 경우, 하이드로폰과 호스만 있는 경우, 하이드로폰과 장력 구조물만 있는 경우, 모두를 포함하는 하이드로폰 시스템의 4가지 경우로 분리하여 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

#### 참 고 문 헌

(1) Song, Y.-I., 1998, "Submarine Optical Cable Installation of Underwater Surveillance System",

ADD Report, pp. 222~231.

(2) Dallas, I. M., et. al., 1999, "Advanced Technologies for Undersea Surveillance", UDT 99, pp. 105~111.

(3) Kwon, O.-C., 2005, "Development of Underwater Buried Linear Array Sensor System", JDTR, pp. 73~84.

(4) Lee, S. H. and Kim, Y. H., 2004, "Realization of Acoustic Scattering Holography", Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 11, pp. 1101~1106.

(5) Kim, Y. S. and Lee, D. J., 2007, "Acoustic Scattering from Circular Cylinder by Periodic Sources", Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 41~47.

(6) Kim, J.-S., Lee, J.-M. and Cho, Y.-H. 2005, "A study on Design of Underwater Acoustic Transducers Using the Electro-mechanical Coupling Analysis Code ATILA", Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 10, pp. 1211~1216.

(7) ANSYS Inc., 2000, ANSYS Release 8.1 Document.