

해양 배경 소음 하의 수신 특성 안정화를 위한 원통형 하이드로폰 배열의 개념 설계

Conceptual Design of Cylindrical Hydrophone Arrays for Stabilization of Receiving Characteristics under Ocean Ambient Noise

노응휘, 이훈기, 엄원석[†], 장우석*

(Eunghwy Noh, Hunki Lee, Won-Suk Ohm,[†] and Woosuk Chang*)

연세대학교 기계공학부, *LIG넥스원

(Received April 1, 2015; accepted May 13, 2015)

초 록: 수중 음향 감시 체계는 하이드로폰 배열을 이용하여 적함을 실시간으로 탐지하고 그 위치를 추적하는데, 해저 고정형 센서 배열은 이러한 감시 체계에 있어 중추적 역할을 수행한다. 본 연구에서는 천해 환경을 고려한 해저 고정형 원통형 하이드로폰 배열의 개념 설계를 유한요소해석을 통하여 수행하였다. 해양 배경 소음 하에서의 수신 특성 안정화를 위하여 금속 차단막을 이용한 배경 소음 스펙트럼 준위의 백색화 기법을 제안하였고, 배열 형상 최적화를 통하여 고각 및 방위각 방향의 지향성을 확보하였다. 나아가 소나돔의 형상과 재질에 따른 구조 진동 및 음향 산란 특성을 고찰하였다. 배경 소음 준위의 백색화, 배열 형상 최적화 및 소나돔의 음향적 투명화를 통하여, 해당 주파수 범위에 걸쳐 4 dB 이내의 감도 편차를 갖는 강건한 수신 특성의 하이드로폰 배열을 도출할 수 있음을 보였다.

핵심용어: 수중 음향 감시 체계, 수신 특성 안정화, 해양 배경 소음, 금속 차단막, 원통형 배열, 소나돔

ABSTRACT: An underwater sound surveillance system detects and tracks enemy ships in real-time using hydrophone arrays, in which seabed-mounted sensor arrays play a pivotal role. In this paper the conceptual design of seabed-mounted, cylindrical hydrophone arrays for use in shallow coastal waters is performed via finite element calculations. To stabilize the receiving characteristics under the ocean ambient noise, a technique for whitening the ambient noise spectrum using a metal baffle is proposed. Optimization of the array configuration is performed to achieve the directivity in the vertical and azimuthal directions. And the effects of the sonar dome shape and material on the structural vibration and sound scattering properties are studied. It is demonstrated that a robust hydrophone array, having a sensitivity deviation less than 4 dB over the frequency range of interest, can be obtained through the whitening of the ambient noise, the optimization of the array configuration, and the design of acoustically transparent sonar domes.

Keywords: Underwater sound surveillance system, Stabilization of receiving characteristics, Ocean ambient noise, Metal baffle, Cylindrical array, Sonar dome

PACS numbers: 43.30.Yj, 43.38.Hz

1. 서 론

수중 음향 감시 체계(underwater sound surveillance system)는 음향 수신 센서를 이용하여 적함의 침입을

감지하고 그 위치를 추적하는 일종의 경보장치라고 할 수 있다. 이러한 음향 감시 체계는 주로 외해를 대상으로 적 잠수함, 수상함, 반잠수정 등을 조기에 탐지하는 역할을 수행한다. 음향 감시 체계의 일환으로 다수의 하이드로폰과 이를 연결하는 케이블을 해저 면에 설치하여 운용하는 해저 고정형 음향 센서

[†]Corresponding author: Won-Suk Ohm (ohm@yonsei.ac.kr)
School of Mechanical Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-Ro, Seodaemun-Gu, Seoul 120-749, Republic of Korea
(Tel: 82-2-2123-5819, Fax: 82-2-312-2159)

배열을 주로 이용한다. 적합을 탐지하기 위한 방법은 크게 적합 자체의 방사 소음을 감지하는 수동 소나와 아군 함정에서 생성한 음파의 반향음을 감지하는 능동 소나로 대별된다. 오늘날 함정의 정숙화 기술이 발전함에 따라 단순히 수동 소나의 형태로 음향 감시 체계를 운용하는 것은 그 한계가 있기 때문에 능동 소나 방식의 채택이 점차적으로 증가하는 추세이다. 그 중에서도 송신부와 수신부가 공간적으로 분리된 양상태(bistatic) 소나 방식이 상당 부분 활용되고 있다. 따라서 능동 반향음을 감지하는 해저 고정형 음향 센서 배열의 설계는 음향 감시 체계를 이용한 적합의 탐지 및 추적에 있어 매우 기본적인며 중추적인 요소라 할 수 있겠다.

수중 음향 감시 체계는 주로 해양 환경에서 사용되기 때문에 해양 배경 소음(ocean ambient noise)의 직접적인 영향을 받는다. 해양 배경 소음은 선박, 바람, 파도, 강우 및 수중 생물 등에 의하여 발생되는데, 음향 센서 배열의 탐지 성능 저하를 유발하므로 음향 감시 체계의 설계 및 제작에 있어 반드시 고려되어야 한다. 일반적으로 해양 배경 소음의 주파수 특성은 Wenz^[1]의 “Rule of fives”에 의하여 기술되는데, 주파수가 두 배 될 때마다 소음 레벨이 5 dB 가량 감소(-5 dB/octave)하는 경향을 보인다. Choi *et al.*^[2]은 한

반도 주변의 천해 환경에서 측정된 데이터를 바탕으로 해양 배경 소음의 스펙트럼 준위에 대한 실험식을 도출하였고, 이는 Fig. 1에 도시되어 있다. 대양 심해를 대상으로 하는 Wenz 곡선에 비해 전체적인 소음 준위는 10 dB 이상 크지만, 공통적으로 -5 dB/octave의 감소 경향성을 잘 반영하고 있다. 이러한 해양 배경 소음 하에서 양상태 소나로 능동 반향음을 수신하는 음향 감시 체계에서는 배경 소음을 기준으로 수 dB 이상의 문턱 값(threshold) 초과 여부를 판단하게 된다. 기준이 되는 해양 배경 소음이 주파수에 따라 감소하므로 문턱 값 또한 주파수에 따라 감소해야 한다. 문턱 값 초과 여부를 판별하기 위해서는 일차적으로 시간 영역 신호를 주파수 영역으로 가져가기 위한 푸리에 변환을 수행해야 하는데, 이에 소요되는 연산시간은 체계의 작전성능을 저하하는 직접적인 원인이 될 수 있다. 반면 최종 수신된 배경 소음의 스펙트럼 분포를 평탄하게 만들면 주파수에 관계 없이 일정한 문턱 값을 설정할 수 있기 때문에 별도의 푸리에 변환 없이 시간 영역 상에서의 탐지 및 판별이 가능하다. 본 논문에서는 이와 같은 배경 소음 준위의 백색화를 수신 특성 안정화의 첫 번째 요소로 정의한다. 배경 소음의 백색화를 위해 +5 dB/octave의 특성을 갖는 고역 필터(high-pass filter)를 이용하여 전기적으로 배경 소음의 백색화를 구현할 수 있지만, 이 경우 고주파수 성분의 전기 잡음도 함께 증폭되어 탐지 성능을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 단위 센서 후방에 차단막을 설치하여 기계적으로 배경 소음 준위의 백색화를 구현하는 기법을 고려한다.

수중 음향 감시 체계에서는 비교적 가까운 거리에 존재하는 아군 함정의 방사 소음으로 인해 탐지 성능이 저하될 수 있지만, 지향성 센서 배열을 이용해 그 영향을 최소화할 수 있다. 따라서 센서 배열의 지향성 확보를 위한 배열 형상 최적화를 수신 특성 안정화의 두 번째 요소로 꼽을 수 있다. 음향 센서 배열은 선형, 원형, 평면형 및 원통형 배열 등으로 분류된다. 그 중 원통형 배열은 여러 개의 원형 배열이 축방향을 따라 수직으로 나열되어 있는 형태를 말한다. 원통형 배열은 고각(vertical angle) 방향으로 지향성을 가질 뿐만 아니라 360° 방위각(azimuthal angle)에

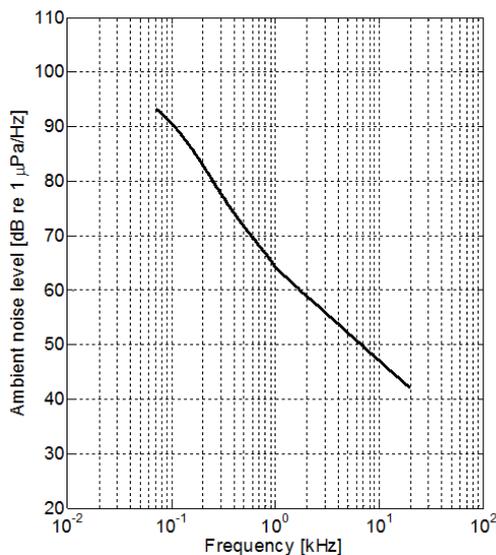


Fig. 1. Spectrum of the ocean ambient noise measured in shallow coastal waters of the Korean peninsula. Reproduced here using Eq. (2) of Ref. 2.

따라 빔 조향이 가능하기 때문에 음향 감시 체계 뿐만 아니라 함정 소나 및 수중 무선통신 시스템 등에 널리 적용되고 있다.^[3] 한편 센서 배열을 수중 환경으로부터 보호하기 위해서 소나돔을 설치하는데, 소나돔에 의한 구조 진동과 음향 산란은 수신 특성의 불안정성을 유발하는 원인이 된다. 따라서 소나돔에 의한 진동 및 소음의 영향을 최소화 혹은 소나돔을 음향적으로 투명화하는 것을 수신 특성 안정화의 세 번째 요소로 정의한다.

본 논문에서는 음향 감시 체계에 적용 가능한 저 고정형 음향 센서 배열의 개념 설계를 위해 원통형 센서 배열을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 특히, 해양 배경 소음 하에서 앞서 언급한 수신 특성 안정화의 3대 요소인 배경 소음 준위의 백색화, 배열 형상 최적화 및 소나돔의 음향학적 투명화를 구현하는데 주안점을 두었다. II장에서는 배경 소음 준위의 백색화를 위한 차단막의 개념 설계에 대해 기술한다. III장에서는 고각 및 방위각 방향의 수신 지향성 확보를 위해 수행된 원통형 배열의 개념 설계에 대해서 기술한다. IV장에서는 소나돔의 음향적 투명화에 대해서 논의하고, V장에서는 전체적인 결론을 내린다. 본 논문의 모든 시뮬레이션은 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics(이하 COMSOL)를 이용하여 수행되었다.

II. 배경 소음 준위 백색화를 위한 차단막의 개념 설계

본 장에서는 전기적으로 변환된 해양 배경 소음 신호의 스펙트럼 준위가 주파수에 따라 편차가 없게끔 만드는 차단막(baffle)의 1차원 개념 설계를 기술한다. 한반도 주변 해역의 배경 소음 스펙트럼은 앞서 언급한 바와 같이 주파수가 증가함에 따라 약 -5 dB/octave로 감소하는 양상을 보인다. 따라서 수신 배경 소음 준위의 백색화를 위해 수신 감도가 고주파수로 갈수록 약 +5 dB/octave로 증가하는 단위 소자를 설계하도록 한다. Fig 2에 도시된 바와 같이 단위 소자는 전방향(omnidirectional) 하이드로폰, 철제 차단막 및 전처리기(sensor electronics)로 구성된다. 전처리기는 하이드로폰에 의해 획득된 아날로그 신호

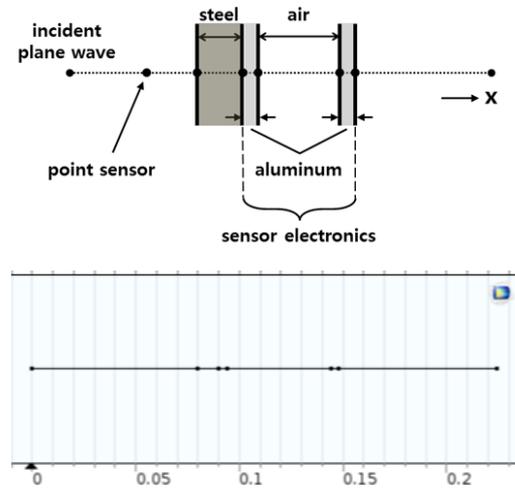


Fig. 2. A schematic for the conceptual design of an array element (top) and the one-dimensional model used in finite-element calculation (bottom).

를 디지털 신호로 변환하고 추가적인 신호처리를 수행하는 전자회로를 포함하며, 이를 해수 및 정수압(hydrostatic pressure)의 영향으로부터 보호하기 위하여 내부가 공기로 충전된 적당한 두께의 알루미늄 케이싱을 고려한다.

전처리기를 얇은 두께의 철제 차단막 뒤쪽에 배치하게 되면, 상대적으로 고주파수에서는 철제 차단막에 의한 반사가 중요하고, 상대적으로 저주파수에서는 후방의 전처리기, 특히 공기층에 의한 반사가 중요해진다. 차단막에 의한 반사에서는 해수에 비해 철의 음향 특성임피던스(characteristic impedance)가 높기 때문에 입사파와 반사파의 위상이 동일하고, 이들의 중첩에 의해 반사면에 가까운 위치에서 입사파보다 큰 음장이 형성된다. 반면 공기층에 의한 반사에서는 공기의 특성임피던스가 해수에 비해 매우 낮으므로 압력 소멸 경계(pressure release boundary) 조건과 유사하며, 반사파의 위상이 180° 변하기 때문에 반사면 근처에서 음장의 크기가 작다. 따라서 차단막 앞쪽에 위치한 하이드로폰에 형성되는 음압 크기는 주파수가 높아질수록 증가하게 되므로, 자유 음장에서의 수신 감도가 주파수에 따라 일정한 하이드로폰을 사용하더라도 단위 소자의 최종 감도는 주파수에 따라 증가하는 양상을 보인다. 이러한 개념의 타당성을 검증하고 이를 바탕으로 목표 수신 감도 특성(+5 dB/octave)을 부여하는 차단막의 개념 설

계를 위하여 Fig. 2와 같이 1차원 모델을 구성하였다.

차단막 앞쪽에 위치한 하이드로폰은 주파수에 따라 일정한 수신 전압 감도(Receiving voltage sensitivity, RVS)를 갖는 점 센서(point sensor)로 가정하였다. 자유 음장에서 하이드로폰 감도를 기준으로 전체 단위 소자의 상대적인 감도를 계산하는 방법을 취하였다. 차단막의 재질로는 Steel AISI 4340을 가정하였다. 전처리기는 차단막의 바로 뒤에 인접하도록 배치하고 알루미늄-공기-알루미늄의 순서로 케이싱 및 공기 충전부를 모델링 하였다. 해석 구간의 양 끝단에는 반사가 없는 방사조건을 부여하였고, 양의 x 축 방향으로 입사하는 음파를 가정했으며 주파수 영역에서 해석을 수행하였다. 설계 변수로는 철제 차단막의 두께, 하이드로폰과 철제 차단막 간 이격 거리, 전처리기의 알루미늄 케이싱 두께 및 공기 충전부 두께를 선정하였고, 이에 대하여 사례 연구를 수행한 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3(a)는 철제 차단막의 두께가 10, 30, 50 mm인 세 가지 경우에 대한 주파수별 수신 감도를 나타낸 것이다. 하이드로폰과 차단막 간 이격 거리는 15 mm 이고, 전처리기 알루미늄 케이싱의 두께는 4 mm, 공기 충전부의 두께는 50 mm로 고정하였다. 철제 차단막의 파장 대비 두께가 증가할 경우, 상대적으로 차단막 전면에 의한 반사 효과가 중요해짐에 따라 수신 감도가 상승하는 경향이 나타났으며, 특히 고주파수의 경우 음압 배가(pressure doubling) 효과에 의해 감도가 6 dB 상승함을 확인하였다. Fig. 3(b)는 철제 차단막의 두께를 10 mm로 선정하고 나머지 조건을 동일하게 유지한 채 하이드로폰과 철제 차단막 전면부의 이격 거리를 각각 15, 30, 50 mm로 변화시키면서 계산한 결과이다. 주파수 영역에서 입사파와 반사파에 의해 중첩된 음장은 파장 대비 거리, 즉 파수(wave number) k 와 거리 d 의 곱인 kd 값을 기준으로 형성된다. 철제 차단막으로부터 하이드로폰의 파장 대비 이격 거리가 증가할 때 동등한 감도를 갖기 위해서는 주파수가 낮아져야 하므로 감도 그래프는 음의 주파수 방향으로 이동하는 경향을 나타낸다. Fig. 3(c)는 전처리기 알루미늄 케이싱의 두께가 4, 6, 10 mm인 경우에 대해 감도를 비교한 결과이며, 두께가 증가할수록 감도도 증가하지만 그 정도는 미미하다.

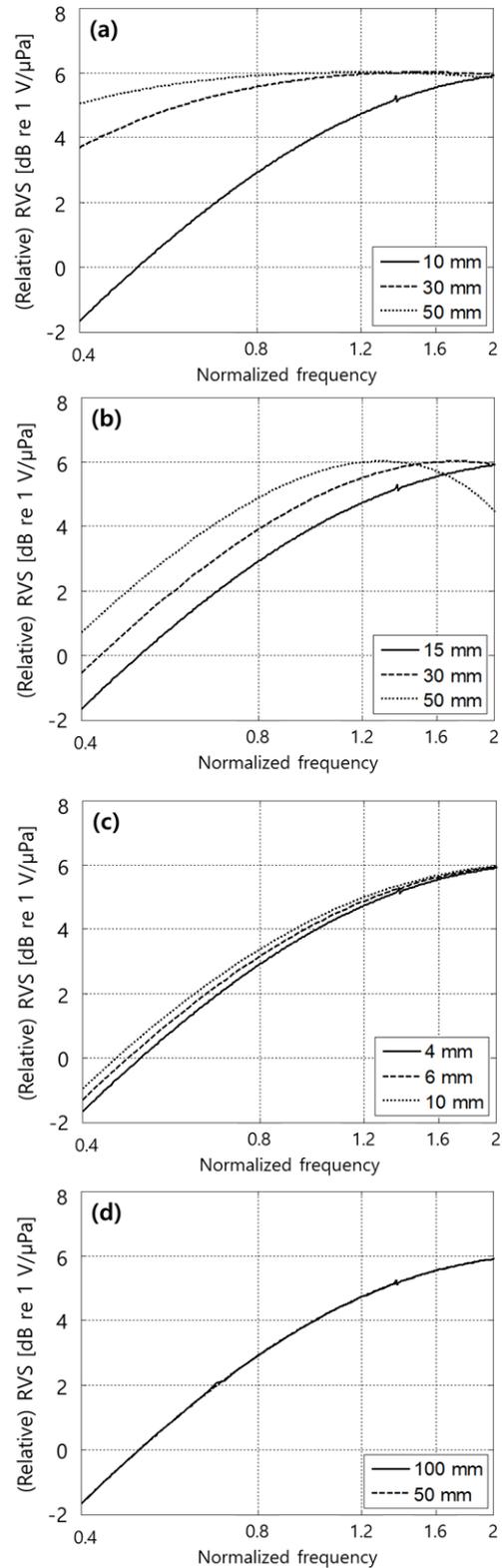


Fig. 3. Variation of the relative RVS with design parameters of (a) thickness of baffle, (b) sensor-baffle spacing, (c) thickness of aluminum casing, and (d) thickness of air layer.

따라서 전처리기 케이싱의 두께는 목표 수신 감도 특성보다 수심에 의한 정수압에 초점을 두고 설계를 해야 할 것이다. Fig. 3(d)는 전처리기 공기 충전부의 두께가 50 mm, 100 mm인 두 경우를 비교한 그래프이며 감도 결과는 차이가 거의 없다. 공기의 음향 특성 임피던스가 매우 낮기 때문에 음파가 투과하지 못하면서 수신 감도에 영향을 주지 않는다. 따라서 공기 충전부는 전처리기 내부 전자회로 및 케이블 구성에 초점을 두고 설계되어야 할 것이다.

지금까지의 1차원 해석 결과로부터, 본 연구에서 목표로 하는 수신 감도 특성을 만족시키기 위해서는 전처리기 설계보다 철회 차단막의 두께와 하이드로폰-차단막 간 이격 거리가 더 중요한 설계 변수로서 작용함을 알 수 있다. 또한 10 mm의 철회 차단막 두께와 15 mm의 하이드로폰 이격 거리에 대하여 약 +5 dB/octave 기울기의 수신 감도 특성을 1차원 모델에 대해 도출할 수 있었다.

III. 수신 지향성 확보를 위한 원통형 배열의 개념 설계

II장의 단위 소자 해석 결과를 바탕으로 센서 배열의 개념 설계를 위하여 2차원 및 3차원 모델을 구성하였다. 2차원 해석은 수신 배경 소음 준위의 백색화를 저해하지 않는 범위에서 고각 방향의 지향성을, 3차원 해석은 방위각 방향의 지향성을 얻는 것을 목적으로 한다. 실제 운용 측면에서 원통형 배열 내 모든 하이드로폰에 대해 별개의 채널을 할당하여 신호를 처리하는 방식은 그 계산량이 상당하다. 따라서 축 방향으로 수 개의 하이드로폰은 병렬 연결하여 하나의 채널을 구성하고, 원주 방향으로 각각 별개의 채널을 구성하여 신호를 획득 및 처리하는 형태를 취한다. Fig. 4와 같이 하나의 채널을 구성하는 축 방향으로의 하이드로폰 선형 배열은 스테이브(stave)라고 하는 원통형 배열의 기본 단위가 되고, 따라서 원통형 배열은 고각 θ 방향으로 지향성을 갖는 스테이브들을 원형으로 배열한 것으로 볼 수 있다.^[4] 선형 배열에서는 축을 포함하는 평면상에서 기본적으로 지향성이 나타나며, 개구면(aperture) 크기가 커지거나 주파수가 높아질수록 더 좁은 빔 폭을 갖는

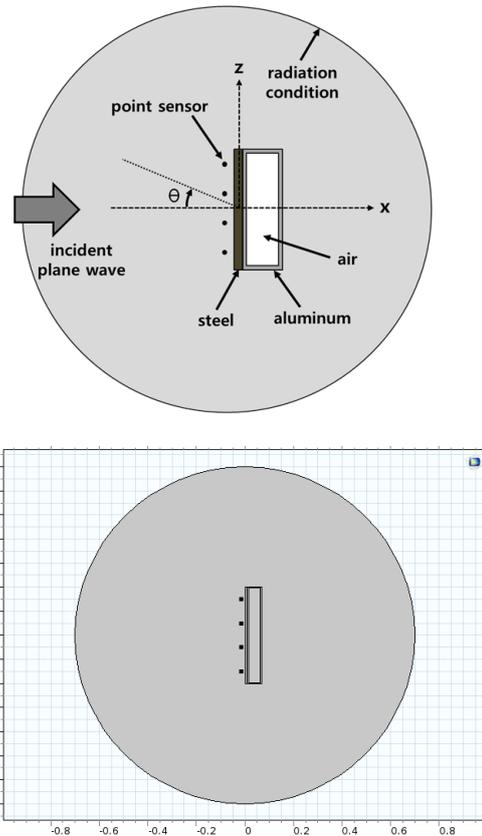


Fig. 4. A schematic for the conceptual design of a stave (top) and the two-dimensional model used in finite-element calculation (bottom).

다.^[5] 빔 폭이 좁을수록 스테이브에 수직인 방향, 즉 상대적으로 작은 고각에서 들어오는 신호를 더 크게 감지할 수 있다. 단일 스테이브를 하나의 채널로 구성함으로써 신호처리를 통한 고각 방향으로의 빔 조향이 불가능하다는 단점이 있지만, 천해 환경에서는 탐지하고자 하는 적함이 수심에 비해 상대적으로 전방의 먼 거리에 있기 때문에 고각 방향 빔 조향의 필요성이 크지 않다. 또한 아군 함정 혹은 선박들은 상대적으로 근거리에 위치하여 높은 고각을 갖기 때문에, 그로 인한 음향 신호는 별도의 신호처리 없이 스테이브의 지향성만으로도 상당 부분 제거된다. 이와 같이 고각 방향으로 양호한 지향성을 갖는 단일 스테이브의 개념설계를 위한 2차원 해석 모델을 Fig. 4와 같이 구성하였다.

2차원 모델에서는 z축 방향으로 유한한 길이의 철회 차단막 및 그와 동일한 길이의 전처리기 형상을 구성하였다. 1차원 해석과 마찬가지로 전처리기는

알루미늄 재질의 케이싱과 내부의 공기 충전부로 구성했으며, 각 하이드로폰은 자유 음장에서의 값을 기준으로 주파수에 따라 일정한 감도를 갖는 점 센서로 가정하고 단일 스테이브의 감도를 상대적으로 계산하였다. 여기서 II장의 1차원 해석으로부터 도출된 10 mm의 철제 차단막 두께와 15 mm의 하이드로폰-차단막 이격 거리를 반영하였으며, 전처리기의 형상으로는 4 mm의 알루미늄 케이싱 두께와 50 mm의 공기 충전부 두께를 선정하였다. 위의 조건들을 고정한 채 철제 차단막 및 전처리기의 길이, 즉 개구면의 길이를 300, 400, 500 mm로 변화하면서 사례 연구를 수행하였다. 센서 간의 이격 거리를 100 mm로 일정하게 유지하면서 300 mm 개구면의 경우 3개, 400 mm의 경우 4개, 500 mm의 경우 5개의 센서를 배치하였다. 철제 차단막과 전처리기의 알루미늄 케이싱에 대해서는 COMSOL에 포함된 선형 탄성 재료 모델을 적용하여 음향-구조 연성 해석을 수행하였다. 수신 감도 계산을 위해 2차원 스테이브 모델을 자유 음장 내에 위치시키고 x축 방향으로 입사하는 평면파를 가정한 후 주파수 영역 해석을 수행하여 수신 감도를 예측하였고, 고각 방향의 지향성 계산을 위하여 1° 간격으로 입사 고각을 변화시키면서 그 결과를 도출하였다. 이를 통해 개구면 길이 혹은 센서 개수에 따른 고각 방향의 지향성 및 수신 감도를 예측한 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5(a)는 고각에 따른 지향성 결과를 나타내고 있다. 입사각을 고각 방향으로 1° 간격으로 증가시키면서 단일 스테이브를 통해 감지되는 전기신호의 크기를 정규화하여 나타냈다. 0°의 고각, 즉 스테이브 축에 수직인 방향에서 최대값을 보이며 고각이 증가할수록 신호가 감소하는 경향이 나타난다. 또한 개구면의 길이가 증가할수록 주엽(main lobe)의 빔폭은 감소하나 부엽(minor lobe)이 생성되는 일반적인 경향을 보인다. Fig. 5(b)는 0°의 고각으로 입사하는 평면파에 대해 계산된 단일 스테이브의 수신 감도 결과이다. 고각 방향의 지향성을 얻기 위해 선배열을 구성하였음에도, 약 +5 dB/octave로 증가하는 목표 감도 특성이 그대로 유지됨을 확인하였다. 부분적으로 목표 감도를 벗어나는 부분은 철제 차단막과 알루미늄 케이싱의 탄성을 고려함으로써 발생하는

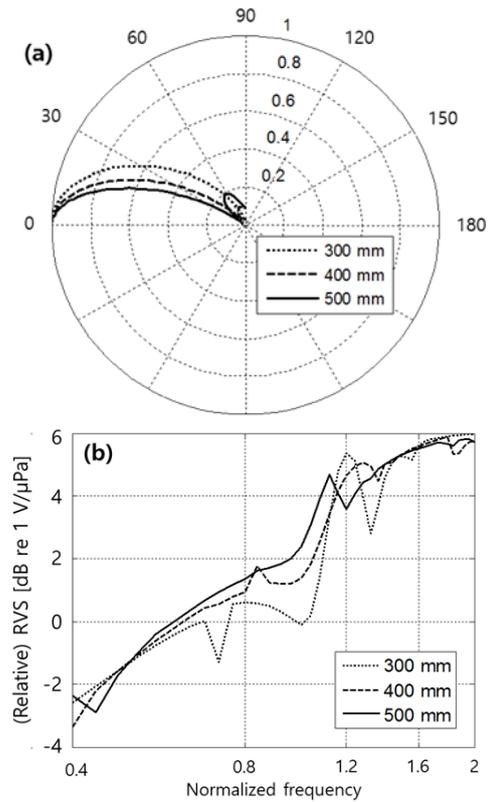


Fig. 5. Effects of the aperture length on the receiving characteristics in terms of (a) directivity pattern and (b) relative RVS.

구조 진동의 영향으로 볼 수 있다. 이에 대해서 더 자세한 분석이 필요하지만, 이후 고려할 원통형 배열의 3차원 해석에서는 구조의 변화로 인해 진동의 양상이 달라진다. 따라서 본 2차원 해석에서는 전체적인 수신 감도의 양상이 목표 감도 특성과 유사하다는 것에 더 의미를 둘 수 있겠다.

지금까지 2차원 해석을 통하여 단일 스테이브의 고각 방향의 지향성을 살펴본 반면, 원통형 배열의 방위각 방향의 지향성을 알아보기 위해서 3차원 해석을 수행하였다. 원통형 센서 배열은 축대칭의 구조를 가지고 있기 때문에 전체적인 센서 배열의 관점에서는 방위각 방향으로의 변화가 없다. 그러나 각각의 스테이브마다 하나의 채널을 가지고 있으며, 단일 스테이브만을 고려할 경우에는 차단막 등의 구조로 인해 축대칭으로 볼 수 없으므로 입사파의 방위각에 따라 감도의 차이가 존재한다. 이에 대한 해석을 위하여 먼저 2차원 해석으로부터 도출한 500 mm 길이의 개구면에 5개의 센서가 배치되는 스테이브

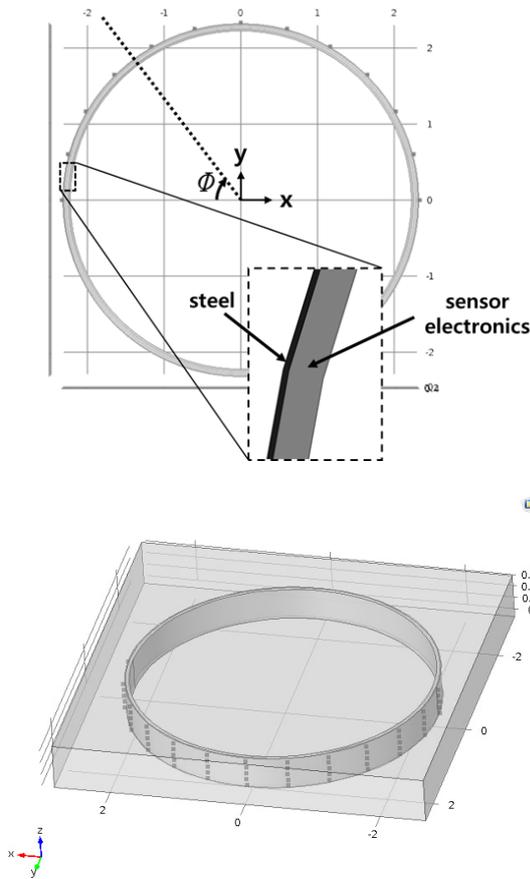


Fig. 6. A bird's eye view of the schematic for the conceptual design of a cylindrical array (top) and the three-dimensional model used in finite-element calculation (bottom).

모델(Fig. 5의 실선)을 채택하였다. 이를 연직 방향의 배열 축에 대해 회전시켜 Fig. 6과 같이 다수의 스테이브가 원통형 배열을 이루면서 철펀 차단막과 전처리기가 원통형 껍질의 형태를 가지는 3차원 모델을 구성하였다. 원통형 센서 배열이 해저면에 고정된 상황을 가정하여 강성 경계(rigid boundary) 조건이 부여된 바닥면에 센서 배열을 배치하였다. 원통형 배열의 반경으로는 2.3 m를 선정하고, 0°의 고각으로 수평 입사하는 평면파를 가정하였다. 계산 과정에서는 수신 빔 형성 등 별도의 신호처리를 포함하지 않았으며, 2차원과 마찬가지로 철펀 차단막과 알루미늄 케이싱에 선형 탄성재료 모델을 적용하였다. 입사파의 방위각을 변화시키는 대신 입사 방향을 양의 x축 방향으로 고정한 채 원통면의 둘레 방향을 따라 해당 각도에 위치한 스테이브를 대상으로 감도를 계

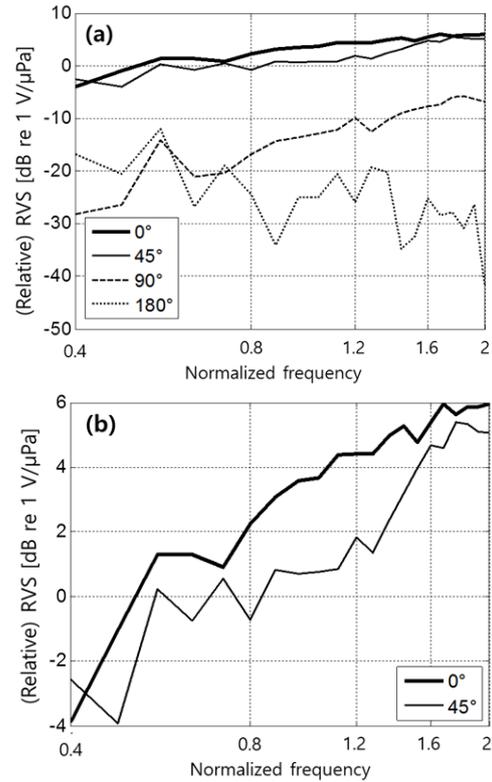


Fig. 7. Variation of the relative RVS with the incident azimuthal angle. (a) 0°, 45°, 90°, 180°, (b) 0°, 45°.

산하였다. 해석은 주파수 영역에서 수행되었으며, 이를 통해 음의 x축 방향을 기준으로 각각 0°, 45°, 90°, 180°의 방위각에 위치하는 네 개의 스테이브에 대해 계산된 수신 감도 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 7(a)로부터 음원이 입사하는 방향을 기준으로 스테이브의 방위각이 작을수록 감도가 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있다. 90° 이상의 방위각에서는 입사파가 공기층을 직접적으로 투과하기 어렵기 때문에 매우 낮은 감도가 나타난다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)에서 다루고 있는 네 가지 방위각 중에서 감도가 높은 0°와 45°의 경우만을 확대하여 나타낸 그래프이다. 가장 낮은 주파수를 제외하고는 방위각 0°로 입사파를 마주하고 있는 스테이브의 감도가 더 높게 계산된다. 따라서 낮은 주파수에서는 방위각 방향의 탐지 정확도가 다소 저하되나, 그 외의 모든 주파수에 대해서는 음원이 위치한 방향에서 스테이브의 감도가 크게 나타나기 때문에 이를 이용하여 적합 위치의 방위각을 추정할 수 있음을 확인하였다.

2차원 해석과 마찬가지로 차단막 및 전처리에

의한 구조 진동 및 음향 간섭에 의해 수신 감도 그래프의 개형이 1차원 해석의 결과처럼 부드러운 형태로 나타나지 않았지만, 전체적으로는 본 연구에서 목표로 하는 +5 dB/octave의 수신 감도 경향성을 확보할 수 있었다.

IV. 소나돔의 음향적 투명화에 관한 영향 인자 분석

소나돔은 어선의 저인망 등 다양한 수중 물체에 의하여 해저 고정형 센서 배열이 손상되지 않도록 보호하는 역할을 한다. 하지만 소나돔의 존재로 인해 음파의 투과 손실이 발생하고 센서의 수신 성능이 저하될 가능성이 있다. 따라서 소나돔 설계 시에는 외부 충격을 견딜 수 있도록 충분히 높은 강도를 가지면서도 음향 투과 손실을 최소화할 수 있도록 구조 및 음향학적 조건을 동시에 충족시켜야 한다. 기존 연구에서는 약 20 mm의 두께를 갖는 GRP(Glass Reinforced Plastic) 재질 평판 구조물에 대한 음향학적 특성을 분석하였고,^[6] 소나돔 재료의 음향 성능에 대한 설계 기법을 제시한 바 있다.^[7] 본 연구에서는 소나돔의 자세한 설계에 초점을 맞추기보다, 소나돔의 형상 및 재질의 변화가 원통형 센서 배열의 수신 감도에 미치는 영향을 살펴보는 것에 중점을 두고자 한다.

소나돔 형상과 수신 감도 특성의 연관성을 알아보기 위하여 해석 대상으로 선정한 두 종류의 소나돔 형상을 도식화하여 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8(a)는 각

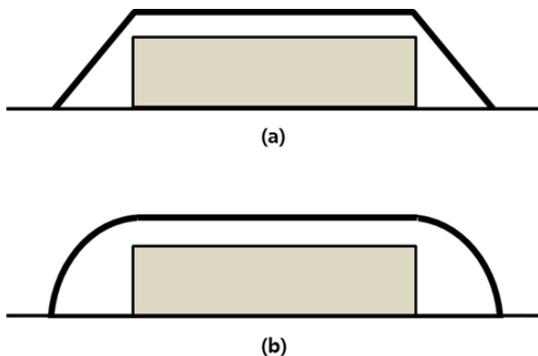


Fig. 8. Different types of sonar domes considered in the three-dimensional analysis (side view). (a) plate type, (b) arch type.

이진 형태의 접시형 소나돔, Fig. 8(b)는 둥근 형태의 아치(arch)형 소나돔이며 그림 중앙의 사각형은 원통형 센서 배열을 나타내고 있다. 먼저 형상에 의한 영향만을 고려하기 위하여 소나돔 재질은 CRP(Carbon-fiber Reinforced Plastic)로 통일하였으며, 하단에서 약 3.1 m, 상단에서 약 2.3 m의 반경을 갖고 약 0.63 m의 높이와 20 mm의 두께를 갖는 형태로 모델링하였다. 소나돔 내부의 원통형 센서 배열은 III장의 3차원 해석에 사용한 모델과 같이 500 mm의 개구면에 5개의 센서가 하나의 스테이브를 구성하도록 하였다. 다수의 스테이브를 약 2.3 m의 반경을 갖는 원을 따라 배열하였으며, 해저면에 센서 배열이 배치된 상황을 가정하여 바닥면에 강성 경계 조건을 부여하였다. 입사파로는 0°의 고각으로 입사하는 평면파를 가정하였으며, 주파수 영역에서 해석을 수행하였다. 0°의 방위각에 위치하여 평면파 입사방향과 마주하는 스테이브에서의 수신 감도를 두 가지 소나돔 형상 및 소나돔이 없는 경우에 대해 Fig. 9에 도시하였다.

Fig. 9의 실선 그래프는 소나돔이 없는 경우의 수신 감도로서 III장에서 수행된 결과와 동일하며, 두 종류의 파선 그래프는 소나돔을 추가한 모델에 대하여 계산된 수신 감도를 나타낸다. 소나돔이 추가된 경우에도 전체적으로는 그래프 개형이 주파수에 따라 증가하는 형태로서 목표 수신 감도 특성을 만족하지만, 소나돔의 구조 진동에 기인한 음향 간섭에 의해 수신 특성의 불안정성이 부분적으로 나타나고 있다. 이를 해결하기 위해서는 진동 감쇠재 역할을 하는 PU(polyurethane) 재료를 소나돔 표면에 적용함

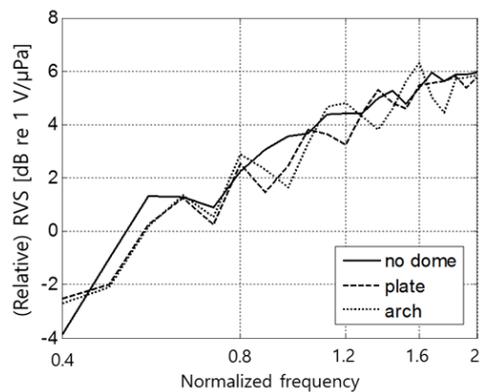


Fig. 9. Variation of the relative RVS with the geometry of the sonar dome.

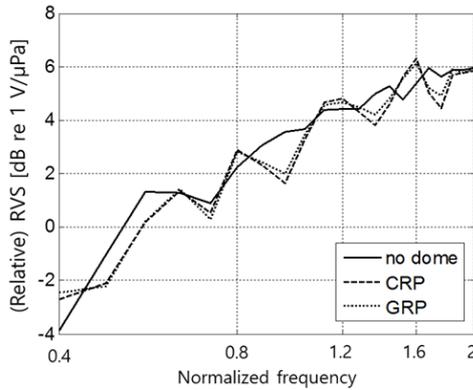


Fig. 10. Variation of the relative RVS with the material of the sonar dome.

으로써 투과 성능 면에서 약간의 손해를 봄과 동시에 진동의 영향을 감소시키는 방안을 적용할 수 있다.^[6] 본 연구에서는 해석의 복잡성 및 계산량의 한계로 인해 이러한 PU 적층 모델의 해석을 다루지는 않았으나, 수신 특성 안정화 향상을 위한 노력으로서 추후에 이러한 방법들을 고려할 필요가 있다. 한편 소나돔 설계의 음향 투과 성능은 통상적으로 2dB 이하의 손실을 목표로 하고 있으며, 위의 해석 결과로부터 소나돔 유무에 따른 수신 감도를 비교했을 때 형상에 관계없이 소나돔에 의한 수신 감도의 저하가 일반적인 목표치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

다음으로는 소나돔의 재질에 따른 수신 특성의 변화를 살펴보기 위한 해석을 수행하였다. 비교 대상으로는 보편적인 소나돔의 재료로서 CRP와 GRP를 선정하였으며, 앞서 이용한 아치형 소나돔 형상을 고려하였다. 나머지 조건을 이전과 동일하게 유지한 채 주파수 영역에서 해석을 수행한 결과를 Fig. 10에 도시하였다.

Fig. 10의 실선 그래프는 이전과 마찬가지로 소나돔이 없는 경우이며, 두 종류의 파선은 각각 아치형 소나돔의 재질로서 CRP와 GRP를 이용한 경우를 나타내고 있다. 형상에 따른 감도 변화와 마찬가지로 전체적인 경향은 목표 수신 특성과 유사한 형태를 보이고 있지만, 두 재료 모두에 대해 소나돔의 구조 진동 및 음향 간섭에 의한 수신 특성의 불안정성이 부분적으로 나타났다. 소나돔의 재질에 따른 수신 감도의 차이가 거의 없기 때문에, 음향학적 측면에서는 CRP와 GRP가 비슷한 특성을 가지고 있다고 할

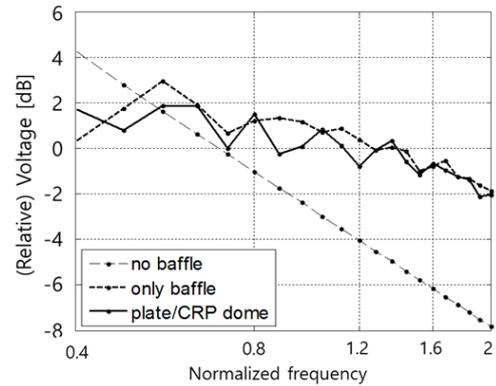


Fig. 11. Received voltage amplitude of the ocean ambient noise shown in Fig. 1 for different sensor arrays.

수 있다. 수신 감도 특성의 변화는 소나돔 재질보다는 형상에 의한 영향이 더 주요하게 나타났으며, 따라서 소나돔에 의한 수신 감도의 불안정성을 해결하기 위해서는 형상에 대한 고려가 선행되어야 한다.

소나돔을 포함하여 최종적으로 설계된 센서 배열에 대하여 해양 배경 소음에 따른 수신 전압을 계산하고 이전의 경우와 비교해보면 Fig. 11과 같다. 해양 배경 소음의 스펙트럼으로는 Fig. 1에 도시한 수치를 사용하였다. Fig. 11의 긴 점선 그래프는 차단막이 없는 자유음장 상태에서의 수신 전압으로서 -5dB/octave의 배경 소음 경향성이 그대로 드러난다. 반면 차단막을 적용한 경우에는 짧은 점선 그래프와 같이 수신 전압 신호가 전체적으로 편평하게 나타나며, CRP 재질의 접시형 소나돔을 포함하더라도 실선 그래프와 같이 해당 주파수 범위에서 4 dB 이내의 비교적 평편한 수신 전압 신호를 확보할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수중 음향 감시 체계에 적용 가능한 해저 고정형 원통형 센서 배열의 개념 설계, 특히 천해 환경 배경 소음 하의 수신 특성 안정화를 위한 3대 요소로서 배경 소음 준위의 백색화, 배열 형상 최적화 및 소나돔의 음향적 투명화에 주안점을 두었다. 해양 배경 소음 신호가 주파수에 따라 일정한 스펙트럼 준위를 갖도록 하는 단위 소자의 목표 감도 특성을 선정하고, 이를 구현하기 위해 센서 후방에

금속 차단막을 배치하는 구조를 제안하여, 주파수가 증가할수록 감도가 약 5 dB/octave로 증가하는 수신 특성을 도출하였다. 또한 원통형 배열이 고각 및 방위각 방향으로 양호한 지향성을 갖도록 2차원 및 3차원 해석을 수행하였으며, 소나돔의 형상과 재질이 감도 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 3차원 해석을 수행하였다. 이러한 과정을 통하여 해양 배경 소음 하에서 수신 전압 신호가 해당 주파수 범위에서 4 dB 이내의 편차를 갖도록 원통형 하이드로폰 배열을 설계하였다.

향후에는 철재 차단막, 알루미늄 케이싱 및 소나돔의 구조 진동으로 인해 발생하는 부분적인 수신 불안정성에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이를 위해 더 정밀한 주파수 분석은 물론, 구조 진동의 저감을 위한 추가 설계 요소를 도입해야 한다. 또한 제작 및 운용 측면을 고려하여 교체가 용이한 센서의 고정 구조 및 케이블 구성 등의 추가 요소가 반영된 상세 설계를 수행하고, 다양한 탐지 환경에 대해 작동이 가능한 신호처리 기법을 적용해 보고자 한다.

감사의 글

본 연구는 LIG넥스원(주)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. G. M. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources," J. Acoust. Soc. Am. **34**, 1936-1956 (1962).
2. B. K. Choi, B. C. Kim, C. S. Kim, and B. N. Kim, "Analysis of dependence on wind speed and ship traffic of underwater ambient noise at shallow sea surrounding the Korean peninsula" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **22**, 233-241 (2003).
3. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 2007), pp. 27-28.
4. D. C. Bertilone, D. S. Killeen, and C. Bao, "Array gain for a cylindrical array with baffle scatter effects," J. Acoust. Soc. Am. **122**, 2679-2685 (2007).
5. D. T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics* (Wiley, New York, 2000), pp. 495-506.
6. W. J. Jung, S. J. Han, W. H. Kim, K. K. Shin and J. J. Jeon, "A Study on the Measurement and Analysis Method for the Acoustic Transmission Loss of the Material for the Acoustic

Window of Sonar Dome," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, **16**, 729-738 (2006).

7. Y. S. Seo, M. W. Kang, K. K. Shin and J. J. Jeon, "Acoustic performance study of FRP acoustic window," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, **21**, 890-896 (2011).

저자 약력

▶ 노 응 휘 (Eunghwy Noh)



2012년: 연세대학교 기계공학과 학사
2012년 ~ 현재: 연세대학교 기계공학과 석박사 통합과정

▶ 이 훈 기 (Hunki Lee)



2010년: 연세대학교 기계공학과 학사
2012년: 연세대학교 기계공학과 석사
2012년 ~ 현재: 연세대학교 기계공학과 박사과정

▶ 엄 원 석 (Won-Suk Ohm)



1994년: KAIST 기계공학과 학사
2001년: University of Texas at Austin, Department of Mechanical Engineering 공학박사
2002년 ~ 2005년: 캐나다 표준과학연구원 (NRC-INMS) 객원연구원
2006년 ~ 2008년: (주)메디슨 선임연구원
2008년 ~ 현재: 연세대학교 기계공학부 교수

▶ 장 우 석 (Woosuk Chang)



1994년: 한양대학교 기계설계공학 학사
1996년: Mechanical Engineering, Lehigh University 석사
2001년: Engineering Mechanics, Pennsylvania State University 박사
2002년 ~ 2006년: Temasek Laboratory, National University in Singapore, 연구원
2006년 ~ 현재: LIG넥스원, 수석연구원