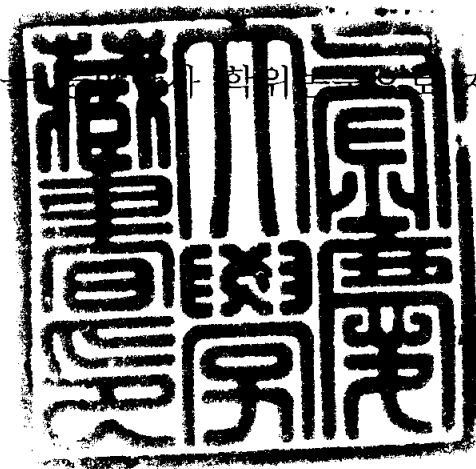


공학박사 학위논문

근거리 음장을 이용한 원거리 음장
예측과 음원 위치 추정

지도교수 윤 중 락

이 논문은 부경대학교 대학원 음향진동공학과에서 제출함



2003년 8월

부경대학교 대학원

음향진동공학과

김 원 호

김원호의 공학박사 학위논문을 인준함

2003년 6월 26일

주	심	공학박사	김 천 덕
부	심	공학박사	양 보 석
위	원	공학박사	김 무 준
위	원	공학박사	윤 종 락
위	원	공학박사	이 채 봉



목 차

Abstract

제 1 장 서 론	1
1.1. 연구 배경 및 필요성	1
1.2. 본 연구의 구성 내용	6
제 2 장 근거리 음장 측정과 원거리 음장 예측	7
2.1. 음원 영역의 구분	7
2.2. Helmholtz 적분식을 이용한 예측법	16
2.3. 경계배치법	18
2.3.1. 수중 실험 및 결과 고찰	21
2.3.2. 최적 측정 지점수의 결정	35
제 3 장 근거리 음장에서 음원 위치 추정	49
3.1. 홀로그래프 면에서의 상호 파워 스펙트럼	49
3.2. 음장의 공간 변환	57
3.2.1. 파수 공간 필터	62
3.3. 수치 모의 실험 및 결과 고찰	64
3.3.1. 무한 배플 내의 원판형 진동체 음원	64
3.3.2. 수치 모의 실험 및 결과 분석	67
3.4. 수중 실험을 통한 결과 고찰	77
3.4.1. 수중 음원의 위치 추정을 위한 실험 및 장비 구성	77
3.4.2. 수중 실험 결과 및 고찰	82
3.5. 음원과 홀로그래프 평면간의 거리	89

제 4 장 결 론	92
-----------------	----

참고 문헌	96
-------------	----

그림 목차

그림 1. 원판형 음원으로부터의 방사	7
그림 2. 원판형 음원의 구조	8
그림 3. $(r^2 + a^2)^{1/2}$ 의 이항 전개에서 처음 2항만 사용시의 오차	10
그림 4. $\sin(\pi a^2/2\lambda r) \simeq \pi a^2/2\lambda r$ 의 근사식에서의 오차	11
그림 5. 원판형 음원의 거리에 따른 음압 준위 $(f = 10 \text{ kHz}, a = 1 \text{ m}, c = 1500 \text{ m/s})$	14
그림 6. DRL 예측법에 대한 구조	15
그림 7. 경계배치법에 의한 근거리 음장 측정	18
그림 8. 근거리 음장 측정 구성도	22
그림 9. 음향 수조	23
그림 10. 음향 측정 시스템	23
그림 11. 원추형 음원 (ITC 5003)	24
그림 12. B&K 8103 3개로 구성된 선배열 음원	25
그림 13. 선배열 음원의 음장 측정 결과 비교	26
그림 14. 선배열 음원의 음장 분포 예측 결과 비교	27
그림 15. 측정 지점수에 따른 예측 결과 비교(선배열 음원)	28
그림 16. 측정 지점수에 따른 b_m 의 비교(선배열 음원)	29
그림 17. 원추형 음원의 음장 측정 결과 비교	31
그림 18. 원추형 음원의 음장 분포 예측 결과 비교	32
그림 19. 측정 지점수에 따른 예측 결과 비교(원추형 음원)	33
그림 20. 측정 지점수에 따른 b_m 의 비교(원추형 음원)	34
그림 21. 임의 형태의 음원과 음장 지점	36
그림 22. 홀수 개로 구성된 선배열 음원의 구조	39
그림 23. 짝수 개로 구성된 선배열 음원의 구조	41
그림 24. 배열수 n 에 따른 선배열 음원의 b_m 누적 특성($kL = 251$)	43

그림 25. kL 에 따른 선배열 음원의 b_m 누적 특성($n=50$)	44
그림 26. kL 에 따른 선배열 음원의 최적추정점수($\alpha = 10^{-1} \sim 10^{-5}$)	45
그림 27. kL 에 따른 최적 추정 지점수($\alpha = 10^{-5}$)	47
그림 28. kL 에 따른 kL 의 비례계수($\alpha = 10^{-5}$)	48
그림 29. 임의 음원과 홀로그램 면	51
그림 30. 기준 센서 평면과 홀로그램 평면	52
그림 31. 음원 영역에서의 음장 분포 계산 흐름도	52
그림 32. 공간 영역과 공간 주파수 영역의 관계	61
그림 33. 추정 평면에서 다른 평면으로의 파의 변환	61
그림 34. 파수 영역에서의 음장 평면 간의 전달함수의 크기	62
그림 35. 파수 공간 필터	63
그림 36. 원판형 음원과 홀로그램 평면	65
그림 37. 원판형 진동체 4개로 구성된 음원과 홀로그램 평면	66
그림 38. 기준 센서 평면과 홀로그램 평면	68
그림 39. 홀로그램 평면에서의 음장 분포(음압의 크기)	69
그림 40. 홀로그램 평면의 공간 주파수 영역에서의 음장 분포(단일 음원)	70
그림 41. 파수 공간 필터를 적용하지 않은 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포(단일 음원)	71
그림 42. 파수 공간 필터를 적용한 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포(단일 음원)	72
그림 43. 홀로그램 평면의 공간 주파수 영역에서의 음장 분포(음원 4개)	74
그림 44. 파수 공간 필터를 적용하지 않은 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포(음원 4개)	75
그림 45. 파수 공간 필터를 적용한 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포(음원 4개)	76
그림 46. 근거리 음장 측정 시스템 구성도	79
그림 47. 수중에 설치된 음원과 센서	80
그림 48. 홀로그램 평면 내의 선배열 센서	80

그림 49. 복소 음압 측정 화면	81
그림 50. B&K 8103 센서들의 수신 전압감도	81
그림 51. ITC 1001 음원 센서들의 송신 전압감도	82
그림 52. 홀로그래프 평면에서의 음장분포(10 kHz)	84
그림 53. 홀로그래프 평면의 공간 주파수 영역에서의 음장분포($k_0 = 41.9$)	85
그림 54. 파수 필터를 적용하지 않은 음원 영역에서의 공간 주파수 영역에서의 음장분포(10 kHz)	86
그림 55. 파수 필터를 적용한 음원 영역에서의 공간 주파수 영역에서의 음장분포(10 kHz)	87
그림 56. 파수 필터를 적용한 음원 영역에서의 공간 주파수 영역에서의 음장분포(20 kHz)	88
그림 57. 파수 공간 필터를 적용한 음원 영역에서의 음장 분포(10 kHz, 15×7 , $Z_h = 16$ cm)	90

표 목차

표 1. 측정 대상 음원 및 측정 변수 값	22
표 2. 배열수 $n=3$ 이고 $kL = 12.6$ 인 선배열 음원의 b_m 특성	42
표 3. $kL = 12.6$ 일 때 α 에 따른 최적 측정 지점수와 음측 상 음압 준위의 차이	46
표 4. 음원과 홀로그래프 평면의 거리에 따른 음원 위치 추정 결과	89

Positional Estimation of Sound Source and Far-Field Prediction of Sound Field using the Near-Field Sound Pressure

Won Ho Kim

*Department of Interdisciplinary Program of Acoustics and Vibration Engineering,
Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

This paper describes the prediction of sound field in far-field and the positional estimation of sound source using near-field sound pressure.

For the prediction of far-field sound pressure, Boundary Collocation Method is investigated. Boundary Collocation Method is one of the far-field prediction methods, which is analyzed based on Helmholtz integral equation and Green function. It is required on the complex sound pressure measurement around sound source in near-field. Its accuracy depends on the number of measuring points. The minimum measurement point which depends on the type of sound source and its directivity, are investigated and prediction results are also presented.

The number of measurement points in the near field which relates to the accuracy of the predicted field and the amount of data processing, should be optimized. Existing papers say that measurement points is proportional to kL and depends on geometry and directivity of the source. But they do not give us any definite criterion for the required number of measurement points. As a result of this paper, it has been found that the number of measurement points is optimized as $0.54kL$ which is about one half of the existing results.

And the results of positional estimation of sound source are as follows. The

basic theory is used in this paper, which is based on the near-field holography and the measurement of cross-power spectrum on a hologram plane. For them, this paper describes the theory to get sound fields in a source region from the spatial transform of sound field and the measured cross-power spectrum of sound pressure over a hologram surface close to a sound source. To solve the sound pressures from cross-power spectrums over a hologram surface, Taylor series for nonlinear equations is expanded, and it is calculated using Newton-Raphson method. In case that the radiated sound pressure level is not constant in time, it is required simultaneous measurements at all field points over a hologram surface, but if its sound source is stationary, this limitation can be overcome using a cross-power spectrum. And by introduction of reference sensor, the number of measurements can be reduced greatly.

And in this paper, it is proposed a new wave number filter to remove errors that is occurred on the backward propagation, and it is performed the numerical simulation of a circular piston sound source with infinite baffle. The source function on circular piston is established and presented the sound field on the source region from spatial transform of sound field in the hologram plane near sound source.

Also, This paper describes the experimental study for the positional estimation method of underwater sound source using spatial transformation of near-field sound pressure. The result confirms that it can be used in the identification of underwater noise sources. The sound sources in the experimental work consists of 2 spherical projectors and the near-field sound pressure is measured in the hologram plane. From the cross-power spectra of the measured data, the complex sound pressures on the hologram plane is derived and its spatial transformation gives sound fields in a source region. The obtained sound fields in a source region showed that the position of each sound source and their relative source strength are exactly estimated using a

wave number filter which is proposed in this paper.

And the distance between sound source and hologram plane is important for positional estimation and hologram plane must be within 1 wave length from sound source. In conclusion, this technique can be applied for estimation of each noise source position and its relative strength contribution for the underwater multiple sound sources.

제 1 장 서 론

1.1. 연구 배경 및 필요성

모든 파동 중에서 음파는 수중에서 전파가 가장 잘 되기 때문에 해양 탐색 등 비군사적 또는 군사적의 다양한 목적으로 수중 음파가 사용되고 있다. 이러한 수중에서의 정보 획득의 수단으로 사용되는 음파의 음장 예측은 매우 중요하다.

특히 수상함이나 잠수함에서 발생하는 방사소음(radiation noise)은 대잠 전술이나 소나(SONAR; SOund Navigation And Ranging)에 대한 피탐지 능력을 결정하는 주요 인자이기 때문에 이에 대한 음장 해석이 필요하다. 그러나 방사소음과 표적 강도(target strength)등의 주요 식별 인자에 대한 음장 해석의 이론적인 해석은 단순한 모델링[1,2]은 가능하나, 복잡한 내부 구조와 형상[3,4]으로 인해 실제 구조에 대한 해석은 거의 불가능하고 측정에 의존해야 한다.

이러한 방사소음 또는 표적 강도를 측정하는 경우에 원거리 영역에서의 측정은 해상 또는 호수와 같이 원거리 조건을 만족하는 넓은 영역에서 이루어져야 하나, 실제 측정 환경에서의 신호는 주변 선박, 바람, 파도, 조류 등 해상에서의 다양한 암 소음(ambient noise)에 의해 묻혀 버리고 실험 환경의 열악 등 제약 요소가 많이 수반되기 때문에 실제로 원거리 영역에서의 측정은 거의 불가능하다. 따라서 자유 음장(free field)을 만족하는 제한된 공간에서의 근거리 음장을 측정해야 한다.

선진 외국의 경우에는 조선소의 독(dock)을 이용하여 근거리에서 방사 소음을 측정하는 경우도 있으며[5], 잠수함의 표적강도를 측정하는 경우에는 음향 수조에서의 시험을 위해 크기를 축소시킨 모형 표적을 일반적으로 사용한다. 이 경우에, 표적 크기의 축소비 만큼 주파수가 증가[6,7]되어 음향 수조 내에서 원거리 조건을 만족할 수가 없다.

근거리 영역에서의 음장은 방사면을 구성하고 있는 음원의 방사 소자들(elements)의 상호 음향 간섭에 의해 위치에 따른 음장 특성은 규칙성이 없고 거리에 따라 음압 준위의 크기가 심하게 변하기 때문에 거리에 따른 전송 손실의 보상

이 불가능[8]하여 기준 거리에서의 음압 준위를 계산할 수가 없다. 따라서 근거리 영역에서의 음장 분포 측정 결과를 활용하여 원거리 영역에서의 음장 분포 예측이 필요하다.

또한 수상함이나 잠수함에서 발생하는 자체 소음(self noise)은 적에게 노출되어 자신의 위치가 탐지되기 때문에 소음원을 찾아내서 소음을 줄이거나 차폐하여야 한다. 특히 잠수함의 경우는 치명적이기 때문에 방사 소음의 감소 등 저소음, 정숙화를 위한 스텔스(stealth) 기술이 발전 추세에 있다[9]. 이러한 소음원은 함정의 엔진 등의 기계적 소음, 프로펠러 소음 등 다양한 복합음에 의해 발생되며, 함정의 종류를 구분하는 주요한 식별의 단서가 된다. 소음원의 제어를 위해서는 소음을 유발하는 주요 내부 음원과 소음 경로를 진단해야 하며, 이를 위해 개별 소음원의 위치를 찾아내고 소음원의 음장 분포를 공간상의 영역으로 가시화하여 각 소음원의 기여량을 분석할 필요가 있다.

이와 더불어 함정의 능동 소나는 수중에서 음파를 이용하여 적의 위협 표적을 탐지, 추적, 식별하기 위한 중요한 기능을 갖고 있는데, 소나를 구성하는 소자 중 일부가 충격 또는 노후로 인해 정상적인 동작을 못 하는 결손 소자가 발생하면 소나의 출력이 정상치에 못 미치거나 소나의 빔 방향이 벗어나는 등 소나 성능이 저하될 수 있다. 따라서 소나의 개별 소자에 대한 음장 분포를 가시화함으로써 결손 소자 또는 성능이 저하된 소자를 찾아내어 소나 성능의 저하 요소를 차단할 필요가 있다.

근거리 음장 측정을 통한 음장 예측에는 두 가지로 분류할 수 있다. 원거리 조건을 만족하지 못 하는 경우에 근거리 영역에서 음장을 측정하여 원거리 영역에서의 음장을 예측하는 분야와 근거리 영역에서의 음장 측정으로부터 음원의 위치를 추정하는 분야이다.

첫 번째로 원거리 음장 예측 분야는 1956년 Pachner[10]가 무향실과 같은 작은 공간에서 측정된 음장으로부터 원거리에서의 지향 패턴(directivity pattern)을 구하기 위한 음장 계산 방법을 제안한 이후 원거리 음장 예측에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.

이후 1961년 Horton[11,12], 1962년 Baker의 DRL(Defence Research Laboratory)

방법[13,14] 등의 논문이 발표되면서 원거리에서의 음장 예측이 실현화되기 시작했다. Helmholtz 적분식을 이용한 DRL 방법은 자유 공간 Green 함수를 Helmholtz 적분식에 도입하고 음원 근처의 평면과 전파를 가정하여 근사화 함으로서 복소 음압만 측정하면 음장 예측이 가능하게 되었다. 그러나 이러한 가정 때문에 곡률 반경이 큰 원통형 음원(cylindrical sound source) 등의 적용 가능한 음원이 제한되고, 음원에 근접한 곳에서 근거리 음장을 측정해야 하는 제한 요소를 갖는다.

Trott[15-17]는 소나와 같은 크기가 큰 송수신기(transducer)의 근거리에서의 측정 자료로부터 원거리에서의 송/수신 감도와 빔 패턴(beam pattern)을 구하기 위해 Helmholtz 적분식 대신 송신기(projector)와 수신기(hydrophone) 간의 가역(reciprocity) 특성을 가정하여 원거리 음향 특성을 구하였으며, 근거리 음장 측정을 위한 평면 배열(Near Field Calibration Array; NFCA, Trott array 라고도 함)의 설계법을 제시하였다. 이 방법 또한 구형 전파, 평면 전파에 대한 가역 상수를 도입하여 대칭 음원에 제한되고, 가역 송수신기를 사용한 매우 큰 평면 배열을 구성해야 된다.

또한 Van Buren[18-20]은 Helmholtz 적분식에 근거한 NFCA 가역 원리를 이용하였으며, 음원의 회전에 의한 원통형 배열을 제안하였다. 이와 유사한 평면, 원통형 그리고 구형 등의 측정 배열을 구성하여 송수신기의 원거리 음장 예측을 위한 논문들[21-25]과 잠수함의 원거리 방사 소음을 예측하기 위한 논문[26]이 발표되었다. 기본 개념은 음원 면에서 소멸하는 Green 함수(Dirichlet 경계 조건[27])를 도입한 Helmholtz 적분식 또는 NFCA 가역 원리를 적용하고 있으며, 음원의 주파수와 크기에 따라 적용할 수 있는 측정 배열이 제한되기 때문에 측정 배열의 구성에 관련된 연구들이 진행되고 있다.

앞에서 소개한 연구들은 근거리 음장 측정을 위해 폐곡면의 가정이 가능한 대형의 수신 배열을 구성하여 3차원 음장을 측정하여야 하나, 이후 Buttler가 발표한 경계 배치법(Boundary Collocation Method)[28]은 Helmholtz 미분식을 만족하는 해를 유한 급수 전개식으로 구하고 폐곡선 상의 유한 지점에서 측정된 복소 음압으로부터 음원의 정보를 갖고 있는 특성 상수를 구해 원거리에서의 음장을 예측하는 방법으로, DRL 방법 등의 기존 해석 방법에 비해 접근 방법이 비교적 단순하며

특히 폐곡면이 아닌 폐곡선 상에서의 2차원 근거리 음장을 측정하므로 측정 지점의 수가 상대적으로 작아지는 장점이 있다.

두 번째로 수중 음원의 위치 추정법에는 빔 형성 방법(beamforming method)을 이용한 수신 신호 도래각 추정법, 다중 경로(multipath)를 갖는 수중 환경에서의 음파 전달 모델에 근거한 정합장 처리(matched field processing)[29,30]에 의한 방법, 음향 인텐시티(intensity) 방법[31,32] 그리고 근거리 음향 홀로그래피 방법(Near-field Acoustic Holography; NAH)[33-35] 등이 있다.

빔 형성 방법을 이용한 Bartlett 빔 형성기[36], Capon 방법[37] 그리고 MUSIC(Multiple Signal Classification) 방법[38] 등의 방향 탐지 알고리즘과 정합장 처리 기법은 원거리에서 수신된 신호로부터 음원의 위치를 추정하는 기법으로 수중 위협 표적의 추적을 위해 사용되고 있으나, 평면파 전파 모델을 근거로 하기 때문에 근거리 음장의 해석이 불가능하며 소음원의 음장 분포를 해석할 수가 없다.

그리고 음향 인텐시티법은 음원을 둘러싼 면에서의 인텐시티를 측정하는 방법으로 크기와 방향을 갖는 벡터량을 이용하므로 음파의 흐름을 가시적으로 표현할 수 있어 자동차 및 항공기 등과 같은 여러 가지 기계 요소들의 다양한 복합 구조물에서 발생하는 소음이나 이상음 등의 위치를 추정하여 제어하고 진단하는데 응용될 수 있으나, 측정 면에서 만의 인텐시티 정보를 보유하기 때문에 소음원의 위치를 추정할 뿐 음압, 입자 속도 등의 다른 음장 특성은 파악할 수 없는 문제점이 있으며[39], 수중에서는 크기만을 갖는 스칼라량인 음압을 사용하므로 적합하지 않다[40].

반면에 근거리 음향 홀로그래피 방법은 음원의 근거리 면에서 음압의 측정으로부터 음장의 모든 정보(음압, 입자 속도, 음향 인텐시티 등)를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 음원 근처에서만 존재하는 소멸파(evanescent wave)를 1960년대 중반에 발표된 음향 홀로그래피(acoustical holography)[41] 이론에 도입함으로써 음원이 존재하는 영역에서의 음장 해석이 가능하게 되었다.

근거리 음장을 이용한 음원의 위치를 추정하기 위한 연구는 홀로그래피를 이용하여 음향적으로 음원을 영상화하기 위해 1960년대 후반에 처음 시도[42,43]되었으며, 1980년 Williams 등[44,45]은 음향 홀로그래피 이론을 이용하여 저주파 음원의

재구성(reconstruction) 및 해상도 향상을 위한 연구를 수행하였다. Stepanishen 등 [46]은 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform; FFT)을 이용한 음장의 전 방향 전파(forward propagation)와 후 방향 전파(backward propagation)에 대한 논문에서 전 방향 전파로 원거리 음장의 예측과 후 방향 전파로 음원 영역의 음장 분포의 추정 가능성을 제시하였다.

음원 영역에서의 음장 분포를 구하기 위해서는 음원을 둘러싼 폐곡면 상에서의 음장 측정이 요구되며, 어떤 공간 영역에서 구한 음장으로부터 다른 영역에서의 음장 예측을 위한 방법들은 Helmholtz 적분식에 의해 구할 수 있다. 임의 지점에서 음장을 구하기 위해 Parrent[47]는 Helmholtz 적분식의 대체 형식을 수학적으로 유도하였으며, Ferris[48]는 근거리 영역에서 음원을 둘러싼 면에 걸쳐 측정된 상호 파워 스펙트럼(cross-power spectrum)으로부터 음장 예측에 대한 연구를 수행하였다. Shewell과 Wolf[49]는 음향 홀로그래피에 대한 기초를 마련함으로서 측정 면과 음원 사이의 다른 면에서의 음장 예측을 가능하게 하였다.

1984년 Maynard는 음향 홀로그래피 이론에 소멸파를 도입함으로써 근거리 음향 홀로그래피(NAH)라는 새로운 이론을 수립하여 평판 구조의 음원의 해석이 가능하게 되었으며, 원통형 구조의 음원을 해석하기 위한 GENAH(Generalized Nearfield Acoustical Holography)[50]가 발표되었다.

원거리 음장 예측을 위한 경계배치법은 2차원 근거리 음장 측정으로 측정 지점수가 감소되는 장점을 갖고 있으나, 측정 지점수에 대한 구체적인 기준이 제시되지 않고 있다. 따라서 측정 지점수에 대한 의존 함수를 분석하고 측정 지점수의 최적화를 통한 효율적인 예측 기법이 필요하다.

그리고 음원의 위치 추정을 위해서는 홀로그램 면에서 측정된 상호 파워 스펙트럼을 음압 분포로의 변환이 필요하며, 근거리 음향 홀로그래피 방법에서 역 방향 전파시 발생하는 오차를 분석하고 오차를 제거하기 위한 방법이 필요하다. 그리고 음원의 위치를 추정하기 위해 홀로그램 면의 위치는 매우 중요하나, 음원과 홀로그램 면과의 거리에 대한 기준은 음원에 근접해야 한다는 정도만 알려져 있어 이에 대한 구체적인 기준이 필요하다.

따라서 본 논문의 목적은 근거리 음장의 측정 지점수를 최적화하여 원거리 음장

의 효율적인 예측 방법의 구현과 음원 위치 추정시 발생하는 오차를 최소화하고 홀로그래프 면의 거리 조건을 제시하여 소음원의 음장을 효과적으로 가시화하는데 있다.

1.2. 본 연구의 구성 내용

근거리 음장을 이용한 원거리 음장 예측과 음원 위치 추정에 관한 본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다.

제 1장에서는 서론으로 본 연구의 총괄적인 문제를 제기하고 이에 대한 역사적인 배경과 본 연구의 필요성과 목적 그리고 구성 내용에 관하여 기술한다.

제 2장에서는 음장의 영역 구분을 설명하고 근거리 음장을 이용한 원거리 음장 예측을 위한 기존의 대표적인 이론과 본 논문에서 적용한 경계배치법에 대한 이론을 살펴본다. 경계배치법의 적용 가능성을 살펴보기 위해 형태가 다른 2가지 음원에 대한 수중에서의 실험을 수행하고 이에 대한 결과를 고찰한다. 그리고 측정 지점수에 대한 의존 함수를 분석하고 최적 측정 지점수에 대한 기준을 제시한다.

제 3장에서는 근거리 음장을 이용한 음원 위치 추정을 위한 이론을 살펴보고, 수치 모의 실험과 수중에서의 실험 결과 제시한다. 홀로그래프 평면에서의 상호 파워 스펙트럼으로부터 홀로그래프 면에서의 복소 음압 분포를 구하기 위한 비선형 방정식의 해를 구하는 방법을 제시하고, 홀로그래프 평면에서의 음장을 공간 변환하여 음원 영역의 이동된 면에서의 음장을 구하는 과정을 설명한다. 또한 역방향 전파시 발생하는 오차에 대한 분석과 이를 제거하기 위한 파수 공간 필터의 개념을 제안하고 제안된 파수 공간 필터의 적용 결과를 비교함으로써 본 논문의 내용을 검증하고, 모의 실험과 수중 실험의 결과로부터 음원과 홀로그래프 평면간의 거리에 대한 조건을 제시한다.

마지막으로 제 4장에서는 원거리 음장 예측과 음원 위치 추정에 대한 분석 결과를 종합하고 기대 효과를 제시한다.

제 2 장 근거리 음장 측정과 원거리 음장 예측

2.1. 음원 영역의 구분

음원에서 방사된 음파는 처음에는 평면파(plane wave)로 진행하다가 구형파(spherical wave)로 진행한다. 그림 1은 입자 속도가 균일한 원판형 음원에서의 음파가 방사될 때 평면파에서 구형파로의 변화를 보여준다. 이러한 음파가 변하는 구간의 경계에 따라 음원의 영역이 구분되는데, 평면파 전파 구간을 근거리 영역(nearfield or Fresnel region), 구형파 전파 구간을 원거리 영역(farfield or Fraunhofer region) 그리고 근거리 영역과 원거리 영역의 중간 영역을 천이 영역(transition region)으로 정의한다[51].

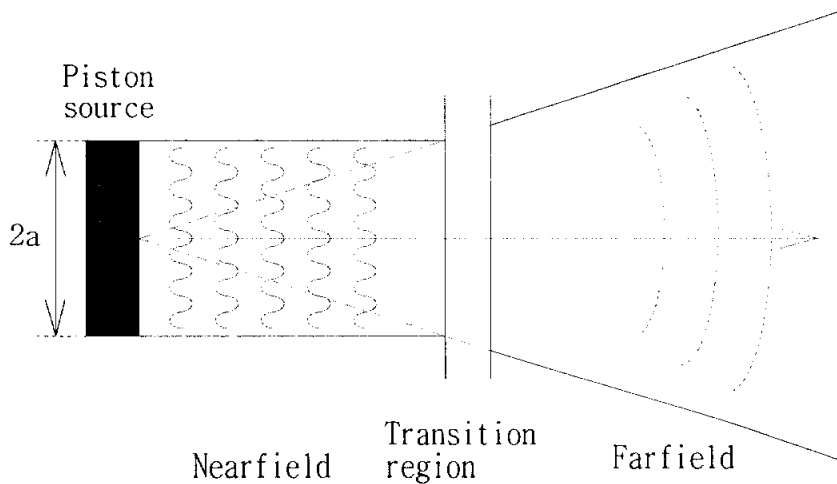


그림 1. 원판형 음원으로부터의 방사.

Figure 1. Radiation from a circular piston.

그림 2는 무한 배플 내에 있는 반경 a 의 원판형 음원의 구조와 좌표이다. 음원의 방사면에서의 음파의 입자 속도는 $U_0 \exp(j\omega t)$ 로 일정하다고 가정한다. 이때 음장 지점에서의 음압은 음원 면을 미소 면들(infinitesimal elements)으로 나눔으로서 구할 수 있다.

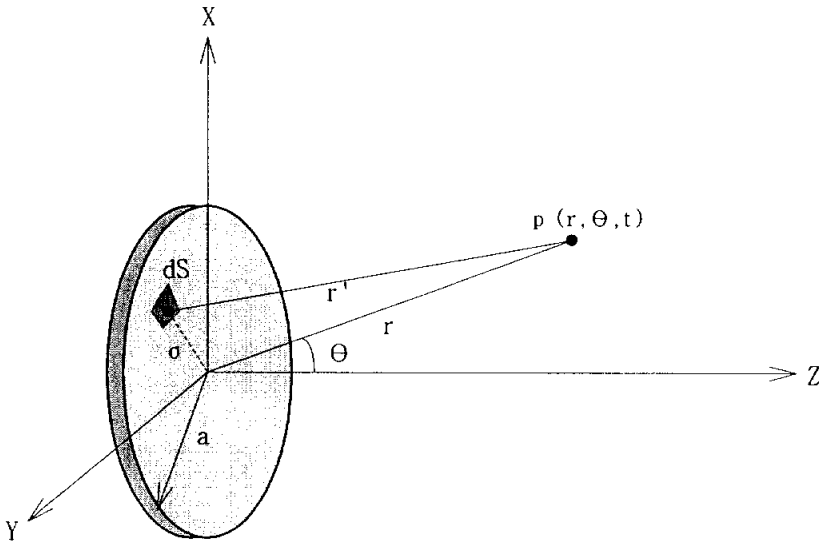


그림 2. 원판형 음원의 구조.

Figure 2. Geometry of a circular piston.

이러한 미소 면들은 음원으로 작용을 한다고 가정하고, 이때 방사된 총 음압은 다 음과 같이 방사면에 대한 면 적분으로부터 계산할 수 있다[8].

$$p(r, \theta, t) = jA k \int_S \frac{\exp[j(\omega t - kr')]}{r'} dS \quad (1)$$

여기서, r' ; 원판형 음원의 임의의 지점과 음장 지점 (r, θ) 간의 거리

$$(r' = \sqrt{\sigma^2 + r^2 - 2 \sigma r \cos(90 - \theta)})$$

A ; 음의 세기 상수 $\left(= \frac{\rho_0 c U_0}{2\pi} \right)$, U_0 ; 입자 속도의 진폭, ρ_0 ; 밀도, c ; 음속

$\theta = 0^\circ$ 인 음축(acoustic axis)에서의 축상 음압의 크기는 식 (1)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|p(r, 0)| = 4\pi A \left| \sin \left\{ \frac{1}{2} k [\sqrt{r^2 + a^2} - r] \right\} \right| \quad (2)$$

식 (2)에서 $(r^2 + a^2)^{1/2}$ 을 무한수열로 이항 전개하고, 이항 전개된 식에서 2번째 항이 3번째 항 보다 대단히 클 경우, 즉

$$\frac{a^2}{2r} \gg \frac{a^4}{8r^3} \quad \text{또는} \quad \frac{a}{r} \ll 2 \quad (3)$$

$$(r^2 + a^2)^{1/2} \simeq r + \frac{a^2}{2r} \quad (4)$$

인 경우, 식 (2)의 축상 음압은 다음과 같다.

$$|p(r, 0)| = 4\pi A \left| \sin \left(\frac{\pi a^2}{2\lambda r} \right) \right| \quad (5)$$

식 (5)에서 $\sin$ 항의 값이 1 보다 매우 작을 경우, 즉

$$\frac{\pi a^2}{2\lambda r} \ll 1 \quad \text{또는} \quad r \gg \frac{\pi a^2}{2\lambda} \quad (6)$$

인 경우, $\sin \alpha \simeq \alpha$ 이므로 식 (5)는 다음의 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$|p(r,0)| \simeq 2\pi^2 A \frac{a^2}{\lambda r} \quad (7)$$

식 (7)은 원거리 영역의 r 지점에서의 음압의 크기를 나타낸 계산식이며, 원거리 영역에서의 음압의 크기는 거리 r 에 반비례하고 있다.

식 (4)와 식 (7)의 근사화 함으로서 발생하는 오차는 식 (8)과 식 (9)의 오차를 dB로 나타낸 식들로부터 그림 3과 그림 4와 같다.

$$Error\ 1\ (dB) = 20 \log \frac{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^2}{\left[1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (8)$$

$$Error\ 2\ (dB) = 20 \log \frac{\frac{\pi a^2}{2\lambda r}}{\sin \frac{\pi a^2}{2\lambda r}} \quad (9)$$

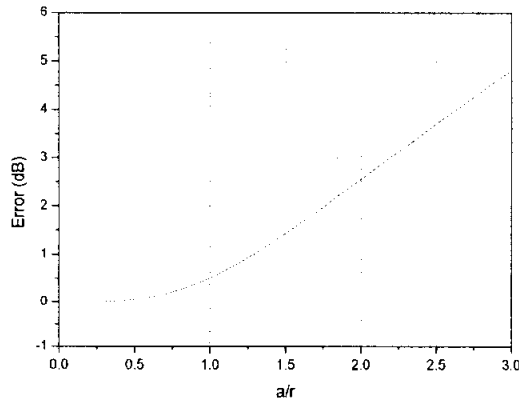


그림 3. $(r^2 + a^2)^{1/2}$ 의 이항 전개에서 처음 2항만 사용시의 오차.

Figure 3. Error in using only the first two terms in the binomial expansion of

$$(r^2 + a^2)^{1/2}.$$

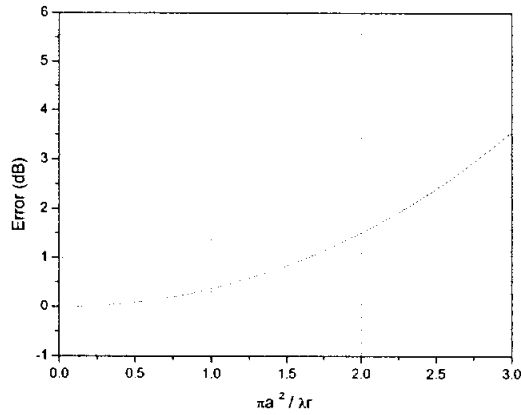


그림 4. $\sin(\pi a^2/2\lambda r) \simeq \pi a^2/2\lambda r$ 의 근사식에서의 오차.

Figure 4. Error in the approximate equation of

$$\sin(\pi a^2/2\lambda r) \simeq \pi a^2/2\lambda r.$$

그림 3에서 $a/r = 0.2$ 일 때 오차는 0.002 dB, $a/r = 0.5$ 일 때 오차는 0.054 dB 그리고 $a/r = 1$ 일 때 오차는 0.512 dB 이며, 그림 4에서 $\frac{\pi a^2}{\lambda r} = 0.2$ 일 때 오차는 0.015 dB, $\frac{\pi a^2}{\lambda r} = 0.5$ 일 때 오차는 0.091 dB 그리고 $\frac{\pi a^2}{\lambda r} = 1$ 일 때 오차는 0.365 dB 로서, r 이 a 보다 크거나 $\frac{\pi a^2}{\lambda}$ 보다 클 때 오차는 영으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 오차가 0.5 dB 이하일 때를 원거리 조건의 기준 거리 r_f 로 정의하면, 그림 3과 그림 4에서의 결과와 식 (3)과 식 (6)의 조건들로부터 r_f 는 다음과 같이 식 (10)과 식 (11)을 만족해야 한다[2].

$$r_f \geq a \tag{10}$$

$$r_f \geq \frac{\pi a^2}{\lambda} = \frac{\pi a^2}{c} f \tag{11}$$

식 (11)에서 πa^2 은 원판형 음원의 방사면에 대한 단면적이 되며, 원거리 조건은 음원의 크기와 주파수에 비례함을 알 수 있다. 따라서 모든 음원에 적용할 수 있는 일반적인 원거리 조건의 기준 거리 r_f 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_f \geq L \quad (12)$$

$$r_f \geq \frac{L^2}{\lambda} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)에서 L 은 음원의 최장 크기가 된다. 음원의 중심과 음원의 가상 자리로부터 L^2/λ 의 거리까지의 경로 차는 대략 $\lambda/8$ 가 되며, 따라서 식 (13)은 음원을 구성하는 모든 지점에서 r_f 에 도달하는 위상이 동일한 위상 기준 조건이 되고, 거리 r 이 $2L$ 보다 클 때 음축 상의 음압의 크기는 $1/r$ 로 감소하기 때문에 식 (12)는 크기 기준 조건이 된다[52]. 음축을 벗어난 지향(directionality) 특성 측정의 경우에는 $10L$ 보다 커야 한다[53].

수중 청음기(hydrophone)의 크기가 작지 않은 경우에는 크기 기준 조건의 r_f 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$r_f > \frac{L_1^2 + L_2^2}{\lambda} \quad (14)$$

여기서, L_1 ; 음원의 최장 크기, L_2 ; 수중 청음기의 최장 크기

근거리 영역에서는 평면파 전파 구간으로서 음압 준위의 최대 크기는 변하지 않으며, 식 (2)에서 보는 바와 같이 원판형 음원의 음압 준위 크기는 거리의 증가에 따라 0에서 최대 $4\pi A$ 사이에서 요동(fluctuation)함을 알 수 있다. 이때 음압 크기의 최대값과 최소값은 다음 식을 만족하는 거리 r 에서 발생한다.

$$\frac{1}{2} k [\sqrt{r^2 + a^2} - r] = m \frac{\pi}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

식 (15)에서 m 이 홀수 일 때 최대가 되고, m 이 짝수일 때 최소가 된다. $m = 1$ 일 때 첫 번째 최대값을 갖는 거리가 되며, 이때의 r_1 은 다음과 같다.

$$r_1 = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} > 0 \quad (16)$$

$$a > \frac{\lambda}{2} \quad (17)$$

따라서 근거리 영역은 원판형 음원의 반경이 반 파장 보다 클 때 발생함을 알 수 있다.

그림 5는 주파수 $f = 10$ kHz, 음원의 반경 $a = 1$ m 그리고 음속 $c = 1500$ m/s로 가정한 원판형 음원의 거리에 따른 음압 준위로서, 그림 5에서 실선은 식 (2)의 산출 결과이고 점선은 식 (7)의 원거리 영역에서의 근사식의 산출 결과이다.

이 경우, 원거리 조건의 기준 거리 $r_f (= \frac{\pi a^2}{\lambda})$ 는 20.9 m 로서 원거리 영역에서의 음압 준위는 거리에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 일반적인 음장 측정은 음원 전방 1 m 인 기준 거리로의 음압 준위의 보상이 가능한 원거리 영역에서 이루어지고 있다. 그러나 그림 5에서 보는 바와 같이 근거리 영역에서의 음압 준위는 규칙성이 없고 거리에 따라 크기가 요동이 심하게 나타나고 있다. 이러한 근거리 영역에서의 음장 측정은 거리에 따른 보상이 불가능하기 때문에 기준 거리에서의 음압 준위를 예측할 수가 없음을 알 수 있다.

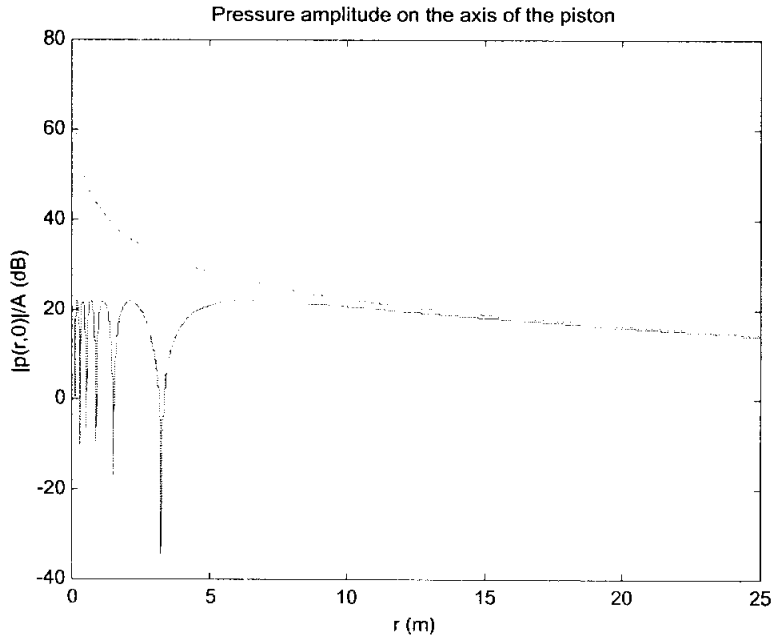


그림 5. 원판형 음원의 거리에 따른 음압 준위 ($f = 10$ kHz, $a = 1$ m, $c = 1500$ m/s) (실선; 식 (2)의 결과, 점선; 식 (7)의 결과).

Figure 5. Sound pressure level of a circular piston sound source with respect to distance ($f = 10$ kHz, $a = 1$ m and $c = 1500$ m/s) (solid line; result of Eq. (2), dot line; result of Eq. (7)).

2.2. Helmholtz 적분식을 이용한 예측법

근거리 음장 측정으로부터 원거리 음장의 예측 방법 중 대표적인 방법으로는 DRL(Defence Research Laboratory) 예측 방법[10-14]이 있으며, 이것은 Helmholtz 적분식에 근간을 이룬다.

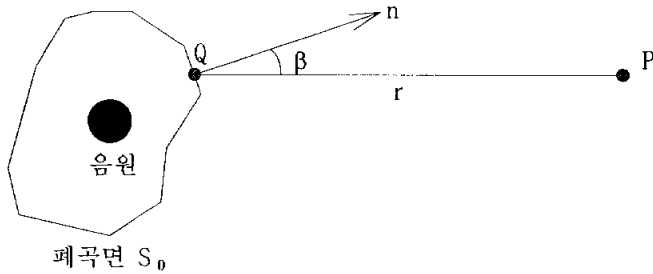


그림 6. DRL 예측법에 대한 구조.

Figure 6. Geometry for DRL method.

그림 6과 같이 음원이 폐곡면 S_0 내에 존재할 때, S_0 면 외부의 음장 지점인 P 점에서의 음압은 폐곡면 S_0 상에서 측정된 음압으로부터 구할 수 있으며, 식 (18)의 파동 방정식 (Helmholtz 식)[54]에 대한 음압 p 에 대한 해는 폐곡면 S_0 상의 면적분 형태로 식 (19)와 같다. 그림에서 n 은 S_0 면상의 측정 지점에 대한 법선 방향이고 r 은 Q 지점에서 P 지점까지의 거리, β 는 직선 $\overline{PQ}$ 와 법선 방향 n 과의 방위각이다.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (18)$$

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \left\{ p(Q) \frac{\partial}{\partial n} g(r) - g(r) \frac{\partial p(Q)}{\partial n} \right\} dS_0 \quad (19)$$

식 (18)과 식 (19)에서, ∇^2 은 Laplacian 연산자($= \nabla \cdot \nabla$), k 는 파수(wave number), $p(Q)$ 는 음원을 둘러싼 폐곡면 상의 Q 지점에서의 복소 음압 그리고 $p(P)$ 는 구하고자 하는 원거리 음장 지점 P 에서의 복소 음압이 된다. 그리고 $g(r)$ 은 자유 공간에서의 Green 함수(free space Green's function)로서 다음과 같다.

$$g(r) = \frac{\exp(jkr)}{r} \quad (20)$$

따라서 식 (19)는 다음과 같이 전개된다.

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \int_s \left\{ p(Q) \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\exp(jkr)}{r} \right] - \left[\frac{\exp(jkr)}{r} \right] \frac{\partial p(Q)}{\partial n} \right\} dS_0 \quad (21)$$

식 (21)의 Helmholtz 적분식에서 보는 바와 같이, 근거리 복소 음압의 측정으로부터 원거리에서의 복소 음압을 계산하기 위해서는 음원에 대한 경계 조건을 구해야 하며, 이를 위해 음원을 둘러싼 모든 폐곡면 상에서의 근거리 복소 음압을 측정해야 한다. 그러나 음압의 법선 방향의 기울기 성분($\partial p(Q)/\partial n$)인 가속도(또는 입자 속도) 까지 측정해야 함으로 현실적으로 어려움이 많다. 공간상의 해상도가 좋은 가속도 측정을 위해서는 크기가 작은 가속도 센서(pressure-gradient hydrophone)을 사용해야 하나 일반적으로 가속도 센서의 크기는 5 ~ 13 cm 정도 된다. 따라서 음원 주위의 폐곡면 상의 지점에서 가속도의 정확한 측정은 어렵다.

이러한 가속도 측정을 피하기 위해, 음원 근처의 평면파 전파를 가정하여 근사화하면 복소 음압의 측정만으로 원거리에서의 복소 음압의 계산이 가능하다. 음원의 곡면이 커서 음원 근처에서는 평면파 전파로 가정한다면, 음압의 기울기 성분은 다음과 같이 근사화 할 수 있다[55,56].

$$\frac{\partial p(Q)}{\partial n} \simeq j k p(Q) \quad (22)$$

식 (22)의 가정은 음압의 변화가 급격하지 않은 곡면을 갖는 음원에 대해 유용하다(원통형 음원의 경우, 음원의 직경이 5λ 이상).

두 번째 가정은 r 이 매우 큰 경우이다. 실제로 계산하고자 하는 음장 지점은 원거리에 있기 때문에 이 가정은 유용하다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\exp(jkr)}{r} \right] &\simeq \frac{jk}{r} \exp(jkr) \frac{\partial r}{\partial n} \\ &= -j \frac{k \exp(jkr)}{r} \cos \beta \end{aligned} \quad (23)$$

따라서 식 (22)와 식 (23)으로부터 식 (29)의 Helmholtz 적분식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(P) = \frac{-jk}{4\pi r} \int_s (1 + \cos \beta) \exp(jkr) p(Q) ds_0 \quad (24)$$

식 (24)에서 거리 r 과 파수 k 는 알고 있는 값이고 따라서 음원을 둘러싼 폐곡면 상에서 복소 음압 $p(Q)$ 를 측정하면 음장 지점에서의 복소 음압 $p(P)$ 를 계산할 수 있음을 알 수 있다.

음압의 크기가 무시될 정도로 작은 곳에서는 음압의 측정이 필요 없으므로 실제의 측정에서는 완전한 폐곡면을 이루지 않아도 된다. 그리고 음향 수신기에 의한 음향 간섭을 무시하기 위해서는 음향 수신기의 크기는 0.1λ 보다 작아야 하고, 연속적인 측정 면을 가정하기 위해서는 측정 면에서의 측정 지점 간격은 0.8λ 보다 작아야 하며[52], 측정 간격이 좁을수록 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

일반적으로 음원 추상의 2차원 음장이 요구되는 경우에도 폐곡면 상의 3차원 음

장을 측정해야 하며, 측정면이 완전한 폐곡면은 아니더라도 정확한 결과를 얻기 위해서는 측정 지점수가 많아야 한다. 그리고 곡면이 큰 원통형 음원 등의 적용 가능한 음원이 제한되고, 가능한 음원에 근접한 곳에서 근거리 음장을 측정해야 하는 제한 요소를 갖는다.

2.3. 경계배치법

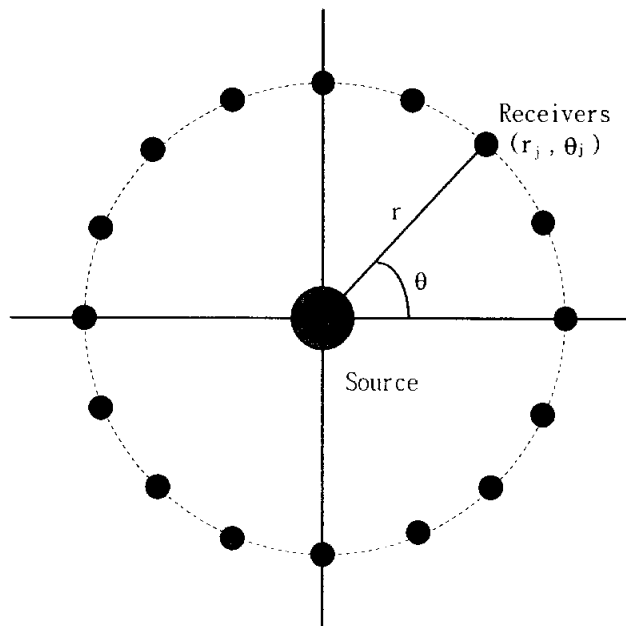


그림 7. 경계배치법에 의한 근거리 음장 측정.

Figure 7. Measurement of the nearfield sound pressure by Boundary Collocation Method.

경계배치법은 음원 주변 폐곡선 상의 근거리 영역에서 복소 음압에 대한 음장의 측정으로부터 원거리 영역에서의 음장을 예측하는 방법으로서 근거리의 음장 분포 측정값을 사용하여 파동방정식을 만족하는 음원 고유의 특성 상수를 산출하고, 산

출된 특성 상수로부터 음장을 예측한다.

DRL 예측법과의 가장 큰 차이는 음원을 둘러싼 폐곡면 상의 3차원 근거리 음장 측정이 아니라, 그림 7과 같이 음원을 둘러싼 폐곡선 상의 2차원 근거리 음장 측정으로 원거리 영역에서의 음장 예측이 가능하여 측정 지점수가 크게 감소되는 점에 있다.

파동방정식인 식 (18)의 Helmholtz 식의 음압 p 에 대한 극좌표 형식의 해는 다음과 같다.

$$p(r, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} b_m h_m(kr) P_m(\cos \theta) \quad (25)$$

실제 측정에서 측정 지점 수는 무한할 수 없고, 그림 7에서와 같이 음원을 둘러싼 측정 지점 수가 N 개인 유한개 지점에서 근거리 음장을 측정할 때 식 (25)는 다음과 같이 전개된다.

$$p(r_j, \theta_j) = \sum_{m=0}^{N-1} b_m h_m(kr_j) P_m(\cos \theta_j) \quad (26)$$

여기서,

$$j = 1, 2, \dots, N$$

$p(r_j, \theta_j)$; 음원에서 측정 지점까지의 거리 r_j 와 방위각 θ_j 지점에서의 복소 음압

b_m ; 음원의 특성을 나타내는 m 개의 특성 상수

$h_m(kr_j)$; kr_j 값을 갖는 Spherical Hankel 함수, $j_m(kr_j) + y_m(kr_j)$,

k ; 파수 ($= 2\pi f / c$, f ; 주파수, c ; 음속)

$P_m(\cos \theta_j)$; $\cos \theta_j$ 값을 갖는 m 차의 Legendre 다항식

식 (26)에서 복소 음압 $p(r_j, \theta_j)$ 는 근거리 영역에서 실제 음장 측정으로부터 구할 수 있고, $h_m(kr_j)$ 과 $P_m(\cos \theta_j)$ 는 주파수, 거리 그리고 방위각에 대한 위치 정보로부터 구할 수 있으므로 미지수인 음원의 특성 상수 b_m 을 구할 수 있다. 여기서 Spherical Hankel 함수와 Legendre 다항식의 계산은 참고문헌 [57]의 계산 결과와 일치함을 확인하였다. b_m 을 구하기 위해 식 (26)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_{N \times 1} = \mathbf{b}_{N \times 1} \mathbf{A}_{N \times N} \quad (27)$$

여기서, $\mathbf{p}_{N \times 1}$; 측정 음압 $p(r_j, \theta_j)$ 에 대한 $N \times 1$ 행렬

$\mathbf{b}_{N \times 1}$; 특성 상수 b_m 에 대한 $N \times 1$ 행렬

$\mathbf{A}_{N \times N}$; $A_{jm} = h_m(k r_j) P_m(\cos \theta_j)$ 의 요소를 갖는

$N \times N$ 의 정방행렬(square matrix),

$j=1, 2, \dots, N, m=0, 1, \dots, N-1$

따라서 식 (27)에서의 행렬 $\mathbf{b}_{N \times 1}$ 는 $\mathbf{A}_{N \times N}$ 의 역행렬로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{b}_{N \times 1} = \mathbf{A}_{N \times N}^{-1} \mathbf{p}_{N \times 1} \quad (28)$$

식 (28)에서 구한 음원의 특성 상수 b_m 으로부터 원거리에서의 음장은 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 r_{fj} 와 θ_{fj} 는 음원의 중심에서 원거리 영역에서의 음장 지점에 대한 거리와 방위각이다.

$$p(r_{fj}, \theta_{fj}) = \sum_{m=0}^{N-1} b_m h_m(kr_{fj}) P_m(\cos \theta_{fj}) \quad (29)$$

2.3.1. 수중 실험 및 결과 고찰

음원을 둘러싼 근거리 영역에서 음장을 측정하기 위해 방위조절기(rotator)를 이용하여 음원을 회전시켰으며, 이때의 회전 방위각 및 거리를 측정하고 방위각에서의 복소 음압을 측정하였다. 그림 8은 근거리 음장을 측정하기 위한 측정 시스템의 구성도이다. 음향 수조의 벽면, 바닥 그리고 수면에서의 반사파 영향을 제거하기 위해 톤 버스트(tone burst) 신호에 의한 펄스 기법을 사용하였으며, 복소 음압의 측정을 위해 수신된 신호를 FFT 처리하여 음압의 크기와 위상을 측정하였다. 그리고 근거리 음장의 측정을 위한 수신기의 위치는 음원 전면의 0° 에서 180° 사이의 등 간격 지점으로 설정하였다. 음원에서 발생된 신호를 모든 방위에서 동시에 측정하여야 하나, 이를 위해서는 수신기의 수량이 많아야 하는 현실적인 제약 요소가 많이 수반된다. 그러나 음원에서 발생된 신호는 시간에 따른 변화가 없기 때문에 수신기는 한 지점에 고정하고 음원을 회전시키므로써 수신기들이 배열된 상태와 동일한 효과를 얻을 수 있다. 그림 9는 길이 18 m, 폭 10 m 그리고 깊이 10 m의 음향 수조이고 그림 10은 측정 시스템이다.

그리고 본 논문에서 적용한 측정 대상 음원은 B&K 8103 3개를 배열한 선배열 음원과 원추형(line-in-cone) 음원인 ITC 5003을 대상으로 하였다(그림 11, 그림 12 참조). 실험에서 사용한 원추형 음원은 원추형 배플 내에 원주 모드의 유한한 길이의 원통형 진동체가 적층된 선배열 음원으로 구성되어 있으며, 선배열 음원에서 발생된 음파는 원추형의 배플에서 반사되어 전면으로 방사되는 음원의 특성을 갖고 있다. 여기서 원추 하단의 원의 크기가 음원의 구경(aperture size)이 된다.

실험에 사용된 주파수 및 음장 측정 거리 등에 대한 측정 정보는 표 1과 같다. 표 1에서 kL 계산에 사용한 수중에서의 음속은 1,500 m/s를 가정하였다.

표 1. 측정 대상 음원 및 측정 변수 값.

Table 1. Sound sources and value of parameters used in measurement.

음원 형태	주파수 (kHz)	음원의 크기 L (cm)	kL	측정 거리 (m)		원거리 조건 (m)
				근거리	원거리	
선배열	5	59	12.4	0.5	4.8	1.2
원추형	60	30	75.4	1.0	12.0	3.7

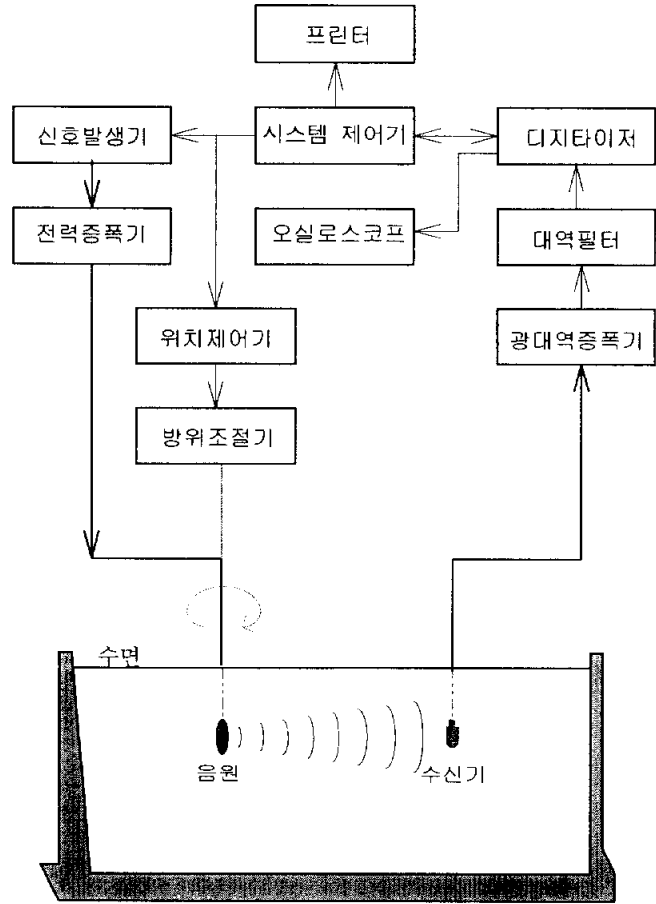


그림 8. 근거리 음장 측정 구성도.

Figure 8. Schematic diagram for the measurement of near-field sound pressure.

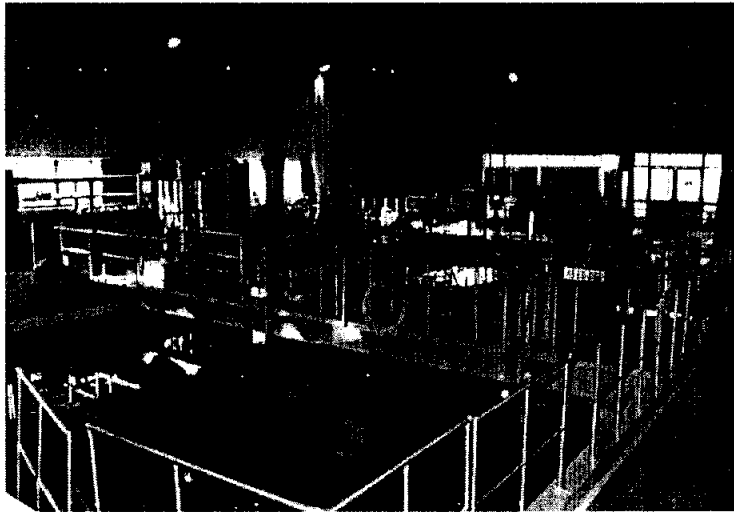


그림 9. 음향 수조.

Figure 9. Acoustic water tank.

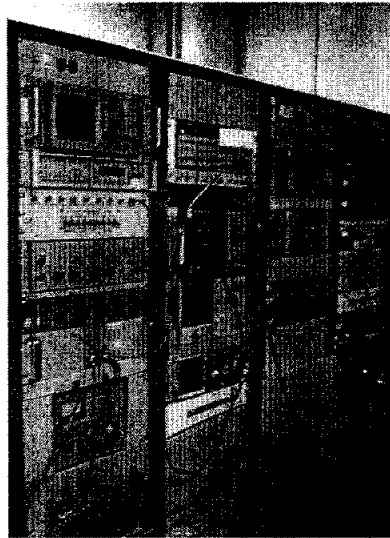


그림 10. 음향 측정 시스템.

Figure 10. Acoustic test facility system.

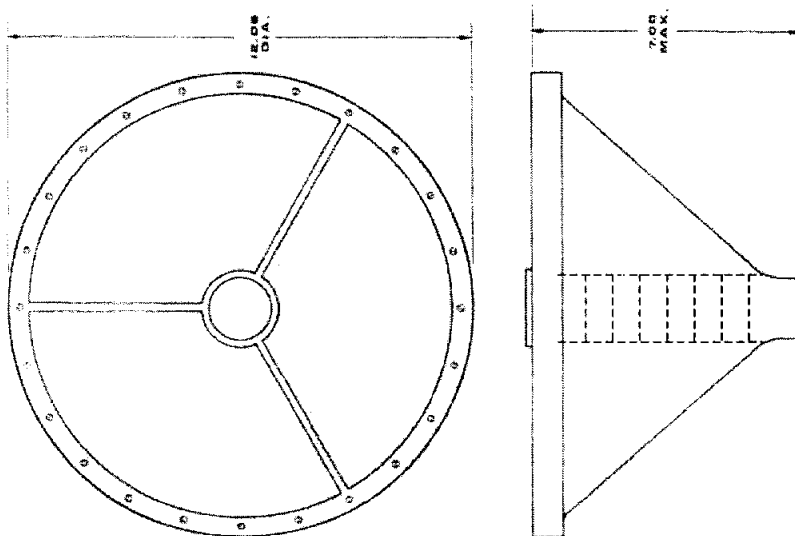
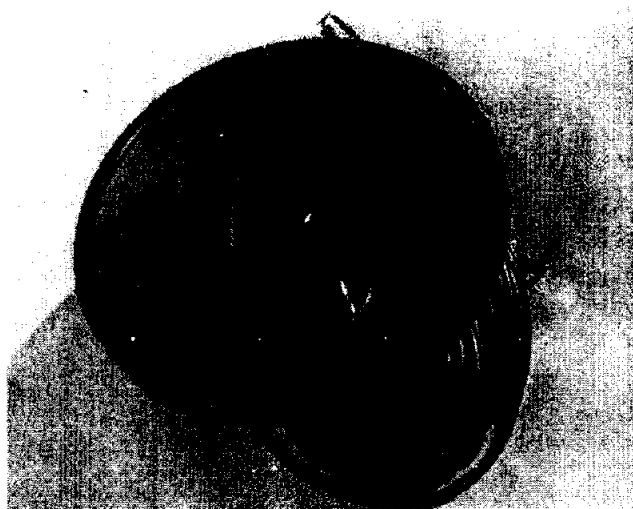


그림 11. 원추형 음원(ITC 5003).

Figure 11. Line-in-cone type sound source(ITC 5003).

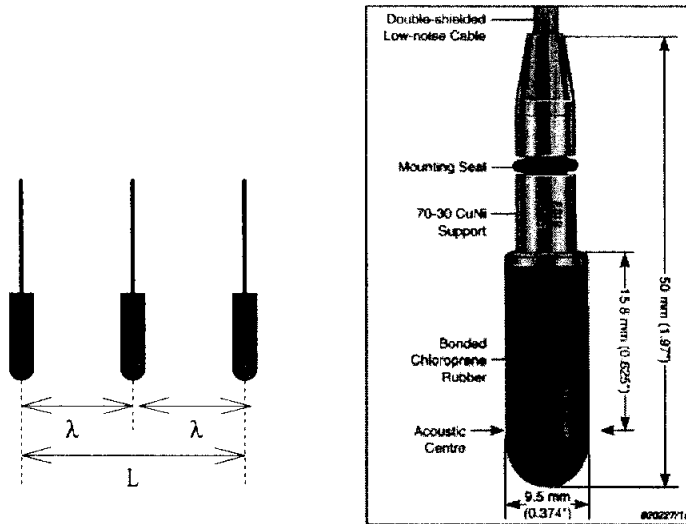


그림 12. B&K 8103 3개로 구성된 선배열 음원.

Figure 12. Line array sound source with 3 B&K 8103s.

1) 측정 결과 및 예측 결과 비교

(1) 선배열 음원

그림 13은 선배열 음원에 대한 근거리 0.5 m에서와 원거리 4.8 m에서의 음압에 대한 수중에서의 음장 분포 측정 결과이며, 그림에서 가운데 작은 원 3개는 선배열 음원의 위치를 표시한다. 그리고 그림 14는 음장 분포 측정 및 예측 결과의 비교로서 그림 13의 근거리 0.5 m에서 측정한 자료로부터 식 (28)과 식 (29)를 사용하여 원거리 4.8 m에서의 음장 분포를 예측한 결과로서 대칭이므로 $0^\circ \sim 180^\circ$ 의 결과만 기록하였다. 원거리 음장 측정 결과와 원거리 음장의 예측 결과를 비교하면 주엽(main lobe, 그림에서 90° 방위의 빔)에서 0.01 dB 그리고 부엽(side lobe, 0° , 60° , 120° , 180°)에서는 최대 0.47 dB의 차이로 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

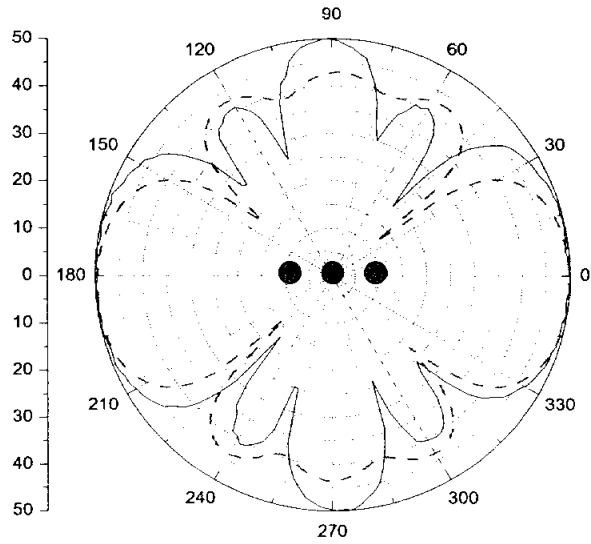


그림 13. 선배열 음원에 대한 수중에서의 음장 측정 결과 비교(실선; 원거리, 점선; 근거리).

Figure 13. Comparison of the measuring result on acoustic field in case of the line array sound source in water(solid line; far-field, dot line; near-field).

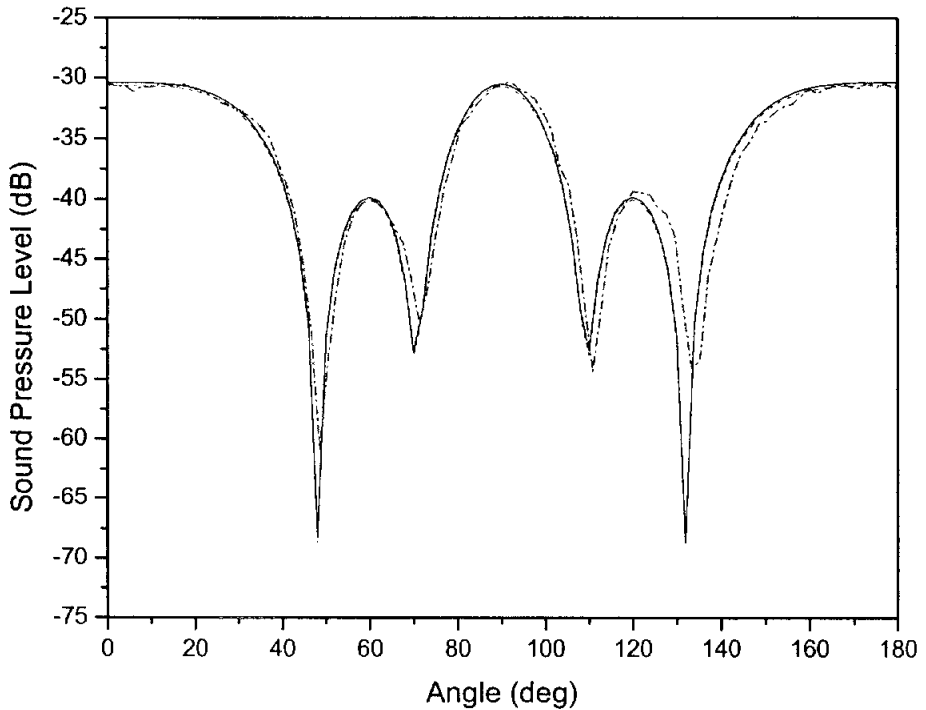


그림 14. 선배열 음원의 음장 분포 예측 결과 비교(실선; 근거리 측정 → 원거리 예측, 일점쇄선; 원거리 측정, 점선; 원거리 계산).

Figure 14. Comparison of the estimated acoustic field in case of the line array sound source(solid line; farfield estimation from nearfield measurement, red dot line; measurement in farfield, dash dot line; farfield calculation).

또한 원거리에서의 예측 결과는 원거리에서의 계산 결과와도 정확히 일치하고 있으며(주엽에서 0.21 dB 차이), 예측 결과의 정확도는 근거리 음장 측정시 측정 지점수에 따라 좌우되므로 측정 지점수의 변화에 따른 예측 결과를 살펴보면 그림 15와 같다. 측정 지점수는 7개, 13개 그리고 25개로 하였으며, 그림에서 점선은 측정 지점수가 7개인 경우의 예측 결과이다. 13개와 25개 지점에서 측정에 의한 예측

결과는 완전히 일치하여 그림에서 구분할 수가 없다. 그리고 측정 지점수가 7개인 경우에는 0° 와 180° 근방에서 오차가 발생하고 있다.

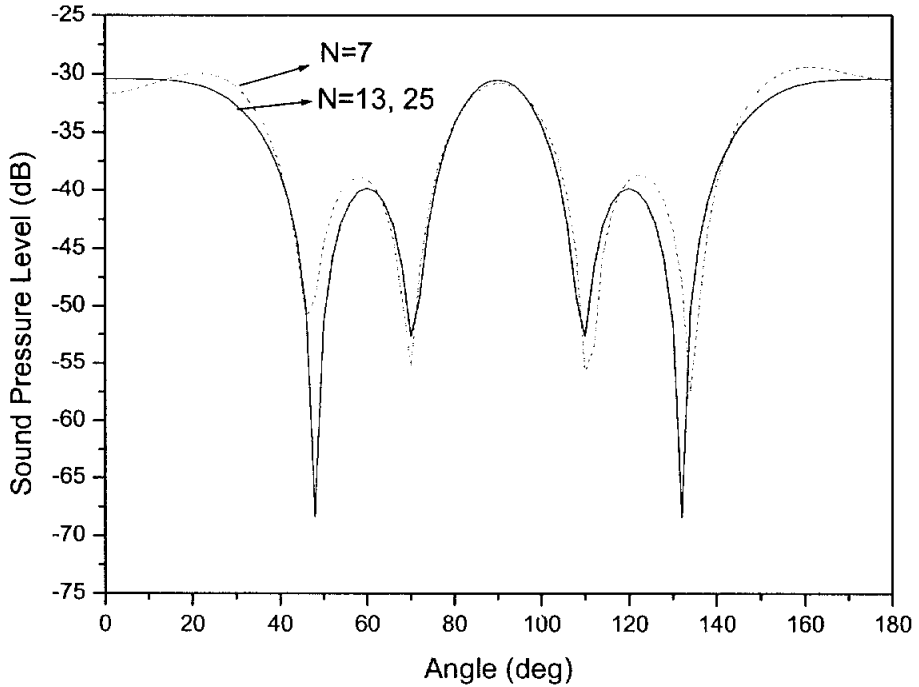


그림 15. 측정 지점수에 따른 예측 결과 비교(선배열 음원).

Figure 15. Comparison of the estimated far-field results with respect to number of measuring points(line array sound source).

측정 지점수에 따른 예측 결과의 차이는 음원의 특성 상수 b_m 을 비교함으로써 분석할 수 있다. 그림 16은 측정 지점수에 따른 음원의 특성 상수 b_m 에 대한 것으로 m 이 증가하면서 b_m 의 크기는 크게 변하다가 서서히 크기가 감소하여 0으

로 수렴하고 있다. 여기서 b_m 은 근거리 음장을 측정된 후 식 (28)로부터 구한 값이며, m 은 0에서 $N-1$ 의 값을 갖는 측정 지점수에 관련된 상수이다. b_m 의 크기가 0일 때 음압의 크기가 변화가 없음을 식 (29)로부터 알 수 있다. 따라서 측정 지점수는 b_m 의 크기가 0으로 수렴되어 계속 일정한 값을 갖는 범위까지 포함하여야 정확한 음장의 예측이 가능함을 알 수 있다. 그림 16에서, m 이 13 이상에서는 b_m 의 값이 0으로 일정하게 된다. 측정 지점수가 13개와 25개인 경우에는 b_m 의 값이 0으로 수렴되는 범위를 포함하여 정확한 예측이 가능하였으나, 측정 지점수가 7개인 경우에는 0으로 수렴하지 못 해 음장 예측에 오차를 갖는 원인이 되었다. 이는 m 이 13 이상에서의 b_m 은 음장 예측에 영향을 주지 못하고 있으며, 정확한 음장 예측을 위한 최적 측정 지점수가 존재함을 알 수 있다.

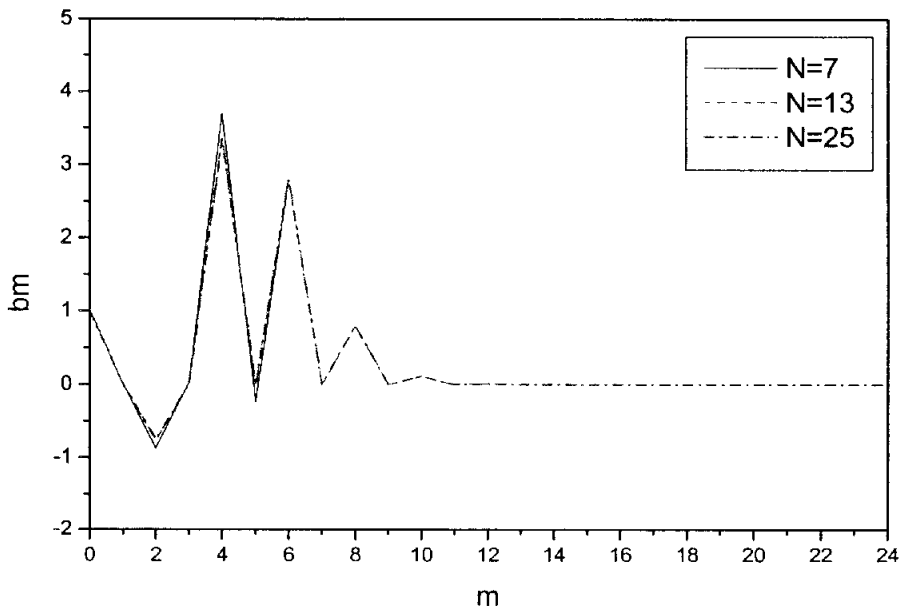


그림 16. 측정 지점수에 따른 b_m 의 비교(선배열 음원).

Figure 16. Comparison of b_m for the number of measuring points(line array sound source).

(2) 원추형 음원

그림 17은 원추형 음원에 대한 근거리 1 m에서와 원거리 12 m에서의 음압에 대한 수중에서의 음장 분포 측정 결과이고 그림 18은 음장 분포 측정 및 예측 결과의 비교로서 그림 17의 근거리 1 m에서 측정한 자료로부터 식 (28)과 식 (29)를 사용하여 원거리 12 m에서의 음장 분포를 예측한 결과로서 $0^\circ \sim 180^\circ$ 의 결과만 기록하였다. 원거리 음장 측정 결과와 원거리 음장의 예측 결과를 비교하면 주엽(그림에서 90° 방위의 빔)에서 3 dB 그리고 부엽(82° , 98°)에서는 1 ~ 2 dB의 차이를 보이고 있다. 원추형 음원의 음장 분포 형태가 복잡하여 선배열 음원의 경우보다는 차이가 있지만, 전반적인 경향은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 19는 측정 지점수의 변화에 따른 비교로서, 측정 지점수는 46개, 76개 그리고 93개로 하였다. 측정 지점수가 46개와 76개의 경우에는 180° 근방에서 예기치 않는 부엽이 크게 발생하고 있으나, 측정 지점수가 증가하여 93개에서 일치하기 시작한다.

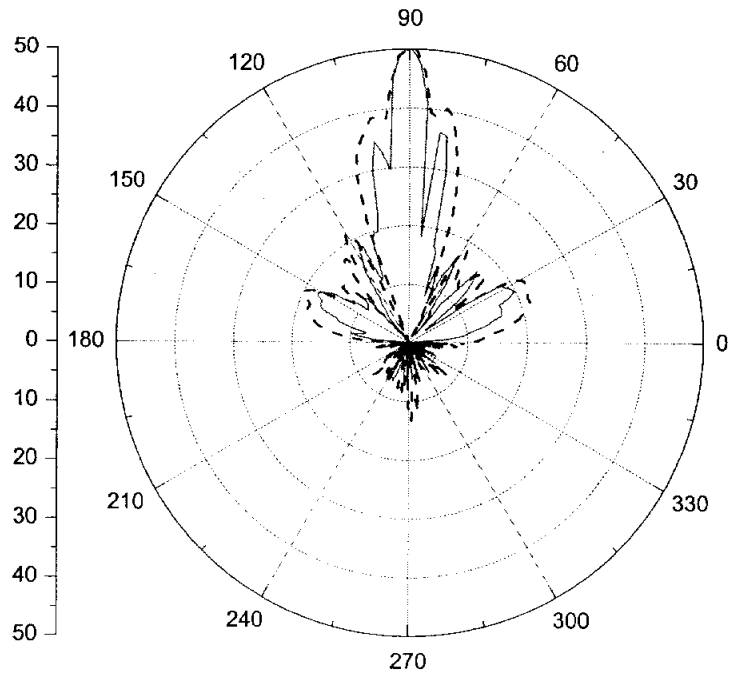


그림 17. 원추형 음원에 대한 수중에서의 음장 측정 결과 비교(실선; 원거리, 점선; 근거리).

Figure 17. Comparison of the measuring result on acoustic field in case of the line-in-cone type sound source in water(solid line; far-field, dot line; near-field).

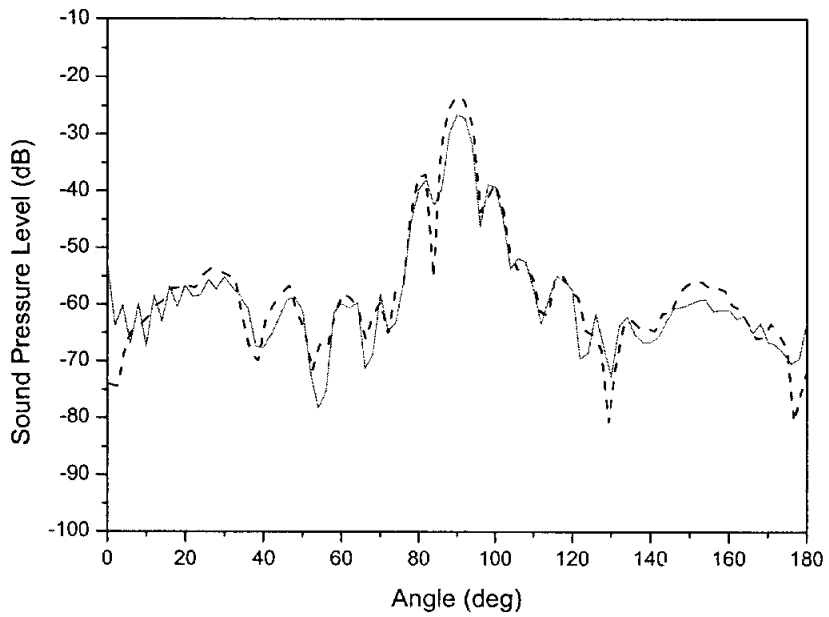


그림 18. 원추형 음원의 음장 분포 예측 결과 비교(실선; 예측, 점선; 측정).

Figure 18. Comparison of the estimated acoustic field in case of the line-in-cone type sound source(solid; estimation, dot; measurement).

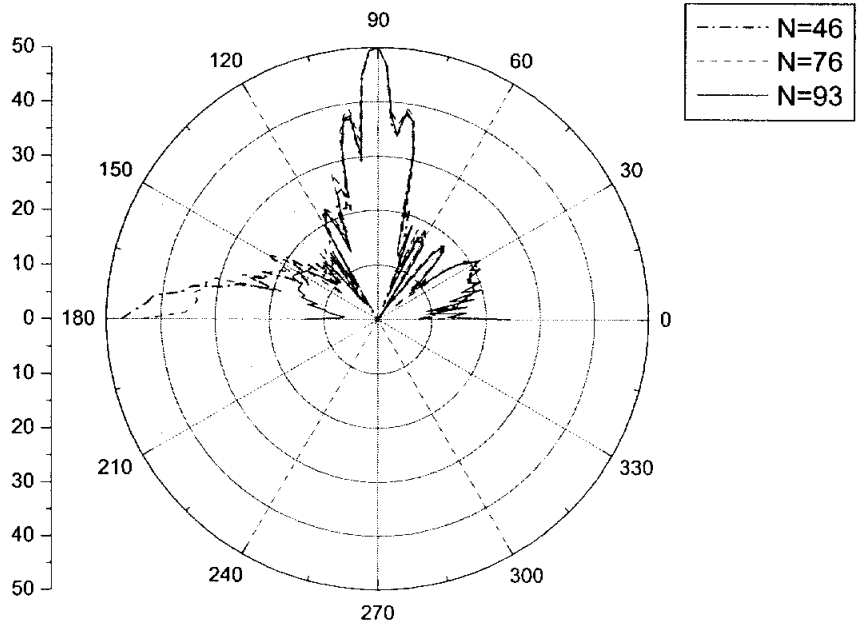


그림 19. 측정 지점수에 따른 예측 결과 비교(원추형 음원).

Figure 19. Comparison of the estimated results for the number of measuring points(line-in-cone type sound source).

그리고 그림 20은 측정 지점수에 따른 b_m 의 비교로서 측정 지점수를 음원의 특성 상수인 b_m 에 대해 살펴보면 선배열 경우와 마찬가지로 m 이 증가하면서 b_m 의 크기는 진폭을 갖고 증가하다가 감소하여 0으로 수렴하는 특성은 같으나 요동하는 진폭의 크기가 상대적으로 크며 측정 지점수가 증가할수록 진폭이 작아지는 현상이 뚜렷하게 나타난다. 이 결과는 음원 형태에 따라 음원의 특성 상수의 진폭 특성이 다르게 나타남을 의미하며, 음장 분포 형태가 복잡할수록 주어진 측정 지점에서 요구되는 정보가 많아지기 때문에 진폭의 요동이 심하게 나타난다.

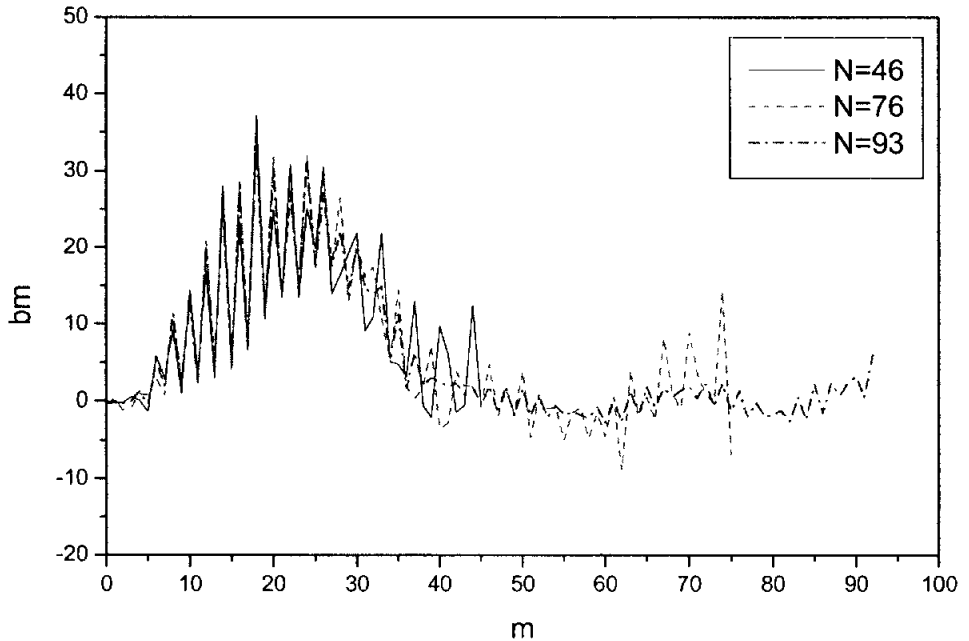


그림 20. 측정 지점수에 따른 b_m 의 비교(원추형 음원).

Figure 20. Comparison of b_m for the number of measuring points(line-in-cone type sound source).

(3) 선배열 음원 및 원추형 음원에 대한 음장 분포 예측 결과 고찰

앞에서 살펴 본 바와 같이 선배열 음원의 경우 kL 은 12.4이고 이때 정확한 예측 결과는 측정 지점수가 13개 일 때이었으며, 원추형 음원의 경우 kL 은 75.4이고 측정 지점수는 93개에서 정확한 예측이 가능하였다. 따라서 정확한 예측을 위한 최적 측정 지점수는 kL 이 클수록 증가하여 kL 에 비례함을 알 수 있다.

그러나 선배열 음원의 경우는 최적 측정 지점수가 kL 과 비슷한 값에서 나타나나 원추형 음원의 경우는 kL 보다 높은 값에서 나타난다. 따라서 음원 형태에 따

라 최적 측정 지점수에 대한 kL 의 의존도는 다르며, 측정 지점수를 음원 특성 상수에 대해 살펴본 바와 같이 음장 분포 형태에 따라 음원 특성 상수의 진폭 특성이 다르게 나타나고 음장 분포 형태가 복잡할수록 최적 측정 지점수는 증가되어야 함을 알 수 있다[58].

2.3.2. 최적 측정 지점수의 결정

원거리에서의 음장 특성을 정확히 예측하기 위해서는 근거리에서의 측정 지점수가 충분히 많을수록 만족된 결과를 얻을 수 있음을 앞에서의 결과로부터 알 수 있었다. 그러나 측정 지점수의 무한한 증가는 비현실적이고 비경제적이므로 최소의 측정으로 정확한 예측 결과를 얻을 수 있는 최적 측정 지점수에 대한 기준이 필요하다. 앞에서 살펴본 바와 같이 이러한 최적 측정 지점수는 음원의 주파수와 크기의 함수인 kL 에 비례한다. 즉 kL 이 커지게 되면 지향성이 커지게 되는데[9], 이러한 경우에는 음향 간섭이 더욱 심하게 일어나 근거리 영역에서의 공간상에서 음장 특성의 변화가 커지게 된다. 따라서 근거리 음장의 공간적인 샘플링 자료로부터 원거리 음장을 예측하기 위해서는 이러한 변화에 대응될 수 있도록 측정되어야 한다.

1) 선배열 음원의 음장 해석

그림 21에서 (r_0, θ_0) 는 음원 지점, (r, θ) 는 음장 지점이고, R 은 두 지점 간의 거리이며, 파동 함수의 전개는 Green 함수를 전개함으로서 구할 수 있다. 이때, 축 대칭이고 구형 전파 함수에 대한 Green 함수는 다음과 같이 주어진다 [28].

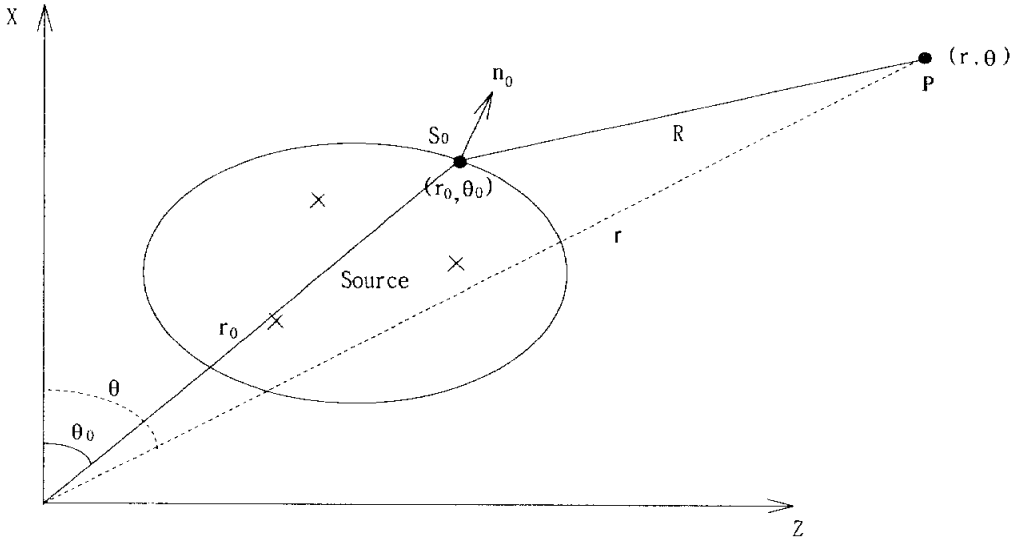


그림 21. 임의 형태의 음원과 음장 지점.

Figure 21. Arbitrary shaped sound source and an acoustic field point.

$$g(R) = ik \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) j_m(k r_0) P_m(\cos \theta_0) \times h_m(kr) P_m(\cos \theta) \quad (30)$$

따라서 식 (30)을 식 (19)의 Helmholtz 적분식에 대입하면 음장 지점 P 에서의 음압은 다음과 같이 전개된다.

$$p(P) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{jk(2m+1)}{4\pi} \times \int_s \left\{ -jk p(s_0) j_m(kr_0) P_m(\cos \theta_0) + p(s_0) \frac{\partial}{\partial n_0} [j_m(kr_0) P_m(\cos \theta_0)] \right\} ds_0 \times h_m(kr) P_m(\cos \theta) \quad (31)$$

따라서 식 (25)와 식 (31)로부터 음원의 특성 상수인 b_m 은 다음 식으로 주어진다.

$$b_m = \frac{ik(2m+1)}{4\pi} \times \int_s \left\{ -jk p(s_0) j_m(kr_0) P_m(\cos \theta_0) + p(s_0) \frac{\partial}{\partial n_0} [j_m(kr_0) P_m(\cos \theta_0)] \right\} ds_0 \quad (32)$$

여기서, 식 (25)를 살펴보면 음원의 특성 상수 b_m 을 알고 있으면 음원과 음장 지점에 대한 거리와 방위 정보로부터 음원에 대한 음장 분포를 구할 수 있음을 알 수 있다. 또한 식 (25)는 선형 방정식이므로 측정 자료로부터 b_m 을 구하기 위한 m 의 최대 차수는 최적 측정 지점수와 일치하게 된다. 식 (32)는 축 대칭이고 구형 전파 함수를 갖는 일반적인 경우이며, 여기서 선배열 음원의 경우로 해석하면 다음과 같다.

선배열 음원은 $\theta_0 = 0^\circ$ 인 X 축 상에 놓여 있으므로 $P_m(\cos \theta_0) = 1$ 이 되고, r_0 에 대한 법선 방향의 증분이 없으므로 두 번째 항은 제거된다. 그리고 면적분은 선 적분으로 변환되므로 b_m 은 다음과 같다.

$$b_m = (2m+1) \sum_{i=1}^N a_i j_m(kr_i) \quad (33)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, N$ (총 음원 수 N 일 때의 음원 번호)

$$a_i = \frac{k^2 p(s_0)}{4\pi} \quad (\text{각 음원에 대한 음압 진폭 상수})$$

r_i ; 선배열 음원의 중심에서 i 번째 음원까지의 거리

선배열 음원의 개별 음원의 위치는 원점을 기준으로 하여 등 간격으로 배열되어 있고, 음원의 진폭은 배열을 구성하고 있는 모든 음원이 동일 진폭을 갖는 경우로 가정($a_1 = a_2 = \dots = a_i = \dots = a_N = a$) 하였다.

그리고 선배열 음원을 구성하고 있는 총 음원의 수가 홀수 개인 경우와 짝수 개인 경우로 구분하여 b_m 의 특성을 살펴보고자 한다. 총 음원의 수가 N 개 (3개 이상)인 홀수 개로 등 간격 배열된 선배열 음원은 그림 22와 같다. 그림 22에서 d 는 배열 간격 그리고 총 선배열 음원의 길이는 L 이다.

선배열 음원의 중심에서 i 번째 음원까지의 거리 r_i 와 Bessel 함수의 특성은 다음과 같다[59].

$$r_i = \left(\frac{N+1}{2} - i \right) d \quad (34)$$

$$j_m(-kr_i) = (-1)^m j_m(kr_i) \quad (35)$$

따라서 식 (33)은 다음과 같이 정리된다.

$$b_m = (2m+1) a \times \left\{ [(-1)^m + 1] \sum_{i=1}^{(N-1)/2} j_m \left[\left(\frac{N+1}{2} - i \right) kd \right] + j_m(0) \right\} \quad (36)$$

그리고 선배열 음원의 중심에서 $j_m(0)$ 는 m 의 값에 따라 다음과 같이 정리된다.

$$j_m(0) = 1, \quad m = 0 \quad (37)$$

$$j_m(0) = 0, \quad m \neq 0 \quad (38)$$

따라서 식 (37)과 식 (38)로부터 식 (36)의 b_m 을 정리하면 다음과 같다.

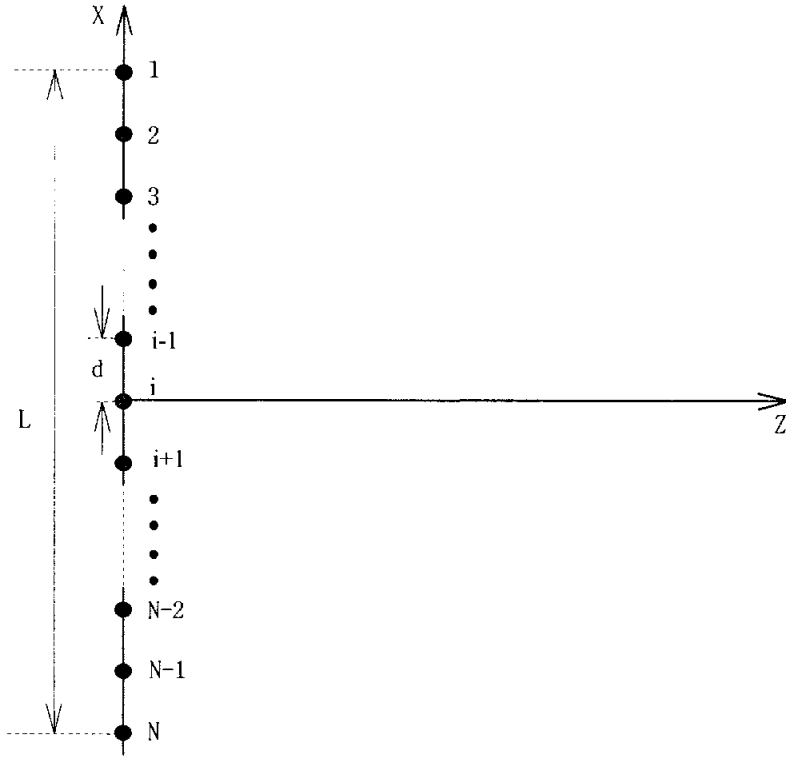


그림 22. 홀수 개로 구성된 선배열 음원의 구조.

Figure 22. Geometry of the line array sound source with the odd number's elements.

1) $m = 0$ 인 경우

$$b_0 = a \left\{ 2 \sum_{i=1}^{(N-1)/2} j_0 \left[\left(\frac{N+1}{2} - i \right) kd \right] + 1 \right\} \quad (39)$$

2) $m \neq 0$ 인 경우

$$b_m = 0, \quad m ; \text{odd } (1, 3, \dots) \quad (40)$$

$$b_m = 2(2m+1) a \sum_{i=1}^{(N-1)/2} j_m \left[\left(\frac{N+1}{2} - i \right) kd \right] \quad (41)$$

$$m ; \text{even } (2, 4, \dots)$$

두 번 째로 총 음원의 수가 N 개 (2개 이상)인 짝수 개로 등 간격 배열된 선배열 음원은 그림 23과 같다.

홀수 개의 경우와 마찬가지로 $m = 0$ 인 경우와 $m \neq 0$ 의 경우로 구분하면 다음과 같다.

1) $m = 0$ 인 경우

$$b_0 = 2a \sum_{i=1}^{N/2} j_0 \left[\left(\frac{N+1}{2} - i \right) kd \right] \quad (42)$$

2) $m \neq 0$ 인 경우

$$b_m = 0, \quad m ; \text{odd } (1, 3, \dots) \quad (43)$$

$$b_m = 2(2m+1) a \sum_{i=1}^{N/2} j_m \left[\left(\frac{N+1}{2} - i \right) kd \right] \quad (44)$$

$$m ; \text{even } (2, 4, \dots)$$

여기서 음원의 크기 $L = (N-1)d$, 즉 $d = \frac{L}{N-1}$ 이므로 b_m 은 주파수와 음원 크기의 무차원 함수인 kL 및 m 값에 따른 Bessel 함수의 특성에 의존하고 있음을 알 수 있다. 그러나 값의 범위는 배열수 N 에 무관함을 보인다.

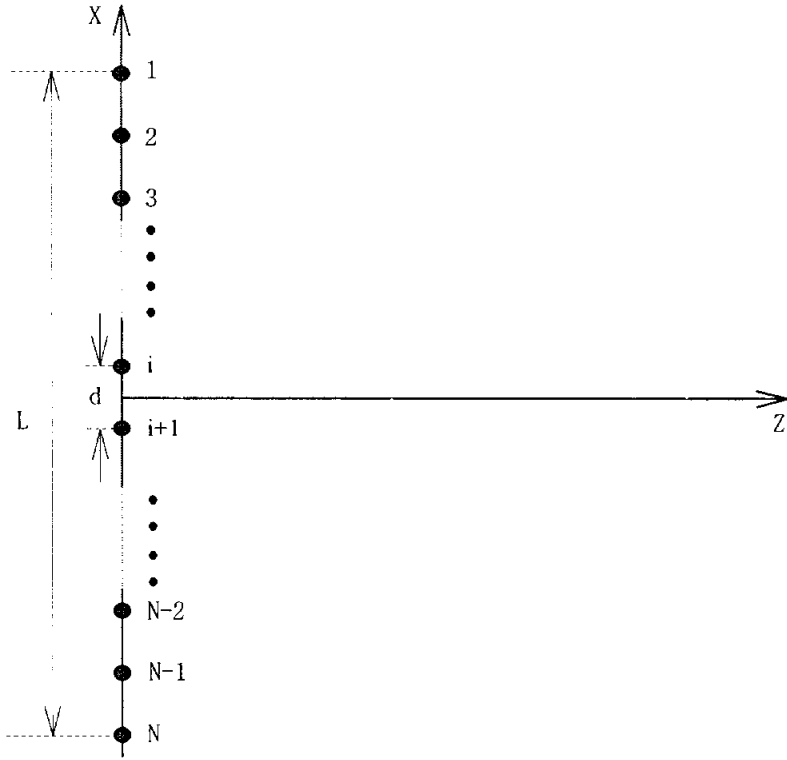


그림 23. 짝수 개로 구성된 선배열 음원의 구조.

Figure 23. Geometry of the line array sound source with the even number's elements.

표 2는 $kL = 12.6$ 이고 3개의 음원으로 구성된 선배열 음원에 대한 b_m 특성으로 m 이 13 이상에서는 b_m 이 0이 되어 음장 예측 계산 결과에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그리고 kL 이 증가하면 b_m 이 0이 되는 m 또한 증가하고 있음을 식 (39) ~ (44)의 계산 결과로부터 알 수 있다.

표 2. 배열수 $N = 3$ 이고 $kL = 12.6$ 인 선배열 음원의 b_m 특성.

Table 2. The b_m characteristics of a line array source ; $N = 3$, $kL = 12.6$.

m	b_m	m	b_m
0	1.000	13	0.000
1	0.000	14	0.001
2	-0.760	15	0.000
3	0.000	16	0.000
4	3.347	17	0.000
5	0.000	18	0.000
6	2.797	19	0.000
7	0.000	20	0.000
8	0.800	21	0.000
9	0.000	22	0.000
10	0.120	23	0.000
11	0.000	24	0.000
12	0.011		

따라서 b_m 이 0이 되는 곳에서 최적 측정 지점수를 정의할 수 있으며, 최적 측정 지점수를 보다 명확히 살펴보기 위해 b_m 의 누적($\sum_m b_m$) 특성을 해석한 결과는 그림 24와 그림 25와 같다. 그림 24는 kL 이 251로 일정한 상태에서 배열수 N 을 변화했을 때의 b_m 의 누적 특성으로써 누적된 b_m 이 일정한, 즉 기울기가 0인 m 의 위치는 배열수에 상관없이 동일한 지점에서 나타남을 알 수 있다. 즉 측정 지점수가 더 이상 증가하더라도 이러한 지점을 지나면 음장 계산에 영향을 주지 않는다. 따라서 최적 측정 지점이 되는 m 은 kL 만의 함수로 주어진다.

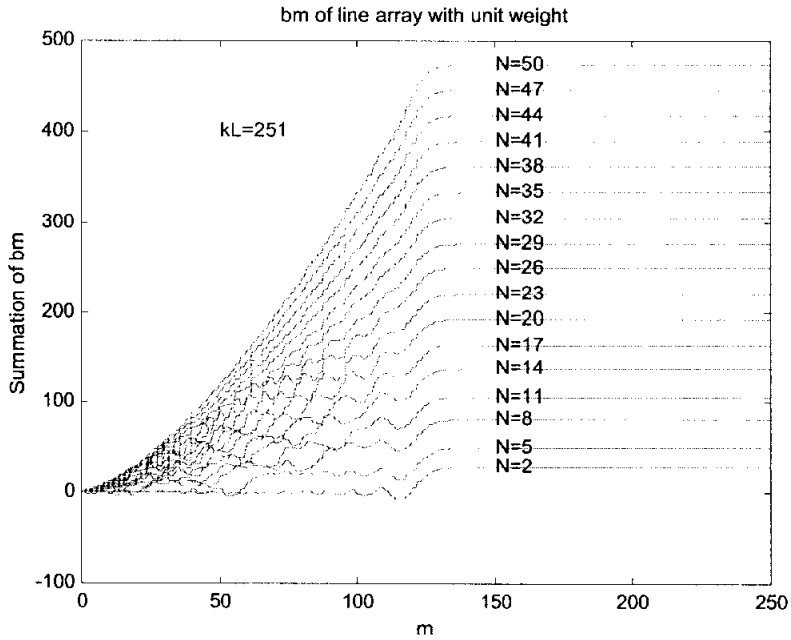


그림 24. 배열수 N 에 따른 선배열 음원의 b_m 누적 특성($kL = 251$).

Figure 24. Cumulative characteristics of b_m with respect to the number of a line array elements N ($kL = 251$).

그림 25는 배열수 $N = 50$ 으로 고정된 상태에서 kL 이 변화했을 때의 b_m 의 누적 특성으로서, $\sum_m b_m$ 이 m 및 kL 의 함수가 되고 있음을 보이고 있고, kL 값이 주어지는 경우 이 값은 특정 값에 수렴함을 보인다.

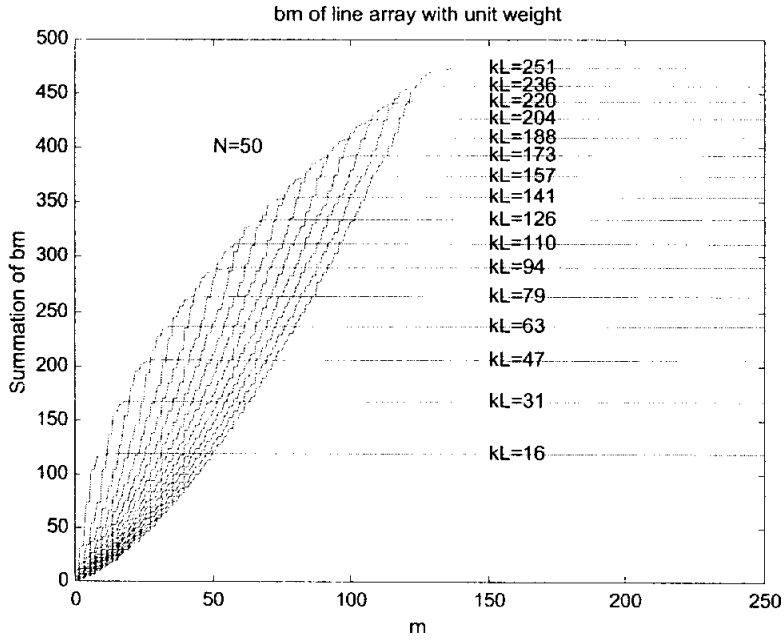


그림 25. kL 에 따른 선배열 음원의 b_m 누적 특성 ($N = 50$).

Figure 25. Cumulative characteristics of b_m with respect to kL of a line array sound source ($N = 50$).

따라서 이러한 지점을 기준으로 최적 측정 지점수 n_{opt} 를 정의할 수 있다. 이때 b_m 의 n_{opt} 까지의 누적치는 무한대까지의 누적치에 수렴하게 된다. 따라서 수렴 범위 상수를 α 로 정의하면, 다음과 기술할 수 있다.

$$\frac{\sum_m^{n_{opt}} b_m}{\sum_m^{\infty} b_m} = 1 - \alpha \quad (45)$$

여기서 α 는 0에서 1 사이의 값을 갖으며, 값이 작을수록 정확한 음장 예측을 산출

할 수 있다. 이때의 음측상 음압 준위(Sound Pressure Level ; SPL)를 구하여 음압 준위의 최종 수렴치의 범위를 설정하고, 이때의 α 값을 구하면 α 값에 따른 최적 측정 지점수를 구할 수 있다. 그림 26은 α 가 10^{-1} 에서 10^{-5} 의 범위에서 선배열 음원의 최적 측정 지점수이다.

그림 26에서 α 가 감소할수록 최적 측정 지점수는 증가하고 있으며, 표 2의 조건인 $kL = 12.6$ 일 때 α 에 따른 최적 측정 지점수와 음측상 음압 준위의 차이는 표 3과 같다.

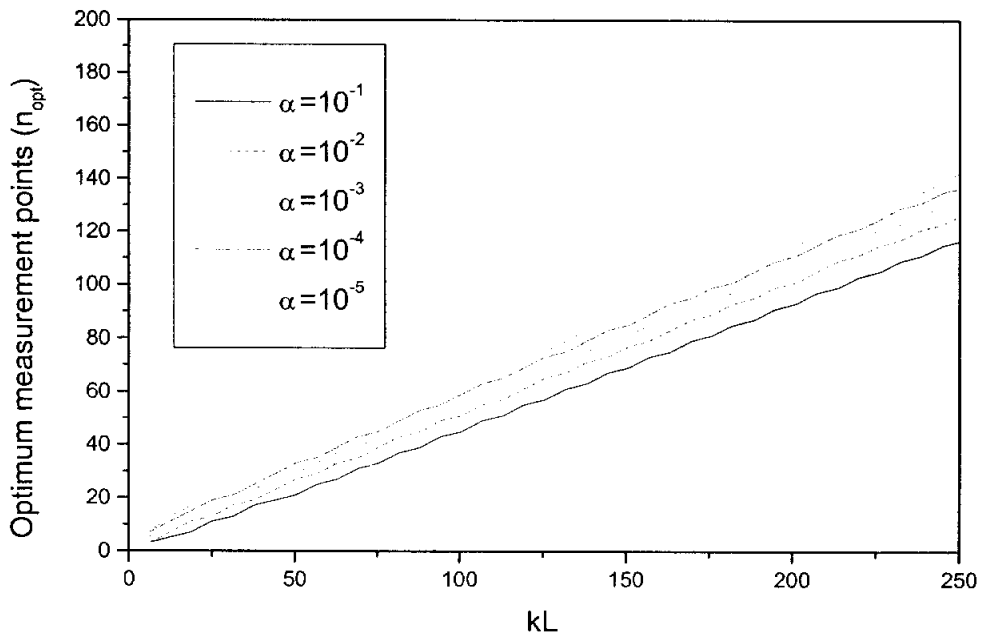


그림 26. kL 에 따른 선배열 음원의 최적 측정 지점수 ($\alpha = 10^{-1} \sim 10^{-5}$).

Figure 26. Optimum measurement points as a function of kL ($\alpha = 10^{-1} \sim 10^{-5}$).

표 3. $kL = 12.6$ 일 때 α 에 따른 최적 측정 지점수와 음축 상 음압 준위의 차이.

Table 3. SPL difference in acoustic axis with respect to α ($kL = 12.6$).

α	Optimum measurement points	SPL difference in acoustic axis (dB)
10^{-1}	5	3.466
10^{-2}	7	0.387
10^{-3}	9	0.021
10^{-4}	11	0.008
10^{-5}	13	0

따라서 음축 상 음압 준위 오차를 0.5 dB 이하로 설정한다면 α 는 10^{-2} 보다는 작아야 하고, 표 3에서 해석되는 바와 같이 0 dB의 오차, 즉, 정확한 음축 상 음압 준위를 얻기 위해서는 측정 지점수는 13 개 이상이어야 함을 보인다. 이는 측정 지점수에 따른 선배열 음원의 예측 결과인 그림 16의 결과와도 일치한다. 그림 27은 $\alpha = 10^{-5}$ 인 경우로 설정하여 kL 에 따른 최적 측정 지점수를 보인다.

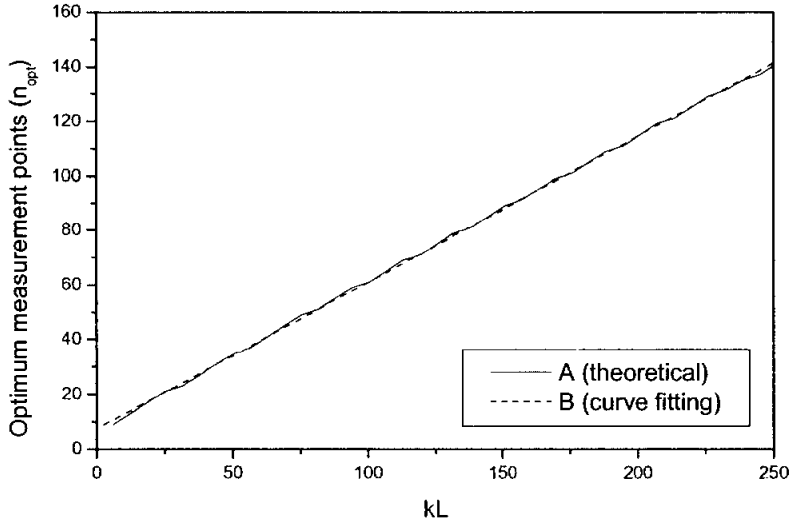


그림 27. kL 에 따른 최적 측정 지점수 ($\alpha = 10^{-5}$).

Figure 27. Optimum measurement points as a function of kL ($\alpha = 10^{-5}$).

그림 27에서 A는 계산 결과이고 B는 curve fitting 결과로서 최적 측정 지점수를 수식화 하면 다음과 같다.

$$n_{opt} = 7.34615 \pm 0.2437 + (0.53533 \pm 0.00165) kL \quad (46)$$

즉, 최적 측정 지점수 n_{opt} 는 약 0.54의 비례상수로 kL 에 비례하며, kL 이 작은 경우에는 최적 측정 지점수는 kL 보다 커야 하나 kL 이 큰 경우에는 최적 측정 지점수는 약 $0.54kL$ 로 결정됨을 보인다[60]. kL 에 따른 최적 측정 지점수의 kL 의 의존도를 살펴보기 위해 식 (46)을 kL 의 비례상수의 함수 형태로 바꾸면 식 (47)과 같으며, 그림 28은 식 (47)의 결과이다.

$$n_{opt} = r_p kL \quad (47)$$

$$r_p = \frac{7.34615}{kL} + 0.53533 ; \text{비례계수} \quad (57)$$

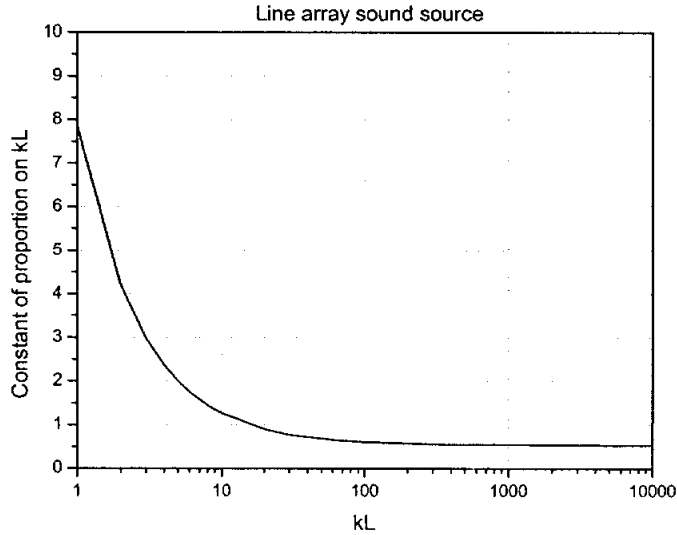


그림 28. kL 에 따른 kL 의 비례계수 ($\alpha = 10^{-5}$).

Figure 28. Coefficient of proportion on kL as a function of kL ($\alpha = 10^{-5}$).

그림 28에서 보는바와 같이, kL 이 15.8 이하에서는 최적 측정 지점수는 kL 보다 같거나 많아야 하나, kL 이 증가하면서 최적 측정 지점수는 $0.54kL$ 로 수렴한다. kL 이 작은 경우의 측정 지점수의 증가는 kL 이 작기 때문에 실제로 문제가 되지 않으며, kL 이 커짐에 따라 측정 지점수의 상대적인 증가가 현실적인 어려움이다. 기존의 통설은 측정 지점수는 kL 보다 많아야 된다고[28] 알려져 있으나, 본 논문의 결과는 kL 의 반 정도로 측정 지점수가 감소할 수 있음을 보인다.

제 3 장 근거리 음장에서의 음원 위치 추정

3.1. 홀로그래프 면에서의 상호 파워 스펙트럼

음원이 정상 상태인 경우가 아니거나, 정상 상태인 경우라 하더라도 음원에서 발생한 음압의 크기가 시간에 따라 변하는 경우에는, 홀로그래프 면의 모든 지점에서 동시에 측정[52]해야 하나, 이는 현실적으로 어려움이 많다. 그러나 음원이 정상 상태인 경우에는 음장이 시간에 따라 변하더라도 상호 파워 스펙트럼을 순차적으로 측정하면, 상대적인 음압의 크기와 위상을 측정 면상의 모든 측정 지점에서 구할 수 있어 동시 측정에 대한 제한점을 극복할 수 있다[62]. 이러한 기술은 B&K사에서 적용[62,63]하고 있으나, 세부 내용은 공개되지 않고 있다. 또한 국내에서는 음향 홀로그래피를 이용한 음장 해석에 대한 논문들[64-66]은 발표되고 있으나, 상호 파워 스펙트럼을 이용한 음장 해석에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

음압에 대한 상호 파워 스펙트럼은 음압을 주파수 영역으로 Fourier 변환 후 공액 복소수를 취하면 구할 수 있으며[67], 홀로그래프 면에서의 모든 측정 지점에 대한 상호 파워 스펙트럼 행렬을 C 로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 홀로그래프 면은 음원에서 발생한 음장을 측정하기 위해 구성된 측정 면으로 정의된다.

$$C = \overline{PP^T} = \begin{bmatrix} \overline{p_1} \\ \overline{p_2} \\ \vdots \\ \overline{p_N} \end{bmatrix} [p_1 p_2 \cdots p_N] \quad (49)$$

$$P^T = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_N] \quad (50)$$

여기서, 위 첨자 $-$ 는 공액 복소수이고, T 는 행렬의 전치를 의미하며, $p_1, p_2, \dots, p_N$ 은 홀로그래프 면에서의 N 개의 측정 지점에 대한 음압의 스펙트럼 함수이다. 식 (49)에서 보는바와 같이 홀로그래프 면에서 음압에 대한 상호 파워 스

펙트럼을 측정하면 홀로그램 면을 구성하고 있는 모든 측정 지점에서의 복소 음압을 구할 수 있다.

홀로그램 면은 구형, 원통형 그리고 평면으로 구성할 수 있으며, 음원 전방의 음장을 측정하는 경우에는 그림 29에서와 같이 홀로그램 면을 평면으로 구성할 수 있다. 이러한 경우, 음원에서 발생한 전방의 음장을 모두 측정할 수 있도록 면의 크기가 충분히 커야 한다. 그러나 아무리 크더라도 홀로그램 면의 크기는 유한하고 이산 샘플링에 의해 발생하는 둘러싸기 오차(wraparound error)가 발생하기 때문에 홀로그램 평면의 크기를 음원과 홀로그램 평면까지의 거리보다 충분히 크게 하고, 홀로그램 평면 내의 센서 배열 간격 d 는 음원과 홀로그램 평면까지의 거리보다 작고, 공간상의 엘리어싱을 피하기 위한 Nyquist 조건[34]인 $d \leq \pi/k = \lambda/2$ 을 만족해야 한다. 따라서 주파수가 높거나 음원의 크기가 큰 경우에는 측정 지점이 증가하고 상호 파워 스펙트럼의 측정 횟수가 증가하게 된다.

따라서 측정 횟수를 줄이기 위해 그림 30과 같이 음원과 홀로그램 평면 사이에 또 다른 측정 면을 구성하는데, 이를 기준 센서 면으로 정의한다. 기준 센서 면에서의 음압에 대한 행렬 R 을 도입하고 R 과 P 를 포함한 새로운 행렬 Q 를 다음과 같이 정의한다. 여기서 기준 센서의 수는 K 개다.

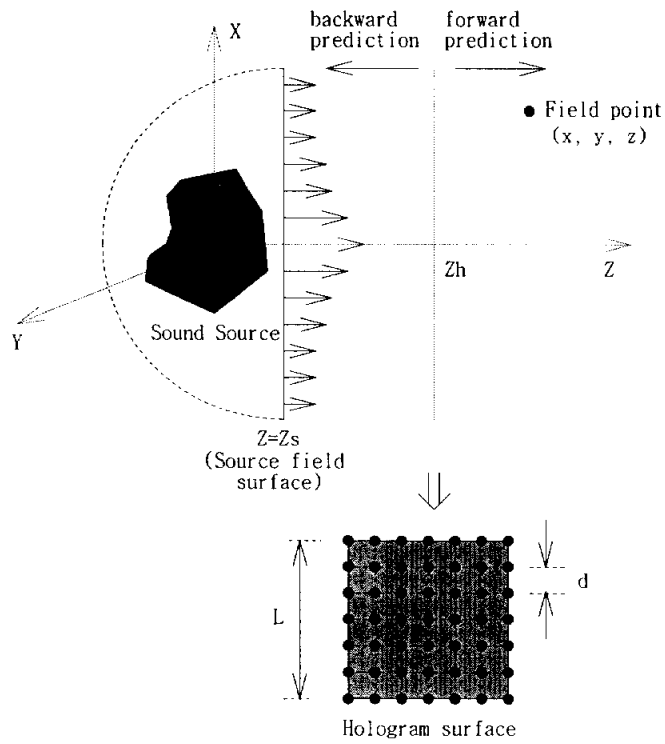


그림 29. 임의의 음원과 홀로그램 면.

Figure 29. Arbitrary sound source and hologram surface.

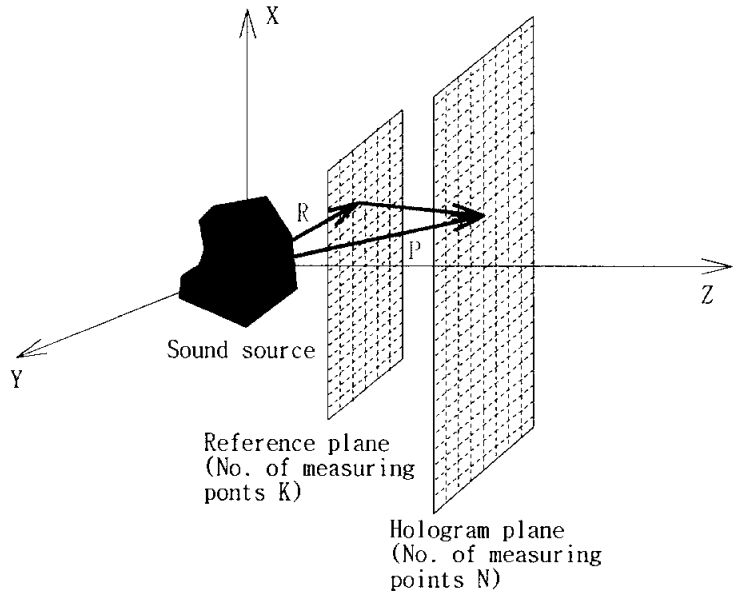


그림 30. 기준센서 평면과 홀로그램 평면.

Figure 30. Reference plane and hologram plane.

$$Q \equiv \begin{bmatrix} R \\ P \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$R \equiv [r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_K] \quad (52)$$

기준 센서 면에서의 상호 파워 스펙트럼과 홀로그램 면에서의 상호 파워 스펙트럼을 상호 연결하기 위해서는 두 평면간의 상호 파워 스펙트럼이 필요하며, 기준 센서 면과 홀로그램 면과의 상호 파워 스펙트럼 행렬 C_+ 는 다음과 같다.

$$C_+ = \overline{Q} Q^T = \begin{bmatrix} \overline{C_R} & C_{\Delta} \\ C_{\Delta}^T & C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \end{bmatrix} \quad (53)$$

여기서

$$\mathbf{C}_1 \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{C}_R \\ \overline{\mathbf{C}}_{\Delta}^T \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\mathbf{C}_2 \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\Delta} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$\mathbf{C}_R = \overline{\mathbf{R}} \mathbf{R}^T ; \text{ 기준 센서들의 상호 파워 스펙트럼 행렬} \quad (56)$$

$$\mathbf{C}_{\Delta} = \overline{\mathbf{R}} \mathbf{P}^T ; \quad (57)$$

기준 센서들과 홀로그래프 면에서의 측정 지점들 간의 상호 파워 스펙트럼 행렬

이때 $\mathbf{C}_1$ 과 $\mathbf{C}_2$ 를 연결하는 행렬 $\mathbf{E}$ 를 식 (58)로 정의하고 식 (54)와 식 (55)를 정리하면 식 (59)와 같이 $\mathbf{C}$ 를 $\mathbf{C}_R$ 과 $\mathbf{C}_{\Delta}$ 의 항으로 정리할 수 있다. 이 경우 측정 지점의 수는 $K(K+2N+1)/2$ 로서 $K \ll N$ 로 구성하면 기준 센서 배열을 적용하지 않은 경우의 측정 횟수인 $N(N+1)/2$ 에 비해 크게 줄어 들 수 있다.

$$\mathbf{C}_2 = \mathbf{C}_1 \mathbf{E} \quad (58)$$

$$\mathbf{C} = \overline{\mathbf{C}}_{\Delta}^T \mathbf{C}_R^{-1} \mathbf{C}_{\Delta} \quad (59)$$

여기서 $\mathbf{C}_R$ 은 특이행렬(singular matrix)로 역 행렬을 취할 수 없으므로, $\mathbf{C}_R$ 의 고유벡터(eigenvector) 전개를 도입하면 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_R = \overline{\mathbf{S}} \mathbf{D} \mathbf{S}^T = \sum_{i=1}^K d_i \overline{\mathbf{s}}_i \mathbf{s}_i^T \quad (60)$$

$$\mathbf{C}_R^+ = \overline{\mathbf{S}} \mathbf{D}^+ \mathbf{S}^T \quad (61)$$

여기서 $\mathbf{C}_R^+$ 는 $\mathbf{C}_R$ 의 유사 역행렬(pseudo inverse matrix)[68]이고, $\mathbf{S}$ 는 고유벡터 행렬($\overline{\mathbf{S}} \mathbf{S}^T = \mathbf{S}^T \overline{\mathbf{S}} = \mathbf{I}_K$, $\mathbf{I}_K$; $K \times K$ 단위 대각 행렬(unit diagonal

matrix)), D 는 음이 아닌 실수 값을 갖는 고유치(eigenvalue)의 대각 행렬이다.

C_R^{-1} 을 C_R^+ 로 대체하고 식 (59)를 정리하면 다음과 같다.

$$C = \overline{A} A^T \quad (62)$$

여기서

$$A = C_{\Delta}^T S D^{-1/2} \quad (63)$$

$$D^{-1/2} \equiv \begin{bmatrix} d_1^{-1/2} & & & 0 \\ & d_2^{-1/2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & d_K^{-1/2} \end{bmatrix} \quad (64)$$

따라서 식 (49)의 홀로그래프 면에서의 상호 파워 스펙트럼은 식 (62)와 같이 변환되어 기준 센서 면에서의 상호 파워스펙트럼 C_R 과 기준 센서들과 홀로그래프 면에서의 측정 지점들 간의 상호 파워스펙트럼 C_{Δ} 를 구하면 홀로그래프 면에서의 모든 지점에 대한 상호 파워스펙트럼을 구할 수 있다.

식 (49)를 구성하고 있는 홀로그래프 면에서의 N 개의 측정 지점에 대한 음압 $p_1, p_2, \dots, p_N$ 은 식 (62)에서 측정된 상호 파워스펙트럼으로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 P 는 $(N \times 1)$ 행렬, A 는 $(N \times K)$ 행렬이다.

$$\begin{aligned} C &= \begin{bmatrix} \overline{p_1} \\ \overline{p_2} \\ \vdots \\ \overline{p_N} \end{bmatrix} [p_1 p_2 \dots p_N] = \begin{bmatrix} \overline{p_1 p_1} & \overline{p_1 p_2} & \dots & \overline{p_1 p_N} \\ \overline{p_2 p_1} & \overline{p_2 p_2} & \dots & \overline{p_2 p_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{p_N p_1} & \overline{p_N p_2} & \dots & \overline{p_N p_N} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{M1} & c_{M2} & \dots & c_{NN} \end{bmatrix} \quad (65) \end{aligned}$$

여기서 $c_{ij} (i=1, \dots, N, j=1, \dots, N)$ 는 식 (62)에서 구한 i, j 지점 간의 상호 파워 스펙트럼이다. 홀로그래프 면에서의 상호 파워 스펙트럼으로부터 음압을 분리하기 위해, 식 (65)로부터 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\overline{p_1 p_1} = c_{11} = a \quad (66)$$

$$\overline{p_1 p_2} = c_{12} = b + jc \quad (67)$$

$$\overline{p_2 p_2} = c_{22} = d \quad (68)$$

여기서 a, b, c 및 d 는 c_{11}, c_{12}, c_{22} 을 구성하는 상호 파워 스펙트럼의 실수와 허수치이고, p_1 과 p_2 를 다음과 같이 정의하면, 아래와 같다.

$$p_1 = x_1 + j y_1 \quad (69)$$

$$p_2 = x_2 + j y_2 \quad (70)$$

따라서 정리를 하면 아래와 같은 4개의 미지수를 갖는 4개의 비선형 방정식이 나온다.

$$f_1 = x_1^2 + y_1^2 - a = 0 \quad (71)$$

$$f_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 - b = 0 \quad (72)$$

$$f_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1 - c = 0 \quad (73)$$

$$f_4 = x_2^2 + y_2^2 - d = 0 \quad (73)$$

비선형 방정식의 해를 구하기 위해 Taylor 급수 전개를 하고 Newton-Raphson 법 [69]을 사용하여 계산할 수 있다. 임의의 초기치를 입력하여 반복 계산으로 식 (75)과 같이 p_1 과 p_2 를 구할 수 있다. 여기서, i 는 함수의 현재 값이고 $i+1$ 는 다음

단계의 값이다.

$$\mathbf{Z} \mathbf{X}_{i+1} = -\mathbf{F}_i + \mathbf{Z} \mathbf{X}_i \quad (75)$$

여기서,

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{1,i}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{1,i}}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{2,i}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{2,i}}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_{3,i}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{3,i}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{3,i}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{3,i}}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_{4,i}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{4,i}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{4,i}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{4,i}}{\partial y_2} \end{bmatrix} \quad (76)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 2x_1, \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial f_1}{\partial y_1} = 2y_1, \quad \frac{\partial f_1}{\partial y_2} = 0 \quad (77)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_1} = x_2, \quad \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = x_1, \quad \frac{\partial f_2}{\partial y_1} = y_2, \quad \frac{\partial f_2}{\partial y_2} = y_1 \quad (78)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_1} = y_2, \quad \frac{\partial f_3}{\partial x_2} = -y_1, \quad \frac{\partial f_3}{\partial y_1} = -x_2, \quad \frac{\partial f_3}{\partial y_2} = x_1 \quad (79)$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial f_4}{\partial x_2} = 2x_2, \quad \frac{\partial f_4}{\partial y_1} = 0, \quad \frac{\partial f_4}{\partial y_2} = 2y_2 \quad (80)$$

$$\mathbf{X}_{i+1} = \begin{bmatrix} x_{1,i+1} \\ x_{2,i+1} \\ y_{1,i+1} \\ y_{2,i+1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_{1,i} \\ x_{2,i} \\ y_{1,i} \\ y_{2,i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} f_{1,i} \\ f_{2,i} \\ f_{3,i} \\ f_{4,i} \end{bmatrix} \quad (81)$$

$p_3, \dots, p_N$ 은 식 (82)와 같이 앞에서 구한 p_1 으로부터 순차적으로 구할 수 있다 [70].

$$\overline{p_1 p_i} = (x_1 + j y_1)(x_i + j y_i) = c_{1i}, \quad i = 3, \dots, N \quad (82)$$

3.2. 음장의 공간 변환

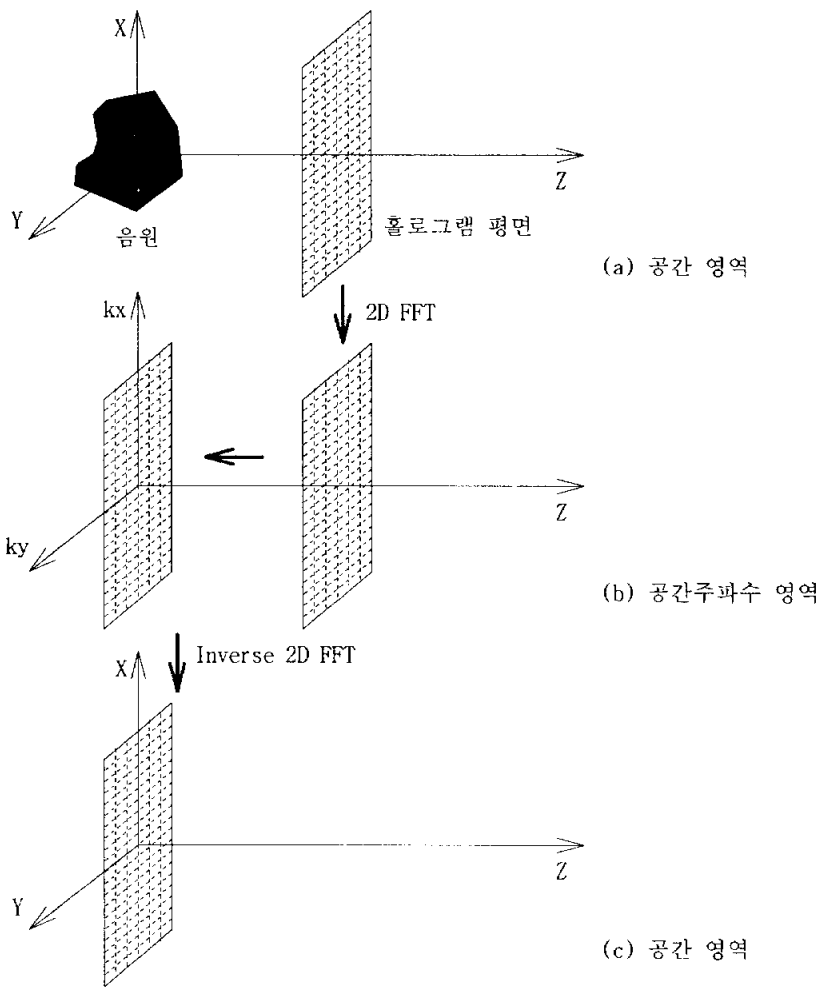


그림 31. 음원 영역에서의 음장 분포 계산 흐름도.

Figure 31. Flow for calculation of sound field in a sound source region.

그림 31은 음원 영역에서의 음장 분포를 계산하기 위한 흐름도 이다. 홀로그램 면에서의 음장은 홀로그램 면 보다 음원 쪽으로 가까이 있거나 멀리 위치한 다른

면으로의 음장 이동이 가능하며, 이때 두 이동 면간에 또 다른 음원이 없어야 한다 (source free). 홀로그래프 면에서 측정된 공간 영역에서의 음장을 다른 면으로 이동하기 위해서는 그림 31과 같이 2차원 공간 주파수 변환으로 공간 영역의 데이터를 공간 주파수 영역으로 옮기고 전달함수를 이용하여 예측하고자 하는 다른 면으로 변환하여야 한다. 이러한 공간 해석을 위해 주파수가 고정된 복소 음압 $p(x, y, z)$ 가 식 (83)의 Helmholtz 식을 만족하는 해를 구하여야 한다.

$$\nabla^2 p(x, y, z) + k^2 p(x, y, z) = 0 \quad (83)$$

식 (83)의 해는 다음과 같이 면 적분 형태로 된다[15].

$$p(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} p(x', y', z_s) G'(x-x', y-y', z-z_s) dx' dy' \quad (84)$$

여기서, x, y, z 는 구하고자 하는 음장 지점이고, x', y', z_s 는 음원을 둘러싼 폐곡면 상의 한 지점(그림 29 참조), 그리고 G' 은 Green 함수의 미분으로서 z_s 평면 상에서 입자 속도 향이 0이 되는 Dirichlet 경계조건[33]을 만족하는 Green 함수는 다음과 같다.

$$G(x, y, z | x', y', z') = \frac{\exp\{ik\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}\}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} - \frac{\exp\{ik\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z'-2z_s)^2}\}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z'-2z_s)^2}} \quad (85)$$

$z' = z_s$ 에서의 Green 함수에 대한 법선 방향 미분 $\partial/\partial z'$ 은 다음과 같다.

$$-4\pi G'(x-x', y-y', z-z_s) \equiv -\frac{\partial G}{\partial n}(x, y, z | x', y', z_s)$$

$$= -2 \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\exp \{ ik \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + a^2} \}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + a^2}} \right]_{a=(z-z_S)} \quad (86)$$

따라서, 홀로그래프 면인 $z=z_H$ 에서 식 (84)는 다음과 같이 된다.

$$p(x, y, z_H) = \int \int_{-\infty}^{\infty} p(x', y', z_S) G'(x-x', y-y', z_H-z_S) dx' dy' \quad (87)$$

식 (87)에서 측정 면인 홀로그래프 면 (x, y, z_H) 에서의 음압은 음원 면에서의 음압 $p(x', y', z_S)$ 와 G' 의 컨볼루션(convolution)이다. 따라서 측정 면에서의 음압은 공간 상의 Fourier 변환에 의한 파수 영역 상에서의 음압과 G' 의 Fourier 변환의 곱으로 나타낼 수 있다.

$p(x, y, z_H)$ 에 대한 2차원 공간 Fourier 변환은 다음과 같다. 여기서 공간 상의 Fourier 변환은 “ $\wedge$ ”으로 표시하였다.

$$\begin{aligned} \widehat{p}(k_x, k_y, z_H) &= F[p(x, y, z_H)] \\ &= \int \int p(x, y, z_H) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \end{aligned} \quad (88)$$

이 되고, 식 (84)에 컨볼루션 이론을 적용하고 Fourier 역 변환하면 다음과 같다.

$$p(x, y, z) = F^{-1}[\widehat{p}(k_x, k_y, z_S) \cdot \widehat{G}'(k_x, k_y, z-z_S)] \quad (89)$$

그리고 식 (87)에 대한 컨볼루션은

$$\widehat{p}(k_x, k_y, z_H) = \widehat{p}(k_x, k_y, z_S) \cdot \widehat{G}'(k_x, k_y, z_H-z_S) \quad (90)$$

이므로, 따라서 $p(x, y, z)$ 는 다음과 같이 정리되어 새로운 면에서의 음장을 구할 수 있다.

$$p(x, y, z) = F^{-1} \left\{ \hat{p}(k_x, k_y, z_H) \cdot \left[\frac{\hat{G}'(k_x, k_y, z - z_S)}{\hat{G}'(k_x, k_y, z_H - z_S)} \right] \right\}$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{p}(k_x, k_y, z_H) e^{-ik_z(z_H - z)}] e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (91)$$

여기서,

$$\frac{\hat{G}'(k_x, k_y, z - z_S)}{\hat{G}'(k_x, k_y, z_H - z_S)} = e^{-ik_z(z_H - z)}, \quad k_x^2 + k_y^2 \leq k_0^2 \quad (92)$$

$$\frac{\hat{G}'(k_x, k_y, z - z_S)}{\hat{G}'(k_x, k_y, z_H - z_S)} = e^{k_z(z_H - z)}, \quad k_x^2 + k_y^2 > k_0^2 \quad (93)$$

$$k_z = \sqrt{k_0^2 - (k_x^2 + k_y^2)} \quad (94)$$

새로운 평면의 위치는 z 값의 설정에 의해 정해지며, z 값의 범위는 근거리 영역에 한정된다. 따라서 음원 영역에서의 음장은 z 값을 음원 영역으로 설정하면 구할 수 있다(후방 전파, backward propagation). 반면에 원거리 영역에서의 음장은 홀로그래프 면에서 측정된 음장 분포 자료로부터 제 2장에 수록한 Helmholtz 적분식을 이용하여 구할 수 있다[71].

공간 주파수(파수) 영역에서 반경 $k = k_0 (= 2\pi f/c)$ 인 원을 방사 원이라고 정의한다. 식 (92)와 식 (93)은 음장 평면 간의 전달함수로서, 방사 원 내부에 존재하는 파수 성분 ($k \leq k_0$)은 평면파로서 위상의 변화를 갖고 원거리로 전파하는데 기여하는 반면, 방사 원 외부에 존재하는 파수 성분 ($k > k_0$)은 소멸파로서 음원 근처에서만 존재하고 거리가 증가할수록 급격히 작아져서 원거리에서는 소멸됨을 알 수 있다. 그림 32와 그림 33은 이러한 관계를 보여준다. 따라서 음원 면에서의 음장 해석을 위해서는 소멸파를 포함한 모든 음장의 측정을 위해 홀로그래프 평면은 가능한 음원 근처에 있어야 한다.

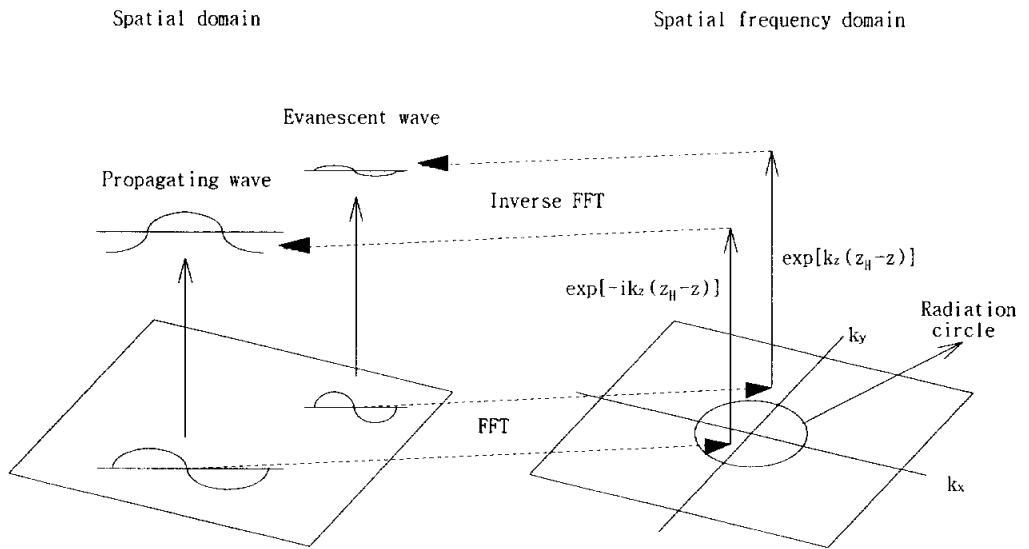


그림 32. 공간 영역과 공간 주파수 영역의 관계.

Figure 32. Relationship between spatial domain and spatial frequency domain.

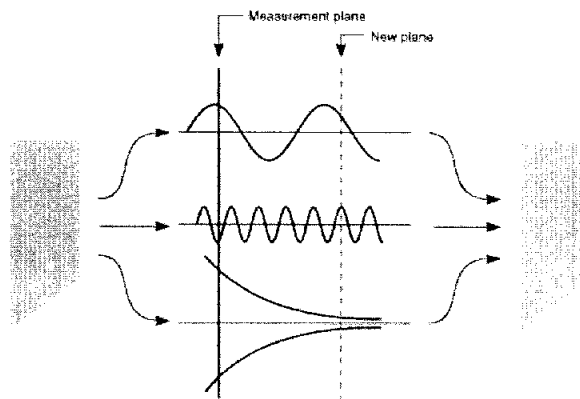


그림 33. 측정 평면에서 다른 평면으로의 파의 변환.

Figure 33. Transformation of waves from one measurement plane to another.

3.2.1 파수 공간 필터

그림 34에서 보는 바와 같이, 식 (92)와 식 (93)의 음장 평면 간의 전달함수에서 음원 면으로의 후방 전파의 경우에는 소멸파에 해당하는 파수 영역에서 전달함수의 크기가 크게 변하여 랜덤 오차의 에너지를 증가시키기 때문에 음원 영역에서의 음장 분포 예측시 오차를 유발하게 된다[72].

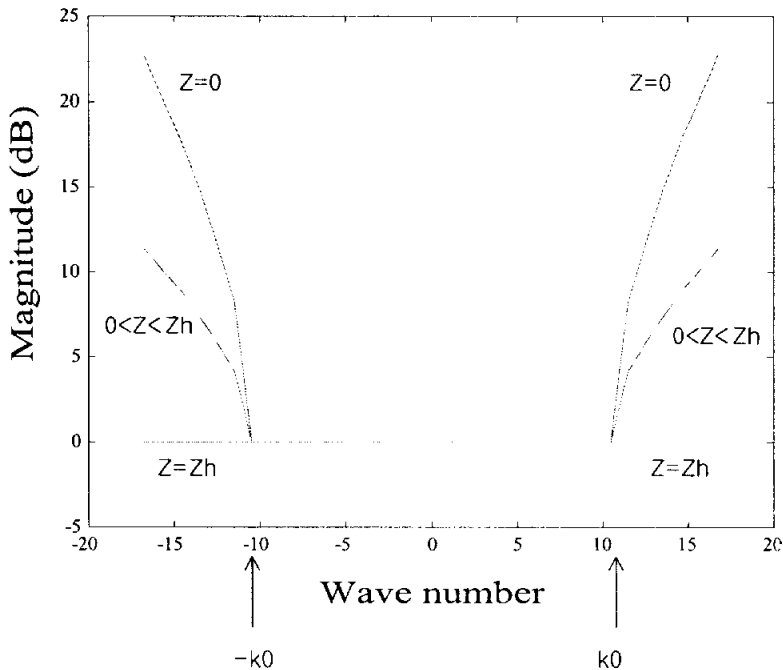


그림 34. 파수 영역에서의 음장 평면 간의 전달함수의 크기.

Figure 34. The magnitude of transfer function between sound field planes in wave number domain.

따라서 본 논문에서는 소멸파의 파수 영향을 감소시키고 방사원 내부의 진행파 파수의 영향을 증대시키기 위한 지수 함수 형태의 파수 공간 필터를 제안한다. 이를 위해 식 (95) ~ (99)와 같이 파수를 변환하고, 이에 대한 파수 공간 필터 함수는 식 (100)과 그림 35와 같다. 이때, 파수 공간 필터를 적용한 음장 지점에서의 음

압은 식 (101)로부터 구할 수 있다.

$$k'_x = k_x + \pi/d, \quad k_x < 0 \quad (95)$$

$$k'_x = -k_x + \pi/d, \quad k_x \geq 0 \quad (96)$$

$$k'_y = k_y + \pi/d, \quad k_y < 0 \quad (97)$$

$$k'_y = -k_y + \pi/d, \quad k_y \geq 0 \quad (98)$$

$$k'_z = \sqrt{k_0^2 - (k_x'^2 + k_y'^2)} \quad (99)$$

$$F(k_x, k_y) = e^{-i(k'_x - k_x)(z_H - z)} \quad (100)$$

$$p(x, y, z) =$$

$$F^{-1} \left\{ \hat{p}(k_x, k_y, z_H) \cdot \left[\frac{\hat{G}'(k_x, k_y, z - z_S)}{\hat{G}'(k_x, k_y, z_H - z_S)} \right] \cdot \frac{F(k_x, k_y)}{\max(F(k_x, k_y))} \right\} \quad (101)$$

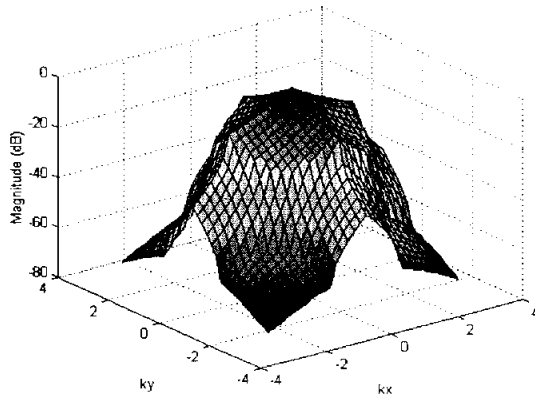


그림 35. 파수 공간 필터.

Figure 35. Wavenumber space filter.

3.3. 수치 모의 실험 및 결과 고찰

수치 모의 실험을 위한 음원은 무한 배플 내의 원판형 진동체(음원의 수는 1개와 4개인 경우로 선정)로 하였으며, 이에 대한 음원 함수를 세우고 음원 근처에 홀로그램 평면을 구성하였다. 홀로그램 평면의 모든 측정 지점과 홀로그램 평면과 음원 사이에 배치한 기준 센서 평면에서의 음압에 대한 상호 파워 스펙트럼을 구하고 이 결과로부터 홀로그램 평면에서의 복소 음압을 구하였다. 근거리 음장 홀로그래피(NAH) 기술[33]을 이용하여 주파수 함수를 공간 주파수(파수) 함수로 변환하고 음원 영역에서의 음장분포를 구하였다.

음원에서 발생된 음장을 측정하기 위한 홀로그램 면은 사용하는 좌표에 따라 평면, 원통형 그리고 구형으로 구성될 수 있으며, 구조물의 형태나 예상되는 음원의 형태에 따라 홀로그램의 형태를 선택할 수 있다. 본 논문에서는 실험이 용이하고 가장 일반적으로 사용하고 있는 평면의 홀로그램을 선택하였다. 근거리 영역에서만 존재하는 소멸파를 포함한 모든 음장을 측정하기 위해 홀로그램 평면은 음원에 근접된 위치에 배치하고 홀로그램 평면의 크기는 충분히 커야 한다. 홀로그램 평면에서의 음압에 대한 음장 분포를 가시화하여 결과를 확인하였다.

음원이 좌표축 중앙에 1개가 있는 경우의 모의실험을 통해 음원 영역에서의 음장 분포를 확인하고, 음원의 수를 4개의 경우로 확장하여 결과를 검증하였다. 공간 주파수 영역에서의 음장 분포를 통해 음원 간의 간섭 현상을 볼 수 있으며, 음원 영역에서의 음장 분포는 음원들의 위치를 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있었다.

3.3.1 무한 배플 내의 원판형 진동체 음원

본 논문의 모의실험을 위해 적용한 음원의 수는 1개와 4개인 경우로 선정하였으며, 음원의 수가 1개인 경우는 그림 36과 같이 무한 배플 내에 있는 반경이 a 인 원판형 진동체이다. 음원의 중심으로부터 거리 r 지점에 있는 홀로그램 평면의 임의의 지점에서의 음압은 식 (102)와 같이 음원에 대해 면적분 함으로서 구할 수 있다[9]. 이에 대한 계산은 사다리꼴 법칙을 이용하여 수치 적분하여 구하였다[73].

원판형 진동체 음원의 축상 음압에 대한 수치 적분 결과와 참고 문헌 9에서의 해석해의 결과를 비교하여 계산 결과를 검증하였다.

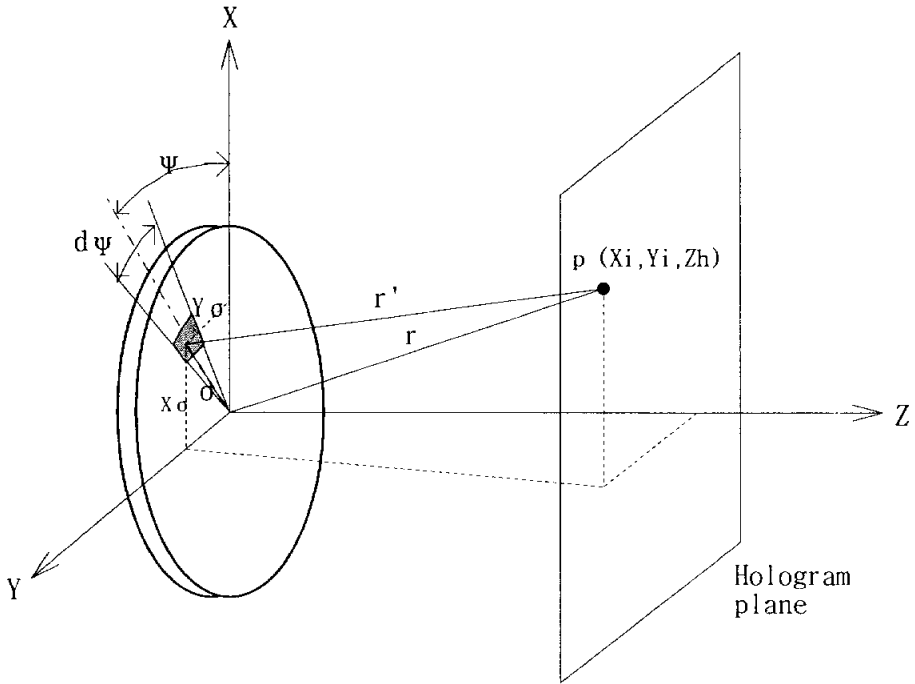


그림 36. 원판형 음원과 홀로그램 평면.

Figure 36. Circular piston sound source and hologram plane.

$$p(X_i, Y_i, Z_h, t) = jA k \int_0^a \sigma \int_0^{2\pi} \frac{e^{j(\omega t - kr')}}{r'} d\Psi d\sigma \quad (102)$$

여기서,

r' ; 원판형 진동체의 (σ, Ψ) 지점과 홀로그램 평면의 (X_i, Y_i, Z_h) 지점 간의

거리 ($r' = \sqrt{(X_i - X_o)^2 + (Y_i - Y_o)^2 + Z_h^2}$)

A ; 음의 세기 상수 ($= \frac{\rho_0 c U_0}{2\pi}$), U_0 ; 입자 속도, ρ_0 ; 밀도, c ; 음속

그리고 음원의 수가 4개인 경우는 그림 37과 같으며, 배열 간격은 d_s 로 설정하였다. 이 경우, 홀로그램 평면의 (X_i, Y_i, Z_h) 지점에서의 음압은 식 (102)를 이용하여 각각의 음원에 대한 홀로그램 평면에서의 복소 음압을 구하고 중첩의 원리를 이용하여 각각의 음압의 합으로서 구할 수 있다.

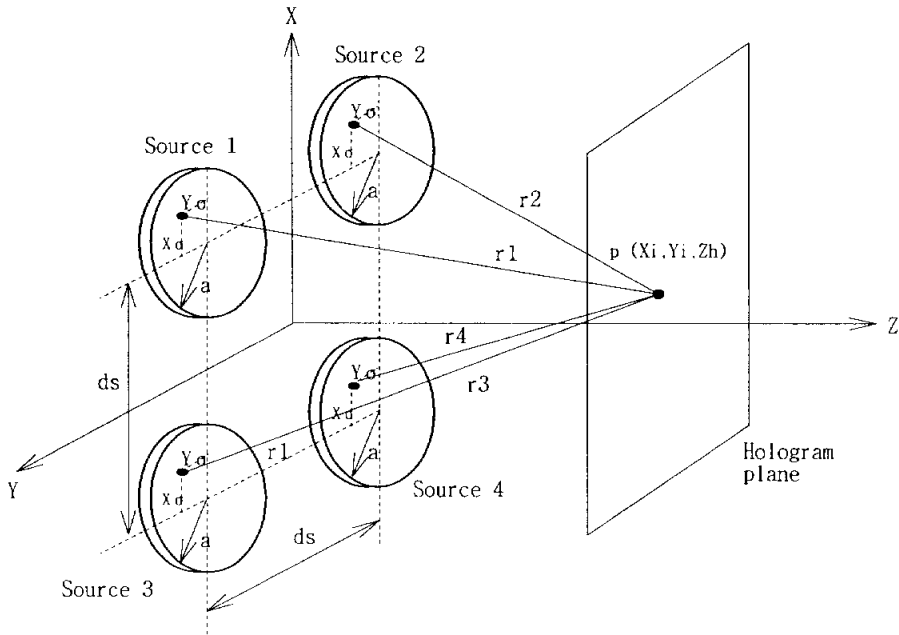


그림 37. 원판형 진동체 4개로 구성된 음원과 홀로그램 평면.

Figure 37. Sound source with 4 circular pistons and hologram plane.

그림 37에서 원판형 진동체의 음원 1 ~ 음원 4의 임의 지점과 홀로그램 평면의 (X_i, Y_i, Z_h) 지점 간의 거리와 복소 음압은 식 (103) ~ 식 (108)과 같다.

$$r_1 = \sqrt{(X_i - X_\sigma - d_s/2)^2 + (Y_i - Y_\sigma - d_s/2)^2 + Z_h^2} \quad (103)$$

$$r_2 = \sqrt{(X_i - X_\sigma - d_s/2)^2 + (Y_i - Y_\sigma + d_s/2)^2 + Z_h^2} \quad (104)$$

$$r_3 = \sqrt{(X_i - X_\sigma + d_s/2)^2 + (Y_i - Y_\sigma - d_s/2)^2 + Z_h^2} \quad (105)$$

$$r_4 = \sqrt{(X_i - X_\sigma + d_s/2)^2 + (Y_i - Y_\sigma + d_s/2)^2 + Z_h^2} \quad (106)$$

$$p(X_i, Y_i, Z_h, t) = \sum_{j=1}^4 p_j(X_i, Y_i, Z_h, t) \quad (107)$$

$$p_j(X_i, Y_i, Z_h, t) = jA k e^{j\omega t} \int_0^a \sigma \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkr_j}}{r_j} d\Psi d\sigma \quad (108)$$

3.3.2 수치 모의 실험 및 결과 분석

1) 원판형 진동체 1개로 구성된 단일 음원의 경우

수치 모의 실험에 사용한 원판형 진동체의 반경 a 는 1 m, 공간 주파수 k_0 는 10.5로 하였으며, 기준 센서 및 홀로그램 평면의 구성은 그림 38과 같다. 기준 센서 평면은 음원의 중심 축으로부터 10 cm 떨어진 지점에 기준 센서 1개를 구성하고, 홀로그램 평면은 20 cm 떨어진 지점에 32×32 개로 구성하였다. 홀로그램 평면의 크기 L 은 평면 외부에서의 음압이 무시될 수 있도록 커야 하며, 따라서 본 수치 모의 실험에서는 음원 크기의 3 배인 6 m 로 하였다. 홀로그램 평면의 크기가 유한하고 이산 샘플링에 의해 발생하는 둘러싸기 오차(wraparound error)는 홀로그램 평면의 크기를 음원과 홀로그램 평면까지의 거리보다 충분히 크게 함으로서 무시할 수 있도록 하였으며, 공간상의 샘플링 간격 d 는 음원과 홀로그램 평면까지의 거리보다 작아야 하고, 공간상의 엘리어싱(spatial aliasing)을 피하기 위한 Nyquist 조건[34]인 $d \leq \pi/k_0 = \lambda/2 \cong 0.3m$ 을 만족하도록 18.75 cm 로 하였다. 기준 센서의 수 $K = 1$, 홀로그램 평면에서의 측정 지점수 $N = 32 \times 32 = 1,024$ 로서 총 측정 횟수는 $K(K+2N+1)/2 = 1,025$ 이며, 기준 센서를 적용하지 않은 경우의 측정 횟수 $N(N+1)/2 = 524,800$ 에 비해 512 배나 감소함을 알 수 있다.

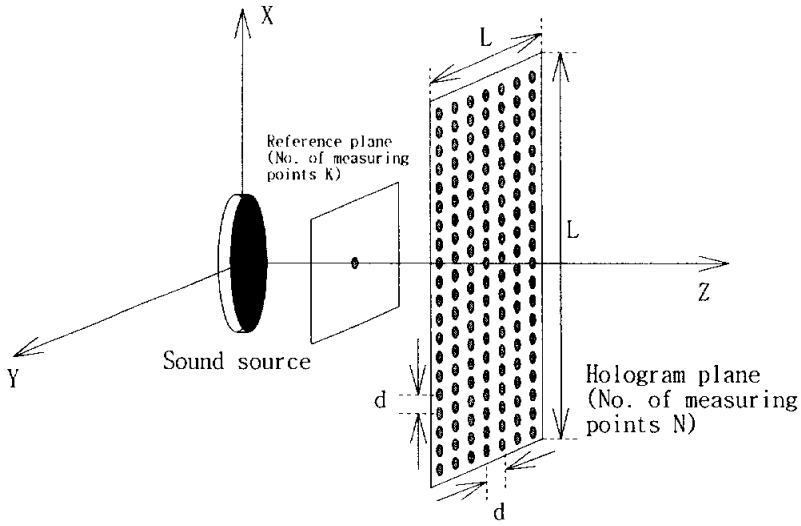


그림 38. 기준 센서 평면과 홀로그램 평면.

Figure 38. Reference sensor plane and hologram plane.

기준 센서와 홀로그램 평면에서의 상호 파워 스펙트럼으로부터 구한 홀로그램 평면에서의 음장 분포는 그림 39와 같다. 여기서 샘플링 주파수는 160,448 Hz로 하였다.

공간 영역인 그림 39의 홀로그램 평면에서의 음장 분포로부터 2차원 공간 주파수 변환을 하면 그림 40과 같이 공간 주파수 영역에서의 음장 분포를 구할 수 있다. 2차원 공간 주파수 변환을 위해 Matlab의 fft2 함수를 사용하였으며, 방사원이 형성됨을 알 수 있다.

방사원 내부의 음장은 원거리로 전파되는 성분으로 공간 주파수 영역의 중심으로 갈수록 크게 나타나고, 방사원 외부의 음장은 원거리로 갈수록 사라지는 소멸파로서 방사원에서 멀어 질수록 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 k_x 와 k_y 가 작을수록 방사 방향의 공간 주파수인 k_z 가 증가($k_x = k_y = 0$ 일때 $k_z = \sqrt{k_0^2 - (k_x^2 + k_y^2)} = k_0$ 로 음원의 축 방향으로 최대 방사) 하고 방사원을

벗어나면서 k_z 는 허수값을 갖기 때문이다.

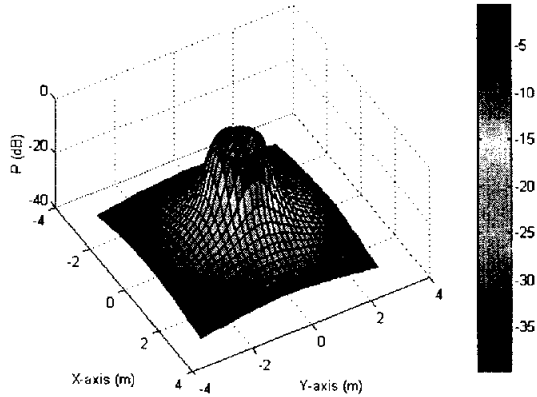
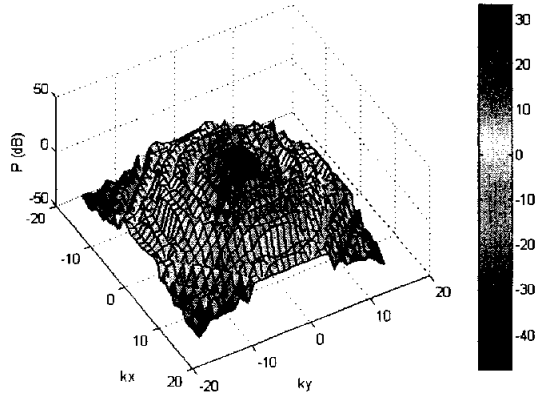


그림 39. 홀로그램 평면에서의 음장 분포(음압의 크기).

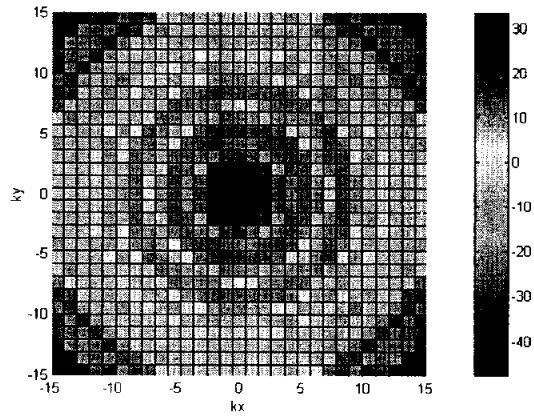
Figure 39. Sound field on the hologram plane(Magnitude of sound pressure).

따라서 방사원의 중심으로 갈수록 전파에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 즉, k_z 는 실수인 경우와 허수인 경우로 구분되는데, k_z 가 실수이면 거리에 따라 위상만 변하는 진행파가 되고, k_z 가 허수이면 거리에 따라 크기가 지수적으로 감소하는 소멸파가 된다. 여기서 최대 파수(Nyquist 파수)는 $16.76 (= \pi/d)$ 이며, 샘플링 간격 Δk 는 $2\pi/L$ 이다.

그림 38의 공간 주파수 영역에서의 음장 분포를 전달함수를 이용하여 음원 영역에서의 음장으로 변환(식 (91)에서 $z=0$) 한 후 2차원 공간 Fourier 역 변환을 하면 그림 41과 같이 음원 면의 공간 영역에서의 음장을 계산할 수가 있다. 여기서 2차원 공간 Fourier 역 변환은 Matlab의 ifft2 함수를 이용하였다.



(a)



(b)

그림 40. 홀로그래프 평면의 공간 주파수 영역에서의 음장 분포(단일 음원), (a) 3차원 결과, (b) $k_x - k_y$ 평면의 2차원 결과.

Figure 40. Sound field on a spatial frequency domain of hologram plane(single sound source), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of $k_x - k_y$ plane.

그림 41의 예측 결과는 파수 공간 필터를 적용하지 않은 경우로서, 음원 면에서의 음장 분포는 식 (102)에서 원판형 음원 면에서 음압의 크기가 일정하다고 가정하여 일정한 음장 분포를 기대하였으나, 음원 면의 가운데에서 음압의 크기가 일정하지 않고 골을 형성하고 있음을 알 수 있다.

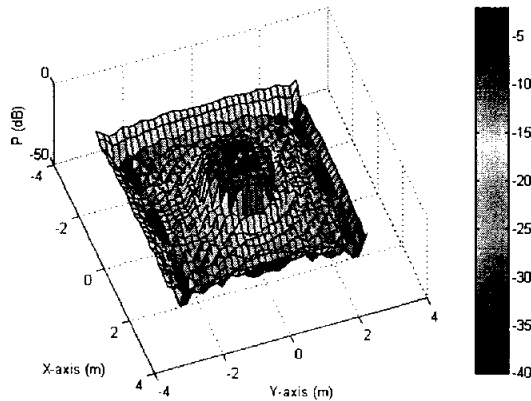
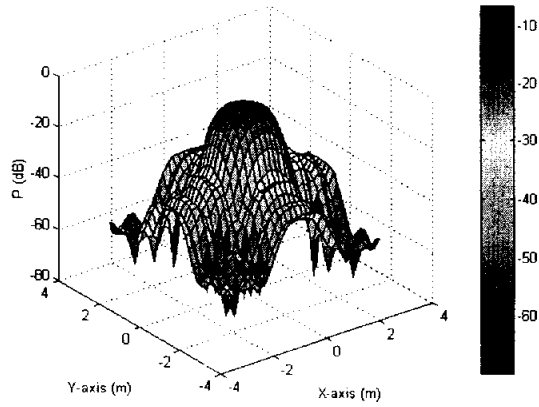


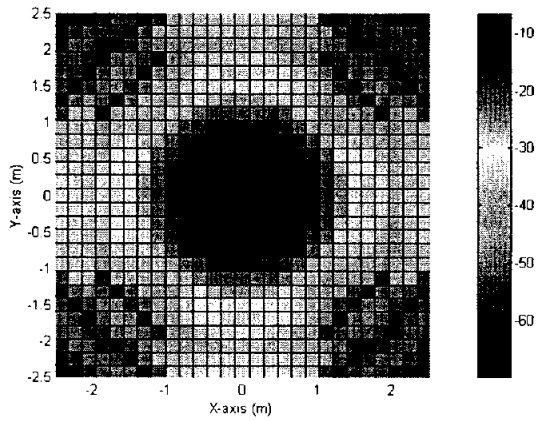
그림 41. 파수 공간 필터를 적용하지 않은 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포 (단일 음원).

Figure 41. Sound field on a spatial domain of sound source plane without a wavenumber space filter(single sound source).

이는 앞장에서 기술한 바와 같이, 후방 전파시 발생하는 오차에 기인하며, 파수 공간 필터를 적용한 음원 면에서의 음장 분포 결과는 그림 42와 같이 식 (99)에서 음압의 크기를 일정하게 설정한 것과 일치한다. 그리고 음원과 배플의 경계면에서 음압의 크기가 감소하기 시작하여 음원을 벗어난 배플 영역에서는 음압의 크기가 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

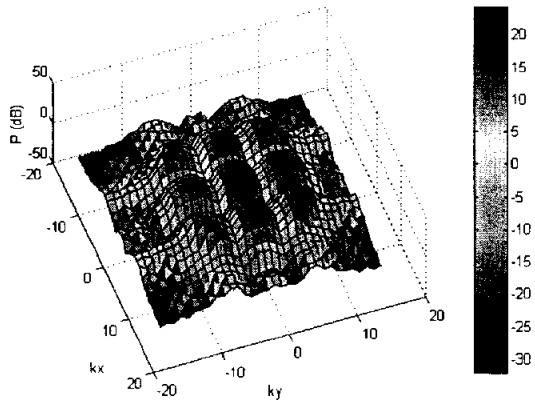
그림 42. 파수 공간 필터를 적용한 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포(단일 음원), (a) 3차원 결과, (b) X-Y 평면의 2차원 결과.

Figure 42. Sound field on a spatial domain of sound source plane using a wavenumber space filter(single sound source), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of X-Y plane.

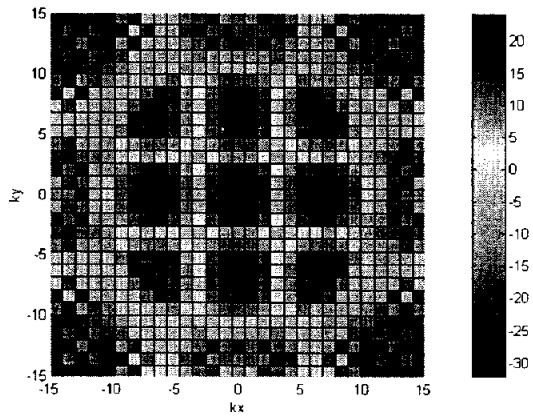
2. 원판형 진동체 4개로 구성된 음원의 경우

음원이 4개로 구성된 경우, 수치 모의 실험에 사용한 원판형 진동체의 반경은 0.3 m, 배열 간격 d_s 는 0.9 m 로 하였다(그림 37 참조). 홀로그래프 평면에서의 샘플링 간격을 단일 음원의 경우와 동일하게 유지하기 위해 공간 주파수 k_0 는 10.5로 고정하였으며, 홀로그래프 평면의 크기, 기준 센서 및 홀로그래프 평면의 구성 등의 조건들은 단일 음원의 경우와 동일하게 설정하였다.

그림 43의 공간 주파수 영역에서의 음장 분포를 살펴보면, 방사원이 형성되고 방사원 내부에는 배열 음원에 의한 여러 개의 작은 봉우리가 나타나고 있다. 방사원 내부의 음장은 단일 음원의 경우와 마찬가지로 공간 주파수 영역의 방사원 중심에서 가장 크게 나타나고 있으며, 배열된 음원들의 상호 간섭에 의한 현상들을 쉽게 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 43. 홀로그램 평면의 공간 주파수 영역에서의 음장 분포(음원 4개), (a) 3차원 결과, (b) $k_x - k_y$ 평면의 2차원 결과.

Figure 43. Sound field on a spatial frequency domain of hologram plane (4 sound sources), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of $k_x - k_y$ plane.

그리고 그림 44는 파수 공간 필터를 적용하지 않은 경우로서 음원의 구분이 명확하지 않으나, 파수 공간 필터를 적용한 그림 45에서는 음원 면에서의 음장 분포가 명확하게 나타나고 있으며, 음원의 위치와 음압의 상대적인 크기를 정확히 나타내고 있음을 알 수 있다.

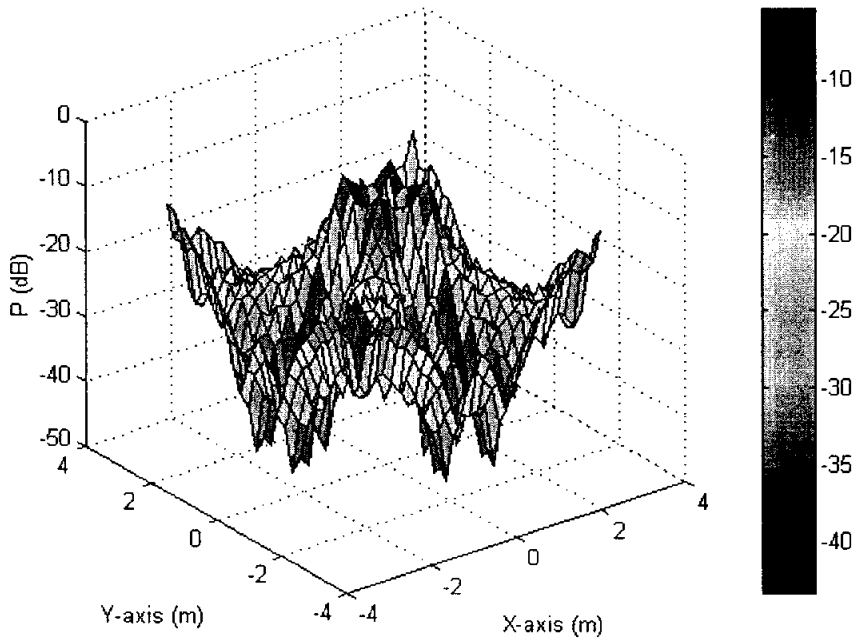
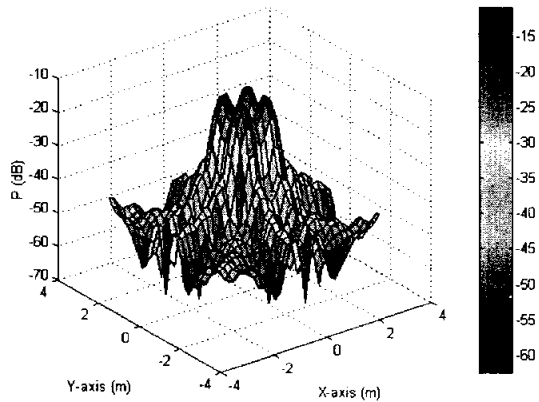


그림 44. 파수 공간 필터를 적용하지 않은 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포 (음원 4개).

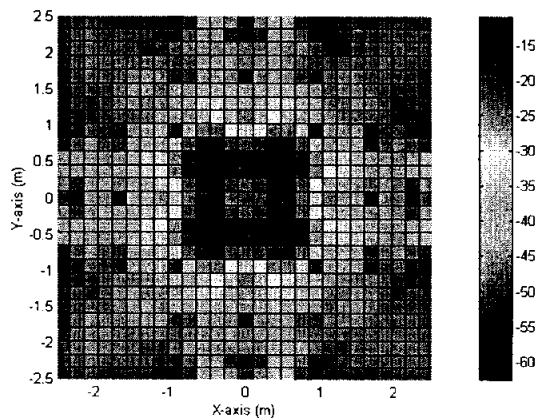
Figure 44. Sound field on a spatial domain of sound source plane without a wavenumber space filter(4 sound sources).

이상과 같이 원판형 진동체의 단일 음원과 4개로 배열된 배열 음원의 수치 모의 실험 결과, 음원 면에서의 음장 분포 결과는 파수 공간 필터를 적용함으로써 음원들의 위치와 음압의 상대적인 크기를 정확하게 나타내고 있으며 본 논문에서 적용한 이론의 타당성과 소음원의 식별, 소나와 같은 배열 음원의 음장 해석 등 다양한

활용 가능성을 확인하였다. 또한 공간 주파수 영역에서의 음장 분포를 가시화 함으로서 음원 들 간의 간섭 현상과 파동의 분석이 가능하고, 기준 센서를 적용함으로써 측정 횟수를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다[74].



(a)



(b)

그림 45. 파수 공간 필터를 적용한 음원 면의 공간 영역에서의 음장 분포(음원 4개), (a) 3차원 결과, (b) X-Y 평면의 2차원 결과.

Figure 45. Sound field on a spatial domain of sound source plane using a wavenumber space filter(4 sound sources), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of X-Y plane.

3.4. 수중 실험을 통한 결과 고찰

3.4.1 수중 음원의 위치 추정을 위한 실험 및 장비 구성

수중에 있는 음원의 위치를 추정하기 위한 측정 시스템의 구성도는 그림 46과 같다. 여기서 음원은 구형 센서인 ITC 1001(직경 10.795 cm, 그림 47 참조) 2개를 사용하였다. 이때 음원으로 사용한 ITC 1001의 송신전압감도는 그림 51과 같으며, 그림 46의 구성도에 표시한 음원 1이 음원 2에 비해 송신전압감도가 전 측정 주파수 대역에서 다소 높게 나타나고 있다.

그리고 배열 간격 d_s 는 20 cm, 수심은 2.54 m로 같은 깊이에 설치하고 음원으로부터 7.2 cm (Z_k , 0.48λ) 떨어진 지점에 홀로그래프 평면을 구성하였다. 음원 위치의 추정을 위해서는 음원으로부터 거리가 멀어질 수록 급격히 감소하는 소멸파를 측정하는 것이 중요하므로 음원과 홀로그래프 평면과의 거리는 최대한 음원 근처에 설치하였다. 기준 센서와 홀로그래프 평면을 구성하는 센서들은 센서들간에 음향 간섭을 최소화할 수 있도록 크기가 작아야 하며, 따라서 본 논문의 실험에서는 직경 0.95 cm, 길이 2.5 cm인 B&K 8103을 사용하였다. B&K 8103은 100 kHz 이하의 주파수에서는 수평과 수직면상에서 1 dB 이내의 무지향성 빔(beam) 특성을 갖고 있어 홀로그래프 평면 내의 위치에 따른 지향 특성에 의한 영향을 무시할 수 있다[75].

홀로그래프 평면의 센서 간격은 음원의 크기에 대한 해상도와 공간상의 엘리머싱을 고려하여 3.5 cm로 하였으며, 배열 수는 가로 24 지점, 세로 24 지점으로 총 576 지점으로 구성하였다(홀로그래프 평면의 크기; 80.5 cm $\times$ 80.5 cm). 7개의 B&K 8103 센서를 7 cm 간격으로 선배열을 구성(그림 48 참조)하였으며 선배열 센서를 상하, 좌우로 이동하여 홀로그래프 평면을 구성하였다.

상하 이동을 위해 선배열 지지봉 4곳에 고정구와 연결판을 제작하였으며, 수평 이동을 위해서 이동 레일을 마련하였다. 기준 센서는 2개의 음원 센서 중심에 설치하여 기준 센서와 홀로그래프 평면에서의 센서들에 대한 상호 파워 스펙트럼을 측정하도록 하였다.

실험 시 발생할 수 있는 오차는 측정을 원하는 위치와 실제 측정 위치가 다르기 때문에 생기는 측정 위치의 부정확성(position mismatch)에 의한 오차와 여러 개의 센서를 사용하여 음장을 측정할 때 각 센서의 특성이 다르기 때문에 발생하는 센서간의 특성 차이(sensor mismatch)에 의한 오차가 있다[72]. 특히 수중에서의 실험은 육상에서 센서들의 설치와 이동을 조정하기 때문에 실제 수중에 설치된 센서들의 위치는 오차를 포함할 수 있다. 본 논문의 실험에서 수심은 선배열 센서의 길이를 고려하면 최대 2.96 m 로서(육상부 센서 이동 레일까지는 약 4 m) 센서가 설치된 위치에서는 수 cm의 오차가 발생할 수 있으며, 이러한 위치 오차는 음원과 홀로그래프 평면간의 거리가 근접되어 있기 때문에 추정 결과에 큰 오차로 작용할 수 있다.

설치 수심을 최대한 낮게 하면 수중에서의 위치 오차를 줄이는 것이 가능 하나, 수면으로부터의 반사파의 영향으로 수면 근처에 센서 설치하는 바람직하지 않다. 따라서 본 실험에서는 설치 및 이동 오차를 최소화하기 위해 기준 센서와 홀로그래프 평면을 구성하는 선배열 센서 아래에 무거운 추를 달아 가능한 수직으로 위치하도록 하여 육상과 수중에서의 위치가 가능한 동일하도록 하여 측정 위치의 부정확성에 의한 오차를 최소화하도록 하였다.

다수의 B&K 8103 센서 중에서 홀로그래프 평면을 구성할 7개 센서를 선정하기 위해 먼저 공기 중에서 임피던스 측정으로 1차 선정하고 수중에서의 수신전압감도(Receiving Voltage Response; RVS)를 측정(측정 결과; 그림 50 참조)하여 이중 RVS 특성이 유사한 것을 선정하였다. 음향 수조 벽면 등에서의 반사파 영향을 제거하기 위하여 펄스 폭이 2 ms인 톤 버스트 신호를 사용하였다. 신호발생기(HP 3314A)에서 음파를 발생하여 전력증폭기(B&K 2713A)를 통해 2개의 음원으로 분기하여 인가하였다.

그리고 기준 센서에서의 신호와 홀로그래프 평면을 구성하는 선배열 센서에서의 신호를 동시에 FFT 처리(rectangular window 사용)하여 상호 파워 스펙트럼을 순차적으로 측정하였다. 그림 49는 상호 파워 스펙트럼의 측정을 위한 기준 센서와 홀로그래프 평면 내의 수신기에서의 음압의 크기와 위상의 측정 화면이다.

수신 센서들의 수신 감도가 동일하지 않으므로 상호 파워 스펙트럼은 센서들의

주파수별 RVS 특성치를 보상하여 센서들의 위치에서의 음압 준위 (sound pressure level)로부터 구하여 센서간 특성 차이에 의한 오차를 제거하였다.

실험에 사용한 주파수는 5 kHz 에서 20 kHz 까지 1 kHz 간격으로 하였으며, (ITC 1001의 공진 주파수 18 kHz) 배열 간격 3.5 cm 는 상기 주파수에 대해 공간 상의 엘리어싱을 충분히 배제할 수 있다($d < Z_h$ 이고 $d \leq \lambda/2$ ($= 3.75$ cm, $f = 20$ kHz, 수중에서의 음속 1500m/s로 가정)의 Nyquist 조건을 만족).

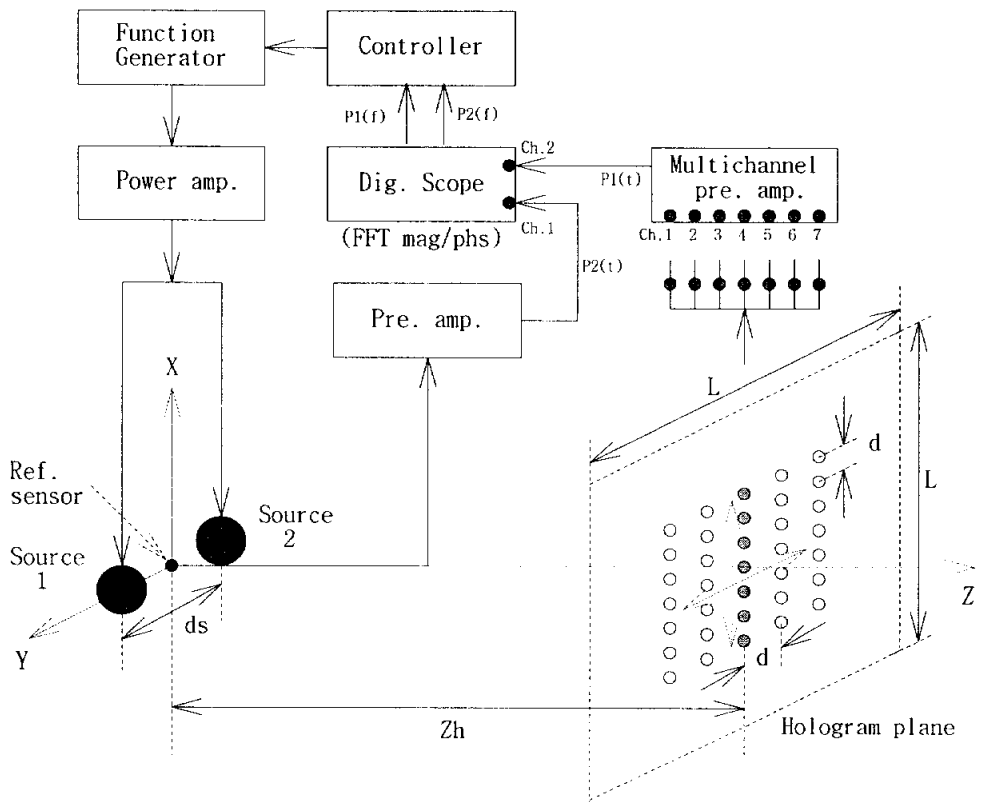


그림 46. 근거리 음장 측정 시스템 구성도.

Figure 46. Schematic diagram of the measurement system for sound field in near-field.



그림 47. 수중에 설치된 음원과 센서.

Figure 47. Sound sources and sensors installed in water.

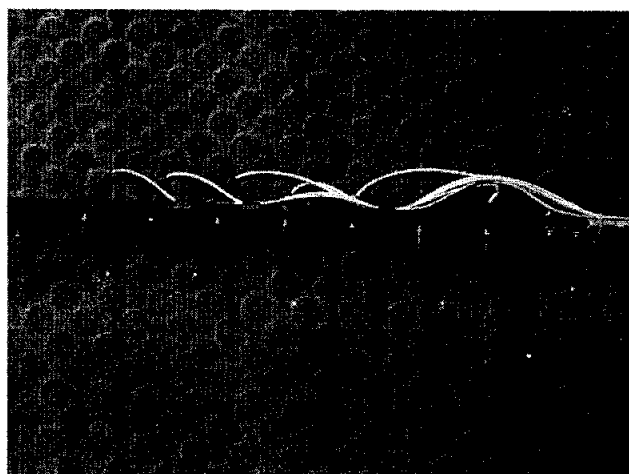


그림 48. 홀로그램 평면 내의 선배열 센서.

Figure 48. Line array sensor in hologram plane.

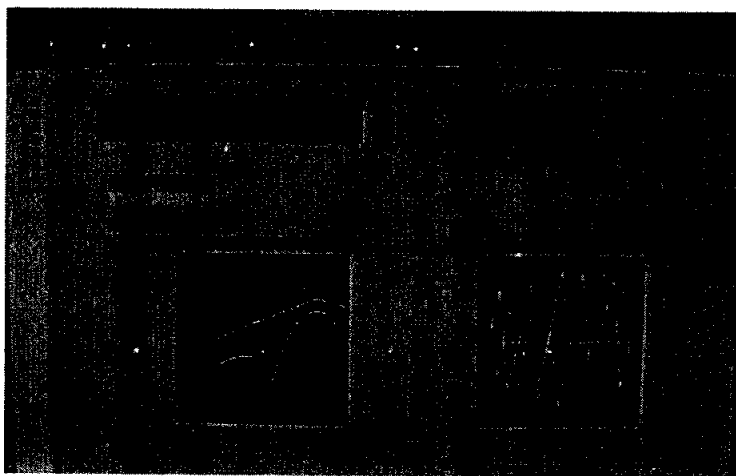


그림 49. 복소 음압 측정 화면.

Figure 49. Display for the measurement of complex pressure.

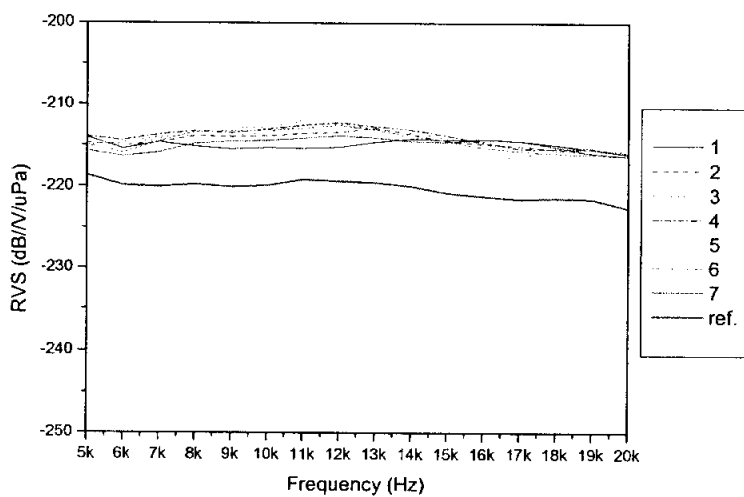


그림 50. B&K8103 센서들의 수신전압감도.

Figure 50. Receiving voltage sensitivity of B&K8103 hydrophones.

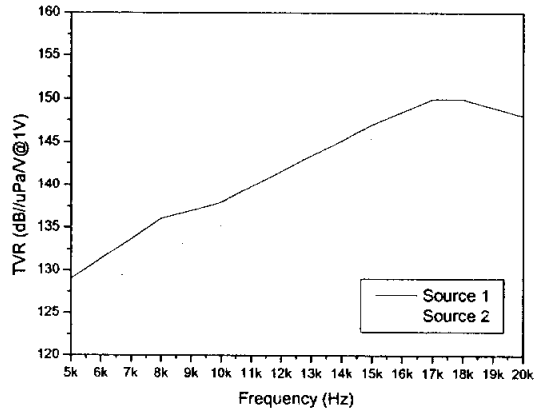


그림 51. ITC 1001 음원 센서들의 송신전압감도.

Figure 51. Transmitting voltage response of ITC 1001 sound sources.

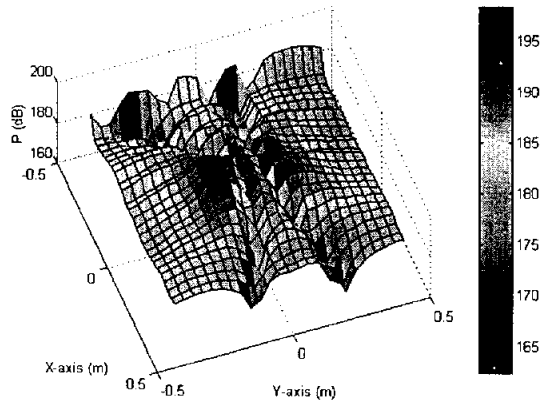
3.4.2 수중 실험 결과 및 고찰

앞에서 설명한 실험 구성에서의 실험 결과는 그림 52에서 그림 56과 같다. 주파수는 5 kHz 에서 20 kHz 까지 1 kHz의 간격으로 실험을 하였으며, 음원 준위가 낮아 측정 신호가 미약했던 5 kHz를 제외하고는 유사한 결과를 보이므로 주파수 10 kHz에서의 결과(그림 52 ~ 그림 55)와 20 kHz에서의 결과(그림 56)를 제시하였다. 그림 52는 홀로그램 평면에서 측정된 상호 파워 스펙트럼으로부터 구한 홀로그램 평면에서의 음압에 대한 음장 분포이며, 이로부터 구한 공간 주파수(파수) 영역에서의 결과는 그림 53과 같다.

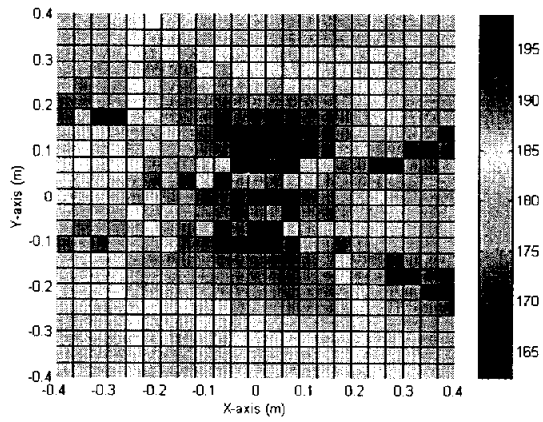
그림 53에서 보는바와 같이 방사원이 $k_0 = 41.9$ (주파수 10 kHz에 해당) 에서 형성되고 있으나 방사원 형태가 뚜렷하지 않고 방사원 외부의 파수 영역에서 상대적으로 큰 음장이 형성되고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 52의 홀로그램 평면에서의 음장 분포 측정에서도 알 수 있듯이 측정 자체가 깨끗하지 못 한데서 기인한다. 무지향성 음원의 사용으로 음장이 넓게 분포되고 크기의 구분이 뚜렷하지 않았으

며, 측정 오차가 많이 포함된 것으로 판단된다.

그림 54는 파수 공간 필터를 적용하지 않은 음원 영역에서의 음장 분포로서, 위에 기술한 이유로 인해 음원의 위치를 구분할 수 없으나, 파수 공간 필터를 적용한 그림 55에서는 2개의 음원이 명확하게 구분되고 있음을 알 수 있다. 따라서 측정 오차 등에 의해 측정 상태가 좋지 않은 경우에도 음원의 위치를 정확하게 나타낼 수 있으며, 각 음원에서 발생한 상대적인 음원 준위(source level)의 크기를 비교할 수 있다. 음원 준위가 다른 2개의 음원 중 +Y 축에 위치한 음원 1의 음원 준위는 185.9 dB로서 음원 2의 음원 준위 182.1 dB에 비해 3.8 dB 높게 나타나고 있으며, 이는 그림 51의 송신전압감도에서 3 dB 높게 나타난 결과와 일치한다. 그리고 그림 55의 (b)에서 두 개의 점선으로 그린 원은 음원을 설치시의 예상된 위치를 나타내었는데, 실제 음원 2의 설치된 위치가 약 3 cm 정도 가운데로 치우쳐져 있음을 알 수 있다. 그림 56은 20 kHz($k_0 = 83.8$)에 대한 음원 영역에서의 음장 분포로서 두 음원이 구분이 되고 있으며, 10 kHz의 결과와 유사한 결과를 보인다. 이러한 실험 결과로부터 개별 소음원의 위치와 발생한 소음의 기여도 분석이 가능함을 알 수 있다.



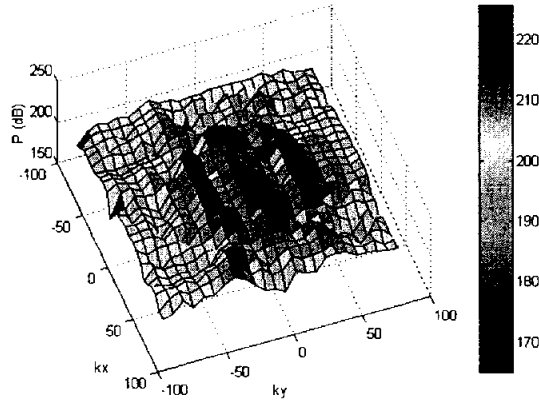
(a)



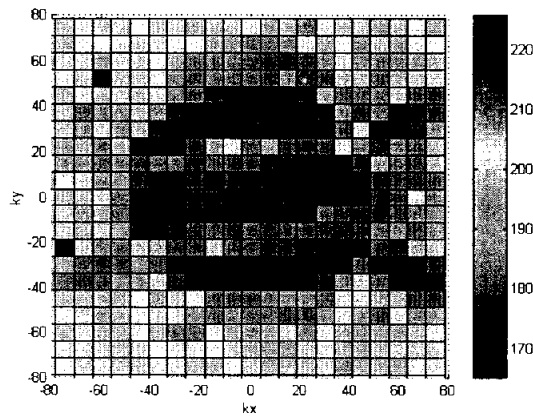
(b)

그림 52. 홀로그래프 평면에서의 음장분포(10 kHz), (a) 3차원 결과, (b) X-Y 평면의 2차원 결과.

Figure 52. Sound field on the hologram plane(10 kHz), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of X-Y plane.



(a)



(b)

그림 53. 홀로그래프 평면의 공간 주파수 영역에서의 음장분포($k_0 = 41.9$), (a) 3차원 결과, (b) $k_x - k_y$ 평면의 2차원 결과.

Figure 53. Sound field on the spatial frequency domain of hologram plane($k_0 = 41.9$), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of $k_x - k_y$ plane.

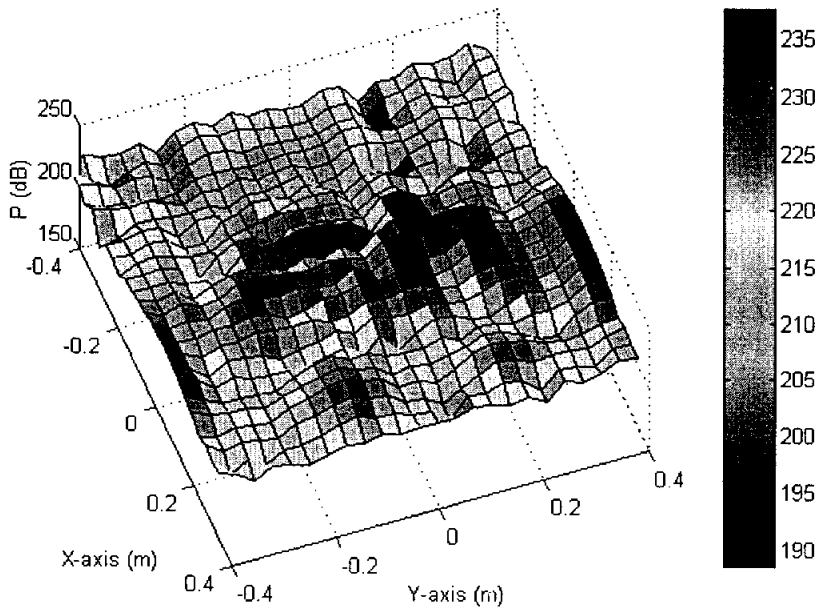
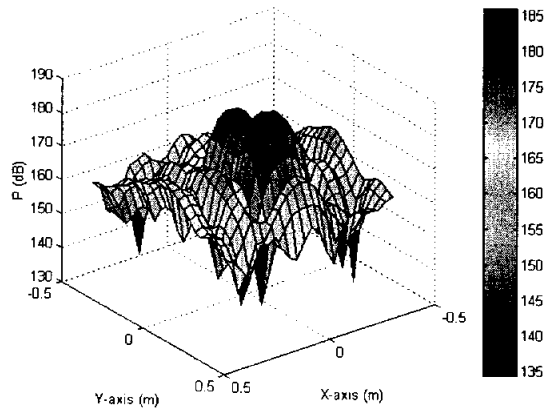
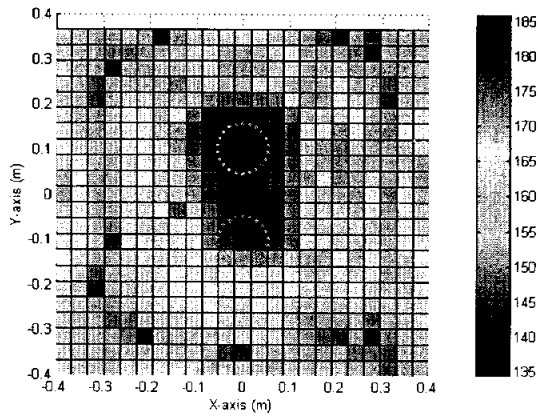


그림 54. 파수 공간 필터를 적용하지 않은 음원 영역에서의 음장 분포(10 kHz).
 Figure 54. Sound field on the source region without a wavenumber space filter(10 kHz).



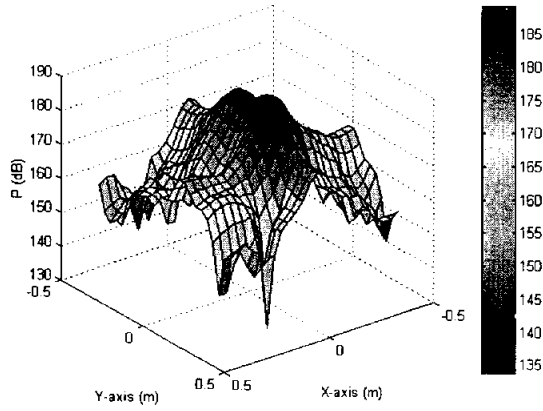
(a)



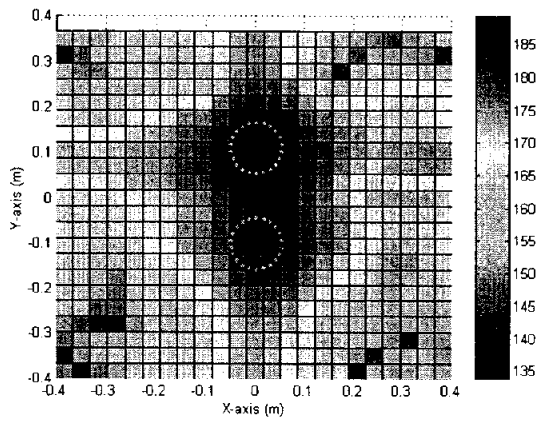
(b)

그림 55. 파수 공간 필터를 적용한 음원 영역에서의 음장 분포(10 kHz), (a) 3차원 결과, (b) X-Y 평면의 2차원 결과.

Figure 55. Sound field on the source region using a wavenumber space filter (10 kHz), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of X-Y plane.



(a)



(b)

그림 56. 파수 공간 필터를 적용한 음원 영역에서의 음장 분포(20 kHz), (a) 3차원 결과, (b) X-Y 평면의 2차원 결과.

Figure 56. Sound field on the source region using a wavenumber space filter (20 kHz), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of X-Y plane.

3.5. 음원과 홀로그램 평면간의 거리

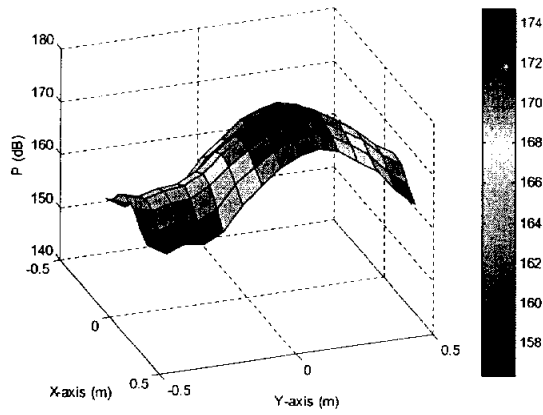
그림 57은 음원과 홀로그램 평면과의 거리가 16 cm이고 7 cm 간격으로 가로 15 지점, 세로 7 지점으로 홀로그램 평면을 구성하여 주파수 10 kHz에서 측정한 경우의 음원 영역에서의 음장 분포 추정 결과인데, 이 경우에는 음원이 하나만 나타나고 음원의 구분이 나타나지 않고 있다. 홀로그램 평면의 크기는 $98\text{ cm} \times 42\text{ cm}$ 로서 음원이 놓인 Y 축상의 홀로그램 평면의 크기는 3.4 절에서의 경우 보다 더 크나 음원과 홀로그램 평면과의 거리도 증가되어 있다. 따라서 파수 공간 필터를 적용하더라도 소멸파가 측정되지 않으면 음원의 구분이 어려움을 알 수 있다. 음원 영역에서의 음장 분포로부터 음원을 추정하기 위해서는 음원 근처에서만 존재하는 소멸파를 측정해야 하며, 따라서 소멸파를 측정하기 위해서는 음원에 가능한 근접해야 하므로 음원과 홀로그램 평면간의 거리는 중요한 요소임을 알 수 있다.

따라서, 앞에서 살펴본 수치 모의 실험 결과와 수중 실험 결과를 음원과 홀로그램 평면간의 거리 Z_h 에 대해 요약하면 표 4와 같다. 여기서 Z_h 는 파장 λ 에 대한 비로서 거리를 표시하였으며, 모의 실험은 3.3 절의 결과이고, 수중 실험 1은 3.4 절의 결과 그리고 수중 실험 2는 3.5 절의 실험 결과를 의미한다. 표 4에서 보는 바와 같이 1 파장 이내의 거리에서는 음원이 구분이 가능하며, 따라서 홀로그램 평면은 음원으로부터 1 파장 이내에 위치하여야 함을 알 수 있다.

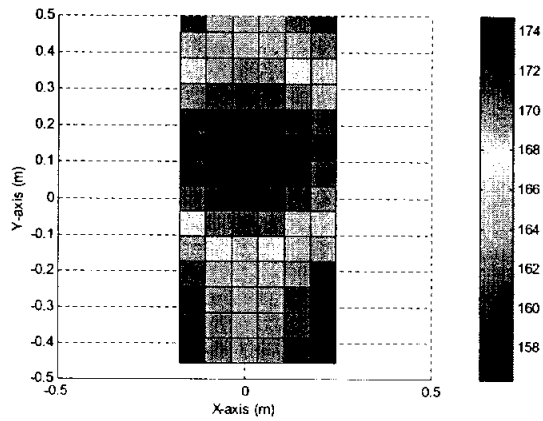
표 4. 음원과 홀로그램 평면의 거리에 따른 음원 위치 추정 결과.

Table 4. Result of the sound source positional estimation with respect to distance between hologram plane and sound source.

구분	k_0	Z_h	음원 위치 추정 결과
모의 실험	10.5	$\lambda/3$	음원 구분 가능
수중 실험 1	41.9	0.48λ	
수중 실험 1	83.8	0.96λ	
수중 실험 2	41.9	1.07λ	음원 분리 불가



(a)



(b)

그림 57. 파수 공간 필터를 적용한 음원 영역에서의 음장 분포(10 kHz, 15×7 , $Z_h = 16$ cm), (a) 3차원 결과, (b) X-Y 평면의 2차원 결과.

Figure 57. Sound field on the source region using a wavenumber space filter (10 kHz, 15×7 , $Z_h = 16$ cm), (a) result in 3-dimension, (b) result in 2-dimension of X-Y plane.

이상과 같이 음원 근처의 근거리 음장을 측정하고 공간 변환 이론을 적용하여 수중에 위치한 음원의 위치를 추정하기 위한 실험의 결과는 파수 공간 필터를 적용함으로써 음원의 위치와 음원준위의 상대적 크기를 정확하게 추정하고 있다. 따라서 근거리 음압의 공간 변환 이론을 적용하여 수중 소음원의 위치 추정과 개별 소음원의 기여도 분석이 가능함을 보였다.

수중에서의 위치 오차를 줄이고 실험에 소요되는 시간을 줄이기 위해서는 다수의 센서를 평면 배열하여 홀로그래프 평면을 구성하는 것이 필요하며, 음원 위치의 정확한 추정을 위해서는 홀로그래프 평면의 크기, 홀로그래프 평면을 구성하는 센서들의 간격도 중요하지만 음원 근처에서만 존재하는 소멸파를 측정해야 위치 추정이 가능하므로 음원과 홀로그래프 평면과의 거리가 가장 중요한 요소임을 본 논문의 결과로부터 알 수 있다[76].

제 4 장 결 론

근거리 음장을 이용하여 원거리에서의 음장을 예측하기 위해서는 근거리 음장 측정시 측정 지점수의 최적화로 효율적인 예측 기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 측정 지점수에 대한 의존 함수를 분석하고, 최적 측정 지점수에 대한 기준을 제시하였으며, 수중 실험과 모의 실험을 통해 결과를 입증하였다.

그리고 근거리 음장에서 음원의 위치를 추정하는데 있어서, 홀로그램 평면에서 측정된 상호 파워 스펙트럼을 음압 분포로 변환이 필요하며, 따라서 본 논문에서는 상호 파워 스펙트럼을 음압 분포로 변환하기 위한 비선형 방정식의 해를 구하는 방법을 제시하였다. 그리고 근거리 음향 홀로그래피에서 역 방향 전파시 발생하는 오차를 분석하고 이를 제거하기 위한 파수 공간 필터를 제안하였으며, 음원과 홀로그램 평면간의 거리에 대한 조건을 제시하였다. 이에 대한 모의 실험을 수행하였으며, 수중에서의 실험을 통해 결과를 입증하였다.

본 논문의 각 장에서의 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

제 1장에서는 본 논문의 문제점 제기와 이에 대한 역사적 배경 그리고 연구 필요성과 구성에 관하여 기술하였다.

제 2장에서는 근거리 음장을 이용하여 원거리 음장 예측에 대한 연구 내용을 기술하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

원거리에서의 음장 예측을 위해 경계배치법을 이용하였으며, 음측 상에서의 2차원 음장을 예측하는 경우에는, 음원을 둘러싼 폐곡선 상에서 근거리 음장을 측정하면 되므로 폐곡면 상에서 모든 음장을 측정하는 일반적인 경우에 비해 측정 지점의 수가 크게 감소함을 확인하였으며, 2가지 형태의 수중 음원에 대한 실험을 통해 정확한 원거리 음장의 예측이 가능함을 보였다.

실제 실험에 적용한 음원은 비교적 단순한 음장분포를 갖는 선배열 음원과 원추형 배플 내에 선배열 음원으로 구성된 원추형 음원을 사용하였으며, 근거리 음장의 측정 결과를 사용하여 원거리에서 예측한 음장분포는 원거리에서의 음장 측정 결과는 kL 이 12.4인 선배열 음원의 경우에는 주엽에서 0.01 dB 그리고 부엽에서 최대 0.47 dB의 오차로 좋은 일치를 보여주고 있으며, kL 이 75.4인 원추형 음원의

경우에는 주엽에서 3 dB, 부엽에서 최대 2 dB의 오차로 선배열 음원의 경우 보다는 오차가 크나 전반적인 음장 분포 형태는 거의 일치하고 있다.

근거리에서 측정된 음장 분포 자료를 활용하여 원거리에서의 음장 분포를 예측하기 위해서는 근거리에서의 측정 지점수를 최적화하는 것이 필요하며, 정확한 음장 예측을 위한 최적의 측정 지점수에 대해 결과를 도출하였다. 선배열 음원의 경우에는 kL 이 12.4일 때 정확한 원거리 음장의 예측은 측정 지점수가 13개 이상에서 이루어지고 있으며, 원추형 음원의 경우에는 kL 이 75.4이고 측정 지점수는 93개 이상에서 음장 예측이 가능함을 알 수 있어, 최적 측정 지점수는 음원의 주파수와 크기의 무차원 함수인 kL 에 의존하고 있고, 이러한 최적 측정 지점수는 kL 에 비례하나 음원의 기하학적 형태 또는 지향 특성에 따라 kL 의 의존성이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

선배열 음원에 대한 파동 함수를 전개하고, 음원의 특성 상수의 누적 특성으로부터 최적 측정 지점수에 대한 kL 의 함수를 수식화하였으며, kL 에 대한 의존도를 밝혔다. kL 이 15.8 보다 작은 경우에는 최적 측정 지점수는 kL 보다 많아야 되나 kL 이 증가하면서 0.54 kL 로 수렴함을 보였다. 이러한 결과는 측정 지점수에 따른 수중 실험의 예측 결과와도 일치하고 있다. 실제로 kL 이 작은 경우에는 측정 지점수의 증가가 문제가 되지 않으나, kL 이 큰 경우, kL 이 커진 만큼 측정 지점수가 증가하기 때문에 측정의 어려움이 많이 수반된다. 기존의 연구에서는 최적 측정 지점수는 kL 보다 커야한다고 하고 있으나, 측정 지점수를 기존의 경우 보다 반 정도 줄여도 정확한 음장 예측이 가능함을 본 논문의 결과로부터 알 수 있었다.

제 3장에서는 근거리 음장에서 음원의 위치를 추정하기 위한 연구 내용을 기술하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

음장이 시간에 따라 음압의 크기가 변하는 경우에, 근거리 음장의 측정을 위해서는 홀로그래프 평면에서의 모든 지점에서 동시 측정이 요구되나, 정상상태에 있는 음원의 경우, 상호 파워 스펙트럼의 순차적인 측정으로부터 동시 측정의 제한 요소를 극복할 수 있음을 확인하였다.

그리고 홀로그래프 평면에서의 측정된 음압에 대한 상호 파워 스펙트럼을 복소 음

압의 분포로 나타내기 위해 비선형 방정식의 해를 구해야 하며, 이를 위해 Taylor 급수 전개와 Newton-Raphson 법을 사용하여 해를 구하기 위한 방법을 제시하였다. 또한 기준 센서를 적용함으로써 기준 센서를 적용하지 않는 경우보다 측정 횟수를 512배 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

그리고 역방향 전파시 발생하는 오차를 분석하고 이러한 오차를 제거하기 위해 소멸파의 영향을 줄이고 진행파의 영향을 증대시키기 위한 파수 공간 필터를 제안하였으며, 모의 실험과 수중에서의 실험 결과로부터 유용성을 입증하였다. 측정 오차가 포함된 수중 배열 음원에 대한 실험 결과, 파수가 41.9에서 추정 오차는 0.8 dB이었으며, 본 논문에서 제안한 파수 공간 필터를 적용함으로써 열악한 시험 환경에서도 음원의 위치 추정과 음원의 음압 분포의 상대적인 크기를 정확하게 나타낼 수 있어 소음원의 위치 추정 및 기여도 분석에 적용이 가능함을 보였다.

음원 위치의 정확한 추정을 위해서는 홀로그래프 평면의 크기, 홀로그래프 평면을 구성하는 센서들의 간격도 중요하지만, 음원 근처에서만 존재하는 소멸파를 측정해야 정확한 위치 추정이 가능하므로 음원과 홀로그래프 평면과의 거리가 가장 중요한 요소이다. 일반적으로 홀로그래프 평면의 크기, 측정 평면 내의 배열 간격에 대한 조건을 알려져 있으나, 홀로그래프 평면과 음원과의 거리 조건은 음원에 근접해야 한다는 정도만이 알려져 있었다. 파수가 10.5, 41.9 그리고 83.8에서의 모의 실험과 수중에서의 실험 결과로부터 홀로그래프 평면은 음원으로부터 1 파장 이내에 위치하여야 함을 알 수 있었다.

따라서 원거리 음장 예측에 대한 본 논문의 결과는 수상함 또는 잠수함의 방사 소음 및 표적 강도에 대한 원거리 음장 해석과 대형의 능동 소나에 대한 원거리 음장 해석에 활용할 수 있으며, 특히 본 논문에서 제안된 최적 측정 지점수는 근거리 음장의 측정 배열을 구성하는데 활용되어 최적의 측정 배열 구성이 가능할 것으로 기대된다.

그리고 음원 위치의 추정을 위해 본 논문에서 제안한 파수 공간 필터와 홀로그래프 평면의 거리 조건은 추정된 음원 위치의 해상도 개선에 기여할 것으로 기대되며, 이러한 본 논문의 결과는 수중 소음원의 3차원 방사 음장을 가시화하여 수중 소음원의 주파수 및 방사 특성의 예측에 활용이 가능하고, 수중 소음원을 구성하는

개별 소음원의 기여량 분석으로 잠수함의 노출을 최소화하는데 기여가 가능할 것으로 기대된다. 또한 음원 위치의 추정을 능동 소나의 결손 소자 분석에 활용하면 소나의 성능 저하 요소를 차단할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (third edition, McGraw-Hill, New York, 1983).
- [2] A. D. Waite, *Sonar for Practicing Engineers* (third edition, John Wiley & Sons., 2002).
- [3] T. Crancy, *Submarine, A Guide Tour Inside a Nuclear Warship* (Berkley Books, New York, 1993).
- [4] H. A. Jackson, "The Influence of the USS ALBACORE on Submarine design", *Warship International Symposium on Naval Submarines*, (2), 1-10, May 1993.
- [5] B. Garnier, B. Allgeyer, and G. Lauro, "Nearfield Acoustic Methods in the Dockyard as a Tool to Improve Signature Management of Submarines", *Undersea Defence Technology*, 124-127, June 1993.
- [6] J. K. Maior, *Physics of Sound in the Sea, Part III Reflection of Sound from Submarines and Surface Vessels* (Gordon & Breach Science Pub., Washington, D. C., 1969).
- [7] 신기철, 김재수, 김우식, 김원호, 김용연, "수중 축소표적의 음향산란에 관한 연구 - 실험과 분석", *한국해양공학회지*, 12(4), 92-100, 1998.
- [8] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppins, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (third edition, John Wiley & Sons, 1982).
- [9] S. Zimmerman, *Submarine Design for the 21st Century* (Pasha Publication, 1993).
- [10] J. Pachner, "On the Dependence of Directivity from the Emitter", *J. Acoust. Soc. Am.*, 28(1), 86-90, 1956.
- [11] C. W. Horton, and Jr., G. S. Innis, "The Computation of Far-Field Radiation Patterns from Measurements Made near the Source", *J. Acoust. Soc. Am.*, 33(7), 877-880, 1961.

- [12] C. W. Horton, "Acoustic Impedance of an Outgoing Cylindrical Wave", *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**, 1663, 1962.
- [13] D. D. Baker, "Determination of Far-field Characteristics of Large Underwater Sound Transducers from Near-Field Measurements", *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**(11), 1737-1744, 1962.
- [14] D. D. Baker, "Computation of Far-field Characteristics of Transducers from Near-Field Measurements", *U.S. Navy Journal of Underwater Acoustics*, **14**(3), 525-547, 1964.
- [15] W. J. Trott, "Transducer Calibration from Near-Field Data", *Navy Underwater Sound Reference Laboratory Research Report. [AD-265 449]*, (55), 1961.
- [16] W. J. Trott, "Underwater-Sound-Transducer Calibration from Nearfield Data", *J. Acoust. Soc. Am.*, **36**(8), 1557-1568, 1964.
- [17] W. J. Trott, and I. D. Groves, "Application of the Near-Field Array Technique to Sonar Evaluation", *Naval Research Laboratory Report 6734. [AD-669 4331]*, 501-523, 1968.
- [18] A. L. Van Buren, "Theoretical Design of Nearfield Calibration Arrays", *J. Acoust. Soc. Am.*, **53**(1), 192-199, 1973.
- [19] A. L. Van Buren, "Cylindrical Nearfield Calibration Array", *J. Acoust. Soc. Am.*, **56**(3), 849-855, 1974.
- [20] A. L. Van Buren, M. D. Jevnager, and A. C. Tims, "A 5- to 50-kHz Synthetic Cylindrical Nearfield Calibration Array", *J. Acoust. Soc. Am.*, **77**(5), 1927-1932, 1985.
- [21] A. L. Van Buren, "Steered Planar Nearfield Calibration Array", *J. Acoust. Soc. Am.*, **63**(4), 1052-1059, 1978.
- [22] R. D. Marciniak, "A Nearfield, Underwater Measurement System", *J. Acoust. Soc. Am.*, **66**(4), 955-964, 1979.
- [23] A. L. Van Buren, "Spherical Nearfield Calibration Array for

- Three-Dimensional Scanning", *J. Acoust. Soc. Am.*, **85**(6), 2655-2660, 1989.
- [24] A. L. Van Buren, "Near-Field Transmitting and Receiving Properties of Planar Near-Field Calibration Arrays", *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**(3), 1423-1427, 1991.
- [25] A. L. Van Buren, "Near-field Calibration Arrays for Acoustic Wavefield Determination", *IEEE Trans. Instrumentation Meas.*, **41**(1), 22-26, 1992.
- [26] F. R. Crawford, "Submarine Radiated Noise Far-Field Beam Patterns for Discrete Frequencies from Near-Field Measurements", *Naval Postgraduate School [AD-A020 106]*, 1975.
- [27] D. G. Crighton, A. P. Dowling, J. E. Ffowcs Williams, M. Heckel, and F. G. Leppington, *Modern methods in analytical acoustics*, (Springer-Verlag, 66-70, 1992).
- [28] J. L. Buttler, "Solution of Acoustical Radiation Problems by Boundary Collocation", *J. Acoust. Soc. Am.*, **48**(1), 325-336, 1970.
- [29] A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, "Matched Field Processing: Source Localization in Correlated Noise as an Optimum Parameter Estimation Problem", *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**(2), 571-587, 1988.
- [30] J. L. Krolik, "The Performance of Matched-Field Beamformers with Mediterranean Vertical Array Data", *IEEE Trans. Signal Processing*, **44**(10), 2605-2611, 1996.
- [31] 押野, "音響インテンシティの自動車騒音測定の実用例", *日本音響學會誌*, **43**(12), 975-982, 1987.
- [32] 日高, 安久, 橘, "複素音響インテンシティによる音場解析", *日本音響學會誌*, **43**(12), 994-1000, 1987.
- [33] J. D. Maynard, "Experimental study using Near Field Acoustic Holography of Sound Transmission through Fuselage Sidewall Structures", *Progress Report, Pennsylvania State Univ.*, 1984.
- [34] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, "Nearfield Acoustic

- Holography: I. Theory of Generalized Holography and the Development of NAH", *J. Acoust. Soc. Am.*, **78**(4), 1395-1412, 1985.
- [35] W. A. Veronesi, and J. D. Maynard, "Nearfield Acoustic Holography (NAH) II. Holographic Reconstruction Algorithms and Computer Implementation", *J. Acoust. Soc. Am.*, **81**(5), 1307-1322, 1987.
- [36] M. S. Bartlett, "Smoothing Periodograms from Time Series with Continuous Spectra", *Nature*, **161**, 686-687, 1949.
- [37] J. Capon, "High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis", *Proc. IEEE* **57**(8), 1408-1418, 1969.
- [38] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, **34**(3), 276-280, March 1986.
- [39] 김시문, 김양한, "원통형 음향 홀로그래피를 이용하여 구성한 유도전동기의 방사 음장", *한국소음진동공학회지*, **7**(6), 919-929, 1997.
- [40] F. J. Fahy, *Sound Intensity* (Elsevier Science, England, 1989).
- [41] B. P. Hildebrand, and B. B. Brenden, *An Introduction to Acoustical Holography* (Plenum Press, New York, 1974).
- [42] T. S. Graham, "Long Wavelength Acoustic Holography", *Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University, 1969. Diss. Abs. Int.*, **30**, 3319B, 1970.
- [43] E. E. Watson, "Detection of Sound Radiation from Plates using Long Wavelength Acoustical Holography", *Doctoral Dissertation, The Pennsylvania State University, 1971. Diss. Abs. Int.*, **32**, 6560B, 1972.
- [44] E. G. Williams, J. D. Maynard, and Eugen Skudrzyk, "Sound Source Reconstructions using a Microphone Array", *J. Acoust. Soc. Am.*, **68**(1), 340-344, 1980.
- [45] E. G. Williams, and J. D. Maynard, "Holographic Imaging without the Wavelength Resolution Limit", *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 554-557, 1980.

- [46] P. R. Stepanishen, and K. C. Benjamin, "Forward and Backward Projection of Acoustic Fields using FFT Methods", *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**(4), 803-812, 1982.
- [47] G. B. Parrent, "On the Propagation of Mutual Coherence", *J. Opt. Soc. Am.*, **49**(4), 787-793, 1959.
- [48] H. G. Ferris, "Farfield Radiation Pattern of a Noise Source from Nearfield Measurements", *J. Acoust. Soc. Am.*, **36**, 1597-1598, 1964.
- [49] J. R. Shewell, and E. Wolf, "Inverse Diffraction and a New Reciprocity Theorem", *J. Opt. Soc. Am.*, **58**(12), 1596-1603, 1968.
- [50] E. G. Williams, and H. D. Dardy, "Generalized Nearfield Acoustical Holography for Cylindrical Geometry: Theory and Experiment", *J. Acoust. Soc. Am.*, **81**(2), 389-407, 1987.
- [51] J. Zemanek, "Beam Behavior within the Nearfield of a Vibrating Piston", *J. Acoust. Soc. Am.*, **49**(1), 181-191, 1971.
- [52] M. J. Mason McKemie, "An Experimental Investigation of the Parabolic Reflector as a Nearfield Calibration Device for Underwater Sound Transducers", *The University of Texas at Austin*, August 1978.
- [53] "Basic Methods for the Calibration of Sonar Equipment", *National Defense Research Committee Summary Technical Report*, Washington, D. C., 1946.
- [54] A. D. Pierce, *Acoustics; An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, pp. 27 (McGraw-Hill, 1981).
- [55] R. J. Bobber, *Underwater Electroacoustic Measurements* (Naval Research Laboratory, Washington, D. C., 1970).
- [56] P. M. Morse, and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, pp. 243-409 (McGraw-Hill, 1968).
- [57] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, (Dover Publication, Inc., 1972).

- [58] 김원호, "Boundary Collocation Method에 의한 원거리 음장 예측", *국방기술연구*, 4(2), 90-96, 1998.
- [59] G. B. Arfken, and H. J. Weber, *Mathematical Methods for Physics* (fourth edition, Academic Press, 1995).
- [60] 김원호, 윤종락, "경계배치법(Boundary Collocation Method)에 의한 근거리 음장 자료로부터 원거리 음장의 예측; 최적 측정점 개수의 결정", *한국음향학회지*, 18(6), 31-37, 1999.
- [61] J. Hald, "Non-Stationary STSF", *B&K Technical Review*, (1), 2000.
- [62] J. Hald, "STSF-A Unique Technique for Scan-Based Acoustic Holography without Restrictions on Coherence", *B&K Technical Review*, (1), 1989.
- [63] Per Rasmussen, "Spatial Transformation of Sound Fields", *Sound and Vibration*, 18-24, 1995.
- [64] 김양한, 권휴상, "음향 홀로그래피를 이용한 방사 음장의 전방예측 방법에 관한 기본 이론 및 신호처리 방법", *대한기계학회논문집*, 16(9), 1654-1668, 1992.
- [65] 김시문, 권휴상, 김양한, "원통면 음향 홀로그래피를 이용한 음장예측의 오차 해석 및 적용 방법", *한국소음진동공학학회지*, 5(1), 37-48, 1995.
- [66] 박순홍, 김양한, "개선된 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법과 이동 음원의 방사 소음 가시화에 대한 응용", *한국소음진동공학학회지*, 10(4), 669-678, 2000.
- [67] D. G. Crighton, A. P. Dowling, J. E. Ffowcs Williams, M. Heckel, and F. G. Leppington, *Modern Methods in Analytical Acoustics* (Springer-Verlag, 1992).
- [68] J. Penny, and G. Lindfield, *Numerical Methods using Matlab* (second edition, Prentice-Hall, 2000).
- [69] 김철, 김태국, 신동신, 이승배 공역, *공학도를 위한 수치해석* (3판, McGraw-Hill Korea, 2001).
- [70] 김원호, 윤종락, "근거리 음압의 공간 변환에 의한 음원 면에서의 음장 분포 (I) : 기준 하이드로폰과 크로스 스펙트럼을 이용한 음장 해석", *한국음향학회지*, 2003.(계재 예정)

- [71] E. G. Williams, *Fourier Acoustics - Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography* (Academic press, 1999).
- [72] 남경욱, 김양한, “평면 음향 홀로그래피에서 센서간 특성 차이와 측정 위치의 부정확성에 의한 음압 추정 오차의 정량화”, *한국소음진동공학회지*, 8(6), 1023-1029, 1998.
- [73] W. H. Press, *Numerical Recipes* (Cambridge University Press, 1986).
- [74] 김원호, 윤종락, “근거리 음압의 공간 변환에 의한 음원 면에서의 음장 분포 (II) : 원판형 진동체 음원에 대한 모의시험”, *한국음향학회지*, 2003.(게재 예정)
- [75] Bruel & Kjaer, *Technical Documentation; Hydrophones Types 8103, 8104, 8105, 8106* (Bruel & Kjaer, Denmark, 1992).
- [76] 김원호, 윤종락, “근거리 음압의 공간 변환에 의한 수중 음원의 위치 추정”, *한국음향학회지*, 2003.(게재 예정)

감사의 글

본 논문을 완성하기까지 많은 분들의 도움과 격려에 감사드리며, 지면을 빌어 그 분들의 고마움을 조금이나마 전하고자 합니다. 지금까지 많은 질책과 세심한 배려 그리고 아낌없는 조언으로 지도해 주신 윤종락 교수님께 깊이 머리 숙여 감사 드립니다. 그리고 논문의 부족한 부분을 보완하여 좋은 논문이 되도록 많은 지적을 해주신 김천덕 교수님, 양보석 교수님, 김무준 교수님 그리고 이채봉 교수님께 깊이 감사 드립니다. 또한 박사 과정을 마치는 동안 저에 대해 관심을 가져 주시고 전공의 기초적 지식을 쌓을 수 있도록 도와주신 물리과 김성부 교수님과 음향진동 공학과 모든 교수님께도 감사 드립니다.

아울러 연구 과정동안 협조를 아끼지 않았던 노용주, 박지현 등 실험실의 모든 학생들에게 고마움을 전합니다.

직장과 병행하여 학업에 정진할 수 있도록 배려해 주신 국방과학연구소의 황경선 본부장님, 최진혁 부장님 그리고 윤형규 실장님 이하 1부 8팀의 모든 연구원님들께 깊이 감사드립니다. 또한 학업을 시작할 수 있도록 동기를 부여해준 나영남 박사와 어려움을 함께 하신 김영선 선임연구원께 이 자리를 빌어 감사 드립니다.

그리고 살아 계셨더라면 가장 기뻐 하셨을 부모님의 영전에 먼저 기쁨을 전하며, 이 자리가 있도록 항상 관심과 사랑을 주신 형님 내외분, 누님 내외분 그리고 장인 어른과 장모님께 모든 영광을 바칩니다. 또한 희선이를 비롯한 조카들과 큰 처제와 작은 처제 내외분 모두와 이 기쁨을 함께 하고자 합니다.

끝으로 항상 변함없는 사랑으로 어려움을 극복할 수 있도록 내조해준 아내 애란이에게 모든 영광을 바칩니다. 그리고 많은 시간을 함께 못해 항상 미안했던 사랑스러운 딸 재윤이와 듄직하게 자라고 있는 아들 형구에게도 이 기쁨을 함께 나누며, 지금까지의 저를 있도록 도와 주셨던 그 외 많은 분들께도 고마움을 전합니다. 감사합니다.

2003년 8월

김 원 호