

상관관계를 이용한 천해 3층모델의 2층 모델로의 전환조건에 대한 연구

A Study on the Conversion Condition of Shallow Water 3-layered Model into 2-layered Model with Correlation

김 영 선*, 김 성 부**
(Young-Sun Kim*, Sung-Boo Kim**)

*국방과학연구소, **부경대학교 물리학과
(접수일자: 2007년 12월 13일; 수정일자: 2008년 2월 11일; 채택일자: 2008년 2월 14일)

다층 모델이 갖는 문제점을 해소하고, 2층 모델의 시나친 간결성을 보완하기 위해 유체-유체-탄성체로 이루어진 3층 모델을 가정하였다. 일반적으로 퇴적층의 두께가 10파장 이상인 경우, 수층 내의 음장에 대한 암반층의 영향을 무시할 수 있다고 알려져 왔는데, 음장의 계산결과와 실험결과간의 최대 상관계수를 추적하는 방법을 통해 그 같은 조건이 보다 구체화 할 수 있음을 확인하였다. 최대 상관계수를 구하기 위해 단일센서로부터 얻어진 전달손실을 사용하였다. 음속이 1813m/s 인 퇴적층을 가정할 경우 50 kHz에서 120 kHz 간의 주파수 범위에서 2층모델로 전환되는 조건은 2.5파장내지 7.7파장 범위에 존재하였다.

핵심용어: 3층 모델, 퇴적층의 두께, 상관관계, 전환조건

투고분야: 수중음향분야 (5.1)

To dissolve the multi-layered model problems, and to complement 2-layered model's simplicity, assumed fluid-fluid-solid 3-layered model. Generally it is known that if the sediment thickness is more than 10 wavelength, the half space's influence to the in-water acoustic field could be disregarded. By tracking the maximum correlation coefficient of calculated results and experimental ones we confirmed that the requirement could be more realized. To calculate the maximum correlation coefficient we used single sensor transmission loss. On the assumption that the sediment sound velocity was 1813 m/s and frequency range 50 kHz to 120 kHz, the conversion condition was from 2.5 to 7.7 wavelength

Keywords: 3-layered model, Sediment thickness, Correlation, Conversion condition

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.1)

I. 서론

수중을 진행하는 음파는 매질을 이루는 수층의 수직 온도 분포와 해저층의 음향학적 특성 등에 많은 영향을 받으므로 해양음향 환경에 대한 충분한 정보를 갖지 못한 채 모델을 구성하거나, 또는 운용할 경우에는 많은 오차를 갖게 된다.

1948년 Pekeris에 의해 고안된 유체층만의 2층 모델은 [1] 구조가 간단하고, 쉽게 해를 구할 수 있으며, 결과에 있어서 다층의 복잡한 모델 계산결과와 큰 차이를 보이지 않는다는 면에서 오랜 동안 많은 사람들에게 의해

사용되어 왔다. 그러나 실제적인 해양환경은 2층 모델과 차이를 가지며, 특히 퇴적층의 불리량이나 두께가 음장에 미치는 영향을 보기 위해서는 다층 모델을 사용할 수밖에 없는데, 다층모델을 통해 실제적인 문제를 풀고자 할 때 과연 퇴적층을 몇 층으로 볼 것이며, 암반층과의 경계는 어디인가? 하는 문제에 부딪히게 된다. 왜냐하면, 다층모델의 계산결과가 정확하지만 계산에 필요한 자료를 충분히 확보하는 것이 기술적으로나 혹은 경제적으로 어려운 일이며, 충분한 자료를 확보했다 할지라도 계산에 별 영향을 주지 않을 수도 있기 때문이다. 본 논문에서는 다층 모델이 갖는 문제점을 해소하고,

2층 모델의 지나친 간결성을 보완하기 위해 다층 모델이 2층 모델로 전환되는 조건을 이론 및 실험적으로 확인하고자 하였다. Pekeris에 의해 제안된 2층 모델은 1965년 Pedersen 등이 발표한 표층 도파관에서의 음파전달 연구 [2]를 발표함으로써 정규모드뿐만 아니라 가상모드까지 포함하였으며, 1980년 Macpherson 등에 의해 3층 모델에서의 가상모드연구 결과를 발표함으로써 다층 모델로 확장되었다 [3-4]. 한편, 정규모드 모델을 대상으로 한 Tolstoy [5]와 Ewing 등 [6], Brekhovskikh [7], Jensen 등 [8]의 연구는 다층모델에 대한 이론적 토대가 되었을 뿐만 아니라 다수의 FFP (Fast Field Program) 계열 모델을 [9-10] 낳았다.

1982년 시작된 한국의 수중음향 학술활동은 그 동안 많은 수의 논문이 발표되었음에도 불구하고 음파전달에 관한 학문적 연구는 국외의 연구활동에 비해 상대적으로 미미하다고 하겠다. 최근에 국내에서 발표된 논문 중 해양의 층모델과 관련된 것으로는 1996년 김성부 등 [11-12]에 의해 발표된 모형실험을 통한 2층 모델의 정규모드에 대한 실험적 확인 및 그의 특성에 관한 연구결과와 이듬해 모형실험을 통한 가상모드의 존재 및 그의 영향에 대한 연구 [13] 등이 있다. 그리고 2001년 김영선 등 [14]은 3층의 유체모델에서의 가상모드에 대한 이론적 연구를 발표함으로써 2층 모델에서의 가상모드 연구를 3층 모델로의 이론적 확장을 꾀한 바 있다.

본 논문에서는 퇴적층의 수를 최소화하고, 실제환경을 대변할 수 있는 다층모델로써 유체-유체-탄성체로 이루어진 3층 모델을 가정하고, 다층 모델의 음장 해석용 프로그램인 OAST [15]를 이용한 계산결과와 실험결과간의 최대 상관계수만을 추적하는 방법 (이하 최대 상관계수 기법)을 통해 주파수와 환경조건을 변화시키며 3층 모델이 2층 모델로 전환되는 조건을 찾았다. 즉, 그림1에서 보인 바와 같이 3개의 층으로 구성된 3층모델이 그림2와 같은 제1층과 제2층 (퇴적층) 만으로 구성된 성격상 2층모델로 전환되는 조건을 찾고자 하는 데서 출발하였으며, 이는 퇴적층의 두께가 갖는 일반적인 조건인 $H \geq 10\lambda$ 을 만족시킬 경우 즉, 퇴적층의 두께가 10파장 이상인 경우, 수층 내의 음장에 대한 암반층의 영향을 무시할 수 있다는 조건을 보다 구체화 하고자 한 것이다. 단일센서로부터 얻어진 전달손실과 2층모델간의 최대 상관계수를 이용하여 수치모델로부터 찾은 조건 즉, 2층모델로 전환되는 조건은 음속 1813 m/s인 퇴적층을 가정할 경우 50 kHz에서 120 kHz 간의 주파수 범위에 서 2.5파장내지 7.7파장 정도의 범위에 존재하였으며,

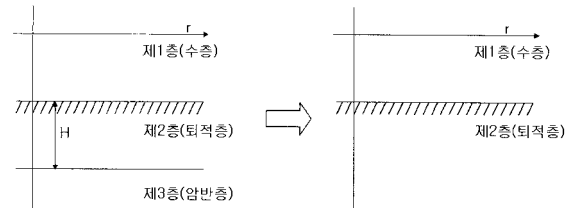


그림 1. 3층 모델

figure 1. 3-layered model.

그림 2. 전환된 2층 모델

figure 2. conversed 2-layered model.

모형수조에서의 실험을 통해서 전환이 이루어짐을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 3층모델의 2층모델로의 전환조건을 찾는 방법으로서 최대상관계수를 이용한 기법을 제안하였다.

실험은 1/1000로 축소된 모형수조를 사용하였으며, 벽면에 흡음판을 씌우므로써 벽면으로부터의 반사파 영향을 제거시켰다. 모래층으로 구성된 제2층의 두께를 변화시켜가며 얻은 음장과 2층 모델의 음장간의 최대상관계수를 통해 3층 모델이 2층 모델로 전환됨을 확인하였으며, 환경조건에 따른 모드 비교를 위해서는 정규모드 프로그램인 Krakenc [16]를 이용하였다.

II. 음파전달 모델

본 논문에서는 3층이 균일한 매질로 이루어진 유체-유체-탄성체 모델을 가정한다. 그리고 두 데이터가 갖는 유사성을 나타내는 척도로서 다음과 같이 상관계수를 적용한다. 즉, 실험결과를 함수 $x_0(r)$ 로 두고, 제2층의 두께를 d 라고 할 때 계산된 음장을 $x(r, d)$ 라 하면 이들 간의 상관계수 및 최대 상관계수는 다음과 같다.

$$C_{x_0x}(r, d) = \frac{1}{(I_{x_0} I_{xx})^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} x_0^*(r) x(r + \tau, d) dr$$

$$I_{x_0x}(d) = \max[C_{x_0x}^*(\tau, d)]$$

여기에서 I_{x_0x} 와 I_{xx} 는 다음과 같이 각각 실험결과 및 계산된 음장의 공간적 자기상관계수 (Auto-correlation)를 의미하며

$$I_{x_0x}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_0^*(r) x_0(r + \tau) dr$$

$$I_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(r) x(r + \tau) dr$$

τ 는 2개의 서로 다른 음장의 유사성을 산출하기 위한

공간적 지연값을 의미한다.

본 논문에서는 로그값으로 표현된 거리 별 음장의 실험 값과 제2층의 두께 변화에 따른 이론값 간의 최대 상관계 수를 제2층의 두께 d 의 함수로 표현하였다. 그림 3(a)의 윗 그림은 주파수 (70 kHz) 및 환경변수가 일정한 상태 에서 3층모델의 제2층 두께변화에 따른 거리별 음장의 세기를 비교한 것이며, 아랫 그림은 3층 모델의 제2층 두께를 최대 20파장까지 변화시켰을 때의 음장의 세기와 2층 모델의 음장의 세기 간의 최대 상관계수를 보인 것이 다. 그리고 그림 3(b)는 주파수를 100 kHz로 하고 동일 한 계산을 한 것이다. 음장의 세기 비교에서 제2층의 두 계는 2층 모델과의 최대 상관계수값이 각각 0.99, 0.999, 0.9999인 경우를 선택하여 얻은 것으로서 최대 상관계수값이 0.999이상인 경우 실질적으로 모델간의 구분이 어려움을 알 수 있다. 그림 3을 위한 입력자료는 제2층 음속 1813 m/s, 감쇠계수 0.2 dB/λ, 밀도는 1.91 g/cm³, 제3층의 압축음속 3366 m/s, 감쇠계수 0.4 dB/λ, 전단음속 2005 m/s, 감쇠계수 0.6dB/λ, 밀도 1.93 g/cm³, 음원수심 7.8 mm, 수신센서수심 25 mm, 수심 30 mm 등이며, 수층의 음속구조는 등속이다.

일반적으로 수층과 퇴적층, 그리고 암반층 등 3개층 으로 구성된 3층 모델의 제2층의 두께가 파장에 비해 충분히 크지 못할 경우 수층 내의 음장이 제2층과 제3층 간 경계면의 영향을 받으나 퇴적층인 제2층의 두께가 $H > 10\lambda$ 을 만족시킬 경우 즉, 퇴적층의 두께가 10파장 이상인 경우에는 암반층의 영향을 무시할 수 있다고 알 려져 왔다. 본 논문에서는 이러한 조건을 구체화해서 보 다 현실적인 조건의 범위와 그 조건을 추출하기 위한 방 법으로서 최대 상관계수기법을 소개하고자 한다.

3층 모델의 2층 모델로의 전환을 논하기에 앞서 수직

음장을 바탕으로 한 2층 모델과 3층 모델간의 차이를 비교하고자 한다. 그림 4에서 보인 바와 같이 2층 모델 은 2개의 층만으로 구성되며, 제2층은 아래쪽 방향으로 무한히 펼쳐지는 무한공간 (half space)을 가정한다. 2 층 모델에서 제1층과 제2층간의 경계면을 투과한 파 (p) 는 제1층으로 재입사하지 않고 아래쪽으로 진행되어 나 아간다. 그러나 3층 모델에서는 2층 모델의 제2층 아래 쪽의 또 다른 층을 가짐으로써 제2층에 입사한 파 (p)가 제2층과 제3층 사이의 경계면에서 반사되어 새로운 파 (p_{tr})를 생성하며, 제1층과 제2층간의 경계면을 통과하 여 표층까지 진행하면서 2층 모델에서는 볼 수 없거나 적은 진폭의 모드가 큰 진폭의 새로운 모드로 전환된다. 따라서 엄밀한 의미에서 2층 모델과는 음장을 구성하는 구성요소에서 차이를 갖는다.

그림 5(a)는 72.5 kHz에서 음원으로부터 0.1 m (약 4.9파장) 거리에서 3층 모델과 2층 모델의 모드를 보인 것으로서, 4차모드는 3층 모델에서 생성된 모드로서 가 상모드이다. 그리고 그림 5(b)는 동일한 조건하에서 주 파수 114.2 kHz에서의 모드를 보인 것으로서 3층 모델 의 5차모드가 2층 모델에서는 보이지 않는데 역시 가 상 모드이다. 그림에서 볼 수 있듯이 제2층의 두께변화에 주로 영향을 받는 것은 가상모드로서 제2층의 두께가 파장에 비해 큰 경우 가상모드의 진폭은 상대적으로 감 소되어 수층의 음장 형성에 미치는 영향이 적게 된다. 또한 정규모드에 비해 큰 허수부를 갖기 때문에 음원으 로부터의 거리가 클 경우 진폭이 현저히 줄어서 전반적 으로 2층 모델의 음장에 근접하게 된다. 사용된 입력자 료는 제2층 음속 1813 m/s, 감쇠계수 0 dB/λ, 밀도는 1.89 g/cm³, 제3층의 압축음속 2426 m/s, 감쇠계수 0.4 dB/λ, 전단음속 1275 m/s, 감쇠계수 0.2 dB/λ,

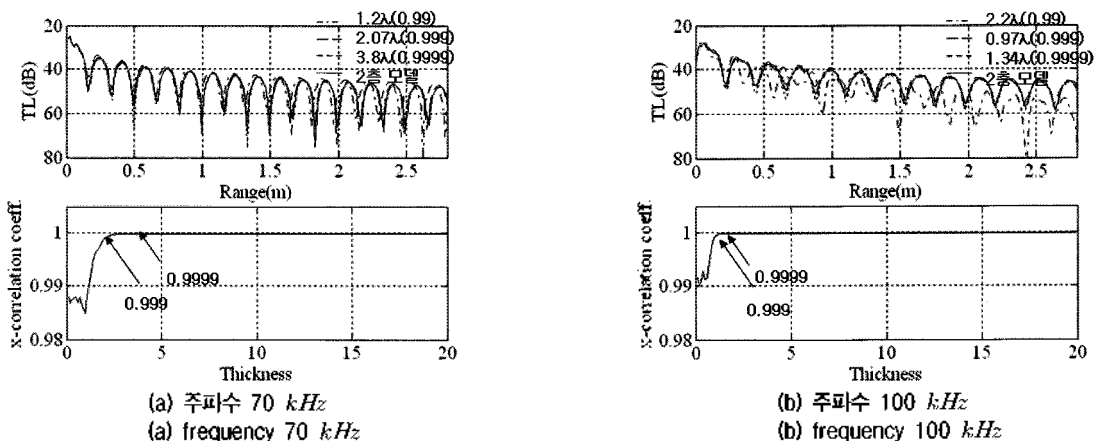
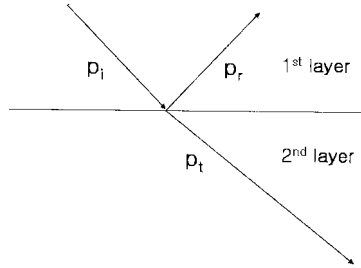


그림 3. 전달손실과 최대 상관계수의 특성

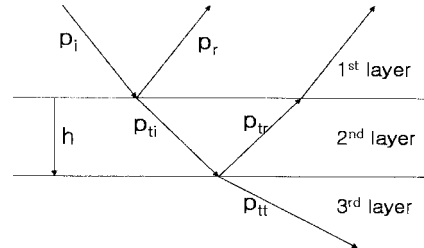
Figure 3. Characteristics of propagation loss and max. cross correlation coefficient.

밀도 1.95 g/cm^3 , 음속수심 10.2 mm 등이며, 수층의 음속구조는 등속이다.

그림 6은 수심 변화에 의한 영향을 보기위해 3층 모델과 2층 모델의 음장간의 최대 상관계수를 2차원 평면상

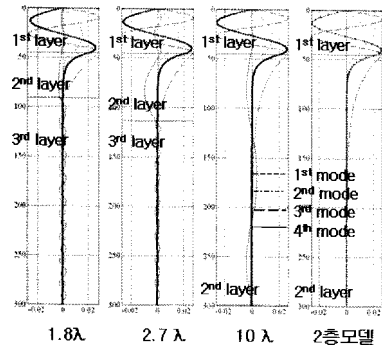


(a) in 2-layered model

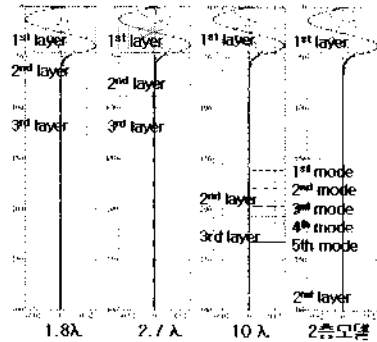


(b) in 3-layered model

그림 4. 경계면에서의 투과파와 반사파
Figure 4. Reflected and transmitted rays at interfaces.

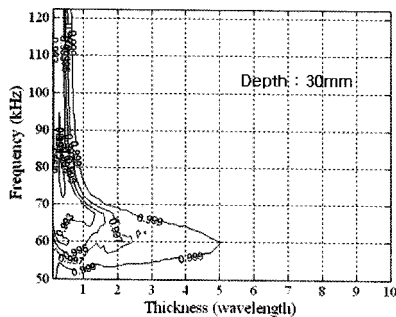


(a) 72.5 kHz, $r=0.1 \text{ m}$

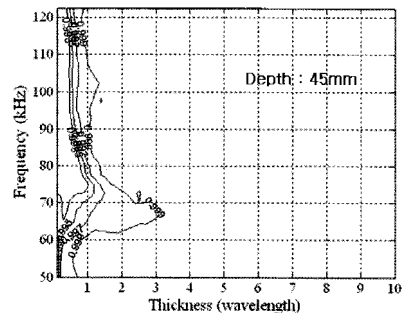


(b) 114.2 kHz, $r=0.1 \text{ m}$

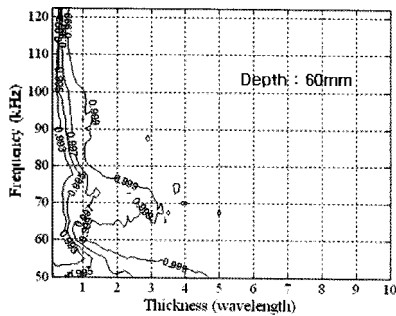
그림 5. 제 2층의 두께 변화에 따른 3층 모델과 2층 모델의 모드비교
Figure 5. Normalized modes of a 3-layered model and a 2-layered model with some 2nd layer thicknesses.



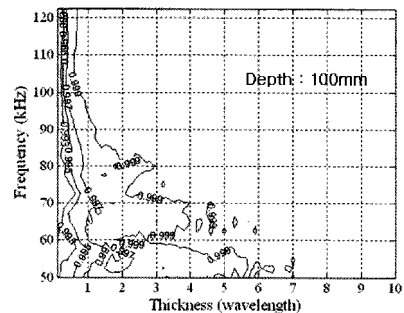
(a) 수심 30 mm 일 때
(a) water depth : 30 mm



(b) 수심 45 mm 일 때
(b) water depth : 45 mm



(c) 수심 60 mm 일 때
(c) water depth : 60 mm



(d) 수심 100 mm 일 때
(d) water depth : 100 mm

그림 6. 최대 상관계수 등고선도
Figure 6. Contours of max. cross-correlation coefficient.

의 등고선도로 표현한 것이다. 수심 변화는 30 mm, 45 mm, 60 mm, 100 mm로, 제2층의 두께 변화범위는 0.25 파장부터 10 파장까지, 최대상관계수의 변화는 0.993에서 0.999까지로 하였다. 계산결과 두께 변화에 따른 최대상관계수의 값이 수심 변화에 민감하게 반응하는 영역 (50 ~ 80 kHz)과 그렇지 않은 영역 (90 ~ 120kHz)으로 구분할 수 있다.

최대상관계수가 0.999인 등고선을 기준으로 할 때 50 kHz와 60 kHz에서는 제2층의 두께가 약 0.5에서 7파장에 이를 만큼 변화폭이 심하나, 주파수가 증가할수록 변화폭이 감소하여, 100 kHz 이상에서는 약 0.4에서 1.3파장 정도로 비교적 안정된 상태를 유지하는 것을 알 수 있다. 그림 7은 최대상관계수가 0.999일 때의 제2층 두께를 수심을 변화시키며 그린 것으로서 앞서 기술한 2개의 주파수군 중 수심 변화에 민감하게 반응하는 주파수군인 50 kHz에서 80 kHz까지의 영역 (그림 윗부분)에서는 최대 7.7파장, 그렇지 않은 영역인 90 kHz에서 120 kHz까지의 영역 (그림 아랫부분)에서는 최대 2.5파장으로 구분이 뚜렷함을 알 수 있다. 따라서 그림 3의 결과를 토대로 사실상 2층 모델과의 차이를 구분하기 어려운 최대 상관계수 0.999 이상인 곳을 2층 모델로의 전환영역으로 본다면 그림 7을 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

최대수심 200 mm 이내에서, 모래층을 제2층으로 갖는 3층 모델은 제2층의 두께가 7.7파장 이상일 때 2층 모델로 전환된다. 특히, 100 kHz 이상에서는 약 1.5파장 이상에서 2층모델로의 전환이 이루어진다.

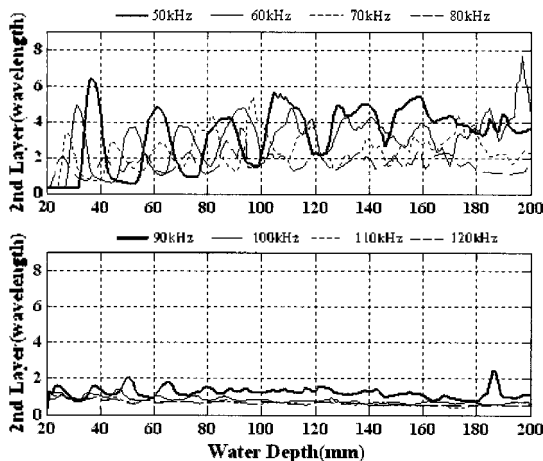


그림 7. 수심과 전환영역과의 관계
Figure 7. The relation between water depth and conversion region.

III. 실험방법 및 결과

앞에서 이론적 모델을 통해 얻어진 2층 모델로의 전환 조건을 확인하기 위해 다음과 같이 모형수조에서 실험을 수행하였다.

실험장치는 송신장비와 수신신호의 측정 및 분석장비, 모형수조 등으로 구분되며, 측정 및 분석장비는 모형수조 실험에서 널리 사용되는 일반적인 방식을 택하였다. 직경 0.6 m, 길이 3 m의 진축용 플라스틱 관으로 만들어진 모형수조에는 자체 제작된 두께 0.1 m의 췌기형 흡음판을 양옆에 부착함으로써 주변 벽으로부터의 반사파가 제거된 천해 해양환경을 모사하고자 하였다 [12]. 제2층은 모래층으로 하였으며, 제3층은 시멘트층을 두어 암반층을 대신하도록 하였다. 실험결과와 계산 결과의 반복적인 비교를 통해 산출된 제2층의 압축파 음속과 감쇠계수, 밀도는 각각 1813 m/s, 0.2 dB/λ, 1.91 g/cm³, 제3층의 압축파 음속과 감쇠계수는 3366 m/s, 0.4 dB/λ, 전단파 음속과 감쇠계수는 2005 m/s, 0.6 dB/λ, 그리고 밀도 1.93g/cm³였으며, 모래층의 전단 속도는 0 m/s로 두었다. 수심이 얕고 수량이 적어서 실험 중 대기의 온도 변화에 많은 영향을 받는 수중음속은 매 실험마다 수중온도를 측정하여 Medwin의 수식으로 부터 산출하였다.

실험은 70 kHz와 100kHz, 120kHz에서, 제2층의 두께를 10 mm, 15 mm, 20 mm, 40 mm 등으로 변화시켜가며 제2층 두께변화가 음장형성에 미치는 영향을 관찰하였다. 이것은 실제 해양에서 주파수 70 Hz와 100 Hz, 120 Hz, 그리고 제2층의 두께 10 m, 15 m, 20 m, 40 m에 해당한다. 실험결과 해석은 다음과 같이 실험의 정확성 확인단계와 2층 모델로의 전환여부 판단단계로 구분하였다.

첫째, 실험의 정확성 확인을 위해 전달손실 값의 비교를 통해 실험결과와 가장 유사한 음장을 갖는 3층 모델을 선택하여, 수심, 제2층의 두께, 음원 및 수신 센서 깊이 등을 선정한다.

둘째, 선정된 3층 모델 및 실험결과와 2층 모델간의 전달 손실을 비교함으로써 실험의 정확도, 실험시 환경과 2층모델로의 전환정도 등을 확인하고,

셋째, 선정된 3층 모델에서 제2층 두께만을 최대 10 파장까지 변화시키며 얻은 이론음장에 대하여 앞에서 선정된 3층 모델 (굵은 실선), 실험결과 (실선) 및 2층모델 (점선)의 최대 상관계수를 비교하며 최대상관계수 값이 극값을 보이는 위치가 동일한

지 여부를 확인하고 그것을 제2층의 두께로 한다. 또한, 전체적인 최대 상관관계수 곡선이 상호 근접하는지 여부를 관찰한다.

넷째, 등고선도와 비교함으로써 등고선을 통한 전환영역에 대한 예측의 정확성을 확인한다.

가. 70 kHz 실험결과

그림 7에 의하면 70 kHz에서 2층 모델로의 전환영역(0.999)은 약 2.5 파장인 반면, 실험시 제2층 두께는 최대 1.5 파장(40 mm)에 불과하였기 때문에 실험은 모두 3층 모델에 대한 실험이며, 낮은 값의 최대 상관관계수를 기록할 것으로 예측할 수 있다. 실험결과는 그림 8에서 보인 바와 같이 70 kHz 실험결과 최대 상관관계수는 0.994 이하로 비교적 낮았으며, 전달손실 곡선을 이용한 음장 비교로부터 2층모델로의 전환을 확인할 수는 없었지만 실험결과가 이론과 비교적 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

나. 100 kHz 실험결과

실험시 수심은 전반적으로 약 45 mm이었으며, 그림

7에 의하면 전환영역은 약 1.2파장인 21.8 mm에 해당한다. 따라서 제2층 두께가 1.1 파장인 20 mm부터 2층 모델로 전환이 이루어지리라 기대하였으나 아래 그림 9(a)와 (b)에서 보인 바와 같이 최대상관관계수가 제2층 두께의 증가에 따라 급격히 증가하여 제2층의 두께가 10 mm에서는 0.999에 근접한 0.998을, 15 mm에서는 0.999를 초과한 0.9993을 기록함으로써 사실상 2층모델로의 전환이 이루어졌음을 보여주고 있다. 2층 모델로의 전환조건에 있어서 그림 7의 예측결과와의 차이는 실험시 환경 및 송수신 센서 위치에 대한 정보와 그림7을 생산할 때의 입력정보의 차이, 그리고 작은 수심변화에도 최대상관관계수가 급격히 변화하는 특성에서 비롯되었다고 판단된다. 그림에도 불구하고 2층 모델 음장과 최대 상관관계수 0.999부근에서 2층 모델로의 전환이 이루어짐이 확인된 셈이다.

제2층 두께가 20 mm와 40 mm 일 때 최대상관관계수가 낮고, 제2층 두께변화에 따른 변화가 심한 것으로부터 음장형성에 주된 역할을 하는 모드가 제2층 두께 변화에 영향을 받음을 미루어 짐작할 수 있다. 음장모델인 Krakenc에 수심 45.2 mm, 주파수 100 kHz, 제1층의

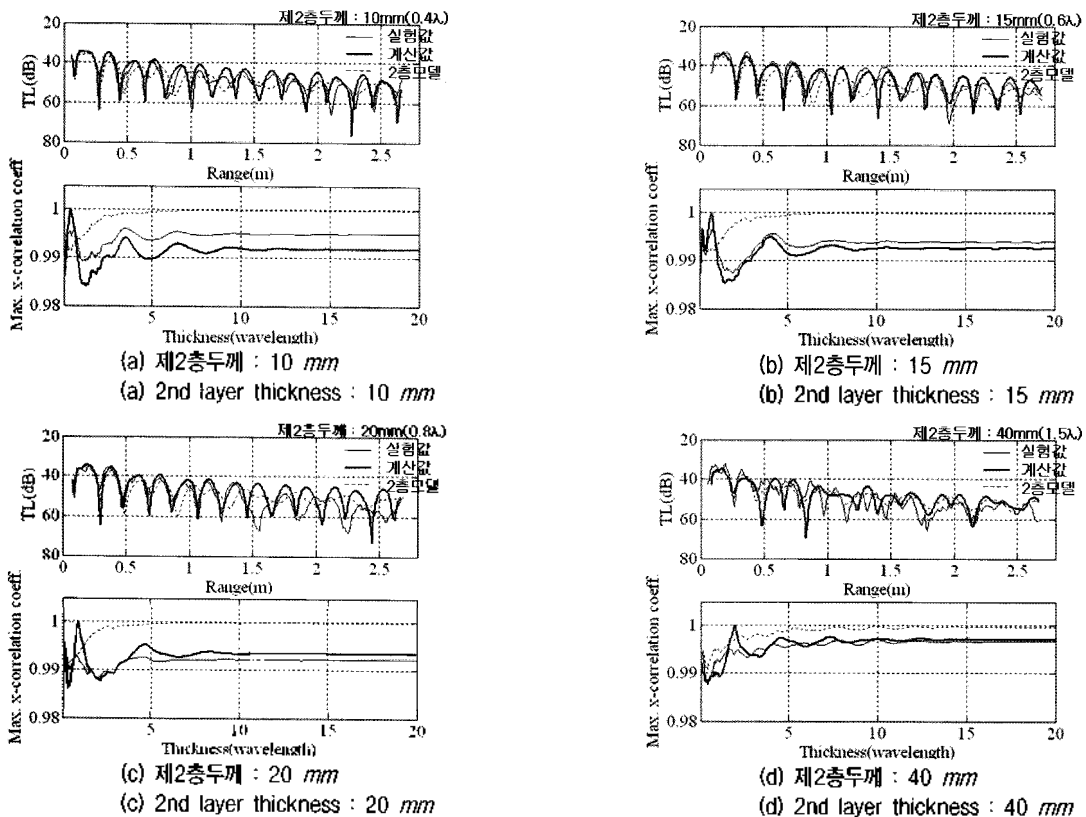


그림 8. 주파수 70 kHz일 때의 제2층두께와 전달손실, 최대상관계수

Figure 8. Relations of 2nd layer thickness, TL and Max. cross-correlation coefficient at frequency 70 kHz.

음속 1497.0 m/s, 제2층의 음속 1813 m/s, 제2층 두께 20 mm 등 실험시 환경자료를 입력하여 다음과 같이 실험시 모드의 특성을 분석하였다. 계산결과 표 1에 보인 바와 같이 제2층의 두께를 10 mm부터 최대 20파장인 약 363 mm까지 변화시켰으나 4, 5차 모드가 제2층 파수와 제3층 파수 사이에 머물러 있었으며, 제2층 두께가 증가함에 따라 제2층의 파수에 근접하기는 하지만, 허수부가 증가함으로써 모드의 진폭이 감소하여 전체 음장에 미치는 영향이 줄어들고, 최대 상관계수는 안정적인 상태로 변화되는 것으로 판단된다.

다. 120 kHz 실험결과

그림 7에 따르면 수심 45 mm일 때의 전환영역은 약 0.9파장이다. 따라서 제2층 두께가 약 1.0 파장인 15 mm에서 2층 모델로의 전환이 있을 것으로 기대할 수 있으나, 그림 10에 보인 바와 같이 10 mm에서 이미 2층 모델로의 전환이 이루어진 것으로 보이며, 이는 100 kHz의 경우와 마찬가지로 제2층 두께의 증가에 따른 최대상관계수가 급격히 증가하는 고주파의 특성 및 실험시 환경 조건과 그림 7을 생산할 때의 입력 조건간의 차이가 원인으로 판단된다. 또한 수심 10 mm에서 최대상관계수

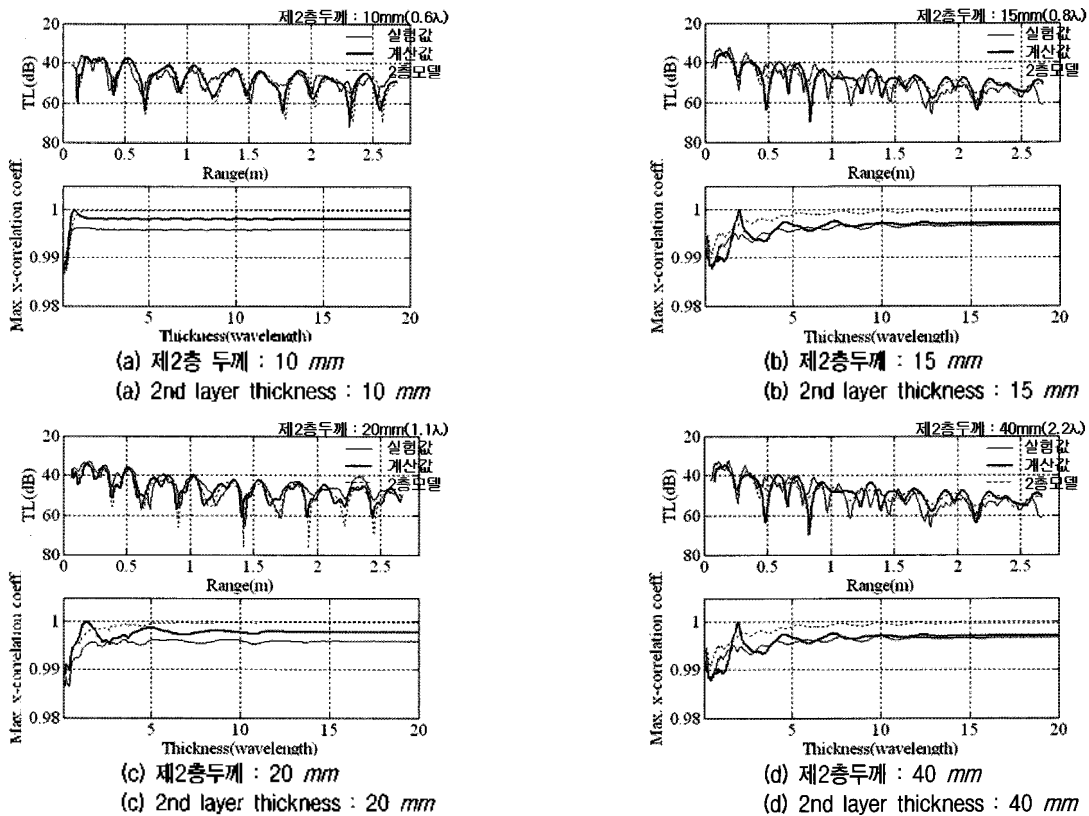


그림 9. 주파수 100 kHz일 때의 제2층 두께와 전달손실, 최대상관계수

Figure 9. Relations of 2nd layer thickness, TL and Max. cross-correlation coefficient at frequency 100 kHz.

표 1. 주파수 100 kHz에서 3층모델의 파수

Table 1. wave numbers of 3-layered model at 100 kHz.

제2층두께	10 mm (0.6파장)	20 mm (1.1파장)	363 mm (20파장)
제1층파수	0.41972	0.41972	0.41972
모드1	0.41542+0.00001i	0.41550+0.00001i	0.41550+0.00001i
모드2	0.40183+0.00004i	0.40211+0.00003i	0.40211+0.00003i
모드3	0.37728+0.00007i	0.37782+0.00007i	0.37782+0.00007i
제2층파수	0.34656+0.00127i	0.34656+0.00127i	0.34656+0.00127i
모드4	0.33931+0.00016i	0.34125+0.00023i	0.34178+0.00104i
모드5	0.28346+0.00574i	0.28028+0.01223i	0.28049+0.00294i
제3층파수	0.18667+0.00137i	0.18667+0.00137i	0.18667+0.00137i

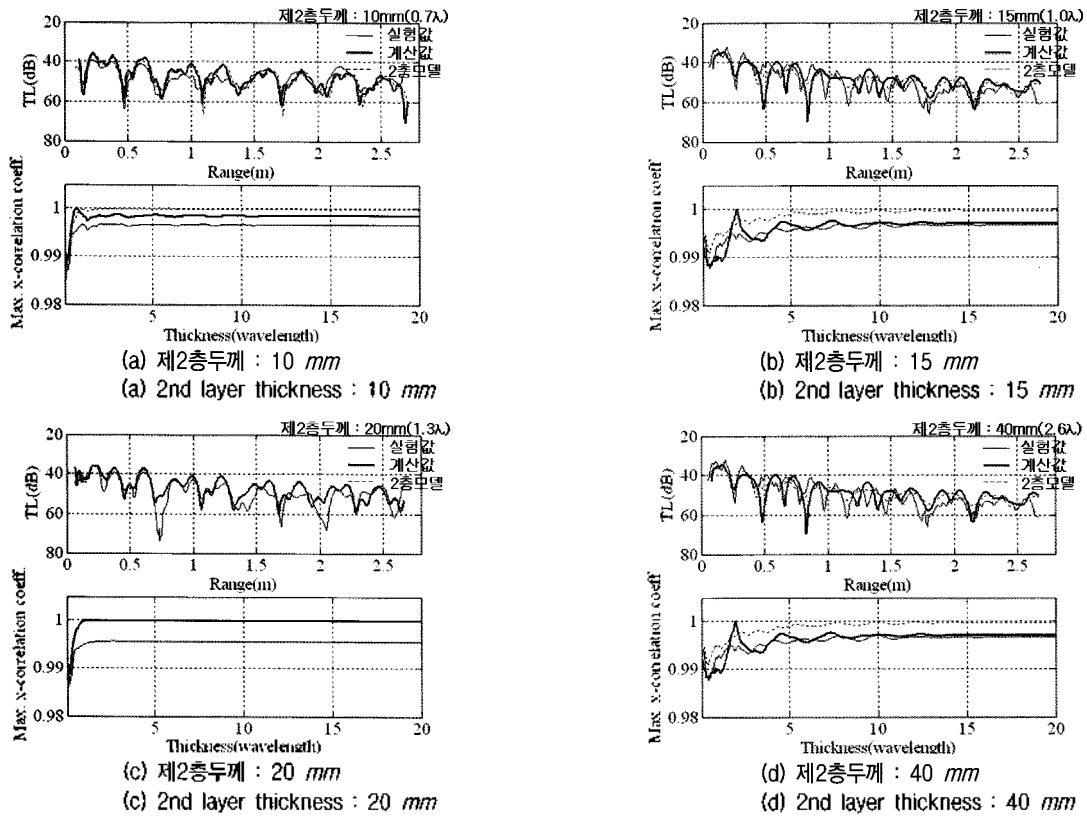


그림 10. 주파수 120 kHz일 때의 제2층 두께와 전달손실, 최대상관계수
 Figure 10. Relations of 2nd layer thickness, TL and Max. cross-correlation coefficient at frequency 120 kHz.

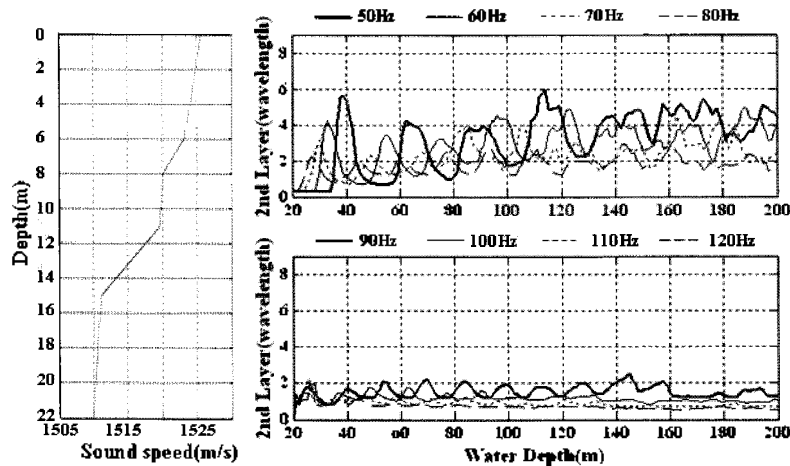


그림 11. 실제 해양환경에서의 수심과 전환영역과의 관계
 Figure 11. The relation between water depth and conversion region under real sea environmental conditions.

는 0.9986으로 사실상 2층 모델의 전환조건에 허용오차 내에 있다고 볼 수 있다.

이상은 실험실에서의 결과를 이론과 비교 가능하도록 모든 크기가 1/100로 축소된 등음속의 모형실험 환경 하에서 수십kHz대의 주파수를 대상으로 한 것이다. 그림 11은 이러한 이론의 실제 환경에서의 적용가능성을 보이기 위한 것으로서 그림 7의 경우와 동일한 방법에 실

측된 해양의 음속 구조를 적용하였다. 사용된 입력자료는 제2층의 음속 1813 m/s, 감쇠계수 0.2 dB/λ, 밀도 1.91 g/cm³, 제3층의 압축음속 3366 m/s, 감쇠계수 0.4 dB/λ, 전단음속 2005 m/s, 감쇠계수 0.6 dB/λ, 밀도 1.93 g/cm³, 음원수심 7.8 m, 수신센서수심 11.3 m 등이며, 수층의 음속구조는 그림 11의 왼쪽그림과 같다. 계산결과는 전반적으로 그림 7과 유사한 면을 보이고

있다. 따라서 최대상관계수기법이 실제 해양환경에 적용가능함을 알 수 있으며, 3층모델의 2층모델로의 전환 조건에 대한 다음과 같은 결론을 맺을 수 있다. 제2층의 감쇠계수가 $0.2 \text{ dB}/\lambda$ 이며, 최대수심 200m 인 해양에 적용할 경우 수심변화에 민감한 주파수군인 $50\sim 80 \text{ Hz}$ 범위에서는 제2층의 두께가 7.7파장 이상에서, 그리고 수심변화에 둔감한 주파수군인 $90\sim 120 \text{ Hz}$ 범위에서는 2.5파장 이상에서 각각 2층 모델로의 전환을 기대할 수 있다. 또한, 100 Hz 이상에서는 1.3파장을 넘지 않으나, 제2층의 두께 변화에 따른 최대상관계수의 급격한 변화와 짧은 파장으로 인해 실험환경 조건 등 입력변수의 오차가 2층 모델로의 전환조건에 영향을 미칠 수도 있다. 이러한 모든 결과들은 제2층의 감쇠계수를 $0.2 \text{ dB}/\lambda$ 로 가정하는 것으로서, 이는 해양의 상부퇴적층이 갖는 평균 감쇠계수 ($0.05\sim 1.29 \text{ dB}/\lambda$ 또는 $3\sim 85 \text{ dB}/\text{m}$, 100 kHz) [17]를 적용할 경우 2층 모델로의 전환은 위에서 기술한 것보다 적은 값의 제2층 두께에서 일어날 수도 있을 것으로 판단된다.

이상 모형수조 내에서의 음장실험결과와 이론적인 계산결과와의 비교를 통해 3층 모델의 2층 모델로의 전환을 확인하였으며, 2층 모델과의 최대상관계수 0.999를 2층 모델로의 전환기준으로 선정함은 전반적으로 타당한 기준이었다고 사료된다. 또한, 본 논문에서 제안한 최대상관계수기법을 실제 해양에 적용하기 위한 자료는 퇴적층의 표층부 성격을 대변할 수 있는 대략적인 정보와 수직음속구조, 그리고 그림 11과 같은 그림을 얻기 위한 s/w 가 전부이므로 해양에서의 음전달 해석을 위한 인적, 물적 자원의 절약을 기대할 수 있다고 판단된다.

IV. 결론

3층 모델이 2층 모델로 전환되는 조건을 찾기 위해 수행된 본 연구는 실험을 통해 다음과 같은 점을 확인하였다.

- 첫째, 최대상관계수를 이용한 분석기법은 단일 수신센서들 이용한 전달손실 실험결과 분석에 유용하게 적용될 수 있었다.
- 둘째, 3층 모델의 2층 모델로의 전환분석에는 주파수 뿐만 아니라 수심의 영향도 적지 않으며
- 셋째, 2층 모델음장과의 최대 상관계수 0.999이상에서 2층모델로의 전환이 이루어짐을 확인하였으며,

실제 해양환경에 적용할 경우, 제2층이 감쇠계수 $0.2 \text{ dB}/\lambda$ 인 모래층이라면 수심 200 m 이하에서 수심변화에 민감한 주파수군인 $50\sim 80 \text{ Hz}$ 범위에서는 제2층의 두께가 7.7파장 이상에서, 그리고 수심변화에 둔감한 주파수군인 $90\sim 120 \text{ Hz}$ 범위에서는 2.5파장 이상에서 각각 2층 모델로의 전환을 기대할 수 있다.

참고 문헌

1. C. S. Pekeris, "Theory of propagation of explosive sound in shallow water," *Geol. Soc. Am., Mem.* 27, 1-117, 1948.
2. Melvin A. Pedersen, David F. Gordon, "Normal-Mode Theory Applied to Short-Range Propagation in an Underwater Acoustic Surface Duct," *J. Acoust. Soc. Am.* 37(1), 105-118, 1965.
3. Mark K. Macpherson, George V. Frisk, "The contribution of normal modes in the bottom to the acoustic field in the ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* 68(3), 929-940, 1980.
4. C. A. Boyles, *Acoustic Waveguides*, (John Wiley & Sons, 1984.)
5. I. Tolstoy, C. S. Clay, *Ocean Acoustics*, (McGraw-Hill), pp24-126, 1966.
6. W. M. Ewing, W. S. Jardetzky, F. Press, *Elastic Waves in Layered Media*, (McGraw-Hill Book company, inc., 1957.)
7. L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, (Academic Press, 1980).
8. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, (American Institute of Physics, 1994.)
9. F. R. Dipoli, "Fast Field Program for Multilayered Media," Rep. 4103, Naval Underwater Systems Center, New London, CT, 1971.
10. Henrik Schmidt, Finn B. Jensen, "A full wave solution for propagation in multilayered viscoelastic media with application to Gaussian beam reflection at fluid-solid interfaces," *J. Acoust. Soc. Am.* 77(3), 813-825, 1984.
11. 김성부, 김상한, "천해에서의 음파전달에 관한 모형실험," *한국음향학회*, 15(2), 101-104, 1996.
12. 김성부, 박사학위 논문, "천해에서 가상모드가 포함된 음파전달에 관한 모형실험," *경성대학교*, 1996.
13. 김성부, 김상한, "천해에서 가상모드가 포함된 음파전달에 관한 모형실험," *한국음향학회*, 16(8), 68-73, 1997.
14. 김영선, 김성부, "2개의 해저층으로 구성된 천해 음파전달에 관한 모델 연구," *한국음향학회*, 20(4), 71-80, 2001.
15. H. Schmidt, "User Guide and Reference Manual," Massachusetts Institute of Technology, 1999.
16. M. B. Porter, "The KRAKEN Normal Mode Program," *NRL/MR/5120-92-65*, 1992.
17. Edwin L. Hamilton, "Geoacoustic modeling of the sea floor" *J. Acoust. Soc. Am.* 68(5), 1313-1340, 1980.

저자 약력

• **김 영 선 (Young-Sun Kim)**

1952년 9월8일생

1980년 2월 서강대학교 물리학과 졸업(이학학사)

1982년 2월 서강대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)

2004년 2월 부경대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)

1981년 9월-현재 국방과학 연구소 연구원

한국음향학회지 제20권 제4호 참조

주관심분야 : 수중음향

• **김 상 부 (Sung-Boo Kim)**

현재 부경대학교 물리학과 재직중

한국음향학회지 제15권 제2호 참조

주관심분야 : 수중음향