

## Caustic위치 파악 및 음선모델을 이용한 신호모의

### Analysis of location of caustics and signal processing using ray model

김두현      나정열  
(Doo-Hyun Kim    Jung-Yul Na)

한양대학교 지구해양학과

#### 요약문

실제 해양에서 동일 수심과 거리에서 둘 이상의 음선이 교차하여 형성되는 Caustic에서는 고전적인(classical) 음선모델(ray model)에서 나타나는 무한대의 음압이 아니라 주변지역과 비교하여 다소 높은 정도의 음압을 나타낸다. 하지만 caustic이라 할 지라도 음선들이 도달하는 도달시간차(travel time difference)와 펄스길이(pulse length)의 변화에 따라 음압상승현상의 폭이 달라지며 때로는 음압이 상승이 나타나지 않는 경우도 있다.

본 연구에서는 음선모델을 이용하여 caustic위치를 추정하고 펄스길이를 변화시키면서 신호모의를 실시하였다.

모의결과 caustic은 수렴대(convergence zone) 및 도파관(duct)등 음선이 모이는 곳에 집중되어 나타났고 펄스길이의 변화에 따라 음압이 다르게 나타났다.

#### 1. 서론

caustic은 고전적인 음선이론에 의하면 전달손실(propagation loss)를 구하는 과정에서 vertex velocity가 0이 되어 음압이 무한대로 증가하는 현상이다. 하지만 음선모델에서는 실제적인 결과를 얻기위해 평활화(smoothing)기법을 통하여 음압을 계산하며[6], 관측자료를 통해서 caustic에서의 음압이 주변에 비해 다소 높게 나타나고 있음을 알수있다[4].

하지만 caustic에서 음압이 반드시 상승되는 것만은 아니다. 즉, caustic위치에 수신되는 음선들간의 도달시간차가 짧아 펄스길이 내에 포함되는 음선들의 수에 따라 caustic에서의 음압은 달라질 것이며 펄스길이보다 음선들의 도달시간차가 길어 펄스길이내에 음선들이 포함되지 않는다면 음압의 상승효과가 없다.

이에 따라 본 연구에서는 음선모델을 통해 caustic이 생성되는 위치를 추정하고 그 위치에서의 고유음선을 찾아 시간축에서 합산(summation)한 후 펄스길이를 변화시키면서 신호모의를 실시하여 펄스길이에 따른 caustic에서의 음압변화를 살펴보았다.

#### 2. 본론

##### 가. caustic 위치 파악

음선모델 내에서의 caustic을 정의하는 알고리즘은 다음과 같다.

수심과 거리의 함수인 음선경로방정식(ray path equation)을 발사각(launch angle)  $\theta_s$ 에 대해 미분하면 발사각  $\theta_s$ 에 대한 수심변화율을 의미하는  $\zeta = dz/d\theta_s$ ,

가 생긴다. 이때 아주 미세한 각도의 차이를 갖는 두 음선을 고려하면  $\zeta \approx dz/d\theta_s \approx \delta z/\delta\theta_s$ 이 되어 range step내에서  $\zeta$ 의 부호변화로서 caustic이 정의되어 진다.

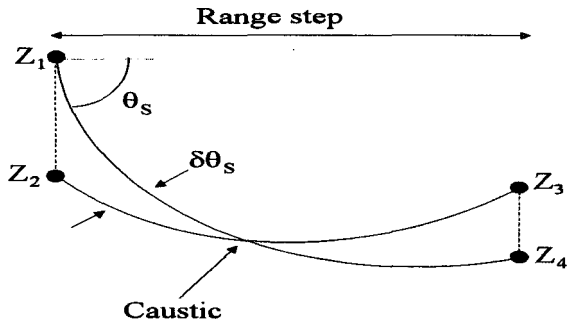


fig 1. caustic위치산출 모식도

fig 1에서 range step이 시작되는 점에서의  $\zeta$ 는

$$\zeta = \lim_{\delta\theta_s \rightarrow 0} \frac{z_2 - z_1}{\delta\theta_s}$$

$$\zeta = \lim_{\delta\theta_s \rightarrow 0} \frac{z_3 - z_4}{\delta\theta_s}$$

가 되어  $\zeta$ 의 부호가 음선이 교차되는 점을 중심으로 바뀌게 됨을 알 수 있다. 이때  $\zeta=0$ 이 되도록 hermite spline에 의한 curve fitting을 통해서 caustic이 생기는 거리를 찾고 hermite cubic spline을 이용해 수심을 찾아 caustic위치를 산출한다.

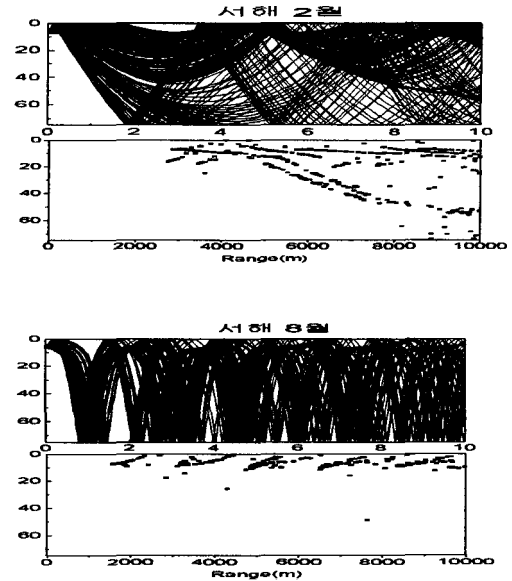
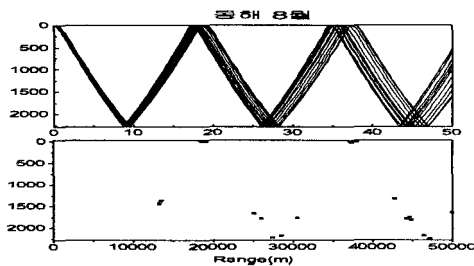
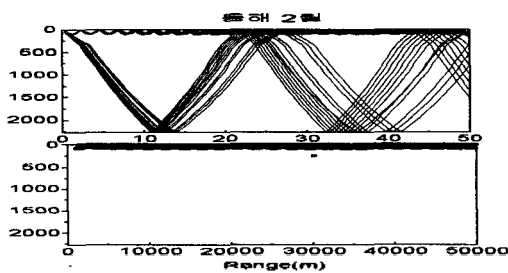


fig 2. 계절별 caustic생성위치

fig 2는 음원수심을 7m로 고정하고 여름·겨울에 따라 동·서해별로 caustic생성위치를 나타낸 것이다. 음선추적결과와 비교해 보면 음선이 집중되어 지는 지역에 caustic도 다수 생성됨을 알 수 있다. 단, 해저면에서 반사되어 진행되는 음선의 경우에는 해수면 근처에서 굴절되어지는 곳에 비해 상대적으로 caustic생성횟수가 적어짐을 알 수 있다. 음원이 해수면 근처에 위치할 시 여름철의 경우에는 동·서해 모두 음선이 굴절하는 해수면 근처에서 caustic이 집중되어 생성되었고 겨울철 동해의 경우 표층도파관(surface duct)내에 caustic이 집중되어 졌으며, 서해의 경우 해수면에 반사되어 진행되는 음선을 중심으로 생성되었다.

음원이 해수면 가까이에 위치할 시 동·서해 모두 심해보다는 해수면에 가까운 곳에서 caustic에 의한 음압상승효과가 클 것이며 특히, 도파관이 형성된 곳에서는 caustic에 의한 음압상승효과가 더욱 커질 것이다.

#### 나. 펄스길이에 따른 caustic에서의 음압변화

caustic에서는 주변에 비해 상대적으로 높은 음압이 나타난다. 하지만 이런 음압의 상승은 둘 이상의 음선이

수신되는 시간차와 펄스길이간의 상호관계에 따라 달라질 수 있다.

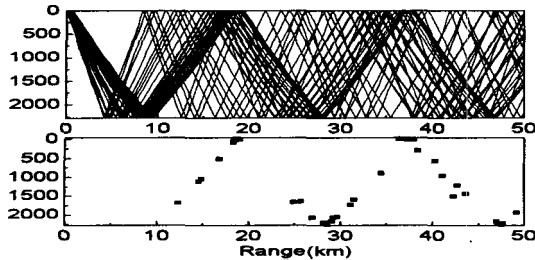


fig 3. 동해 8월 음선추적 및 caustic위치

fig 3은 한국해양자료센터(KODC)의 동해 8월 수온분포 자료중 위도 37° 03', 경도 130° 56'위치에서 음원수심은 7M, 음원각(source angle)을 -25° 부터 25° 까지 0.5° 간격 변화시켜가며 음선추적 및 caustic위치를 구한 것이며 표 1은 fig 3의 caustic위치중 거리 38.057km, 수심 45.19m에서 수신기를 위치시킬시 수신된 고유음선이며 fig 4는 표 1의 자료를 바탕으로 펄스길이를 변화시켜가며 신호모의 한 결과이다.

Source angle	Pressure (kg/m <sup>2</sup> )	Travel time (sec)
-21.44346	2.69E-05	28.68427
-21.59624	2.67E-05	28.70753
-14.07974	3.08E-05	27.50583
-13.86084	3.10E-05	27.48936
13.82166	3.09E-05	27.48718
14.04127	3.08E-05	27.50363
21.41816	2.69E-05	28.68092
21.571190	2.68E-05	28.70416

표 1. Eigenray data

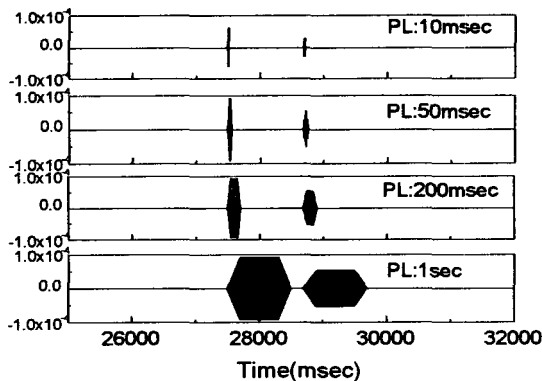


fig 4. 신호모의

표 1에서 보듯이 음선이 2개씩 쌍을 이루어 수msec의 도달시간차로 수신되고 있다. 만약, 음원의 펄스길이를 1msec로 운용한다면 caustic위치에 도달하는 음선들이라 할지라도 caustic에 의한 음압의 상승효과는 기대할 수 없을 것이다. fig 4에서 볼 수 있듯이 펄스길이를 10msec로 운용시 2개의 음선끼리 중첩효과가 생겨 음압이 상승하게 된다.

50msec로 운용시에는 한 펄스길이 내에 4개의 음선이 도달하게 되어 음압의 상승폭은 더욱 커지게 된다. 펄스길이를 200msec나 1sec로 운용시에는 음선들간의 도달 시간차에 의한 음압상승은 50msec로 운용시와 차이가 없고 다만 신호의 길이만 늘어나게 된다. 만약 8개의 고유음선의 도달시간차보다 큰 펄스길이를 사용한다면 음압은 더 상승하게 될 것이다.

위에서 볼 수 있듯이 caustic이라 할 지라도 운용되는 펄스길이에 따라서 나타나는 음압의 크기는 달라진다. 즉, 짧은 도달시간차를 지닌 적은수의 음선들로 이루어진 caustic에서의 음압이 도달시간차가 긴 다수의 음선들로 이루어진 caustic에서 보다 펄스 길이에 따라서 오히려 큰 음압을 나타낼수 있다.

### 3. 결론

음원이 해수면 근처에 위치할 시 caustic은 주로 수렴대나 도파관에 집중되어 생성됐고 해지면 보다는 해수면에서 많이 발생하였다. 또한 신호모의 결과 caustic에서의 음압이 음선이론에서 다루는 것과는 달리 주변지역에 비해 다소 높게 나타나는 정도로 한정되어지며 또한 운용되는 펄스길이에 따라서 수신기에 들어오는 음선수와 caustic에서의 음압이 비례하지 않을 수도 있다.

따라서 caustic에서의 음압상승을 탐지에 이용하거나 caustic에서 들어온 신호를 분석시 펄스길이에 따른 영향을 반드시 고려해야 한다.

### 4. 참고문헌

- [1] Terry L. Foreman, "An exact ray theoretical formulation of the Helmholtz equation", The University of Texas at Austin , 1989
- [2] Timothy F. Duda and James B. Bowlin, "Ray-acoustic caustic formation and timing effects from ocean sound-speed relative curvature", Woods Hole Oceanographic Institution, 1994
- [3] Edward R. Floyd, "The existence of caustics and cusps in a rigorous ray tracing representation", Naval Ocean Systems Center, 1986
- [4] R. A. Vadov, "Observation and Location of Caustics in the Ocean at Different Sound Frequencies", Andreev Acoustics Institute, 1996
- [5] Henry Weinberg, "Navy Interim Surface Ship Model (NISSM)II", Naval Underwater Systems Center, 1973
- [6] Terry L. Foreman, "Acoustic ray models based on eigenrays", Naval Electronic Systems Command, 1977