

수심에 기반한 멀티빔 음향 측심 필터와 격자 대표값 선정 알고리즘

박요섭, 김학일

인하대학교 자동화공학과

Filtering & Gridding Algorithms for
Multibeam Echo Sounder Data based on Bathymetry

Joseph Park, Hakil Kim

Dept. of Automation Eng., IINHA University.

E-mail : joseph@automation.inha.ac.kr, hikim@inha.ac.kr

요약

멀티빔 음향측심기(Multibeam Echo Sounder)는 기존의 단빔 음향측심기(Singlebeam Echo Sounder)와 달리 탐사선 진행방향의 수직(Crosstrack)으로 해저면을 주사(Swath)하여, 한 번의 송수신(Ping)으로 다중의 빔 자료 - 수심, 후방산란된 음압(Backscattered Amplitude), 사이드 스캔 소나(Side Scan Sonar) 자료 - 를 취득하는 장비이다. 멀티빔 음향 측심기를 이용한 해저면 탐사의 경우, 수심이 변함에 따라 주사폭(Swath width)이 변화하고, 각 빔의 수평 해상도(Footprint)는 수심과 더불어 빔폭(Beam width)에 의하여 동적으로 변화한다. 멀티빔 음향 측심기는 해저면을 전역탐사 할 수 있을 뿐만 아니라, 연속된 음향 탐사를 통하여 이웃한 평 사이에 발생하는 전방중첩영역(Endlap)과 이웃 측선(Trackline)을 따라 겹쳐지는 측방중첩영역(Sidelap)의 자료들을 이용하여 멀티 빔 자료들의 전반적인 정확도 및 신뢰도를 평가할 수 있다.

본 논문은 수로 측량(Hydrographic Survey)에서 사용되는 멀티빔 음향 측심기를 운영하여 얻어진 측심 자료를 처리하는 알고리즘 개발에 관한 연구이다. 본 논문에서는 L3사의 Sea Beam 2100 멀티빔 음향 측심기를 대상으로, 멀티빔의 측심 원리와 해저 지형에 대한 일반적 이해를 통하여 획득된 측심 자료의 통계적 특성을 파악하고, 오측심된 수심 자료를 제거하는 방법을 제안하며, 측심 구간의 대표 격자 크기를 결정하는 기준을 제시한다. 또한, 항공원격탐사에서 고도 추정시 사용되고 있는, 평균보간법, 가중평균 보간법과, 본 논문에서 제안하는 격자 대표값 선정 알고리즘(Griding Algorithms)의 결과를 비교하고, 최종적으로 얻어지는 해저 수치지형모델(DEM, Digital Elevation Model)과 후방산란 영상을 제시한다.

1. 서론

멀티빔 음향 측심기는 1964년 미 해군의 위탁 연구를 받은 SeaBeam사에서 Sonar Array Sounding System로 알려진, multiple narrow-beam depth sounding기법을 적용하여 만들어진 음향측심기이다[1]. 멀티빔 음향 측심기는 수심계의 수신기(Hydrophone)와 프로젝터(Projector)로 이루어져 있으며, 측선의 진행방향의 수직인 방향으로 수심의 약 3배정도의 주사능력을 가지고 해저면에 대한 전역 탐사를 수행하는 측심 장비이다. SeaBeam 2100의 경우, 수심에 따라 사용하는 주파수가 동적으로 변화되며, 그에 따른 주사폭도 자동 조절된다. 심해일 경우(수심

300m이상), 주파수 12KHz의 음파와 90°의 주사폭을 가지며, 천해일 경우(50m-300m), 주파수 36KHz의 음파와 150°의 주사폭으로 운영된다. 하나의 빔폭은 1°에서 2°사이이며, 한 평에 121개의 빔에서 151개의 빔까지 생성한다[2]. 멀티빔 음향 측심기는 수심 뿐 아니라, 해저면에 반사되어 되돌아오는 음파의 음압을 기록하고, 사이드 스캔 소나 자료도 동시에 취득하는 기능을 가지고 있으므로, 측심된 해저 지형(Bathymetry)과 해저 지형을 덮고 있는 해저면의 퇴적 상황(Sediment Environment)도 동시에 얻을 수 있는 다목적 측심기이다[3].

미국과 캐나다 수로국에서는 다중빔 음향 측심기를 이용한 해도 작성 뿐 아니라, 하천이나 호수

등의 수중 지형과 퇴적상황을 원격탐사하는 최적의 기법으로 멀티빔 음향 측심기를 이용하고 있다[4][5]. 우리나라에서도 한국해양연구소, 자원연구소, 국립 해양조사원에 L3사의 Sea Beam 2100과 SIMRAD사의 EM3000을 도입하여 운영중에 있다[6].

그림 1에서는 멀티 빔 음향측심기의 측심원리를 설명하고 있다. 측선의 바닥에 설치된 SeaBeam 2100과 측선의 중앙부에 설치된 모션센서(POS/MV)에서 얻어진 측선의 자세 정보, GPS를 이용하여 얻어진 측위정보와 병합하여 최종적으로 한 해저면에서 되돌아온 빔의 위치를 산정하여 빔자료를 기록하게 된다.

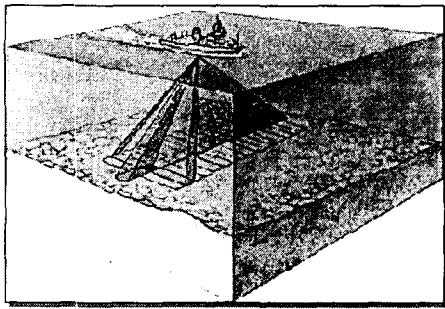


그림 1. 멀티빔 음향 측심기를 이용한 해저면 원격탐사[7].

본 논문에서는, 멀티 빔 음향 측심기를 운영하여 얻어진 원시 빔자료를 처리하여, 해도 작성과 해저면 퇴적 영상을 생성하는 과정을 설명하고, 그 중 빔 자료의 표정(Georeferencing)과 오측심된 빔 자료를 제거하는 필터링 알고리즘을 제시하며, 멀티 빔 음향 측심기의 특성을 고려한 격자화 알고리즘을 제안한다. 결과로서, 최종적으로 획득되는 수치지형모델과 후방산란영상을 제시한다.

II. 본론

1. 멀티빔 음향 측심 자료 처리

1.1 항해자료 보정

그림 2는 멀티 빔 음향 측심 자료 처리의 각 단계를 도식화한 것이다. 멀티 빔 음향 측심 자료 처리의 제 1 단계는 DGPS를 통해 얻어진 항해 자료에 삽입되어 있는 오차를 보정하는 과정이다.

DGPS를 통해 얻어진 항해 자료는 GPS안테나 위치에서 측선 내의 수신기 중심 위치로 변환되고, 모션 센서로부터 측정된 선수(Heading)자료와 각 빔의 탐사선과의 수평거리(Crosstrack)를 이용하여 빔의 정확한 좌표(UTM)를 획득하게 된다. 그러므로, DGPS자료 내에 존재하는 위치 오차를 제거하고, 실시간 DGPS로 얻어지지 않은 지역에

서의 항해자료는 후처리 DGPS기법을 이용한 항해자료로 갱신하는 과정을 반드시 거쳐야 한다. 이 과정의 중요성은 W.S.D Wilcock et al.[8]의 논문을 참조하기 바란다.

본 연구에서 사용한 항해자료는 실시간 DGPS를 통해 취득되었으며, 항해편집용 S/W를 이용하여 오측량자료를 제거된 것이다.

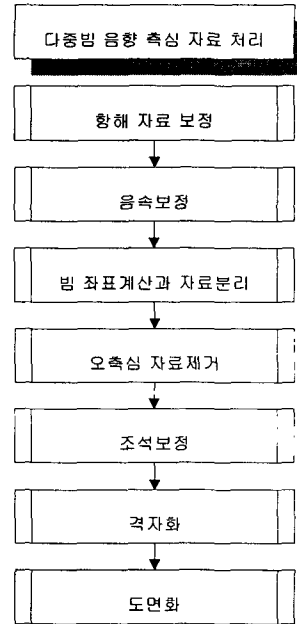


그림 2. 멀티빔 음향측심자료처리.

1.2 음속보정

멀티빔 음향 측심 원리는 특정 주파수의 음파를 해저면을 향해 발사한 후, 되돌아오는데 걸리는 시간을 측정하여 이를 수중에서의 음속을 곱하여 거리를 산출하는 일반적인 음향 측심 원리를 확장한 것이다. 그러나, 단빔 음향측심기처럼 측선 직하방으로 하나의 음파만 발사하고 수신하는 것이 아니라, 여러 개의 수신기에 들어온 음파를 특정 각도(Incidence Angle)로 나누고, 이를 수심으로 변환하는 원리를 이용하고 있다. 알려진 바대로, 한 지점의 수중 음파속도는 수심과 수온 등의 해수의 물리적 환경에 따라 변화하므로, 현장에서 매시간 음속분포(Sound Velocity Profile)를 측정하여 음향 측심 알고리즘에 반영시켜 주어야 한다. 현장에서 음속분포를 반영시키지 못했을 때는 음속분포 데이터베이스를 이용하여 후처리과정에 반드시 보정시켜야 한다. 이 과정을 음속보정이라 일컫는데, 이를 간과하면 외곽 빔의 정확성이 낮아지는 결과를 초래한다.

1.3 빔 좌표계산과 자료분리

멀티 빔 음향 측심기에서 얻어지는 빔 자료는 축선의 중앙 위치와 축선과 빔 사이의 거리 정보, 그리고, 수신 순간 축선의 Pitching에 의한 선수 방향의 변위차를 기록하고 있다. 축선의 모션 정보(Heave, Pitch, Roll)와 선수, 그리고 거리정보를 이용하여, 해당 빔의 음파반사영역(Ensonified Area)의 위치를 산정해야 한다.

축선의 위치로부터 선수와 수평거리를 이용하여 빔의 실제 위치를 산정하는 변환 행렬은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \cos(h) & -\sin(h) \\ \sin(h) & \cos(h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, h 는 선수각, d_x , d_y 는 각각 빔의 수평 주사거리(m)와 선수방향 변위(m)이며, b_x , b_y 는 산정된 빔의 좌표이다.

좌표 산출된 빔 자료에는 수심 자료 뿐 아니라, 후방 산란자료와 사이드 스캔 소나 자료도 포함되어 있으므로, 처리 목적에 따라 분리하여, 다시 각기 자료에 해당하는 자료처리 과정을 거쳐, 최종적인 결과물을 산출한다.

1.4 오측심 자료제거

사용 목적에 따라, 빔 자료를 분리한 후, 각 자료 내에 존재하는 오측량된 자료를 제거한다. 오측심 자료는 빔과 빔 자료 사이에 해저 지형이 급격히 변화하지 않는다는 특성과 해당 해역에 대한 기지의 사실에 근거하여, 이를 위배한 측심 자료를 오측심 자료로 판단하게 되는데, 운영자의 풍부한 자료처리 경험이 필요하게 된다. 2장에서 본 연구에서 적용한 수심에 기반한 측심자료처리에 대하여 상세히 기술하였다.

1.5 조석보정

오측심자료가 제거된 멀티 빔 측심자료를 대상으로 조석보정을 실시하게 되는데, IHO S-44에서 규정한 Order 2이외의 지역인 수심 200m이상 해역에서는 조석 보정의 의미가 없으므로, 이를 실시하지 않는다.

1.6 격자화

무작위 점 사상(Point Topology)으로 산재되어 있는 빔 자료를 임의의 단위 영역으로 변환하는 과정을 격자화이라 한다. 혹은 벡터 자료의 래스터 자료화(Rasterization)라고 일컫기도 한다. 분산되어 있는 점 사상 자료를 특정 크기의 단위 격자에 위치시키고, 그 격자에 포함되는 측심자료들 중에서 단위격자의 대표 수심을 결정하는 방법은 여러 연구자들에 의하여 연구되었다[8][9][10].

격자화된 자료는 래스터구조를 가지기 때문에, 육상의 수치지형모델과 바로 호환될 수 있으며, 등심선도(Contouring), 음영기복도(Shade Relief

Map), 3차원 지형도(3D bathymetric model) 제작의 입력자료로 사용될 수 있다. 본 논문이 제시하는 격자화 알고리즘을 3장에서 설명할 것이다.

1.7 도면화

격자화된 수심과 후방산란 자료, 사이드 스캔 소나자료는 사용할 지도 축척에 맞게 재 격자화될 수 있으며, 래스터구조의 수심자료는 수심도, 등심선도, 명암식 등심선도(Shading Contour), 농담식 등심선(Relief Contour), 지형단면도, 지형분류도, 3차원 해저지형 모델 등의 여러 가지 표현법을 적용하여 도면화 할 수 있다.

2. 수심에 기반한 오측심 자료 제거 필터

하나의 오측심 자료는 전체 측심 자료의 정확성을 떨어뜨리며, 오측심 자료가 제거되지 않은 상태에서 전자 해도 원도 자료로 사용될 시, 선박의 안전 항해에 치명적인 위험이 될 것이다.

IHO S-44에서는 불명확한 측심 자료는 반드시 제거해야 한다고 명문화하고 있다[11]. 측심 자료 중에서 오측심된 자료를 판단하는 일은 상당한 현장 경험과 지질학적 지식이 요구되나, 멀티빔 음향측심기로 취득되는 빔들을 일일이 목시 검사하여 처리하는 일은 거의 불가능에 가까운 일이다. 이를 위해, 정량적인 방법으로 오측심 자료라고 판단할 수 있는 기준을 만들고, 전문가가 필터에 의해 검출된 오측심 후보 자료 중에서 실제 오측심 자료를 가려내는 일을 할 수 있도록 자동화된 오측심 필터가 필요하게 되었다.

우선, 빔 자체의 오측심 여부를 판단하기 전에, 빔을 취득할 순간 축선의 상태정보를 파악한 후, 축선의 자세정보가 정상상태가 아닌 경우에 얻어진 빔자료들은 사전에 제거하는 방법이 사용된다. 본 연구에서는 POS/MV에서 제공하는 모션센서의 정상동작 상태 한계치와 선수방향 변화치를 이용하여, 모션정보의 이상 여부를 가려내고, 한계치를 벗어난 상태에서 얻어진 자료들을 제거하였다. 또한, 한번의 평으로 얻어진 측심자료들은 이웃 빔과 선행 빔 사이의 지형적 연속성을 가정하여, 오측심 판별 여부 대상에 해당하는 빔 위치와 선행 평에서 얻어진 빔자료와의 변화각을 계산하여, 한계치 이상이면 오측심 대상으로 선정하였다. 또한, 빔 주변에 이웃 빔이 하나도 존재하지 않는 고립된 빔자료는 오측심 되었다고 판단하였다. 식(2)는 빔자료 사이들의 수심 변화치를 경사도로 변환할 때 사용한 식이다.

$$\text{Variation Angle} = \tan^{-1}(Z/D) \quad (2)$$

여기서 D 는 이웃 빔과의 거리를 의미하며, Z 는 두 이웃 빔의 수심 차를 나타낸다.

3. 직하방 최근접 격자대표값 선정 (Near Nadir Gridding)

분산되어 있는 점 사상 자료의 격자화 알고리즘에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔는데, 대부분의 격자화 알고리즘은 거리 반비례 가중 평균법(inverse distance weighted averaging)을 사용하고 있다[8][9][10][11][13].

식 (3),(4),(5)는 거리 반비례 가중평균법에서 사용하는 격자 대표점 결정방법을 보여주고 있다.

$$Z = \frac{-D}{W} \quad (3)$$

$$D = \sum_{i=0}^N \frac{d_i}{L_i^2} \quad (4)$$

$$W = \sum_{i=0}^N \frac{1}{L_i^2} \quad (5)$$

여기서, Z는 격자 대표 수심, D는 가중치가 곱해진 수심의 합, d_i 는 측심자료, L_i 는 격자 위치와 측심 위치 사이의 거리, W는 가중치의 합이며, N은 격자내에 포함된 샘플의 갯수이다.

거리의 반비례를 가중치로 사용한 알고리즘 외에도 멀티빔 음향 측심기의 특성을 고려하여, 직하방 수심에 더 많은 가중치를 곱해주는 Butterworth Filter를 변형한 알고리즘도 제시되고 있다[13].

그러나, 위의 방법들은 격자내의 대표점들을 가중 평균화하여, 원 측심자료의 통계적 특성-Min, Max, 등-의 변화를 가져온다. 즉 격자의 위치와 샘플된 빔의 위치가 대단히 근접하면, 측심된 것보다 더 깊은 수심 값이 대표 값으로 지정되는 등의 단점이 있다.

멀티빔 음향 측심기는 직하방에서 멀어질수록 수중을 전파하는 음파의 감쇄와 입사각이 커짐으로 인하여 측정치의 정확성이 떨어진다. 이러한 멀티빔의 특성을 통계적으로 분석한 Jorgen[12]의 연구결과를 이용하여, 직하방에서 얻어진 측심 값이 가장 정확한 수심을 반영한다는 가정하에, 식 (6),(7)과 같이 격자내에 포함된 측심 값 중에서, 입사각(θ)이 직하방에 가장 가까운 측심 값을 그 격자의 대표값으로 취득한다. 이 방식을 적용하면 격자대표 수심값에 정확성이 높은 직하방 근접빔에 의한 측심자료들이 선택되어 격자화후에도 전체 측심정확도가 유지될 것이다.

$$Z = Z_{\theta_{min}} \quad (6)$$

$$\theta_{min} = \text{Min}(\theta_i) \quad \text{for } i = 1..N \quad (7)$$

i는 격자 내의 측심 값들의 인덱스이다.

격자화 알고리즘에서 격자 대표값 선정 방법 이외에도, 격자의 크기를 결정하는 문제가 있다. 최소 격자의 크기는 음파반사영역의 1.5배를 포함하는 크기로 선정하였는데, 이럴 경우 하나의 격자에 하나나 두 개 정도의 측심자료가 포함되어, 보다 원자료에 가까운 격자 자료를 생성할 수 있

기 때문이다. 음파반사영역의 결정은 빔의 수평해상도를 의미하기도 하는데, 이는 수심의 제곱과 빔폭을 곱한 값으로 추정하여 사용한다. 최소 격자 크기로 격자화 자료를 만든 후에, 용도에 맞게 격자의 크기를 조절하여 재 격자화된 자료를 사용하게 된다.

4. 실험결과

본 연구에서 사용된 멀티빔 음향측심자료는, 1996년 국립해양조사원 다목적 측량선인 해양 2000호에 탑재된 Sea Beam 2100을 운영하여 얻은 자료이다.

그림 3은 연구에서 사용된 멀티빔 음향측심 자료를 멀티 빔 자료처리 S/W인 MB-System을 이용하여 그린 것이다. 표1은 연구대상자료의 특성을 보여주고 있다.

표 1. 연구대상 자료특성

항목	내용
전체탐사해역	위도 37도, 36도30분 경도 129도50분, 130도 10분
전체탐사기간	1996년3월26일-1996년3월27일
탐사평균속도	16Knot
탐사자료량	404MB, 3,833,280빔
격자대상해역	위도36도 40분, 37도 5분 경도129도 45분, 130도5분
탐사자료량	986,651빔
수심 최대최소	2,449.70m, 325.40m
모션필터개수	16456빔 제거
수심필터개수	21304빔 제거
격자화 정보	50m, 585×930

표1에서 제시한 바와 같이, 수심필터와 모션필터로 처리된 빔 자료는 전체 자료의 0.3%에 해당되어 비교적 안정된 상태에서 측심되었음을 보여주고 있다. 그림 4에서는 수심 필터의 대표적인 사례를 보여주고 있다. 수심필터를 이용하여 대부분의 오측심 후보 자료들을 찾아내었다.

그림 5는 상이한 격자화 알고리즘에 의해 선택/보간된 대표수심 사이의 상이함을 보여주고 있는데, 최대 12미터까지 차이가 발생하였다. 그림의 가로 축은 그림6 수치지형모델에서 가로(A선)를 횡단하면서 수심의 변화를 기록한 것이고, 세로축은 각 지점에서 대표값 차이를 나타내고 있다.

그림 6과 7은 격자화 알고리즘에 의해 생성된 수치지형모델과 후방산란영상을 보여주고 있다. 6번 그림에서 밝을수록 깊은 수심을 나타내며, 7번 그림에서는 밝은 부분이 강한 반사치를 보여준 퇴적층임을 나타내고 있다.

III. 결론

본 논문에서는 Sea Beam 2100 멀티빔 음향 측심기를 대상으로, 멀티빔 음향 측심기의 측심 원리와 해저 지형에 대한 일반적 이해를 통하여 획득된 측심 자료의 통계적 특성을 파악하고, 오측심된 수심 자료를 제거하는 방법을 제안했으며, 측심 공간의 대표 격자 크기를 결정하는 기준을 제시하였다. 또한, 항공원격탐사에서 고도 추정시 사용되고 있는, 평균보간법, 가중평균 보간법과, 본 논문에서 제안하는 격자 대표값 선정 알고리즘의 결과를 비교하고 최종적으로 얻어지는 해저 수치지형모델과 후방산란 영상을 제시하였다.

향후과제로서, 멀티빔 음향측심자료를 해도 원도 제작에 바로 사용할 수 있도록 멀티빔 정확성과 오류분석 등의 연구를 진행할 예정이다. 또한, 좌표점을 알 수 있는 후방산란 영상과 사이드 스캔 소나를 이용하여 해저면 퇴적 분류에 대한 연구도 진행할 것이다.

참고문헌

- [1] SeaBeam Inc., *Multibeam Sonar Theory of Operation*, SeaBeam Instruments Revision -A, 1997.
- [2] Kushal Talukdar, William Capell, Christos Zabounidis, "Sidescan Survey Results from a Multibeam Sonar System - Sea Beam 2000," *Marine Geodesy*, Vol. 15, pp.63-79, 1992.
- [3] Stephen P. Miller, William J. Capell Sr., "Multibeam Sonars : Families For Multi-Mission Vessels," *Sea Technology*, pp.10-15, June 1993.
- [4] Andre Godin, M. Ing., Michael R. Crutchlow, "Swath Sounding Initiative in CANADA," *International Hydrographic Review*, Monaco, LXXV(1), pp.65-80, March 1998.
- [5] James V. Gardner, Larry A. Mayer, John Hughes Clarke, "The Bathymetry of Lake TAHOE, CALIFORNIA-NEVADA," *U.S. Geological Survey Cruise Report RV INLAND Surveyor Cruise IS-98-LT*, <http://tahoe.usgs.gov/tahoe/news.html>
- [6] 한국해양연구소, 은누리호 장척 "SeaBeam 2000"의 운용 및 응용기술에 관한 연구, 한국해양연구소, 1993.3.
- [7] Scientific American: Sidebar: Panoramas of the Seafloor, <http://www.sciam.com/0697issue/0697pratsonbox3a.html>, June, 1997.
- [8] W.S.D. Wilcock, D.R.Toomey, G.M. Purdy, S.C. Solomon, "The Renavigation of Sea Beam Bathymetry Data Between 9 °N and 10 ° on the East Pacific Rise," *Marine Geophysical Researches*, Vol.15, pp. 1-12, 1993.
- [9] M.J.Casey, D.Monahan, "Contours and Contouring in hydrography part II - Interpolation," *International Hydrographic Review*, Monaco, LXIII(1), pp.37-54.
- [10] Didier Gueriot, Eric Maillard, Jean-Pierre Kernin, "Sonar image registration through symbolic matching : A fuzzy local transformation approach using genetic algorithms," *Proceeding of the IEEE Oceans 96*, pp.1324 - 1329, 1996.
- [11] Thomas A.Jones, David E.Hamilton, Carlton R. Johnson, *Contouring Geologic Surfaces with the Computer*, Van Nostrand Reinhold Company, NewYork, pp.43-65, 1986.
- [12] IHO, *IHO Standards for Hydrographic Surveys*, Special Publication No.44, Fourth Edition, pp.13-14, 1996.
- [13] 이규성, "인공위성 레이더(SAR) 영상자료에 있어서 지형효과 저감을 위한 방사보정," *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, Vol.13, No.1, pp.57-73, 1997.
- [14] James V. Gardner, John E.Hughes Clake, Larry . Mayer, "Multibeam Mapping of the Long Beach, California, Continental Shelf," *U.S. Geological Survey Cruise Report : RV Coastal surveyor cruise C-1-99-5C*, <http://walrus.wr.usgs.gov/reports/ofr99-360>
- [15] Jorgen EEG., "On the estimation of standard deviation in Multibeam Sounding," *International Hydrographic Review*, Monaco, LXXIII(2), pp.39-51, Sept. 1996.

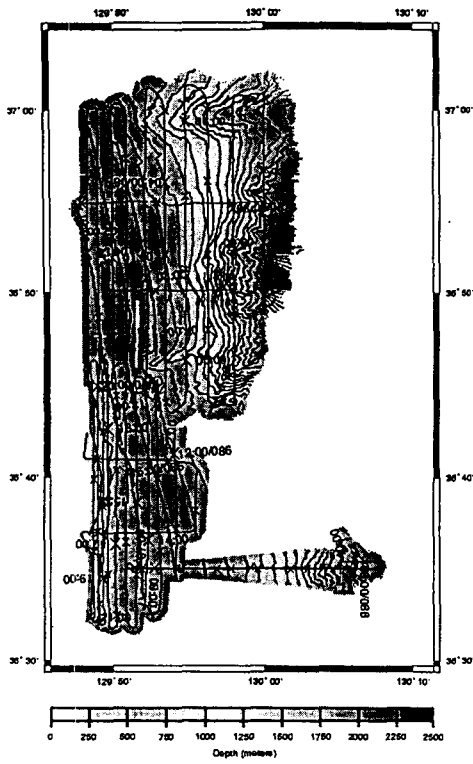


그림 3. 연구대상 해역.
(37 °N, 129 ° 45'E - 36 ° 30'N, 130 ° 10'E)

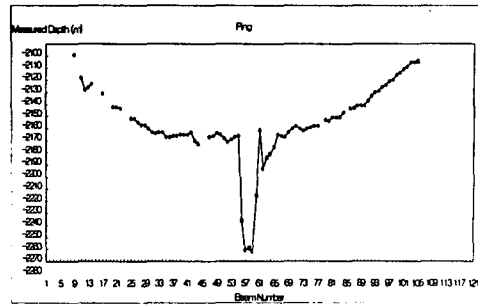


그림 4. 수심 필터된 오측심 자료 예.

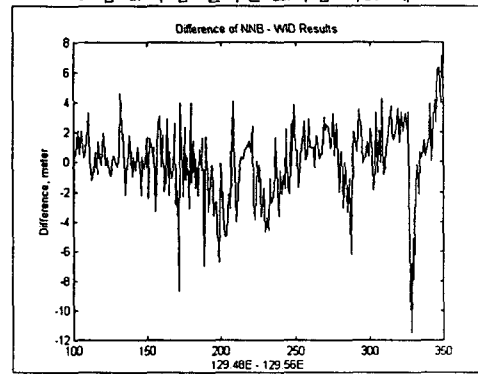


그림 5. 직하방 최근접 격자대표점 선정 방법과
거리 반비례 가중 평균법에 의한 수심값의 차.
(36 ° 55' 2"N, 129 ° 48' 31"E
- 36 ° 54' 58"N, 129 ° 56' 56"E)

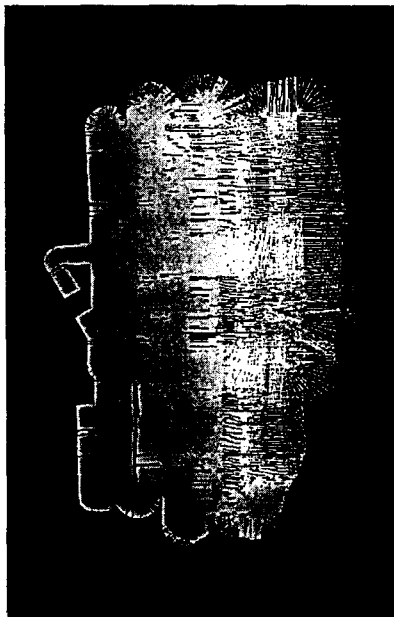


그림 6. 멀티빔 음향측심 자료로 구성된
해저 수치지형모델.
(36 °40'N, 129 °45'E - 37 °5'N, 130 °5'E)

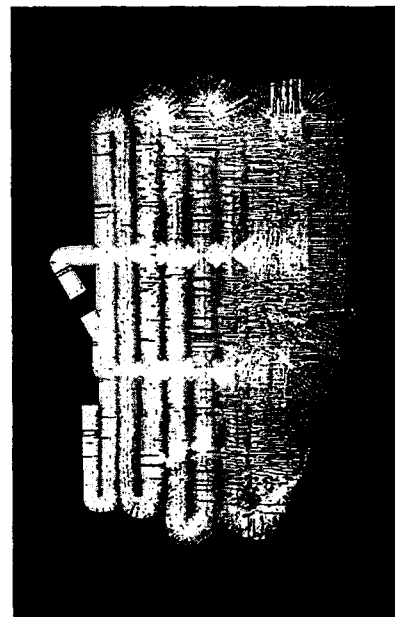


그림 7. 후방산란 영상.
(흰색이 강한 반사를 나타내는 해저면)