

# 퍼지 이론을 이용한 해저면 분류 기법

## Seafloor Classification Using Fuzzy Logic

조진석\*, 윤관섭\*, 박순식\*, 나정열\*, 석동우\*, 주진용\*\*

(Jinsuk Cho\*, Kwan-Seob Yoon\*, Soon-Shik Park\*, Jungyul Na\*, Dong-woo Suk\*, Jin-Yong Joo\*\*)

\*한양대학교 지구해양학과과 \*\*에스브이㈜

(접수일자: 2004년 4월 1일; 채택일자: 2004년 5월 7일)

해저면 분류를 위한 음향실험을 2003년 5월 19일부터 23일까지 5일간 남해에서 실시하였다. 실험 해역은 해저 구성물 질이 각기 다른 6개의 정점을 선정하였으며 5개의 주파수 (30, 50, 80, 100, 120 kHz)를 이용하여 해저면 반사 신호를 측정하였다. 지음향 인자의 측정은 피스톤 코어를 이용하여 해저 퇴적물 샘플을 채취 후 입도분석을 하였다. 측정된 결과는 퍼지 이론을 이용하여 정점별 해저 퇴적물을 분류하였다. 반사손실 모델로 구성된 입력 소속 함수를 이용하여 측정결과를 평가 후, 그 결과를 Wentworth 입자 크기를 이용하여 출력 가능하도록 구성하였다. 퍼지 이론을 이용한 해저면 분류 기법과 잘 일치하였으며, 퍼지 이론을 통한 해저면 분류 기법의 가능성을 확인하였다.

**핵심용어:** 해저면 분류, 해저면 반사손실, HYBRL 모델, 퍼지 이론, 구성 함수, 퍼지 분별 시스템

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.2)

Acoustic experiments are performed for a seafloor classification from 19 May to 25 May 2003. The six different sites of bottom composition are settled and the bottom reflection losses with frequencies (30, 50, 80, 100, 120 kHz) are measured. Sediment samples were collected using gravity core and the sample was extracted for grain size analysis. The fuzzy logic is used to classify the seabed. In the fuzzy logic, Bottom loss model of frequency dependence is used as the input membership functions and the output membership functions are composed of the Wentworth grain size of the bottom. The possibility of the seafloor classification is verified comparing the inversed mean grain size using fuzzy logic with the results of the coring.

**Keywords:** seafloor classification, bottom reflection loss, Hanyang University Bottom Reflection Loss model, fuzzy logic, membership function, Fuzzy Inference System

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.2)

## 1. 서론

지금까지 해저 퇴적 환경 및 자원 탐사 등을 목적으로 한 해저 퇴적층의 연구는 코어링 등과 같은 채집 방법이 주를 이루어 왔으나, 최근 이러한 연구의 비용 및 시간에 대한 비효율성을 개선하고자 음향 신호를 이용한 해저 퇴적층 연구가 활발히 진행 중이다. 우선, 해저 퇴적층의 연구를 위해서는 해저면 구성 물질의 분류가 선행되어야 하며, 표 1은 이러한 연구의 예이다. LeBlanc는 중주파수 대역 (1-10 kHz)의 칩 소오나 (Chirp sonar)

의 시계열 신호의 이완시간 (Reduced time) 및 반사 손실을 이용한 해저면 분류를 시도하였으나 해저면 거칠기를 고려 할 수 없는 레일리 (Rayleigh) 반사 손실 모델을 사용하고 있다는 단점이 있다 [1].

Andrieux는 주파수 변조 (FM, 10-150 kHz) 신호를 사용하여 30여개의 특성을 추출한 후 신경망 이론을 이용하여 해저면 분류를 시도하였다 [2]. 한편, 김 등은 고유치 분석을 통한 분류를 수행하였으며 [3-4], 최근에는 Hellequin (2003)과 Chakraborty (2003)에 의해 다중지향 (multi-beam) 소오나를 이용한 연구가 진행된 바 있다. Hellequin은 해저 퇴적물별 후방산란 에너지의 확률적 분포를 이용하여 다중지향 소오나의 이미징 향상을 시도하였으며 [5-6], Chakraborty는 지향각별 산란강도와 복합 거칠기 (Composite roughness) 모

책임저자: 조진석 (chojs@ihanyang.ac.kr)  
426-791 경기도 안산시 상록구 사1동 1271  
한양대학교 지구해양학과 해양음향연구소  
(전화: 031-400-4233; 팩스: 031-502-6068)

표 1. 해저면 분류 기법 연구

Table 1. Representative seafloor classification.

	Frequency	Sonar Type	Classification property	Classification Method	
L. R. LeBlanc, 1992	1-10 kHz	Chirp sonar	Reduced time, Bottom loss		High resolution, Deep penetration
N. Andrieux, 1995	10-50 kHz	Echo sounder	Echo property	Neural·Network	FM
Han Joon Kim, 2002	1-10 kHz	Chirp sonar	Similarity Index(SI)		FM
L. Hellequin, 2003	95 kHz	MBES	Scattering strength		Enhanced Image quality
B. Chakraborty, 2003	95 kHz	· MBES	Scattering strength	Neural Network	
A. Stepnowski, 2003	200 kHz	Echo sounder	Echo property	ANFIS	

델과 비교하여 신경망 이론 (Neural network)을 통한 해저면 분류 기법을 제안하였다 [7, 9-10].

Stepnowski는 웨이브렛 (wavelet) 기법과 주성분분석 (Principle Component Analysis)을 이용하여 특성을 추출한 후, 신경망 이론과 퍼지 이론을 조합한 적응 신경 퍼지 인식 시스템 (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS)을 이용하여 해저면을 분류하는 기법을 제안하였다 [8]. 이 방법은 주성분 분석을 통해 해저면의 특성을 추출하는 장점이 있는 반면, 단일 주파수의 한정된 정보에서 많은 양의 특성을 추출하여야 한다는 문제점을 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 해저면의 음향학적 거칠기에 따른 주파수 의존성을 갖는 반사 손실 모델 (HYBRL model)을 이용하여 다양한 주파수로부터 획득된 해저면의 음향 신호 응답 특성으로부터의 해저면 특성 추출을 시도하였으며 분류 기법으로는 실제 해양의 해저 퇴적층이 갖고 있는 분류 경계의 모호성 고려가 가능한 퍼지(Fuzzy)이론을 사용하였다.

## II. 이론 연구

### 2-1. 해저면 반사손실 모델

Wentworth는 해저 퇴적물을 표 2와 같이 평균입도에 따라 4 종류로 분류하였다[17]. 퇴적물은 입자의 크기에 따라 밀집구조 (Packing structure)가 다르고, 이러한 밀집구조의 차이는 압축성에 영향을 주어 퇴적물에 따라 다른 임피던스를 갖게 한다. 따라서 퇴적물의 임피던스는 수층과 차이를 나타내며, 퇴적물에 따른 반사손실의 차이가 생긴다. 이러한 퇴적물과 수층의 음향 임피던스에 의해 나타나는 반사손실을 해저면 분류에

표 2. 크기별 해저 퇴적물 분류 (Wentworth grain size scale)

Table 2. Classification of basic sediment.

Sediment type	Limiting particle diameter(mm)	Mean grain size( $\phi$ )
Clay	$\geq 1/2^9$	$\geq 9$
Silt	$1/2^4 - 1/2^9$	4 ~ 9
Sand	2 - $1/2^4$	-1 ~ 4
Gravel	$\leq 2$	$\leq 1$

사용하고자 한다. 최근에 고주파수 (10 kHz - 100 kHz) 대역에서 가장 정확하다고 알려진 Mourad와 Jackson의 모델은 Hamilton이 제안한 지음향 인자들과 평균입도 간의 상관관계를 기반으로 해저면 지음향 인자를 평균입도의 함수로 나타내었다[11]. 그러나 이 모델은 음향학적 거칠기에 대한 영향을 고려하지 못함으로써 주파수 의존성이 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 주파수에 따른 음향학적 거칠기의 영향을 보완한 해저면 반사손실 모델인 HYBRL (HanYang university Bottom Reflection Loss) 모델을 해저면 분류에 사용하였다[12-16].

산란 이론에서 경계면의 거칠기를 판단하는 기준은 레일리인자( $2k\zeta \cos\theta$ )를 기반으로 한 음향학적 거칠기 ( $g_R = 4k^2\zeta^2 \cos^2\theta$ ,  $k$ 는 음파의 파수,  $\zeta$ 는 경계면의 RMS 거칠기,  $\theta$ 는 수평입사각)이다. Tolstoy and Clay에 따르면 음향학적 거칠기  $g_R \gg 1$ 인 해저면은 음향학적으로 거친 경계면이라 하며 주파수에 대한 영향이 없는 것으로,  $g_R \ll 1$ 인 해저면은 음향학적으로 완만한 경계면이라 하며 주파수에 대한 영향을 고려한다. 그리고  $g_R \gg 10$ 인 경우는 고주파 한계로 주파수에 대한 영향이 없는 것으로 간주한다[18]. 기존 연구에서 음향학적 거칠기  $g_R \sim O(1)$ 에 해당하는 부분에서 내삽법

표 3. 해저 퇴적물 구성에 따른 주파수별 반사손실 : 수평입사각 90°  
 Table 3. Bottom reflection loss as a function of sediment type : grazing angle 90°.

Freq. Sed. type	30 kHz		50 kHz		80 kHz		100 kHz		120 kHz	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Clay	≥ 24.5		≥ 24.5		≥ 24.5		≥ 24.5		≥ 24.5	
Silt	18.0	25.0	18.0	25.0	18.0	25.0	18.0	25.0	18.0	25.0
Sand	6.5	20.0	6.5	22.0	6.5	27.0	6.5	31.0	6.5	36.0
Grave	≤ 10.0		≤ 11.0		≤ 13.0		≤ 17.5		≤ 23.0	

(interpolation)으로 발생하는 주파수에 의한 영향을 살펴보면 사실 퇴적물의 입도 분포가 주파수 70 kHz 이상에서는 O(1)에 해당하며 주파수에 따른 종속성을 가짐을 확인할 수 있었다[13].

따라서 주파수에 대한 거친 경계면에서의 반사 영향을 고려하면 그림 1과 같다.

모든 경계면에서의 임피던스 차에 대한 반사계수는  $\mathfrak{R}_{12}$ 이고 Kirchhoff 근사에 따라 거친 경계면을 거친 음선은 평균면(mean surface)으로부터 음선의 공간 위상차 (spatial phase difference)  $2k\zeta \cos\theta$ 를 갖게 된다. 또한 가우스 분포의 확률밀도함수를 갖는 경계면의 모든  $\zeta$ 에 대해 음압을 적분하면 평균면에서 반사된 음압에 대한 거친 경계면으로부터 반사된 실제 음압 비, 식 (1)을 얻게 된다.

$$\mathfrak{R}_{coh} = \left\langle \frac{p_b}{p_{b0}} \right\rangle = \mathfrak{R}_{12} \exp\left[-\frac{(2k\zeta \cos\theta)^2}{2}\right] \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며 이것을 음의 세기로 표현하면

$$\mathfrak{R}_{coh}^2 = \mathfrak{R}_{12}^2 e^{-g_R} \quad (2)$$

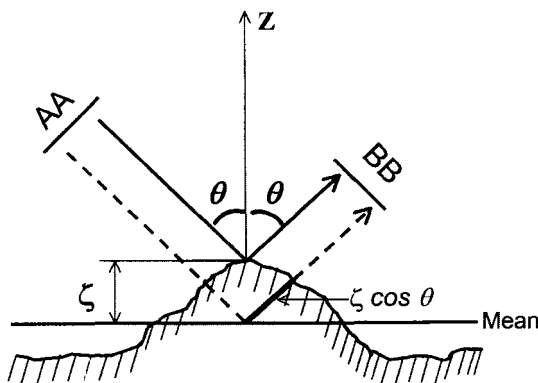


그림 1. 평균 해수면과 거친 해수면에서의 음파의 전달 경로  
 Fig 1. Path differences for specular scatter from a typical horizontal facet of a rough surface.

이고, 평면반사조건에 거칠기의 영향을 고려한 반사계수로 표현이 된다. 여기서 레일리 반사계수인  $\mathfrak{R}_{12}$ 를 Mourad와 Jackson의 반사손실 모델로 대치하면, 음향학적 거칠기의 주파수 의존성을 갖는 새로운 반사손실 모델이 된다. 이 반사손실 모델은 식(1)의 위상에서 음향학적 거칠기를 고려하고 있음을 알 수 있다. 파수 즉 주파수 및 수평입사각의 증가에 따라 종속성을 갖는다. 또한 해저면의 RMS 높이를 해저 퇴적물의 분포의 최소 입도 (Mmin)와 최대입도 (Mmax)까지의 영향을 고려하게 되어 반사손실은 구간을 갖게 된다.

$$\mathfrak{R}_{12} \exp\left[-\frac{(2kM_{min} \cos\theta)^2}{2}\right] \leq BL \leq \mathfrak{R}_{12} \exp\left[-\frac{(2kM_{max} \cos\theta)^2}{2}\right] \quad (3)$$

### 2-2. 퍼지 이론 (Fuzzy logic)

퍼지 이론은 주관적인 인식을 인정하고 이를 객관화시켜 표현하고자 하는 시도이다. 따라서 기존집합의 명확한 수식이나 정의를 통해 표현하려는 방법론에서 벗어나 애매성 (ambiguity)을 그대로 사용하고 있다. 이러한 퍼지의 애매성은 기존의 집합으로 표현 시 불확실한 집합의 경계의 표현이 불가능하다. 따라서 집합의 경계를 모호성 (fuzzy)의 정도로 표시하게 된다. 또한 퍼지 이론은 인간의 지식의 언어적 표현 처리, 전문가적 경험의 적용 및 비선형 함수를 쉽게 표현 할 수 있는 장점이 있다.

해저 퇴적물의 음향학적 응답특성을 퍼지의 장점을 이용하여 해저면 분류에 적용하였다. Stepnowski 등[8]은 특정주파수를 사용하여 한정된 정보에서 다양한 특성을 추출하고 그 특성을 기준으로 분류해야 하는 문제점 때문에 상대적으로 계산량이 적은 수계노 (Sugeno) 구조의 퍼지를 사용하였다. 그러나 수계노 구조의 퍼지 분별 시스템 (Fuzzy Inference System, FIS)은 맘다니 (mamdani) 구조의 퍼지 분별 시스템보다 계산량이 적은 장점이 있으나 구성이 복잡한 단점이 있다. 본 논문에서는 적은 특성만으로도 해저면의 특성을 표현이 가능하므로 구성

표 4. 해저면 분류 퍼지 시스템 구성 파라미터  
Table 4. Parameters of FIS for seafloor classification.

Type	Mamdani
Input membership function	HYBRL model
Output membership function	Wentworth grain size scale
Rule	Frequency dependency
Defuzzification	Centroid method

이 간단한 맴다니 구조의 퍼지를 사용하였다. 해저면 분류의 판단 기준이 되는 소속 함수 (membership function)는 크게 두 부분으로 입력 소속함수와 출력 소속함수로 구성된다. 입력 소속함수는 표 3과 같이 주파수 종속 해저면 반사손실 모델 (HYBRL)로 수직입사각에서의 최소입도와 최대입도의 영향을 고려한 반사손실로 구성하였고, 출력 구성함수는 지질학적 분류 기준 (Wentworth grain size scale)으로 구성하였다 [17]. 측정된 반사손실은 입력 소속함수에 규칙 (Rule)을 적용하여 입력 소속함수에 대한 반사손실의 소속도를 평가하고, 평가된 소속도에 의해 출력 소속함수의 소속도를 결정한 후 디퍼지피케이션 (Defuzzification) 과정을 거쳐 평균입도를 출력하는 해저 퇴적물 분류과정을 거친다 (표 4, 그림 2).

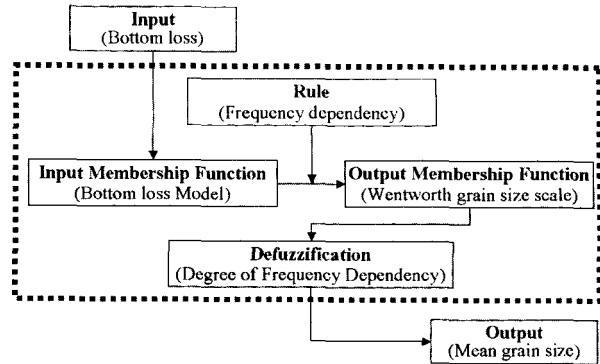


그림 2. 퍼지 이론을 이용한 해저면 분류 과정  
Fig 2. Schematic view of Seafloor classification by fuzzy logic.

### III. 실험개요 및 측정

해저면 분류 기법의 검증을 위하여 고주파 해저면 음향 실험이 2003년 5월 19일 25일 기간 중 남해해역 (거제도 - 대마도)에서 실시하였다. 한국지질자원 연구소의 해저퇴적물 분포도를 기본으로 해저 퇴적물 분포가 다른 6개의 정점을 선정하였으며, 실험 해역의 지음향 자료는 피스톤 코어를 이용하여 퇴적물을 채취하였다 (그림 3). 채집된 퇴적물은 탄산염, 유기물 제거 후 4φ 이하의 사질 성분은 물채질 (wet sieving)을 4φ 이상의 니질 퇴적물은 피펫팅 (pipeting)을 이용하여 퇴적물의 양을 측정 후 Fork 와 Ward (1957)의 방법으로 평균입도 및 모멘트를 산출하였다.

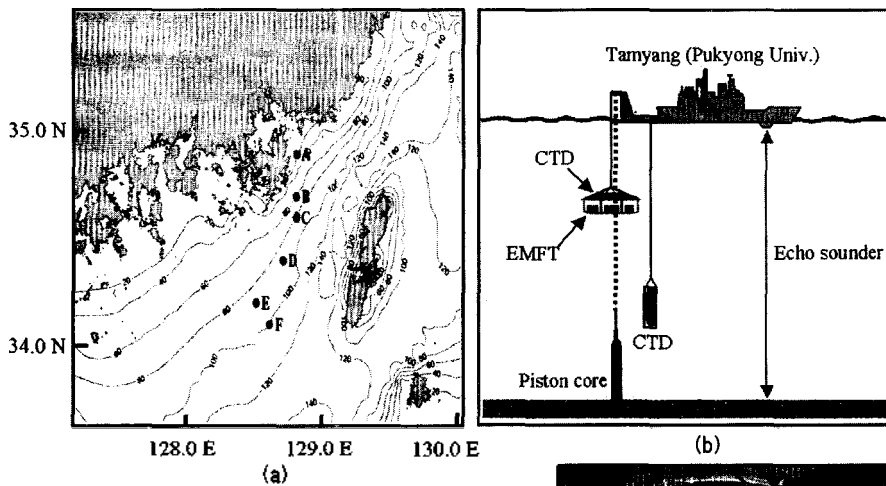
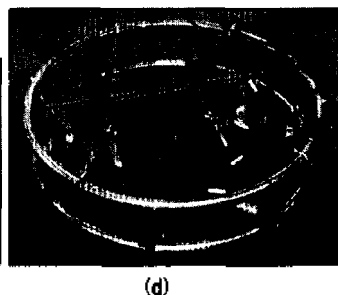
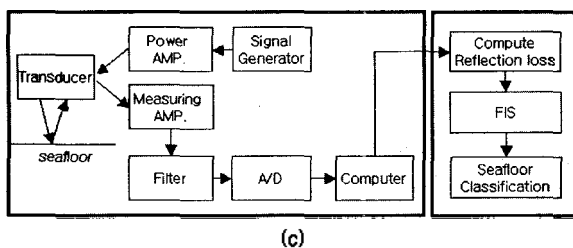


그림 3. 실험 정점 및 실험기기 구성  
(a) 실험 정점 (b) 실험 기기 구성  
(c) 실험 기기 구성 및 해저면 분류 과정 (d) 송수신 장치

Fig 3. Experiment Sites and layout (a) Experimental Sites (b) Experimental layout. (c) Schematic view of seafloor classification (d) Transducer setup.



(c)

(d)

표 5. 해저면 분류 퍼지 시스템 구성 파라미터  
Table 5. Parameters of FIS for seafloor classification.

Station	Water Content(%)	Composition(%)				Sediment Type	Moment			
		Grav.	Sand	Silt	Clay		Mz( $\phi$ )	Sort.	Skew.	Kurt.
A	55.0	0	35.3	64.7	0	sM	5.6	1.79	-0.44	0.69
B	29.3	0	99.2	0.8	0	S	2.2	0.79	-0.55	1.07
C	28.0	0	70.1	29.9	0	mS	3.0	1.48	0.29	0.77
D	54.6	0	5.9	94.1	0	M	6.0	0.92	-0.59	1.15
E	34.8	0	74.8	25.2	0	mS	3.6	2.57	0.66	1.13
F	Ref. KIGAM, 1990					S	3.0			

실험 해역의 수심은 40 - 110 m 이내이며, 실험 기간 동안 해상상태는 파고 0.5 m 내로 매우 양호하였다. 음향장비는 정점에 정선 후 해수면으로부터 10 m 수심에 설치하여 해저면과 수직지향 시켰다. 송신기는 T-128 (30 kHz), TC 2116 (50, 80, 100 kHz) 및 T-38 (120 kHz)의 5개 주파수를 사용하였고, 수신기는 TC 4014 를 사용하여 해저면 반사신호를 획득하였다 (그림 3). 음원 신호는 펄스길이가 5, 10, 20 ms의 정현파 신호를 사용하였고, 2-3 초 간격으로 10-20 회씩 반복하여 송신하였다. 경계면으로부터 반사된 신호는 다시 수신기로 수신하여 증폭 후 고주파 대역 통과 필터 후 A/D 변환기를 거쳐 저장하였다. 수신된 신호는 감쇠손실 및 전달손실을 고려하여 반사손실을 계산하였다.

### VI. 실험결과 및 분석

남해 6개 정점 중 피스톤 코어로 해저퇴적물이 시추

된 5개 정점에 대해서 퍼지 이론을 이용한 해저면 분류 결과를 입도분석 결과와 비교하였다. 그림 4는 퍼지 이론을 이용한 해저면 분류의 예이다. (a)는 실험 정점 및 음속구조이며, 수신된 신호는 (b)에서 주파수별 반사손실을 계산하고, (c)에서 주파수별 5개의 입력 소속함수와 1개의 출력 소속함수에 의해 평가된 결과가 (d)에서 해저 퇴적물의 형태와 평균 입도로 표시된 것이다. 정점별 해저 퇴적물의 분석결과는 표 5와 같다.

입도분석 결과 정점 B, C, E는 1 ~ 4 $\phi$  이하의 사질 퇴적물이며, A, D는 니질 퇴적물 이었다. 정점 A, C, E 정점은 퇴적물의 분포가 각각 사질과 니질에서 한 개씩 모드를 갖는 형태 (Bimodal)를 나타내며, B와 D 정점은 한 개의 모드를 가지며 레일리 (Rayleigh) 형태의 분포를 나타내고 있다.

퍼지 기법을 이용한 퇴적물 분류 결과, 니질과 사질 퇴적물의 특징을 갖고 있는 A, D와 B, C, E 정점이 각각 입도 분석과 유사한 결과를 보였다. 오히려 단순한 평균값으로 대변되는 기존의 평균입도는 실제 그 함량이 매우 적은 입도를 대표값으로 표현하는 결과를 보인

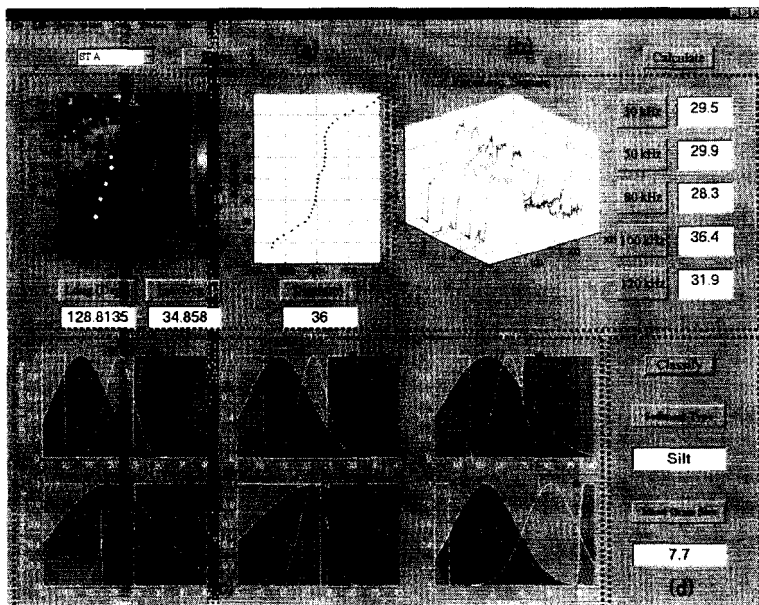


그림 4. 해저면 분류 예(정점 A). (a) 실험정점 및 음속구조, (b) 수신신호 및 반사손실 계산, (c) 입력 소속함수, 출력소속 함수, (d) 퍼지 분석 결과 (해저면 퇴적 구성물질 및 평균입도)  
Fig 4. Example of seafloor classification at St. A (a) Site map and SVP, (b) Signal and bottom loss, (c) Input and output membership function, (d) Output (sediment type, Mean grain size).

반면, 퍼지 기법을 이용한 결과의 경우, 실제 함량이 우세한 값을 퇴적물의 대표값으로 인식하는 결과를 보였다. 특히 가장 큰 차이를 보이는 정점 A는 평균입도의 분석결과와는 5.6  $\phi$ 를 나타내고 있으나, 퍼지 분석 결과는 퇴적물의 함량이 높은 7.7  $\phi$ 를 나타내고 있으며, 실제로 5-6  $\phi$ 에서는 퇴적물의 전체함량에 7%로 전체 함량의 60%인 7-8  $\phi$ 에 비해 아주 낮은 값을 알 수 있다 (그림 5). 실제로, 자연상태의 퇴적물의 분포는 정규 분포 보다는 레일리 분포 (B, D 정점)나 두개의 모드 (Bimodal)를 갖는 분포 (A, C, E 정점)를 보이고 있다.

이러한 분류 경향은 모든 정점에서 동일한 결과를 보여주고 있으며, 지질학적인 퇴적물 분류 결과와는 다르게 퇴적물의 함량이 높은 경향으로 해저면의 입도를 나타내고 있다. 따라서 기존의 평균입도를 이용한 퇴적층의 대표값 추출 시 실제 존재하는 퇴적층의 입도 크기별 조성 분포와는 상이한 결과를 보일 수 있다. 본 연구에서 적용한 퍼지 분류기법의 경우, 다중 주파수를 이용하여 음향학적인 거칠기와 음향 임피던스에 의한 반사 손실을 동시에 고려함으로써 해저면에 존재하는 퇴적층의 주요 구성 입도를 추정할 수 있었다.

### V. 결론 및 고찰

해저면 분류를 위하여 고주파수대역의 다양한 주파수에 대한 해저면의 음향학적 신호 응답 특성인 반사손실을 해저면 분류 특성으로 선정하였다. 또한 퇴적물의 거칠기를 고려한 주파수 종속성 반사손실 모델을 이용하여 맵다니 형태의 퍼지 분별 시스템을 구성하여 해저면 분류를 연구하였다. 2003년 5월 19일부터 23일까지 5일간 해상 실험을 통해 획득한 해저면 반사손실을 입력 값으로 퍼지 분별 시스템을 이용하여 해저면 특성 분류 및 평균입도 분석을 실시하였으며, 지질학적인 방법을 이용한 결과와 비교하였다. 그 결과, 지질학적인 분류 기준 (평균입도)과는 달리 퍼지 이론을 통한 분류 결과에서는 음향학적인 거칠기 효과를 고려 함으로써 입도 분포가 우세한 입자의 크기가 대표값을 갖는다. 이러한 현상은 다중 주파수를 사용함으로써 음향학적인 거칠기 인식에 의한 신호응답이 잘 나타나고 있음을 보여주었다. 향후, 다양한 해저 퇴적물에 대한 해상 실험 및 분류 연구가 지속적인 연구를 위해서는 해저면 퇴적물 분포의 최대값 뿐만 아니라 퇴적물 분포를 유추할 수 있는 기법의 개발이 요구된다. 또한 다중 지향 측심

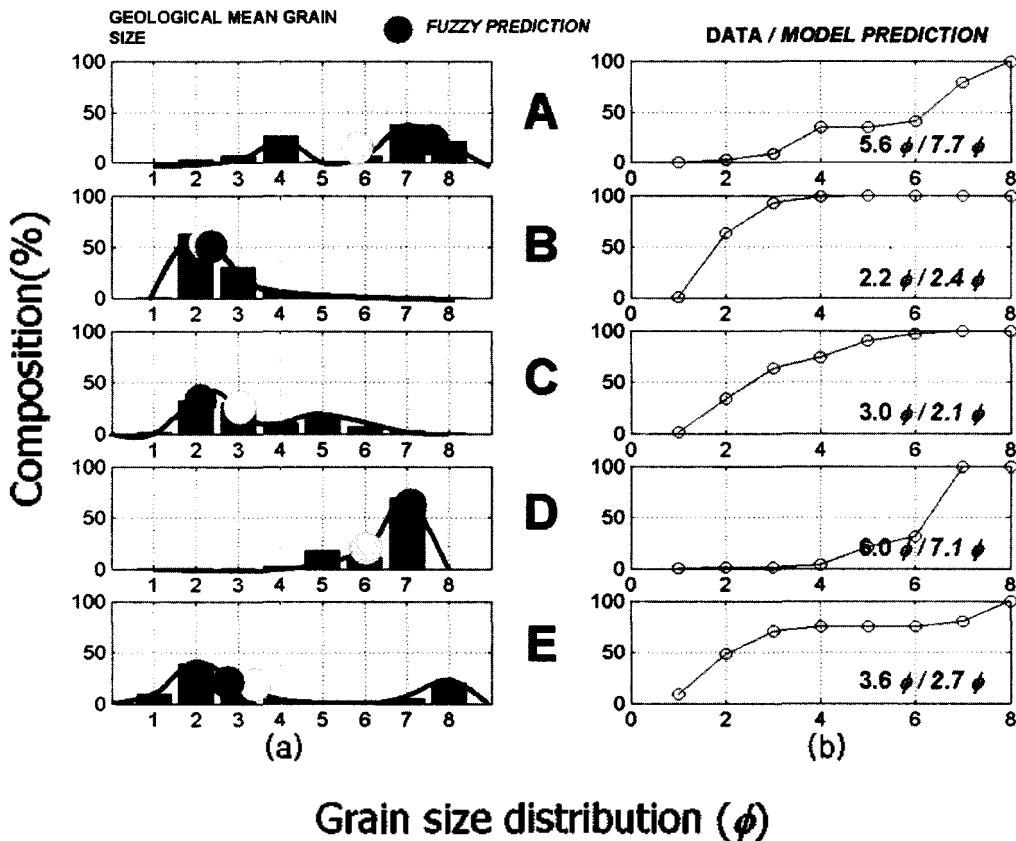


그림 5. 해저 퇴적물 분석결과와 퍼지 예측결과  
Fig 5. Comparison of mean grain size and fuzzy prediction.

기나 전방향 음원 등과 같은 다양한 음원을 이용한 해저면 분류 기법 개발이 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. L. R. LeBlanc, Marine sediment classification using the chirp sonar, J. Acoust. Soc. Am. **91**(1), 107-115, Jan. 1992
2. N. Andreux, P. Delachartre, D. Vray, G. Gimenez, and A. Dziedzic. "Lake bottom recognition using a wideband sonar system and time frequency analysis", J. Acoust. Soc. Am. **98**(1), 552-559, 1995
3. 정재경, "Chirp 신호의 감쇠특성 분석에 의한 해저면 퇴적을 분류 연구", 학위논문, 1999
4. H. J. Kim, J. K. Chang, H. T. Jou, G. T. Park, B. C. Suk and K. Y. Kim, "Seabed classification from acoustic profiling data using the similarity index", J. Acoust. Soc. Am. **111**(2), 794-799, 2002
5. L. Hellequin, "Statistical characterization of multibeam echo sounder data", Proc. OCEAN '98 MTS/IEEE conf., 1, 228~233, 1998
6. L. Hellequin, J. Boucher, and X. Lurton, "Processing of High frequency multibeam echo sounder data for seafloor characterization", IEEE J. OCEAN Eng. **28**(1), 78-89, 2003
7. B. Chakraborty, V. Kodagali, and J. Baracho, "Sea Floor classification using multibeam echo sobackscatter data : A real time approach employing hybrid neural network architecture", IEEE J. OCEAN Eng. **28**(1), 121-128, 2003
8. A. Stepnowski, M. Moszynski, and Tran Van Dung, "Adaptive neuro fuzzy and fuzzy decision tree classifiers as applied to seafloor characterization", Acoustic physics, **49**(2), 193~202, 2003
9. APL UW, "High frequency Ocean Environmental Acoustic Model Handbook", Technical Report APL UW TR 9407 AEAS 9501, 1994.
10. P. D. Mourad, and D. R. Jackson, "High frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss," Proc. OCEAN'89, New York, 1168-1175, 1989.
11. E. A. Hamilton, R. T. Bachman, "Sound velocity and related properties of marine sediments", J. Acoust. Soc. Am., **72**, 1891-1904, 1982.
12. 박순식, 윤관섭, 조진석, 나정열, 나영남, "고주파 해저면 반사손실의 주파수 종속성 측정", 제17회 수중음향학 학술발표회 논문집, 83-86, 2002.
13. 박순식, 윤관섭, 조진석, 나정열, "고주파 해저면 반사손실 모델", 한국음향학회 추계학술발표대회 논문집, **22**(2s), 207-210, 2003.
14. 박순식, 윤관섭, 조진석, 나정열, "고주파 해저면 반사손실의 주파수 종속성 측정", 한국음향학회지, **22**(8), 652-659, 2003.
15. K. S. Yoon, S. S. Park and J. Na, "Frequency dependence

of high frequency bottom reflection loss", Internoise 2003, CD, N450, 3743-3748, 2003.

16. 박순식, 조진석, 윤관섭, 나정열, 석동우, 주진용 "고주파 해저면 반사손실 모델" (심사중)
17. R. A. Davis, Jr, Depositional systems : An introduction to sedimentology and stratigraphy, 2ed, Prentice Hall, 1992
18. I. Tolstoy and C. S. Clay, Ocean Acoustics :Theory and experiments in underwater sound, McGraw Hill, New York, 1966.

### 저자 약력

• 조진석 (Jinsuk Cho)



2002년 2월: 한양대학교 지구해양학과 학사  
 2002년 3월 현재: 한양대학교 지구해양학과 대학원 재학중  
 \* 관심분야: 수중음향 신란

• 윤관섭 (Kwan-Seob Yoon)

한국음향학회지 제21권 제5호 참조

• 박순식 (Soon-Shik Park)

한국음향학회지 제22권 제8호 참조

• 나정열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

• 주진용 (Jin-Yong Joo)



1986년 2월: 한양대학교 기계공학과 공학사  
 1998년 현재: SV㈜ 대표이사  
 \* 관심분야: 소음진동, 수중음향