

논문 2001-10-6-03

PZT-에폭시 3-3형 복합압전체 초음파 트랜스듀서를**사용한 3차원 수중 물체인식**

조현철*, 허진**, 사공건**

3-D Underwater Object Recognition Using PZT-Epoxy 3-3 Type Composite Ultrasonic Transducers

Hyun-Chul Cho*, Jin Heo**, Geon Sa-Gong**

요약

본 연구에서는 자체 제작한 3-3형 복합압전체 초음파 트랜스듀서와 SOFM(Self Organizing Feature Map) 신경회로망을 이용한 수중 3차원 물체인식특성에 대해 연구하였다. 자체 제작한 3-3형 복합압전체 소자는 수중 초음파 트랜스듀서 재료로서의 요구조건을 비교적 잘 만족하였다. 자체 제작한 3-3형 복합압전체 트랜스듀서와 SOFM 신경회로망을 이용하여 얻어진 4종의 인식물체(정사각기둥, 직사각기둥, 원통, 정삼각기둥)에 대한 전체적인 수중 물체인식률은 학습데이터인 경우에는 100%, 시험데이터는 94.0%를 나타내었다. 이들 결과로부터 자체 제작한 3-3형 복합압전체 초음파 트랜스듀서는 수중 물체인식용 트랜스듀서로서 응용될 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract

In this study, 3-D underwater object recognition using the self-made 3-3 type composite ultrasonic transducer and modified SOFM(Self Organizing Feature Map) neural network are investigated.

Properties of the self-made 3-3 type composite specimens are satisfied considerably with requirements as an underwater ultrasonic transducer's materials. 3-D underwater all object's recognition rates obtained from both the training data and testing data in different objects, such as a rectangular block, regular triangular block, square block and cylindrical block, were 100% and 94.0%, respectively. All object's recognition rates are obtained by utilizing the self-made 3-3 type composite transducer and SOFM neural network.

From the object recognition rates, it could be seen that an ultrasonic transducer fabricated with the self-made 3-3 type composite resonator will be able to have application for the underwater object recognition.

1. 서론

지능화·정보화 시대를 추구하는 현대사회에서는 유연한 정보처리 및 휴먼인터페이스 기술의

확립이 요구되면서 신경회로망 이론은 지능로봇, 영상처리 및 3차원 물체인식 등의 분야에서 널리 사용되고 있다. 3차원 물체인식에는 트랜스듀서에서 물체까지의 거리정보를 이용하는데, 거리정보 추출에는 스테레오 비전과 레이저 거리센서를 이용한 광학적 방법, 레이더 등 전자파를 이용하는 방법 및 초음파를 이용하는 방법 등이 제안되고 있으나 사용환경에 따라 능률은 달라진다.

카메라 비전시스템은 빛의 영향으로 사용환경에 제한을 받으며, 투명물체의 인식은 어렵다. 특히 물 속은 일반적으로 혼탁하며 해변 근처에

* 경북전문대학 전기전자계열(Division of Electrical and Electronic)

** 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부(School of Electrical, Electronic and Computer Engineering)

<접수일자 : 2001년 9월 19일>

는 혼탁도가 심하여 광학적 비전시스템의 시야는 1~6M로 제한되고, 수중의 염분은 빛의 에너지를 심하게 감쇠시켜 먼 거리의 측정을 어렵게 한다^[1]. 레이더 등의 전자파를 이용하는 방법은 전자파의 전파속도가 너무 빨라 근접한 거리의 검출은 어렵고, 유리와 같은 투명물체는 투과하므로 검출이 불가능하다.

이들에 비하여 초음파 트랜스듀서는 송신된 초음파가 검출물체에 반사되어 수신될 때까지의 초음파 비행시간을 이용하여 물체에 대한 정보를 획득하므로 검출물체의 제한이 없으며, 빛의 양과 방향 등의 영향을 받지 않아 카메라 사용이 적합하지 못한 환경에서도 물체인식이 가능하다. 또한 해수에서는 염분에 의한 음파에너지의 감쇠가 적어 먼 거리의 물체정보 획득이 가능하고, 데이터 처리가 간단하여 깊이 측정, 어군탐지, 수중음파 시스템에 널리 사용되고 있다^[2].

수중 음파시스템은 송·수신 수중 음파의 시간경과 및 왜곡을 분석하여 물체에 대한 중요한 정보를 획득하는데, 여기서 신호획득, 잡음제거, 특징 추출 등 분류기법으로 신경회로망이 이용되고 있다.

일반적으로 초음파 트랜스듀서 재료로는 큰 압전정수를 가진 PZT(Lead Titanate Zirconate)가 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 PZT 단일상(single phase)만으로 제작된 초음파 트랜스듀서가 수중에서 사용될 경우 PZT소자의 높은 유전율로 인하여 성능지수가 작으며, 밀도가 높아 수중 음향임피던스 정합(matching)이 어렵다. 이를 개선하기 위해 낮은 밀도, 큰 압전성을 가진 각종 압전세라믹-고분자 복합압전체(composite)에 대한 연구가 진행되고 있다^[3]. 특히, PZT-고분자 3-3형 복합압전체는 D.P. Skinner^[4]에 의해 산호를 재료로 한 Lost-wax법에 의해 처음 제작되었으며, 그 후 T.R. Shrout^[5]은 3-3형 복합압전체를 BURPS(BURnout Plastic Sphere method)으로 제작하였다. 본 연구에서는 플라스틱 구체(Plastic Sphere)로 PVA(polyvinylalcohol)를 사용하여 다공질 PZT를 제조한 후^[6-7], 이들을 3-3복합압전체 제조용 충전상(filler phase)으로 사용하고, 고분자 매질상으로는 에폭시 수지계(Eccogel 1365-0 : Emerson & Cuming Inc.)를 사용하여 3-3형 복합압전체 소자를 제조하였다^[8-9].

Watanabe 등^[10]은 초음파센서 배열과

Backpropagation신경회로망을 이용한 3차원 물체에 대한 연구를 하여 고해상도의 3차원물체 복원특성을 얻었으나 모든 출력 뉴런(neuron)에 목표값을 정해주어야하는 지도학습계열^[11]의 신경회로망을 사용함으로써 처리시간이 길고, 고정된 물체에 한정되어 있었다. 한편 국내에서는 실질적인 수중 물체인식 적용에 대한 연구는 PZT소자만으로 제작된 수입된 PZT초음파센서를 배열한 물체인식에 대한 연구가 발표되고 있으나^[12], 복합압전체 초음파 트랜스듀서를 사용한 물체인식에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 종래의 PZT소자만으로 제작된 초음파트랜스듀서의 수중 음향임피던스정합을 개선하고 성능지수를 향상시키기 위하여 PZT-에폭시 3-3형 복합압전체 소자를 사용하여 3-3형 복합압전체 초음파트랜스듀서(이하 3-3형 초음파트랜스듀서라 칭한다)를 자체 제작하였다^[8-9]. 제조된 이들 소자의 특성뿐만 아니라 수중 물체인식특성을 검토하기 위해 이를 실질적인 수중 물체인식실험에 적용해 보았다. 아울러 검출된 수중 물체인식특성과 소자의 특성을 비교 연구함으로써 자체 제작한 초음파트랜스듀서가 수중에서 응용 가능한지를 검토하였다.

II. SOFM 신경회로망

3-3형 복합압전체 소자를 사용하여 자체 제작한 3-3형 초음파 트랜스듀서에 의해 추출된 수중의 3차원 물체 정보들을 분류하고 물체를 인식하기 위해 신경회로망을 이용한다. 추출된 물체정보들을 학습에 의해 분류하는 신경회로망에는 학습방법에 따라 지도학습(supervised learning)^[11]과 자율학습(unsupervised learning)^[12]으로 크게 구분한다. 본 연구에서는 입력 값과 목표 값을 함께 입력받아 학습함으로써 데이터 처리시간이 긴 지도학습의 신경회로망에 비해 비교적 처리시간이 빠른 자율학습계열의 신경회로망을 사용한다.

SOFM(Self-Organizing Feature Map) 신경회로망^[13]은 자율학습의 대표적인 신경회로망으로서 각 뉴런이 다른 뉴런들 사이에서 자기조직에 의한 유클리드 거리에 따른 조직적인 지도를 형성하는 학습알고리즘을 가지며, 다음 식 (1), (2)와 같다.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot N_j(t) \cdot [x_i(t) - w_{ij}(t)] \quad (1)$$

$$\alpha(t) = 0.9 \left(1 - \frac{t}{\text{Number of Iterations}} \right) \quad (2)$$

여기서 $\omega_{ij}(t)$ 는 시간 t 에서 입력뉴런 i 와 출력뉴런 j 사이의 연결강도 벡터이며, $x_i(t)$ 는 시간 t 에서의 입력벡터, $N_j(t)$ 는 근접상호작용함수, $\alpha(t)$ 는 학습율을 나타낸다.

SOFM 신경회로망은 입력 물체들에 대한 3차원 윤곽특징을 추출하여 물체입력의 갯수만큼 분류하며, 그림 1에서와 같이 출력노드인 neuron space는 $N \times N$ 정방향, 입력벡터는 V 차원으로 구성한다.

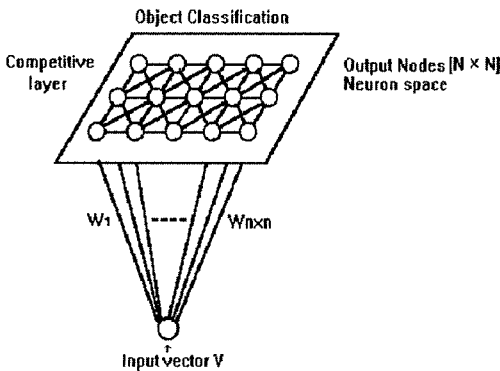


그림 1. SOFM 신경회로망.
Fig. 1. SOFM neural network.

III. 실험방법 및 특성측정

1. 3-3형 복합압전체 트랜스듀서의 제작

3-3형 복합압전체는 다공질 PZT 세라믹스를 충전상(filler phase)으로 사용하고, 고분자 매질상(polymer phase)을 복합화하여 제조한다. 우선 다공질 제조용 PZT분말은 PbO, ZrO₂ 및 TiO₂를 출발원료로 하여 상조성경계(MPB)^[14]를 가진 PZT[Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃] 분말을 용융염합성법^[6-7]에 의해 제조하였다. 이들 분말과 기공 형성을 위한 플라스틱 구체(plastic sphere : 74~88(μm))로는 PVA(polyvinylalcohol)를 사용하였다. PZT와 PVA의 중량비를 92.5 : 7.5(wt.%)로 하여 BURPS법에 의해 다공질 PZT를 제조하였다^[6-7]. 이들 다공질 PZT를 충전상(filler phase)으로 사용하고, 고분자 매질상으로는 에폭시 수지계(Eccogel 1365-0 : Emerson & Cuming Inc.)를 사용하여 3-3

형 복합압전체 소자를 제조하였다^[8-9]. 그 후 이들 시편에 상온 건조용 은전극을 도포한 후 75(°C)의 실리콘 기름 중에서 30~35(kV/cm)의 전계를 10분 인가하여 분극처리하였다^[15]. 이들 시편을 24시간 이상 aging시킨 후 각종 유전 및 압전특성을 측정하였으며, 수중용 초음파 트랜스듀서용 재료로서의 요구되는 조건과 비교하였다.

PZT-에폭시 3-3형 복합압전체 소자를 진동자로 사용하여 트랜스듀서 제작을 위해 음향임피던스가 비교적 크고, 내경이 15(mm)인 동(copper)파이프를 사용하였다. 탐촉자의 한쪽은 진동자를 고정하였고, 다른 한쪽은 BNC 컨넥터를 부착하였다. 진동자 주위는 수중에서의 각종 초음파 특성을 조사할 수 있도록 실리콘 고무로 밀폐시켰다. 이때 진동자의 시효(aging)발생을 감소시키기 위하여 (+)전극을 안쪽으로 향하게 하였고, 신호선(signal line)은 은선(silver wire)을 사용하였다.

비유전율(K₃₃)은 LF Impedance Analyzer (HP4192A)를 사용하여 구하였고, 압전정수 d₃₃는 Berlincourt Piezo d₃₃-meter(Model CPDT 3300, Channel Products, Inc.)로 측정하였다. 수중 압전전압정수 g_h는 pseudo dynamic g_h측정법^[8]에 의해 구하였으며, 또한 LF 임피던스 분석기(HP4192A)를 사용하여 공진주파수 및 공진임피던스를 측정하였다. 이로부터 전기기계결합계수, 기계적 품질계수, 종속도 및 음향임피던스를 계산하였으며, 탄성컴플라이언스는 EMAS의 규정^[16]에 의해 구하였다. 자체 제작한 3-3형 복합압전체 트랜스듀서의 펄스에코응답특성^[17]은 Testpro System(Infomatics Inc, Silver Spring, MD)과 Pulse Receiver (1010PR, Physical Acoustics Co.)를 통하여 평가하였다.

2. 3차원 수중 물체인식 실험

3차원 수중 물체인식을 위한 실험장치로는 초음파 트랜스듀서 분석용 소프트웨어 Testpro System(Infomatics Inc, Silver Spring, MD), Pulse Receiver(1010PR, ACCU-TRON Inc.) 및 수조(upk-T, Physical Acoustics Co.)를 사용하였다. 3차원 수중 물체인식 실험에 사용된 물체의 종류와 크기는 스테인레스강 재질(S45C)의 정사각기둥 W5×L5×H2[cm], 직사

각기둥 $W4 \times L5 \times H2$ [cm], 원기둥 $D5 \times H2$ [cm], 정삼각기둥 $L5 \times H2$ [cm]의 4종류를 사용하였다.

자체 제작한 3-3형 초음파 트랜스듀서의 중심을 기준으로 먼저 y축으로 1[cm]간격으로 16 step 이동시킨 후 x축으로 1[cm] 이동시키는 동작을 반복하여 수조 내의 물체의 거리정보를 픽셀당 x축으로 1[cm], y축으로 1[cm]의 크기를 갖는 16×16 픽셀로 획득하였다.

본 실험의 x, y 좌표 값은 초음파 트랜스듀서 중심의 고정된 값이므로 초음파 트랜스듀서는 직진성만을 가진다고 가정하여 측정 범위에서 벗어난 수중 물체의 거리정보들은 제거하였다. 수중 물체의 거리정보는 초음파 트랜스듀서에 가해진 임펄스 전기신호에 의한 음파의 비행시간을 검출하여 계산하였으며, 거리정보 검출방법으로는 one-pulse echo mode를 이용하였다¹⁰⁾.

실험장치로부터 획득된 원시데이터 16×16 픽셀의 3차원 수중 물체정보는 실험환경의 온도변화 등에 잡음(noise)을 포함하고 있어 이를 제거하고 물체정보를 일정한 픽셀로 전처리한 후 이를 SOFM 신경회로망의 입력으로 사용하였다.

그림 2는 물체인식실험의 작업영역을 나타낸 것으로 그림 2의 작업영역 중심점 O에 수중 물체인식 실험에 사용될 각 물체를 놓은 후 정사각기둥 40개, 직사각기둥 40개, 원기둥 40개, 정삼각기둥 40개의 데이터인 총 160개의 원시데이터를 추출하여 일정한 픽셀로 전처리하였다. 이 중에서 96개는 SOFM 신경회로망의 학습(training) 데이터로 이용하였고, 나머지 64개는 시험(testing)데이터로 사용하였다.

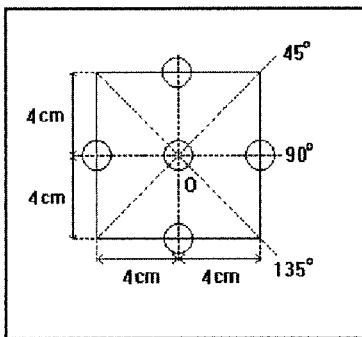


그림 2. 물체인식실험의 작업영역.
Fig. 2. Workspace for object recognition.

SOFM 신경회로망은 3-3형 초음파 트랜스듀서에 의해 획득된 수중 물체의 거리와 위치정보들을 입력받아 3차원 수중 물체유평 특징을 추출하여 정사각기둥, 직사각기둥, 원기둥, 정삼각기둥인 4종류의 물체 입력데이터를 분류하였다.

본 실험에서는 SOFM 신경회로망의 출력 neuron space 크기를 $N \times N$, 입력벡터 V는 $256(16 \times 16)$ 차원으로 구성하고 식 (1)~(2)의 학습알고리즘을 이용하여 반복 학습시켰다. 이때 SOFM 신경회로망의 출력 neuron space 크기 및 반복학습 회수가 수중 물체인식률에 미치는 영향을 실험하기 위하여 출력 neuron space 크기를 2×2 에서 10×10 까지 변화시켰고 각 출력 neuron space에서 반복학습 횟수도 $10 \sim 50$ 회까지 변화시켰다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 3-3형 복합압전체 소자의 특성

표 1은 자체 제작한 PZT소자와 PZT-에폭시 3-3형 복합압전체 소자의 특성⁽⁸⁻⁹⁾을 나타내었다. 3-3형 복합압전체 소자의 경우 PZT소자에 비해 밀도 및 종속도가 작아짐으로써 수중 음향 임피던스가 개선되었고, 탄성컴플라이언스가 증가되어 기계적 충격에 대한 흡수능력이 증대될 것으로 기대된다.

표 1. PZT-에폭시 3-3형 복합압전체 소자의 제 특성.

Table 1. Properties of 3-3 type PZT-Epoxy composite specimen.

Properties	Measured Values	
	3-3 Type composite	PZT
Density	4.9[g/cm ³]	7.7[g/cm ³]
Dielectric permittivity	849	1.400
Piezoelectric constant d_{33}	$310(\times 10^{-12} \text{ C/N})$	$364(\times 10^{-12} \text{ C/N})$
Piezoelectric constant g_{33}	$37(\times 10^{-3} \text{ Vm/N})$	$26(\times 10^{-3} \text{ Vm/N})$
Mechanical quality factor Q_m	5.09	80
Thickness coupling coefficient K_t	0.56	0.7
Elastic compliance S_{33}^D	$21.0(\times 10^{-12} \text{ m/N})$	$12(\times 10^{-12} \text{ m/N})$
Longitudinal velocity V_3^D	$2,400(\text{m/S})$	$4,020(\text{m/S})$
Underwater acoustic impedance	12.2[Mrayl]	31[Mrayl]
Figure of merit $d_h \cdot g_h$	$1,956(\times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N})$	$100(\times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N})$

1(KHz)에서 측정된 3-3형 복합압전체 시편의 비유전율은 에폭시와 조합함으로써 PZT의 비유전율(1,400)에 비하여 약 849정도로 작은 값이 얻어져 수중 압전전압정수 g_h 가 개선될 것임을 알 수 있다. 3-3형 복합압전체 시편의 d_{33} 값은 $310(\times 10^{-12}C/N)$ 정도로 자체 제작한 PZT 소결체의 값 $364(\times 10^{-12}C/N)$ 에 거의 근접하고 있으며, 전기기계 결합계수(k_t)도 0.56으로 PZT($k_t=0.70$)에 근접한 값이 얻어져 전기음향 변환능률이 양호할 것임을 알 수 있다.

기계적품질계수(Q_m)는 약 5.09정도로 PZT의 Q_m 값(80)에 비하여 상당히 작아짐으로서 pulse 상승시간이 빠르고 pulse-echo진폭이 크지게 됨으로써 광대역 트랜스듀서로서 응용될 수 있음을 알 수 있다. 수중 음향임피던스는 시편의 밀도와 음속(V_3^D)에 의해 정해지는 정수로 음향임피던스가 작은 고분자를 복합화하여 3-3형 복합압전체를 제작함으로써 약 12.2(Mrayl)가 얻어져 PZT(약 31Mrayl)에 비해 상당히 개선된 값이 얻어져 음향 에너지의 전달이 더욱 잘 이루질 것임을 예측할 수 있다.

또한 정수압상태에서의 3-3형 복합압전체 소자의 성능지수 $d_h \cdot g_h$ 값은 단일상 PZT에 비해 약 20배 가량 증가된 값을 보여주고 있으나, 두께모드를 이용한 3-3형 복합압전체 트랜스듀서의 성능지수($d_{33} \cdot g_{33}$)는 PZT(9,464)에 비해 11,470으로 약 20% 가량 향상된 값을 보여주고 있다. 이상의 결과로부터 3-3형 복합압전체 소자는 수중용 초음파 트랜스듀서 재료로서의 요구조건^[18]을 비교적 잘 만족하고 있음을 알 수 있었다.

2. 3-3형 트랜스듀서의 펄스-에코특성

2.1. 입력임펄스

PZT트랜스듀서, PZT-에폭시 3-3형 초음파 트랜스듀서로 수중 물체인식실험을 위한 거리정보 추출을 위한 펄스-에코특성을 얻기 위하여 사진 1과 같은 임펄스(impulse)를 인가하여 시편 자체의 진동특성 및 펄스-에코 응답특성을 얻었다. 이때 인가된 임펄스 신호의 크기는 10배의 프로브(probe)를 사용하여 측정된 값을 나타내고 있다.

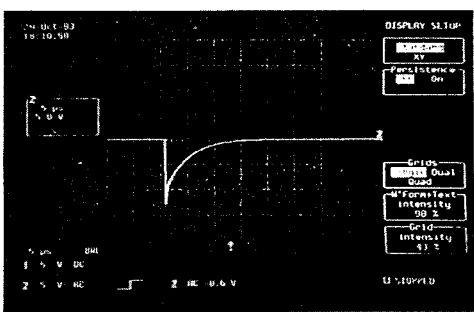
2.2. PZT트랜스듀서

사진 2(a) 및 2(b)는 자체 제작한 단일상 PZT진동자를 사용한 트랜스듀서의 펄스-에코응답특성을 나타낸 것이다.

사진 2(a)에서 채널 2에 나타난 입력 임펄스가 송신용 트랜스듀서에 가해지면 트랜스듀서는 여기(excitation)되어 음파가 수중으로 전달된다. 전달된 음파는 대상물에 의해 반사되어 트랜스듀서에 수신되며, 이와 같은 과정의 반복을 거쳐 음파는 채널 1에 나타난 것과 같이 점차 감쇠되어 소멸된다.

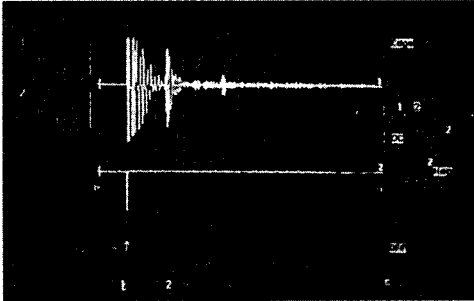
채널 1의 첫번째 좌측에 나타나는 파형군(wave group)은 인가된 임펄스에 의해 진동자 자체의 진동에 의해 반복되어 나타남 파형이며, 두번째 파형군은 진동자의 진동에 의해 수중으로 진행하여 반사되어 오는 수신파로, 이 또한 앞의 경우와 같은 과정의 반복에 의해 파형군으로 나타난다.

사진 2(b)는 두번째 파형군의 시간축을 5($\mu s/div.$)로 확대하였을 경우의 출력 파형으로 진동의 울림(ringing)이 여러 주기동안 계속되고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 진동울림감쇠가 비교적 오래 지속되면 수신감도를 저하시키는 원인이 되며, 이는 압전세라믹스 PZT의 수중 전압정수(g_h, g_{33})가 작기 때문으로 생각된다.

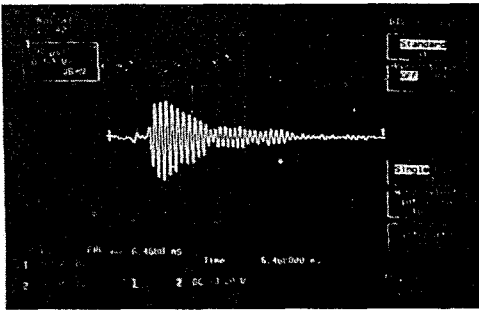


(X : 0.5us/div., Y : 5V/div.)

사진 1. 트랜스듀서의 인가 임펄스. Photo. 1. Input pulse of transducer analyzer.



(a) (Channel 1 - X : 50us/div., Y : 0.5V/div., Channel 2 - X : 50us/div., Y : 5V/div.)

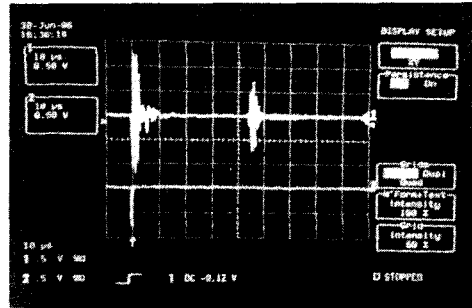


(b) (X: 5 μ s/div., Y: 0.5V/div.)

사진 2. PZT트랜스듀서의 펄스에코응답특성.

Photo. 2. Pulse-echo response of solid PZT transducer.

- (a) Transmitting and receiving waveform of transducer.
- (b) Extended waveform of echo signal.



(a) (Channel 1 - X: 10 μ s/div., Y: 0.5V/div., Channel 2 - X: 10 μ s/div., Y: 0.5V/div.)

2.3. 3-3형 트랜스듀서

사진 3(a) 및 3(b)는 자체 제작한 PZT-에폭시 3-3형 초음파 트랜스듀서의 펄스-에코응답특성을 나타낸 것으로, 인가된 입력 임펄스가 채널 2에 나타내어져 있다.

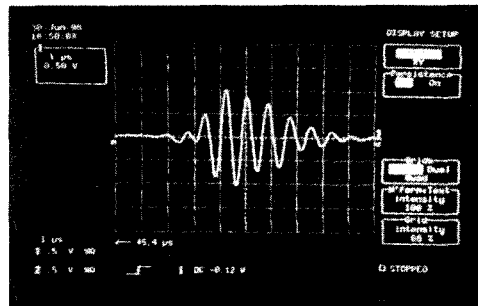
사진 3(a)는 3-3형 트랜스듀서를 사용하여 얻은 송수신 파형을 나타낸 것으로 PZT(사진 2a)에서와 같은 기구(mechanism)에 의해 트랜스듀서에 수신된다. 사진 3(a)에 있어서 X축의 눈금은 10(μ s/div.)이다.

또한 사진 3(a)의 채널 1의 첫번째 좌측에 나타나는 파형군은 인가된 임펄스에 의해 진동자 자체의 진동에 의해 나타난 파형이다. 두번째 파형군은 수신된 에코 파형으로 사진 3(b)에 에코 파형의 시간축을 1(μ s/div.)로 확대하여 나타내었다.

사진 3(b)에서 PZT-에폭시 3-3형 트랜스듀서에서는 단일상 PZT세라믹스 탐촉자를 사용하는 경우(사진 2b)에 비하여 응답파형의 지속적인 진동의 울림현상은 나타나지 않고 시간에 따라 급격한 울림감쇠(ringdown)현상이 나타나고 있다. 이는 3-3형 복합압전체 트랜스듀서의 성능지수가 PZT소자로 제작한 트랜스듀서에 비하여 향상됨으로써 송수신특성이 개선될 것임을 예측할 수 있다.

또 사진 3(a)에서 펄스가 인가되어 트랜스듀서에 수신된 시간(약 48 μ s)과 물의 음속(약 1,500m/s)에 의해 계산된 거리는 트랜스듀서와

반사판과의 실제거리 3.60(cm)와 거의 일치하였다. 이 결과로부터 자체 제작한 3-3형 트랜스듀서로 부터 얻은 거리정보가 물체복원 및 인식 실험에 응용될 수 있음을 확인할 수 있었다.



(b) (X: 1 μ s/div., Y: 0.5V/div.)

사진 3. 3-3형 복합압전체 트랜스듀서의 펄스-에코 응답특성.

- (a) 트랜스듀서의 송수신파형.
- (b) 에코파의 확대된 파형.

Photo. 3. Pulse-echo response of 3-3 type composite transducer.

- (a) Transmitting and receiving waveform of transducer.
- (b) Extended waveform of echo signal.

3. 인식률

표 2는 그림 2의 작업영역 중심점 O에 고정된 수중 물체들에 대한 정보를 신경회로망의 출력 neuron space가 10 \times 10인 SOFM 신경회로망에 입력하고 10회 반복학습 시킨 후 수중의 각 실험물체에 대한 인식률을 나타낸 것이다.

수중 물체인식률은 표 2에서와 같이 짧은 학습시간으로 학습데이터인 경우에는 100%, 시험데이터는 92.0%의 인식률을 나타내었다. 이는 본 연

구에서 자체 제작한 3-3형 초음파 트랜스듀서가 표 2에서 보여주듯 수중음향임피던스 정합의 개선, 수중전압정수 g_{33} 의 증가 및 기계적품질계수가 상당히 작아짐으로서 송수신허성이 향상되어 수중 거리정보가 양호하게 검출될 수 있었던 것으로 생각된다. 한편, 경쟁학습규칙의 SOFM신경회로망을 본 연구에서의 물체인식 알고리즘으로 이용하였기 때문에 데이터 분포특성에 따라 hidden층을 변화시키는 Backpropagation신경회로망^[1]에 비해 학습시간이 짧게 되었기 때문으로 생각된다.

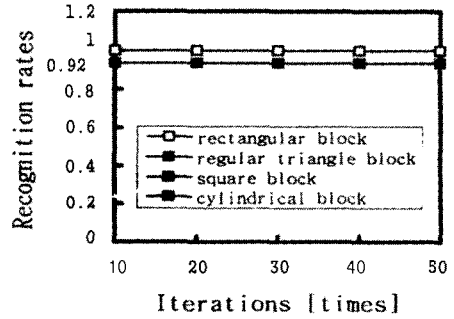
표 2. 10회 반복학습 후의 수중 물체인식률.
Table 2. Underwater object recognition rate after 50 iterations.

Objects	Training data		Testing data	
	Number of data	Recognition rate	Number of data	Recognition rate
Square block	24	100%	16	92.0%
Rectangular block	24	100%	16	100%
Cylindrical block	24	100%	16	92.0%
Regular triangular block	24	100%	16	92.0%

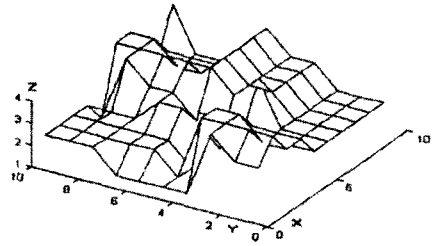
그림 3(a)는 출력 neuron space가 10×10인 SOFM 신경회로망에서 반복학습 회수를 10회~50회까지 변화시켰을 때 시험 데이터에 대한 각 수중 물체의 인식률을 나타낸 것으로서, 반복학습 회수를 변화시켜도 수중 물체인식률은 표 2와 동일한 값을 나타내었다.

그림 3(b)는 출력 neuron space가 10×10인 이 신경회로망을 10회 반복 학습시켰을 때 이 신경회로망의 물체분류지도를 나타낸 것이다. 여기서 x, y축은 출력 neuron space 10×10을 나타내고, Z축의 눈금 1은 분류된 정사각기둥, 2는 직사각기둥, 3은 원기둥 및 4는 정삼각기둥 물체패턴을 나타내고 있다.

그림 4(a), 4(b), 4(c)는 각각 출력 neuron space가 4×4, 6×6, 8×8에서 10회 반복학습 후 SOFM신경회로망의 물체분류지도를 나타낸 것이며, 여기서 x, y와 z축의 눈금 1, 2, 3, 4의 의미는 그림 3(b)에서와 같다.



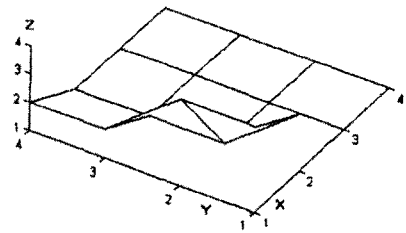
(a)



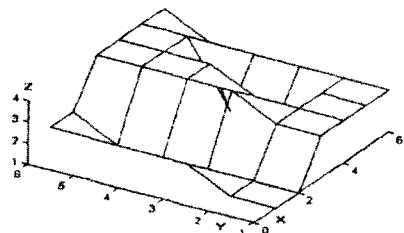
(b)

그림 3. (a) 반복 학습회수에 따른 수중 물체인식률 (b) SOFM신경회로망의 물체 분류지도. (10×10 neuron space, 10 반복학습).

Fig. 3. (a) Underwater object recognition rates as a function of iteration and (b) Map of SOFM neural network. (10×10 neuron space, 10 iterations).



(a)



(b)

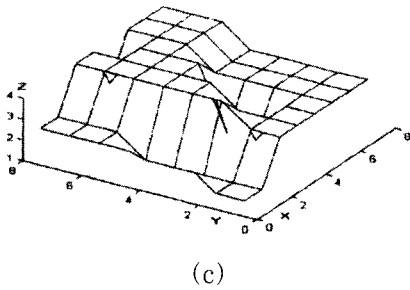


그림 4. SOFM 신경회로망의 물체분류지도(10회 반복학습).

(a) Neuron space 4×4, (b) Neuron space 6×6, (c) Neuron space 8×8.

Fig. 4. Map of SOFM neural network(10 iterations)
(a) Neuron space 4×4, (b) Neuron space 6×6 and (c) Neuron space 8×8.

그리고 시험데이터의 반복학습 회수에 따른 수중 물체인식률은 출력 neuron space의 변화에는 거의 무관함을 알 수 있었다. 즉, SOFM신경회로망의 출력 neuron space를 4×4, 6×6, 8×8로 변화시키고, 또한 각 출력 neuron space에서 반복학습 회수를 10~50회까지 변화시켜도 수중 물체인식률은 2×2 neuron space를 제외하고는 출력 neuron space 및 반복학습 회수에 관계없이 모두 표 2와 거의 비슷한 값을 나타내었다. 전(全) 시험데이터에 대한 수중 물체인식률은 94.0%를 나타내었다. 출력 neuron space가 2×2인 경우에는 반복학습 회수를 10~50회까지 변화시켜도 수중 물체의 인식이 어려웠다. 이는 256개의 입력데이터 분포와 출력 neuron space 크기의 불일치에 기인된 것으로 생각된다.

V. 결 론

본 연구에서는 물과의 임피던스 정합을 개선시키고 성능지수를 향상시키기 위하여 PZT-에폭시 3-3형 복합압전체 초음파 트랜스듀서를 자체 제작, 이를 사용하여 실질적인 수중 물체인식 실험에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

전체적인 수중 물체인식률은 4종의 인식물체(정사각기둥, 직사각기둥, 원통, 정삼각기둥)에 대해 짧은 학습시간으로 학습데이터인 경우에는 100%, 시험데이터는 94.0%의 높은 인식률을 나타내었다. 이는 자체 제작한 3-3형 초음파 트랜스듀서는 단일상 PZT에 비해 작은 밀도 및 종속도를 가짐으로써 음향임피던스 정합이 개선되었고, 수중전압정수 g_{33} 의 증가 및 기계적품질계

수가 상당히 작아짐으로서 송수신특성이 양호하였기 때문에 생각된다.

PZT-에폭시 3-3형 트랜스듀서에서는 PZT트랜스듀서에 비하여 응답파형의 연속적인 진동의 울림감쇠(ringdown)현상이 나타나고 있다. 이는 3-3형 복합압전체의 전압정수(g_{33} 및 g_h)값이 커진 결과 성능지수가 향상되어 PZT트랜스듀서에 비하여 송수신특성이 개선될 것임을 예측할 수 있었다.

따라서 자체 제작한 3-3형 복합압전체 소자로 자체 제작한 초음파 트랜스듀서는 수중 물체인식용으로 응용 가능성을 알 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 고정된 물체에 대한 제한된 거리정보 검출이므로 SONAR시스템에 응용되기 위해서는 수중 물체의 이동 및 회전에 따른 물체 모서리 거리정보 검출 및 먼 거리의 정보 검출도 가능한 트랜스듀서의 재료개발에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

이 논문은 1998학년도 동아대학교 학술 연구구성비(공모과제)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] R. Gorman & T. Sejnowski, "Analysis of Hidden units in a Layered Network Trained to Classify sonar Targets", *Neural Networks*, Vol. 1, pp. 75~89, 1988.
- [2] Jerry L. Sutton, "Underwater Acoustic Imaging", *Proc. of IEEE Int'l Ultrasonic Sympo.*, Vol. 67, No. 4, pp.229~241 April 1979.
- [3] R. E. Newnham, A. Safari, G. Sa-Gong & I. Giniewicz, "Flexible Composites Piezoelectric Sensors", *Proc. of IEEE Int'l Ultrasonic Sympo.*, p501, 1984.
- [4] D. P. Skinner, R.E. Newnham & L. E. Cross, "Flexible Composite transducer", *Mat. Res. Bull.*, Vol.13, pp.599-607, 1978.
- [5] T. R. Shrout, W.A. Schulze & J.V. Biggers, "Simplified Fabrication of PZT/Polymer Composites", L. E. Cross, *Mat. Res. Bull.*, Vol.14, pp.1553-1559, 1979.
- [6] 박정학, 최현일, 사공건, "다공질 PZT 세라믹

의 제작 및 전기적 특성”, 대한전기학회논문집, 43권, 10호, pp. 1678~1683, 1994.

[7] 박정학, 이수호, 사공건, 배진호, “수중청음기 응용을 위한 다공질 PZT 세라믹스의 압전특성”, 대한전기학회논문집, 45권, 4호, pp. 558~561, 1996.

[8] 박정학, 이수호, 최현일, 사공건, 배진호, “초음파트랜스듀서용 PZT-고분자 3-3형 복합압전체의 유전 및 압전특성, 한국전기전자재료학회지, 9(2), pp.146~151, 1996.

[9] 사공건, 박정학, “세라믹/고분자 3-3형 복합압전체 제조방법, 발명특허 등록 제113146호 (1997. 3.)

[10] S.Watanebe & M. Yoneyama, “An ultrasonic robot eye for object identification using neural network”, *Proc. of IEEE Int'l Ultrasonic Sympo.*, pp. 1083~1086, 1989.

[11] D. E. Rumelhart, AG.E. Hinton and R. J. Williams, “Learning Internal Representation by Error Propagation in Parallel Distributed Processing”, *The MIT Press*, Vol.1, 1986

[12] H. Ritter, T. Martinez, K. Schulten, “*Neural Computation and Self-Organizing Maps*”, Addison-Wesley Publish. Co., pp. 59-63, 1992.

[13] G.A. Carpenter and S. Grossberg, “a Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine”, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 37, pp.54-115, 1987.

[14] B. Jaffe, W. R. Cook, Jr. and H. Jaffe, “*Piezoelectric Ceramics*”, Academic Press, London & New York, 1971, p.135.

[15] G. Sa-Gong, A. Safari, S. J. Jang & R. E. Newnham, “Poling Flexible Piezoelectric Composites, *Ferroelectrics*, 5(5), p.131, 1985.

[16] 電子材料工業會 規格 EMAS-6001~7, 電子材料工業會.

[17] 박정학, 최현일, 손무현, 사공건 : PZT-고분자 3-3형 복합압전체 소자로 제작된 초음파트랜스듀서의 펄스에코 응답특성, 한국전기전자재료학회지, 9(10), 1053-1059, 1996.

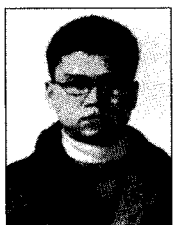
[18] S. Y. Lynn, R. E. Newnham, K. A. Killer, K. Rittenmyer, A. Safari & A. Schulze, “Ferroelectric Composites for Hydrophone,” *Ferroelectrics*, Vol.38, pp.955~958, 1982.

著 者 紹 介



조 현 철
 1961년 11월 19일생
 1985년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업.
 1990년 2월 동 대학원 공학석사 졸업.
 1997년 2월 동 대학원 공학박사 졸업.

1992년 3월~현재 경북전문대학 전기전자계열 조교수, 동 대학 연구기획처장



허 진
 1975년 3월 4일생
 1999년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업.
 2000년 3월~현재 동아대 대학원 전기공학과 석사과정



사 공 건
 1968년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1973년 및 1986년 동 대학원(공학).
 1983~1985년 The Penn. State Univ., Mat. Res. Lab(Visiting Scientist).
 1993년 일본 동경공업대학(객원연구원).

1994년 The State Univ. of New Jersey (Visiting Scientist).
 1997~1998년 Virginia Tech. (Visiting Professor)
 1979~현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수
 1998~현재 한국전기전자재료학회 부산경남울산지부장
 주 관심 분야 : 압전세라믹/고분자 Composite Transducer, 압전 및 자기센서, 전자파흡수체