

## 능동표적신호합성 알고리즘의 실시간 구현

김희성\* · 신기철\* · 김우식\*\* · 한동훈\*\* · 최상문\*\* · 김재수\*  
(97년 1월 14일 접수)

### Realtime Active Target Signal Simulation

Hee-Seong Kim\* · Kee-Chul Shin\* · Woo-Shik Kim\*\* · Dong-Hoon Han\*\* · Sang-Mun Choi\*\* · Jea-Soo Kim\*

**Key Words** : Target Signal(표적신호), HL(HighLight)모델, Scattering(산란)

#### Abstract

The simulation of target-scattered echo with the moving sonar platform and target in 3-dimensional ocean environment is essential to validate and evaluate the performance of a sonar system. This paper presents the improved target signal simulation on the basis of the highlight(HL) model and its realtime algorithm. In order to simulate the scattering highlight, the highlight is represented as a directional scatterer. The realtime generation algorithm of the target signal is realized by use of DSP chip, TMS320C40, where the 40 channels are equally separated to form a parallel processing task in 4 processors. The presented realtime-version of target signal simulation can be used as a target signal simulator in the development of ACM(Acoustic Counter Measure) and advanced sonar signal processing techniques.

#### 1. 서 언

3차원 해양 환경에서 음원과 표적이 움직이는 경우에 능동표적신호합성기의 이론적 배경은 운동학적 모델과 음향학적 모델로 나눌 수가 있다. 그리고 표적신호의 시뮬레이션을 위하여 표적강도, 주파수 천이, 펄스신장등이 알려져 있어야 한다.

본 연구에서는 각 HL에서 반사되는 표적신호의 산란을 합하여 개발된 기존의 MOST알고리즘<sup>1,2)</sup>

을 보완 수정하여 다중채널 능동표적신호합성 알고리즘을 개발하고, 이를 실시간으로 처리하기 위하여 고속처리기법인 병렬처리를 도입하였다.

#### 2. 능동표적신호합성 알고리즘

##### 2.1 운동학적 모델

움직이는 음원과 표적은 해양 환경에서 3차원 운동을 한다.

\* 한국해양대학교 조선해양공학부

\*\* 국방과학연구소

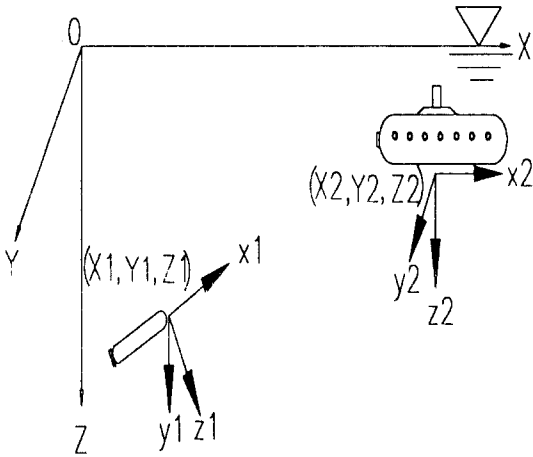


Fig. 1 Definition of global coordinates and local coordinates attached to the target

음원과 표적의 상대적인 운동은 송·수신되는 음향신호의 시간 영역과 주파수 영역에서의 특성을 좌우하게 된다. 따라서, 음원에서 송신할 때 음원과 표적의 지구좌표계와 음원의 국부좌표계에서 바라본 표적의 좌표계는 송·수신시 모두 고려되어야 한다. 즉, 표적과 음원은 전체 좌표계를 기준으로 서로 운동하고 있으나 표적의 운동은 음원의 입장에서는 음원의 좌표계에서 정의된 물리량만 의미 있으므로 전체 좌표계에서 정의되는 표적의 좌표, 속도 등을 음원의 좌표계로 변환을 해야만 한다.

Fig. 1은 지구좌표계 및 음원과 표적에 대한 국부좌표계를 각각 정의하고 있다.

그림과 같이 음원과 표적의 지구좌표계를 각각  $(X_1, Y_1, Z_1)$ 과  $(X_2, Y_2, Z_2)$ 라 하면, 음원의 국부좌표계에서 표적의 좌표는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_1 & \sin\phi_1 \\ 0 & -\sin\phi_1 & \cos\phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기에서  $\phi_1, \theta_1, \phi_1$ 은 각각 음원의 z-축, y-축, x-축에 대한 오일러각을 나타낸다. 오일러각은 국부좌표계가 지구좌표계에 대해 회전하고 있는 각을 시계반대방향을 양(+)으로 하여 정의된다. 또한, 음원에 부착된 국부좌표계로 부터 표적의 지구좌표계에서의 좌표는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & -\sin\phi_1 & 0 \\ \sin\phi_1 & \cos\phi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 2.2 음향학적 모델

능동표적신호합성 알고리즘에 대한 연구에서는 표적신호의 크기, 도플러효과, 표적신호신장, 채널간 위상차 및 위 항들의 간섭 현상까지를 시뮬레이션 하는 것이 요구된다.

본 연구에서 사용된 HL(Highlight)모델은 표적 산란신호의 물리적인 현상변수들을 반영하기가 쉽고, 표적의 종류에 따라 데이터베이스를 구축하기에 용이하여 기존에 개발된 모델은 HL모델을 사용하고 있다<sup>[3]-7)</sup>.

HL모델은 송신신호  $s(t)$ 가 주어지면, 수신신호  $r(t)$ 는 다음과 같이 시스템의 충격응답(impulse response)  $h(t)$ 와의 콘볼루션에 의해 표현되는 것에 기반을 두고 있다.

$$r(t) = s(t) \otimes h(t) \quad (3)$$

이를 주파수영역에서 표현하면 곱셈이 된다. 즉,

$$R(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega) \quad (4)$$

여기에서  $H(\omega)$ 는 표적의 산란현상을 표현하는 주파수 영역에서의 전달함수가 된다. 이론적으로, 산란체의 충격응답이 주어진다면 산란신호는

위 식에 의해서 완전하게 표현될 수 있다. 표적 신호 시뮬레이션의 모델링 방법론에 대하여 깊이 들어가기 전에 결정해야 할 것 중의 하나는, 표적을 점 표적으로 볼 것인가 아니면 분포표적으로 볼 것인가 하는 것이다. 점 표적에 의한 표적신호는 입사신호에 충격응답이 콘볼루션됨으로써 물리적인 현상을 반영할 수 있다. 점 표적이 움직일 경우에는 표적이 움직이는 결과로서 나타나는 도플러천이와 함께 신호가 축소 또는 확대되는 현상이 포함된다. 반면, 표적신호가 입사신호와 달리 왜곡되어 반사되거나 표적자체가 단순한 형태가 아닌 경우, 즉 두개 이상의 점 표적으로 다루어질 수 있는 경우에는 각각의 단위표적에서 반사된 표적신호가 간섭현상을 일으켜 입사신호와 달리 나타나게 된다. 또한, 표적의 임피던스가 무한히 크거나 작지 않고 유한한 경우, 표적에 입사하는 음향 에너지가 표적에 전달되어 내부전달 경로를 거쳐 그로부터 다시 방사되는 경우에는 분포표적으로 모델하여야 한다. 최근의 소나는 분포표적의 각 부분에서 돌아오는 표적신호를 분석하여 분포표적의 각 부분에 대한 정보를 얻어내기 때문에 표적신호합성을 위한 표적은 분포표적이 되어야 한다.

표적이 공간상에 분포됨에 따라 나타나는 현상 중에 하나는 표적신호의 matched 필터 사용시 상관손실이 일어나며, 빔 형성에 있어서도 분포된 산란체에 의해 채널간의 일치성(coherence)이 떨어지기 때문에, 이러한 현상을 포함하기 위해서 표적은 분포표적으로 모델링되어야 한다. 표적신호는 입사신호와 표적의 충격응답의 수정된 콘볼루션에 의해 표현될 수 있는데 표적의 충격응답은 점 표적의 조합, 즉 HL의 조합으로 표현한다.

HL의 간격과 크기는 표적신호를 통계적으로 근사시킬 수 있는 확률분포를 사용한다. 대부분의 교과서[Urlick, 1983]나 표적강도 계산의 논문[Freedman, 1982]에서는 반사계수를 해석적으로 구하기 위해 강성체 가정을 사용하고 있다. 강성체의 가정은 임피던스가 무한대가 되나 실제 표적에서는 물과 잠수함의 재질로 사용되는 스틸의 일종인 HY계열의 임피던스의 차이에서는 입사각도에 따라서는 상당한 에너지가 표적의 내부에 전달될 수 있으며, 이 에너지는 표적으로부터, 특히 내부 구조의 불연속

점에서 다시 방사되어 나오게 되어 강성체 가정은 이러한 2차적인 음향방사 현상을 설명할 수 없게 된다. 그러나 거울같은 반사의 경우의 표적강도는 강성체 가정에 의해 계산된 표적신호의 크기에 거의 오차가 없다. 이는 법선입사의 반사계수가 중요하며, 법선입사인 경우 잠수함 재질에 대한 반사손실은 거의 0dB이기 때문이다. 각 표적의 HL는 거울같은 반사, 또는 2차방사의 경우 방향성(directivity)을 갖게 된다. 표적의 일부분은 마치 송신을 위한 음향변환자 배열처럼 음파를 방사하기 때문에 HL의 방향성은 평면배열 변환자(plane array)로 모델링할 수 있으며, 빔 패턴은 Sinc 함수의 형태로 가정할 수 있다. 문제는 Sinc 함수의 주기를 주는 것인데, 이는 내부 구조물의 종류에 따라 달라져야 한다. 따라서, 표적신호의 방향성 분포에 대한 모델은 다음과 같이 가정한다.

$$B_j(\theta, m_j) = \frac{\sin(m_{j,h}\theta) \sin(m_{j,v}\psi)}{m_{j,h}\theta m_{j,v}\psi} \quad (5)$$

$$= \text{Sinc}(m_{j,h}\theta) \text{Sinc}(m_{j,v}\psi)$$

여기에서, B는 빔 패턴 함수를 나타내며,  $\theta$  와  $\psi$  는 표적의 j-번째 HL에서 음원을 바라보았을 때의 수평 및 수직각을 나타낸다.  $m_{j,h}$  와  $m_{j,v}$  는 j-번째 HL의 수평과 수직 빔 패턴의 변화를 나타내는 자연수로 구조물의 종류에 따라 결정된다.

이러한 HL의 빔 패턴은 관측된 점멸표적(fluctuating target)의 현상과도 일치한다.

능동표적에서는 음원과 표적 모두가 움직이기 때문에 주파수천이가 일어나고, 주파수천이의 정도는 음원의 자세각, 음원속도의 크기 및 방향, 표적의 자세각, 표적속도의 크기 및 방향, 사용되는 주파수, 그리고 매질에서의 음속 등에 의해 결정된다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_{d,j} = f_o \cdot \frac{c + \vec{v}_{t,2} \cdot \vec{n}_{j,2}}{c - \vec{v}_{s,1} \cdot \vec{n}_{j,1}} \cdot \frac{c + \vec{v}_{s,3} \cdot \vec{n}_{j,4}}{c - \vec{v}_{t,2} \cdot \vec{n}_{j,3}} \quad (6)$$

여기에서  $t_1, t_2, t_3$  는 각각 송신펄스가 음원을 떠나는 순간, 송신펄스가 표적의  $j$ 번째 HL에 입사되는 시간, 표적의  $j$ 번째 HL에서 산란된 신호가 새로운 위치의 음원에 수신되는 시간을 나타낸다.  $f_{d,j}$  와  $f_0$  는 각각  $j$  번째 HL에서의 주파수천이와 송신주파수를 나타내고,  $\vec{v}_{s,1}$  과  $\vec{v}_{t,2}, \vec{v}_{s,3}$  는 각각 시간  $t=t_1, t=t_2, t=t_3$  에서 음원 및 표적의 속도를 나타낸다.

- $\vec{n}_{j,1}$  :  $t=t_1$  의 음원위치에서  $t=t_2$  의 표적의  $j$  번째 HL를 향한 단위벡터,
- $\vec{n}_{j,2}$  :  $t=t_2$  의 표적의  $j$  번째 HL위치에서  $t=t_1$  의 음원을 향한 단위벡터,
- $\vec{n}_{j,3}$  :  $t=t_2$  의 표적의  $j$  번째 HL위치에서  $t=t_3$  의 음원을 향한 단위벡터,
- $\vec{n}_{j,4}$  :  $t=t_3$  의 음원위치에서  $t=t_2$  의 표적의  $j$  번째 HL를 향한 단위벡터.

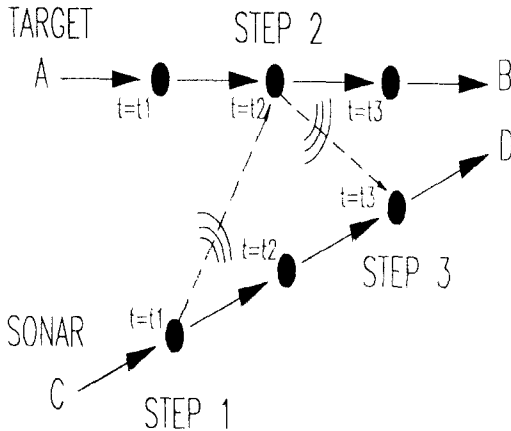


Fig. 2 Geometry and definition of variables of the source and the target

### 2.3 수치적인 모델

복잡한 형상인 표적의 경우는 기하학적 형상에 의한 검증이 거의 불가능하므로 HL이 하나인 단위 표적에 대한 이론적 계산과 이상의 알고리즘으

로 발생한 표적신호의 도플러와 펄스신장, 각 채널에서의 도달시간에 관하여 검증을 하였다.

음향중심에서 채널간의 거리는  $0.5\lambda$  ( $\lambda = C/F_0$ ) 로 하였다.

모의신호에 대한 표적과 음원의 기하학적인 구조는 위에서 보았을 경우에는 표적은 음원의 두부에 대해서  $45^\circ$  기울어져 떨어져 가고있으며, 표적중심과 음원의 두부간 거리는 200m로 하였다. 옆에서 보았을 경우 음원은 수심 100m지점에 위치하고 표적은 수심 120m지점에서 위치한다.

다중채널 능동표적신호합성 프로그램을 이용한 표적신호의 발생은 입력파일의 구성방식에 따라 달라진다.

Fig. 3은 MOST신호합성기를 이용해 모의 출력한 표적신호이다.

입력조건은 중심주파수를 5kHz로하고 샘플링 주파수를 25kHz로 하였으며 HL개수는 31개로 하였고 전체좌표계에 대한 음원과 표적의 중심좌표는 각각 x, y, z순으로 (0, 100, 100)과 (200, 100, 120)이다.

표적의 길이는 100m이고 높이와 폭은 각각 10m로 구성하였다.

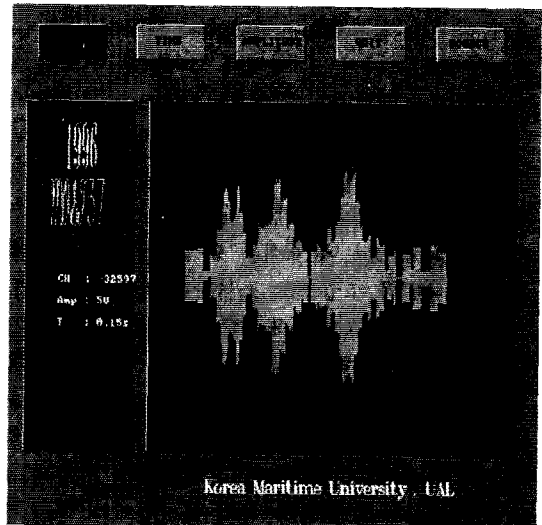


Fig. 3 Simulated target signal

전체좌표계에 대한 음원의 좌표는 x, y, z순으로

- (0m, 100m, 100m)로 하였고 Euler Angle은 ( 0°, 0°, 0° )로 하였다.

표적의 좌표는 200m, 100m, 120m이고, Euler Angle은 0°, 0°, 45°로 설정하였다.

또한 이러한 모의 신호는 음원과 표적의 속도 및 자세각에 따른 도플러 추이와 크기, 그리고 각각의 HL로 부터의 신호간섭을 위해서 음원과 표적을 속도차를 두고 서로 움직이게 하였다. 즉, 음원이 20knots(10.288 m/s)의 속도로 표적을 향해 움직이고 표적은 10knots(5.144 m/s)의 속도로 음원에서 멀어져 가고 있다.

Fig. 3과 같이 HL가 많은 경우에 각 HL들 간의 신호간섭이 일어나 실제의 표적신호와 유사한 형태를 얻을 수가 있다.

### 3. 능동표적신호합성 알고리즘에 대한 실시간구현

개발된 능동표적신호합성 알고리즘이 HLS(Hardware In the Loop System)에 적용되기 위해서는 실시간 처리가 요구된다. 고속처리를 실현하기 위한 방법론으로 다중처리 및 병렬처리가 가능하고 6개의 통신채널과 초당 120Mbytes의 전송속도를 가진 TMS320C40이라는 디지털 신호처리 전용 칩을 이용하여 능동표적신호합성 알고리즘을 실시간으로 구현하였다.

실시간 구현은 크게 두 부분으로 설명할 수 있다. 첫째, 능동표적신호 알고리즘을 병렬처리에 적합하도록 재구성하여야 하며, 두 번째, 구성된 프로그램 모듈을 DSP와 이라는 A/D 변환 및 D/A 변환이 가능한 TDM431모드를 이용하여 분산처리 알고리즘을 적용하였다. 이에 대한 신호의 검증은 다중채널 능동표적신호중 한 개의 채널로 수신되는 디지털 표적신호를 실시간 아날로그 신호로 변환시켜 오실로스코프와 스피커로 최종 확인하게 된다.

실시간 구현을 위해서 능동표적신호합성 알고리즘을 가능한 효율적으로 분산시켜야 하며, 구체적인 단계로서 다중처리와 병렬처리의 연구가 선행되어야 한다<sup>8),(9)</sup>. 분산처리 알고리즘을 구성하기 위해서는 모듈간 균등하게 계산부하를 분산하여 구

성된 프로세서의 효율을 최대한 활용하여야 한다. 그리고 통신시간과 태스크 분리와외의 상관관계를 능동표적신호합성 알고리즘에 적합하도록 고려하여야 한다.

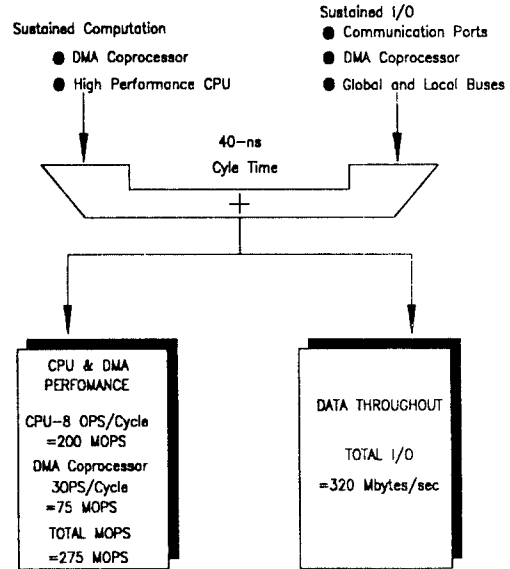


Fig. 4 TMS320C40 Performance

프로그램을 실행하여 생성된 디지털 데이터는 곧바로 아날로그 신호로 변환을 해주어야만 하는데 이러한 D/A변환 처리는 TDM431에서 하게 된다<sup>10)</sup>. TDM431모듈의 제한은 해상도는 12bit, 샘플링 속도는 250kHz까지 가능하며, 아날로그 신호의 입력은 -10V에서 +10V까지의 범위를 갖는다<sup>9)</sup>. D/A의 출력은 12bit 또는 4096크기의 값이 아날로그 출력전압의 최대 범위 -3V에서 +3V사이에서 조정된다.

알고리즘에서 샘플링 속도와 전압변환식을 다음과 같이 설정하였다. 식(7)은 샘플링 간격, 즉  $\Delta t$  와 샘플링 속도, 즉  $f_s$  간의 관계를 표현한 식이다.

$$f_s = \frac{1}{(\Delta t + 1) \times 100ns} \quad (7)$$

D/A의 출력은 12bit 또는 4096크기의 값이아날로그 출력전압범위 -3V에서 +3V사이로 조정된 값

이 출력되는데, Fig. 7은 최대 전압범위로 설정한 경우이며, 아날로그 신호출력단은 약  $1.465 mV$  ( $6 / 4096 V$ )가 된다.

다중채널에 수신되는 표적 신호는 실시간으로 처리된다. 데이터를 입력받아서 디지털 신호를 생성함과 동시에 곧바로 아날로그 신호로 변환되는 과정까지 실시간 처리가 가능하다.

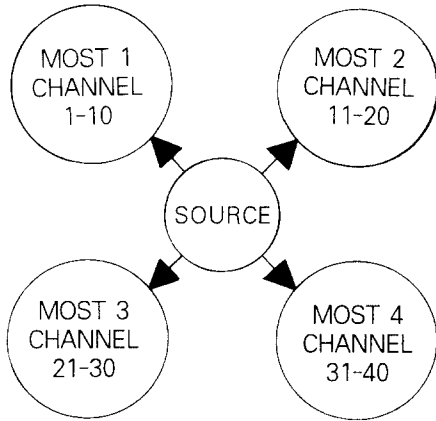


Fig. 5 Physical layout of each TASK

Fig. 5는 실시간을 위한 병렬처리의 알고리즘을 도식화 한것인데, 입력 부분인 소스에서 분리가 가능한 각각의 모듈식 프로그램으로 데이터를 분산하여 처리한다. 본 알고리즘에서는 능동표적신호에 대한 각각의 채널을 40개로 설정하였다. 그림에서 각각의 채널은 여러 가지의 물리적 정보를 가지는데 예를들어 위상이나 주파수의 차이에 의한 도플러와 펄스신장등의 정보를 갖는 각각의 표적신호를 나타낸다.

각 채널에 들어오는 능동 표적신호는 소스 (SOURCE), 즉 하나의 동일한 입력채널을 통해 각 인근채널, 즉 MOST 1, MOST 2, MOST 3, MOST 4의 프로세서에 배당되고, 인근 프로세서에 방해나 영향을 받지않고 각각 독립적으로 처리된다. 각 프로세서에는 10개의 채널씩 균등하게 할당되어있고, 이는 해당되는 프로세서내에서 실시간 처리된다.

결국 처리해야할 채널수에 비례하여 계산부하가 많이 걸리기 때문에 채널수가 증가할수록 많은 프

로세서가 요구된다. 그러나 프로세서의 증가만으로 실시간 처리가 해결될 수는 없다. 각 프로세서간 통신시간, 요구되는 계산시간, 비용문제등을 고려하여야 한다. 많은 시행착오를 거치고 다양한 방법으로 접근하여 최적의 프로세서설정 및 채널할당을 하여야한다.

다중채널 실시간 아날로그 표적신호는 오실로스코프를 통하여 아날로그 파형을 확인하고, 주파수 및 주기를 파악하는것과 동시에 스피커를 통하여 모의신호를 발생시킬 수가 있다.

Fig. 6은 다중채널 중 한 개의 채널에서 수신되는 아날로그 표적 신호를 표현한다.

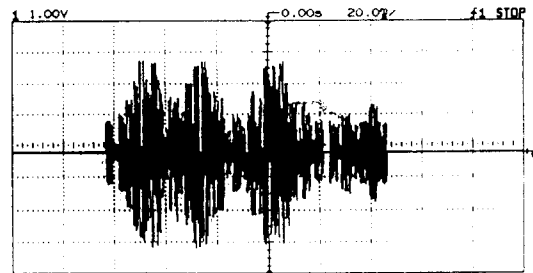


Fig. 6 Simulated analog target signal

각각의 디지털 값은 0부터 4096크기로 값을 변환된 후, 양자화 되어 출력이 된다. 능동표적신호 발생 알고리즘의 실시간 구현 제한시간을 0.9sec로 제한하였는데 Fig. 6에서 아날로그 표적신호의 출력시간을 확인한 결과 제한된 시간내에 아날로그 표적신호가 발생됨을 알 수가 있다. Fig. 3와 Fig. 6을 비교 설명하면, 먼저 동일한 입력조건하에서 Fig. 3은 1채널 디지털 능동표적신호를 표현하고 있으며, 이는 일반적인 능동표적신호합성 알고리즘의 수치적인 모델로 표현한 것이며 신호처리 시간은 PC의 성능에 따라서 수분에서 수십 분에 걸쳐 처리된다. 그러나 실시간 분산처리 알고리즘에 적용시켜 TMS320C40 프로세서와 TDM431 D/A 변환보드를 이용하여 출력시킨 Fig. 6은 아날로그 능동표적신호를 나타내고 있다. 그림에서 가로축은 출력시간을 구간당 20ms로 나타내고, 세로축은 진폭을 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 연구는 능동표적신호합성 알고리즘에 대한 실시간 구현을 다루었다.

HL모델과 콘볼루션 모델을 바탕으로 개발된 능동표적신호합성 알고리즘을 시간 영역에서 표적의 HL를 임의의 가중치를 가지는 단위 임펄스로 가정함으로써 많은 계산 시간을 절약할 수 있기 때문에 실시간 구현에 있어 최적의 방법으로 고려하였다.

실시간 아날로그 표적신호의 구현 방법으로는 병렬처리 방법과 다중처리 방법을 도입하였으며, 결국 실시간 아날로그 표적신호를 합성하는 병렬처리 알고리즘을 개발하였다.

이러한 실시간 능동표적신호합성 알고리즘은 HILS에서 표적신호 발생기로서의 역할을 수행할 수 있으며, 소나개발 및 성능예측등, 표적신호를 필요로 하는 분야에서 이용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 성낙진, 김재수, 이상영, 김강, "능동 표적신호 합성", 한국음향학회지, 제 13권, 제 2호, pp. 30~37, 1994
- 2) 이창호, 김재수, 이상영, 김 강, 오원천, 조운현, "공분산 행렬 분석기법을 이용한 모노펄스 소나 표적상태추정 성능향상 기법", 한국음향학회지, 제 15권, 제 1호, pp. 34~39, 1996.

- 3) J. C. Bol, "Some Developments in Simulating SONAR Target", UDT Conference Proceedings, London, England, Oct. pp. 637~642, 1988
- 4) S.G. Chamberlin and A.M. Berlinsky, "Coherent Target and Environmental Modeling for Torpedo Terminal Homing Simulation", Electronic Progress, Vol.X-XIV. No.1, Raytheon Company, Spring, pp. 19~22, 1982
- 5) D.L. Folds, and N.F. Anderson, "High Resolution SONAR Simulation Techniques", Technical Report Number NCSR-TR-322-77, Naval Coastal Systems Laboratory, Panama City, Florida, USA, pp. 1-977
- 6) R. Ludwig, L. Hogrefe, and W. Tietz, "Acoustic Underwater Target System", UDT Conference Proceedings, Paris, France, April pp. 864~869, 1991
- 7) D.E. Nelson, A Statistical Scattering Model for Time-Spread SONAR Targets, Ph.D. Dissertation, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Rochester, Rochester, New York, U.S.A., 1975
- 8) Texas Instruments, "TMS320C4x User's Guide", 1991,
- 9) Parion System, "Parallel C for C40", 1995
- 10) TRANSTECH, "TDM431 User Manual", 1996