

## 펄스압축 기술을 위한 chirp 신호의 최적대역폭 결정

### Determination of the Optimum-Bandwidth of Chirp-Signal for Pulse Compression Technique

고 대 식\*, 문 건\*\*  
(Daesik Ko\*, Gun Moon\*\*)

#### 요 약

본 논문에서는 chirp 신호를 초음파 신호처리 시스템에 입력시킬 때 반사신호의 진폭을 최대로 얻기 위한 chirp 신호의 대역폭을 결정하는 방법을 연구하였다. 초음파 신호처리 시스템에서 반사신호의 S/N 비는 초음파의 전파시에 발생하는 감쇠와 산란에 의하여 매우 낮게 된다. Chirp 신호를 사용한 펄스 압축기술은 초음파 반사시스템의 S/N 비를 증가시킬 수 있는 방법중 하나이다.

시뮬레이션 및 실험결과, chirp 신호의 펄스폭이 넓을수록 출력이 증가하였고 동일한 펄스폭과 주어진 초음파시스템의 대역폭에 대한 최대출력은 chirp 신호의 대역폭이 초음파시스템의 대역폭 보다 1.15배 클 때 얻어짐을 확인하였다.

#### ABSTRACT

In this paper, when we use the chirp signal as input signal of ultrasonic signal system the technique for determining the bandwidth of the chirp signal that maximizes the amplitude of the compressed ultrasonic echo signal has been studied. In ultrasonic signal processing systems, the signal-to-noise ratio of the echo signal can be too low due to damping and scattering of the ultrasonic wave during transmission. Method of pulse compression using chirp signal is a means to increase the signal-to-noise ratio in ultrasonic pulse-echo systems.

Simulation and experimental results showed that the output signal of ultrasonic system was increased by pulse width of chirp signal and the optimum-bandwidth of the chirp signal was 1.15 times larger than the bandwidth of the ultrasonic system.

#### 1. 서 론

펄스압축 기술은 1940년대부터 레이더 시스템을 위한 기술로 개발되어 최근에는 초음파 신호처리분야에도 응용이 시도되고 있다. 일반적인 초음파 펄스반사 시스템에서 축방향분해능(axial resolution)은 펄스폭이 좁을수록 증가하지만 펄스의 폭이 좁으면 좁을수록 그 에너지는 작기 때문에 S/N비의 감소를 초래한다[1, 2, 3].

그림 1은 펄스압축 기술을 이용한 초음파 펄스반사 시스템의 기본구조이다. 그림 1에서 일반적인 초음파시스템의 펄스발생기는 임의 파형발생기로 대체되고 송수신 스위치와 데이터획득장치 사이에 펄스 압축 필터를 삽입시킨 점이 차이가 있다. 그림 1에서 입력신호로 사용될 수 있는 것은 chirp 신호(linear-frequency modulation)이다. 초음파 펄스반사 시스템의 경우는 레이더 시스템과

비교하면 협대역 시스템이다. 특히 초음파 시스템의 핵심부분인 초음파변환기의 스펙트럼은 대부분 종모양(bell-shape) 형태를 갖기 때문에 적절한 폭과 대역폭을 가진 chirp 신호를 인가시키지 못할 경우, 펄스 압축된 반사신호의 이득을 최대로 얻을 수 없게 된다[4, 5].

그러므로 본 연구에서는 초음파 시스템에 펄스압축 기술을 적용할 때 chirp 신호의 최적대역폭을 결정하는 방법을 연구하였다. 이를 위하여 비파괴 검사등에 이용되는 초음파 펄스반사 시스템의 구조와 동작원리를 고찰하고 초음파 반사신호의 이득과 입력신호의 특성과의 관계를 구하였으며 압축된 반사신호의 이득을 최대로 얻기 위해 입력신호의 대역폭을 분석하였다. 먼저, chirp 신호의 펄스폭이 출력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 펄스폭 T와 chirp신호의 대역폭 B가 출력에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 끝으로 중심주파수가 3.5MHz이고 -6dB 대역폭( $B_T$ )이 2.65MHz인 초음파변환기와 임의파형 발생기를 이용하여 발생시킨 chirp의 대역폭을 0.5  $B_T$ , 1.0  $B_T$ , 1.15  $B_T$ , 1.8  $B_T$ 로 변화시키면서 반사신호의 출력을 구하

\*목원대학교 전자공학과

\*\*제주대학교 통신공학과

접수일자: 1996년 6월 24일

2. 압축필터링 한후 출력을 비교 고찰하였다.

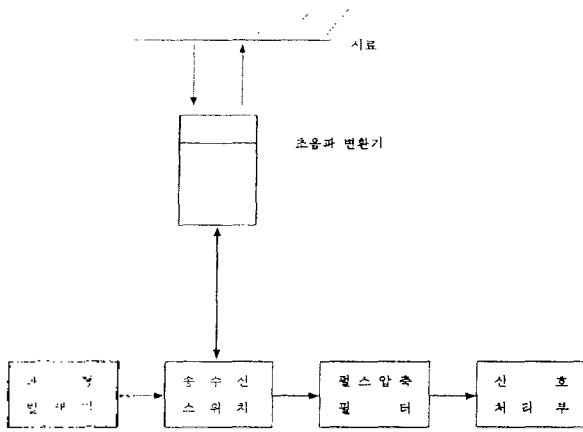


그림 1. 펄스압축 기술을 이용한 초음파시스템

## II. Chirp 신호의 최적대역폭 결정

### 2.1. 초음파 펄스반사 시스템의 특성

초음파 펄스반사 시스템은 초음파 탐상을 비롯한 초음파 신호처리분야에서 널리 이용되는 것으로 그림 2는 그림 1과 같은 초음파시스템의 특성을 해석하기 위한 블록선도이다.

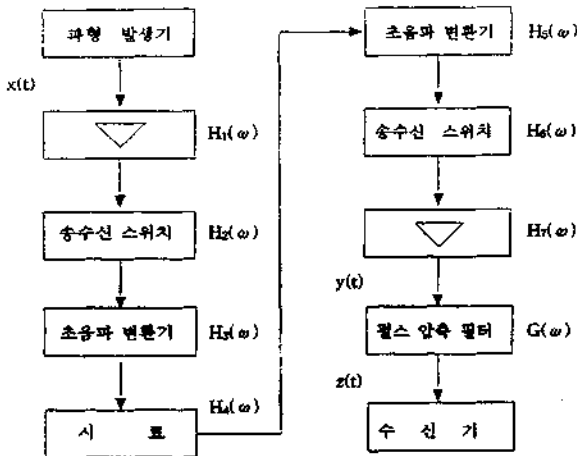


그림 2. 초음파시스템의 주파수분석을 위한 모델링

그림 2의 입력단에 있는 증폭기의 전달함수  $H_1(w)$ 과 출력단의 증폭기  $H_7(w)$  그리고 송수신 스위치의 전달함수  $H_2(w)$ 와  $H_6(w)$ 가 충분히 광대역으로 설계되고 시간변화나 가타 환경변화 등에 영향이 없도록 제작되었다면 이들의 특성은 일정할 것이다. 그러므로 펄스압축 기술을 이용한 초음파 시스템의 반사신호 출력은 초음파변환기와 펄스압축 필터만으로 간략하게 표현할 수 있을 것이다.

$$Z(w) = X(w)H(w)G(w) \tag{1}$$

여기서  $H(w)$ 는 시료의 특성과는 관계없이 주로 초음파 변환기에 의하여 결정되는 초음파시스템의 전달함수를 나타낸다.

### 2.2. Chirp 신호의 최적대역폭 결정방법

Chirp 신호는 펄스의 폭  $T$ 와 대역폭  $B$ 에 의하여 결정된다. 이 두가지 파라미터는 펄스-압축된 반사신호의 진폭을 최대로 얻기 위한 최적상태로 선택되어야 한다. Chirp 신호의 폭  $T$ 는 측정시스템 및 시료의 기하학적 구조와 송수신 스위치의 회복시간(recovery time) 등에 의하여 결정된다. 즉 펄스폭  $T$ 는 최초 반사신호가 수신되는 시간보다는 작아야 송수신간의 신호를 분리하여 검출할 수 있을 것이다.

한편, 주어진 펄스폭과 초음파변환기의 대역폭에 대하여 펄스-압축된 반사신호의 진폭을 최대로 얻기 위한 입력신호의 대역폭을 결정하는 것이 필요하다. 이를 위하여 먼저 chirp 신호의 스펙트럼을 구해야한다. Chirp 신호는 선형주파수 변조된 신호와 구형파의 함수로 식 (2)와 같이 표현된다[6].

$$x(t) = \text{rect}\left(\frac{2t-T}{T}\right) \cos\left(2\pi\left(f_1 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right) \\ = \text{rect}\left(\frac{2t-T}{T}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_1 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right) \tag{2}$$

여기서  $k = \frac{f_2 - f_1}{T}$ ,  $B = f_2 - f_1$ , 그리고  $f_1$ 과  $f_2$ 는 각각 chirp 신호의 최저주파수와 최고주파수이다.  $x(t)$ 의 스펙트럼  $X(f)$ 는 푸리에변환에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다[7].

$$X(f) = FT(x(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi f t) dt \\ = \int_0^T \exp\left(j2\pi\left(f_1 - f\right)t + \frac{1}{2} k t^2\right) dt \tag{3} \\ = \sqrt{\frac{T}{2B}} \exp\left(-j\frac{\pi T}{B} (f_1 - f)^2\right) \sqrt{2} \text{rect}\left(\frac{2(f - f_0)}{B}\right)$$

이제 식 (1)을 이용하여 반사신호의 진폭  $z(t)$ 를 구해보면 식 (4)와 같다.

$$z(t) = IFT\{X(f) \cdot H(f) \cdot G(f)\} \tag{4}$$

식 (4)에서 시스템의 전달함수와 펄스압축 필터의 전달함수는 다음과 같이 놓을 수 있다[8, 9].

$$H(f) = \text{rect}\left(\frac{f - f_0}{B_T}\right) \cos^2\left(\frac{\pi(f - f_0)}{2B_T}\right) \tag{5}$$

$$G(f) = \exp\left(j\frac{\pi T}{B} (f_1 - f)^2\right) \tag{6}$$

여기서  $f_0$ 는 초음파변환기의 중심주파수이고  $B_T$ 는 -6dB 대역폭이다. 그러므로 식 (4)는 식 (7)과 같이 풀 수 있다.

$$\begin{aligned}
 z(t) &= \text{IFT} \{ X(f) \cdot H(f) \cdot G(f) \} \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{T}{B}} \text{rect}\left(\frac{2(f-f_0)}{B}\right) \cos^2\left(\frac{\pi(f-f_0)}{2B_T}\right) \\
 &\quad \exp(j\omega t) d\omega \\
 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{B}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos^2\left(\frac{\pi(f-f_0)}{2B_T}\right) \exp(j\omega t) d\omega \\
 &= \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{T}{B}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left\{ \exp(j\omega t) + \frac{1}{2} \exp\left(j\pi \frac{1+2B_T t}{B_T} f - f_0\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \exp\left(-j\pi \frac{1+2B_T t}{B_T} f - f_0\right) \right\} d\omega \\
 &= \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{T}{B}} \left( I_1 + \frac{1}{2} \exp\left(-j \frac{\omega_0}{2B_T}\right) I_2 + \frac{1}{2} \exp\left(j \frac{\omega_0}{2B_T}\right) I_3 \right) \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서  $I_1$ ,  $I_2$  그리고  $I_3$ 을 풀면 (8), (9) 그리고 (10)과 같이 구해진다.

$$I_1 = 2\pi B \exp(j\omega_0 t) \text{sinc}(\pi B t) \quad (8)$$

$$I_2 = 2\pi B \exp\left(j \frac{\omega_0}{2B_T}\right) \exp(j\omega_0 t) \text{sinc}\left(\pi \left(Bt + \frac{B}{2B_T}\right)\right) \quad (9)$$

$$I_3 = 2\pi B \exp\left(-j \frac{\omega_0}{2B_T}\right) \exp(j\omega_0 t) \text{sinc}\left(\pi \left(Bt - \frac{B}{2B_T}\right)\right) \quad (10)$$

식 (8)의 계산을 위하여  $B = f_2 - f_1$ ,  $f_0 = \frac{f_2 + f_1}{2}$ ,  $f_1 = f_0 - \frac{B}{2}$  그리고  $f_2 = f_0 + \frac{B}{2}$  를 이용하였으며 식(9)와 식 (10)을  $\text{sinc}$ 함수( $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ )로 표현하기 위하여 분모 분자를  $2B_T$ 로 나눈후에  $\pi B$ 를 곱하였다. 이 결과식들을 식 (7)에 대입하면 식 (11)와 같다.

$$\begin{aligned}
 z(t) &= \frac{1}{2} \sqrt{BT} \exp(j\omega_0 t) \left[ \text{sinc}(\pi B t) + \frac{1}{2} \text{sinc}\left(\pi \left(Bt + \frac{B}{2B_T}\right)\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \text{sinc}\left(\pi \left(Bt - \frac{B}{2B_T}\right)\right) \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

그러므로 chirp 신호의 실수부인  $x_r(t)$ 에 대한 출력신호  $z_r(t)$ 는 식 (12)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 z_r(t) &= \text{Re}\{z(t)\} = \frac{1}{2} \sqrt{BT} \cos(\omega_0 t) \left[ \text{sinc}(\pi B t) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \text{sinc}\left(\pi \left(Bt + \frac{B}{2B_T}\right)\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \text{sinc}\left(\pi \left(Bt - \frac{B}{2B_T}\right)\right) \right] \quad (12)
 \end{aligned}$$

함수  $z_r(t)$ 의 최대값은  $t=0$ 인 시간에서 나타나며 이것은 이함수의 미분을 통하여 구해진다. 그러므로 식 (12)에  $t=0$ 인 조건을 대입하면

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{max}}(t) &= \frac{1}{2} \sqrt{BT} \left( 1 + \frac{1}{2} \text{sinc}\left(\frac{\pi B}{2B_T}\right) + \frac{1}{2} \text{sinc}\left(-\frac{\pi B}{2B_T}\right) \right) \\
 &= \frac{1}{2} \sqrt{BT} \left( 1 + \frac{2B_T}{\pi B} \sin\left(\frac{\pi B}{2B_T}\right) \right) \quad (13)
 \end{aligned}$$

식 (13)은 압축된 펄스의 진폭이 초음파변환기의 대역폭에 의하여 결정되는 시스템의 전달함수  $B_T$ 와 입력신호의 대역폭  $B$ 의 함수라는 것을 보여주며 출력이 최대가 되기 위한  $B_T$ 와  $B$ 의 관계는 다음과 같이 구해진다.

$$B_{opt} = 1.1479 \cdot B_T \quad (14)$$

### III. 시뮬레이션 및 실험결과

초음파 신호처리 시스템의 입력으로 chirp신호를 이용하고자 할 때 주어진 초음파시스템의 대역폭과 chirp신호의 대역폭과의 관계를 결정하기 위하여 초음파시스템의 대역폭과 chirp신호의 대역폭 사이의 관계를 구하여야 한다. 이를 위하여 초음파시스템의 대역폭 1 MHz로 가정하고 chirp신호의 대역폭을 2 MHz까지 변화시키면서 초음파 시스템의 출력을 시뮬레이션 하여보면 그림 3과 같다. 이때 chirp신호의 펄스폭 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여  $T = 20\mu s$ ,  $T = 10\mu s$  그리고  $T = 5\mu s$ 로 변화시켰다.

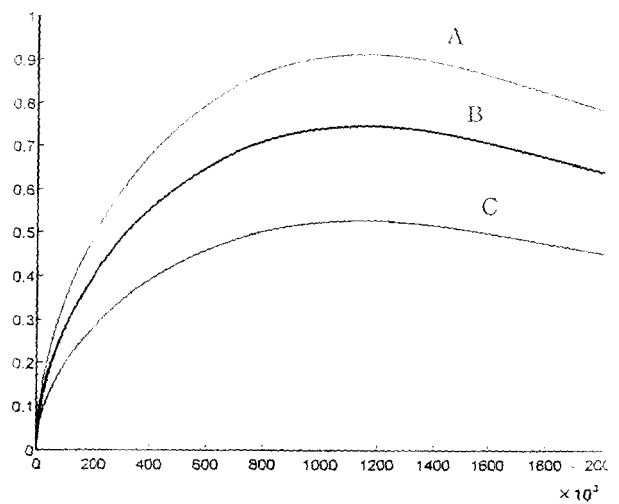


그림 3. 펄스폭과 대역폭 변화에 따른 반사신호 이득

그림 3에서 그래프 A는  $T = 20\mu s$ , 그래프 B는  $T = 10\mu s$  그리고 그래프 C는  $T = 5\mu s$ 인 경우이다. 신호의 펄스폭이 넓을수록 출력이 증가하는 것을 볼 수 있으나 출력신호의 최대값은 항상  $B = 1.1479 B_T$ 인 점으로 일치하게 나타났다.

한편, 그림 4는 펄스폭  $T$ 을  $20\mu s$ 으로 고정시키고, 시스템의 대역폭  $B_T$ 는  $2.65MHz$  그리고 중심주파수  $f_0$ 가  $3.5MHz$ 인 chirp 신호를 인가하였을 때 대역폭의 변화 즉  $B=0.5B_T$ ,  $B=B_T$ ,  $B=1.1479B_T$  그리고  $B=1.8B_T$ 인 경우의 반사신호 파형을 구한 것이다. 그림 4에서 역시  $B=1.1479B_T$ 인 경우가 좁은 펄스폭과 최대출력을 나타내는 것을 볼 수 있다.

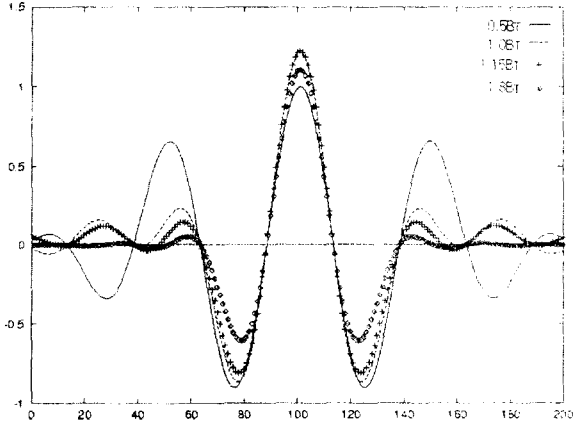


그림 4. Chirp신호의 대역폭 변화에 따른 출력신호 파형

실험을 위하여, 임의파형발생기와 중심주파수가  $3.5MHz$ , 대역폭이  $2.65MHz$ , 초점거리가 2인치인 초음파변환기를 사용하였다. 이때, chirp 신호의 크기는  $5V$ 이고 폭은  $15\mu s$ 이었으며 대역폭은  $B=0.5B_T$ ,  $B=B_T$ ,  $B=1.1479B_T$  그리고  $B=1.8B_T$ 로 변화시키면서 얻어진 알루미늄으로부터 얻어지는 반사신호를 1024개의 데이터로 A/D변환하였다. 그림 5는  $B=B_T$ 인 조건에 대한 입력신호이고 그림 6은 그림 5와 같은 입력에 대한 반사신호와 스펙트럼이다.

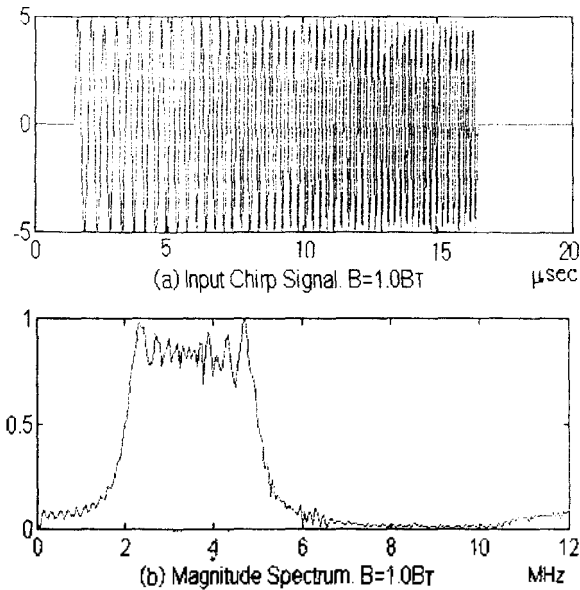


그림 5. Chirp 입력신호 파형 및 스펙트럼

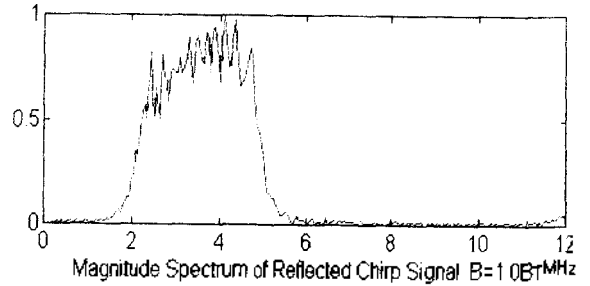
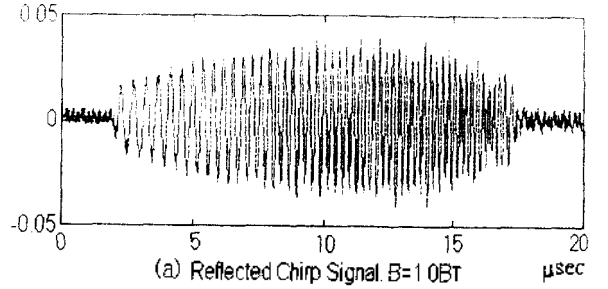
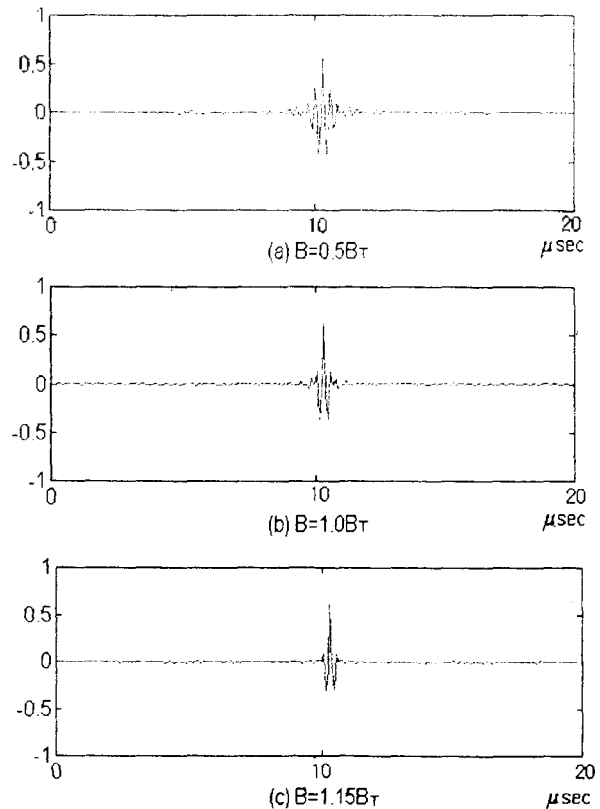


그림 6. Chirp 반사신호 파형 및 스펙트럼

그림 7은 위에서 언급한 4가지 대역폭 조건을 통하여 얻어진 압축된 반사신호 파형이다. 그림 7에서 나타난 바와 같이 chirp신호의 대역폭  $B=1.1479B_T$ 일 경우가 가장 좁은 펄스폭을 나타내고 있으며 신호의 크기 또한 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다.



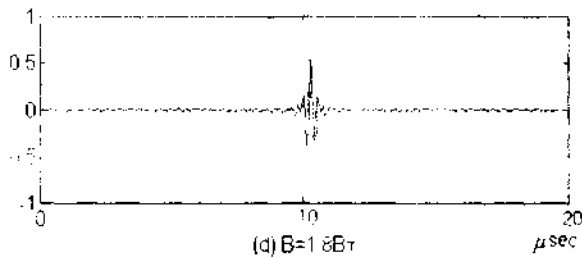


그림 7. 압축된 반사신호 비교

#### IV. 결 론

비파괴 검사 등에 이용되는 초음파 펄스반사 시스템에 펄스압축 기술을 이용하면 반사신호의 S/N 비를 증가시킬 수 있으며 chirp신호는 이를 위하여 이용될 수 있다. 본 논문에서는 초음파 신호처리 시스템에 펄스압축 기술을 적용할 때 입력으로 이용되는 chirp신호의 최적대역폭을 구하는 방법을 연구하였다. Chirp 신호가 초음파변환기의 스펙트럼을 해석하고 이를 이용하여 압축된 초음파 반사신호의 이득을 최대로 얻기 위한 chirp신호의 대역폭을 구한 결과, 펄스폭 T가 클수록 커다란 출력이 얻어지고 입력신호의 최적대역폭은 초음파시스템의 대역폭보다 1.1479배 클 때임을 확인하였다.

Chirp 신호발생을 위한 임의 파형발생기와 중심주파수가 3.5MHz이고 대역폭이 2.65MHz인 초음파변환기를 이용한 실험에서도 동일한 결과가 얻어졌으며 본 연구의 결과는 초음파를 이용한 비파괴검사, 의학용 영상처리 등에서 펄스압축 기술로 chirp 신호를 이용할 때 활용될 수 있으리라 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. C. R. Cole, "Properties of swept FM waveforms in medical ultrasound images," *Ultrasonics symposium*, pp. 1242-1248, 1991.
2. T. Folkestad, et. al, "Chirp excitation of ultrasonic probe for high-rangeability gas flowmetering," *Ultrasonics symposium*, pp. 1087-1092, 1989.
3. 고대식, "스플릿-스펙트럼 처리의 자동화를 위한 가용대역폭의 결정방법," *한국음향학회지*, 14권 6호, pp 27-31, 1995.
4. M.G. Silk, *Ultrasonic transducers for nondestructive testing*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984.
5. *Digital signal acquisition & processing for NDE & plant maintenance workshop*, sponsored by EPRI, Univ. Hilton, 1990.
6. S. Hakin, *Communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 3rd edition, 1994.
7. E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, 5th edition, 1983.
8. M. Gindre, et al., "Ultrasonic imaging correlation techniques computer simulation and results," *Acoustical imaging*, Vol. 17, pp. 319-329, 1989.

9. G. Hayward and E. John, "Comparison of some non-adaptive deconvolution techniques for resolution enhancement of ultrasonic data," *Ultrasonics*, Vol. 27, pp. 155-164, 1989.

#### ▲고 대 식



1982년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1987년 8월 : 경희대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
 1991년 2월 : 경희대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1989년 9월 ~ 현재 : 목원대학교 전자공학과 조교수  
 주요관심분야: 초음파 영상처리, 신호처리, 음향공학 비파괴검사

#### ▲문 건(Gun Moon)

1947년 2월 9일



1969년 : 한국항공대학교 통신공학과 졸업  
 1983년 : 경희대학교 전자공학과 졸업(석사)  
 1988년 : 경희대학교 전자공학과 졸업(박사)  
 현재 : 제주대학교 통신공학과 부교수