

## Golay 코드를 사용한 초음파펄스압축법 개발

김영환\*, 김영길\*, Peter Jeong\*\*

\* 한국표준과학연구원 비파괴평가그룹

\*\* Center for NDE, Iowa State Univ., Ames, IA, U.S.A

**요 약** 범용의 초음파탐상장치에서는 탐촉자를 구동하기 위하여 높은 전압의 좁은 펄스를 사용하는데, 이 펄스의 평균 출력에는 제한이 따른다. 과도하게 높은 전압은 탐촉자를 파괴시키고, 지나치게 긴 펄스는 분해능을 감소시킨다. 긴 폭의 의사랜덤신호를 사용한 펄스압축은 상호관계를 이용하여 분해능을 감소시키지 않고 신호대 잡음비를 개선할 수 있다. 본 연구에서는 Golay 코드를 사용한 초음파펄스압축법을 개발하였다. 이론적으로 펄스압축에서의 신호 특성 및 신호대 잡음비를 계산하기 위하여 Golay 코드의 등가임펄스를 제안하였고, 이를 실험적으로 증명해 보였다. 랜덤한 잡음신호에 대하여 S/N 비가 Golay 코드의 제공근에 비례하였고, 이 방법은 고분자, 플라스틱, 고무와 같은 흡수가 큰 재료에서 유용함을 알 수 있었다.

### 1. 서 론

초음파탐상시험은 금속, 세라믹 제품의 생산 또는 사용중에서의 결함 탐지를 위하여 널리 사용되고 있으며, 범용의 초음파탐상시스템에서는 탐촉자를 구동하기 위하여 좁은 폭의 고압 펄스를 사용한다. 감쇠가 큰 재료에서는 되돌아오는 에코의 크기가 작아 잡음신호와 분리하기 어려우므로, 이러한 경우에 잡음신호보다 큰 에코신호를 얻기 위해 보내주는 펄스의 에너지를 증가시켜야 한다. 펄스의 에너지를 증가시키려면 탐촉자를 구동하는 전압을 높이거나 긴 펄스를 사용해야 하는데, 탐촉자의 구동전압을 높이면 탐촉자가 파괴되고, 펄스의 폭을 증가시키면 분해능이 나빠지므로 초음파 펄스의 에너지를 크게 해주는 데는 제한이 있다.

펄스압축(pulse compression)은 레이더에서 개발된 방법으로 범용 초음파탐상장치의 펄스에너지 제한 문제를 극복할 수 있다. 펄스압축법은 코드화된

긴 펄스로 탐촉자를 구동하고, 수신된 신호를 송신 코드에 맞는 신호 처리로 좁은 폭의 신호를 얻는 방법이다. 펄스압축에 사용되는 코드의 종류로는 linear fm chirp<sup>1)</sup>, 의사랜덤(pseudorandom)신호 등이 있다. 일반적으로 랜덤신호의 상호관계는  $t=0$ 일 때만 유한한 값을 갖는 델타함수( $\delta(t)$ ) 형태이나 그 외의 범위에서도 곱로브(sidelobe)가 존재한다. 의사랜덤신호는 이러한 곱로브를 최소화하기 위해서 고안된 불규칙한 신호로서, Barker 코드<sup>2)</sup>, m-sequence<sup>3)</sup>, Golay 코드<sup>4)</sup> 등이 펄스압축에 많이 사용되며, 곱로브의 최소화를 위한 코드들이 계속 개발되고 있는데<sup>5), 6)</sup>, 이들은 상호관계(correlation)를 이용하는 공통점을 지니고 있다.

Golay 코드는 1961년 M.J.E.Golay에 의하여 고안된 같은 길이의 한 쌍의 수열로 이 수열의 자기상호관계(autocorrelation)는 주피크를 제외하고는 서로 다른 부호의 값을 갖는다.<sup>7)</sup> 그러므로, 두 수열의 자기상호관계의 합은  $t=0$ 일 때의 주피크만 남고

결로브는 소거되는 특성을 지니고 있다. 즉, 한 쌍의 Golay 코드를  $a_i, b_i$ 라 하면, 이들 수열의 자기상호관계  $c_j, d_j$ 는

$$c_j = \sum a_i a_{i+j}$$

$$d_j = \sum b_i b_{i+j}$$

와 같이 주어지고, 이들 자기상호관계의 합은

$$c_j + d_j = \begin{cases} 0 & j \neq 0 \\ 2n & j = 0 \end{cases}$$

와 같이 주어져 결로브가 소거된다.

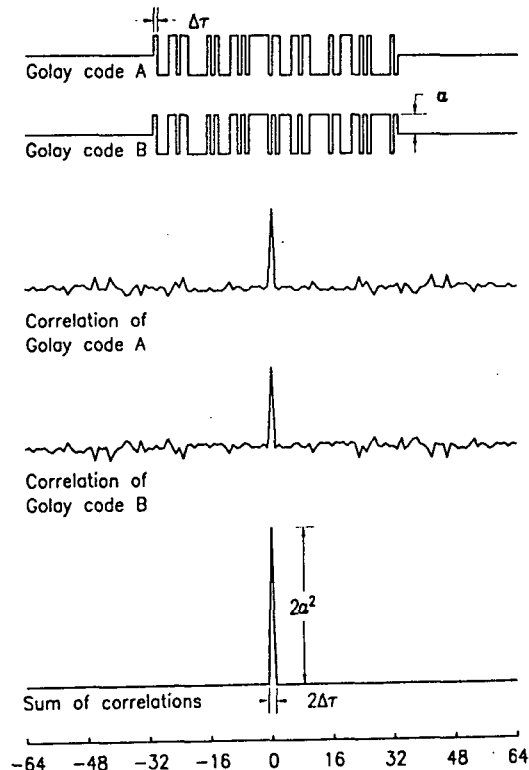


Fig. 1. Golay codes of length 64 and characteristics of their correlation.

대표적인 예로 코드 길이가 64, 코드의 클럭주기가  $\Delta\tau$ , 코드 진폭이  $a$ 인 Golay 코드의 특성을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 한 쌍의 Golay 코드 A와 B의 자기상호관계에서 주피크는 일치하지만 결로브의 부호는 서로 상반되므로, 그 결

과 두 자기상호관계의 합에서는 결로브가 없어지는 특성을 보여주고 있다. 이때 얻어지는 피크는 폭이  $2\Delta\tau$ 이고, 진폭이  $2a^2$ 로 주어진다.

의사랜덤신호의 상호관계를 얻기 위해서 아날로그 상호관계기(correlator)<sup>8)</sup>, 디지털 상호관계기<sup>9), 10), 11)</sup>, 및 다층탐촉자<sup>12)</sup> 등이 고안되어 왔다. 아날로그 상호관계기는 시간지연기(delay line)와 적분기를 사용하는 관계로 하나의 탐상 결과를 얻기 위해서는 수 분의 긴 시간이 요구되며, 디지털 상호관계기를 사용하는 경우에는 연산 속도는 매우 빠르나 입력 데이터의 크기가 제한되어 코드의 길이를 증가시키는데 제한이 있다. 다층탐촉자는 전기적 신호 처리 없이도 간단하게 상호관계를 구할 수 있는 장점이 있지만 코드의 길이가 길어질 경우에 압전소자의 갯수가 증가함에 따라서 제작에 제한이 따른다. 본 연구에서는 디지털 오실로스코프로 수신한 신호를 컴퓨터에서 소프트웨어로 상호관계를 구함으로써 이러한 제약점들을 극복하였다.

본 연구에서는 Golay 코드를 이용한 초음파펄스 압축에서의 등가성 및 신호대 잡음비(signal to noise ratio : S/N비)를 이론적으로 검토하였고, 펄스 압축장치를 개발하여 그 특성을 분석하였으며, 흡수 감쇠가 큰 재료에서 펄스압축법이 S/N비를 향상시킴을 보였다. 또한, Golay 코드의 길이와 S/N비 사이의 관계를 실험적으로 규명하였다.

## 2. 이론적인 배경

범용의 초음파시험장치는 탐촉자를 구동하기 위하여 스파이크 형태의 펄스를 사용하는 반면에 펄스 압축에서는 코드화된 긴 파형을 사용한다. 그러나, 펄스 압축의 결과는 범용의 초음파시험법에 의해 얻어지는 결과와 유사한데, 본 절에서는 Golay 코드와 범용의 초음파탐상장치의 펄스와의 등가성을 유도하였고, 상호관계에 의한 펄스압축시 얻어지는 S/N비에 대하여 논의한다.

### 2.1. Golay 코드의 등가성

초음파시험의 모델은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 초음파탐상에서 얻어지는 신호( $g$ )는 탐촉자를 구동하기 위한 입력신호( $f$ ), 탐촉자의 송신특성( $s_t$ ),

감쇠 및 분산을 포함한 매질의 특성( $p$ ), 결합에서의 반사특성( $r$ ) 및 탐촉자의 수신특성( $s_r$ )로부터

$$g = s_r \star p \star r \star p \star s_t \star f = h \star f \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서,  $\star$ 는 컨볼루션을 나타내며, 초음파시험의 대상이 정해지면 탐촉자, 매질 및 결합의 특성이 결정되어  $h = s_r \star p \star r \star p \star s_t$ 는 일정한 함수로 주어지므로 초음파탐상시스템의 전달함수로 정의하였다.

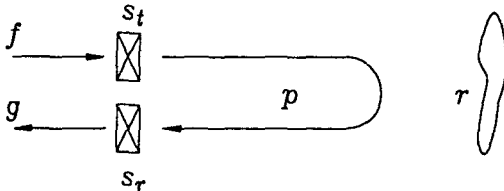


Fig. 2. Schematic diagram of ultrasonic testing.

범용의 초음파시험장치에서는 탐촉자를 구동하기 위해서는 스파이크 형태의 신호( $f_p$ )를 사용하는데, 이 경우 얻어지는 출력신호( $g_p$ )는 식 (1)으로부터

$$g_p = h \star f_p \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 주어진다.

한편, 펄스압축에 사용되는 한 쌍의 Golay 코드신호를  $f_A$ 와  $f_B$ 라 하고, 이 신호로 탐촉자를 구동하였을 때에 얻어지는 수신신호를 각각  $g_A$ 와  $g_B$ 라 하면, 이들은 식 (1)으로부터

$$\begin{aligned} g_A &= h \star f_A \dots\dots\dots (3) \\ g_B &= h \star f_B \end{aligned}$$

와 같이 주어진다. Golay 코드에서의 펄스압축은 수신신호와 송신신호 사이의 상호관계의 합으로 주어지므로 펄스압축시 얻어지는 신호,  $g_C$ 는

$$\begin{aligned} g_C &= f_A \star g_A + f_B \star g_B \\ &= h \star [f_A \star f_A + f_B \star f_B] \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

와 같이 주어진다. 여기서  $\star$ 는 상호관계를 나타

내었다. 한편, Golay 코드의 등가임펄스(impulse)를

$$f_C = f_A \star f_A + f_B \star f_B \dots\dots\dots (5)$$

로 정의 하면, 식(4)는

$$g_C = h \star f_C \dots\dots\dots (6)$$

와 같이 주어진다. 식 (2)와 (6)을 비교해 보면, 펄스압축의 결과는 범용의 초음파탐상장치의  $f_p$  대신에  $f_C$ 를 대체한 것과 같음을 알 수 있다.  $f_C$ 는 Golay 코드의 자기상호관계의 합이므로 Fig. 1에 나타낸 Golay 코드의 특성으로 인하여 주파수만 있는  $\delta(t)$  형태이므로 범용의 초음파탐상장치의 구동신호( $f_p$ )와 유사하여, 펄스압축으로 얻은 신호는 범용의 초음파탐상 결과와 거의 같은 결과를 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

이러한 관계를 시뮬레이션을 통하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 범용의 초음파탐상장치의 구동신호와 Golay 코드의 등가임펄스의 주파수 성분이다. 시간대역에서는 부호는 다르지만 스파이크 형태의 신호를 보이며, 범용의 초음파탐상기용 펄스가 Golay 코드 등가임펄스에 비하여 높은 주파수 성분을 지니게 된다. 5 MHz 초음파탐촉자를 사용하였을 경우 수신되는 시간대역 신호를 Fig. 3(b)에 나타내었고 이 경우 구동신호의 부호가 다르기 때문에 신호의 위상이 바뀌어 나타나므로 범용의 초음파탐상 결과는 반전하여 나타내었다. 두 신호 사이에는 큰 차이가 없고, Fig. 3(c)에 나타낸 주파수 성분도 큰 차이가 없음을 알 수 있고, Fig. 3(a)와 (c)를 비교해보면 Fig. 3(c)가 더 일치하는 것으로 나타났는데 이는 초음파탐촉자가 일종의 필터 역할을 하였기 때문이다. 따라서, 펄스압축을 사용하더라도 얻어지는 정보에는 왜곡이 없게 된다.

2.2. Correlation 시스템에서의 SNR

SNR을 분석하기 위하여 식 (2)로 표시된 초음파탐상시스템에 잡음신호가 더해진 경우를 고찰하면, 식 (2)는

$$g = h \star f + n \dots\dots\dots (7)$$

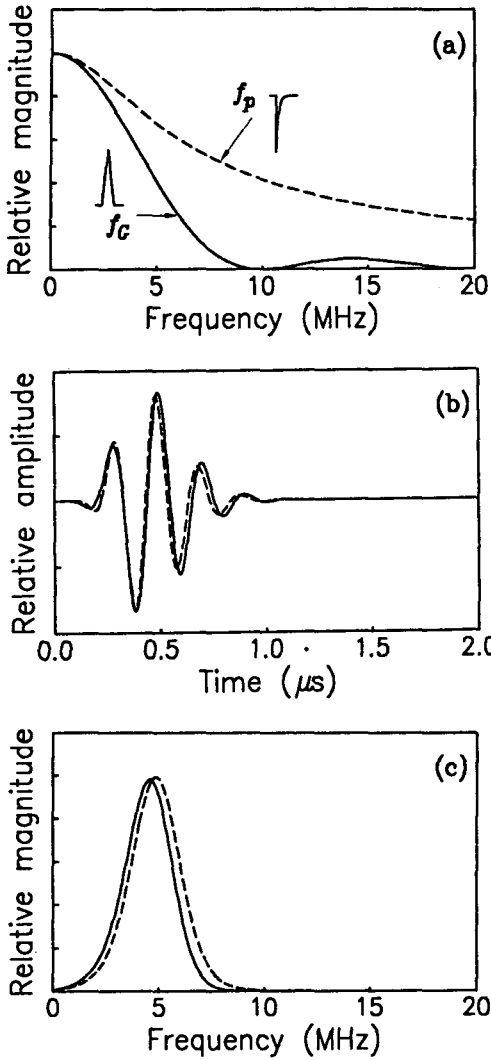


Fig. 3. Computer simulation of conventional ultrasonic testing and pulse compression system. (a) Frequency spectra of conventional UT pulse and equivalent impulse of Golay codes, (b) testing results using 5 MHz transducer and (c) their frequency spectra.

과 같이 된다. 여기서  $n$ 은 잡음신호로 본 연구에서는 불규칙 잡음을 가정하였다. 출력신호와 입력신호 사이의 상호관계,  $\phi_n$

$$\phi = h \star \phi_{ss} + \phi_{ns} \dots \dots \dots (8)$$

와 같이 주어진다. 여기서,  $\phi_{ss} = f \star f$ 은 신호에 대한 상호관계이고,  $\phi_{ns} = n \star f$ 은 잡음신호에 대한 상호관계이다. 만일 잡음이 없을 경우의 출력신호는

$$\phi = h \star \phi_{ss} \dots \dots \dots (9)$$

로 주어진다. 여기서, Golay 코드와 같은 의사랜덤신호를 사용한 경우에는  $\phi_{ss} \approx K\delta(t)$ 이므로 얻어지는 상호관계는

$$\phi \approx Kh(t) \dots \dots \dots (10)$$

와 같이 주어진다. 여기서 Golay 코드 시스템에서는  $\phi_{ss} \equiv f_c$ 이고  $K$ 는 등가임펄스 크기이다. Fig. 1에 나타난 펄스의 폭으로부터  $K = 2a^2\Delta\tau$ 로 주어진다.

$\phi_{ns}$ 로 주어지는 잡음에 의한 오차의 분산( $\sigma^2$ )은 잡음과 신호 사이에 상호관계가 없을 경우에는<sup>13)</sup>

$$\sigma^2 = \frac{1}{\tau^2} \int_0^\tau \int_0^\tau \phi_{ss}(t'-t) \phi_{nn}(t'-t) dt' dt \dots \dots (11)$$

와 같이 주어진다. 여기서  $\tau$ 는 의사랜덤신호의 시간 폭으로서 길이가  $N$ 인 의사랜덤신호의 경우에는  $\tau = N\Delta\tau$ 이다. 만일 잡음신호가 스펙트럼 밀도가  $\rho$ 인 white noise인 경우에는

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{\rho}{\tau^2} \int_0^\tau \int_0^\tau \delta(t-t') \phi_{ss}(t'-t) dt' dt \dots \dots (12) \\ &= \frac{\rho}{\tau^2} \int_0^\tau \phi_{ss}(0) dt = \frac{2\rho a^2}{\tau} \end{aligned}$$

로 된다.

따라서, S/N비는

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{Kh}{\sigma} = ah\Delta\tau\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \\ &= ah\Delta\tau^{3/2}\sqrt{\frac{N}{\rho}} \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

와 같이 주어진다. 초음파펄스압축에서 최대 효율을 얻기 위해서는 사용하는 탐촉자의 공진주파수,  $f_c$ 에 의해 코드의 클럭주기는  $\Delta\tau = 1/(2f_c)$ 와 같이 결정되므로<sup>14)</sup>, 주어진 초음파탐상시스템에서는  $\Delta\tau$ 는 일정한 값을 갖고, 따라서 식 (13)은

$$S/N \propto a\sqrt{N} \dots\dots\dots (14)$$

와 같이 표현된다. 즉 S/N비는 펄스의 진폭  $a$ 와 코드의 길이  $N$ 의 제곱근에 비례한다. 범용 초음파탐상기의 펄스 진폭과 같은 크기의 의사랜덤신호를 사용할 경우에는 코드 길이의 제곱근에 비례하게 되므로 코드의 길이를 256으로 하면 S/N비는 약 16 배 증가하게 된다.

여기서 중요한 점은 잡음신호  $n$ 이 기준신호와 상호관계가 없는 랜덤노이즈이어야 한다는 점이다. 즉, grain 경계 또는 복합재료의 섬유에서의 산란 등에 의한 잡음은 랜덤노이즈가 아니므로 펄스압축에 의해 제거될 수 없고, 따라서 펄스압축은 흡수에 의한 감쇠가 큰 경우에 나타나는 잡음신호에 대해서만 유용하다는 점이다.

3. Golay 코드 펄스압축장치 제작

Golay 코드 펄스압축장치는 Fig. 4에 나타난 바와 같이, 임의파형발생기(LeCroy 9101), 자체제작한 고압증폭기, 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310L)로 구성되어 있으며, 직경이 6.35mm인 5MHz 초음파탐촉자(파나메트릭사의 V110)를 사용하여 pitch-catch로 시험하였다. 범용의 초음파탐상장치를 사용하였을 때의 결과와 비교하기 위하여 초음파신호의 수신부는 범용의 초음파 pulser/receiver 장치(파나메트릭사의 5058PR)를 사용하였다.

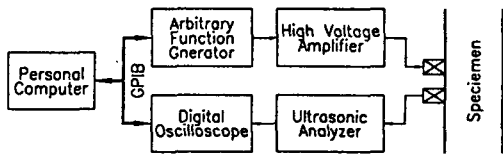


Fig. 4. Configuration of the Golay code ultrasonic pulse compression system.

Golay 코드를 발생하기 위하여 임의파형발생기에 Golay 코드들을 미리 저장하고, 필요시에 발생시킴으로써 하였다. 임의파형발생기에서 나오는 Golay 코드 신호로 직접 탐촉자를 구동하기에는 그 진폭이 충분치 않으므로 고압증폭기를 사용하여 신호를 증폭하였다. 식 (14)에 나타난 바와 같이 S/N비가 구

동신호의 진폭에 비례하여 증가하지만, 고압용 전자소자들의 신호처리 속도가 느린관계로 고압 증폭기에서 Golay 코드를 크게 왜곡시키므로 진폭을 증가시키는 곤란하다. 고압증폭기는 MOSFET를 사용하여 제작하였고, 출력 전압이  $\pm 100V$ 가 되도록 증폭하였다.

증폭기의 특성상 임의파형발생기에서 발생하는 신호는 고압증폭기를 거치는 과정에서 약간의 왜곡을 가져오는데 이는 이상적인  $f_0$ 를 변형시키게 된다. 이 특성을 조사하기 위하여 길이가 64인 Golay 코드를 사용하여 고압증폭기의 출력신호와 임의파형발생기의 출력신호의 상호관계를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)와 (b)는 각각 Golay 코드 A, B의 상호관계로서 주피크를 제외한 부분의 신호의 부호가 반대되는 것을 알수 있다. 따라서, Fig. 5(c)에 나타낸 두 상호관계의 합에서는 주피크를 제외한 겹로브가 소멸되는데, 이상적으로 완전히 제거되지 않고 약간의 신호가 나타났다. 이는 임의파형발생기에서 만들어진 기준신호가 완벽한 Golay 코드가 아니고 또한 이 신호가 고압증폭기를 거치는 동안에 Golay 코드가 왜곡되었기 때문으로 실제의 실험 데이터를 얻을 때에도 ripple을 발생시키는 요인이 될 수 있다.

디지털 오실로스코프에 수신된 신호는 IEEE-

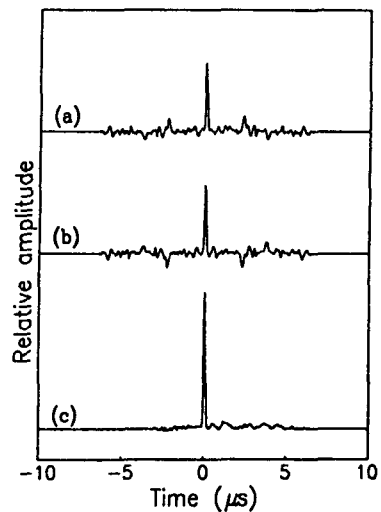


Fig. 5. Characteristics of fabricated high-voltage amplifier. (a) correlation of Golay code A, (b) correlation of Golay code B and (c) sum of two correlations.

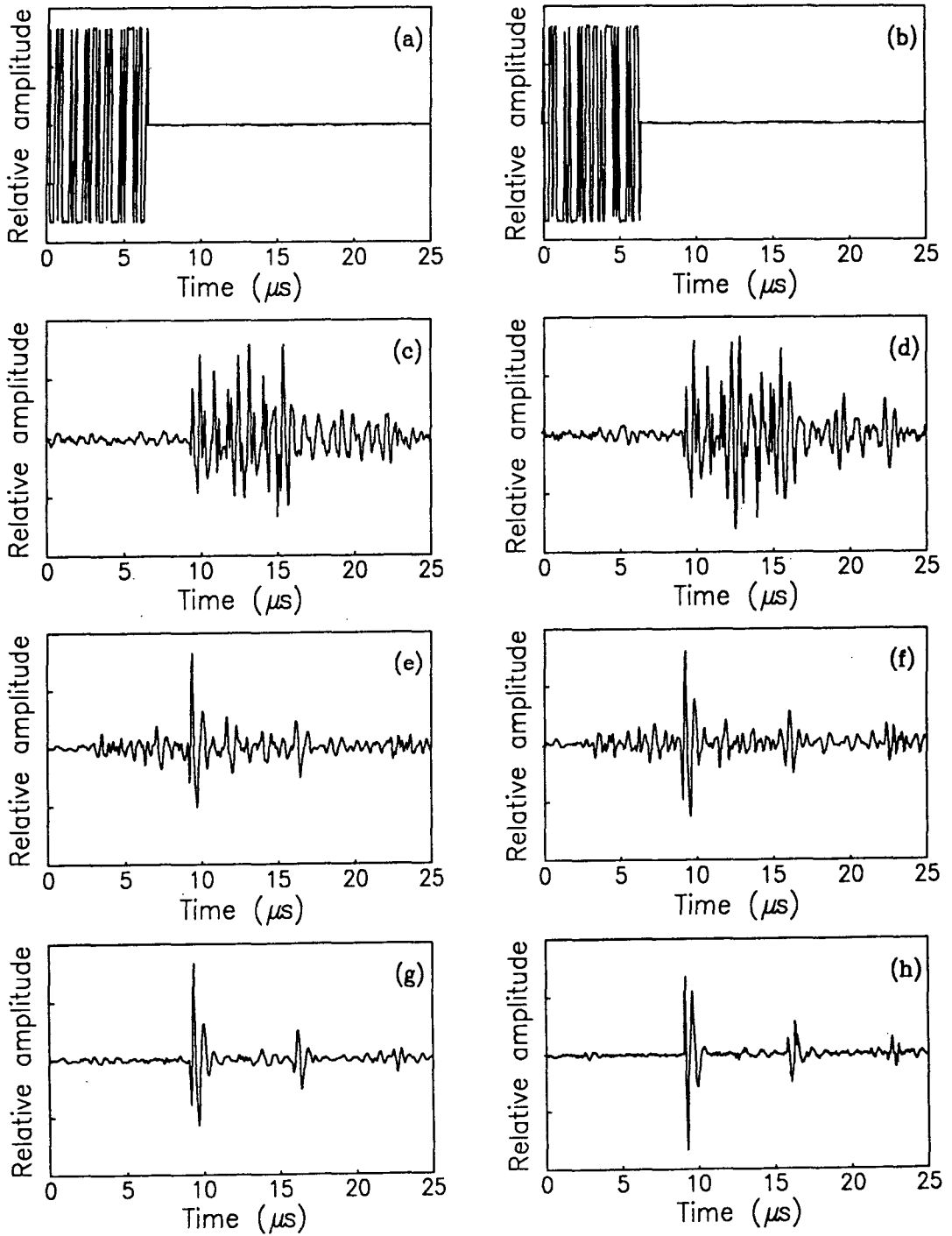


Fig. 6. Results of pulse compression and conventional ultrasonic testing for a steel block of 50mm thick. (a) Golay code A, (b) Golay code B, (c) received signal for code A, (d) received signal for code B, (e) correlation for code A, (f) correlation of code B, (g) sum of two correlations and (h) results of conventional ultrasonic testing.

488 인터페이스를 통하여 PC로 전송되어 신호처리를 하였다. 상호관계를 계산하는 시간을 줄이기 위하여 시간대역에서의 적분 대신에 FFT를 이용하여 주파수 대역에서 상호관계를 구하였다.

#### 4. 결과 및 토의

펄스압축 결과를 범용의 초음파탐상 결과와 비교하기 위하여 범용 초음파시험시 탐촉자를 구동하는 신호로 200V의 스파이크 펄스를 사용하였다. 펄스압축이 초음파시험 결과를 왜곡시키는지 여부를 확인하는 과정으로 두께 50mm인 steel 블럭에 대한 초음파시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)와 (b)는 길이가 64인 Golay 코드 A와 B이고, (c)와 (d)는 각각의 코드에 대한 출력신호이다. (e)와 (f)는 구동신호와와의 상호관계로서 이 경우에도 펄스압축 효과는 있지만, 결로브로 인해서 잡음신호가 크게 나타나고 있다. (g)는 두 상호관계의 합으로서 결로브가 제거되어 깨끗한 신호가 나타나고 (h)에

나타낸 범용의 초음파탐상 결과와 위상이 반전될 것을 제외하고는 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 경우는 잡음신호가 거의 없는 관계로 펄스압축의 효과가 없고, 도리어 약간의 ripple이 나타나는데, 이는 Golay 코드의 발생 및 이의 증폭시 이상적인 Golay 코드와 어긋남으로 인한 것이다. 따라서 펄스압축은 잡음신호가 거의 없는 (S/N비가 큰) 경우에는 효과가 없고 도리어 펄스압축에서는 ripple이 나타날 수 있다.

펄스압축 효과는 흡수에 의한 감쇠가 큰 경우에 잘 나타나는데, 흡수가 큰 물질인 플라스틱과 고무에 대하여 펄스압축시험을 수행하여 좋은 결과를 얻을 수 있었고, 한 예로 두께 127mm인 폴리카보네이트에서의 펄스압축 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 범용의 초음파탐상 결과이고 (b), (c) 및 (d)는 각각 코드의 길이가 8, 64, 256인 Golay 코드를 사용하였을 때의 펄스압축시험 결과이다. Fig. 7(a)의 범용의 초음파시험 결과에서는 115  $\mu$ s 근처에 에코신호를 판별하기 어렵지만 펄스압축 결과에

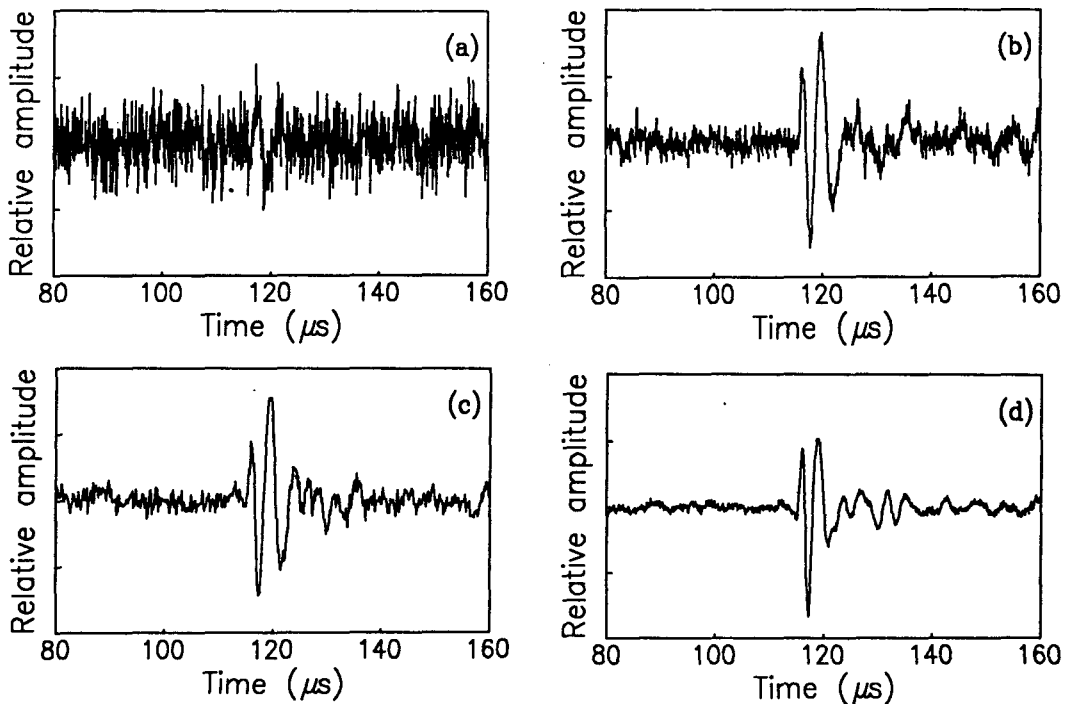


Fig. 7. Test results for 127 mm thick polycarbonate. (a) conventional ultrasonics and pulse compression results using Golay codes, (b) code length 8 (c) code length 64, and (d) code length 256.

서는 쉽게 판정할 수 있으며 코드의 길이가 길어질수록 S/N비가 높아짐을 알 수 있다.

코드 길이와 S/N비의 관계를 규명하기 위하여 에코 신호가 없는 부분을 잡음신호로 정의하고 이 부분의 표준절차를 잡음신호로 하고 에코의 peak-to-peak 전압을 신호로 하여 S/N비를 계산하였고 펄스 압축에 사용된 코드의 길이에 따른 S/N비를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8으로부터  $S/N \propto N^{0.41}$ 의 관계를 얻을 수 있어서 식 (14)에 나타낸 바와 같이 S/N비는 코드 길이의 제곱근에 비례함을 알 수 있다.

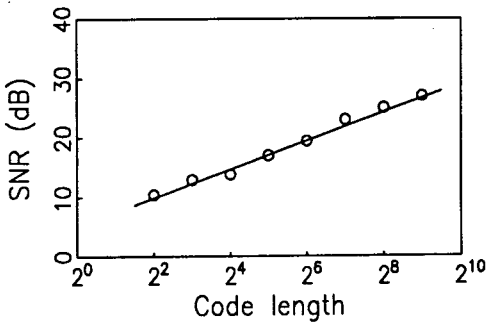


Fig. 8. SNR versus Golay code length.

CFRP와 같은 섬유강화 복합재료에 대해서도 펄스 압축기법을 적용하였으나 좋은 결과를 얻을 수 없었는데, 이는 복합재료에서의 잡음신호원이 주로 섬유에서의 산란에 의한 것이기 때문이다.

### 5. 결 론

Golay 코드의 상호관계를 이용한 펄스 압축을 수행하였다. Golay 코드 시스템의 등가펄스를 수식적으로 검토하여 펄스 압축이 범용의 초음파탐상시스템에서 얻어지는 신호를 거의 왜곡하지 않음을 이론적으로 보였고, 실험으로 확인하였다.

펄스 압축시 얻어지는 S/N비는 구동펄수의 진폭과 의사랜덤신호의 폭의 제곱근에 비례함을 알 수 있고 Golay 코드의 길이의 제곱근에 비례함을 실험적으로 확인하였다.

펄스 압축은 흡수에 의한 감쇠물질에 유용한데, 플라스틱, 고무 및 의료용 초음파에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

- 1) F. Lam, and J. Szilard, "Pulse Compression Techniques in Ultrasonic Non-destructive Testing", Ultrason., 14(1976), pp. 111-114
- 2) W. H. Chen and J. L. Deng, "Ultrasonic Non-destructive Testing Using Barker Code Pulse Compression Technique", Ultrasonic., 26(1988), pp. 23-26
- 3) C. M. Elias, "An Ultrasonic Pseudorandom Signal-correlation System", IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU-27(1980), pp.1-7
- 4) B. B. Lee and E. S. Furgason, "High-speed Digital Golay Code Flaw Detection System", Ultrason., 21(1983), pp.153-161
- 5) C. X. Hua, "A New Algorithm to Optimize Barker Code Sidelobe Suppression Filter", IEEE Trans. Aero. Electr. Syst., 26(4)(1990), pp. 673-677
- 6) S. Wadaka, T. Nagatsuka, K. Misu and Koike, "New Sets of Testing Codes Providing Zero Range Sidelobes for Ultrasonic Pulse Compression Nondestructive Testing Systems", Nondestr. Test. Eval., 7(1992), pp. 201-211
- 7) M. J. E. Golay, "Complementary Series", IRE Trans. Inform. Theor., IT-7(1961), pp. 82-87
- 8) N. M. Bilguty, E. S. Furgason, and V. L. Newhouse, "Evaluation of a Random Signal Correlation System for Ultrasonic Flaw Detection", IEEE Trans, Sonics Ultrason., SU-23(1976), pp. 329-333
- 9) G. Hayward and Y. Gorfu, "A Digital Hardware Correlation System for Fast Ultrasonic Data Acquisition in Peak Power Limited Applications", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., UFFC-35(1988), pp.800-808
- 10) G. Hayward and Y. Gorfu, "Low Power Ultrasonic Imaging Using Digital Correlation", Ultrason., 27 (1989), pp. 288-296
- 11) Z. X. Ding and P. A. Payne, "A New Golay Code System for Ultrasonic Pulse Echo Measure-



- ments", Meas. Sci. Techol., 1(1990), pp. 158-165
- 12) K. M. Sung, "Piezoelectric Multilayer Transducers for Ultrasonic Pulse Compression", Ultrason-ic., 24(1984), pp. 61-68
- 13) J. D. Lamb and P. A. Payne, "Noise Rejection Properties of Modern Measurement Techniques in Control Engineering", Proc. 5th IEEE Conf. on Circuits & Systems (Asilomar CA, USA, 1971), pp. 548-554
- 14) B. B. Lee and E. S. Furgason, "An Evaluation of Ultrasound NDE Correlation Flaw Detection Systems", IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU-29 (1982), pp. 359-369

## Development of Ultrasonic Pulse Compression Using Golay Codes

Young H. Kim\*, Young Gil Kim\*, and Peter Jeong\*\*

\*NDE Group, Korea Research Institute of Standards and Science

\*\*Center for NDE, Iowa State Univ., Ames, IA, U.S.A

**Abstract** Conventional ultrasonic flaw detection system uses a large amplitude narrow pulse to excite a transducer. However, these systems are limited in pulse energy. An excessively large amplitude causes a dielectric breakage of the transducer, and an excessively long pulse causes decrease of the resolution. Using the pulse compression, a long pulse of pseudorandom signal can be used without sacrificing resolution by signal correlation. In the present work, the pulse compression technique was implemented into an ultrasonic system. Golay code was used as a pseudorandom signal in this system, since pair sum of autocorrelations has no sidelobe. The equivalent input pulse of the Golay code was derived to analyze the pulse compression system. Throughout the experiment, the pulse compression technique has demonstrated for its improved SNR(signal to noise ratio) by reducing the system's white noise. And the experimental data also indicated that the SNR enhancement was propotional to the square root of the code length used. The technique seems to perform particularly well with highly energy-absorbent materials such as polymers, plastics and rubbers.

---

(Received : June 11, 1994)