

DSP를 이용한 자기공명영상시스템의 경사자계 파형 발생기

論 文
49D-1-7

Gradient Waveform Synthesizer in Magnetic Resonance Imaging System using Digital Signal Processors

高光赫* · 權義奭* · 金治寧** · 金侏政** · 金相默* · 安昌範***
(K. H. Ko · E. S. Kwon · C. Y. Kim · H. J. Kim · S. M. Kim · C. B. Ahn)

Abstract - In this paper, we develop a TMS320C31 (60MHz) digital signal processor (DSP) board to synthesize gradient waveforms for Spiral Scan Imaging (SSI), which is one of the ultra fast magnetic resonance imaging (MRI) methods widely used. In SSI, accurate gradient waveforms are very essential to high quality magnetic resonance images. For this purpose, sampling rate for synthesizing the gradient waveforms is set twice as high as the data sampling rate. With the developed DSP boards accurate gradient waveforms are obtained. Ultra fast spiral scan imaging with the developed DSP board is currently under development.

Key Words : Spiral Scan Imaging(SSl), Digital Signal Processor(DSP), Magnetic Resonance Imaging(MRI), Ultra Fast MRI, Waveform Synthesizer

1. 서 론

최근 들어 자기공명영상(magnetic resonance imaging : MRI) 분야에서는 구조적인 영상뿐만 아니라, 기능적인 영상을 얻을 수 있는 초고속 영상이 주목을 받고 있다. 초고속 영상이란 기존의 수 초에서 수 분대에 이르는 자기공명영상 측정시간을 수십 ms에서 수백 ms 이내로 단축시키는 방법으로서, 빠르게 반전하는 경사자계를 이용하여 전 공간주파수 데이터를 한번의 rf (radio frequency) excitation으로 얻는 방법이다 [1-3]. 나선 주사 영상(Spiral Scan Imaging: SSI) 기법은 k-space에서 데이터를 얻을 때 그리는 궤적이 나선 모양으로써 와전류의 영향이 작고, flow에 의한 위상이 refocusing 되며, 균일한 분포의 T₂ 감쇄 영향을 받는 등 많은 실험적인 장점을 가지고 있다 [2, 4]. 나선 궤적을 만들기 위해서는 경사자계를 사다리꼴 모양으로 인가하는 기존의 방법과는 달리 연속으로 증가하면서 진동하는 경사자계를 인가하여야 한다. 경사자계의 파형을 정확하게 인가하는 것은 좋은 영상을 획득하는데 중요한 요소가 된다. 기존의 일반적인 스펙트로미터(spectrometer)는 복잡한 파형의 실시간 계산이 불가능하며, 메모리 용량의 한계로 나선 주사 영상과 같은 초고속 영상을 위한 정밀한 경사자계의 파형을 구현하는 데 문제점이 많았다. 본 연구에서는 초고속 영상에 필요한 정밀한 경사자계를 만들기 위하여, 기존의 일반적인 스펙트로미터에 추가적으로 복잡한 경사자계 파형을 실시간으로 계산할 수

있는 전용 DSP 보드를 제작하였다. DSP를 이용한 파형발생기는 스펙트로미터에서 발생하는 트리거 신호에 동기를 맞추어 동작하게 함으로써, 기존의 스펙트로미터의 하드웨어 변형없이 초고속 영상 기능을 추가할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 2 장에서 나선 주사 영상 기법을 소개하고, 3 장에서는 기존 스펙트로미터의 문제점과 나선 주사 영상의 경사자계 파형을 만들기 위하여 제작한 DSP 보드를 기술하였다. 4 장에서는 제작한 DSP 보드로 경사자계 파형의 출력을 측정하고, 정밀한 경사자계 파형 계산을 위한 digital-to-analog (D/A) 컨버터의 동작을 기술하였고, 마지막으로 5 장에서 결론을 맺었다.

2. Single-Shot 나선 주사 영상

나선 주사 영상은 초고속 자기공명영상기법으로 Echo Planar Imaging (EPI) [1]과 함께 가장 잘 알려진 Gradient 에코 영상기법 중의 한 종류이다. 두 개의 증가하면서 진동하는 경사자계를 사용하여 주파수 영역에서 한 번의 스캔으로 전체 영역을 커버할 수 있다. 특히 기존의 EPI와는 달리 균등한 방향의 T₂ blurring을 갖는 장점이 있다. 두 개의 경사자계를 만들기 위한 k-space에서의 나선 궤적은 아래의 식으로 주어진다 [2].

$$\begin{aligned}k_x(t) &= \gamma \cdot a \cdot t \cdot \cos(b \cdot t) \\k_y(t) &= \gamma \cdot a \cdot t \cdot \sin(b \cdot t)\end{aligned}\quad (1)$$

여기에서 γ 는 gyromagnetic ratio이고, a 와 b 는 나선 궤적의 radial 방향의 확장속도와 각속도를 결정하는 상수으로써 재구성하려는 영상의 픽셀 크기에 따라 Nyquist 샘플링 이론에 의하여 결정된다. 이러한 궤적을 얻기 위하여 인가하는 경사

* 準 會 員 : 光云大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 光云大 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 光云大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 10月 22日

最終完了 : 1999年 11月 30日

자계는 식 (1)로부터 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} G_x(t) &= a \cdot \cos(b \cdot t) - a \cdot b \cdot t \cdot \sin(b \cdot t) \\ G_y(t) &= a \cdot \sin(b \cdot t) + a \cdot b \cdot t \cdot \cos(b \cdot t) \end{aligned} \quad (2)$$

나선 주사 영상 파라미터를 설정하기 위하여, 나선 궤적에서 회전 횟수를 N_r , 한 회전 당 샘플링 수를 N_θ 로 정의하고 시간영역에서의 샘플링 구간을 ΔT 라 하면, Nyquist 샘플링 이론에 의하여

$$\begin{aligned} a &= \frac{\pi}{\gamma N_\theta N_r \Delta T \Delta r} \\ b &= \frac{2\pi}{N_\theta \Delta T} \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다. 여기에서 Δr 은 재구성 영상에서의 픽셀 크기이다. 회전 방향으로 등각 샘플링을 할 경우 1차원 Fourier 보간을 거쳐 filtered backprojection으로 재구성이 가능하다 [5-6]. 나선 주사 영상에서의 N_r 및 N_θ 는 재구성하려는 영상의 matrix 크기 ($N \times N$)로부터 아래와 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} N_r &= \frac{N}{4} \\ N_\theta &= N \cdot \pi \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 전체 데이터 측정시간은 다음과 같이 주어진다.

$$T_D = N_r N_\theta \Delta T \approx T_2 \quad (5)$$

3. DSP 보드 디자인

자기공명영상시스템은 강력한 외부자장에 의하여 정렬된 인체내부의 spin 들에 rf와 경사자계를 적절히 인가함으로써 단층 영상을 얻게 된다. 스펙트로미터는 자기공명영상시스템에서 rf와 경사자계의 파형 인가 및 데이터 수집 시간 등을 제어한다. 이를 위해서 스펙트로미터는 기본적으로, rf 및 경사자계의 파형과 인가 시간 등을 미리 계산하여 메모리에 저장해 놓은 후 lookup table 방식으로 각 축에 대한 파형을 출력하도록 만들어져 있다. 측정시간이 수십초에서 수분정도 소요되는 기존의 일반적인 Fourier 영상의 경우, 영상 단면 선택을 위한 sinc 함수 모양의 rf 파형을 메모리에 저장하며 (약 200 - 300 포인트), 사다리꼴 모양의 경사자계는 파형이 비교적 단순하여 실시간으로 계산하거나 counter 등을 사용하여 구현하고 있다. 반면에 초고속 나선 주사 영상 (측정시간: 100-200ms) 에서는 한번의 rf excitation으로 모든 k-space 데이터를 측정하여야 하므로 측정 데이터 양이 일반적인 영상에 비하여 32-64 배 정도 증가하고, 데이터를 측정하는 동안 계속해서 선형적으로 증가하면서 진동하는 경사자계를 가하여야 한다. 나선 주사 영상에서 선형적으로 증가하면서 진동하는 경사자계는 동일한 파형이 반복적으로 가해지는 EPI와 달리 구현에 어려움이 많다. 대부분의 스펙트로미

터에서는 식 (2)와 같이 주어지는 파형의 방정식이 복잡하여 실시간으로 계산이 어렵고, 메모리가 한정되어 있어 저장할 수 있는 파형의 크기에 제한이 있다. 예를 들어, 얻고자 하는 영상의 matrix 크기가 128×128 일 때, 13000 여 점의 데이터를 측정하여야 하며 이 때 경사자계를 충분히 정확하게 인가하기 위해서 한 측정 데이터 간격 당 두 개의 경사자계 데이터를 출력한다고 가정할 경우 약 26000 여 점의 경사자계 데이터가 필요하게 된다. 이러한 크기의 경사자계 파형 데이터는 기존의 일반적인 스펙트로미터에서는 저장이 불가능하다. 본 논문에서는 경사자계 파형의 실시간 계산과 출력을 할 수 있는 전용 DSP 보드의 제작을 통해 이러한 문제점들을 해결하였다.

3.1 경사자계 파형 계산을 위한 DSP 성능 분석

제작한 DSP 보드는 경사자계 파형을 구현하기 위하여 기존의 스펙트로미터가 사용한 lookup table 방식 대신에 식 (2)를 실시간으로 계산하였다. 실시간 계산은 전체 파형의 값을 미리 계산하여 저장하는 대신에 계산식을 프로그래밍하여 DSP 보드 내의 D/A 컨버터의 한 출력 간격 사이 시간에 다음 파형의 값을 계산하여 원하는 파형을 지연없이 출력한다. 따라서 사용하고자하는 D/A 컨버터의 샘플링 간격과 그 시간 동안에 DSP가 수행해야할 계산량에 대한 정확한 분석이 필요하다. 경사자계 발생기의 프로세서로 Texas Instruments (TI)에서 만든 TMS320C31 범용 DSP를 사용할 경우 경사자계 파형을 실시간으로 출력하기 위하여 소요되는 계산량을 표 1에 나타내었다. 표 1에서 보면, 파형의 한 점을 계산하는데 걸리는 명령 사이클 수는 83이다. 여기에 DSP가 프로그램을 실행할 때 발생하는 파이프라인 충돌 때문에 발생하는 명령어 수행의 지연과 D/A 컨버터의 접근 시간과 인터럽트 시간을 고려하였을 때 DSP 보드에서 경사자계 파형의 한 점을 출력하는 데 걸리는 전체 명령 사이클 수는 표 2에 보인 것과 같이 112 사이클이 된다. 디자인한 DSP 보드에는 128K

표 1 경사자계 파형의 한 점을 계산하는데 소요되는 명령 사이클 수

Table 1 Number of instruction cycles required for calculating one-point gradient waveform

계산 내용	명령 사이클 수
$b \cdot t \rightarrow bt$	1
$\cos(bt)$	31
$\sin(bt)$	33
$a \cdot \cos(bt)$	1
$a \cdot bt \rightarrow abt$	1
$abt \cdot \sin(bt)$	1
$a \cdot \cos(bt) - abt \cdot \sin(bt)$	1
레지스터 보존	1
데이터 이동 및 출력	13
합 계	83

표 2 경사자계 파형의 한 점을 출력하는데 필요한 명령 사이클 수

Table 2 Total number of instruction cycles for one-point gradient waveform output

동작 내용	명령 사이클 수
1 점 계산 루틴	98
인터럽트 루틴 시작	9
확장 메모리 기록시 추가 사이클	0
D/A 컨버터 접근 시간	5
합계	112

-word의 확장 메모리를 가지고 있지만 계산시간을 최소화하기 위하여 프로세서의 내부 메모리를 사용하여 확장 메모리 기록시 요구되는 추가 사이클의 발생을 막았다. 나선 주사 영상에서 샘플링 구간을 $10\mu s$ (전체 데이터 측정 시간 : 130ms)로 하고, 정확한 경사자계의 인가를 위한 디지털 경사자계 파형의 샘플링 구간을 $5\mu s$ 로 할 때 DSP가 한 점의 경사자계를 출력하는데 걸리는 시간은 50 MHz의 TMS320C31을 사용하였을 경우 $112 \text{ 사이클} \times 40ns = 4.48\mu s$ 이며, 60 MHz의 프로세서를 사용하였을 경우 $112 \text{ 사이클} \times 33.3ns = 3.73\mu s$ 이다. 두 가지 프로세서 모두의 경우 한 점 계산에 걸리는 시간이 경사자계의 샘플링 구간인 $5\mu s$ 이하로 합당하지만, 본 논문에서는 계산시간에 여유를 가지고, 또한 데이터 샘플링 구간을 $8\mu s$ (경사자계 샘플링구간 : $4\mu s$)로 줄일 때를 대비해서 60 MHz의 DSP를 선택하였다.

3.2 DSP 보드 구현

그림 1은 DSP 보드의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1에서 보듯이 DSP 보드에 장착한 프로세서는 실시간 구현을 위하여 Texas Instruments (TI)사의 TMS320C31 (60 MHz)을 사용하였다 [7]. 이 프로세서는 부동소수점 방식의 DSP로서 사용하는 클럭에 따라 최대 80 MFLOPS (mega floating-point operations/s)의 연산능력을 가진다. 내부에 2K-word의 RAM과 64-word의 캐시 메모리를 가지고 있으며 DMA (direct memory access) 컨트롤러와 직렬 입출력 포트를 각각 한 개씩 내장하고 있다. 부가적으로 128K-byte의 ROM을 부착하여 프로그램을 보존할 수 있도록 하였고, TMS320C31의 내부 RAM 이외에 zero wait access를 할 수 있는 접근시간이 12 ns인 128K-word의 외부 SRAM을 추가하였다. 또한, DSP와 컴퓨터 간의 시리얼 통신을 위하여 USART (universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter)와 RS-232 drivers/receivers를 장착하여 DSP에서 계산한 결과를 컴퓨터에서 확인할 수 있도록 하였다. DSP 보드에서 계산된 값들을 경사자계 증폭기의 입력으로 인가하기 위한 아날로그 신호로 변환하기 위하여 변환시간이 $10\mu s$ 인 12bit D/A 컨버터를 사용하였으며 D/A 컨버터의 정확한 외부 참조 전압을 위해 정전압회로를 추가하였다. 주변장치와 DSP 사이의 인터페이스를 위한 디코더 회로와 8251에 필요한 클럭 분주 회로 등을 만들기 위한 논리회로를 FPGA를 사용하여 구현하였으며, 설계된 DSP 보드는 6층 PCB로 제작하였다 [8, 9].

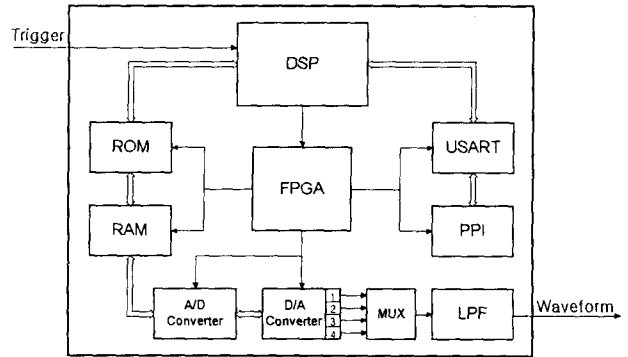


그림 1 DSP 보드의 구조
Fig. 1 Architecture of the DSP board

3.3 경사자계 파형 발생 프로그램

그림 2는 경사자계 파형 발생을 위한 프로그램의 동작 순서도를 나타낸 것이다. 구현된 프로그램은 처음 리셋 후, DSP 보드의 TMS320C31에 내장되어 있는 두 개의 타이머 중 한 개를 $5\mu s$ 마다 인터럽트가 걸리도록 초기화를 한 후, 타이머 인터럽트를 enable시키는 트리거 신호를 기다린다. 스펙트로미터로부터 트리거 신호가 입력되어 타이머 인터럽트가 enable 되면 $5\mu s$ 마다 인터럽트 서비스 루틴을 호출하고 이 인터럽트 서비스 루틴에서 경사자계 파형의 한 점을 실시간으로 계산하여 D/A 컨버터로 출력한다. X축과 Y축의 경사

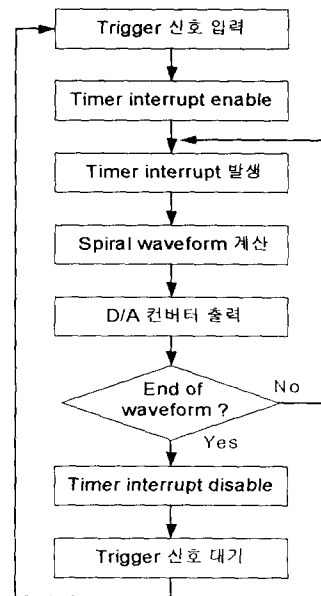


그림 2 경사자계 파형 발생을 위한 프로그램의 순서도
Fig. 2 Flow chart of the program for gradient waveform synthesizer

자계를 만들기 위하여 두 개의 DSP 보드는 이 과정을 지정한 샘플 수만큼 반복 실행하며 파형의 출력이 모두 끝나면 인터럽트를 disable 시킨 후 다음 트리거 신호를 기다리게 된다.

4. 실험 및 결과

제작한 DSP 보드로 나선 궤적을 출력하는 프로그램을 TMS320C31 어셈블리어로 작성하였다[10]. 프로그램 개발은 Windows NT 4.0에서 Visual C++ 6.0을 이용한 다운 로더 프로그램을 작성하여, PC에서 프린터 포트를 통해 DSP 보드로 경사자계 발생 프로그램을 다운 로드시켜 수행하였다. 최종적으로 완성된 프로그램은 EPROM에 저장하여 전원을 켜면 실행 프로그램이 동작할 수 있도록 하였다. 제작된 경사자계 파형 발생기는 그림 3과 같다. 경사자계 파형 발생기는

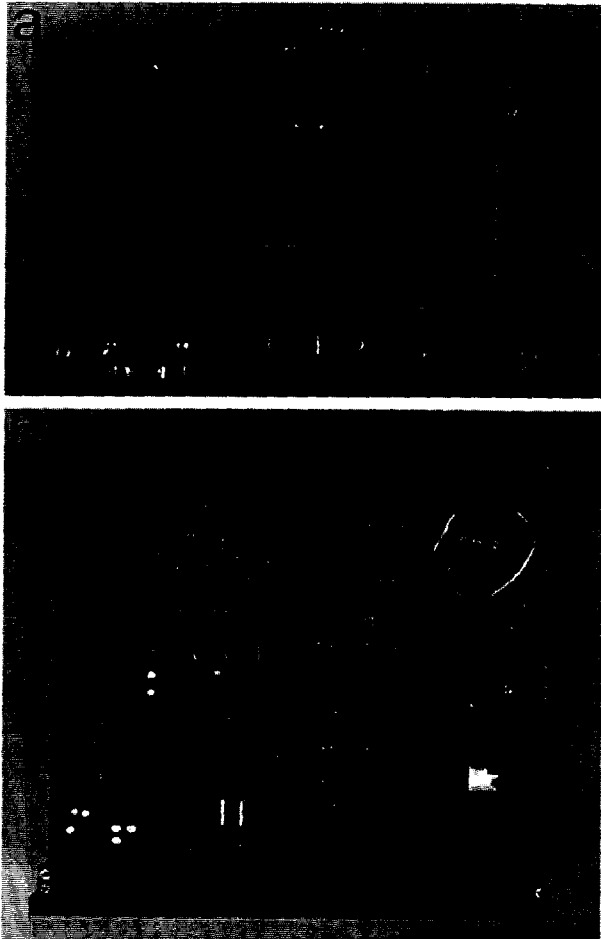


그림 3 제작된 DSP 보드를 이용한 파형 발생기
(a) DSP 보드 (b) DSP 보드 2장, 인터페이스, 전원으로 구성된 경사자계 파형 발생기

Fig. 3 Photograph of the gradient waveform synthesizer using the DSP board
(a) DSP board (b) Waveform synthesizer composed of two DSP boards, interface circuits, and power supply.

X축과 Y축의 경사자계를 만들기 위한 두 장의 DSP 보드와 트리거 수신회로 및 경사자계 파형 출력시 사용한 멀티플렉서와 저역통과필터 등을 포함한 인터페이스 보드, 그리고 전원으로 구성되어 있다. 그림 4는 나선 주사 영상을 위한 펄스

스 시퀀스이다. 실험에서 영상의 matrix 크기는 128×128 이고, 샘플링 간격은 $10\mu s$ 로 하였다. 그림 4에서 보였듯이 두 개의 DSP 보드는 스펙트로미터로부터 트리거 신호를 동시에 입력받는다. 트리거 신호를 받게되면 각 DSP 보드는 $5\mu s$ 마다 경사자계 파형을 실시간으로 계산하여 D/A 컨버터를 통하여 $G_x(t)$ 및 $G_y(t)$ 를 출력하게 된다. 2차원 영상 단면 선택을 위한 $G_z(t)$ 및 rf 파형, 그리고 데이터 측정용 기존의 스펙트로미터를 이용하였다. 제작한 DSP board의 D/A 컨버터의 변환시간이 $10\mu s$ 이기 때문에 $5\mu s$ 의 샘플링 간격을 만족시키기 위하여 D/A 컨버터가 가지고 있는 독립적인 네 개의 채널을 사용하였다. 즉 처음 타이머 인터럽트가 걸리면 D/A 컨버터의 채널 1에 계산된 값을 내보낸다. 그리고 $5\mu s$ 의 실험은 카톨릭의대의 Magnum 3.0 Tesla 전신 자기공명영상 시스템에서 수행하였다. 그림 5는 나선 주사 영상 실험을 위한 인터페이스 화면이다. 실험 인터페이스 화면에서는 원

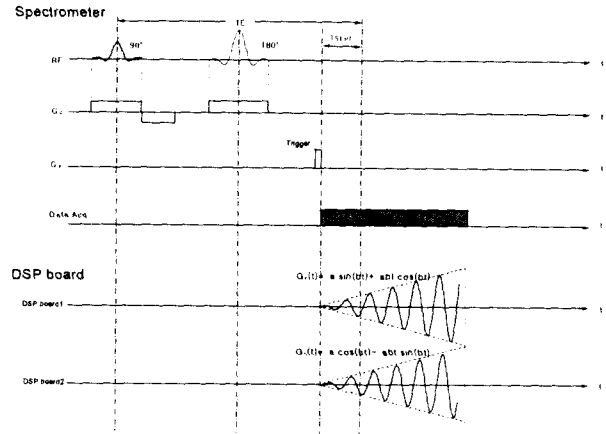


그림 4 나선 주사 영상 pulse sequence
Fig. 4 Pulse sequence for the spiral scan imaging

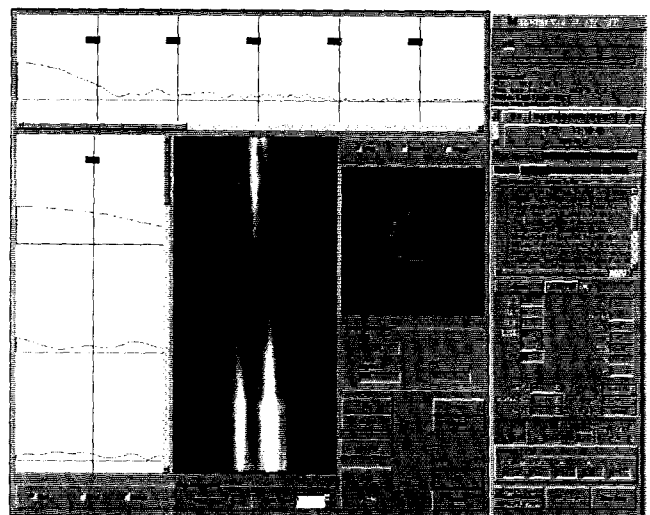


그림 5 3.0 Tesla MRI 시스템에서 나선 주사 영상을 위한 실험 화면
Fig. 5 User interface for the spiral scan imaging at 3.0 Tesla whole body MRI system

하는 영상 기법을 선택할 수 있고, 영상 단면의 위치 및 각도 선택, rf 이득, 수신기 이득, 에코 시간 등의 주요 실험 파라미터들을 입력할 수 있다. 또한 측정된 에코 신호 및 sinogram, 재구성된 영상들을 볼 수 있다. 나선 주사 영상을 선택하여 실험을 시작하면, 일반적인 자기공명영상 실험과 달리 스펙트로미터는 rf 파형과 $G_x(t)$ 및 데이터 측정을 제어하고, $G_x(t)$ 및 $G_y(t)$ 의 파형 대신에 트리거 펄스를 발생시킨다. DSP 보드는 스펙트로미터의 트리거 신호를 받아서 $G_x(t)$ 및 $G_y(t)$ 파형을 출력한다. 스펙트로미터와 파형 발생기에서 만들어진 파형들은 rf 증폭기와 경사자계 증폭기

를 거쳐 MRI 샘플에 가해지며 이러한 pulse sequence에 의하여 얻어지는 에코 신호는 재구성 과정을 거쳐 영상으로 디스플레이된다 [5,6]. 그림 6은 제작된 DSP 보드를 이용한 경사자계 파형 발생기에서 출력되는 파형을 오실로스코프(텍트로닉스, TDS 360)로 측정한 파형이다. 그림 6의 파형은 수식 (2)로 정의되는 나선 주사 영상의 경사자계 파형과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 나선 주사 영상 기법에서 사용되는 경사자계 파형을 발생시키기 위한 DSP 보드를 제작하였다. 나선 주사 영상과 같은 초고속 자기공명영상기법을 기존의 일반적인 스펙트로미터로 구현하는데는 메모리 한계와 실시간 계산의 어려움으로 인하여 제한이 많았다. 따라서, 본 논문에서는 전용 DSP 보드를 제작하여 경사자계 파형을 실시간으로 계산하여 출력함으로써 기존의 일반적인 스펙트로미터로도 나선 주사 영상 등과 같은 초고속 영상이나 복잡한 경사자계 파형을 갖는 영상 기법을 구현할 수 있도록 하였다. 제작된 DSP 보드는 스펙트로미터에서 발생하는 트리거 신호에 동기를 맞추어 동작하게 함으로써 기존의 스펙트로미터의 하드웨어 변형없이 손쉽게 인터페이스가 가능하도록 하였다. 개발된 DSP 보드를 이용한 경사자계 파형 발생기는 5 μ s 당 한 점의 경사자계를 계산하여 출력할 수 있으며, 이러한 성능은 나선 주사 영상 등과 같은 초고속 영상 기법 사양을 충분히 만족하고 있다. 현재 3.0 Tesla 전신 자기공명영상 시스템에서 개발된 경사자계 파형 발생기를 이용하여 나선 주사 영상 기법의 개발이 진행중이다.

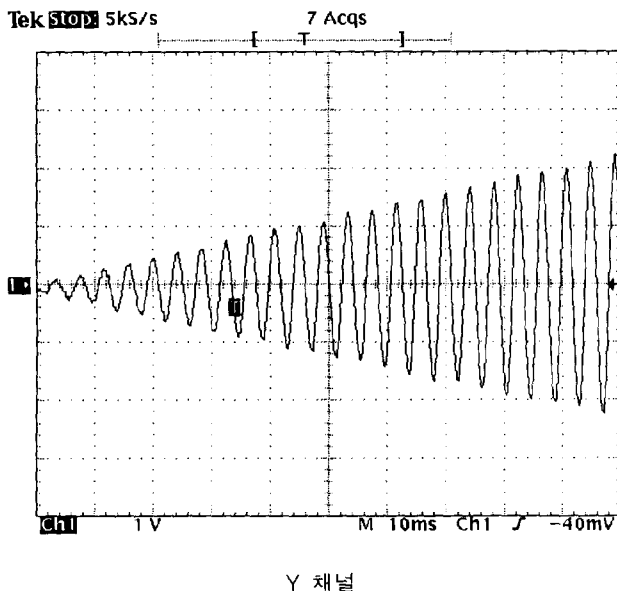
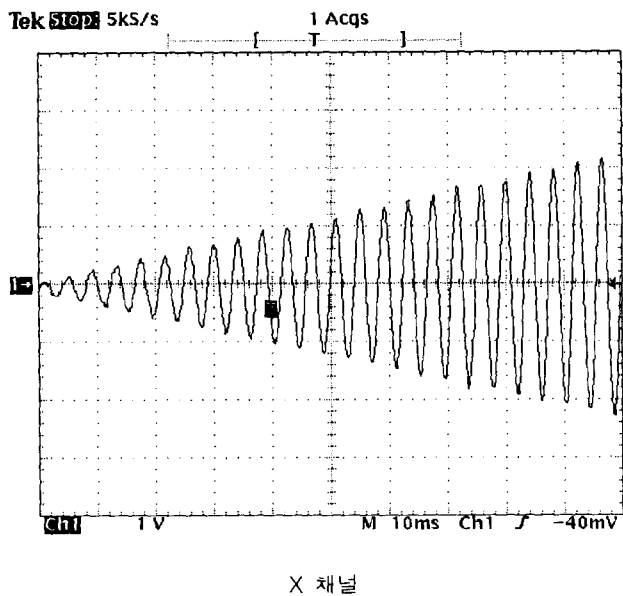


그림 6 제작된 파형 발생기에서 출력된 X, Y 축의 경사자계 파형

Fig. 6 Gradient waveforms from the developed synthesizer for X and Y gradient coils

참 고 문 헌

- [1] P. Mansfield, "Multi-planar image formation using NMR spin echoes," J. Phys. C, vol. 10, pp. 155-158, 1977.
- [2] C.B. Ahn, J.H. Kim, and Z.H. Cho, "High-speed spiral-scan echo planar NMR imaging-I," IEEE Tans. Med. Imag., vol. 5, pp. 1-6, 1986.
- [3] C.H. Meyer, B.S. Hu, D.G. Nishimura, A. Macovski, "Fast spiral coronary artery imaging," Magn. Reson. Med., vol. 2, pp. 202-213, 1992.
- [4] D.G. Nishimura, P. Irarrazabal, C.H. Meyer, "A velocity k-space analysis of flow effects in echo planar and spiral imaging," Magn. Reson. Med., vol. 33, pp. 549-556, 1995.
- [5] C.B. Ahn, H.J. Kim, C.H. Oh, and C.Y. Kim, "Reconstruction aspects of spiral scan magnetic resonance imaging," SPIE. vol. 3336, pp. 141-152, 1998.
- [6] 안창범, 김휴정, 오창현, 김치영, "DC offset을 보정한 나선 주사 초고속 자기공명영상의 재구성 알고리즘," 의공학회지, vol. 19, pp. 243-250, 1998.

[7] TMS320C3x User's Guide, Texas Instruments, 1996.
 [8] 윤덕용, TMS320C31 마스터, Ohm사, 1998.
 [9] W.W. Smith and J.M. Smith, Handbook of real-time Fast Fourier Transforms, IEEE Press, New York, 1995.

[10] TMS320C3x/C4x Assembly Language Tools, Texas Instruments, 1996.

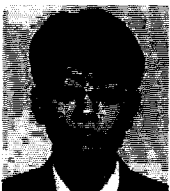
저 자 소 개



고 광 혁(高光赫)
 1972년 1월 7일 생. 1998년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 광운대 대학원 전기공학과 석사 과정
 E-mail : khko@explore.kwangwoon.ac.kr



김 휴 정(金侏政)
 1971년 9월 19일 생. 1996년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정
 E-mail : xcalibur@explore.kwangwoon.ac.kr



권 의 석(權義奭)
 1972년 8월 20일 생. 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 E-mail : miette4@explore.kwangwoon.ac.kr



김 상 묵(金相默)
 1973년 3월 1일 생. 1999년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 E-mail : ksm99@explore.kwangwoon.ac.kr



김 치 영(金治寧)
 1971년 12월 11일 생. 1995년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정
 E-mail : cykim@explore.kwangwoon.ac.kr



안 창 범(安昌範)
 1958년 4월 16일 생. 1981년 서울대 전자공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공학). 1986~1991년 Univ. California, Irvine 조교수. 1991~1992년 생산기술연구원 부교수. 1992년~현재 광운대학교 전기공학과 부교수. 1989년 미국의학물리학회 최우수 논문상(Sylvia Sorkin Greenfield Award) 수상
 Tel : 02-940-5148, Fax : 02-909-3159
 E-mail : cbahn@daisy.kwangwoon.ac.kr