
BLDC 서보 모터 펌프를 이용하는 직동력(PBW) 구동시스템의 DSP 제어기 및 구동기 설계

주재훈* · 심동석** · 최중경***

Design of a DSP Controller and Driver for the Power-by-wire(PBW) Driving System
Using BLDC Servo Motor Pump

Jae Hun Joo* · Dong Seouk Sim** · Jung Keyng Choi***

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21사업」의 지원비를 받았음
이 논문은 2009~2010년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

요 약

본 논문은 BLDC 서보모터 펌프를 사용하는 PBW(power-by-wire) 시스템을 위한 DSP(Digital Signal Processor) 제어기에 대한 연구를 제시한다. PBW 유압 액츄에이터는 BLDC 서보모터에 의해 구동되는 유압펌프와 유압 실린더 그리고 제어기로 구현된다. 이 PBW 시스템은 유압 실린더의 선형 추진 동작을 위해 서보 모터의 속도 제어를 필요로 한다. 본 논문에서는 벡터 제어 방법과 MIN-MAX PWM 기술을 활용하는 서보 제어기를 구현한다. 제어기로서, PWM 파형발생기, A/D변환기, SPI(직렬인터페이스) 포트 그리고 많은 입/출력 포트 등을 가지고 있는 이유로 TMS320F2812 DSP가 채택되었다.

ABSTRACT

This paper presents a study on the DSP(Digital Signal Processor) controller for the PBW(power-by-wire) system using BLDC(Brushless Direct Current) servo motor pump. The PBW hydraulic actuator was realized with hydraulic pump driven by BLDC servo motor, hydraulic cylinder and controller. This PBW system needs speed control of servo motor for linear thrust action of hydraulic cylinder. This paper implements a servo controller with vector control algorithm and MIN-MAX PWM technique. As CPU of a controller, TMS320F2812 DSP was adopted because it has PWM waveform generator, A/D converter, SPI(Serial Peripheral Interface) port and many input/output port etc.

키워드

서보모터펌프, 제어기, PBW 유압액츄에이터, 벡터제어

Key word

DSP, BLDC, PBW, PWM

* 정회원 : 창원대학교 공과대학 전자공학과
** 정회원 : 대영산전(주)
*** 정회원 : 창원대학교 (교신저자, cjk@changwon.ac.kr)

접수일자 : 2011. 02. 08
심사완료일자 : 2011. 03. 01

I. 서 론

항공기를 전기적으로 제어하는 기술인 **More-Electric (ME)** 기술이 이제 연구단계에서 벗어나 항공기에 실제 실현되고 있다. 특히 비행조종기술에 있어 가용성 및 정비성의 증대, 항공기 중량과 지상정비 시간의 단축 등과 같은 장점을 얻기 위해서 기존의 유압식 작동방식을 직동력(PBW, Power-by-wire)방식으로 진보시키는 많은 기술들이 개발되고 있다.

초기 항공기는 각 조종면을 움직이기 위해 필요한 유압을 공급해야 하고, 이를 위해 항공기 내부에 고압의 유압배관을 복잡하게 설치하여 이용해 왔다.

직동력 방식의 목적은 작동기에 전기동력을 이용하는 유압 펌프를 직접 제공함으로써 유압라인과 이와 관련된 위험요소를 획기적으로 줄이거나 제거하는데 있다. 직동력 기술의 제품이 바로 직동력 고응답 액추에이터이다. 이러한 직동력 고응답 액추에이터의 지능화, 소형화, 경량화를 이루기 위해서는 본 연구 대상인 **BLDC** 서보전동기 제어 기술이 필수적이다.

먼저 제어 대상 시스템인 **BLDC** 펌프 모터에 대하여 고전적인 벡터기법을 적용하여 전류제어가 용이한 수학적 모델 식을 얻기 위해 그림 2의 좌표축 관계를 설명한다.

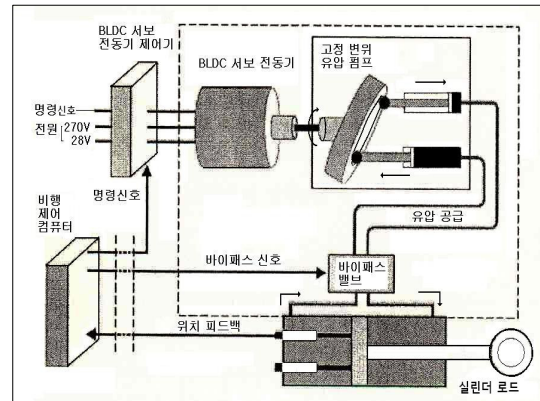
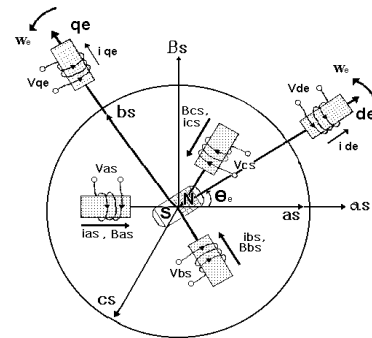


그림 1. 직동력 고응답 액추에이터의 구성
Fig 1. Composition of PBW high response actuator

II. 직동력 고응답 액추에이터의 구조 및 BLDC 서보모터의 등가 표현식

직동력 고응답 액추에이터는 유압 펌프, 서보모터, 유압 실린더, 스트로크 센서(거리 센서) 등을 일체화 한 액추에이터부와 모터앰프, 센서앰프의 제어기부로 나누어진다. 제어기는 지령 신호와 스트로크 센서로부터의 피드백 신호를 연산하고, 모터의 회전속도에 상당하는 새로운 지령신호를 모터 앰프로 출력한다. 실린더의 동작은 그림1과 같이 모터의 회전 속도와 회전 방향의 전환에 의하여 이루어지며, 이로 인해 펌프의 토출 유량이 제어되어 직선 서보기구를 실현한다.

조종면에 필요한 변위와 속도 그리고 힘은 유압 펌프 및 매니폴드에 장착된 밸브에 의하여 조절되는 구성으로서, 유압 펌프의 회전 방향에 의하여 유압 액추에이터가 전·후진하며, 유압 액추에이터의 정지는 바이패스 밸브에 의하여 행해진다. 서보모터의 회전속도 변화에 따라 유압펌프의 송출량이 변하게 되고 이에 의해 유압 액추에이터의 전·후진 속도가 변하게 된다.



as-bs-cs : Y 또는 Δ 결선된 3상의 고정자 자계 좌표축
as-βs : 2상의 직각 고정자 자계 좌표축
de-qe : 회전자와 동기된 속도로 회전하는 2상 직각 좌표축

그림 2. 3상 고정자 좌표계와 2상 동기 회전좌표계의 관계
Fig 2. Relationships between 3-phase stator coordinate frame and 2-phase rectangular rotating frame

먼저 3상 고정자 좌표계(as-bs-cs)와 2상 직각 동기회전좌표계(de-qe)의 관계 그리고 각 좌표계에서의 등가 코일 형상과 합성 벡터의 모습을 위 그림에 보인다. 여기서 회전자 영구자석 자계가 2축 동기회전좌표계의 de축

과 일치된 있음을 주목해야 한다. 3상 좌표계의 음의 축 방향으로 3개의 전자석 코일을 배치한 것은 Y 결선된 고정자 코일에 전류를 인가해 자계를 발생시킬 때의 모양을 형상화하기 위한 것이다. 3상의 전자석 각각에 120도 위상 차를 갖는 같은 진폭의 교류를 인가하면 회전하는 일정한 크기의 합성자계가 만들어 진다.

이 그림 2에서 보면, 실제 고정자에 인가되는 전원은 3상의 서로 120도 위상차를 갖는 전압, 전류이지만 타여자 직류전동기와 같은 특성을 갖게 하기 위해 한 축(qc 축)이 회전자 영구자석 자계와 직각을 유지하면서 회전자와 같은 속도로 회전하는 2상의 직각 동기회전축을 제안하고, 이 직각 축 상에서 토크발생 전류(iqe)를 계산한 후 다시 이를 구현할 수 있는 3상 전류를 만드는 것이 BLDC 전동기의 벡터제어 임을 알 수 있다. 그리고 이러한 동기 회전좌표계의 변환에 의해 다음과 같이 직류 전동기와 유사한 표현식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{qe} \\ \dot{i}_{de} \\ \dot{\omega}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{\omega_e L_d}{L_q} - \frac{\Psi_F}{L_q} \\ \frac{\omega_e L_q}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ \frac{3}{2} (P)^2 \frac{\Psi_F}{J} & 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qe} \\ i_{de} \\ \omega_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{qe} \\ v_{de} \\ -\frac{P}{J} T_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

(P: 극 쌍수, ω_e : 전기적 각속도)

$$\begin{cases} v_{de} = v_{de}' - \omega_e L_q i_{qe} \\ v_{qe} = v_{qe}' + \omega_e L_d i_{de} + \omega_e \Psi_F \end{cases} \quad (2)$$

위식의 v_{de} , v_{qe} 는 기본적인 전류제어기 입력 (v_{de}' , v_{qe}')에 각 상 방향으로의 간섭 항을 제거하기 위한 보상 항이 첨가된 비간섭 제어입력이 포함된 전체 전류 제어 입력이 된다.

III. 회전자의 절대위치에 따른 θ_e 의 결정

BLDC 전동기에 벡터제어를 잘 적용하기 위해서는 변환 공식에 포함되어 있는 θ_e 의 정보가 필요하다. 그리고 이 정보는 레졸버 레환센서를 이용하여 얻어 진다. 레졸버를 이용하는 디지털 정류(commutation)동작은 레졸버의 SIN, COS 신호를 RDC(Resolver to Digital

Converter)가 처리하여 얻어지는 특정 비트(10비트~16비트) 분해능의 디지털 절대위치 신호(기계각 정보) 정보를 이용한다. 이 신호를 이용하여 모터의 회전자 영구자석 자계와 고정자인 전기자 합성자계와의 관계를 전기각 90도의 위상 차 관계를 갖도록 하는 것이다.

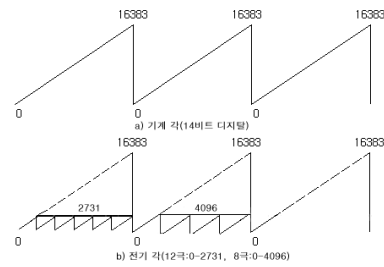


그림 3. 14비트 RDC를 통한 기계 각과 전기 각 검출
Fig 3. Calculation of a Mechanical Angle and Electrical Angle through a 14-bit RDC

이렇게 얻어진 θ_e 의 정보는 프로그램 상에서 sin, cos 함수를 호출하는데 사용되어 진다. 이 함수들은 적용 DSP 인 TMS320F2812 프로세서에 의해 제공되는 라이브러리에 의해 빠르게 연산된다.

그림 4는 레졸버를 이용하는 정류동작을 포함하는 전체 제어시스템의 블록도이다. 레졸버를 통해서 얻어진 위치 정보가 벡터제어를 위한 변환 공식과 속도제어를 위한 속도 정보로 제공되고 있음을 보이고 있다.

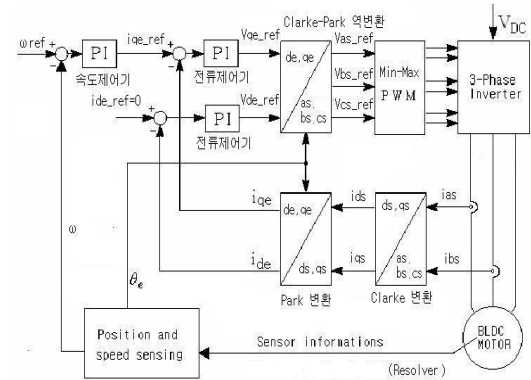


그림 4. 레졸버 정보를 이용하는 MIN-MAX PWM 및 벡터제어 블록도
Fig 4. Vector Control & MIN-MAX PWM block diagram using resolver information

IV. BLDC 전동기의 전류제어

전류제어 흐름을 살펴보면 전류제어의 시작은 먼저 상전류의 센싱과 RDC 값으로부터 회전자의 절대 위치 정보를 얻어내는 것으로부터 시작 된다. 이렇게 센싱된 정보를 이용해서 좌표변환과 PDFF(Pseudo Derivative Control with Feedforward Gain) 제어를 통해 최종적인 전압 지령인 v_{as}, v_{bs}, v_{cs} 가 만들어 진다.

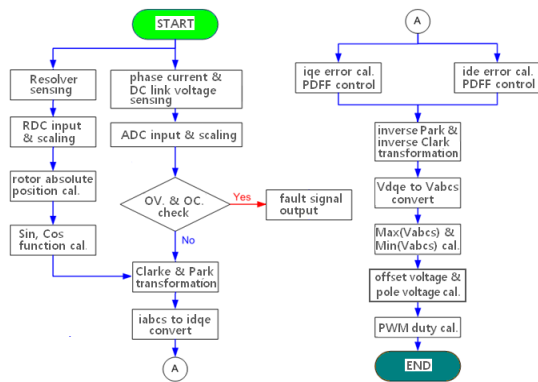


그림 5. 벡터제어와 MIN-MAX PWM 기법을 포함하는 전류제어 체계도

Fig 5. Current control flowchart including vector control and MIN-MAX PWM method

PDFF 전류제어 방법은 아래 식과 같이 전통적인 PI 제어 방식과 다르게 기준명령 신호와 출력 제한 신호 각자에 다른 비례 이득을 적용하는 방법이다. 이 제어 방법은 오버슈트 제거에 효과적이다[1].

$$u(s) = (K_i / s)e(s) + K_{pr}r(s) - K_{pf}y(s) \quad (3)$$

$e(s)$:오차, $r(s)$:기준 명령, $y(s)$:출력

$$V_{qe} = K_i \int (i_{qe_ref} - i_{qe_sen}) dt + K_{pr} \times i_{qe_ref} - K_{pf} \times i_{qe_sen}$$

$$V_{de} = K_i \int (i_{de_ref} - i_{de_sen}) dt + K_{pr} \times i_{de_ref} - K_{pf} \times i_{de_sen}$$

$$K_{pr} / K_{pf} \leq 1$$

K_{pr} : feedforward 이득, K_{pf} : feedback 이득 (4)

MIN-MAX PWM 제어기법은 PDFF 전류제어 출력인 v_{de}, v_{qe} 를 3상 전압 지령으로 변환한 v_{as}, v_{bs}, v_{cs} 값

에서 시작된다. 이 상 지령치 중 최대치와 최소치를 판별하여 옵셀(offset)전압을 계산한 후, 극(pole)전압을 결정하여 PWM 듀티를 계산한다. 이 방법을 통하여 3상 지령 전압 발생을 위한 3상 인버터의 각 브리지의 상하 스위치 온/오프 시간을 다른 브리지와 독립적으로 간단히 결정할 수 있다[2].

V. 성능 평가 결과 및 분석

본 연구를 통해 설계된 BLDC 서보모터 제어기의 전류, 속도제어 특성 실험과 이를 이용하는 직동력 액추에이터의 유압실린더 위치제어 결과를 다음과 같이 도시한다.

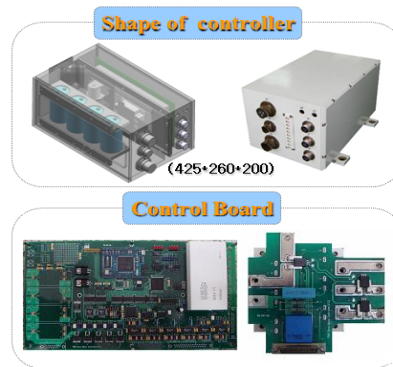


그림 6. DSP 제어보드, 인버터보드 및 전체 제어기 콘솔
Fig 6. DSP control board, inverter board and entire controller console

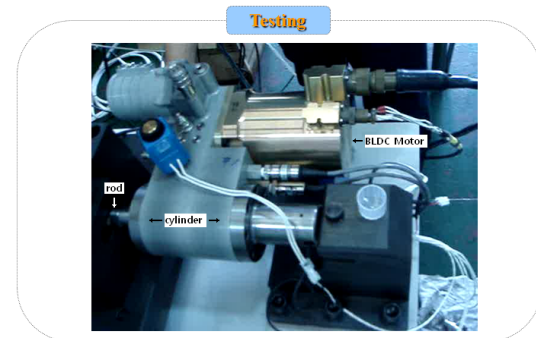


그림 7. 부하 시험 중인 액추에이터 시스템
Fig 7. Actuator system under the load testing

표 1. 전체 구현 시스템의 제원
Table 1. Overall realized system characteristics

중량	50 kg
액츄에이터 이동거리	± 50 mm
정격부하 시 액츄에이터 속도	80.72 mm/sec @ 10,700 kgf
액츄에이터 출력	8.46 kW
유지력(Stall force)	15,530 kgf
액츄에이터 위치정밀도	-0.070 ~ 0.050 mm
모터의 최대/정격 토크	17.7/12.7 Nm(9 kW)
모터의 최대/정격 속도	10,000/6,700 rpm
모터의 최대/정격 전류	110/90 A

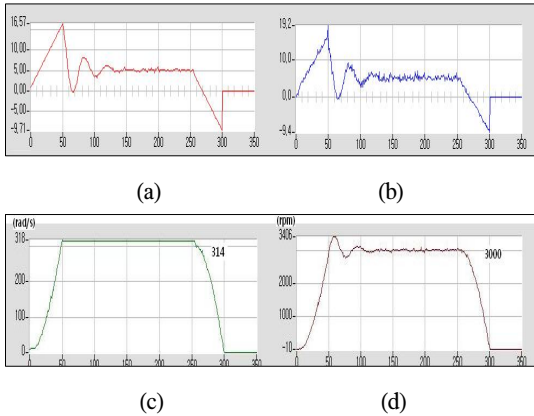


그림 8. 무부하 시 속도제어 및 전류제어 결과
(a) i_{qe_ref} (전류지령) (b) i_{qe_sen} (전류응답)
(c) ω_ref (속도지령) (d) ω (속도응답)
Fig 8. Result of speed and current control at no load
(a) i_{qe_ref} (reference) (b) i_{qe_sen} (response)
(c) ω_ref (reference) (d) ω (response)

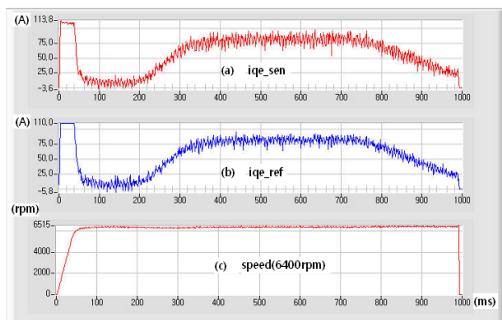


그림 9. 부하 시 순방향 속도 및 전류제어 결과
Fig 9. Results of speed & current control at rated load (CW direction)

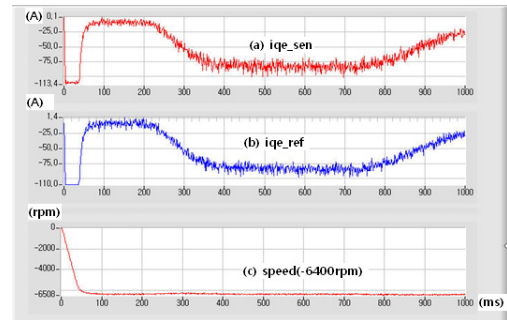


그림 10. 부하 시 역방향 속도 및 전류제어 결과
Fig 10. Results of speed & current control at rated load (CCW direction)

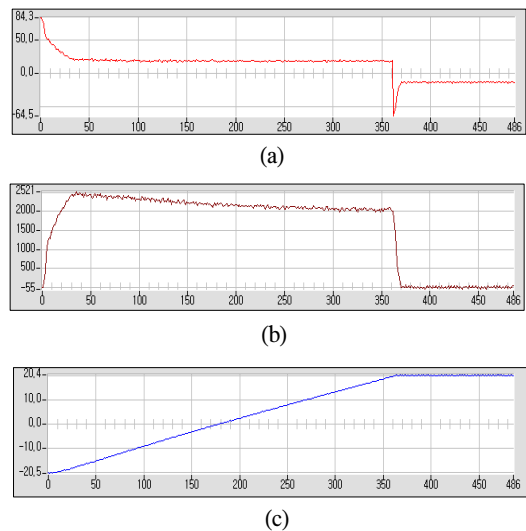


그림 11. 2000rpm 정속 회전 시 직동력 액츄에이터 제어결과. (a) i_{qe} (전류응답) (b) ω 속도응답
(c) LVDT 측정결과
Fig 11. Result of PBW actuator control at a time of rotation at 2000rpm. (a) i_{qe} (current response) (b) ω speed response (c) LVDT measured result

그림 8은 가감속 구간에 정현파 궤적을 채택한 사다리꼴 속도궤적 지령(최대치 3000rpm)에 대응하는 실제 속도 응답과 전류제어 결과를 보이고 있다. 무부하 특성이기 때문에 약간의 오버슈트와 낮은 정상상태 전류 특성을 보인다. 그림 9와 10은 초기에 6400 rpm 과 -6400 rpm 으로 속도 제어된 PBW 서보펌프 시스템에 0.2초 후 부하를 인가한 결과를 보여준다. 부하인가와 나중에 부

하 제거 시에도 안정한 속도제어 특성을 보여주고 있다. 실제로 부하인가시와 제거 시에 약 100rpm 정도의 감속 및 증속 특성이 발생하였으나 곧 지령치를 추정하는 결과를 보여주었다. 그림 상에서는 속도 축 값들이 6500 rpm 정도의 최고치 값 기준으로 표현되어 있어 이러한 변화를 감지하기는 어렵다.

그림 11은 BLDC 서보 전동기를 이용하여 유압실린더의 변위를 LVDT를 통해 측정된 결과를 보여준다. BLDC 서보 전동기를 2000 rpm으로 정속 회전하였을 때 전류 응답과 속도 응답을 볼 수 있으며 유압 실린더의 위치가 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서 고속 정밀 제어가 가능한 BLDC 서보 전동기를 이용하여 직동력 액츄에이터를 제어하기 위하여 백터제어 기법과 MIN- MAX PWM을 적용한 BLDC 전동기 제어시스템을 설계 하였다. 빠른 처리 속도와 ADC, PWM, SPI 등 많은 주변 장치를 내장하고 있는 DSP (TMS320F2812)를 사용하였고, 고속의 부동소숫점 연산을 가능케 해주는 Qmath 라이브러리를 사용하였다 [3]. BLDC 전동기의 정·역 회전 속도를 이용하여 유압 실린더의 위치를 제어함으로써 기존의 유압을 공급하여 유압 실린더를 제어하는 방식보다 구조를 간소화 하였고, 고속 정밀 제어가 가능하게 됨으로써 성능의 향상을 가져 올수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] D.Y.Ohm, "A PDFF Controller for Tracking and Regulation in Motion Control," Proceeding of 18thPCIMConference, Oct.21-26, 1990.

[2] D.W.Chung, J.S.Kim, S.K.Sul, "Unified Voltage Modulation Technique for Real Time Three-Phase Power Conversion" IEEE Trans. on Ind. Appl., Mar/Apr, 1998, pp. 374-380.

[3] Texas Instruments, "TMS320F2812 Peripherals Reference Guide", June 2003

저자소개

주재훈(Jae-hun Joo)



2004. 2. 창원대학교 전자공학과 공학사

2008. 2. 창원대학교 전자공학과 공학석사

2010. 2. 창원대학교 전자공학과 박사과정수료
2008년 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 박사과정
※관심분야: 서보기기제어, DSP응용

심동석(Dong-seok Sim)



2008. 1. 인천대학교 산업공학과 공학석사

2008. 3. 대영산전(주)입사

2010. ~ 현재 창원대학교 전자공학과 박사과정

※관심분야: 마이크로프로세서 응용, DSP 응용

최중경(Jung-keyng Choi)



1986. 2. 고려대학교 전기공학과 공학사

1988. 2. 고려대학교 전기공학과 공학석사

1992. 3. 고려대학교 전기공학과 디지털제어 공학박사
1992년 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 정교수
※관심분야: 서보기기제어, 자동동조제어, 마이크로 프로세서응용, DSP응용, 전자회로설계