

## 주기 변동 부하시 유도 전동기의 속도제어

김 덕 구\* · 강 경 보\*\* · 오 성 보\*\*\*

### Speed Control of Induction Motor on Periodic Variation Load

Deog-Goo Kim\*, Kyung-Bo Kang\*\* and Seong-Bo Oh\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, we describes the speed control of induction motor by vector control using DSP TMS320F240 that has the remarkable characteristics of motor control. We use a space voltage vector PWM inverter and a PI controller that is stable of transient response characteristics in a speed controller and a current controller of d-axis and q-axis. We try computer simulation about the speed control including clock wise and counter clock wise in induction motor using direct drive system attached the arm on shaft when it works by periodic variation load. So that, we verify the validity of speed control by the experiment.

**Key words** : Speed control induction motor, vector control, direct drive

#### 1. 서 론

유도전동기는 구조가 간단하고 경제적이며 유지 및 보수의 측면에서 대단히 유리하며, 높은 자속밀도의 변화와 가감속 운전특성에 우수한 장점을 갖고있어 고속운전에서 정역 가감속제어가 요구되는 새로운 서보 구동원으로 광범위한 응용이 기대되고 있다. 이는 유도전동기에 벡터제어 이론을 도입함으로써 정밀제어와 고성능 속도제어가 가능하기 때문이다.

1969년 독일의 Hasse와 1971년 Blaschke에 의해 제안된<sup>1)</sup> 벡터제어법은 유도전동기의 고정자전류를 동기속도로 회전하는 d-q축으로 좌표변환하여 d축을 회전자 자속과 일치시키면, d축성분 전류는 자속성분, q축성분 전류는 토크성분으로 분리되며 이들을 서로 독립적으로 제어하면 이것은 타여자 직류전동기와 유사한 특성으로 제어할 수 있다는 이론이다.<sup>2)</sup>

교류전동기의 가변속 구동에 이용되는 인버터시스템중 sinusoidal PWM 기법은 원리가 간단하여 구현하기가 쉽지만, 출력전류에 고조파가 포함되어 있는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 공간전압벡터PWM 기법은 제어알고리즘이 복잡하고, 많은 연산이 필요하여 구현하는데 복잡하나, 이는 고속 연산이 가능한 고성능 프로세서의 개발로 해결 가능케 되어 실제 구현하는데 많이 적용되어 지고 있다.<sup>3,4)</sup>

실험에 이용한 제어시스템은 벡터제어 알고리즘에

\* 제주직업학교

Cheju vocational school

\*\* 제주산업정보대학 전기과

Dept. of Elec. Cheju college of technology

\*\*\* 제주대학교 전기전자공학부, 산업기술연구소

Faculty of Electrical & electronic Eng., Res. Insti. Tech., Cheju Nation Univ.

서의 고속연산처리를 위하여 전동기 등의 motion control 분야에 적합한 TMS320F240 DSP로 구성하였으며 A/D변환기, PWM인버터 등 주변장치를 내장하고 있어 시스템 소형화를 추구할 수 있으며, 인버터의 고속 스위칭을 위하여 IGBT모듈인 IPM을 사용하였다.<sup>5)</sup>

본 논문에서는 산업용 공작기계의 응용분야에 적용할 수 있는 direct-drive방식을 도입하여 아-암 중량에 의한 주기 변동부하시의<sup>6)</sup> 정역 속도제어를 구현하기 위하여 과도응답 특성이 우수한 PI제어기를 속도제어기 및 d축, q축 전류제어기에도 사용하여 MATLAB을 이용 시뮬레이션 하였으며, 이를 실험을 통하여 검증하고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1. 공간전압벡터 PWM

일반적으로 널리 알려진 SVPWM 기법은 기준전압 벡터를 벡터공간상의 위치에 기준을 두 어 스위칭 시간을 결정하는 기법이다. Fig. 1과 같이 3상 인버터는 모두 6개의 스위칭 소자로 구성되어 있으며, 스위칭 소자의 동작에 있어서 6개의 유효전압 벡터(V1-V6)

과 2개 영전압벡터(V0, V7)이 있다. 이렇게 8가지 동작 모드에서의 출력전압을 벡터도로 표시하면 Fig. 2와 같이 정육각형을 형성한다.

이 6각형의 꼭지점을 형성하는 전압벡터(V1-V6)은 인버터의 최대 출력전압이 된다. 따라서 6각형 내부의 임의의 출력전압 벡터는 이것이 위치한 삼각형의 두 변에 해당하는 전압벡터를 이용하여 시간적으로 벡터를 합성하여 스위칭 시간을 구하는 방식이다. 6개의 유효벡터 정전압이 차례대로 전동기에 인가하면 시간적으로 한 주기 즉, 360°로 회전하는 전압이 전동기에 인가되는 효과를 얻을 수 있다. 그러므로 각 벡터의 간격은 60°이며, 전동기 부하의 각 상이 평형이라면 각 유효벡터의 크기는  $\frac{2}{3} V_{dc}$ 가 된다.

Fig. 2에서와 같이 섹터1에 기준전압벡터가 있는 경우, 전압은 V1벡터와 V2벡터의 시간적인 합성에 의해 한주기 내에서 얻어진다. 이러한 원리에 의해 한주기 내에서의 적분으로부터 각 유효벡터의 인가 시간을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\int_0^T V^* dt = \int_0^n V_n dt + \int_n^{n+T_2} V_{n+1} dt + \int_{n+T_2}^T V_0 dt \quad (1)$$

$$T_s \cdot V^* = (T_1 \cdot V_n + T_2 \cdot V_{n+1}) \quad (2)$$

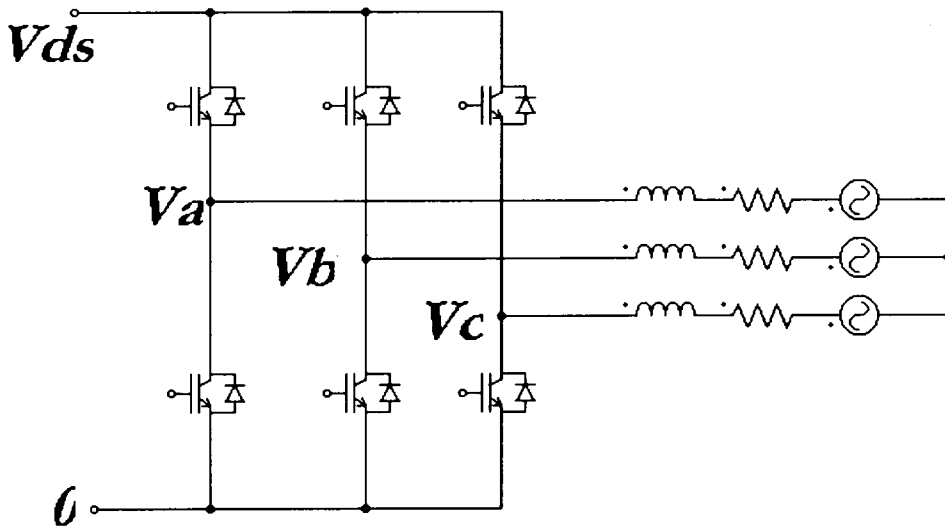


Fig. 1 Inverter System

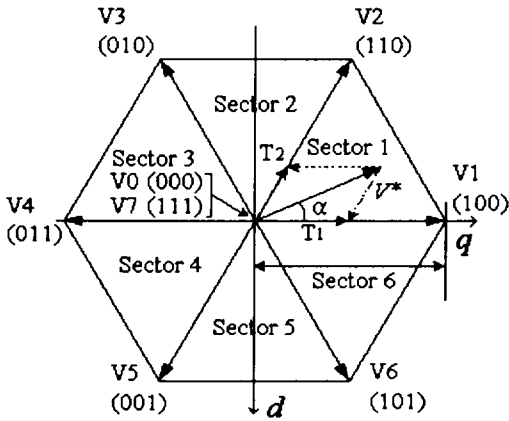


Fig. 2 Space vector diagram of available switching vector

## 2.2. 관성 부하와 물리모델

전동기에 관성 부하를 연결하여 기동하는 경우에는 전기회로에 발생하는 전기적 과도 현상과 관성체를 가속하기 위해 발생하는 기계적인 과도 현상을 수반하고 있다. 일반적으로 전자의 시정수는 후자의 시정수에 비해 훨씬 작고 전기적인 과도 현상은 빠르게 감쇠되는 것이라 보아도 된다.

전동기에서 기동, 정지, 역회전 등과 같이 속도 변화에 중점을 두어 특별히 고려 되어야 하므로, 본 논문에서는 유도전동기의 회전자 축에 직접 아-암을 Fig. 3과 같이 연결한 관성 부하의 질량  $m$ 의 변화에 따른 주기적인 변동부하의 속도 응답을 파악한다.

즉, 관성 부하의 물리모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다<sup>7)</sup>

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = P I_{(t)} - mg \sin \theta \quad (3)$$

$$J = J_m + J_a \quad (4)$$

여기서

$J_m$  : 전동기의 관성모우멘트[kgm<sup>2</sup>]

$J_a$  : 아-암의 관성모우멘트[kgm<sup>2</sup>]

$P$  : 컨버터 출력과 토크의 비례정수

$I_{(t)}$  : 토크 전류 지령[A]

$m$  : 아-암의 질량[kg]

$l$  : 전동기축에서 아-암의 중심까지의 거리[m]

$\theta$  : 아-암의 위치[rad]

식(3)의 우변 제2항이 아-암에 의한 변동 부하에 영향이 있으며 전체 관성의 크기  $J$ 는 전동기 관성과 아-암 관성의 합으로 시뮬레이션 및 실험에 적용된다.

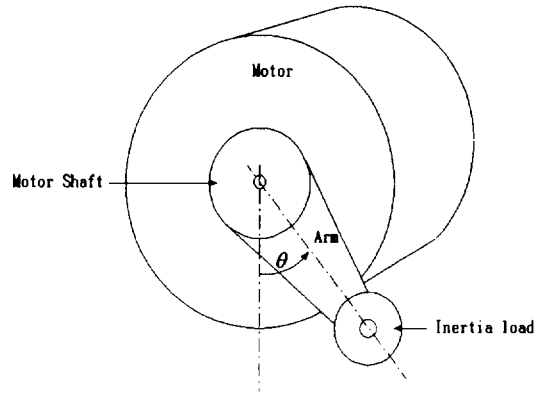


Fig. 3 The model of inertia load

## III. 시스템 구성

본 논문에서는 유도전동기의 정역 속도제어를 구현하기 위하여 Fig. 4와 같은 시스템으로 벡터제어기법을 이용하여 속도제어를 하였다. 이 제어기법은 기존의 V/F 제어를 대체해 나가고 있는 제어방법으로, 3상의 제어변수들을 d-q 2상분리를 통해 DC 타여자 전동기를 제어하는 방식으로 운전하는 방법으로 유도전동기 구동에서 동적인 특성을 향상시킨다. 실험에 사용한 전동기 파라미터를 입력하고 전류제어기 셋팅에서 PI제어기의 Pass band와 Damp factor를 적절히 조절하여  $K_p$ ,  $K_i$  게인 튜닝을 하고 또한 속도제어기 셋팅도 동일한 방법으로 입력하여 안정된 실험을 행한다.<sup>8)</sup>

## IV. 시뮬레이션

Fig. 4 에 제시한 유도전동기 속도제어 시스템의

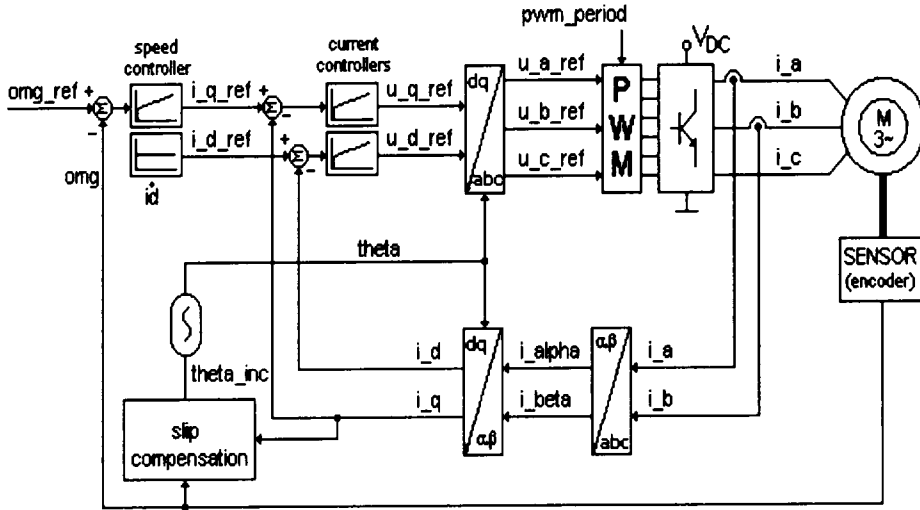


Fig. 4 System configuration

응답특성을 알아보기 위하여 실험에 앞서 컴퓨터를 이용한 디지털 시뮬레이션을 Table 1과 같은 전동기의 파라미터를 입력하여 MATLAB을 이용하여 PI제어에 의한 관성부하의 주기적 변동에 따른 속도제어에 대한 응답 특성을 해석하였다.

벡터제어 이론을 적용하여 유도전동기의 수학적 모델링에 의해 미분방정식을 세워 관성부하의 변화에 따라 속도와 전류특성을 해석하였다. 이 때 속도제어기를 1[ms]으로 전류제어기는 100[μs]의 샘플링 시간으로 제어하였으며, 구동 시스템을 보호하기 위하여 전류 리미터는 12[A]로 제한하였다. 이때 관성부하를 무부하, 200[g], 400[g]에서 주기적 변동에 따른 속도 응답에 대한 결과를 얻었다. 속도지령은

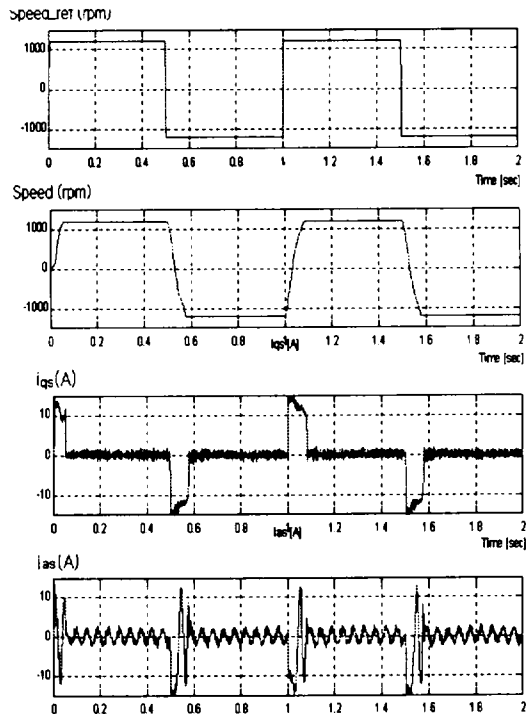


Fig. 5 Simulation results of speed response with CW and CCW in no inertia load

1200[rpm]을 주었고, 0.5[sec] 간격으로 정역회전하도록 하여 2[sec]동안 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

Table 1. Parameters of induction motor

Rated power	370 [W]	$R_s$	6.6[Ω]
Rated Speed	2820 [rpm]	$R_r$	6.2[Ω]
Rated Current	0.95 [A]	$L_{ls}$	0.00171[H]
Starting Current	4.8 [A]	$L_{lr}$	0.00171[H]
Power Factor	0.53	$L_{lm}$	0.349[H]
Starting Torque	3 [Nm]	P	2
Maximum Torque	3.5 [Nm]		
Rotor Inertia	$3.5 \times 10^{-4}$ [kgm <sup>2</sup> ]		

Fig. 5은 관성부하가 무부하일 때 결과파형을 나타낸 그림이다. 상단에서 지령속도 파형, 실제속도, 토오크분 전류파형, 회전자 한 상분 전류파형에 대한 시뮬레이션한 결과를 나타냈다. 속도응답을 보면 오버슈트없이 0.1[sec] 이내에 정상상태에 도달하고 있고, 전류파형 결과에서 전류를 제한하여 기동에 대한 큰 전류가 걸리지 않고 있다. Fig. 6은 관성부하를 200[g]으로 하여 시뮬레이션한 결과 파형이다. 속도 응답에서 오버슈트없이 나타나고 있지만, 정상상태 도달시간이나 전류에 대한 응답을 보면 무부하보다 응답이 조금 늦어짐을 알 수 있다. Fig. 7은 관성부하를 400[g]으로 하여 결과를 나타낸 파형이다. 앞에 시뮬레이션 결과파형에 비교하여 보면 응답이 조금 늦어졌다. 관성부하가 커질수록 속도응답시간이 조금 길어지고,  $i_{as}$ ,  $i_{qs}$ 의 응답특성이 변화하고 있음을 알 수 있지만, 변화에 대하여 속도와 전류에 대하여 중요없이 결과파형이 안정하게 나타나고 있다.

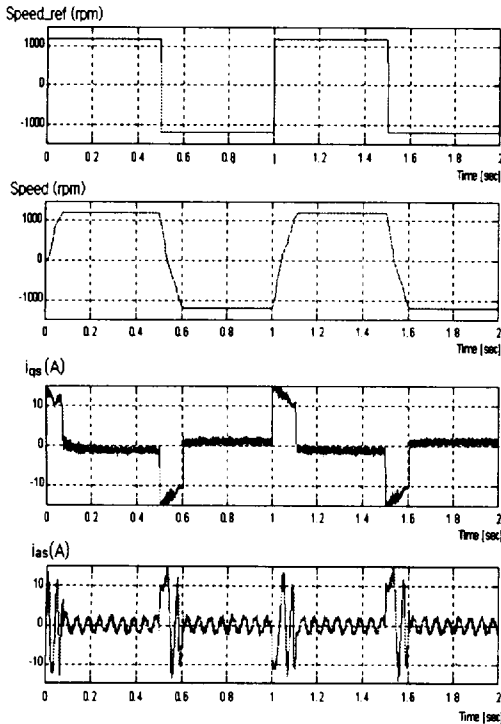


Fig. 6 Simulation results of speed response with CW and CCW in  $m=200[g]$

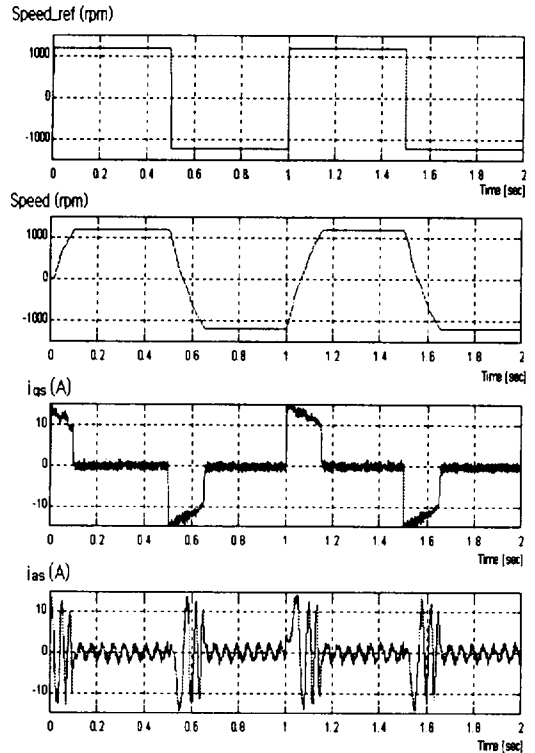


Fig. 7 Simulation results of speed response with CW and CCW in  $m=400[g]$

## V. 실험 결과 및 검토

컴퓨터 시뮬레이션 해석 결과를 검증하기 위하여 Fig. 4에서 제안한 속도제어 시스템을 적용하여 주어진 시간에 따라 주기적으로 변동하는 부하, 즉 Fig. 3과 같은 관성 부하용 아암을 직접 회전축에 연결하여 무부하시, 아암 질량200[g]과 400[g]의 관성 부하시 속도 지령을 1200[rpm]으로 주어 0.5[sec]마다 정역 회전케하여 정역 속도제어 실험을 수행하였다.

속도 응답 특성을 보면, Fig. 8은 관성부하 없이 정역 속도제어 응답과 전류에 대한 응답을 실험 결과에서 나타낸 파형이다. 실험결과에서도 시뮬레이션과 마찬가지로 속도에 대한 응답이 오버슈트없이 0.1[sec] 이내에 정상상태로 도달하는 것을 확인할 수 있고, 전류응답도 앞에 시뮬레이션과 거의 일치하고

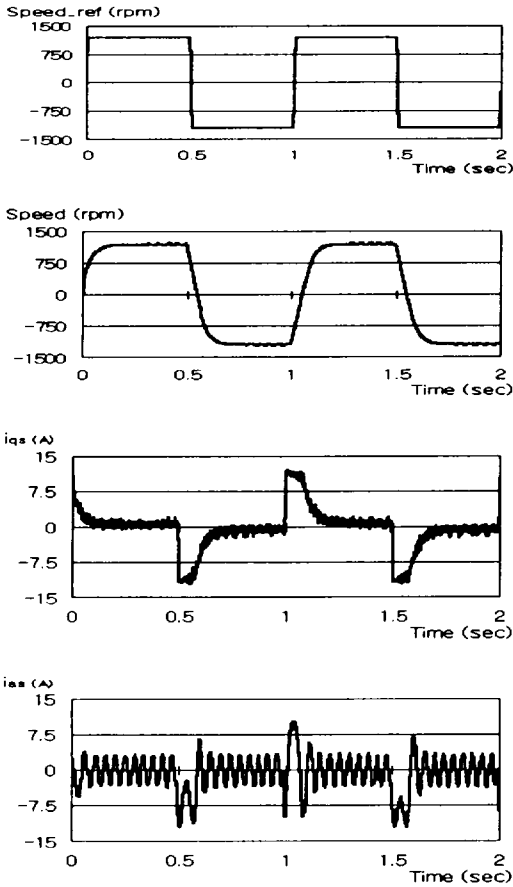


Fig. 8 Experimental results of speed response with CW and CCW in no inertia load

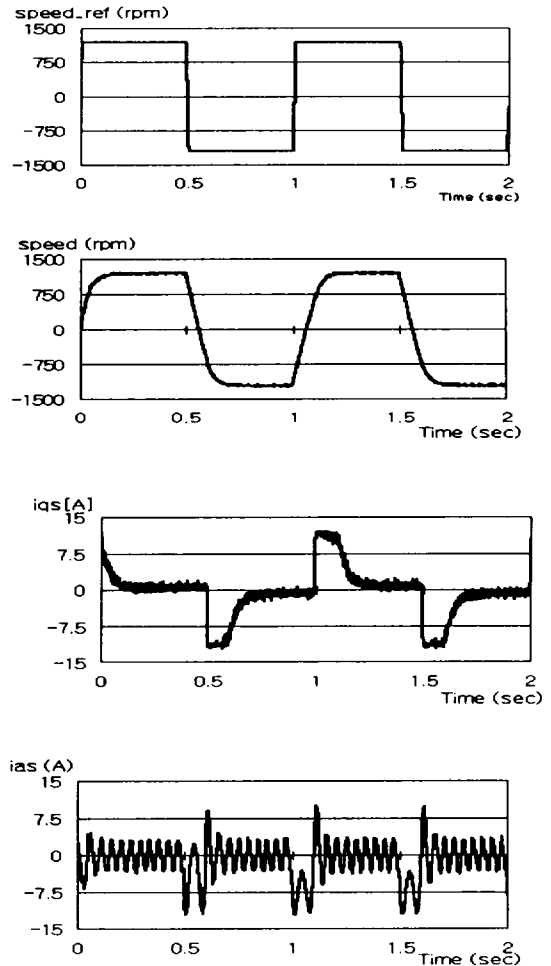


Fig. 9 Experimental results of speed response with CW and CCW in  $m=200[g]$

있는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 주기적 변동부하인 관성부하용 아-암 질량이 200[g]일 때 실험결과 파형이다. 무부하일 때 비해서 약간 변동이 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 관성부하에 대하여 아-암 질량이 400[g]시의 속도응답과 전류응답에 대한 결과를 보여주고 있다. 실험에서 관성부하가 변동함에 따라 속도응답과 전류 응답이 큰 동요없이 동작이 잘 되고 있다는 것을 실험을 통해서 확인할 수 있다. 각각의 토크분 전류  $i_{qs}$ 의 최대치, 회전자 한 상분 전류  $i_{as}$ 의 최대치 및 정상 상태 도달 시간은 시뮬레이션 결과에 추종함을 알 수 있으며, 각 경우의 속도 응답 파형의 데이터를 분석해 보면 오버슈트 없이 정정시간에 안정되게 접근하여 속도 명령에 추종됨을 알 수 있었다.

## VI. 결론

본 논문에서는 구조가 간단하고 경제적이며 가감속 운전특성에 장점을 가지는 유도전동기를 이용하여 벡터제어 알고리즘 및 공간전압벡터 PWM기법을 이용하여 주기적으로 변동하는 관성부하의 변화에 따른 정역 속도제어 시뮬레이션과 이를 검증하기 위한 실험을 행하였다. 속도제어기 및 전류제어기에 PI제어기를 사용하였으며, 벡터제어 알고리즘을 고속연산처리를 위하여 가격이 저렴하고 전동기 전용 제어용으로

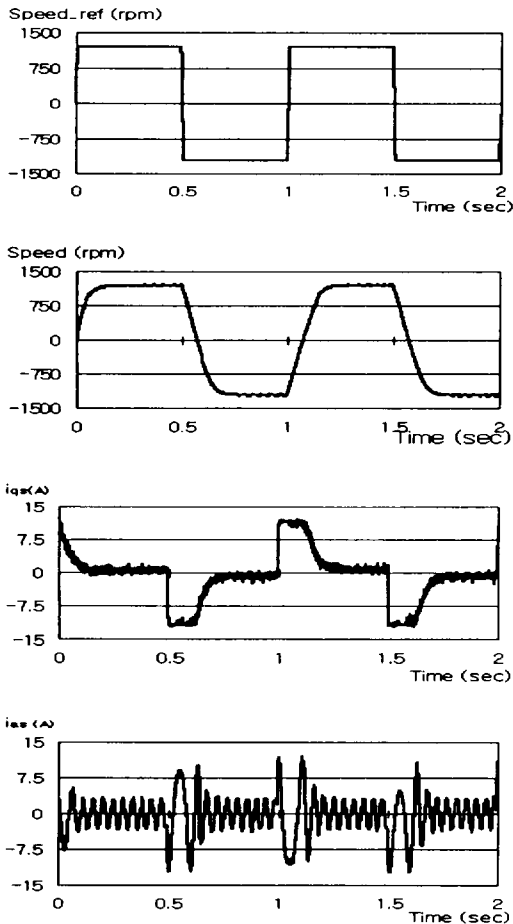


Fig. 10 Experimental results of speed response with CW and CCW in  $m=400[g]$

성능이 뛰어난 마이크로 프로세서 DSP TMS320F240 CPU로 이용하였다.

MATLAB으로 시뮬레이션 한 결과와 실험을 통한 속도응답 특성이 거의 일치한 것을 확인할 수 있었다. 유도전동기의 주기적 변동 부하인 관성 부하의 변화에 따른 정역 속도제어 방법이 양호함을 확인할 수 있었다. 따라서, 가격이 저렴한 DSP TMS320F240를 변동부하 속도제어 시스템에 적용하여 산업용 공장 기계의 motion control분야에 적용은 물론, 정역 및 가감속 제어가 요구되는 새로운 서보 구동 방법에 응용되리라 기대된다.

### 참고 문헌

- 1) 김민희, 1988, 유도전동기의 벡터제어시 선형화 특성에 관한 연구, 중앙대학교 학위논문.
- 2) 中野孝良, 1996, 交流モータのベクトル制御.
- 3) 중앙대학교 전력전자연구실, 1996, 유도전동기제어.
- 4) 문상호, 오성보, 1999, 공간전압벡터PWM 기법을 이용한 유도전동기의 구동특성 해석, 제주대학교 산업기술연구소, Vol.10, No1, pp.167-174.
- 5) TEXAS INSTRUMENTS, 1998, AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320-F240.
- 6) 오성보, 1995, 브러쉬 없는 직류 전동기의 디지털 속도제어, 제주대학교 산업기술연구소, Vol.6, pp. 114-118.
- 7) 小杉辰彦, 1988, 口ボットアームのダイレクト駆動に関する研究, 長崎大學.
- 8) Technosoft, 1998, DSP Motion Solutions.