

DC 모터 속도제어를 위한 퍼지 알고리즘 설계

최종수 김성중 최한수*

전북대학교 제어계측공학과

* 조선대학교 제어계측공학과

Design of Fuzzy Algorithms for D C Motor Speed Control

Jong-Soo Choi Sung-Joong Kim Han-Soo Choi*

Chonbuk National University

* Chosun University

ABSTRACT

This paper proposes fuzzy control algorithms for a DC motor speed control. The proposed algorithms are constructed by the fuzzy controller and the fuzzy compensator. The fuzzy compensator used to overcome rapidly the effects caused by the disturbance and is mounted outside of the closed loop of the fuzzy controller. The fuzzy control rules are established from human operator experience and basic engineering knowledge about the process dynamics. Simulation results show that the proposed algorithms compensate for parameter variation and disturbance.

1. 서 론

퍼지논리(fuzzy logic)를 기반으로한 퍼지제어기법은 사람의 전문가적 지식을 획득하고 불확실성을 처리하는 수단으로써 Zadeh와 Mamdani에 의해서 제창되었다. 이러한 개념들은 분명치 않은(ill-defined) 산업공정에 적용되었다. 분명치 않은 시스템들은 부정확한 정보를 받아들임에도 불구하고 종종 양호한 결과를 얻고있는 경험이 풍부한 사람에 의해서 보통 조작된다. 초기에 퍼지제어기법이 적용된 공정들은 시멘트 킬른(cement kiln), 하수처리 플랜트 등이고, 많은 응용에서 퍼지제어기법을 이용하여 성취한 결과들은 엄밀한 수동조작에 의한 결과보다 더 우수함을 입증하였다.[1] 최근에는 복잡하고 느린 공정시스템에서 부터 로보틱스 및 서보제어와 같은 빠른 시스템에 까지 퍼지제어기법의 응용범위를 넓혀가고 있다.[2]

DC 모터제어는 보통 구조가 간단하여 실현하기가 용이한 PID 제어를 많이 이용하고 있다. 그러나 PID 제어기는 변화하는 제어환경 또는 시스템 비선형에 대한 적응능력이 떨어진다. 이러한 단점을 해결하기 위한 방법 중 대표적인 것

근법이 파라미터 추정을 통해 주어진 제어대상의 시변특성이나 외란을 극복할 수 있는 적응제어(adaptive control)이다. 그러나 적응제어 또한 여러가지 장점을 갖고 있음에도 불구하고 정확한 수학적 해석에 의존하기 때문에 모델링의 한계에 부딪히게 되고, 알고리즘이 복잡하여 현재 상용화된 마이크로프로세서나 컴퓨터상에서 실시간 구현이 어렵기 때문에 동특성이 매우 빠른 시스템에 대한 응용을 제한하고 있다. 따라서 수학적 모델링과 해석보다는 전문가의 경험이나 지식을 기반으로한 퍼지제어기법을 DC 모터제어에 적용하는 연구들이 행해지고 있다.

이 연구에서는 DC모터 속도제어를 위해서 퍼지논리를 기반으로한 퍼지제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 퍼지제어기(fuzzy controller)와 퍼지보상기(fuzzy compensator)로 구성된다. 제안한 PI-type 퍼지제어기는 파라미터 변화에 대해 잘 적용할 수 있으나 외란이 투입될 경우, 외란을 극복하는 시간이 길다는 단점이 있다. 이러한 문제를 효과적으로 보상하기 위해서 PD-type 퍼지보상기를 설계하고 PI-type 퍼지제어기의 바깥쪽에 탑재하여 이용한다. 제안한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 모의실험을 행하였으며, 제안한 알고리즘이 파라미터 변화 및 외란에 잘 적용함을 보였다.

2. 퍼지제어기 설계

퍼지제어기의 설계는 다음의 네 단계를 통해서 제어기출력을 계산해낸다.

- [단계 1] 제어기의 입출력변수 정의
- [단계 2] 멤버십함수 및 퍼지제어규칙 설계
- [단계 3] 퍼지추론(fuzzy reasoning)
- [단계 4] 비퍼지화(defuzzification)

이 연구에서는 제어기의 입력변수를 오차(e(k))와 오차의 변화량(de(k))으로 선정하고, 출력변수는 제어입력(du(k))으로 선정하였으며 아래와 같이 정의한다.

$$e(k) = sp(k) - y(k) \quad (2.1)$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2.2)$$

$$u(k) = u(k-1) + du(k) \quad (2.3)$$

여기에서 sp(k)와 y(k)는 각각 k번째 샘플링 시간의 설정치(setpoint)와 공정출력(모터의 속도)이고, 식(2.3)의 du(k)는 e(k)와 de(k)에 의해서 결정된다. 제어변수의 정의에서 퍼지제어기의 입력력관계는 다음과 같으며, PI-type 퍼지제어기라고 한다. PI-type 퍼지제어기의 블록선도는 그림 2.1과 같다.

$$R : e(k) \times de(k) \rightarrow du(k) \quad (2.4)$$

멤버십함수는 설계자의 경험과 지식에 의해서 주관적으로 정의되며, 제어변수 e(k), de(k), du(k)에 대한 언어변수(linguistic variable)는 다음과 같이 7개의 용어집합(term set)으로 정의했다.

$$T = \{ PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB \}$$

설계한 멤버십함수는 그림 2.2와 같은 삼각형 형태(triangular form)로 설계하였고, 입력력변수에 대한 전체집합(universe of discourse) U를 13개 레벨로 양자화했다.

$$U = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

이 연구의 퍼지제어기는 two-input/single-output(MISO) 시스템이므로 제어규칙은 다음과 같이 표현되고,

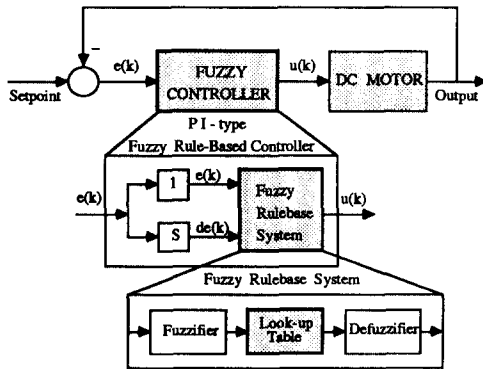


그림 2.1 PI-type 퍼지제어기의 블록선도
Fig. 2.1 Block diagram of PI-type fuzzy controller

$$R = \{ R^1_{MISO}, R^2_{MISO}, \dots, R^n_{MISO} \}$$

R^1_{MISO} 는 "If - then"문으로 아래와 같이 기술할 수 있다.

"If e(k) is PB and de(k) is PS, then du(k) is NB"

일반적으로 제어규칙은 meta-rule의 개념 또는 human operators로부터 얻은 수동조작에 대한 heuristics를 조사하고 분류하여 체계화한 공학지식과 같은 공정에 대한 해박한 지식으로부터 유도할 수 있다. MacVicar-Whelan^[6]은 아래의 세 meta-rule을 이용하여 제어규칙을 설계하였다.

- (1) 만일 e(k)와 de(k)가 zero이면, 현재의 제어 setting을 유지한다.
- (2) 만일 e(k)가 만족할 정도로 zero에 접근하고 있는 상황이라면, 현재의 제어 setting을 유지한다.
- (3) 만일 e(k)가 자동조절(self-correcting)되지 않는다면, du(k)는 zero가 아니고, e(k)와 de(k)의 부호와 크기(small, medium, big 등)에 의존한다.

퍼지제어기에 대한 제어규칙은 MacVicar-Whelan의 제어규칙을 변형하였으며, 2차원 행렬형태로 표 2.1에 제시하였다.

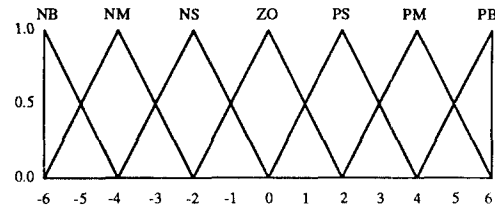


그림 2.2 퍼지제어기의 멤버십함수
Fig. 2.2 Membership functions for fuzzy controller

표 2.1 퍼지제어규칙
Table 2.1 Fuzzy control rule
Change in Error

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

퍼지추론은 Zadeh가 제안한 CRI(Compositional Rule of Inference), 즉 최대-최소 합성(max-min composition)을 이용한다. 멤버십함수의 모호한 정도에 따라서 측정된 입력변수값(x_1, x_2)에 적용되는 규칙은 여러개이며, 적용되는 규칙들이 제어기출력 계산에 영향을 미치는 정도는 각각 다르다. 영향을 미치는 정도를 규칙에 대한 만족도(degree of fulfillment: DOF)라 하고, i 번째 규칙에 대한 DOF $_i$ 는 다음식으로 계산한다.

$$DOF_i = \text{MIN} \{ \mu_{E_i}(x_1), \mu_{DE_i}(x_2) \} \quad (2.5)$$

for $x_1, x_2 \in U$

여기에서 $\mu_{E_i}(x_1)$ 와 $\mu_{DE_i}(x_2)$ 는 i 번째 규칙의 $e(k)$ 와 $de(k)$ 에 대한 멤버십함수이다.

제어기출력은 비퍼지화(defuzzification) 방법을 이용하여 구할 수 있으며, 다음식으로 표현되는 무게중심법(center of gravity method)을 사용한다.

$$DU = \left[\sum_{i=1}^n (DOF_i \cdot U_i) \right] \div \left[\sum_{i=1}^n (DOF_i) \right] \quad (2.6)$$

여기에서 n 은 규칙의 수이고, U_i 는 i 번째 규칙의 Support값이다.

이 연구에서는 실시간 처리(real-time processing)를 위해서 on-line방식을 채택하지 않고, off-line 방식을 이용한다. off-line방식을 이용하게 되면 추론한 결과를 메모리에 저장해놓고 이용하게되므로 추론하는 동안 소요되는 많은 시간을 절약할 수 있어 실시간 처리가 가능해진다. 추론을 통해서 얻은 결과(decision table)는 "look-up table"형태로 표 2.2에 나타냈다.

표 2.2의 look-up table은 다음과 같은 2차원 행렬로 구성되어 있다.

$$DU(k) = F[E(k), DE(k)] \quad (2.7)$$

표 2.2 PI-type 퍼지제어기의 추론결과

Table 2.2 Look-up table for PI-type fuzzy controller

		DE[k]												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
E[k]	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	
	-5	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	
	-4	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	
	-3	-6	-6	-5	-4	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3	
	-2	-6	-5	-4	-3	-2	-2	-1	0	1	2	3	4	
	-1	-5	-5	-4	-3	-2	-2	-1	0	1	2	3	4	
	0	-4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	4	4	
	1	-4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	2	3	4	5	5
	2	-4	-3	-2	-1	0	1	2	2	3	4	5	6	6
	3	-3	-2	-1	0	1	2	3	3	3	4	5	6	6
	4	-2	-1	0	1	2	3	4	4	4	5	6	6	6
5	-1	0	1	2	3	4	5	5	5	6	6	6	6	
6	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6	

여기에서 연산자 $F[\cdot]$ 는 look-up table을 표현하는 수단이다. 측정된 $e(k)$ 와 $de(k)$ 는 Scaling factor(K_i)를 곱하므로써 다음과 같이 각각 $E(k)$, $DE(k)$ 로 mapping된다.

$$E(k) = K_1 \{ Q_1 e(k) \} \quad (2.8)$$

$$DE(k) = K_2 \{ Q_2 de(k) \} \quad (2.9)$$

$E(k)$ 와 $DE(k)$ 를 이용하여 look-up table로 부터 제어기출력 $DU(k)$ 를 얻을 수 있으며, 비퍼지 제어기출력 $du(k)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$du(k) = f^{-1} [K_3 DU(k)] \quad (2.10)$$

여기에서 f^{-1} 은 식(2.7)의 퍼지변수들로부터 비퍼지제어신호를 산출하는 의사결정과정을 의미한다. 위의 과정을 그림으로 표현하면 그림 2.3과 같다.

3. 퍼지보상기 설계

제안한 퍼지제어기는 플랜트의 파라미터가 변화하거나 외란이 투입될 경우에도 원하는 출력응답을 실현할 수 있다. 그러나 외란에 대한 영향을 회복하는데 많은 시간이 걸린다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 새로운 퍼지보상기(fuzzy compensator)를 제안한다. 설계한 퍼지보상기는 그림 3.1과 같이 PI-type 퍼지제어기 페루우프의 바깥쪽에 탑재하여 이용한다.

퍼지보상기의 입력변수는 식(2.1)과 식(2.2)로 퍼지제어기와 동일하게 정의하고, 출력변수는 $u_{cmp}(k)$ 로 정의한다. 따라서 제안한 퍼지보상기는 PD-type의 퍼지제어기로 생각할 수 있다.

입력변수 $e(k)$ $de(k)$ 에 대한 멤버십함수는 그림 3.2와 같이 정의했으며, 출력변수 $u_{cmp}(k)$ 에 대한 멤버십함수는 그림 2.2의 멤버십함수를 이용한다. 또한 퍼지제어 규칙은 표 3.1과 같이 설계하였다.

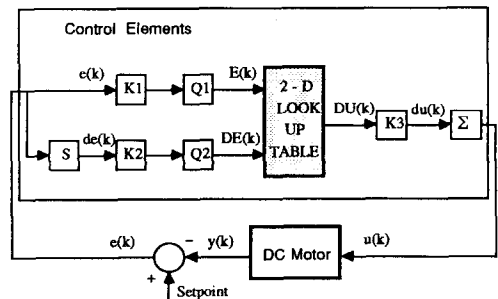


그림 2.3 PI-type 퍼지제어기 구조

Fig. 2.3 PI-type fuzzy controller structure

보상기출력 $U_{cmp}(k)$ 는 아래의 최대치평균법(mean of maximum method)을 이용하여 계산하였다.

$$DU(k) = \sum_{i=1}^j U_i / j \quad (3.1)$$

여기에서, j 는 Support값의 수이다. 추론결과는 표 3.2의 look-up table에 보였고, 표 3.2의 look-up table은 다음과 같이 2차원 행렬로 표현된다.

$$U_{cmp}(k) = F[E(k), DE(k)] \quad (3.2)$$

위 식을 Scaling factor를 이용하여 표시하면 다음과 같다.

$$C_3f[u_{cmp}(k)] = F[C_1f[e(k)], C_2f[de(k)]] \quad (3.3)$$

즉, 퍼지보상기에 대한 Scaling factor는 $C_i(i=1,2,3)$ 이다.

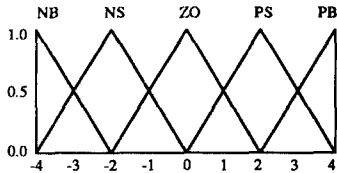


그림 3.2 퍼지보상기의 멤버십함수
Fig. 3.2 Membership functions for fuzzy compensator

표 3.1 퍼지보상기의 제어규칙
Table 3.1 Control rule for fuzzy compensator
Change in Error

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NS	NB	NM	NS	ZO	PS
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB

표 3.2 퍼지보상기의 추론결과
Table 3.2 Decision table for fuzzy compensator
DE[k]

	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-3	-6	-5	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
-2	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
-1	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
0	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
2	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
3	-1	0	1	2	3	4	5	6	6
4	0	1	2	3	4	5	6	6	6

4. 적용 및 결과검토

이 연구에서 사용한 DC 모터의 파라미터는 표 4.1과 같다.

표 4.1 DC 모터 파라미터
Table 4.1 Parameters of DC motor

Armature Resistance	$R_a = 3.5 [\Omega]$
Armature Inductance	$L_a = 10 \times 10^{-3} [H]$
Torque Constant	$K_t = 1.088 [Nm/A]$
Back emf Constant	$K_b = 1.1 [V/rad/sec]$
Rotor Inertia of Motor	$J_m = 0.0945 [Kg \cdot m^2]$

제한한 알고리즘의 건실성을 입증하기 위하여 파라미터 변화 및 외란을 추가하여 모의실험을 행하였으며, 결과는 그림 4.1, 그림 4.2, 그림 4.3에 제시하였다. 이 때의 Scaling factor는 다음과 같다.

$$SF1: K_1 = K_2 = 0.06, K_3 = 4 \quad (\text{초기동작모드}) \quad (4.1)$$

$$SF2: K_1' = K_2' = 0.5, K_3' = 0.5 \quad (\text{목표치인접영역}) \quad (4.2)$$

$$SF3: C_1 = C_2 = 0.3, C_3 = 3 \quad (\text{퍼지보상기}) \quad (4.3)$$

그림 4.1의 결과는 식(4.1)의 Scaling factor SF1을 이용한 경우로 목표치(100[rad/sec])에 overshoot 및 정상상태오차 없이 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 4.2는 기계적 시정수를 0.28[sec]에서 0.25[sec]로 변화시킨 경우의 속도응답이다. 그림 4.2(a)는 파라미터 변화에 적응하지 못하는 경우이며(SF1을 이용함), 그림 4.2(b)는 파라미터 변화에 대한 오차를 보상한 경우이다. 오차는 퍼지제어기의 초기 동작모드에서 Scaling factor SF1을 이용하고, 목표치 인접영역에서 Scaling factor SF2를 추가하므로써 효과적으로 보상을 하였다. 그림 4.3은 20% 크기의 외란을 지속적으로 추가한 경우의 결과이다. 제한한 퍼지제어기는 외란에 대해 잘 적응할 수는 있으나 PI-type 제어기이기 때문에 빠른 보상을 행하지 못한다. 따라서 PD-type 퍼지보상기를 도입하므로써 외란의 영향을 빠른속도로 처리함을 보였다. 이 때 PD-type 퍼지보상기의 Scaling factor는 식(4.3)의 SF3이다.

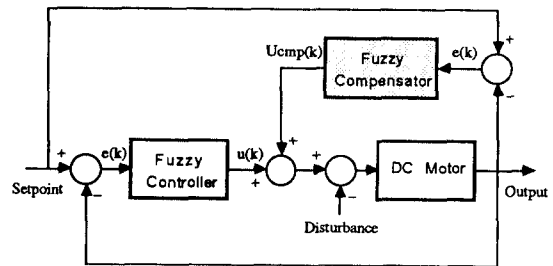


그림 3.1 퍼지보상기를 포함한 전체 블럭선도
Fig. 3.1 Total block diagram with fuzzy compensator

5. 결 론

이 연구에서는 DC모터 속도제어를 위해서 퍼지논리를 기반으로 한 퍼지제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 PI-type 퍼지제어기와 PD-type 퍼지보상기로 구성되어 있다. 추론에 소모되는 시간을 줄이기 위해서 추론결과를 look-up table화 하여 이용하는 off-line방식으로 제어기를 구현하였다. 제안한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해서 파라미터 변화 및 외란을 부가한 경우에 대하여 모의실험을 하였다. 파라미터가 변화할 경우 제안한 PI-type 퍼지제어기가 잘 적응할 수 있도록 설정치 인접영역에서 Scaling factor를 조정하였으며, 지속적인 외란이 투입될 경우, PD-type 퍼지보상기를 PI-type 퍼지제어기의 바깥쪽에 탑재하여 이용하므로써 외란을 효과적으로 보상하였다.

□ 참고 문헌

- [1] J.A. Bernard, " Use of a Rule-Based System for Process Control," *IEEE Control Systems Magazine*, pp.3-13, October 1988.
- [2] Y.F. Li and C.C. Lau, " Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, pp.65-71, April 1989.
- [3] W.H. Bare, R.J. Mulholland, and S.S. Sofer, " Design of a Self-Tuning Rule Based Controller for a Gasoline Refinery Catalytic Reformer," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.35, No.2, pp.156-164, 1990.
- [4] L.A. Zadeh, " Outline of a New Approach to the Analysis of Complex System and Decision Processes," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No.1, pp.28-44, 1973.
- [5] E.H. Mamdani and S. Assilian, " A Fuzzy Logic Controller for a Dynamic Plant," *Int.J.Man-Machine Studies*, Vol.7, pp.1-13, 1975.
- [6] P.J.MacVicar-Whelan, " Fuzzy Sets for Man-Machine Interaction," *Int. J. Man-Machine Studies*, Vol.8, pp.687-697, 1976.
- [7] K. Tamaki, K. Ohishi, K. Ohnishi and K. Miyaki, " Microprocessor Based Robust Control of a DC Servo Motor," *IEEE Control Systems Magazine*, pp.30-36, October 1986.
- [8] S. Chiu, S. Chand, D. Moore and A. Chaudhary, " Fuzzy Logic for Control of Roll and Moment for a Flexible Wing Aircraft," *IEEE Control Systems Magazine*, pp.42-48, June, 1991.

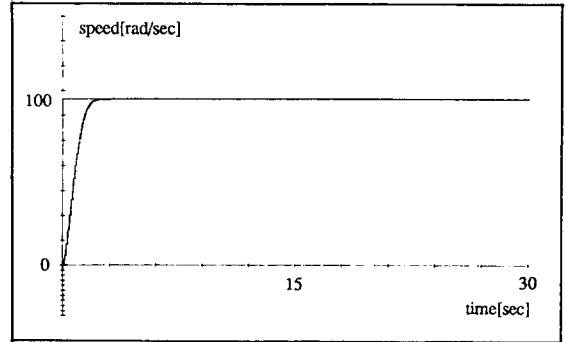


그림 4.1 모터의 속도응답

Table 4.1 Speed response of DC motor

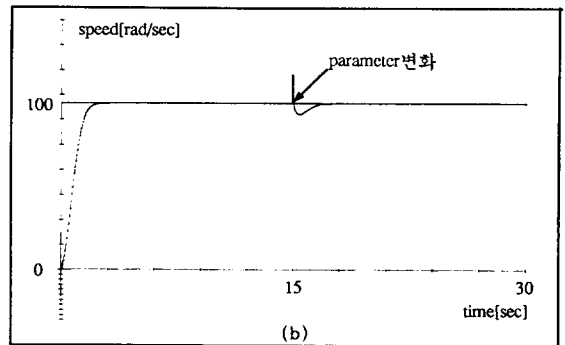
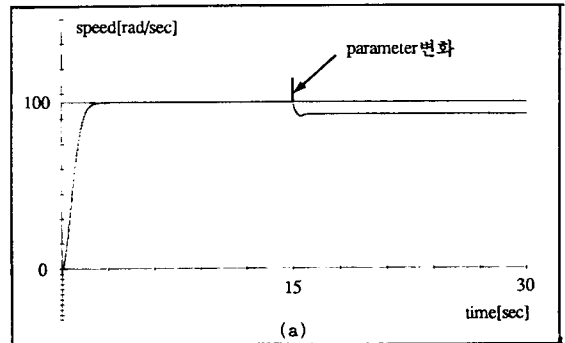


그림 4.2 파라미터 변화에 대한 속도응답

Table 4.2 Speed response for parameter variation

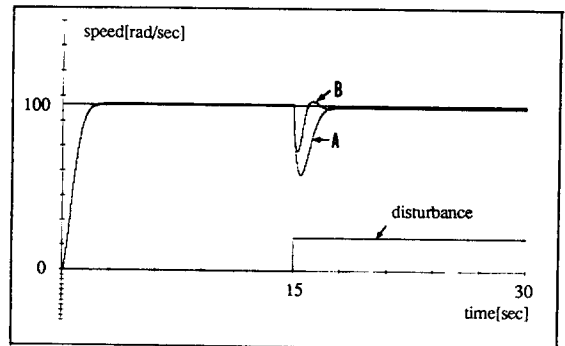


그림 4.3 외란에 대한 속도응답

Table 4.3 Speed response for disturbance