

# 퍼지 웨이브 변수를 이용한 수동성 원격 시스템 설계

## Design of Passivity Tele-Operation System Using Fuzzy Wave Variables

박 범 석, 유 성 구, 정 길 도\*  
(Beom Seok Park<sup>1</sup>, Sung Goo Yoo<sup>1</sup>, and Kil To Chong<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Chonbuk National University

**Abstract:** In the bilateral tele-operation system, time delay may be a critical problem. Even if system modeling error or time delay occurs, when applied to wave transformation system, the system's stability can be achieved. Using the characteristic  $b$  which is an important parameter of wave transformation, the system can display robust performance for time delay. However, since assuming and that the time delay was fixed developing a theory, a stability cannot be guaranteed about the time-varying delay. Therefore, In the paper, Therefore, in this paper, we studied for the method that controls this by applying the fuzzy algorithm which surveyed the time-varying delay characteristics and can adjust the  $b$  according to it adaptively.

**Keywords:** wave variables, time delay, passivity, stability, fuzzy control, tele-operation

### I. 서론

과학기술의 발달로 작업절차가 복잡하고, 돌발적인 상황이 발생하는 곳에서 로봇이나 기계시스템이 인간을 대신하여 작업을 수행할 수 있게 되었다. 이 시스템을 원격제어시스템이라고 하며, 주로봇, 종로봇, 통신채널로 구성된다[1].

원격제어시스템이 안정적으로 작동하기 위해서는 주로봇과, 종로봇, 통신채널이 모두 안정해야 하지만 통신채널에 존재하는 시간지연은 전체 시스템을 불안정하게 하는 가장 큰 요인이다[2,3]. 현재까지 시간지연 문제를 해결하기 위해서 다양한 방법들이 제안되었다[4-8]. 하지만 위의 방법들은 수학적 모델의 정확성이 필요한 방법으로 실제 시스템에서의 적용이 힘들다.

1990년대 후반부터 모델링 오차가 있어도 시스템의 성능을 보장할 수 있는 수동성 이론을 사용하여 안정성을 보장할 수 있는 연구가 진행되었다. 대표적으로는 Impedance Representation [9], Hybrid Representation [10], Scattering Theory [11], Wave Variables [12]과 원격 조작 제어 이론들이 등장하였다. 그리하여 수동성 기반의 접근으로 시간 지연이 있는 원격 조작 시스템의 안정화 문제를 체계적으로 다룰 수 있게 되었다.

Anderson과 Spong [11]은 일정한 시간 지연이 존재하는 힘 반향 양방향 원격 제어의 안정성을 유지하기 위하여 산란 이론(scattering theory)을 제안하였고 이것을 Niemeyer와 Slotine [12]이 웨이브 변수(wave variables)로 확장하였다. 이들은 통신 채널의 수동성을 만족시키기 위하여  $U, V$ 로 통칭하는 웨이

브 변수들을 정의하고 위치/속도, 힘 등의 물리량을 웨이브 변수로 치환하여 전송하는 기법을 제안하였다. 하지만 이러한 수동성 기반의 이론들의 단점은 시스템의 성능을 최대한 발휘할 수 없다는 점이다. 즉 시스템 모델링 오차나 비선형적인 요소로 인한 영향을 줄이는 대신에 시스템의 성능을 감소하여 이를 보장하는 방법이기 때문이다[13].

웨이브변수 기법에서는  $b$  라는 특성 임피던스 파라미터가 존재한다. 위 값은 시스템의 동적 성능에 영향을 미치는 값으로 현재까지의 웨이브변수 기법에서는 고정된  $b$  를 적용하여 시스템을 구성하였다. 하지만 시변 시간지연에 대해서도 안정성을 확보하기 위해서는 시변 시간지연에 따라 적절하게  $b$  의 크기를 조절해야 한다. 따라서 본 논문에서는 시변 시간지연특성을 관측하여 그에 따른 웨이브 임피던스 값을 적응적으로 조절할 수 있는 제어 방안에 대한 내용을 연구하였다[14-16].

### II. 웨이브 변환

#### 1. 웨이브 변수(wave variables)

웨이브 변수는 파워변수인 속도  $\dot{x}$  과 힘  $F$  의 정보를 인코딩한 값으로 정의된다.

$$u = \frac{b\dot{x} + F}{\sqrt{2b}}, v = \frac{b\dot{x} - F}{\sqrt{2b}} \quad (1)$$

여기서  $u, v, b$  는 각각 오른쪽 방향으로 움직이는 웨이브, 왼쪽 방향으로 움직이는 웨이브, 그리고 웨이브 임피던스를 나타낸다. 웨이브 변수는 네트워크 이론 중에 수동성과 분산이론을 기반으로 설계되었다. 수동성 관점에서 웨이브 변수 기법은 시간지연에 강인함을 보인다. 그림 1은 시간지연을 갖는 웨이브 변수 시스템의 구성을 보여준다. 웨이브 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2b} & \sqrt{b/2} \\ -1/\sqrt{2b} & \sqrt{b/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (2)$$

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 11. 12., 수정: 2010. 11. 26., 채택확정: 2010. 12. 23.

박범석, 정길도: 전북대학교 전자정보공학부

(bombsix@nate.com/kitchong@chonbuk.ac.kr)

유성구: 전북대학교 제어계측공학과(dings5@hanmail.net)

※ 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 중견연구자지원사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2010-0026391).

※ 상기 논문은 제어·로봇·시스템학회 전북제주지부와 전남지부의 합동 학술대회에서 초안이 발표되었음.

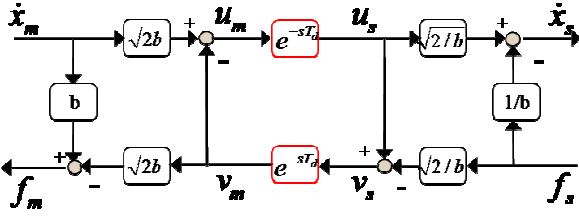


그림 1. 시간지연을 갖는 웨이브 변수.  
Fig. 1. Wave variables with time delay.

여기서  $b$ 는 특성 임피던스이며 임의의 상수값으로 전송라인의 전송특성을 결정한다.  $\dot{x}$  과 힘  $F$ 는 속도와 힘을 나타내고,  $u$ 와  $v$ 는 각각 오른쪽과 왼쪽으로 흐르는 웨이브를 의미한다. (2)의 역은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} f \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{b/2} & -\sqrt{b/2} \\ 1/\sqrt{2b} & 1/\sqrt{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

통신 채널의 파워 변수인 속도  $\dot{x}$  과 힘  $F$ 의 값을 웨이브 변수의 형태로 변환하는 이유는 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 수동성을 보장하기 위한 것으로서, 통신 채널에서의 파워 흐름은 웨이브 변수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{flow} = \dot{x}^T F = \frac{1}{2} u^T u - \frac{1}{2} v^T v$$

여기서 오른쪽으로 흐르는 파워 흐름을 양(positive)의 값을 갖도록 가정한다.

$$P = \dot{x}_m^T F_m - \dot{x}_s^T F_s = \frac{1}{2} (u_m^T u_m - u_s^T u_s + v_s^T v_s - v_m^T v_m) \quad (5)$$

$$\int_0^t P d\tau = \int_0^t \frac{1}{2} (u_m^T u_m - u_s^T u_s + v_s^T v_s - v_m^T v_m) d\tau$$

파워 플로우의 파워 변수를 웨이브 변수의 형태로 나타낼 수 있다. 파워 변수의 형태로 나타내면 두 개의 변수의 값을 곱해야 하지만 웨이브 변수로 나타내어진 파워 플로우는  $u$ 와  $v$ 가 자신이 가지고 있는 값의 제곱을 가지고 있다.

파워 변수는 한 스텝에서 에너지를 계산할 때 두 개의 값을 필요로 한다. 그러나 통신 채널에 시간 지연이 발생하면 두 값의 곱은 아무런 의미가 없게 된다. 하지만 웨이브 변수로 표현되면 자기 자신의 값을 가지고 있으므로, 통신 채널에서 발생하는 지연 시간을 알면 두 값의 연산이 가능하므로 에너지를 계산할 수 있다. 즉, 양방향 원격제어시스템의 통신 채널에 시간 지연이 발생하더라도 웨이브 변수의 형태로 나타내면 시간 지연에 강인함(robustness)을 가지게 된다. 그렇게 함으로써, 통신 채널에 시간 지연이 발생하는 시스템의 수동성을 보장한다.

한편 통신 채널에 시간 지연  $T$ 가 존재하면 (6)의 관계가 성립하므로,

$$\begin{aligned} u_s(t) &= u_m(t-T) \\ v_m(t) &= v_s(t-T) \end{aligned} \quad (6)$$

파워는 (6)을 (7)에 대입하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_0^t P d\tau &= \frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t u_s^T u_s d\tau + \frac{1}{2} \int_0^t v_s^T v_s d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau \\ &= \frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau + \frac{1}{2} \int_0^t v_s^T v_s d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t u_m^T(t-T) u_m(t-T) d\tau \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_0^t v_s^T(t-T) v_s(t-T) d\tau \\ &= \frac{1}{2} \int_{t-T}^t u_m^T u_m d\tau + \frac{1}{2} \int_{t-T}^t v_s^T v_s d\tau \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 통신 채널에 저장된 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{store}(t) &= \int_0^t P d\tau \\ &= \int_{t-T}^t \left( \frac{1}{2} u_m^T u_m + \frac{1}{2} v_s^T v_s \right) d\tau \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

시스템에 입력되는 에너지가 수동성을 유지하려면 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\int_0^t P d\tau \geq -E_{store}(0), \forall t \geq 0 \quad (9)$$

여기서  $E_{store}(0)$ 는 초기에 시스템에 저장된 에너지를 나타내며, 저장된 에너지의 양이 0보다 크거나 같으면 통신 채널의 안정성을 보장해 준다.

즉, 네트워크에 시간 지연  $T$ 가 존재하더라도 그 만큼의 에너지가 통신 채널에 저장될 뿐 수동성 조건을 위배하지 않을 수 있다. 하지만 위의 조건은 마스터와 슬레이브의 동적모델 오차 및 제어기 모델의 성능 그리고 웨이브 임피던스의 크기에 따른 전체 시스템의 동적 성능을 고려하지 않은 것으로 실제 시스템에서는 안정성이 보장되지 않을 수도 있다.

따라서 다음 절에서는 웨이브 변환 원격제어 시스템의 구성과 시스템에서의 임피던스 및 제어기에 따른 영향을 살펴 보겠다.

## 2. 웨이브 변환 시스템의 구성

전체 시스템의 구조는 그림 2와 같다. 다음과 같은 마스터와 슬레이브 선형 모델을 이용하여 실험을 진행하였다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta} \\ \tau_s &= J_s \ddot{\theta} + B_s \dot{\theta} \end{aligned} \quad (10)$$

$\tau_m, \tau_s$ 는 마스터와 슬레이브의 입력토크이고,  $J$ 는 이너서 계수이고,  $B$ 는 댐핑계수이다.

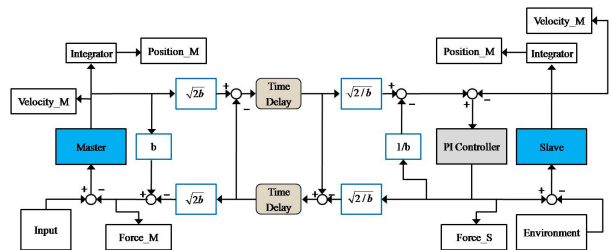


그림 2. 웨이브 변환을 적용한 양방향 원격 시스템.

Fig. 2. Bilateral tele-operation using wave transformation.

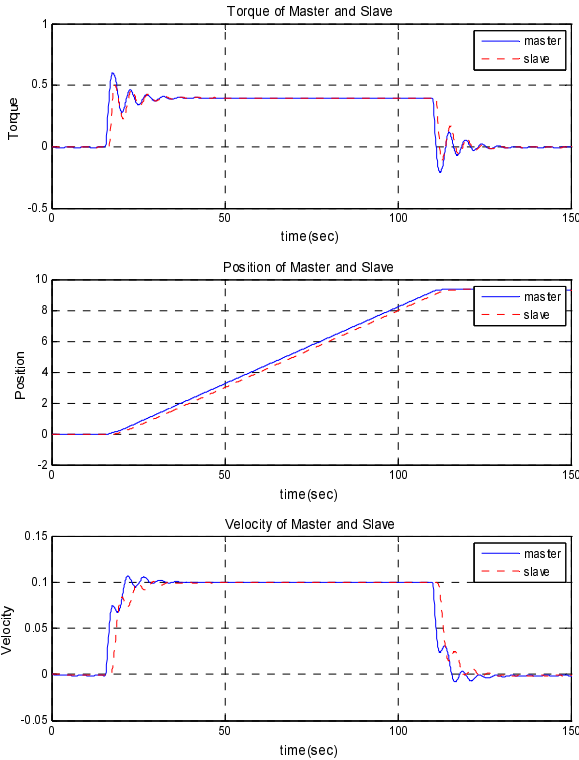


그림 3. 웨이브 양방향 원격제어 결과( $b = 20$ ).

Fig. 3. Result using wave transformation ( $b = 20$ ).

본 실험에서  $J_m = J_s = 4Kg \cdot m^2$  와  $B_m = B_s = 8Kg \cdot m^2 / s$  을 적용하였다. 그리고 슬레이브를 움직일 수 있는 힘을 측정하기 위해 단순한 PI 제어를 적용하였다. 샘플링 타임은 150ms로 진행하였다.

그림 3의 결과는 시간지연이 존재하는 경우에도 웨이브 변환을 적용하면 시간지연에 강인한 제어기 설계가 가능함을 보여준다. 사용한 웨이브 임피던스 값은 20을 사용하였다. 시간지연 영향으로 인해 오버슈트 및 정착시간이 증가하지만 안정적인 시스템 응답을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

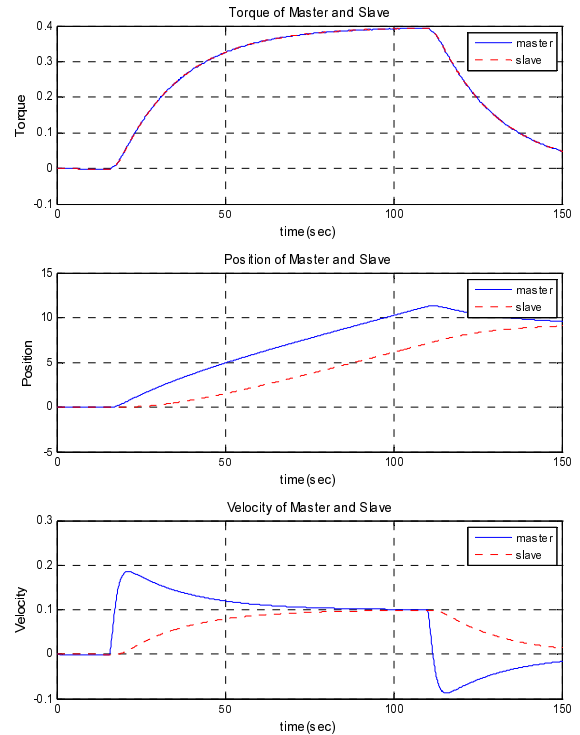
다음으로 웨이브 임피던스  $b$ 가 매우 작거나 클 경우를 실험하였다. 그림 4에서 보듯이  $b$ 의 값에 따라 시스템이 발산하여 불안정해지는 모습을 보인다. 그림 4(b)는 일정한 값을 유지하다가 발산하는 것처럼 보이지만, 실제로는 격한 진동을 보이다가 발산하는 경우이다. 즉 시스템의 성능에 맞는 적절한  $b$ 의 선택이 중요함을 나타낸다.

3.  $b$ 와 시간지연에 따른 동작특성 분석

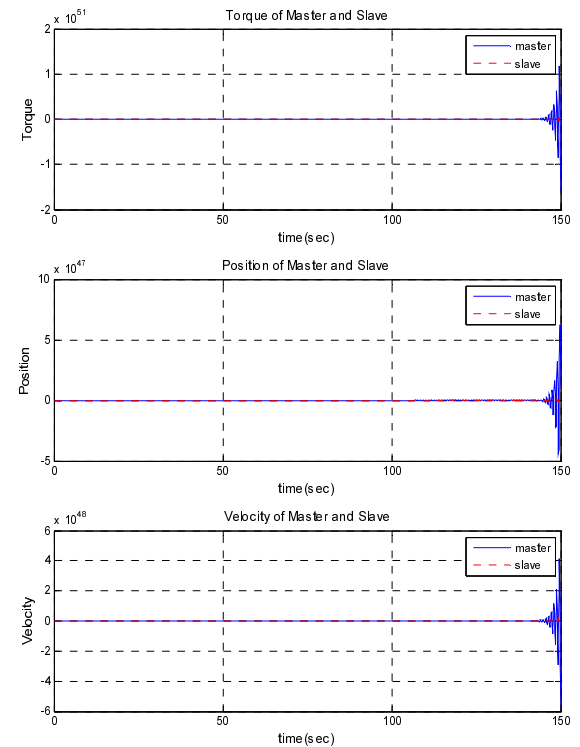
본 절에서는 웨이브 변환을 적용한 원격제어 시스템에서 제어기가 변할 경우에는 안정한 특성 임피던스의 범위가 어떤 식으로 변하는지 알아보았다.

모의 실험을 통해 웨이브 임피던스와 시간 지연이 변함에 따라 시스템의 동작 특성 성능을 분석하고, 이에 따른 웨이브 임피던스  $b$ 의 선택방법에 대해 설명하였다. 실험 모델은 그림 2와 동일한 시스템을 적용하였고, 시간 지연이 고정되었다고 가정하였다.

그림 5(a)는 시간 지연 400ms일 경우로  $b$ 의 크기가 16 이상일 경우에는 발산하는 모습을 보이며, 5이하일 경우에도 시스템이 불안정해지는 모습을 보인다. 즉, 5와 16사이의 웨



(a)  $b = 0.1$



(b)  $b = 200$

그림 4.  $b$ 의 크기에 따른 성능 변화.

Fig. 4. The performance variation according to the size of  $b$ .

이브 임피던스 크기를 유지해야 시스템이 안정함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 100ms일 경우로 8에서 10사이의 값을 유지해야 함을 알 수 있다. 즉, 원격제어 시스템의 시간 지연을 측정할 수 있다면 이에 따라 웨이브 임피던스를 안정한 범위의 크기로 설정하여 시스템의 불안정성을 방지할 수 있다.

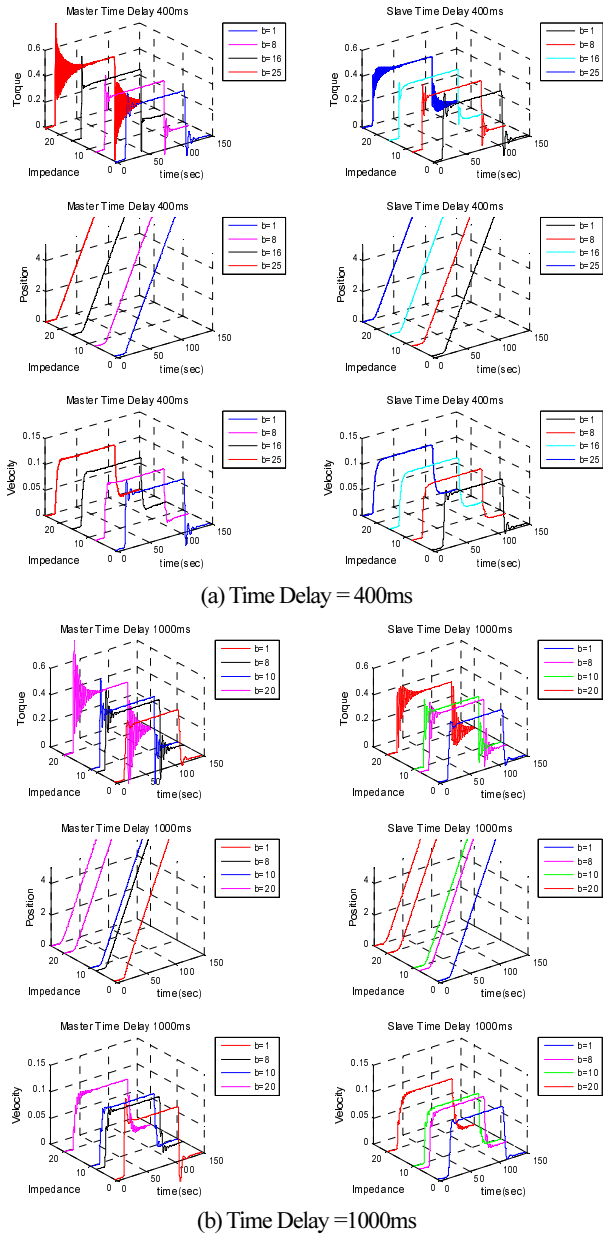


그림 5. 시간지연과  $b$ 의 크기에 따른 동작 특성.  
Fig. 5. The performance characteristic according to the size of the time delay and  $b$ .

III. 퍼지 제어기 설계

본 장에서는 시변 시간지연에도 강인한 성능을 보장하기 위해서 시간지연에 따라 웨이브 임피던스를 적응적으로 조정할 수 있는 퍼지 제어를 적용하여 전체 시스템의 안정성을 보장하는 방법을 제안한다.

1. 퍼지 제어(fuzzy control)

퍼지 이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해주는 방법으로서 1995년 Zadeh에 의해 처음으로 소개되었으며, 이 퍼지이론의 응용분야로 퍼지 제어(fuzzy control)가 가장 활발히 연구되어 왔다[17].

퍼지 제어는 퍼지 논리에 기초를 두고 있는데, 퍼지 논리는 인간의 사고나 자연의 특성과 많은 유사성을 가지고 있어서 실 세계의 근사적이고 불확실한 현상을 기술하는데 유용

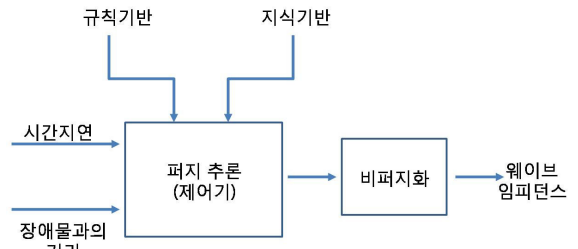


그림 6. 퍼지 제어기의 구성.  
Fig. 6. Structure of fuzzy controller.

하게 이용될 수 있다[18].

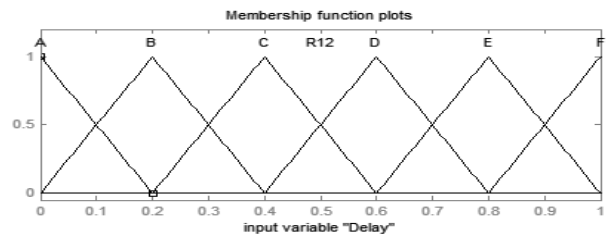
퍼지 제어기의 구성은 입력 변수를 받아 양자화 하는 입력 부분, 규칙을 추론하는 제어기 부분, 추론된 값을 비퍼지화 하는 출력부분으로 나눈다. 그림 6에 본 연구에 적용한 퍼지 제어기의 구성을 나타내었다.

퍼지 제어기의 입력은 시간 지연과 장애물과의 거리이다. 여기서 제어기는 시간 지연과 장애물과의 거리를 입력받아서 웨이브 임피던스  $b$ 의 크기를 제어한다.

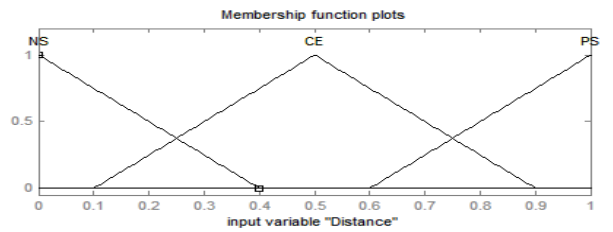
2. 멤버쉽 함수(memberhip function)

시간지연, 장애물과의 거리에 대한 멤버쉽 함수의 라벨은 다음과 같이 정의하였다.

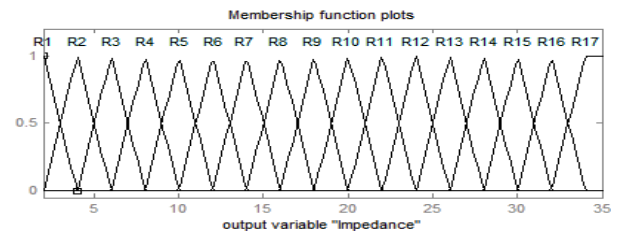
- A=시간지연 0ms, B=시간지연 200ms, C=시간지연 400ms,
- D=시간지연 600ms, E=시간지연 800ms, F=시간지연 1000ms
- NS=장애물과 거리가 멀다. CE=장애물과 근접하였다.
- PS=장애물과 접촉 및 충돌하였다.



(a) Membership functions for time delay



(b) Membership functions for the distance between obstacles



(c) Membership functions for the wave impedance

그림 7. 멤버쉽 함수의 설정.  
Fig. 7. Setting of membership function.

표 1. 퍼지 제어 규칙.

Table 1. Fuzzy control rule.

		장애물과의 거리		
		NS	CE	PS
시 간 지 연	A	R1	R8	R17
	B	R2	R6	R10
	C	R3	R5	R8
	D	R3	R5	R7
	E	R4	R5	R6
	F	R4	R5	R5

멤버십 함수의 설정은 일반적으로 전문가적 경험과 지식을 기본으로 하지만 일반적으로 제어 파라미터의 최대값과 최소값을 결정한 후 이 영역을 균등하게 나누어 설정한다. 그림 7은 시간지연, 장애물과의 거리, 웨이브 임피던스에 대한 멤버십 함수의 설정을 나타낸다.

3. 퍼지 제어규칙

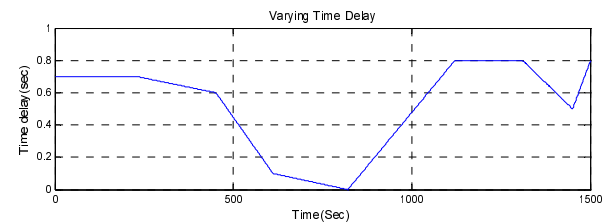
표 1은 퍼지 논리 규칙을 나타낸다. 표의 가로축은 장애물과의 거리를, 세로축은 시간지연을 나타낸다. 시간지연이 클수록 웨이브 임피던스  $b$ 의 최대값은 작아지고, 최소값은 커진다. 장애물과의 거리가 가까워질수록 정밀한 제어가 필요하게 되어  $b$  값이 커지게 됨을 확인할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

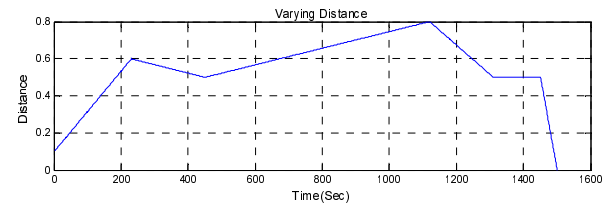
본 장에서는 제안한 방법과 기존의 웨이브 변환 방법과의 비교를 통해 제안한 시스템의 성능을 검증해 보았다. 이를 위해 그림 8과 같이 시변 시간지연 모델과, 장애물과의 거리 모델을 적용해 실험해 보았다. 여기서 장애물 거리 모델은 외적 환경 모델을 의미한다.

이는 장애물과의 근접이나 충돌이 발생했을 때에도 안정한 동작을 하는지를 판별하기 위한 것이다.

그림 9는 기존의 웨이브 임피던스 값을 제어하지 않고 일정한 크기( $b=10$ )의 고정값을 이용한 결과 그래프이다. 시간지연이 어느 정도 큰 지점에서는 시스템이 진동하기 시작해서 제어가 제대로 안 되는 것을 확인할 수 있다. 시간지연이 계속해서 증가하거나 급격히 변할 경우에는 발산하는 모습



(a) Time-varying delay model



(b) Distance model with obstacles

그림 8. 시변 시간지연 및 장애물과의 거리 모델.  
Fig. 8. Time-varying delay and distance model.

을 보이기도 한다. 그와는 반대로 그림 10에서 보였듯이 제안한 퍼지 웨이브 변수 방법을 적용한 경우에는 안정적으로 제어되는 모습을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과에서 보였듯이 제안한 시스템이 시변 시간지연에도 강인함을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 하드웨어 제어 모델에 적용하기 위해서는 센서의 구성 및 통신 구성에 따른 추가적인 연구가 필요하다.

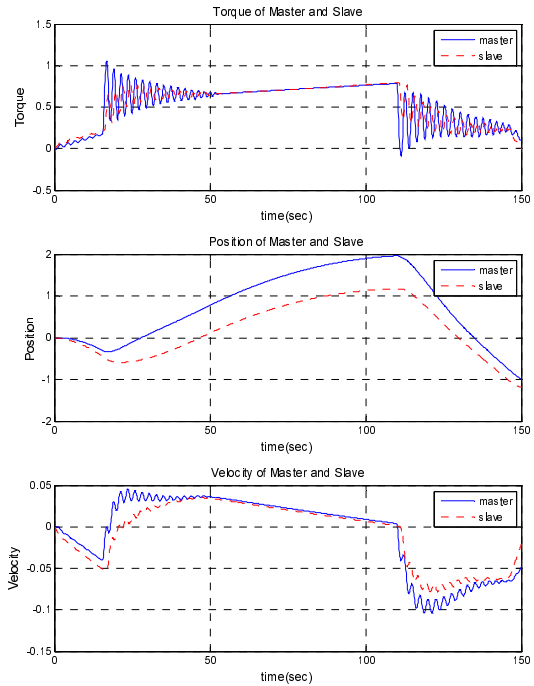


그림 9. 기존의 웨이브 변환 이용한 결과.  
Fig. 9. Result using wave transformation.

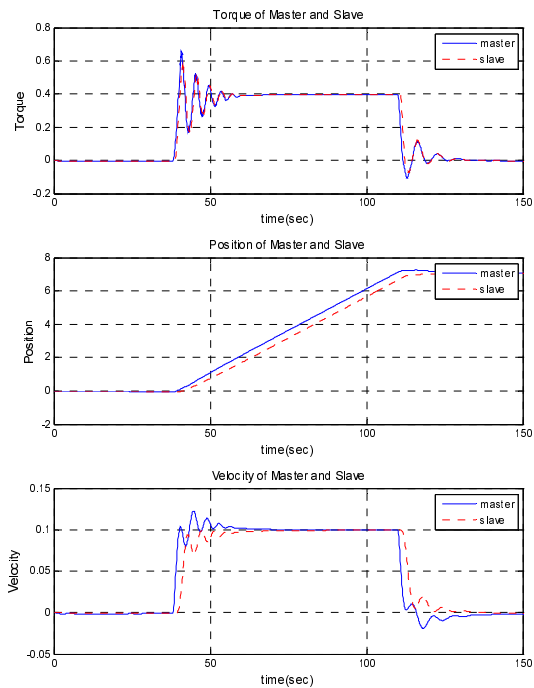


그림 10. 퍼지 제어를 이용한 결과.  
Fig. 10. Result using fuzzy control.

## V. 결론

본 논문에서는 기존의 웨이브 변환 시스템이 시변시간지연에서는 안정성을 보장할 수 없는 문제와 웨이브 임피던스에 따라 전체 시스템의 동적 성능이 저하되는 문제를 해결하기 위해 적응적으로 웨이브 임피던스 값을 제어할 수 있는 시스템을 제안하였다. 이를 위해 시간지연의 크기와 웨이브 임피던스 크기에 따른 원격제어 시스템의 안정성을 분석하였으며 그리고 외부 환경요소 즉 장애물과의 거리 및 충돌에 따른 시스템의 안정성도 분석하였다. 분석 데이터를 적용하여 적응적으로 외적 요소에 따라 웨이브 임피던스를 제어할 수 있도록 퍼지제어를 적용하였다.

원격제어 시 발생할 수 있는 비선형 요소에도 시스템을 안정적인 동작을 할 수 있도록 퍼지 모델을 설계하였으며 기존 시스템과의 비교를 통해 제안한 시스템의 성능을 검증해 보았다. 차후에는 실제 하드웨어 시스템에 적용하여 시스템의 특성에 맞게 웨이브 임피던스 값을 제어하는 시스템을 구현하는 연구를 진행할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] 배영걸, 최호진, 정슬, “원격제어 시스템의 종로봇인 이 동로봇의 제작과 힘 추종 제어 구현,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제16권 제7호, pp. 681-687, 2010.
- [2] Z. Zhang and K. T. Chong, “Second order hold and taylor series based discretization of SISO input time delay systems,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 136-148, 2009.
- [3] Y. Zhang and K. T. Chong, “Time-discretization of nonlinear control systems output delay,” *Journal of Mechanical Science*, vol. 20, no. 7, pp. 964-974, 2006.
- [4] Y. Zhang and K. T. Chong, “Discretization of nonlinear control systems with state-delay via taylor-lie series,” *Nonlinear Analysis*, vol. 70, no. 1, pp. 83-98, 2009.
- [5] H. J. Choi and K. T. Chong, “Time-discretization of nonlinear system with variable time-delayed input using a taylor series expansion,” *Journal of Mechanical Science*, vol. 20, no. 6, pp. 759-769, 2006.
- [6] J. H. Park, N. Kazantzis, A. G. Parlos, and K. T. Chong, “Time-discretization of non-affine nonlinear system with delayed input using taylor series,” *KSME International Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 1297-1305, 2004.
- [7] Y. Zhang and K. T. Chong, “Time-discretization of nonlinear control non-affine system using scaling and squaring technique,” *IJCAS*, vol. 4, no. 3, pp. 293-301, 2006.
- [8] J. H. Park, Ni. Kazantzis, A. G. Parlos, and K. T. Chong, “Time-discretization of nonlinear system with delayed multi-input using taylor-series,” *KSME International Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 1107-1120, 2004.
- [9] G. J. Raju, G. C. Verghese, and T. B. Sheridan, “Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 1316-1321, 1989.
- [10] B. Hannford and P. Fiorini, “A detailed model of bilateral teleoperation,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1, pp. 117-121, 1988.
- [11] R. J. Anderson and M. W. Spong, “Bilateral control of teleoperators with time delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, 1989.
- [12] G. Niemeyer and E. Slotine, “Stable adaptive teleoperation,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 152-162, 1991.
- [13] B. Hannford and J.-H. Ryu, “Time domain passivity control of haptic interfaces,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2002.
- [14] N. A. Tanner and G. Niemeyer, “Online tuning of wave impedance in telerobotics,” *Robotics, Automation and Mechatronics*, vol. 1, pp. 7-12, 2004.
- [15] 유지환, “시간영역 수동성 기법을 사용하여 시변 시간지연 하에서 안정성을 보장하는 양방향 원격제어기 : 리셋 방법,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제14권 제11호, pp. 1124-1129, 2008.
- [16] J.-H. Ryu, “Bilateral controller for time-varying communication delay : Time domain passivity approach,” *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 13, no. 11, pp. 1099-1105, 2007.
- [17] Y. L. Sun and M. J. Er, “Hybrid fuzzy control of robotics system,” *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 6, pp. 755-765, 2004.
- [18] W.-S. Yu, “Adaptive fuzzy controller design for biped robotic systems,” *Advanced Robotics and Its Social Impacts*, pp. 1-6, 2008.
- [19] 박범석, 유성구, 정길도, “퍼지 웨이브 변수를 이용한 양방향 원격제어시스템 설계,” 제어·로봇·시스템학회 전북제주지부 전남지부 합동 학술발표대회 논문집, 제11권 제1호, pp. 122-125, 2010.

## 박 범 석



2009년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2009년~현재 전북대학교 전자정보공학부 석사과정수료. 관심분야는 이동로봇 및 원격제어.

## 유 성 구



2003년 전북대학교 제어계측공학과 학사졸업. 2005년 전북대학교 제어계측공학과 석사졸업. 2010년 전북대학교 제어계측공학과 박사졸업. 현재 전북대학교 박사후 과정중. 관심분야는 Robotics, 인공지능, 제어시스템.

## 정 길 도



1984년 Oregon State University 기계공학 학사졸업. 1986년 Georgia Institute of Technology 기계공학 석사졸업. 1992년 Texas A&M University 기계공학 박사 졸업. 현재 전북대학교 전자정보 교수, 관심분야는 Time-Delay, Robotics, 인공지능, Web기술.