

## 자동변속기의 본드선도 모델링 및 제어

강민수\*(부산대 대학원 지능기계공학과), 강조웅(대우정밀), 김종식(부산대학교 기계공학부)

### Bond Graph Modeling and Control for an Automatic Transmission

M. S. Kang(Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering, PNU), J. W. Kang(DAEWOO Precision Industries CO., Ltd), J.S. Kim (School of Mechanical Engineering, PNU)

#### ABSTRACT

An automatic transmission model using the bond graph techniques is developed for analyzing shift characteristics of vehicles. Bond graph models can be systemically manipulated to yield state space equations of standard form. Bond graph techniques are applied for modeling overall automatic transmission systems and shift models. A fuzzy controller is synthesized for the verification of a shifting model in the 1<sup>st</sup> gear to the 2<sup>nd</sup> gear. Simulation results show the fitness of models by the bond graph techniques.

**Key Words :** Bond graph modeling (본드선도 모델링), Automatic transmission(자동변속기), Fuzzy control(퍼지 제어)

#### 1. 서론

차량의 자동변속기를 모델링하고 제어시스템을 설계하여 동적 성능을 평가하고 분석하는 것은 차량 시스템 개발에 필수적이다. 실제의 자동변속기에서 얻기 힘든 정보를 알기 위해서 또는 여러가지 제어기법을 설계하고 검증하려면 우선적으로 모델링이 요구되고 이에 대한 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 모델링이 적절하게 수행되었다면 시뮬레이션 상에서 소프트웨어적으로 시스템의 성능을 분석하는 것이 실제의 모델에서 행해지는 것보다 경제적, 시간적 비용을 절약할 수 있는 이점이 있다. 따라서 본 논문에서는 본드선도(bond graph)기법<sup>(1,2)</sup>을 이용하여 Nissan 자동변속기(R01A)<sup>(3)</sup>를 모델링 하고자 한다. 그리고 모델링된 자동변속기에 대한 퍼지제어 시스템을 설계하고, 이를 객체지향적 프로그램을 작성하여 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 한다.

자동변속기를 모델링 하는데 있어서 토크 컨버터의 동적 특성은 무시하고 유성기어의 동적 특성을 중심으로 쉬프팅(shifting)을 포함하여 모델링하기로 한다. 변속기에서 기존의 Newton 방법으로 운동방정식을 유도할 수 있지만 수식 전개가 용이하지 않다는 단점이 있다. 반면에 본드선도를 이용하면 시스템 요소들을 에너지 요소별로 분류하여 에너지의 흐름에 따라 조직적으로 상태방정식을 유도

할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 방법을 이용하여 자동변속기를 1 단에서 4 단까지 모델링하고 1-2 단 변속시 클러치 압력 제어를 위한 퍼지제어기를 설계한다. 그리고 1 단에서 4 단까지의 변속제어시에 적절한 압력곡선을 선정하여 모델의 정확도를 시뮬레이션을 통해 확인하기로 한다.

#### 2. 자동변속기의 모델링

##### 2.1 유성기어의 본드선도 모델링

자동변속기 모델링을 위해 우선 유성기어를 모델링하기로 한다. Fig. 1은 단일 유성기어의 단면이며 구속조건이 없는 경우의 각 요소들의 상태를 표시하였다. 식(1)은 이와 같은 상태에서의 각속도 관계식이다.

$$\omega_c = \frac{N_s}{N_s + N_r} \omega_s + \frac{N_r}{N_s + N_r} \omega_r \quad (1)$$

여기서  $N_s, N_r$ 은 각각 선기어의 잇수 및 링기어의 잇수이다. 3 요소중 2 요소가 입력 혹은 구속력을 가지면 나머지 1 요소에서 출력을 얻게 된다. Fig. 2는 단일 유성기어를 결합시킨 복합 유성기어의 본드선도이다. 여기서 첨자 1, 2 는 단일 유성기어의 번호이며 관성이 작은 피니언 요소는 생략하였다.

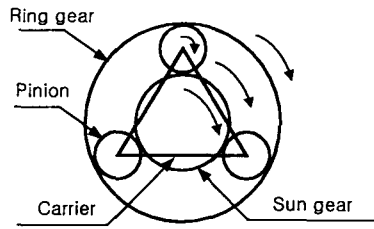


Fig. 1 Single planetary gear : all elements are free

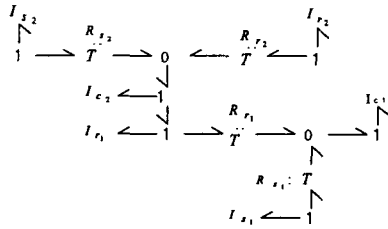


Fig. 2 Bond graph of the double planetary gear system

## 2.2 자동변속기의 본드선도 모델링

Fig. 3 은 자동변속기의 구성과 각 요소들의 명칭을 표시한 블록선도이다. Table 1 에는 각 단에서의 유압클러치의 결속상태<sup>(3)</sup>가 표시되어 있다.

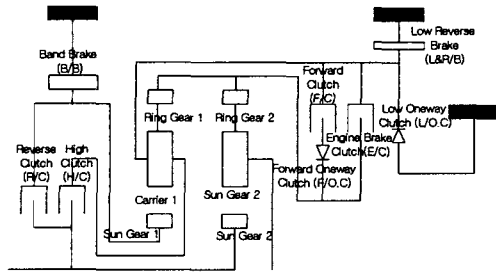


Fig. 3 Block diagram of the overall automatic transmission system

Table 1 Clutch actions of a Nissan automatic transmission

	R/C	H/C	F/C	E/C	B/B		F/O.C	L/O.C	L&R/B
					2nd	4th			
Park									
Reverse	○								○
Neutral									
D	1st		○				○	○	
	2nd		○		○		○		
	3rd		○	○			○		
	4th		○			○			
2	1st		○				○	○	
	2nd		○	○	○		○		
1	1st		○	○			○		○
	2nd		○	○	○		○		

1 단의 경우, Fig. 3 에서 F/C, F/O.C, L/O.C 가 체결된 상태이다. Fig. 4 에 있는 본드선도로부터 식 (2)로 표현되는 상태방정식을 유도할 수 있다. 그리고 축력 캐리어속도는 식(3)과 같다.

$$\omega_t = \frac{1}{I_t + I_{s_2} + R_{s_2}^2(I_{c_2} + I_{r_1}) + \frac{R_{s_2}^2 R_{r_1}}{R_{s_1}^2} I_{s_1}} (T_t - R_{s_2} R_d T_s) \quad (2)$$

여기서

$$\omega_t = \frac{-R_{s_2} R_d T_s}{I_t + I_{s_2} + R_{s_2}^2(I_{c_2} + I_{r_1}) + \frac{R_{s_2}^2 R_{r_1}}{R_{s_1}^2} I_{s_1}}$$

$$\omega_{cr} = R_{s_2} \omega_t \quad (3)$$

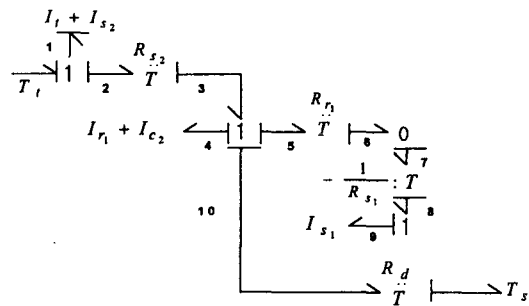


Fig. 4 Bond graph of the 1<sup>st</sup> gear

각 단 및 변속과정에 대해 위와 같은 방법을 적용하여 상태방정식들을 유도할 수 있다. 각각의 방정식들에 포함된 R, I의 첨자기호는 여러 파라미터들의 수식을 하나로 치환한 것으로 R은 속도비이며 I는 관성을 의미한다.

1-2 단 토크영역 변속과정은 F/C, F/O.C, L/O.C 가 체결되며 B/B가 체결되는 과정이다. Fig. 5의 본드선도로부터 식(4),(5)를 유도할 수 있다.

$$\omega_t = \frac{T_t + \frac{R_1 R_{s_2} T_{bb_2} - R_1 R_d T_s}{R_{s_1}}}{I_{12}} \quad (4)$$

여기서,

$$\omega_t = \frac{R_1 R_{s_2} T_{bb_2} - R_1 R_d T_s}{R_{s_1} I_{12}}$$

$$\omega_{cr} = R_{s_2} \omega_t \quad (5)$$

1-2 단 속도영역 변속과정은 토크영역과 같다. Fig. 6의 본드선도로부터 식(6), (7)을 유도할 수 있다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{(I_{12s_2} + I_{12s_1}c_2)T_t + I_{12s_2}c_1T_{bb_2} - I_{12s_1}R_dT_s}{I_{12s_1}I_{12s_2} - I_{12s_1}I_{12s_2}} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \omega_t = \frac{I_{12s_2}c_1T_{bb_2} - I_{12s_1}R_dT_s}{I_{12s_1}I_{12s_2} - I_{12s_1}I_{12s_2}}$$

$$\dot{\omega}_{cr} = \frac{(I_{12s_2} + I_{12s_1}c_2)T_t + I_{12s_2}c_1T_{bb_2} - I_{12s_1}R_dT_s}{I_{12s_1}I_{12s_2} - I_{12s_1}I_{12s_2}} \quad (7)$$

2 단의 모델링은 F/C, B/B, F/O.C 가 체결된 상태이다. Fig. 7의 본드선도로부터 식(8), (9)를 유도할 수 있다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{I_t + I_{s_2} + R_\alpha(I_{c_2} + I_{r_1}) + R_\beta I_{r_2}} (T_t - R_\rho T_s) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \omega_t = \frac{-R_\rho T_s}{I_t + I_{s_2} + R_\alpha(I_{c_2} + I_{r_1}) + R_\beta I_{r_2}}$$

$$\omega_{cr} = \frac{R_{s_2}}{1 - R_{r_1}R_{r_2}} \omega_t \quad (9)$$

2-3 단 토크영역 변속과정은 F/C, F/O.C 가 체결되며 B/B의 체결이 해제되는 중이며 H/C가 체결되는 과정이다. Fig. 8의 본드선도로부터 식(10), (11)을 유도할 수 있다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{T_t - \frac{R_{s_1}}{1 - R_{r_1}R_{r_2}}T_{hc} - \frac{R_{s_2}}{1 - R_{r_1}R_{r_2}}R_dT_s}{I_{23t}} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \omega_t = \frac{-\frac{R_{s_1}}{1 - R_{r_1}R_{r_2}}T_{hc} - \frac{R_{s_2}}{1 - R_{r_1}R_{r_2}}R_dT_s}{I_{23t}}$$

$$\omega_{cr} = \frac{R_{s_2}}{1 - R_{r_1}R_{r_2}} \omega_t \quad (11)$$

2-3 단 속도영역 변속과정은 토크영역과 같으며 Fig. 9의 본드선도로부터 식(12), (13)을 유도할 수 있다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{(I_{23s_2} + I_{23s_1}c_2)T_t + (c_1I_{23s_2} + c_2I_{23s_1})T_{hc} + I_{23s_1}T_{bb_2} - I_{23s_1}R_dT_s}{I_{23s_1}I_{23s_2} - I_{23s_1}I_{23s_2}} \quad (12)$$

$$\text{여기서, } \omega_t = \frac{(c_1I_{23s_2} + c_2I_{23s_1})T_{hc} + I_{23s_1}T_{bb_2} - I_{23s_1}R_dT_s}{I_{23s_1}I_{23s_2} - I_{23s_1}I_{23s_2}}$$

$$\dot{\omega}_{cr} = \frac{(I_{23s_2} + I_{23s_1}c_2)T_t + (c_1I_{23s_2} + c_2I_{23s_1})T_{hc} + I_{23s_1}T_{bb_2} - I_{23s_1}R_dT_s}{I_{23s_1}I_{23s_2} - I_{23s_1}I_{23s_2}} \quad (13)$$

$$\text{여기서, } \omega_{cr} = \frac{(c_1I_{23s_2} + c_2I_{23s_1})T_{hc} + I_{23s_1}T_{bb_2} - I_{23s_1}R_dT_s}{I_{23s_1}I_{23s_2} - I_{23s_1}I_{23s_2}}$$

3 단은 H/C, F/C, F/O.C가 체결된 상태이며 Fig. 10의 본드선도로부터 식(14), (15)를 유도할 수 있다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{T_t - R_dT_s}{I_3} \quad (14)$$

$$\text{여기서, } \omega_t = \frac{-R_dT_s}{I_3}$$

$$\omega_{cr} = \omega_t \quad (15)$$

3-4 단 토크영역 변속과정은 H/C, F/C, F/O.C가 체결되며 B/B가 체결되는 과정이다. Fig. 11의 본드선도로부터 식(16), (17)을 유도할 수 있다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{T_t - R_{s_1}^2T_{bb_1} - R_dT_s}{I_{34t}} \quad (16)$$

$$\text{여기서, } \omega_t = \frac{-R_{s_1}^2T_{bb_1} - R_dT_s}{I_{34t}}$$

$$\omega_{cr} = \omega_t \quad (17)$$

3-4 단 속도영역 변속과정은 과정은 토크영역과 같으며 Fig. 12의 본드선도로부터 식(18), (19)를 유도할 수 있다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{I_{34s_2}T_t + (\frac{R_{r_1}}{R_{s_1}}I_{34s_1} - \frac{1}{R_{s_1}}I_{34s_2})T_{bb_1} - I_{34s_1}R_dT_s}{I_{34s_1}I_{34s_2} - I_{34s_1}I_{34s_2}} \quad (18)$$

$$\text{여기서, } \omega_t = \frac{(\frac{R_{r_1}}{R_{s_1}}I_{34s_1} - \frac{1}{R_{s_1}}I_{34s_2})T_{bb_1} - I_{34s_1}R_dT_s}{I_{34s_1}I_{34s_2} - I_{34s_1}I_{34s_2}}$$

$$\omega_{cr} = \frac{I_{34ss2} T_t + \left( \frac{R_{r1}}{R_{s1}} I_{34s1} - \frac{1}{R_{s1}} I_{34ss2} \right) T_{bb2} - I_{34s1} R_d T_s}{I_{34s1} I_{34s2} - I_{34ss1} I_{34ss2}} \quad (19)$$

여기서,  $\omega_{cr} = \frac{\left( \frac{R_{r1}}{R_{s1}} I_{34s1} - \frac{1}{R_{s1}} I_{34ss2} \right) T_{bb2} - I_{34s1} R_d T_s}{I_{34s1} I_{34s2} - I_{34ss1} I_{34ss2}}$

4 단은 H/C, F/C, B/B 가 체결된 상태이다. Fig. 13의 본드선도로부터 식(20), (21)을 유도할 수 있다.

$$\omega_t = \frac{T_t - \frac{1}{R_{r1}} R_d T_s}{I_4} \quad (20)$$

여기서,  $\omega_t = \frac{-\frac{1}{R_{r1}} R_d T_s}{I_4}$

$$\omega_{cr} = \frac{1}{R_{r1}} \omega_t \quad (21)$$

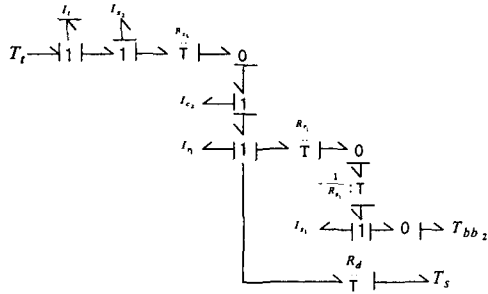


Fig. 5 Bond graph of the torque phase in the shifting 1<sup>st</sup> gear to 2<sup>nd</sup> gear

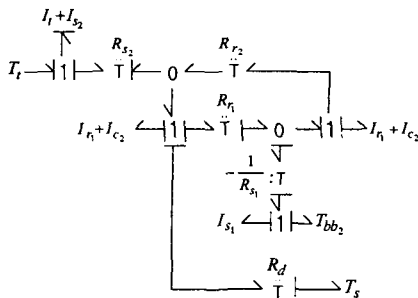


Fig. 6 Bond graph of the speed phase in the shifting 1<sup>st</sup> gear to 2<sup>nd</sup> gear

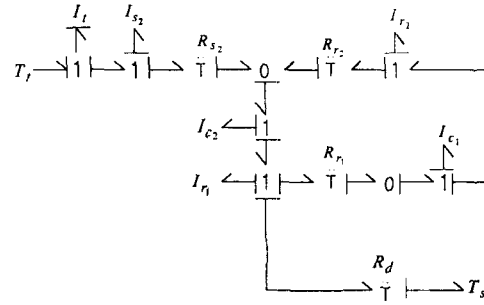


Fig. 7 Bond graph of the 2<sup>nd</sup> gear

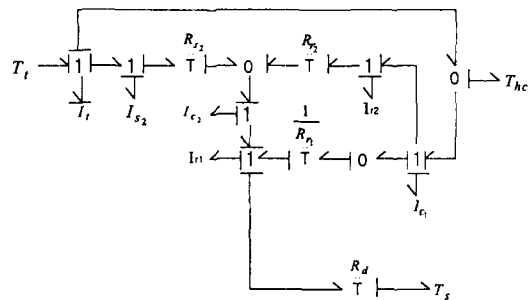


Fig. 8 Bond graph of the torque phase in the shifting 2<sup>nd</sup> gear to the 3<sup>rd</sup> gear

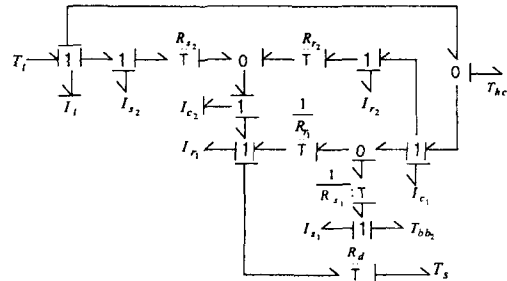


Fig. 9 Bond graph of the speed phase in the shifting 2<sup>nd</sup> gear to the 3<sup>rd</sup> gear

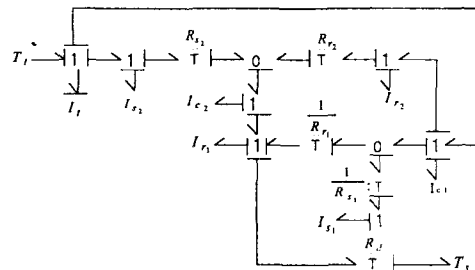


Fig. 10 Bond graph of the 3<sup>rd</sup> gear

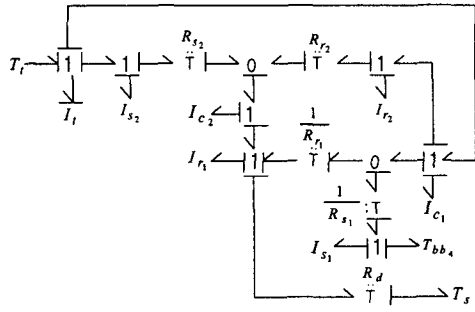


Fig. 11 Bond graph of the torque phase in the shifting 3<sup>rd</sup> gear to 4<sup>th</sup> gear

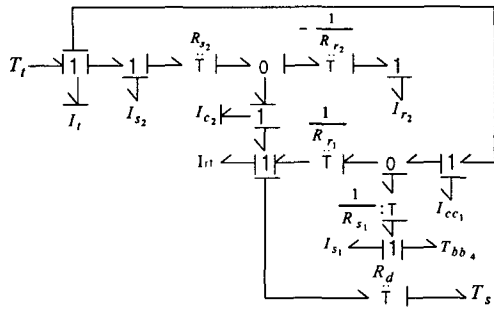


Fig. 12 Bond graph of the speed phase in the shifting 3<sup>rd</sup> gear to 4<sup>th</sup> gear

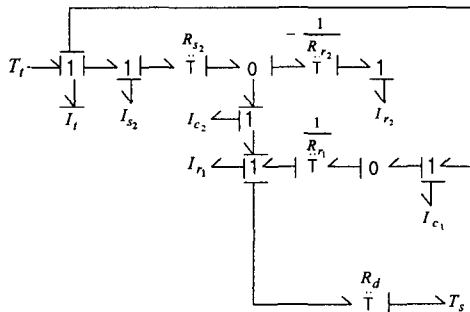


Fig. 13 Bond graph of the 4<sup>th</sup> gear

### 3. 자동변속기의 퍼지제어

Fig. 14 는 퍼지 정의역 변수인 Time(변속시간), Slip(슬립속도)의 멤버쉽함수를 나타내며 정의역 변수에 사용되는 값은 일반화된 백분율로 표시하였다. 1-2 단 변속과정에서 적용한 제어규칙은 Table 2 와 같다. 출력값은 퍼지변수  $P_{bb}$  (B/B 의 압력)이다. Table 2 의 제어규칙을 Mandani 법<sup>(4)</sup>을 이용하여 비 퍼지화시킨 룩업테이블이 Fig. 15 에 표시되어 있다. Table 2 의 제어규칙 이외에 추가적으로 Fig. 16 에

나타나 있는 가중치함수를 사용하면 제어규칙의 미흡한 점을 보충한다. 가중치함수는 제어규칙과 마찬가지로 경험적으로 설정한다.

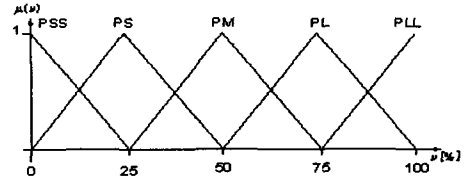


Fig.14 Generalized fuzzy domain and membership function

Table 2 Control law in the shifting 1<sup>st</sup> gear to the 2<sup>nd</sup> gear

Time \ Slip	PSS	PS	PM	PL	PLL
PSS	PSS	PSS	PS	PM	PLS
PS	PS	PS	PM	PL	PLL
PM	PM	PM	PM	PL	PLL
PL	PL	PL	PL	PL	PLL
PLL	PLL	PLL	PLL	PLL	PLL

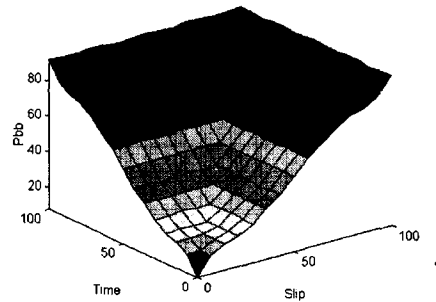


Fig. 15 Look-up table of the control law in the shifting 1<sup>st</sup> gear to the 2<sup>nd</sup> gear

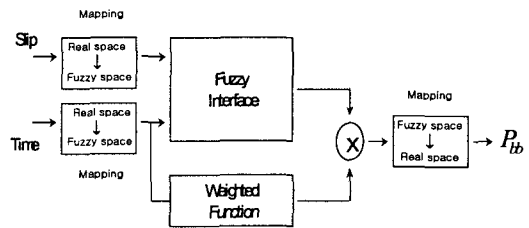


Fig. 16 Fuzzy controller in the shifting 1<sup>st</sup> gear to the 2<sup>nd</sup> gear

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

퍼지제어기를 사용한 1-2 단 변속과정을 시뮬레이션하기로 한다. Nissan 자동변속기(R01A) 모델의 파라미터들<sup>(5)</sup>을 사용하여 얻은 결과가 Fig. 17에 표시되어 있다. 퍼지제어시 출력토크가 단순 체결한 스텝압력보다 향상되었음을 알 수 있다. 1-4 단 변속기 모델의 타당성을 확인하기 위한 시뮬레이션 방법은 먼저의 경우와 동일하지만 퍼지제어기가 아닌 적절한 압력을 사용하였다. Fig. 18에는 1-4 단의 출력토크가 표시되어 있다. 1-2 단에서 퍼지제어시 출력토크의 과도응답이 상당히 향상되었음을 볼 수 있다. 그리고 1-4 단에서 변속과정의 토크영역과 속도영역은 시뮬레이션 및 실제응답을 비교한 논문<sup>(6)</sup>의 근거로 판단한 결과 본 논문의 모델링이 잘 수행되었음을 확인할 수 있다.

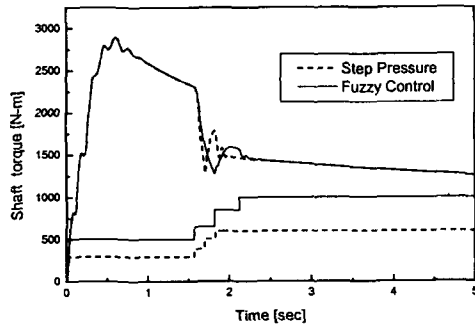


Fig. 17 Output speed for the step pressure input and fuzzy control input in the shifting 1<sup>st</sup> gear to 2<sup>nd</sup> gear

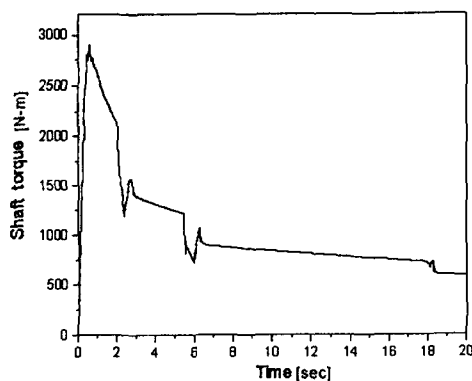


Fig. 18 Output torque from the 1<sup>st</sup> gear to the 4<sup>th</sup> gear

#### 5. 결론

본 논문에서는 본드선도기법을 이용하여 자동변속기의 단일 유성기어를 모델링 하였다. 이 방법은 일관성이 있고 적용하기가 용이할 뿐만 아니라 시스템의 각 요소들 사이의 에너지흐름에 적합하도록 논리적으로 모델링을 수행할 수 있었다. 또한 클러치 및 브레이크 밴드의 요소도 에너지 흐름에 맞게 모델링하였음을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 따라서 본드선도 기법이 자동변속기를 모델링할 때 매우 유용한 방법이라 사료된다. 그리고 제어기 설계에 있어서 퍼지제어를 보정하는 값으로 가중치의 개념을 첨가시켜 제어기 설계를 용이하게 하였다. 이 제어방식은 일반적으로 사용되는 방법이 아니고 이 시스템에 국한되는 전문가적 지식기반이다.

#### 참고문헌

1. D. C. Karnopp, *System Dynamics: A Unified Approach*, John Wiley & Sons, Inc, 1990,
2. 김종식, 동적시스템 및 제어공학, 청문각, 1994,
3. S. Minoru, "Nissan Electronically Controlled Four Speed Automatic Transmission," SAE Technical Paper No. 890530, 1989,
4. Tsoukalas, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering* John Wiley & Sons, Inc, 1997,
5. 강조웅, 자동변속기의 본드선도 모델링 및 퍼지 제어, 부산대학교 공학석사 학위논문, 1998,
6. D. Cho, "Automotive Powertrain Modeling for Control," Transaction of ASME, Vol III, December, 1989,