한국자동차공학회논문집 제8권 제4호, pp.68~84

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0068

클러치의 독립구동에 의한 자동변속기의 변속제어

The Shifting Control in Automatic Transmission by Independent-Acting Clutches

김 정 관*, 한 명 철**, 홍 금 식***
Jung-Kwan Kim, Myung-Chul Han, Keum-Shik Hong

ABSTRACT

A study to reduce the transient torque in shifting in automatic transmission has been very important issue. Recently, it is really dominant to decrease the torque by using independent-acting hydraulic circuit because we can control the clutch pressure actively and elaborately. So, we design the new hydraulic circuit to control the clutches in automatic transmission and make the module library of computer simulations. We apply the result to GM model automatic transmission and carry out 1→4 shifting simulations. By this work, we recognize the capability of active and elaborate clutch pressure control using new hydraulic circuit. In addition, We develop the tool to simulate the powertrain system. It is easier to update and exchange the subsystem model or parameters than conventional simulation tools.

주요기술용어 : 변속제어(shifting control), 독립구동 클러치(independent-acting clutch), 펄스폭 변조(PWM : pulse width modulation), PCV(압력제어 밸브), PCSV(압력제어 솔레노이드 밸브), SMV(솔레노이드 모듈레이터 밸브)

Nomenclature

A : area
C_d : flow coefficient
d : orifice diameter
I : inertia
I_{ti} : inertia of turbine on i-speed(i=1,2,3,4)
L : length
P : pressure, N/m^2
R : speed reduction ratio
R_i : i-speed gear ratio (i=1,2,3,4)
RT : reaction torque
T : torque, N · m
V_i : volume of control volume i
c.r. : reaction carrier
i.s.g.: input sun gear
i.c.g.: input carrier gear
r.s.g.: reaction sun gear
Q_i^j : flow rate from i to j
β_e : equivalent bulk modulus
ρ : mass density

* 회원, 부산대학교 대학원
** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
*** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

ω : angular velocity, rad/sec

Subscripts

ci : input carrier
cr : reaction carrier
si : input sun
sr : reaction sun
s : shaft
t : turbine
ci : clutch i (i=1,2,3,4)
12B : 1-2 band brake

1. 서 론

자동변속기는 토크컨버터, 유성기어, 유압회로, 그리고 제어를 위한 TCU로 구성되어 있으며, 외부입력에 대하여 TCU 내부에 내장되어 있는 논리에 준해 변속단을 결정하여 자동으로 변속이 수행되도록 하는 장치이다. 즉, TCU에서 유압회로 내의 해당 솔레노이드밸브로 제어입력 듀티비를 내주며 이를 바탕으로 조절된 압력이 각 클러치 및 브레이크에 공급되어 변속이 이루어진다. 그러나 이러한 유단 변속과정에서 클러치 공급압력의 형상에 따라 출력축에 각기 다른 형태와 크기의 과도토크가 발생하여 승차감을 저해하므로 클러치 압력의 적절한 제어가 반드시 요구된다. 지금까지 이러한 클러치 압력제어를 위한 여러 방안이 연구되어 왔으나, 현재에는 출력축 과도토크와 밀접한 연관이 있는 상태인 터빈속도를 미리 설계된 목표궤적으로 추종하도록 해당 클러치 압력을 제어함으로써 출력축에 발생하는 과도토크를 저감시키는 간접제어 방식이 지배적이다. 따라서 효과적인 과도토크의 저감을 위해서는 정교한 클러치 압력제어가 필요하게 된다. 이러한 요구와 함께 최근에는 전자기술과 액추에이터의 급속한 발달에 힘입어 과거의 하나의 압력제어밸브를 사용하고 각 클러치의 압력을 어큐뮬레이터의 백업압력으로 제어하던 방식과는 달리 고성능 전자제어장치를 이용하여 각각의 클러치를 독립적으로 제어하는 보다 정밀하고 다양한 기능의 유압회로를 사용하고 있는 추세이다.[1-2] 특히 클러치의 독립구동은 각각의 클러치에 독립적인 액추에이터가 할당되어 있어서 과거의 방식보다 클러치 압력의 정교한 제어가 가능한 큰 장점이 있다. 또한 클러치의 독립구동 뿐만 아니라 솔레노이드밸브 단독으로 클러치 압력을 제어하는 직접구동 클러치 방식도 있다.

본 논문에서는 자동변속기 장착 차량의 변속과도특성을 연구하기 위하여 1-4단 GM 모델 자동변속기 모델링을 수행하였고, 단순 PWM 솔레노이드밸브와 스풀밸브를 이용한 독립구동 방식의 유압회로를 설계 모델링하였다. 자동변속기의 변속성능을 개선하기 위하여 반복적 실험을 수행하려면 많은 시간과 비용이 소요되므로 시뮬레이션을 통해 그 경향을 예측하는 것이 매우 효과적이다. 따라서, 본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 자동변속기의 클러치 압력제어에 관한 동특성을 효과적으로 파악하기 위한 시뮬레이션 툴을 개발하였다. 툴 내부는 엔진, 자동변속기, 유압회로 등의 서브시스템 모듈로 구분되어 있어, 과거 대부분의 시뮬레이션 툴들이 모델이 바뀌면 소스의 대부분을 수정해야 하며 그것 또한 시스템에 대한 많은 지식이 요구되는 단점이 있는데 반해, 본 시뮬레이션 툴은 서브시스템 간의 입·출력 관계만 파악되면 모듈의 수정 및 교체가 용이한 장점이 있다.

2. 자동변속기 모델링

본 논문에서 사용된 자동변속기는 Fig. 1과 같은 복합 위성기어의 구조를 한 GM 모델 자동변속기이며 4개의 클러치, 하나의 밴드 브레이크 그리고 2개의 스프래그(sprag)로 구성되어 있다.[3] 이를 본드 그래프를 이용하여 각 단 그리고 변속 과정의 모델식을 상태방정식의 형태로 수립하였으며,[4] 아래에 시뮬레이션에 사용된 1-4단에 걸친 모델식을 나타내었다. 변속 중의 모델식은 Fig. 2와 같이 클러치 전달토크에 의해 출력축 토크가 갑자기 떨어지는 토크영역(torque

phase)과 클러치 압력이 어느 정도 상승함에 따라 실제로 기어비가 변하기 시작하면서 차속이 증가하려고 하나 차량의 관성에 의해 차속이 상승하지 못하는 이유로 과도토크가 증가하게 되는 속도 영역(speed phase)으로 구분되어 진다. 시뮬레이션 시 각 단의 판별은 기구학적 조건과 더불어 동적 제한 조건에 의하게 함으로써 실제 차량주행 상황에 가깝도록 하였다. 특히 동적 제한 조건은 각 단을 판별하기 위한 동력학적 조건으로서 슬립양 또는 반발토크를 고려한다. 예를 들어 1단에서 2단으로 변속을 할 경우, 2단으로의 변속이 완료되었음을 판별하기 위하여 단순히 현재 차량의 속도에 의한 것이 아니라, 현재 2단 클러치의 토크가 2단 클러치에 해당하는 기어(Fig. 1의 input carrier)의 반발 토크보다 큰가를 확인한다. 만일 크다면 2단으로의 변속이 완료되었다고 판별하며, 작으면 아직 클러치의 슬립이 발생하며 변속 중에 있다고 판단한다. 각 단별 클러치와 밴드의 동작은 Table 1과 같다.

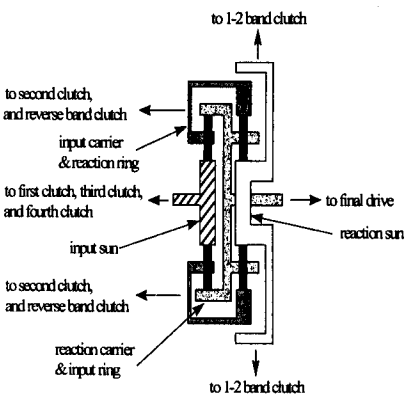

Fig. 1 Compound Planetary Gear Set

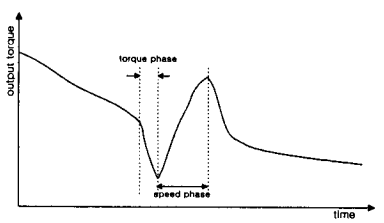

Fig. 2 Output Torque in Shifting Time

Table 1 Friction Element Application Chart

	C1	C2	C3	C4	B12
1단	ON	OFF	OFF	OFF	ON
1-2단	ON	⬆	OFF	OFF	ON
2단	ON	ON	OFF	OFF	ON
2-3단	⬇	ON	⬆	OFF	⬇
3단	OFF	ON	ON	OFF	OFF
3-4단	OFF	ON	ON	⬆	OFF
4단	OFF	ON	ON	ON	OFF

⬆ : on-coming, ⬇ : off-coming

Table 2 Slip Speed of each clutch

C1_slip	$\omega_t - \omega_{si}$
C2_slip	$\omega_t - \omega_{ci}$
C3_slip	$\omega_{si} - \omega_t$
C4_slip	ω_{si}
B12_slip	ω_{sr}

2.1절부터 2.7절까지 GM 모델 자동변속기에 대한 1→4단 모델식을 나타내었다.[Fig. 1 참고] 그리고, 기구학적 · 동력학적 조건식을 1→2단에 대해 예시하였다.[4] 동력학적 조건의 슬립양의 정의는 Table 2와 같다. 본 논문에서는 슬립양을 주로 속도 영역에서 변속 완료 여부를 판단하는데 사용하였다.

2.1 1단 모델

<상태방정식>

$$I_{t1}\dot{\omega}_t = T_t - R_1 R_d T_s \tag{1}$$

<기구학적 제한조건>

$$\omega_{si} = \omega_t, \quad \dot{\omega}_{si} = \dot{\omega}_t \tag{2}$$

$$\omega_{sr} = 0 \text{ (held by } 1-2 \text{ band)} \tag{3}$$

$$\omega_{ci} = \frac{R_1}{R_2}\omega_{si}, \quad \dot{\omega}_{ci} = \frac{R_1}{R_2}\dot{\omega}_{si} \tag{4}$$

$$\omega_{cr} = R_1\omega_{si}, \quad \dot{\omega}_{cr} = R_1\dot{\omega}_{si} \tag{5}$$

<동적 제한조건>

$$T_{c1} \geq T_t \tag{6}$$

$$T_{12B} > RT_{12B} \tag{7}$$

여기서,

$$RT_{12B} = \frac{R_{sr}}{R_{ci}}\left(\frac{T_t-(I_t+I_{si})\dot{\omega}_t}{R_{si}} - I_{ci}\dot{\omega}_{ci} + (1-\frac{1}{R_{si}})T_{c2}\right) \tag{8}$$

$$I_{t1} = I_t + I_{si} + R_1^2 I_{cr} + \frac{R_1^2}{R_2^2} I_{ci} \tag{9}$$

$$R_1 = 1단\ 기어\ 감속비 = \frac{R_{ci}R_{si}}{1-R_{ci}R_{cr}} \tag{10}$$

$$R_2 = 2단\ 기어\ 감속비 = R_{ci} \tag{11}$$

$$R_d = 최종\ 출력\ 감속비 \tag{12}$$

$$T_s = 차축에\ 걸리는\ 토크 \tag{13}$$

I_t, I_{si}, I_{ci}는 터빈, i.s.g.와 i.c.g.의 관성을 나타내며, T_t는 터빈 토크, T_{c2}는 유체 압력에 의해 클러치 2에 나타나는 반응 토크, 그리고 ω_t는 터빈의 회전속도를 나타낸다.

2.2 1→2단 모델

TCU 내의 변속예정도에 의해 2단으로의 변속 시점이 되면 P_{c2}가 on-coming되기 시작하여 2단으로의 변속이 시작된다

토크 영역 (torque phase)

<상태방정식>

$$\omega_t = \omega_{si},\quad \dot{\omega}_t = \dot{\omega}_{si} \tag{15}$$

$$\omega_{sr} = 0\ (\text{held by } 1-2 \text{ band}) \tag{16}$$

$$\omega_{ci} = \frac{R_1}{R_2}\omega_{si},\quad \dot{\omega}_{ci} = \frac{R_1}{R_2}\dot{\omega}_{si} \tag{17}$$

$$\omega_{cr} = R_1\omega_{si},\quad \dot{\omega}_{cr} = R_1\dot{\omega}_{si} \tag{18}$$

<동적 제한조건>

$$T_{c1} > T_t \tag{19}$$

$$T_{B12} > RT_{B12} \tag{20}$$

여기서,

$$RT_{B12} = \frac{R_{sr}}{R_{ci}}\left\{\frac{T_t-(I_t+I_{si})\dot{\omega}_t}{R_{si}} - I_{ci}\dot{\omega}_{ci} + (1-\frac{1}{R_{si}})T_{c2}\right\} \tag{21}$$

R_1, R_2는 각각 1단과 2단의 기어비, T_s는 출력축 토크, T_{c2}는 유체 압력에 의해 클러치 2에 나타나는 반응 토크를 의미한다.

속도 영역 (speed phase)

이 상태는 일방향 스프래그에 의해 i.s.g.가 터빈으로부터 분리되어 자유회전하며 i.c.g.가 터빈과 같은 속도로 운동하게 되는 중간과정이다.

<상태방정식>

$$I_t\dot{\omega}_t = T_t - T_{c2} \tag{22}$$

$$I_{cr12}\dot{\omega}_{cr} = \frac{T_{c2}}{R_2} - R_d T_s \tag{23}$$

<기구학적 제한조건>

$$T_{B12} > RT_{B12} \tag{35}$$

여기서,

회전하기 시작하며 속도 영역이 시작된다.

<상태방정식>