

## 자동변속기 변속 제어

한 상 서, 이 교 일  
서울대학교 기계항공공학부

### 1. 서론

자동변속기(Automatic Transmission)는 말그대로 자동으로 변속을 수행하여 엔진의 동력을 차속과 스톱/스타트 개도에 따라 차체로 전달하여 차량을 구동하는 기계 요소로서, 엔진과 함께 자동차의 구동계를 이루는 핵심적인 요소이며 자동차 내의 여러 기계 장치 중 가장 고도의 설계 기술이 요구되는 분야 중 하나이다.

자동변속기는 1930년대 초부터 미국에서 개발되기 시작하였으며, 초기에는 2단으로 출발하여 3단을 거쳐 지금은 4단 자동변속기가 보편화 되어 있다. 최근에는 5단 자동변속기가 중대형차를 중심으로 장착되고 있는 추세이다.

자동변속기의 개발 추세를 보면, 70년대 후반부터 동력전달효율을 증대시킨 토크 컨버터의 록업 장치가 적용되고, 80년대 초반에 보급된 마이크로프로세서를 이용한 전자제어장치가 선보였으며, 고속 주행 시 소음 저감과 연료 소비율을 감소 시킨 오버 드라이브 기어가 사용되었다. 80년대 중반부터는 승차감 향상을 위한 변속 품질 제어에 관한 연구가 활발해졌다. 90년대부터는 적응제어, 퍼지제어 및 학습제어 등의 현대제어이론을 적용한 변속제어 알고리즘이 개발되어 변속 품질 개선과 연비 향상에 박차를 가하고 있다.

본 논문에서는 자동변속기의 구조 및 기능을 파악하고, 변속 품질 향상을 위한 제어 기법의 연구 동향에 대해 기술하고자 한다.

### 2. 자동변속기의 구조와 작동 원리 및 기능

자동변속기의 구조는 그림 1과 같고, 주요 구성 요소는 다음의 네 가지로 구분될 수 있다.

- 동력전달계(Powertrain)
- 토크컨버터(Torque Converter)
- 유압제어시스템(Hydraulic Control System)
- 변속기전자제어장치(Transmission Control Unit)

각 요소별로 구조 및 작동 원리를 간단히 살펴보고자 한다.

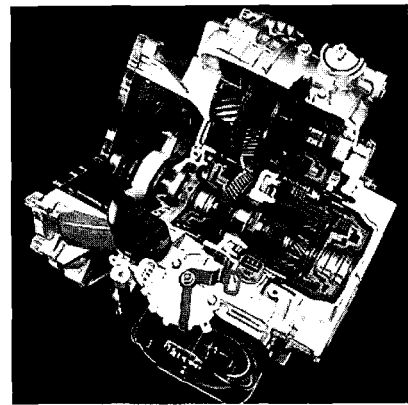


그림 1. Section View of Automatic Transmission.

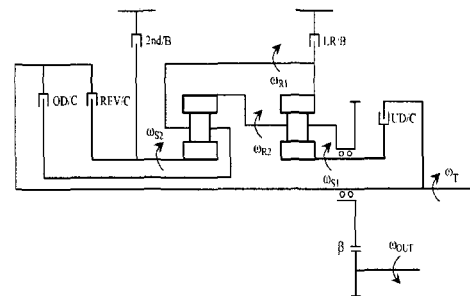


그림 2. Stick Diagram of Powertrain.

#### 2-1. 동력전달계

동력 전달계는 엔진으로부터 입력되는 토크를 전달하는 기어 열이며 실제 차량을 구동하는 동력전달 경로에 해당한다. 4개 내지는 5개의 정해진 기어비에 의해 토크를 전달하며, 각 단별로 정해져 있는 마찰 요소를 작동/해제함으로써 기어비를 자동으로 조절할 수 있다. 일반적으로 마찰 요소의 작동/해제는 작은 공간에서 큰 힘을 낼 수 있는 유압시스템을 적용하여 제어하고 있다. 동력 전달계의 구성 요소는 다음과 같다.

- 기어열
- 마찰 요소(클러치, 브레이크)

- 최종감속기어
- 일방향클러치

그림 2는 동력전달계의 개략도를 나타내며, 그림 3은 이러한 동력전달계를 해석하여 각 단별 체결 마찰 요소와 속도를 나타낸다.

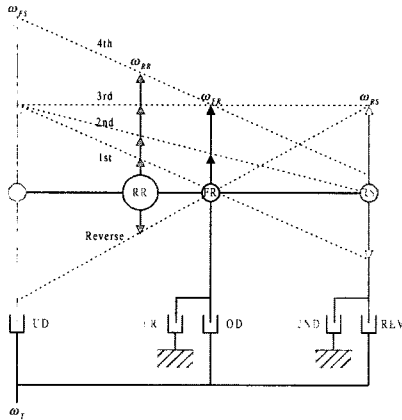


그림 3. Velocity Diagram of EF-A/T.

## 2-2. 토크컨버터

토크컨버터란 유체클러치와 비슷한 원리로 회전력에 의해 발생하는 유체력을 이용하여 동력을 전달하는 요소다. 그림 4 입력(pump)과 출력(turbine)사이 스테이터(stator)가 있어서 유체력을 증배할 수 있으

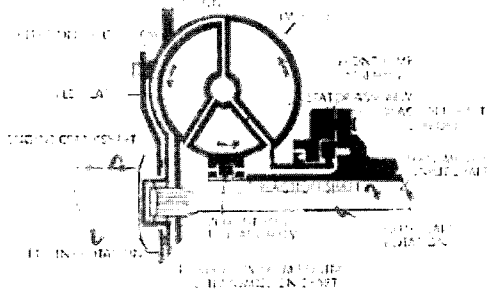


그림 4. Schematic of Torque Converter.

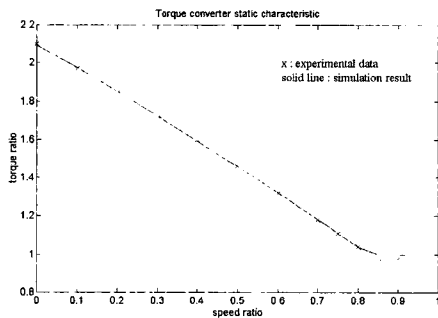


그림 5. Steady-state Characteristic of Torque Converter. (Torque Ratio vs. Speed Ratio)

며, 일정 속도 이상이 되면 더 이상의 토크 증배가 일어나지 않는다. 그림 5 수동변속기의 경우, 차량 출발 시 엔진에 과도한 부하가 걸리는 것을 막기 위해 운전자가 클러치를 제어하여 차량을 구동하나, 자동변속기의 경우는 토크컨버터가 장착되어 있어서 차량 출발 시 토크컨버터의 토크 증배에 의해 엔진에 걸리는 과도한 부하를 극복하며 차량을 구동할 수 있다.

## 2-3. 유압제어시스템

유압제어시스템은 자동변속기의 핵심 부품으로서, 동력전달계의 기어비를 변경하게 하는 마찰 요소의 작동/해제를 제어한다. 일반적으로 마찰 요소에 해당하는 클러치와 브레이크는 습식다판클러치의 구조로 되어 있으며, 유압제어시스템에 의한 클러치 피스톤의 작동에 의해 작동/해제된다. 클러치 피스톤은 밸브블록으로부터 유량을 공급 받고, 이에 의해 형성되는 압력에 의하여 작동한다. 유압제어시스템의 구성 요소는 다음과 같다.

- 오일 펌프
- 밸브블록
- 클러치/브레이크 실린더

밸브블록은 각종 밸브, 체크볼, 오리피스, 어큐뮬레이터 등이 장착되어 있는 블록으로서, 블록내의 유로를 따라 유량이 흐르게 되며, 밸브블록에서 공급되는 유량은 변속기하우징 내의 유로를 통하여 클러치/브레이크 실린더에 공급된다.

유압제어시스템을 기능별로 세분화하면 다음의 세 부분으로 나눌 수 있다.

- 라인압력 제어부
- 토크컨버터 댐퍼클러치 제어부
- 클러치/브레이크 제어부

### 1) 라인압력 제어부

라인압력 제어부는 펌프로부터 유량을 공급 받아서 유압시스템에서 기준이 되는 압력을 설정하는 역할을 한다. 일반적으로 저단에서는 전달 토크가 크므로 높은 압력을, 고단에서는 낮은 압력을 유지하도록 설계되어 있으며, 최근에는 동력 손실을 줄이기 위해 최적을 라인압력을 유지하도록 가변 라인압력 제어 방식을 사용하기도 한다.

### 2) 토크컨버터 댐퍼클러치 제어부

토크컨버터는 특성상 일정 속도 이상이 되면 토크 증배가 일어나지 않으며, 유체력에 의한 손실 에너지 때문에 전달 효율이 떨어지게 된다. 그러므로, 고속에서 토크컨버터의 입력과 출력을 직결하여 유체력에 의한 손실을 줄이게 되는데, 이것을 록업(Lock Up)이라 하고, 입력과 출력을 직결하는 엑츄에이터를 댐퍼클러치 혹은 록업클러치라고 한다. 댐퍼클러치는 토크컨버터의 작동을 제어함으로써 연비를 향상시키기 위한 기구이나 작동영역이 고속으로 제한

되어 있으므로, 작동영역을 넓혀서 연비를 더욱 향상시키기 위해 슬립제어(Slip Control)를 적용하기도 한다. 또한 댐퍼클러치 체결 시 발생하는 과도 토크에 의한 충격을 저감하기 위해 정교한 압력제어가 요구된다.

3) 클러치/브레이크 제어부

실제로 변속에 관련된 클러치/브레이크를 제어하는 유압시스템을 말하며, 자동변속기의 유압제어시스템의 핵심 부분이라고 할 수 있다. 클러치/브레이크의 작동/해제 시 발생하는 과도 토크에 의해 변속 충격이 발생하고 승차감이 떨어지게 되므로, 정교한 압력 제어를 통해 과도 토크를 저감함으로써 우수한 변속 품질을 얻는다. 과거에는 순수 유압제어 방식이 사용되어 수동적으로 클러치/브레이크의 압력을 형성하였으나, 최근에는 전자제어 기술과 전자 제어 밸브의 발달로 인하여 능동적인 압력제어가 가능하게 되었다.

클러치/브레이크 제어부의 핵심 부품은 솔레노이드에 인가되는 전류에 의해 스톱 밸브를 구동하는 전자제어밸브이며, 작동 방식에 따라 PWM 밸브, 비례제어 솔레노이드 밸브 등이 있다.

2-4. 변속기전자제어장치

변속기전자제어장치는 각종 센서로부터 신호를 입력 받아 차량 상태를 파악하고, 상황에 맞는 지령을 출력하여 변속을 수행하게 하는 전자제어장치이다. 즉, 자동변속기에 의해 자동으로 변속을 수행하게 하는 핵심 부품으로서, 사람의 두뇌에 해당하는 부분이다. 일반적으로 8 bit 혹은 16 bit microprocessor를 이용하여 변속 제어 알고리즘을 구현하고 있으며, 각종 액츄에이터의 구동회로를 포함한다.

3. 자동변속기의 제어

자동변속기는 변속 시점을 판단하여 자동으로 변속을 수행하는 기구이다. 여기서 '변속 시점 판단'은 차량의 상황에 맞는 단을 결정하는 것으로서 각종 센서로부터 입력되는 신호 정보를 가지고 TCU내에 정해져 있는 변속 시점 판단 알고리즘에 따라 변속 여부를 판단하게 된다. '자동으로 변속을 수행'한다는 것은, TCU로부터 변속지령이 내려지면 자동변속기 내부에서 자동으로 기어비가 바뀌어서 변속이 일어나는 것을 말하며, 유압제어시스템의 클러치/브레이크 제어부에 의해 형성된 압력에 의해 각 단별로 클러치/브레이크가 체결/해제되고 유성기어와 기어열에 의해 동력을 전달함으로써 변속이 수행된다.

즉, 변속을 '언제' '어떻게' 할 것인가라고 자동변속기의 제어를 크게 두 가지로 나눈다면, '언제'에 해당하는 '변속 시점 판단'과 '어떻게'에 해당하는

'변속 과정 제어'로 나눌 수 있다. 일반적으로 변속 시점 판단은 차량의 정특성을 반영하며 주로 연비에 관련되어 있고, 변속 과정 제어는 동특성을 반영하며 주로 변속 품질에 관련되어 있다. 두 가지 제어에 대하여 유압제어시스템과 변속기전자제어장치를 중심으로 제어 방식, 제어 전략, 연구 개발 동향 등에 대해 알아 보자.

3-1. 변속 시점 판단

변속 시점 판단은 엔진 특성과 자동변속기의 변속비에 따라 결정되는 변속 선도를 기준으로 차량 상태에 맞게 변속 여부를 결정하는 것을 말한다. 변속 시점에 따라 엔진 동력의 전달 효율이 달라지므로 차량의 연비와 관련 있는 중요한 제어라고 할 수 있다.

앞에서도 설명하였듯이, 자동변속기는 정해진 기어비를 갖는 유단변속기이므로, 차량의 상태와 운전자의 의지를 반영하여 최적의 동력전달이 이루어질 수 있도록 변속을 해야 한다. 수동변속기의 경우, 운전자가 차량의 속도, 현재 차량의 가속도(혹은 감속도) 등을 판단하여 변속 지령을 직접 내리고 변속조작 또한 운전자가 수행하게 된다. 자동변속기의 경우, 미리 정해져 있는 변속패턴에 의하여 변속시점을 판단하게 되고 변속지령이 내려지면 자동으로 변속 조작이 일어난다. 여기서 '미리 정해져 있는 변속 패턴'이란 일반적으로 차속과 스로틀 개도에 따라 변속단을 결정하는 방법을 말하며, 변속기전자제어장치(TCU)내에 프로그램화 되어 있다. 정해진 변속패턴을 '변속 선도'라고 하며, 이것에 의해서 변속이 일어난다. 변속 선도는 차량의 속도와 스로틀 개도에 의해 변속 시점을 판단하므로 정적 특성을 고려한다고 볼 수 있으며, 일단 차량 속도와 스로틀 개도가 정해지면 항상 같은 시점에서 변속이 일어나므로 주행 부하, 운전자의 의지 등 동적인 상황 변동에 대처하기 어렵다. 그러므로, 동적인 요소를 고려하여 변속 시점을 판단하기 위해, 차량의 속도, 스로

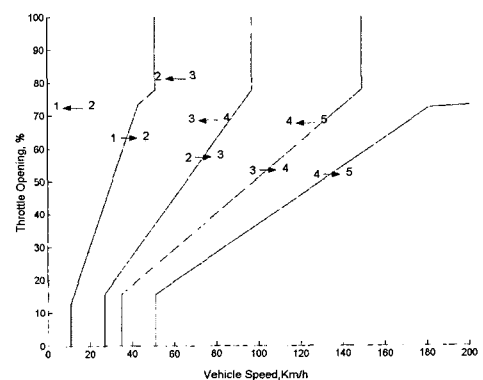


그림 6. Shift Map of 5 A/T.

를 개도, 차량의 가속도까지 고려하여 변속 시점을 판단하는 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 고급차종의 경우 운전자의 습관을 변속 시점 판단에 반영하는 FUZZY 제어나 학습 제어를 통하여 우수한 가속 성능과 연비 성능, 변속 품질 등을 나타내고 있다. 그림 6에 일반적인 변속순도를 나타내었다.

### 3.2. 변속 과정 제어

변속 과정 제어는 변속 시점 판단에 의해 변속 지령이 내려지면 실제로 기어비를 변경하는 과정에 대한 제어를 말한다. 변속 과정은 마찰 요소의 작동/해체에 따라 토크 영역(Torque phase)과 관성 영역(Inertia phase)으로 나눌 수 있으며, 각각 영역에 해당하는 제어를 통하여 과도한 전달 토크가 발생하지 않도록 하여 변속 품질을 향상하는 것이 핵심이라고 할 수 있다. 이러한 과정과 유압제어시스템에 의한 제어에 관하여 살펴 보자.

#### 1) 토크 영역과 관성 영역

일반적으로 변속 과정은 크게 토크 영역과 관성 영역으로 나뉘며, 그림 7에 나타내었다.

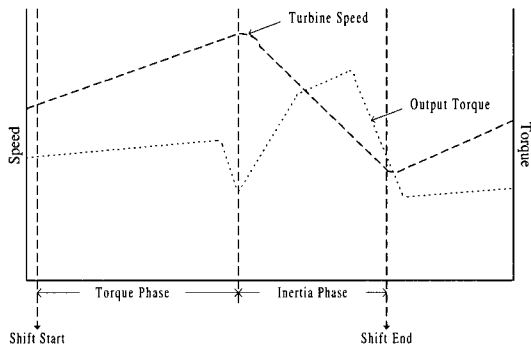


그림 7. Torque Phase and Inertia Phase.

토크 영역은 회전 요소의 각속도 변화 없이 클러치 압력에 의한 구속 토크의 변화가 있는 상태로서, 클러치 사이에 토크는 전달되나 동력은 wjs달하지 않는 상태이다. 이 영역에서는 측정 가능한 속도의 변화가 없기 때문에 제어가 불가능하다. 따라서 정상상태 클러치 압력의 특성과 개루프 실험 결과를 이용한 적절한 개루프 입력을 사용하여 변속 제어가 이루어진다.

관성 영역은 회전 요소의 각속도와 클러치 압력에 의한 구속 토크의 변화가 동시에 일어나는 2 자유도 시스템이다. 토크 영역에서 관성 영역으로의 천이는 마찰 요소의 접합을 유지하기 위한 제어 압력에 의한 구속 토크보다 마찰 요소에 작용하는 반력 토크가 더 크게 되는 순간이다. 일반적으로 변속 과정 제어는 주로 관성 영역에서 이루어지며, 속도 신호 피드백에 의한 여러가지 제어 알고리즘이 개발되어

왔다.

#### 2) 유압제어시스템에 의한 클러치 압력 제어

자동변속기에서 변속 과정 중 과도 토크를 저감하여 변속 품질을 향상하고자 하는 모든 제어는 유압제어시스템에 의해 클러치/브레이크에 형성되는 압력 제어로 귀결된다.

과거에는 순수 기계유압식 유압제어시스템을 사용하였기 때문에, 수동적으로 정해진 압력 파형을 형성하여 변속 과도 토크를 제어하였다.

최근에는 비례제어 솔레노이드 밸브, PWM(Pulse Width Modulation) 솔레노이드 밸브 등 전자제어 밸브가 발달함에 따라 밸브 블록 내에 이러한 전자제어 밸브를 장착하여 능동적으로 변속 과도 토크를 제어하고 있다. 이러한 전자제어 밸브는 보통 PWM 구동방식으로 되어 있으며, 유압제어시스템은 PWM 신호를 제어 입력으로 입력 받고 클러치/브레이크에 형성되는 압력을 출력하는 시스템이라고 할 수 있다. 그림 8에 PWM 밸브의 개략도를 나타내었다.

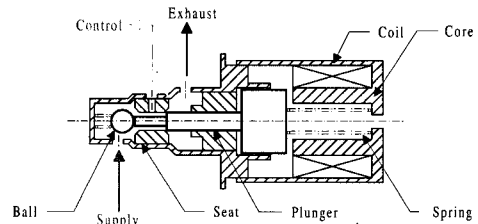


그림 8. Schematic of PWM Solenoid Valve.

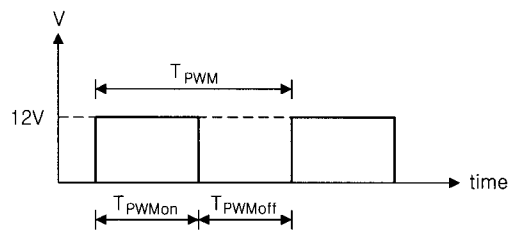


그림 9. Duty Ratio and Carrier Frequency.

$$\text{반송주파수} : f_{PWM} = \frac{1}{T_{PWM}}$$

$$\text{듀티율} : R_{PWM} [\%] = \frac{T_{PWMon}}{T_{PWM}} \times 100$$

작동 원리는 'ON'시 솔레노이드가 작동하여 스프링을 당겨서 공급되는 유량을 출력하고, 'OFF'시 스프링에 의해 스프링이 원위치로 이동하고 이에 따라 볼이 유로를 차단하여 공급 유량이 출력되지 않도록 하는 것이다. PWM 방식은 위의 ON과 OFF를 반송

주파수(carrier frequency)에 따라 반복함으로서 밸브에서 출력되는 유량에 의해 형성되는 압력을 조절한다. ON과 OFF의 비율이 듀티율이며, 이것에 의해 ON시간과 OFF시간이 결정된다.(그림 9) 즉, 밸브의 개폐가 반복되면서 유량을 출력하기 때문에 이것에 의한 출력 압력은 맥동이 있으며, 일반적으로 반송 주파수가 낮을수록 맥동압력의 폭이 커진다. 일반적으로 듀티율에 대한 출력 압력은 선형적인 특성을 나타내는데, 솔레노이드의 특성, 반송 주파수, 구동 회로에 따라 듀티율과 출력 압력의 관계가 달라진다. 그림 10에 PWM밸브의 듀티율에 대한 출력 압력의 한 예를 나타내었다.

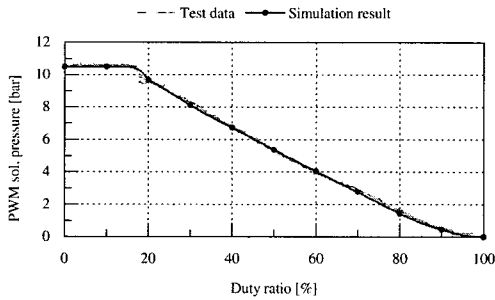


그림 10. Steady-state Characteristic of PWM Solenoid Valve.

이러한 전자제어 밸브를 이용하여 클러치/브레이크에 형성되는 압력을 능동적으로 제어할 수 있으며, 여러 가지 제어 기법은 궁극적으로 유압제어시스템의 제어 입력인 듀티율을 적절하게 설정하여 과도토크가 발생하지 않도록 클러치/브레이크의 압력을 제어하는 것을 목표로 한다.

실제 자동변속기 유압제어시스템에서 사용하고 있는 클러치/브레이크 제어 회로는 그림 11과 같다.

PWM 솔레노이드 밸브는 라인 압력을 입력 받아서 압력제어밸브(PCV)를 제어하기 위한 압력( $P_{sol}$ )을 출력한다. 보통 PWM 솔레노이드 밸브의 용량 제한에 의해 라인 압력보다 낮은 압력을 출력하게 되고, 이 출력 압력에 의해 압력제어밸브가 그림상에서 좌우로 움직이면서 압력제어밸브로 바로 입력 되는 유량을 클러치로 공급하게 된다. 즉, 압력제어밸브는 PWM솔레노이드 밸브의 출력 유량을 증폭하여 클러치로 공급하는 역할을 한다. 예를 들어, 듀티율에 의해 솔레노이드가 ON되면  $P_{sol}$ 에 의해 압력제어밸브 스펴이 그림상의 왼쪽으로 이동하게 된다. 이 경우 라인 압력으로부터 클러치로 이어지는 유로가 차단되어 클러치로 유량이 공급되지 않는다. 반대로 OFF시에는  $P_{sol}$ 이 0이므로 압력제어밸브 스펴이 스프링력에 의해 그림상의 오른쪽으로 되돌아 오고, 클러치로의 유로가 열려서 유량이 공급되어 클러치 압력( $P_c$ )를 형성한다.

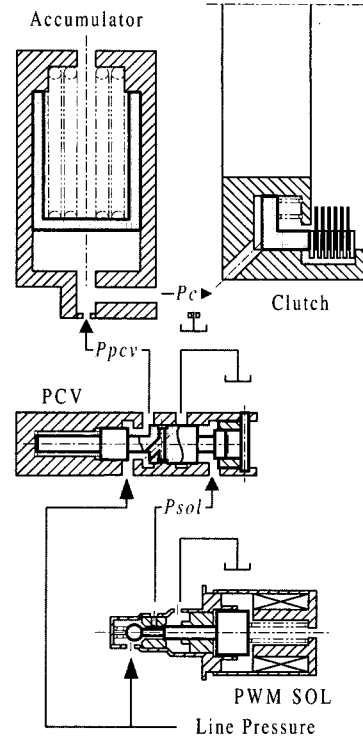


그림 11. Hydraulic Circuit for Clutch Control of A/T.

앞에서도 설명하였듯이, 듀티율에 의해 ON과 OFF를 반복하며  $P_{sol}$ 을 출력하므로,  $P_{pcv}$ 도 마찬가지로 압력 맥동을 갖는다. 이러한 맥동을 줄이기 위해 어큐뮬레이터를 장착되어 있으며, 이것에 의한 압력 맥동 현상은 그림 12와 같다. 그림 12에서 볼 수 있듯이,  $P_{pcv}$ 는 0에서 10 bar의 큰 폭을 갖고 변화하지만 어큐뮬레이터에 의해  $P_c$ 는  $P_{pcv}$ 의 평균 압력을 갖게 되고 맥동 폭도 줄어드는 것을 알 수 있다.

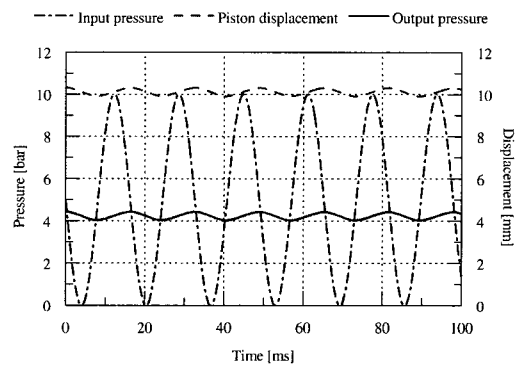


그림 12. Accumulator Behaviour.

그림 13은 실제로 상용화된 자동변속기의 1->2 상향 변속 과정에서 듀티율에 의해 제어된 압력을 나타낸다. 그림 11에 나타나 있는 회로를 이용하여 두 개의 마찰 요소(LR brake, 2ND brake)를 각각 제어하는 시스템에 대한 변속 과정이며, LR brake에 형성되

는 압력을 낮추어 LR brake를 해제하면서 2 ND brake에 압력을 형성하여 2 ND brake를 체결하는 과정을 나타낸다. 각 브레이크 별로 인가된 듀티율이 나타나 있으며, 인가되는 듀티율에 따라 형성되는 압력이 달라지는 것을 알 수 있다.

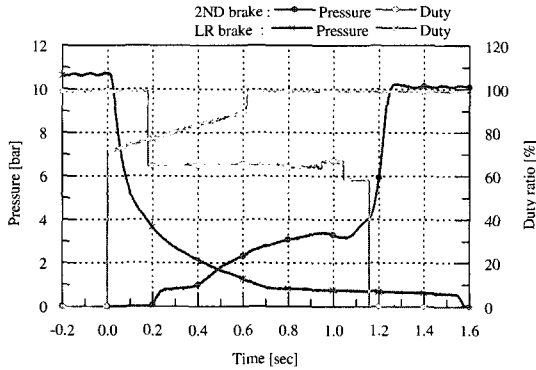


그림 13. Pressure Profile of Dis/engaged Brake During 1->2 Upshift of EF-A/T.

변속 충격은 체결되는 마찰 요소의 압력이 과도하게 형성될 때 발생한다. 즉, 압력이 급격히 형성되면 마찰 요소가 갑자기 체결되므로 토크가 순간적으로 증가하여 변속 충격으로 나타나게 된다. 반대로 압력이 서서히 형성되면 마찰 요소가 천천히 체결되어 변속 충격은 적으나 마찰 요소가 완전 체결되지 않고 미끄러지면서 회전하는 시간이 길어지므로 마찰재의 마모 및 마찰 요소 발열량의 증가 등 문제가 발생한다. 다시 말하면, 변속 시간 단축과 과도 토크 저감이라는 상반된 목표를 만족하도록 제어 전략을 수립하여야 한다. 그림 14는 변속 과정을 주요 파라미터로 나타내어 제어 전략을 수립하는 예를 보여준다. 그림 15는 이렇게 수립된 제어 전략에 의해 실제로 자동변속기 장착 차량에서 1->2 상향 변속을 수행한 실험 결과이다.

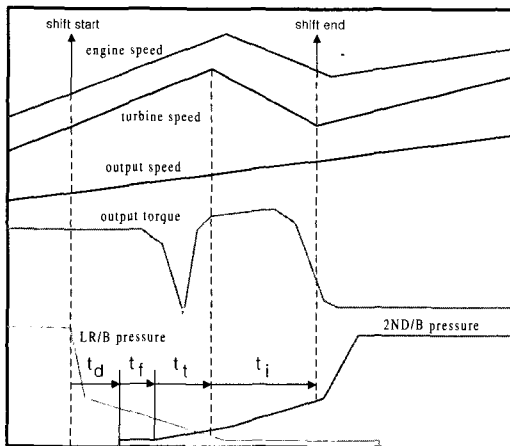


그림 14. Shift Pattern during Upshift.

그림에 사용된 기호 설명은 다음과 같다.

- Delay time,  $t_d$ : 듀티율이 인가된 후 압력이 발생되기 시작하는 시간
- Fill time,  $t_f$ : 유압 피스톤의 이동이 종료된 후 압력이 상승하기까지의 시간
- Torque phase time,  $t_t$ : 터빈 속도변화 없이 출력축 토크만이 변화되는 시간
- Inertia phase time,  $t_i$ : 터빈 속도변화가 시작되어 변속이 완료되기까지의 시간

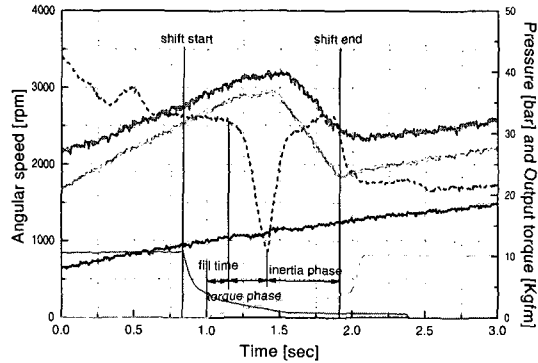


그림 15. Shift Characteristic of 1->2 Upshift.

위의 실험 결과를 앞에서 설명한 변속 과정 영역 별로 기술하면 다음과 같다.

- Fill time 과 torque phase 변속구간 : 스톱을 개도에 따른 듀티율의 개루프 제어
- Inertia phase 변속구간 : 변속 시 발생하는 터빈 각속도가 목표터빈 각속도에 일치하도록 brake 압력을 제어하는 페루프 제어
- 변속 품질(shift quality)과 내구성능 : 상반되는 특성을 갖는다. 즉, 변속시간(shift time)이 길면 클러치에서 과도한 마찰열이 발생되므로 양호한 변속품질 과 안정된 내구성능을 유지하기 위해서는 일정한 시간 내에 변속이 완료되어야 한다[1].일반적으로 자동변속기 장착 차량은 터빈 속도, 차량 속도 등을 측정할 수 있다. 변속 품질에 직접적인 영향을 주는 토크를 측정하여 되먹임하는 것이 바람직하나, 토크 센서는 고가이고 장착하기 어려우므로 측정되는 속도 신호를 이용하여 차량의 토크 정보를 추정하는 기법을 주로 사용하고 있다.

#### 4. 자동변속기 제어에 대한 최근의 연구 동향

자동변속기는 엔진과 더불어 차량의 핵심 부품임에도 불구하고 국내의 연구 기반은 취약한 실정이다. 신차 개발 시 대부분의 국내 자동차 회사들은 자동변속기를 전량 수입하거나 면허 생산을 통하여 공급하고 있다. 90년대 중반부터 학계에서도 승용차용 자동변속기에 대한 연구를 시작하여 국내 자동차 회사들과 활발한 산학 협동 연구를 진행 중이며, 그 중

주로 학계에서 발표된 논문을 중심으로 국내의 자동 변속기 제어에 관한 연구 동향을 살펴 보기로 한다.

#### 4-1. 전자제어 솔레노이드 밸브를 이용한 유압제어시스템

자동변속기용 유압제어시스템은 순수 유압식의 수동제어 방식에서 전자제어 유압식의 능동제어 방식으로 발전해왔다. 전자제어 유압식은 사용되는 솔레노이드 밸브에 따라 크게 ON/OFF 솔레노이드 밸브를 이용한 방식, PWM 솔레노이드 밸브를 이용한 방식, 그리고 비례제어 솔레노이드 밸브를 이용한 방식 등이 있다. 각각의 특징을 비교하고, 이와 관련하여 국내 연구 동향을 알아보자.

##### 1) ON/OFF 솔레노이드 밸브를 이용한 방식

일반적으로 자동변속기에는 5~6개 정도의 클러치/브레이크가 장착되어 있어서, 이를 제어하기 위해 각각 클러치/브레이크 별로 구동 유압회로가 필요하다. 초창기의 자동변속기용 전자제어 유압시스템은 ON/OFF 솔레노이드 밸브에 의해 각 단별로 유로를 변경하고, 변속 과정 중의 압력은 어큐뮬레이터에 의해 정해진 형태로 압력이 형성되도록 하는 방식을 사용하였다. 즉, 변속 충격에 직접적인 관련이 있는 클러치 압력을 하드웨어적으로 항상 일정하게 형성되게 하는 방식이었다. 이러한 방식은 구조가 복잡하고 차량의 상태를 능동적으로 반영하지 못하는 단점이 있다.

##### 2) PWM 솔레노이드 밸브를 이용한 방식

PWM 솔레노이드 밸브를 이용한 방식은 앞에서 설명한 그림과 동일한 방식으로 ON/OFF를 반복하며 압력을 제어하는 방식을 말한다. 즉, ON/OFF 솔레노이드 밸브는 단순 유로 변경 기능밖에 없으나 PWM 솔레노이드 방식은 원하는 압력을 능동적으로 형성할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 밸브의 여닫이에 의해 압력 맥동이 생기므로 이것을 해결하기 위해 어큐뮬레이터를 보통 사용하는데, 이것은 제어 관점에서 압력 형성을 더디게 하므로 응답이 느려질 수 있는 단점이 있다.

##### 3) 비례제어 솔레노이드 밸브를 이용한 방식

가장 고급형의 솔레노이드 밸브로서 스펴을 원하는 위치로 제어할 수 있으므로 정교한 압력 제어를 할 수 있다. 그러나 자동변속기의 라인 압력을 형성할 수 있는 고용량의 비례제어 밸브는 일반적으로 구하기 어렵고 가격도 비싸다.

1)의 경우, 변속 과도 상태 제어는 하드웨어에 의한 수동적 제어를 하고 있고, 2)와 3)의 경우에는 소프트웨어에 의한 능동적인 제어를 하고 있다. 대부분의 자동변속기는 가격과 성능면에서 우수한 PWM 솔레노이드 밸브 방식을 채택하고 있다.

#### 4-2. 클러치/브레이크 제어 방식

앞의 세 가지 방식은 단순히 장착된 밸브의 종류에 따라 구분한 것이고, 클러치/브레이크를 제어하는 유압제어 시스템의 제어 방식에 따라 수동형 방식, 반능동형 방식, 능동형 방식 등으로 구분할 수 있고, 어큐뮬레이터의 유무에 따라 간접구동 방식, 직접구동 방식으로 구분할 수 있다.

##### 1) 수동형 방식

1980년대 초부터 선보인 방식으로서, ON/OFF 솔레노이드 밸브 방식과 비슷하며, ON/OFF 솔레노이드 밸브의 신호에 의해 각 단에 해당하는 클러치/브레이크를 선택하고 변속 과도 압력은 어큐뮬레이터에 의해서 수동적으로 형성되는 방식이다.

##### 2) 반능동형 방식

1980년대 중반 이후부터 사용된 능동제어 방식으로서, 라인 압력을 비례제어 솔레노이드 밸브로 제어하고 클러치/브레이크에 형성되는 압력은 어큐뮬레이터에 의해서 제어되는 방식이다. 일반적으로 라인 압력에 의해 어큐뮬레이터의 배압을 조절하는 방식을 채택하고 있기 때문에 완전한 능동제어 방식이라 할 수 없다. 즉, 솔레노이드 밸브에 의해 클러치/브레이크의 압력을 제어하는 것이라기 보다는, 제어된 라인 압력을 어큐뮬레이터 배압으로 이용하여 간접적으로 클러치/브레이크의 압력을 제어한다고 할 수 있다. 또한, 1)과 마찬가지로, 각 단별 마찰 요소는 ON/OFF 솔레노이드 밸브에 의해서 유로 변경을 한다.

##### 3) 능동형 방식

1990년대부터 등장한 완전 전자제어 시스템으로서, 클러치/브레이크에 형성되는 압력을 전자제어 밸브를 이용하여 능동적으로 제어하는 방식이다. 1)과 2)의 경우에는 각 단에 해당하는 마찰 요소로의 유로를 ON/OFF 솔레노이드 밸브에 의해서 선택하고, 마찰 요소별로 어큐뮬레이터에 의해 과도 압력을 제어하고 있으나, 능동형 방식의 경우, 각 마찰 요소별로 PWM 솔레노이드 밸브가 장착되어 있어서 전자신호에 의해 각 단별 유로를 선택하고 과도 압력까지 제어하게 된다. 그림 11에 보인 방식도 일종의 능동형 방식이며, 어큐뮬레이터는 압력 맥동을 줄이는 역할을 한다[7].

능동형 방식 중, PWM 솔레노이드 밸브 대신 비례제어 솔레노이드 밸브를 사용하여 각 마찰 요소에 형성되는 압력을 직접 제어하는 방식을 클러치 직접구동 방식이라고 하며, 어큐뮬레이터와 같은 하드웨어에 의한 제어 방식이 아니라 솔레노이드 밸브를 이용한 소프트웨어에 의한 제어 방식이라 할 수 있다. 1997년 서울대에서 처음 제안 되었으며, 기존의 능동형 방식의 EF-소나타용 자동변속기를 클러치 독립 직접 구동 방식으로 개선하여 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다[2][3][8].

**4.3. 유압제어시스템의 시스템 식별(Identification)**

변속 시 발생하는 과도토크의 크기 및 형상은 마찰 요소에 형성되는 압력에 따라 좌우된다. 따라서, 마찰 요소에 형성되는 압력을 정확히 예측하고 해석할 수 있다면 변속 과도 토크를 크게 저감할 수 있을 것이다. 마찰 요소에 압력을 형성하는 유압제어 시스템은 비선형성이 강하고 온도변화에 민감하게 반응하며 unknown parameter를 포함하고 있다. 또한 Newton's 2<sup>nd</sup> law에 의하여 수립된 유압시스템 모델은 실제 변속제어기에 사용하기에는 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 따라서 실제 실험 결과에 기반하여 원하는 특성을 잘 반영하며 간단한 유압시스템 모델을 수립하기 위해 식별 기법을 적용하여 비선형 식별 모델을 수립하는 연구가 진행되어 왔다[6]. 그림 16은 시스템 식별 이론 중 신경회로망을 이용한 식별 모델의 성능을 실제 실험결과와 비교한 그림이다.

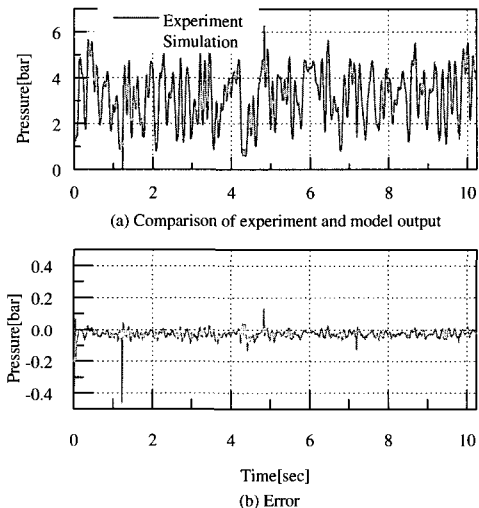


그림 16. White Noise Response of Neural Network Model.

**4.4. 토크 추정기법을 이용한 변속 과도 토크 제어**

변속 과도 토크를 저감하기 위하여 여러 가지 제어 기법이 개발되고 적용되어 왔다. 앞서서도 설명했듯이, 자동변속기 장착 차량에서 토크 신호를 측정하기 어려우므로, 측정 가능한 속도 정보로부터 토크를 추정하는 기법에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다[4][5]. 이들 방법들은 공통적으로 자동변속기 입력 토크인 토크컨버터의 터빈 토크를 추정하여 과도 상태인 관성영역에서 페루프 제어를 통해 과도 토크를 저감하는 방식을 사용하고 있다.

**4.5. 중대형 승용차용 5단 자동변속기 개발**

자동변속기는 유단변속기이며, 초창기 자동변속기는 3단이었으나 차츰 단이 증가하여 오버드라이브 기능이 있는 4단 혹은 5단 변속기가 개발되어 왔다.

버스나 트럭 같은 대형 차에 장착되어 있는 수동변속기의 경우 6단 이상의 변속단을 갖지만 자동변속기는 구조가 복잡해지고 무게가 증가하기 때문에 일반적으로 5단 이상을 사용하지 않는다. 국외의 경우, 대형 승용차에 5단 자동변속기가 장착되는 것이 일반적이고, 국내의 경우에는 아직 4단 자동변속기가 일반적이다. 단이 많은 경우 동력 전달 효율을 높일 수 있으므로 연비가 향상되는 이점이 있으나, 구조가 복잡해지고 제어 해야 할 요소가 늘어나므로 제어 전략이 매우 중요하다 할 수 있다. 그러므로 이러한 5단 자동변속기는 첨단 부품에 속하며, 현재 국내에서 중대형 승용차에 장착할 수 있는 5단 자동변속기를 개발 중이다[9].

**5. 결론**

본 논문에서는 자동변속기의 구조와 작동, 자동변속기 제어 기법의 연구 동향에 관하여 주로 유압제어시스템을 중심으로 살펴 보았다. 자동변속기 제어는 크게 변속 시점 판단 제어와 변속 과정 제어로 나눌 수 있으며, 유압제어시스템의 기능별로 다시 연비 향상을 위한 토크컨버터 특업 시스템 제어, 동력 손실 저감을 위한 라인 압력 제어, 그리고 변속 품질 향상을 위한 클러치 과도 토크 제어로 나눌 수 있다. 그러므로 자동변속기의 유압제어시스템은 제어를 위한 핵심 부품이라고 할 수 있으며, 전자제어 밸브의 발달에 따라 점차로 구조가 간단해지고 소프트웨어에 의한 제어의 비중이 커지고 있다.

**참고문헌**

- [1] 정규홍, 조백현, 이교일, "EF-자동변속기 동특성 분석 및 관성영역 터빈동특성의 선형모델에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제 7권, 제 3호, pp.145-154, 1999.
- [2] 정규홍, 조백현, 이교일, "비례제어 솔레노이드밸브가 적용된 EF-자동변속기의 변속제어기법," 한국자동차공학회 논문집, 제 7권, 제 4호, pp.251-259, 1999.
- [3] B.K. Shin, J.W. Hur, S.S. Han, and K.I. Lee, "The Analysis of Proportional Solenoid Valve and Its Application to the Shift Control of Automatic Transmission," Proceedings of the Fourth JHPS International Symposium on Fluid Power, pp. 649-654, Tokyo, 15-17 Nov. 1999.
- [4] K.S. Yi, B.K. Shin, and K.I. Lee, "Estimation of Turbine Torque of Automatic Transmissions Using Nonlinear Observers," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.122, June-2000.
- [5] B.K. Shin, J.O. Hahn, and K.I. Lee, "Development of



- Shift Control Algorithm Using Estimated Turbine Torque,” SAE 2000-01-1150.
- [6] J.W. Hur, J.O. Hahn, B.K. Shin, D.H. Kim, and K.I. Lee, “Identification of Automatic Transmission Shifting Hydraulic System Equipped with Proportional Solenoid Valve Using Neural Network,” pp.60-64, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IWAM, Dec. 1999.
- [7] 조백현, “완전전자제어방식 자동변속기용 유압시스템 개발,” 서울대학교 공학석사 학위논문, 1998.
- [8] 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, “G7차세대 자동차 - 자동변속기 기반기술개발에 관한 연구 최종보고서,” 1998.
- [9] 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, “중대형 승용차용 5단 자동변속기 유압제어 시스템 설계 및 성능해석 중간보고서,” 2000.
- [10] N. Narumi, H. Suzuki, and R. Sakakiyama, “Trends of Powertrain Control,” SAE 901154.

#### 한 상 서

1995년 서울대학교 조선해양공학과 졸업. 1997년 서울대학교 대학원 기계설계학과 졸업(공학석사). 1998년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 유압제어, 변속제어 알고리즘 설계 등.

#### 이 교 일

1942년 7월 6일생. 1966년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1971년 독일 Aachen공대 기계공학석사. 1978년 독일 Aachen공대 유압제어 박사. 1978년~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수. 관심분야는 유압제어, 생산자동화 등.