

## 자동화 변속기 클러치의 동적 특성에 관한 연구

\*박진호, 장옥진, 조성태 (서울대 대학원)

이장무 (서울대)

조한상 (서울대 정밀기계설계공동연구소)

### Abstract

This study is one of the prestudy for the design of an automated manual transmission. For understanding dynamic characteristics of the clutch that is one of the most important elements, the mathematical modeling of the core element of a manual transmission is fulfilled and using this modeling the simulation program is developed. To verify this analysis, the A.M.T dynamometer is constructed.

### 1. 서론

숙련된 운전자의 부드러운 변속동작을 구현하고, 주행상황에 대응하는 변속시점제어를 전자-유압/공압 시스템이 수행하는 자동화 변속기(Automated Manual Transmission)가 실용화되고 있다. 최근의 자동화 변속기의 기술개발 추세를 보면 70년대 후반부터 공압을 이용한 대형 트럭용 자동 클러치 시스템(Automatic Clutch System)이 개발된 것을 시작으로, 80년대 초반에 보급화된 마이크로 프로세서를 이용한 전자제어장치들이 선보였다. 이를 계기로 80년대 중반부터 변속승차감 향상을 위한 변속제어에 대한 연구가 활발해졌으며, 더 정밀한 작동을 위해 유압을 이용하고, 자동 변속기(Automatic Transmission)와 마찬가지로 클러치 자동화와 최적 변속시점을 위한 통합 변속제어장치(Transmission Control Unit : TCU)가 개발되었으며, 80년대 후반부터 발표되는 자동화 변속기에 이러한 개념이 도입되었다. 90년대 초반에는 이러한 자동화 변속기를 승용차에 도입하여, 자동 변속기와 경쟁할 만한 시스템의 내구도와 연비, 구동성능 향상을 위한 변속 알고리즘 등이 개발되어 가고 있는 추세이다. 한편 변속기어 조작은 중대형 차량 변속기의 토크 전달용량에 직접적으로 관계된다. 현재 생산되는 변속기의 출력토크는 2000 Nm 이상으로 대형화되어 있으므로 변속기어 조작 노력(Shift Lever Change Effort)을 줄이는 것이 연구의 직접적인 요점이다. 또한 비교적 가벼운 상용차와 승용차의 경우 정지-출발이 잦은 도시형 운송(Urban Delivery Work)과 주행을 행하는데 점차 주행 난이도가 커지고 있으며, 대부분의 중대형 트럭도 일의 많은 부분이 일반 도로상에서 이루어지는 추세로 점점 더 기어 변속이 늘어나고 있다.

자동화 변속기의 핵심부품인 변속제어장치(TCU)와 클러치 액츄에이터(Actuator)는 전량 수입에 의존하고 있으며, 이중 자동 클러치 시스템은 상당한 개발업체가 연구를 시도하고 있다.

자동화 변속기의 구성은 Fig.1과 같으며 본 논문에서는 이 중 가장 중요한 클러치의 동적 특성에 대하여 알아 보기로 한다.

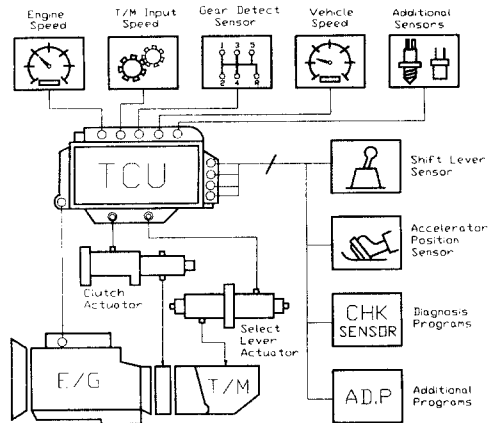


Fig. 1 Operational Principle of AMT

### 2. 수동변속기 시스템의 모델링

본 연구에서는 5단 수동변속기를 장착한 전륜구동형 승용차의 동력전달계를 연구대상으로 하였다. Fig.2는 연구대상 수동변속기의 개략도이다.

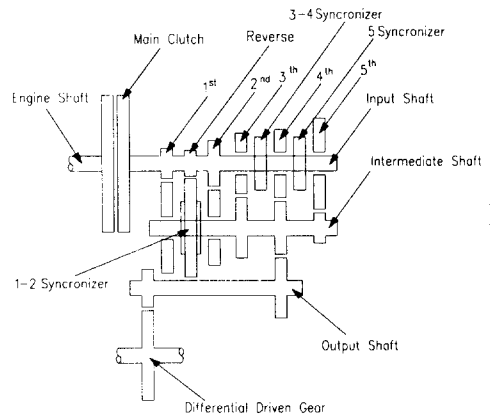


Fig.2 5-Speed Manual Transmission

## 2.1 엔진

임의의 엔진 회전속도와 스로틀(throttle)에 대한 출력토크 값은, 엔진의 크랭크 축의 회전속도에 대하여 발생하는 엔진 출력토크의 실험결과를 사용하여 구하였으며, 팬, 발전기, 유압펌프 등의 토크손실은 배제하였다. Fig.3은 엔진의 성능 곡선이다.

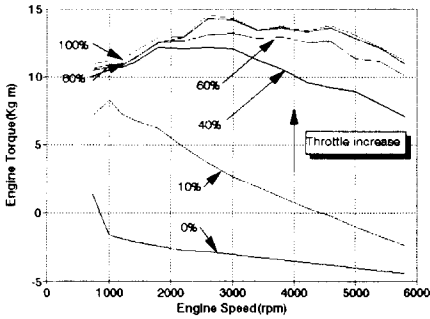


Fig.3 Performance Curve of an Engine

## 2.2 클러치

수동변속기에서 클러치는 변속을 하기 위하여 동력을 분리/결합하는 역할을 한다. 본 연구 대상 수동변속기의 클러치는 단판이며 건식이고 그 구조는 Fig.4와 같다.

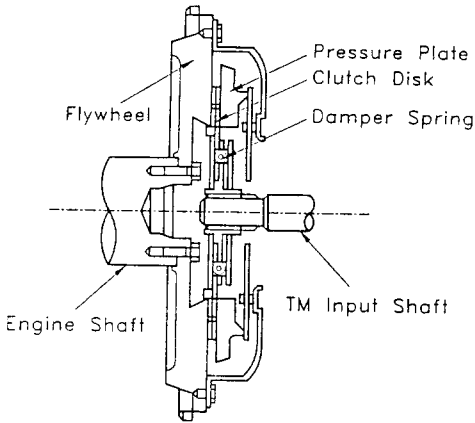


Fig.4 Clutch

### - 클러치 토크

클러치에서 발생하는 토크는 다음과 같이 모델링된다.

$$T_c = \mu n F R_m \quad (1)$$

여기서,

$\mu$  : 마찰계수

$n$  : 접촉면의 수

$F$  : 클러치면의 수직항력

$R_m$ : 등가 반경

등가반경은 다음과 같이 구한다.

$$R_m = \frac{2}{3} \frac{(R_o^3 - R_i^3)}{(R_o^2 - R_i^2)} \quad (2)$$

### - 클러치 마찰계수

수동변속기의 클러치 마찰계수는 클러치 결합과 분리에 미치는 영향이 크므로 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 마찰계수에 영향을 미치는 주요인자로는 구성재료, 클러치의 면압, 온도, 그리고 클러치 양단의 상대속도 등이나, 본 연구에서는 동적 특성에 가장 큰 영향을 주는 클러치 면의 상대속도를 포함한 모델링을 사용하였다.

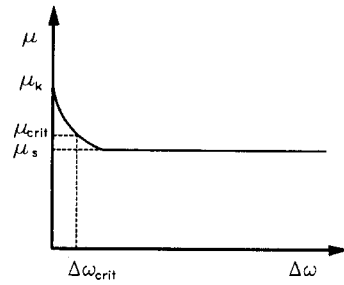


Fig.5 Characteristics of Friction Coefficient

$$\mu = (\mu_s - \mu_k) \exp\left(-\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{crit}}\right) + \mu_k \quad (3)$$

### - 클러치의 감쇠 스프링 상수

클러치의 감쇠 스프링(Damper spring)의 스프링 상수  $K_d$ 은 실험에 의해 추출된 결과가 비선형이므로 이것을 2단계로 선형화하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$\begin{aligned} \text{상대 변위} < 2.5 \text{ degree} & \quad 0.86 \text{ Kg} \cdot \text{m} / \text{deg} \\ \text{상대 변위} > 2.5 \text{ degree} & \quad 1.83 \text{ Kg} \cdot \text{m} / \text{deg} \end{aligned} \quad (4)$$

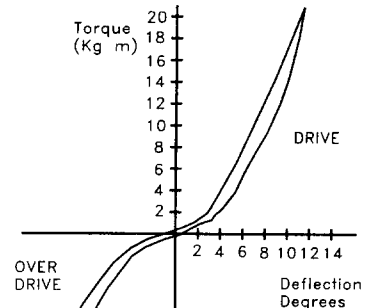


Fig.6 Characteristics of Clutch Damper Spring  
Coefficient

## 2.3 변속기

연구대상 시스템의 전체 모델링은 Fig.7과 같다. 시스템의 각 요소들은 이산계로 생각하여 등가 관성(Equivalent Inertia)등으로 처리하였으며, 클러치의 감쇠 스프링의 강성과 함께 변속기와 출력축의 강성을 등가 강성(Equivalent stiffness)으로 고려하여 모델링에 포함시켰다.

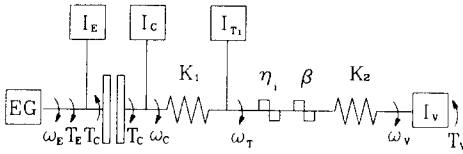


Fig.7 Overall System Modeling

- 상태 변화의 정의

변속과정은 다음과 같이 3가지 상태로 구분될 수 있다.

상태 1 ( phase 1 ) : 클러치가 완전히 결합한 상태.

상태 2 ( phase 2 ) : 클러치가 미끄러지는 상태

상태 3 ( phase 3 ) : 클러치가 완전히 분리된 상태

또한, 싱크로나이저는 클러치가 완전히 분리된 상태에 작동하므로 출력 토크에 영향을 크게 미치지 않는다. 그러므로 본 연구의 모델링에서 싱크로나이저에 대한 영향은 고려하지 않았다.

- 각 상태별 운동방정식

Phase 1 :

$$(I_E + I_C) \dot{\omega}_E = T_E - K_1(\theta_C - \theta_T) \quad (5)$$

$$I_{Ti} \dot{\omega}_T = K_1(\theta_C - \theta_T) - K_2 \left( \frac{\theta_T}{\beta \eta_i} - \theta_V \right) \frac{1}{\beta \eta_i} \quad (6)$$

$$I_V \dot{\omega}_V = K_2 \left( \frac{\theta_T}{\beta \eta_i} - \theta_V \right) - T_V \quad (7)$$

Phase 2 :

$$I_E \dot{\omega}_E = T_E - T_C \quad (8)$$

$$I_C \dot{\omega}_C = -K_1(\theta_C - \theta_T) + T_C \quad (9)$$

$$I_{Ti} \dot{\omega}_T = K_1(\theta_C - \theta_T) - K_2 \left( \frac{\theta_T}{\beta \eta_i} - \theta_V \right) \frac{1}{\beta \eta_i} \quad (10)$$

$$I_V \dot{\omega}_V = K_2 \left( \frac{\theta_T}{\beta \eta_i} - \theta_V \right) - T_V \quad (11)$$

Phase 3 :

기어가 중립인 상태만을 모델링하였다.

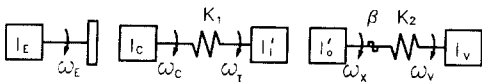


Fig.8 Modeling of Phase 3

$$I_E \dot{\omega}_E = T_E \quad (12)$$

$$I_C \dot{\omega}_C = -K_1(\theta_C - \theta_T) \quad (13)$$

$$I'_i \dot{\omega}_T = K_1(\theta_C - \theta_T) \quad (14)$$

$$I'_o \dot{\omega}_X = -K_2 \left( \frac{\theta_X}{\beta} - \theta_V \right) \frac{1}{\beta} \quad (15)$$

$$I_V \dot{\omega}_V = K_2 \left( \frac{\theta_X}{\beta} - \theta_V \right) - T_V \quad (16)$$

3. 클러치의 동적 특성 해석 방법

3.1 클러치의 작동 원리

수동변속기의 클러치는 유압식과 케이블식이 있는데, 유압식의 구조는 다음의 그림과 같다. 즉 Fig.9의 릴리스 포크 (Release fork)가 클러치의 릴리스 베어링 (Release bearing)을 밀어 줌으로서 압력판을 이동시켜 클러치가 작동하게 되어 있다.

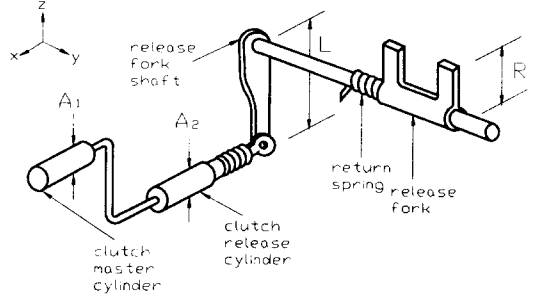


Fig.9 Clutch Operating System

클러치 마스터 실린더 (clutch master cylinder)에 가해지는 힘  $F_1$ 이라 하면, 클러치 릴리스 실린더 (clutch release cylinder)에서 가할 수 있는 힘  $F_2$ 는,

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 \quad (17)$$

으로 구할 수 있으며, 토크 관계식 (18)으로부터 릴리스 베어링 (release bearing)에 해지는 힘  $F_3$ 를 구할 수 있다.

$$T = F_2 \times L = F_3 \times R \quad (18)$$

$$F_3 = \frac{L}{R} \frac{A_2}{A_1} F_1 \quad (19)$$

식 (19)로부터 클러치 마스터 실린더 (clutch master cylinder)의 압력을 제어할 수 있다면 클러치 판에 가해지는 힘을 제어할 수 있다.

3.2 클러치 토크의 모델링

클러치에서 발생하는 토크는 클러치면에 작용하는 수직항력에 비례하므로 클러치가 결합하기 시작한 시점부터는 수직항력의 형태에 따라 클러치 토크도 결정된다. 여기서는 클러치의 실험에 의해 나온 결과를 그대로 적용하였다.

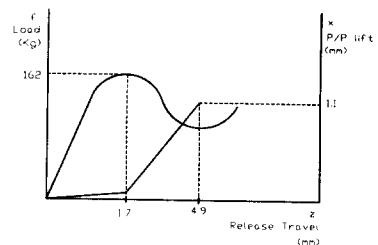


Fig.10 Characteristics of Clutch Load

#### 4. 시뮬레이션 및 실험장치의 구성

##### 4.1 동특성 해석 프로그램

수동변속기의 자동화를 위하여 먼저 수동변속기의 동특성 해석 프로그램을 만들어 시뮬레이션을 수행하였다. Fig.11은 해석 프로그램의 흐름도이다.

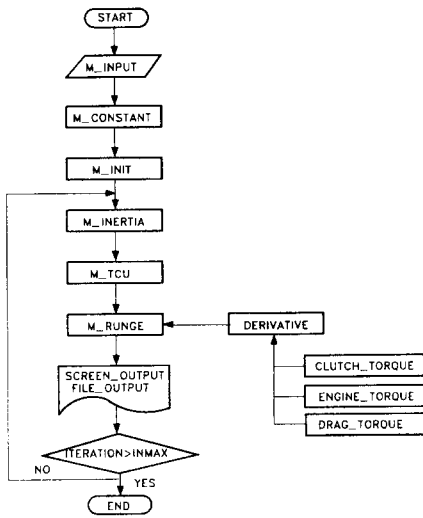


Fig.11 Flowchart of Simulation Program

##### 4.2 제원 및 데이터

- 클러치의 제원 및 데이터

클러치판의 관성 0.000103  $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$   
 클러치판의 안지름 65e-3 m  
 클러치판의 바깥지름 105e-3 m  
 클러치판의 마찰계수 0.31(static)  
 0.25(dynamic)

- 수동변속기의 제원 및 데이터

수동변속기의 자료들은 측정치이며 이들을 정리하면 다음과 같다.

Table 1 Data of Manual Transmission

	기어비	각 기어의 관성 ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$ )
1단	3.363	1.339e-3
2단	1.947	0.694e-3
3단	1.285	0.113e-3
4단	0.939	0.285e-3
5단	0.777	0.467e-3
최종감속비	4.021	.
입력축	.	1.023e-3
중간축	.	2.039e-3
출력축	.	0.611e-3

※ 각 기어의 관성은 축과 연결된 기어를 제외한 각 단수의 기어만의 관성이다.

##### 4.3 시뮬레이션

입력 함수로서 압력 형상을 주고 이에 따라 출력의 과도 토크를 최소화하는 방향으로 입력함수를 결정한다. 이에 따라 클러치의 동작시 가장 적당한 압력 형상을 찾게 된다.

Fig.12 경우는 결합시 과도토크는 작으나 결합시간이 길어져 클러치의 마모의 가능성이 있으며, Fig.13의 경우는 엔진의 속도가 떨어져 과도 토크가 많이 발생한다. Fig.14의 경우 결합 시간도 짧고 과도 토크도 작아 안전한 결합을 이룸을 알 수 있다.

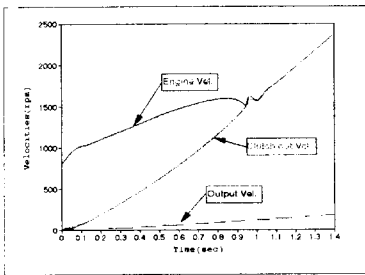


Fig.12(a) Velocities

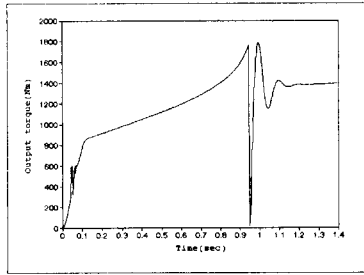


Fig.12(b) Output torque

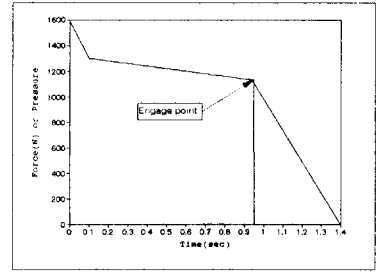


Fig.12(c) Force(Pressure) profile

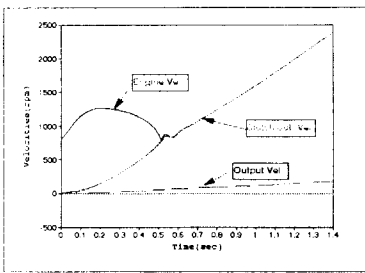


Fig.13(a) Velocities

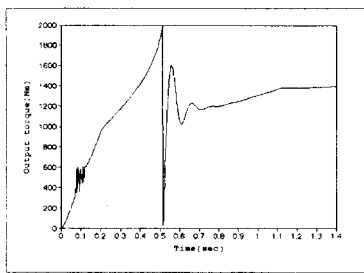


Fig.13(b) Output torque

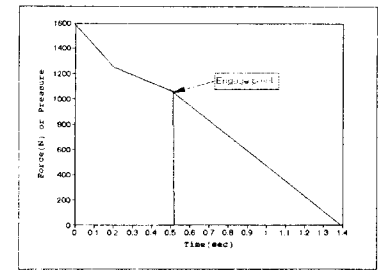


Fig.13(c) Force(Pressure) profile

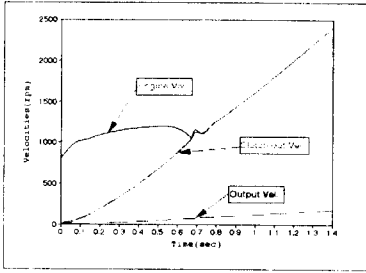


Fig.14(a) Velocities

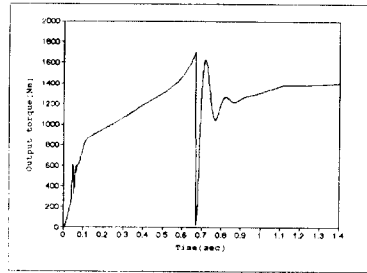


Fig.14(b) Output torque

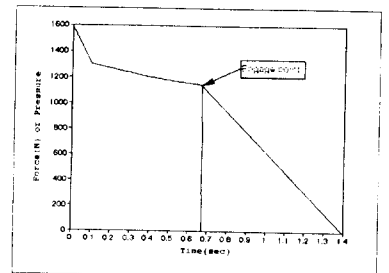


Fig.14(c) Force(Pressure) profile

4.4 실험장치의 구성

실험장치는 유압을 사용하였으며, 비례제어밸브를 사용하여 클러치 액츄에이터를 제어하였고, 광센서를 사용하여 변속 액츄에이터를 제어하였다. 실험장치의 구성도와 신호 검출부의 구성은 Fig.15, Fig.16, Fig.17와 같다.

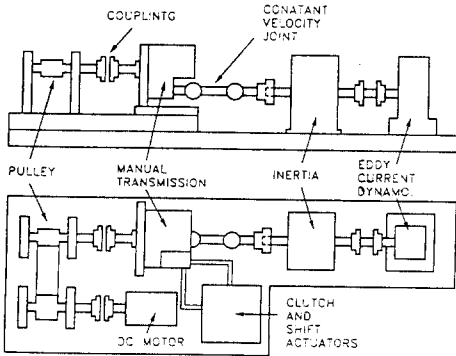


Fig.15 Schematic Diagram of Dynamometer

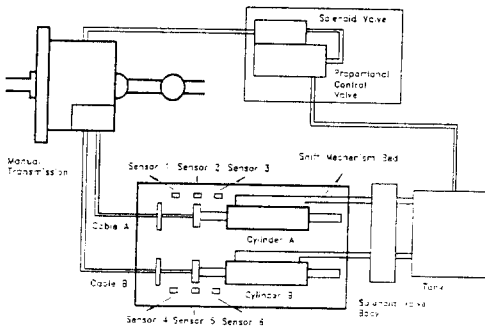


Fig.16 Schematic Diagram of Dynamometer(Cylinder part)

5. 결론

자동화 변속기 설계에서 가장 중요한 요소인 클러치의 동적 특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

(1) 수동변속기의 중요한 핵심요소들에 대한 수학적 모델링을 수행하였으며, 이를 이용하여 클러치의 동적 특성을 알아 볼 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다.

(2) 클러치의 작동원리에 대하여 모델링하였으며 이를 통해 제어변수로서 압력(힘)을 선정하였고, 이에 따라 시뮬레이션을 수행하였다.

(3) 발전시의 클러치의 작동이 중요하므로 본 연구에서는 클러치의 결합시 출력축의 과도 토크를 최소화하는 압력 형상을 시뮬레이션을 통하여 추출하였다.

(4) 자동화 변속기의 설계시 클러치의 특성에 대해서 시뮬레이션 프로그램을 통하여 설계에 응용할 수 있음을 알 수 있다.

(5) 시뮬레이션의 검증용 위하여 유압 장치를 이용한 실험장치를 구성하였다.

참고 문헌

[1] Andrew Szadkowski and Ronald B. Morford, "Clutch Engagement Simulation: Engagement Without Throttle", SAE paper 920766.  
 [2] G. G. Lucas, R. Mizon, "A Model of Clutch Engagement", C147/79. IMechE, 1979.  
 [3] Knut Nordgard and Hans Hoonhorst, "Developments in Automated Clutch Management Systems", SAE paper 950896.  
 [4] 박진호, "승용차용 자동화 변속기의 동적 특성 및 변속 알고리즘에 관한 연구", 서울대학교 공학석사 학위 논문, 서울대학교, 1996. 2.

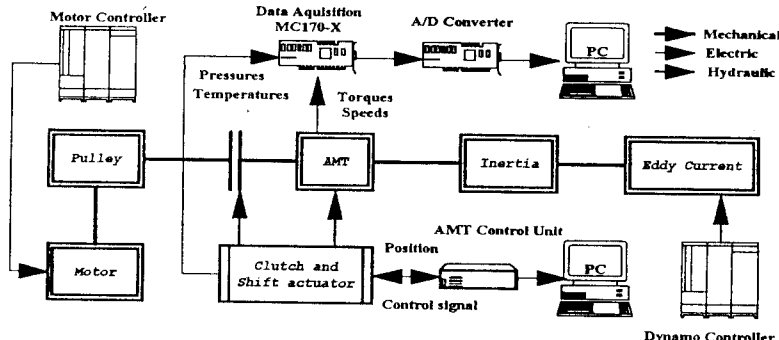


Fig.17 Schematic Diagram of Control and Sensor Signal Flow