

## 습식 클러치 특성 시험 장치 설계

신 승 인\* · 최 세 범  
한국과학기술원 기계공학과

### Apparatus for measurement of frictional characteristics of a wet clutch

Seungin Shin\* · Seibum Choi

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Republic of Korea*

**Abstract :** In the vehicle field, research on transmissions continues to improve fuel efficiency and comfort. The torque converter, which is one of the parts of an automatic transmission, has an adverse effect on fuel economy, so the use of it is getting minimized. Therefore, the clutch control during shifting needs to be made more precise to prevent shifting shock (jerk), shudder, and excessive slip. Since the shift is very short in time and measured values are limited in commercial vehicles, it is difficult to expect good performance with feed-back (FB) control, so feed-forward (FF) control, that guarantees control performance in transient situations, is more suitable. An accurate model is essential for FF control, and it is well known that a friction coefficient model, which has a major influence on shift control, is very important. The coefficient usually varies depending on the friction speed, the temperature of the friction surface, and the pressing force. This study introduces a device that can measure the coefficient of friction in various situations. The result shows the coefficient of friction changes according to the friction speed and the temperature of the friction surface, and within the experimental range, the coefficient of friction tends to increase as the two variables increase.

**Key words :** Automatic transmission(자동변속기), Friction coefficient(마찰계수), Clutch face temperature(클러치 마찰면 온도), Model-based control(모델 기반 제어), Test bench(테스트 벤치)

#### Nomenclature

$T_c$  : clutch torque, Nm  
 $R$  : effective radius, m  
 $\Delta\omega$  : clutch slip, rad/s  
 $\theta$  : clutch face temperature, °C  
 $\mu(\Delta\omega, \theta)$  : clutch dynamic friction coefficient  
 $N$  : Number of clutch plates  
 $A$  : piston area, m<sup>2</sup>  
 $P$  : clutch pressure, Pa  
 $F_s$  : return spring force, N  
 $T_{in}$  : transmission input shaft torque, Nm  
 $T_{out}$  : transmission output shaft torque, Nm

$\tau$  : hydraulic system time constant  
 $K_h$  : hydraulic valve gain  
 $i$  : current, A  
 $C_1$  : coefficient of clutch torque  
 $C_3$  : coefficient of clutch torque  
 $C_4$  : coefficient of clutch torque

#### Subscripts

c : clutch  
s : spring  
out : output shaft

\* 신승인, E-mail: minou93@kaist.ac.kr

## 1. 서론

차량분야에서 연비와 승차감의 개선에 대한 연구는 지속되고 있다. 내연기관 차량의 연비와 직접적으로 연관이 있는 변속기에는 유성기어를 사용한 automatic transmission (AT), dual-clutch transmission (DCT), continuously variable transmission (CVT) 등과 같이 다양한 메커니즘들을 사용한 변속기들이 개발되었으며, 각기 다른 장단점에 의거하여 각각 차량에 사용되고 있다. 그 중 AT는 유압 시스템과 습식 클러치를 사용하는 시스템이며 토크 컨버터의 존재로 매우 부드러운 변속감을 가지게 된다. 하지만 유체 커플링의 작동은 필연적으로 에너지를 소모하게 되는 단점으로 인해 작동을 최소화시키는 방향으로 개발되고 있다. 유체 커플링의 개입이 최소화되면 변속시 클러치의 제어는 변속 충격(jerk), 저더(shudder), 과도슬립 등을 막기 위해 더욱 정밀해져야 할 필요성이 있다. 심지어 하이브리드 차량에서는 토크 컨버터 대신 모터가 들어가게 되어 토크 컨버터의 유체커플링 역할 없이 AT가 동작해야 한다.

AT의 변속은 습식 클러치의 clutch to clutch shift<sup>1)</sup>로 이루어지며 변속 불편감은 클러치의 정밀 제어로 해결할 수 있다. 변속 순간은 굉장히 짧고, 상용화된 차량에서는 측정값들도 많이 제한되기 때문에 feed-back (FB) 제어로는 좋은 성능을 기대하기 힘들다. 정확도가 높고 간단한 모델을 만들어 그 inverse 모델을 사용하여 system input을 생성하는 형식의 FF 제어는 transient한 제어 성능이 보장되기 때문에 상황에 부합한다고 할 수 있다.

모델 기반 제어가 아닌 시간축에서 입력 전류의 튜닝으로 모든 상황에 대비하는 제어는 개발 공수의 폭발적인 증가를 야기할 수 있다. 클러치 체결 과정에 지배적인 영향을 주는 물리적 변수는 마찰계수이며 이는 많은 변수들에 영향을 받는다고 알려져 있다. Coulomb<sup>2)</sup>이 마찰계수 개념을 제안한 뒤로 누르는 힘, 마찰면의 온도, 마찰 속도 등 다양한 변수들에 의해 영향을 받는다는 연구결과들이 있다<sup>3)-9)</sup>. 연구들은 크게 두 마찰재에 대해 연구를 하였다. 첫번째로는 자동변속기 내부 클러치들에 주로 사용되는 paper based friction lining

3), 4), 10)-14) 이 있고, 다른 마찰재로는 limited slip differential에 주로 사용되는 brass friction lining<sup>5)-9)</sup> 이 있다.

마찰계수 static map 은 마찰계수는 마찰속도, 마찰면의 온도, 누르는 힘 등에 따라 마찰계수가 달라진다고 가정하고 각 변수들의 현재 값에 따라 마찰계수가 정해진다는 모델이다. 마찰계수 dynamic 모델은 누르는 힘의 변화량등 변수들의 미분값 또한 마찰계수를 정하는 변수라고 가정하는 모델이다. 각각 장단점이 있으며 Dynamic 모델은 알아야 할 특성값들이 많으며 대상 클러치에 대한 연구가 많이 필요하지만 결과는 모델과 실험결과가 잘 맞는다. Static 맵은 간단한 장점이 있으며 일부 조건에서는 잘 맞지 않는 모습을 보인다. 빠른 압력 변화, 고속에서 잘 맞는다는 연구결과가 있다<sup>15)</sup>.

마찰계수 모델을 제어에 적용하여 자동변속기 제어 성능을 개선하려는 연구들이 있었다. 온도에 의해 마찰 계수가 크게 변하는 경우 그 변화를 고려해주는 compensation 을 하지 않으면 모델을 이용한 제어 시 제어 성능이 크게 감소될 여지가 있다<sup>9)</sup>. 클러치의 마찰 특성을 분석하여 특정시점에서 클러치에 가해지는 압력을 ramp down 하는 단순한 기법을 이용해 부드러운 체결을 성공시키고 과도한 클러치 온도 증가를 막아 클러치 수명을 연장시키는 연구도 있었다<sup>16)</sup>. DCT 변속제어 시 마찰계수에 불확실성이 있다는 것을 가정하고 그 불확실성 계수를 adaptation 하는 dynamic torque observer 를 구성하여 정확한 클러치 토크를 제어하는 연구도 있었다<sup>17)</sup>. 변속기의 변속제어시 slip speed reference 생성을 위한 연구<sup>18)</sup> 와 같은 모델 기반 변속제어를 수행하기 위해서는 클러치 마찰계수를 정확하게 아는 것이 중요하다.

클러치의 특성 실험에 지금까지 많이 쓰여왔던 SAE machine No. 2<sup>19)</sup> 는 실제 자동변속기의 상황과 주요한 차이가 있다<sup>10)</sup>. SAE machine No. 2 는 Inertia dynamometer로서 클러치 체결 단계에서는 회전체의 inertial force만 사용되고 모터는 구동을 중지하여 결국 inertia에 작용하는 토크는 클러치 토크만 존재하며 감속하는 상황만 연출할 수 있다. 하지만 실제로는 torque phase의 경우 엔진 inertia에 엔진 토크가 지속적으로 가해지며 슬립 속도가 일정하게 유지되거나 증가할 수 있다. 더 정밀한 실험을 위해서는 inertia와 클러치에 토크

를 가하는 모터가 엔진과 비견될 만큼의 토크를 지속적으로 발생시킬 수 있어야 한다.

## 2. 모델링

변속기의 변속시의 모델은 아래와 같다.

$$T_c = R \cdot \mu(\Delta\omega, \theta) \cdot N \cdot (A \cdot P - F_s) \quad (1)$$

$$\Delta\dot{\omega} = C_1 \cdot T_{in} + C_3 \cdot T_c(\Delta\omega, P) + C_4 \cdot T_{out} \quad (2)$$

$$\dot{P} = -\frac{1}{\tau} \cdot P + \frac{K_h}{\tau} \cdot i \quad (3)$$

클러치 토크는 solenoid valve 로부터 발생된 automatic transmission fluid (ATF) 압력으로부터 생성되고 마찰 계수가 클러치 슬립과 온도에 따라 변한다. 클러치 슬립은 엔진에서부터 시작되어 토크 컨버터 또는 하이브리드 모터를 지난 후의 입력축 토크, 클러치가 발생시키는 토크, 변속기 출력축 토크 모든 항이 존재한다. DCT의 경우 클러치의 양쪽으로 개별적으로 식을 만들 수 있는 것과 다르다. Solenoid valve 에서부터 형성되는 ATF 압력 다이내믹스는 1차 다이내믹스로 표현할 수 있다<sup>20), 21)</sup>.

클러치 토크를 계산하기 위해서는 마찰계수의 static map 을 사용해야 하는데 이는 클러치 슬립 속도와 마찰면의 온도의 함수이다. 마찰면의 온도를 추정하기 위해서는 기존의 연구 결과<sup>22)</sup>를 사용할 수 있다.

## 3. 실험장비

클러치 마찰계수 static map 얻기 위한 실험장비는 클러치 슬립 속도, 피스톤의 누르는 힘, 전달 토크, 클러치의 온도 측정이 필요하다. 각각은 엔코더, 로드셀, 토크센서, 써미스터로 측정이 가능하며 이를 구성한 장비가 Photo. 1 에 나와있다.

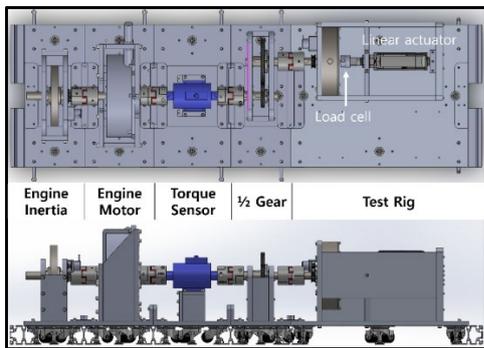


Photo. 1 Apparatus for wet clutch test rig

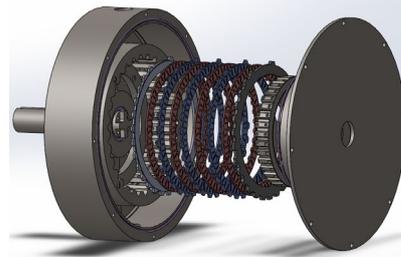


Photo. 2 Multi-plate clutches inside the test rig.



Photo. 3 Installation of the thermistor in the clutch plate.

엔진으로는 아이오닉 HEV 의 모터를 사용하였다. 제원으로는 최대 토크 170 Nm, 최대속도 6000 rpm, 최대 출력 32 kW 이다. 최대 토크 및 최대 출력일 때는 1800 rpm 가량의 성능이다. 클러치는 현대자동차 8단 후륜 자동변속기의 2단에 해당하는 브레이크-클러치를 사용하였다. 1단에서 2단으로 변속할 때 토크가 가장 크게 걸리고 열에너지가 많이 발생한다. 클러치에 걸리는 최대 토크와 회전 속도 범위를 맞추기 위해 1/2 기어를 통해 엔진과 연결하였다. 리니어 액추에이터는 16 kN 의 누르는 힘을 낼 수 있는 240 W 의 리니어 모터이며 액추에이터 끝에 로드셀을 부착하여 피스톤을 누르는 힘을 측정하였다.

Photo. 2 에는 test rig 내부의 다판 클러치들, 내부 input shaft, 외부 housing과 연결되는 톱니 모양의 지그들을 볼 수 있다. 안쪽으로 톱니가 나진 클러치와 바깥쪽으로 톱니가 나진 클러치가 번갈아 가며 위치하여 피스톤이 압착하면 마찰력을 발생시키며 input shaft 에 토크를 형성한다. 형성된 토크는 Photo. 1 에서 볼 수 있듯이 gear module 을 지나 토크 센서에서 측정된다.

Photo. 3 에서 클러치 판의 옆면에 구멍을 뚫어 삽입된 매우 얇은 (0.8 mm) 써미스터를 볼 수 있다. 구멍의 깊이를 조절하여 써미스터가 클러치 너비의 중앙에 위치하도록 하였다.

마찰계수와 관련이 있는 온도는 클러치 마찰 표면의 온도이다. 하지만 클러치 디스크로 사용되는 steel 의 열전달계수가 매우 높기 때문에 마찰 표면과 클러치 플레이트 중앙 측정점점의 온도가 동

일하다고 가정할 수 있기 때문에 써미스터에서 측정되는 온도를 사용하였다.

### 3. 실험 결과

Fig. 1 에 실험과정의 일부가 그려져 있다. 다 판 클러치를 누르는 피스톤에 가해지는 힘은 3.3 kN 가량으로 유지되고, 슬립 속도를 독립변수로 설정하여 132 rpm 으로 15 초 유지하고 20 초 동안 ramp down 시켰다. 슬립 속도가 유지되는 동안 클러치 표면 온도는 열 에너지 발생으로 원하는 온도에 도달할 때까지 온도가 올라가며 이후 슬립속도 ramp down 구간에서는 열에너지 발생량에 따라 온도가 증가하거나 감소한다. 각 시점에서 (1)을 변형한 아래 식 (4)에 따라 마찰계수를 계산할 수 있다. 실험장비에서는 리턴 스프링이 없기 때문에 리턴 스프링 힘 항은 제거하였다.

$$\mu(\Delta\omega, \theta) = \frac{T_c}{R \cdot N \cdot A \cdot P} \quad (4)$$

목표 슬립 속도와 목표 온도를 다르게 하여 실험한 조건들이 Fig. 2에 나와있다.

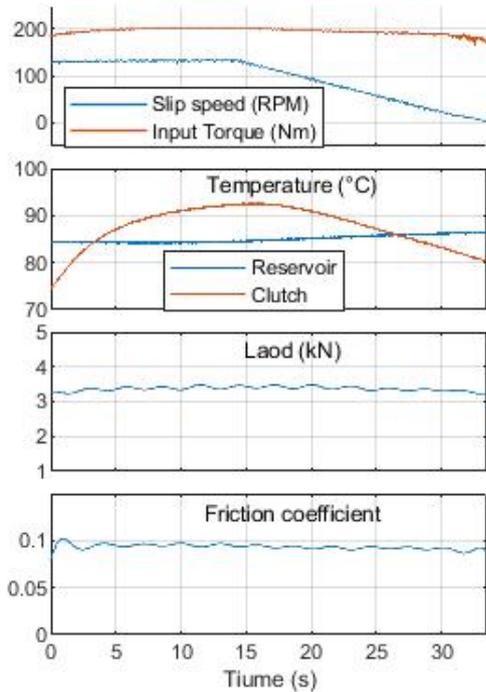


Fig. 1 Experimental condition

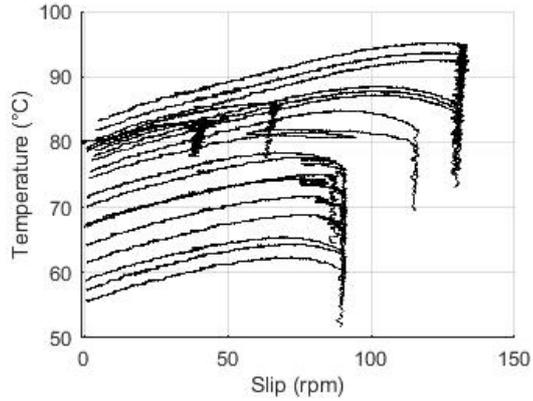


Fig. 2 Variable changes

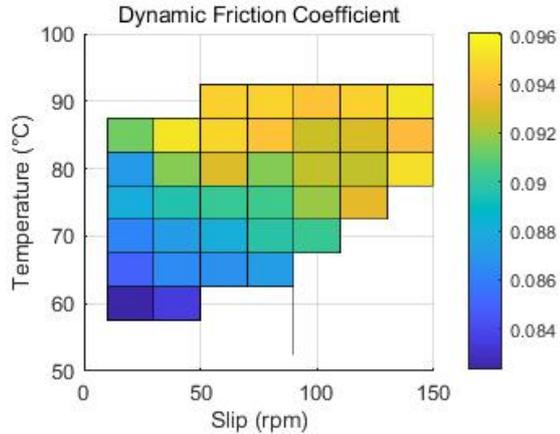


Fig. 3 Dynamic friction coefficient test result.

각 상황에서의 마찰계수를 (4) 에 따라 계산한 결과가 Fig. 3 에 그려져 있다. 실험한 범위인 5 rpm 에서 133 rpm, 55 °C 에서 95 °C 의 범위에서 마찰계수는 0.084 에서 0.096 까지 변화하며 마찰속도와 온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다.

### 4. 결론

아이오닉 HEV 모터, 현대자동차 8단 후륜 자동변속기의 2단 클러치, 리니어 모터, 로드셀, 토크센서 등을 사용하여 마찰계수 모델을 만들 수 있는 장비를 제작하였다.

마찰계수는 마찰 속도와 마찰 표면의 온도에 따라 변화하며 실험 범위 내에서는 두 변인이 증가할수록 마찰계수도 증가하는 경향을 보인다.

실험은 5 rpm 에서 133 rpm, 55 °C 에서 95 °C 까지만 진행되었으며 추후 변속제어 연구를 위해 변

속에 사용되는 모든 범위를 포함하는 넓은 범위 (1 rpm 에서 2000 rpm, 40 °C 에서 200 °C) 에서 마찰계수 측정이 필요하다.

### Acknowledgement

This research was partly supported by the BK21+ program through the NRF funded by the Ministry of Education of Korea; the Technology Innovation Program (20010263, Development of innovative design for UX environment improvement and commercialization model of wheelchair electric motorization kit with enhanced portability and convenience) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea); the grant(20TLRP-C152478-02) from Transportation & Logistics Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) of Korea government and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA); the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 2020R1A2B5B01001531).

### References

- 1) T. Minowa, T. Ochi, H. Kuroiwa, and K. Z. Liu, "Smooth gear shift control technology for clutch-to-clutch shifting," SAE Technical Papers, vol. 1999, no. 724, 1999.
- 2) C. A. Coulomb, "Theorie des machines simples en ayant egard au frottement de leurs parties et a la roideur des cordages." Bachelier, 1821.
- 3) M. Holgerson and J. Lundberg, "Engagement behaviour of a paper-based wet clutch Part 2: influence of temperature," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 213, no. 4, pp. 341-348, 1999.
- 4) M. Holgerson, "Apparatus for measurement of engagement characteristics of a wet clutch," Wear, vol. 213, no. 1-2, pp. 140-147, 1997.
- 5) P. Marklund and R. Larsson, "Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test," Tribology International, vol. 41, no. 9-10, pp. 824-830, 2008.
- 6) P. Marklund, R. Mäki, R. Larsson, E. Höglund, M. M. Khonsari, and J. Jang, "Thermal influence on torque transfer of wet clutches in limited slip differential applications," Tribology International, vol. 40, no. 5, pp. 876-884, 2007.
- 7) V. Ivanović, Z. Herold, J. Deur, M. Hancock, and F. Assadian, "Experimental characterization of wet clutch friction behaviors including thermal dynamics," SAE Technical Papers, vol. 2, no. 1, pp. 1211-1220, 2009.
- 8) V. Ivanović, J. Deur, Z. Herold, M. Hancock, and F. Assadian, "Modelling of electromechanically actuated active differential wet-clutch dynamics," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 226, no. 4, pp. 433-456, 2012.
- 9) R. Mäki, P. Nyman, R. Olsson, and B. Ganemi, "Measurement and characterization of anti-shudder properties in wet clutch applications," SAE Technical Papers, no. 724, 2005.
- 10) M. Holgerson and J. Lundberg, "Engagement behaviour of a paper-based wet clutch Part 1: Influence of drive torque," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 213, no. 4, pp. 341-348, 1999.
- 11) M. Li, M. M. Khonsari, D. M. C. McCarthy, and J. Lundin, "On the wear prediction of the paper-based friction material in a wet clutch," Wear, vol. 334-335, pp. 56-66, 2015.
- 12) M. Li, M. M. Khonsari, D. M. C. McCarthy, and J. Lundin, "Parametric analysis for a paper-based wet clutch with groove consideration," Tribology International, vol. 80, pp. 222-233,

- 2014.
- 13) M. Li, M. M. Khonsari, D. M. C. McCarthy, and J. Lundin, "Parametric analysis of wear factors of a wet clutch friction material with different groove patterns," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, vol. 231, no. 8, pp. 1056-1067, 2017.
  - 14) N. Lingesten, P. Marklund, E. Höglund, M. Lund, J. Lundin, and R. Mäki, "Apparatus for continuous wear measurements during wet clutch durability tests," Wear, vol. 288, pp. 54-61, 2012.
  - 15) J. Deur, J. Petric, J. Asgari, and D. Hrovat, "Modeling of wet clutch engagement including a thorough experimental validation," SAE Technical Papers, 2005.
  - 16) . Holgerson, "Optimizing the smoothness and temperatures of a wet clutch engagement through control of the normal force and drive torque," Journal of Tribology, vol. 122, no. 1, pp. 119-123, 2000.
  - 17) S. Kim and S. B. Choi, "Cooperative Control of Drive Motor and Clutch for Gear Shift of Hybrid Electric Vehicles with Dual-Clutch Transmission," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 25, no. 3, pp. 1578-1588, 2020.
  - 18) . Park and S. Choi, "OPTIMIZATION METHOD OF REFERENCE SLIP SPEED IN CLUTCH SLIP ENGAGEMENT IN VEHICLE POWERTRAIN," International Journal of Automotive, vol. 22, no. 1, pp. 55-67, 2021.
  - 19) AE International, "SAE No. 2 Clutch Friction Test Machine Guidelines," no. 724, pp. 776-790, 1991.
  - 20) K. Yuntae and S. Choi, "Control-oriented Modeling of a Hydraulic Clutch Actuator System," in The Korean Society Of Automotive Engineers, 2019, pp. 97-104.
  - 21) B. Z. Gao, H. Chen, K. Sanada, and Y. Hu, "Design of clutch-slip controller for automatic transmission using backstepping," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 16, no. 3, pp. 498-508, 2011.
  - 22) A. Myklebust and L. Eriksson, "Modeling, observability, and estimation of thermal effects and aging on transmitted torque in a heavy duty truck with a dry clutch," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 1, pp. 61-72, 2015.