

습식 클러치 설계를 위한 실험 변수에 따른 드래그 토크 특성 평가

Assessment of Effect of Test Parameters on Drag Torque Characteristics for Wet Clutch Design

김한솔¹, 정구현^{1,#}
Hansol Kim¹ and Koo-Hyun Chung^{1,#}

¹ 울산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, University of Ulsan)
Corresponding Author / E-mail: khchung@ulsan.ac.kr, TEL: +82-52-259-2744
ORCID: 0000-0002-9092-6784

KEYWORDS: Drag torque (드래그 토크), Friction material (마찰재), Wet clutch (습식 클러치)

As environmental and energy issues increase, energy efficiency is of great significance in the automobile industries. Drag torque of a wet clutch in an automatic transmission system is one of the causes of energy loss. In this work, the drag torque characteristics of a wet clutch as a function of rotational speed was experimentally investigated with respect to the test parameters such as automatic transmission fluid (ATF) temperature and flow rate, clearance between friction disk and separator, and the number of disks in the test system, using two different friction materials. Drag torque was found to decrease with increasing ATF temperature as a result of the decrease in viscosity. Also, drag torque decreased as the clearance between friction disk and separator increased. In addition, the drag torque increased along with the delay in the generation of maximum drag torque as the ATF flow rate increased. Furthermore, it was observed that drag torque increased with the increase in the number of disks in the test system. The drag torque characteristics as a function of rotational speed may be dependent on the friction materials. The results obtained from this work may aid in the design of wet clutch system to enhance performance.

Manuscript received: December 18, 2018 / Revised: February 4, 2019 / Accepted: February 12, 2019

1. 서론

현재 자동차 산업 전반에서 환경 보호 및 에너지 절감에 대한 요구가 증가하고 있으며, 차세대 에너지 기술 개발과 함께, 연비 향상에 대한 요구가 지속적으로 요구되고 있다. 기존 연구에 의하면, 일반 자동차에서 발생하는 손실의 약 16%는 파워트레인에서 발생하는 것으로 알려져 있으며,¹ 특히, 유체를 활용하여 동력을 전달하는 자동 변속기에서는 비교적 높은 에너지 손실이 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 자동 변속기에서 에너지 손실의 주된 원인 중 하나는, 마찰 디스크(Friction Disk, FD)과 이를 분리하는 디스크(Separator Disk, SD)에서 발생하는 드래그 토크(Drag Torque)이며, 이를 개선하기 위한 실험 및 이론적 연구가 수행되고 있다.²⁻⁴ 또한, 마찰재(Friction Material)의 특성 및 내구성을 향상시키기 위한 다양한 연구도 함께 이루어

지고 있다.⁵⁻⁸

드래그 토크는 Fig. 1(a)에 도식적으로 나타낸 바와 같이, FD와 SD 사이로 유입되는 공기와 Automatic Transmission Fluid(ATF)에 따라 변화한다.⁹ ATF는 주로 축의 중심부에서 유로를 따라 공급되며, 회전 속도가 증가함에 따라 원심력에 의하여 공급되는 ATF의 양도 증가하므로, 드래그 토크도 증가하게 된다(Phase 1). 그러나, ATF 공급량 증가는 한계가 있으므로, 드래그 토크는 계속 증가할 수 없으며, 최대값에 도달하게 된다. 이후 회전 속도가 더욱 증가함에 따라, ATF는 FD와 SD 사이를 빠르게 빠져나가고, 유입되는 공기의 양이 상대적으로 많아지므로 드래그 토크는 감소한다(Phase 2). 이러한 과정을 거친 후, 드래그 토크는 비교적 낮은 값을 가지는 정상 상태에 도달한다(Phase 3). 이와 같은 회전 속도에 따른 드래그 토크의 변화는 Fig. 1(b)에 제시하였다.

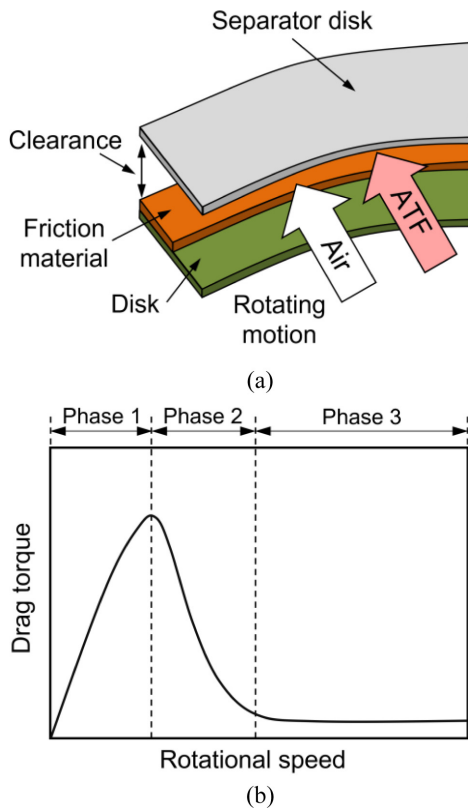


Fig. 1 Schematics of (a) wet clutch system and (b) variation of drag torque as a function of rotational speed

드래그 토크는 에너지 손실 외에, 변속시의 충격 감소와 같은 자동차 승차감에도 영향을 미친다. 그러므로, 마찰재, FD, SD, ATF 등에 의해 결정되는 습식 클러치 시스템은 작동상황에서 충격을 완화시키는 동시에 슬립이 발생하지 않을 정도로 적정 마찰 계수를 가져야 한다. 특히, 드래그 토크에 영향을 미치는 주된 인자 중 하나인 ATF는 기포가 쉽게 생기지 않아야 하며, 우수한 저온 유동성이 요구될 뿐만 아니라, 적은 점도 지수 변화, 우수한 내열 및 내산화성이 요구된다.¹⁰

이와 같은 드래그 토크의 특성을 설계 단계에서 예측하고 반영하는 것은 쉽지 않은 실정이며, 회전 속도, ATF의 온도 및 유량의 영향, FD와 SD 사이의 간극(Clearance), 그리고, 마찰재의 패턴 및 재료 특성 등의 영향을 체계적으로 평가하고 이해하는 것이 요구된다. 또한, FD 및 SD 수에 따른 드래그 토크의 변화를 실험적으로 파악하는 것도 자동변속기용 습식 클러치 설계에 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 회전속도, ATF의 온도 및 유량, FD와 SD의 간극 및 장착된 FD/SD 개수에 따른 드래그 토크의 특성을 평가하여, 자동 변속기용 습식 클러치 설계에 기여하고자 하였다. 이를 위하여, SAE No. 2 마찰 시험기를 기반으로 드래그 토크 특성 평가 장치를 설계 및 제작하였다. 실제 자동 변속기에서 얻은 FD와 SD를 이용하여 실험을 진행하였으며, 특히, 서로 다른 마찰재가 장착된 두가지 종류의 FD를 사용되었다. 본 연구의 결과는 궁극적으로 드래그 토크에 영향을 미치는 인자를 이해

하고, 설계 기술 개발에 기여함으로써, 궁극적으로 자동변속기 효율 개선에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법 및 내용

2.1 실험 재료

본 연구에서는 실제 자동변속기에 사용되는 FD 및 SD를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 2(a)는 실험에 사용된 FD의 사진과 FD에 장착된 마찰재와 디스크 경계의 광학현미경 이미지를 나타낸다. 또한 공초점 현미경(Confocal Microscopy)을 이용하여 얻은 마찰재와 디스크 경계의 3차원 이미지를 함께 제시하였다. 고탄소강으로 제작된 디스크에 마찰재가 부착되어 있었으며, Fig. 2(a)에 제시된 데이터로부터, 마찰재의 두께는 약 200 μm 인 것을 알 수 있었다. 또한, 냉간 압연 강판으로 제작된 SD가 사용되었다.

또한, 본 연구에서는 서로 다른 2가지 마찰재가 장착된 FD(시편 A 및 B)를 이용하여 실험을 수행하였으며, Fig. 2(b)는 각 마찰재 표면을 공초점 현미경을 이용하여 관찰한 결과를 나타낸다. Fig. 2(b)에 제시한 이미지로부터, 시편 A와 B의 마찰재 표면 모두에서, 섬유질(Fiber)을 명확하게 관찰할 수 있다. 그러나, 다른 상용 마찰재와 마찬가지로, 본 연구에 사용된 마찰재들도 섬유질 외에, 마찰 조절재(Friction Modifiers), 바인더(Binder) 등과 같은 다양한 재료를 포함하고 있을 것으로 예상된다.¹¹⁻¹³ 시편 A는 일반적인 습식 클러치와의 호환성을 위하여 설계된 마찰재이며, 시편 B는 진동 및 소음 특성 향상을 위하여 설계된 마찰재이다. Fig. 2(b)에 제시된 바와 같이, 두 마찰재 표면에서 특별한 표면 구조의 차이는 관찰되지 않았으나, 시편 A와 B에 부착된 마찰재의 평균 표면거칠기(R_a)는 각각 6.4 μm 및 4.8 μm 로 차이를 나타냈다. 실험에 사용된 마찰재의 설계 특성 및 표면거칠기의 차이로부터, 두 마찰재의 재료 구성은 서로 다를 것으로 예상되었다. 또한, 이러한 마찰재의 재료 구성 및 표면거칠기 차이는 드래그 토크 특성에 영향을 미칠 것으로 기대되었다. 본 실험에는 75 W 점성도 등급을 가지는 상용화된 ATF를 사용하였다. 온도 변화에 따른 ATF의 점성도 변화는 기존 연구에 제시되어 있는 바와 같이,¹⁴ 30°C에서 24 mPa·s, 100°C에서 4.1 mPa·s인 것으로 나타났다.

2.2 실험 장치 및 방법

Fig. 3(a)는 클러치 시스템의 드래그 토크 특성을 평가하기 위하여 SAE No. 2 마찰 시험기를 기반으로 설계 및 제작된 실험 장치의 사진을 나타낸다. 실험장치는 구동을 위한 스핀들 모터, 드래그 토크 측정을 위한 토크 센서, FD와 SD가 장착되어 상대 운동하는 하우징, 그리고, ATF 순환 장치로 구성되어 있다. 또한, 실제 변속기의 작동 조건 및 환경을 고려하여, ATF의 유량과 온도, FD와 SD의 상대 속도 및 간극을 조절할 수 있도록 하였다.¹⁴

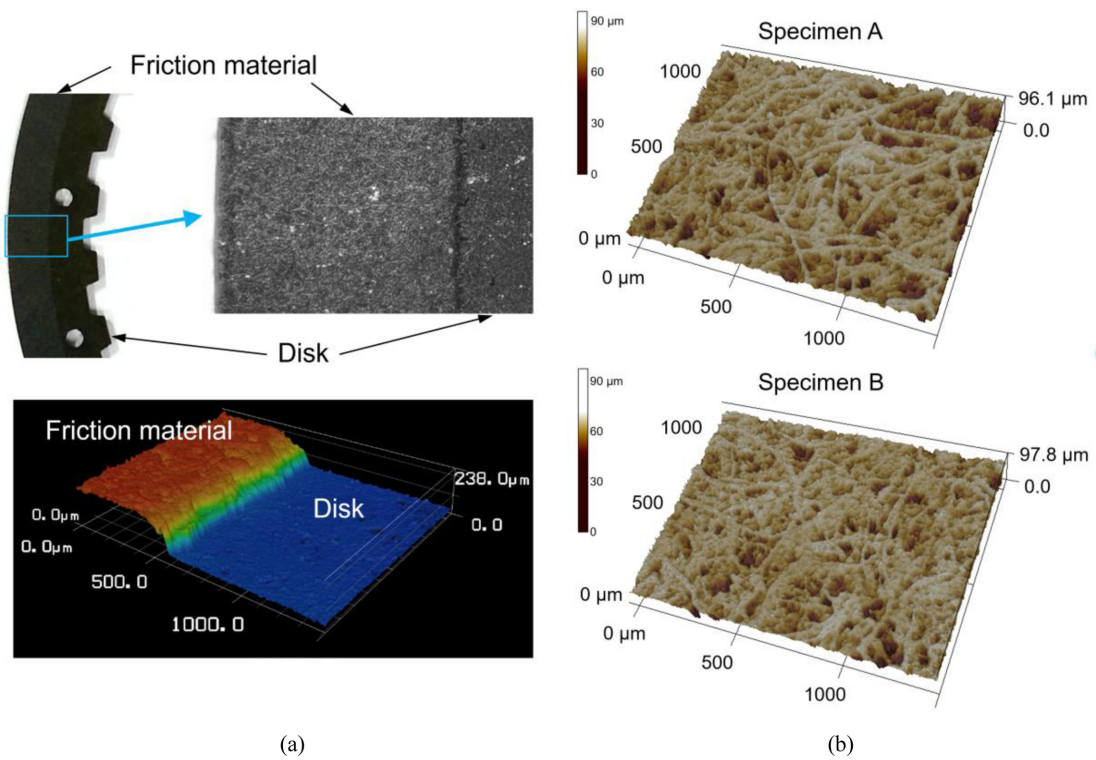


Fig. 2 (a) Photograph and optical microscopy image of the friction disk, and (b) 3-dimensional topographic images of specimens A and B, obtained by confocal microscopy. In (a), 3-dimensional image of friction disk is included

실제 자동변속기의 클러치와 유사한 환경을 만들기 위하여, ATF는 입력 회전축을 통하여 공급하고 원심력을 이용하여 FD와 SD 사이로 분사되도록 하였다. 또한, Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이, 하우징에 윈도우를 설치하여, FD와 SD 사이로 공급되는 ATF의 상태를 관찰할 수 있도록 하였다. ATF의 유량 및 온도는 각각 ATF 순환 장치에 장착된 펌프와 유량계, 히터와 열전대를 이용하여 제어하였다. 또한, 본 연구에서는 SD를 고정시키고, 스피들 모터를 이용하여 FD를 회전시키며 드래그 토크의 변화를 측정하였다. Fig. 3(b)은 FD가 장착되는 스플라인(Spline) 링과 SD가 장착되는 링을 나타내는 사진이다. 특히, 하우징에는 나사산을 가공하여, FD와 SD 장착을 위하여 허용되는 길이를 정밀하게 조절할 수 있도록 하였다. 즉, 1개의 FD/SD가 장착될 경우에는 간극을 직접 조절할 수 있으며, 다수의 FD/SD가 장착될 경우에는 전체 FD/SD 사이에 허용된 길이를 조절할 수 있도록 하였다. 실제 습식 클러치 시스템과 유사한 작동 환경을 구현하기 위하여, 다수의 FD/SD가 장착될 경우 각 FD/SD사이의 간격을 일정하게 분배하지는 않았다. 하우징은 최대 5개의 FD/SD를 장착할 수 있도록 설계하였다.

본 연구에서, 공급되는 ATF의 온도는 30 °C에서 110 °C로 변화시켰으며, 유량은 0.1 L/min에서 1.5 L/min까지 변화시켰다. 또한, FD와 SD의 간극을 0.1-0.3 mm로 변화시켰으며, FD/SD 개수를 1-5로 증가시키며, 드래그 토크 특성을 평가하였다. 이와 같은 실험 변수는 Table 1에 요약하여 제시하였다. 실험하고자 하는 수량의 FD/SD를 실험장치에 장착하고, ATF 온도, 유량,

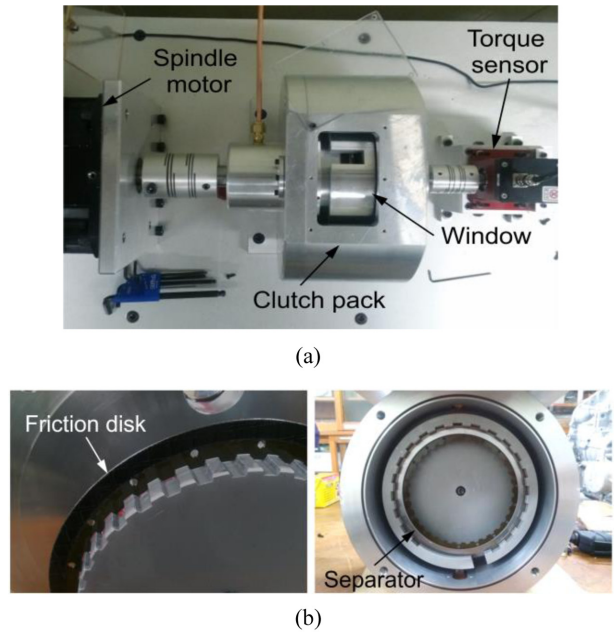


Fig. 3 Photographs of (a) experimental setup and (b) clutch package during installation of friction disk and separator

FD와 SD의 간극 등을 설정한 후 실험을 시작하였으며, 이 때, 스피들 모터는 60초 동안 3,500 rpm까지 등가속시켰다. 실험이 진행되는 동안 토크 센서를 통하여 측정된 드래그 토크의 변화를 실시간 모니터링하였으며, 하우징 상단의 윈도우를 통하여

Table 1 Summary of experimental conditions

Test parameters	Specimen and values				
	Specimens	Temperature (°C)	Clearance (mm)	Flow rate (L/min)	Number of FD/SD sets
Temperature (°C)	A	30, 50, 70, 90, 110	0.1	1.5	1
Clearance (mm)	A	90	0.1, 0.2, 0.3	1.5	1
Flow rate (L/min)	B	70	0.2	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9	1
Number of FD/SD sets	B	70	0.2*	0.5*	1, 3, 5

*Set values per FD/SD set

공급되는 ATF의 상태를 확인하였다. 드래그 토크 신호에는 모터 및 펌프의 진동, 외란 등에 의한 소음이 포함되어 있었으므로, 이를 제거하기 위하여 구간 평균 처리하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 온도의 영향

온도는 ATF의 점성도에 직접적인 영향을 미치므로, 드래그 토크를 결정하는 주된 인자 중 하나이다. Fig. 4는 시편 A를 이용하여 얻은 결과로써, ATF의 온도를 30°C에서 110°C로 증가시키며 얻은 드래그 토크 측정 결과를 나타낸다. 이 때, ATF 유량은 1.5 L/min, FD와 SD의 간극은 0.1 mm으로 설정하였으며, 하나의 FD/SD가 사용되었다. Fig. 4에 제시한 데이터로부터, 회전 속도 변화에 따른 드래그 토크의 전반적인 변화는 Fig. 1(b)와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 그 형태는 다른 연구결과와¹⁴ 다른 것으로 나타났는데(예: 최대 드래그 토크 값, 최대 드래그 토크 발생 지점의 회전 속도 등), 이는 마찰재의 패턴 및 재질의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 본 연구에 사용된 시편 A의 경우, ATF의 온도가 30°C에서 110°C로 증가함에 따라, 최대 토크가 0.69 Nm에서 0.23 Nm로 감소하는 것을 알 수 있다. 예측한 바와 같이, 온도 증가에 따른 ATF의 점성도 감소는 드래그 토크 감소를 유발하는 것으로 생각된다. 그러나, 최대 토크 발생 시의 회전속도는 온도 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 경향성은 기존 연구 결과와 잘 일치한다.¹⁴

3.2 간극의 영향

FD와 SD의 간극은 자동변속기용 클러치 설계 시, 허용된 공간에서 요구되는 클러치 성능을 얻기 위해 고려해야할 중요한 설계 변수 중 하나이다. Fig. 5는 시편 A를 이용하여 얻은 결과로써, FD와 SD의 간극이 0.1 mm에서 0.3 mm로 증가함에 따른 드래그 토크의 변화를 나타낸다. Fig. 5에 제시된 결과는 90°C의 ATF의 온도, 1.5 L/min의 유량에서 1개의 FD/SD를 사용하여 얻었다. 예상된 바와 같이, 간극이 증가함에 따라 드래그 토크는 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 간극 증가에 따른 벽면에서의 전단응력 감소 때문으로 생각되었다. 특히, 0.2 mm 실

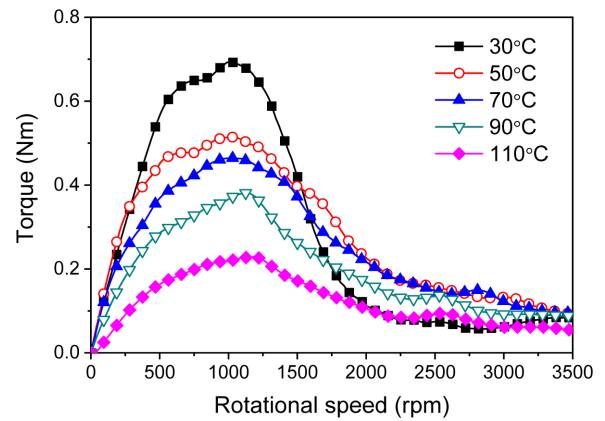


Fig. 4 Variation of drag torque as a function of rotational speed with different temperatures ranging 30-110°C

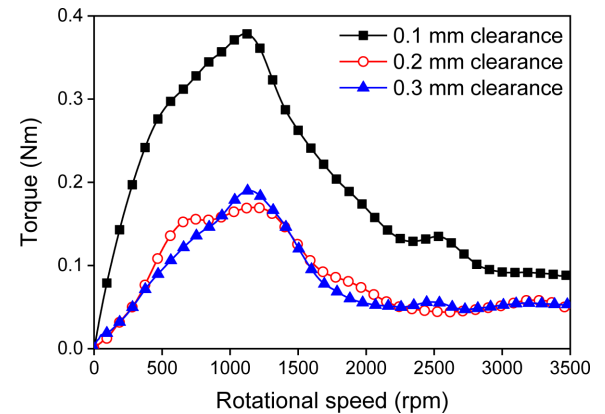


Fig. 5 Variation of drag torque as a function of rotational speed with different clearances between friction disk and separator ranging from 0.1 mm to 0.3 mm

험 조건에서 발생한 최대 드래그 토크 (0.17 Nm)는 0.1 mm인 경우(0.38 Nm)에 비하여 약 0.5배로 감소함을 알 수 있다. 그러나, 그러나, 간극이 0.2 mm에서 0.3 mm로 커질 경우 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 일반적으로, FD와 SD의 간극이 증가할수록 그 사이에 유입될 수 있는 ATF의 양이 증가하므로, 최대 토크 발생이 지연될 것으로 기대되었으나,¹⁴ 해당 실험 조건에서는 간극 증가가 최대 토크의 발생 지점에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

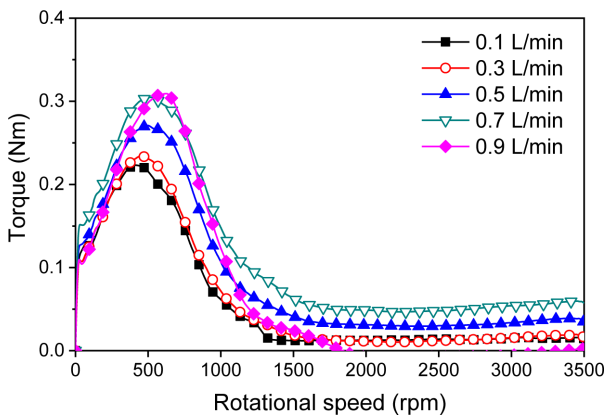


Fig. 6 Variation of drag torque as a function of rotational speed with different flow rates ranging from 0.1 L/min to 0.9 L/min

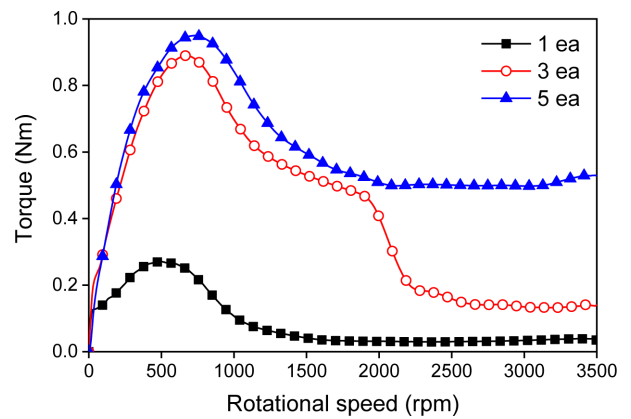


Fig. 7 Variation of drag torque as a function of rotational speed, with different numbers of disks ranging from 1 to 5

3.3 유량의 영향

Fig. 6은 시편 B를 이용하여 얻은 결과로써, ATF의 유량을 0.1 L/min에서 0.9 L/min으로 증가시키며 얻은 드래그 토크 측정 결과를 나타낸다. 이 때, ATF의 온도는 70°C, FD와 SD의 간극은 0.2 mm으로 설정하였으며, 1개의 FD/SD를 사용하였다. ATF의 유량이 0.1 L/min에서 0.9 L/min으로 증가함에 따라, 최대 토크가 0.22 Nm에서 0.31 Nm로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 유량 증가에 따라 FD와 SD 사이에 상대적으로 많은 양의 ATF가 공급될 수 있으므로, 최대 토크가 발생하는 지점의 회전 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 드래그 토크의 증가 및 정상 상태의 지연은 모두 에너지 손실을 증가시키므로, 에너지 절감을 위해서는 허용되는 범위 내에서 유량을 감소시키는 것이 요구된다. 또한 Fig. 6에 제시된 시편 B의 드래그 토크의 변화 특성은 Figs. 4와 5에 제시된 시편 A의 특성과 다른 것을 알 수 있다. 이러한 차이는, 앞서 언급한 바와 같이, 마찰재의 재료 특성(예: ATF 친화성) 및 표면 특성과 관계가 있을 것으로 예상된다.

3.4 FD/SD 개수의 영향

간극과 더불어, 클러치내에 삽입되는 FD와 SD의 개수를 결정하는 것은 허용된 공간내에서 최적의 클러치 성능을 구현하기 위해 고려되어야할 설계 변수 중 하나이다. Fig. 7은 시편 B를 이용하여 얻은 결과로써, FD/SD 개수를 1, 3, 5로 증가함에 따른 드래그 토크의 변화를 나타낸다. Fig. 7의 결과는 70°C의 ATF 온도, 디스크당 0.5 L/min의 ATF 유량, 0.2 mm의 디스크당 간극 조건에서 얻은 결과이다. 디스크 수가 증가하면서 일반적으로 드래그 토크가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 그 경향은 선형적이지 않았으며, 디스크 수가 1에서 3으로 증가할 때의 변화가 3에서 5로 증가할 때에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실험 시, FD와 SD의 간극이 고르지 않아서, 각 FD/SD의 간극이 0.2 mm보다 크거나 작은 경우가 발생하기 때문으로 생각된다. 이러한 결과를 통해 다수의 디스크들이 사용될 경우, 실제 발생하는 드래그 토크는 설계 과정에서 예상한

값과 다를 수 있음을 알 수 있다. 또한, 드래그 토크 감소를 위해서는 다수의 디스크들이 비교적 고르게 분포할 수 있도록 설계하는 것이 요구됨을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 회전속도에 드래그 토크의 특성의 변화를 ATF의 온도 및 유량, FD와 SD의 간극 및 장착된 FD/SD 개수와 같은 다양한 변수에 따라 실험적으로 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ATF의 온도 증가에 따라 드래그 토크는 감소하는 경향을 보였으며, 이는 온도 상승에 따른 점성도 감소에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 ATF의 온도 변화에 의해, 최대 드래그 토크를 유발하는 회전 속도는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

(2) FD와 SD의 간극이 증가함에 따라 드래그 토크는 감소하는 것으로 나타났는데, 0.2 mm 이상의 간극에서의 드래그 토크 증가는 크지 않았다.

(3) ATF 유량이 증가함에 따라 드래그 토크가 증가하는 동시에 최대 드래그 토크 발생이 지연됨을 알 수 있었다. 그러므로, 드래그 토크에 의한 에너지 손실을 줄이기 위해서는 허용되는 범위 내에서 유량을 감소시키는 것이 요구된다.

(4) FD/SD 개수가 증가함에 따라 드래그 토크의 최대값은 증가하였으나, 그 정도는 크게 변할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 작동 시 디스크들의 배열이 균일하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로, 다수의 디스크가 사용되는 경우, 예상치 못한 드래그 토크의 증가가 유발될 수 있으므로, 드래그 토크 제어 위해서는 균일한 디스크의 배치가 요구된다.

습식 클러치의 시스템적 특성, 작동 환경에 따라 드래그 토크는 변할 수 있으므로, 본 연구의 결과를 일반적으로 적용할 수는 없다. 또한, 마찰재의 재료 및 표면 특성에 따른 드래그 토크의 영향을 체계적으로 파악하기 위해서는 마찰재의 재질, 기계

적 물성 등에 대한 체계적인 분석이 함께 이루어져야 할 것으로 생각된다. 그러나, 본 연구를 통하여 관찰한 설계 변수에 따른 드래그 토크 변화 특성은 습식 클러치의 설계 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 생각되며, 이를 통하여 효율을 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2017R1A2B4009651).

REFERENCES

- Holmberg, K., Andersson, P., and Erdemir, A., "Global Energy Consumption due to Friction in Passenger Cars," *Journal of Tribology International*, Vol. 47, pp. 221-234, 2012.
- Kitabayashi, H., Li, C. Y., and Hiraki, H., "Analysis of the Various Factors Affecting Drag Torque in Multiple-Disk Wet Clutches," *Journal of SAE International*, Article No. 2003-01-1973, 2003.
- Jibin, H., Zengxiong, P., and Chao, W., "Experimental Research on Drag Torque for Single-Disk Wet Clutch," *Journal of Tribology*, Vol. 134, No. 1, Article No. 014502, 2012.
- Iqbal, S., Al-Bender, F., Pluymers, B., and Desmet, W., "Model for Predicting Drag Torque in Open Multi-Disks Wet Clutches," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136, No. 2, Article No. FE-13-1241, 2013.
- Marklund, P. and Larsson, R., "Wet Clutch Friction Characteristics Obtained from Simplified Pin on Disc Test," *Journal of Tribology International*, Vol. 41, Nos. 9-10, pp. 824-830, 2008.
- Cho, H. R., Je, Y., and Chung, K. H., "Assessment of Wear Characteristics of Paper-Based Wet Friction Materials," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 19, No. 5, pp. 705-711, 2018.
- Nyman, P., Mäki, R., Olsson, R., and Ganemi, B., "Influence of Surface Topography on Friction Characteristics in Wet Clutch Applications," *Journal of Wear*, Vol. 261, No. 1, pp. 46-52, 2006.
- Ingram, M., Spikes, H., Noles, J., and Watts, R., "Contact Properties of a Wet Clutch Friction Material," *Journal of Tribology International*, Vol. 43, No. 4, pp. 815-821, 2010.
- Takagi, Y., "Effect of Two-Phase Flow on Drag Torque in a Wet Clutch," *Journal of Advanced Research in Physics*, Vol. 2, No. 2, Article No. 021108, 2011.
- Aphale, C. R., Cho, J., Schultz, W. W., Ceccio, S. L., Yoshioka, T., et al., "Modeling and Parametric Study of Torque in Open Clutch Disks," *Journal of Tribology*, Vol. 128, No. 2, pp. 422-430, 2006.
- Gopal, P., Dharani, L. R., and Blum, F. D., "Load, Speed and Temperature Sensitivities of a Carbon-Fiber-Reinforced Phenolic Friction Material," *Journal of Wear*, Vols. 181-183, No. 2, pp. 913-921, 1995.
- Kearsey, A. and Wagner, D., "Carbon Fiber for Wet Friction Applications," *Journal of SAE International*, Vol. 106, No. 2, Article No. 972754, 1997.
- Aphale, C. R., Schultz, W. W., and Ceccio, S. L., "The Influence of Grooves on the Fully Wetted and Aerated Flow Between Open Clutch Plates," *Journal of Tribology*, Vol. 132, No. 1, Article No. 011104, 2009.
- Kim, H. and Chung, K. H., "Experimental Assessment of Drag Torque of Wet Clutch," *Journal of the Korean Tribology Society*, Vol. 33, No. 6, pp. 269-274, 2017.

Hansol Kim

Master's degree received from the School of Mechanical Engineering, University of Ulsan. Currently, he has graduated. His research interest is precision engineering, tribology and surface engineering.
E-mail: bug13@naver.com

Koo-Hyun Chung

Professor in the School of Mechanical Engineering, University of Ulsan. His research interest is tribology and surface engineering.
E-mail: khchung@ulsan.ac.kr