

## 습식 클러치 드래그 토크 특성의 실험적 평가

김한솔 · 정구현<sup>†</sup>

울산대학교 기계공학부

### Experimental Assessment of Drag Torque of Wet Clutch

Hansol Kim and Koo-Hyun Chung<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

(Received September 15, 2017; Revised November 18, 2017; Accepted November 18, 2017)

**Abstract** – Currently, fuel efficiency becomes one of critical issues for automotive industries as concerns about environmental and energy problems grow. In an automatic transmission of an automobile, a drag torque due to a viscous drag of a fluid between friction and clutch plates is one of factors that degrade fuel economy. In this work, the drag torque characteristics of a wet clutch was experimentally investigated with respect to rotational speed, temperature of automatic transmission fluid (ATF), and gap between friction and clutch plates. The experimental results showed that drag torque increases to a certain level, and then decrease to the steady state value with increasing rotational speed. This behavior may be associated with two-phase flow of air and ATF at gap between friction and clutch plates. Also, it was found that the maximum drag torque value decreased as ATF viscosity decreases with increasing temperature. However, it was shown that the point at which the maximum drag torque occurs was not significantly affected by the ATF temperature. In addition, maximum drag torque was found to decrease as the gap between friction and clutch plates increased from 0.1 mm to 0.2 mm. Furthermore, it was observed that the generation of maximum drag torque was delayed as the gap increased. The outcomes of this work are expected to be helpful to gain a better understanding of drag torque characteristic of a wet clutch, and may therefore be useful in the design of wet clutch systems with improved performance.

**Keywords** – drag torque (드래그 토크), gap(간극), rotating speed (회전 속도), temperature(온도), wet clutch (습식 클러치)

### 1. 서 론

현재 자동차산업에서는 환경보호와 에너지 절감을 위하여, 연비 향상에 대한 요구가 꾸준히 증가하고 있다. 기존 연구에 의하면, 자동차에서 발생하는 손실의 33%는 마찰에 의한 것이며, 파워트레인에서 발생하는 손실은 약 16%에 이르는 것으로 알려져 있다[1]. 특히, 동력을 전달하는 역할을 하는 변속기에서는 약 5%의 에너지 손실이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 현재 많이 사용되는 자동변속기에서는, 유체를 활용하여 동력

을 전달함에 따라, 기계적 결합을 통해 동력을 전달하는 수동변속기에 비해 약 5~15% 정도 높은 에너지 손실을 유발하는 것으로 알려지고 있다[2].

자동 변속기에서 사용되는 클러치는 토크 컨버터(torque converter), 오일펌프(oil pump), 클러치(clutch) 등으로 구성되어 있고, 이 중 클러치는 토크 컨버터를 통해 입력된 동력을 전달 및 차단하는 역할을 한다. 클러치는 마찰판(friction plate)과 이를 분리하는 클러치판(clutch plate)로 구성되며, 이들 사이에는 원활한 작동을 위한 윤활유가 지속적으로 공급되어야 한다. 그러나, 마찰판과 클러치판 사이에 형성되는 윤활막은 벽면 전단 응력(wall shear stress)을 유발하고, 이는 결과적으로 드래그 토크(drag torque)를 발생시키며, 이는 자동

<sup>†</sup>Corresponding author : khchung@ulsan.ac.kr  
Tel: +82-52-259-2744, Fax: +82-52-259-1680

변속기에서 발생하는 에너지 손실의 주된 원인 중 하나로 제시되고 있다[3-8]. 이에 따라, 현재까지 드래그 토크 특성을 이해하고 저감시키기 위한 많은 연구와 노력이 이루어지고 있다. 그러나, 설계 과정에서 드래그 토크를 예측하고 반영하는 것은 여전히 쉽지 않으며, 많은 경우 실험적 접근, 경험과 노하우 등에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 관점에서, 속도, 온도, 마찰판 형상, 소재 등과 같은 다양한 조건에서, 드래그 토크를 체계적으로 평가하고 이해하기 위한 연구는 자동변속기를 위한 클러치 설계에 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

이에 따라, 본 연구에서는 실제 자동변속기에서 사용되는 클러치를 기반으로, 다양한 조건(온도, 속도, 간격, 유량 등)에서 드래그 토크를 평가하기 위한 실험장치를 설계 및 개발하였다. 또한, 이를 검증하기 위하여, 마찰판의 회전 속도, automatic transmission fluid (ATF) 온도, 그리고, 마찰판과 클러치판의 간격에 따른 드래그 토크의 변화를 평가하였다. 이러한 실험장치의 개발 및 각 인자에 따른 드래그 토크의 평가는 자동변속기를 위한 클러치 설계 및 개발에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구방법 및 내용

### 2-1. 실험 시편

실제 자동변속기로부터 얻은 마찰판과 클러치판을 이용하여 실험을 수행하였으며, 실험에 사용된 마찰판과 클러치판의 사진은 각각 Figs. 1(a)과 (b)에 제시하였다. Fig. 1(a)에 표시된 바와 같이 마찰판에는 마찰재가 부착되어 있다. 마찰재 표면은 공초점 현미경(confocal microscopy)를 이용하여 실험전에 관찰하였으며, 그 예를 Fig. 1(c)에 제시하였다. Fig. 1(c)로부터, 다른 마찰재와 마찬가지로, 실험에 사용된 마찰재는 합성 섬유, 고체 윤활제, 폴리머 바인더 등과 같은 다양한 재료로 구성되어 있는 것으로 여겨진다. 공초점 현미경 데이터로부터 얻어진 마찰재의 평균 표면거칠기 ( $R_a$ )는  $1.7 \mu\text{m}$  였다.

클러치에 공급되는 ATF는 드래그 토크의 근본적인 원인으로, ATF의 점성도는 드래그 토크 특성 분석에 있어 매우 중요한 요소이다. 본 실험에서는 상용화된 ATF를 사용하였으며, Fig. 2에 제시한 바와 같이, 실험전에 온도에 따른 ATF 점성도의 변화를 측정하였다. 예상된 바와 같이, 온도 상승에 따라 점성이 감소

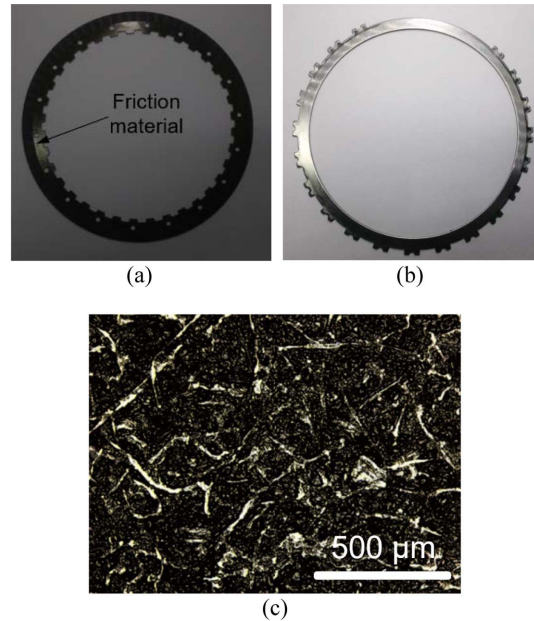


Fig. 1. Photographs of (a) friction plate and (b) clutch plate, and confocal microscope image of friction material.

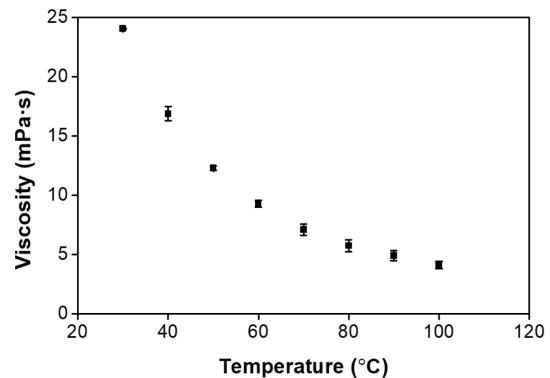


Fig. 2. Variation of viscosity of ATF with respect to temperature.

하는 것을 명확하게 관찰할 수 있으며, 특히, 저온에서의 점성 변화가 좀 더 급격하게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 실험에 사용된 ATF의 점성도는, 상온에서  $24 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 인 것을 알 수 있다.

### 2-2. 실험 장치 및 방법

본 연구를 위해 설계 및 제작된 실험장치의 개략도와 사진을 Fig. 3에 제시하였다. 실험 장치는 작동 조건에 따른 드래그 토크 변화를 파악하기 위하여, 실제

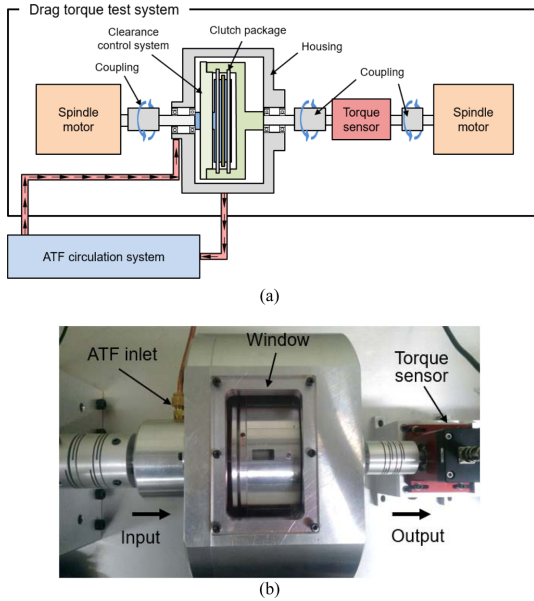


Fig. 3. (a) Schematic and (b) photograph of drag torque test system.

변속기의 작동 조건 및 환경을 고려하여 설계되었다. 또한, ATF의 교체 및 실험 장치의 유지/보수 편의성을 고려하여, 회전운동의 발생 및 드래그 토크 측정을 위한 시스템과 ATF 순환 시스템으로 나누어 구성하였다. 드래그 토크 실험을 위한 구동 및 측정 시스템은, Fig. 3(a)에 제시된 바와 같이, 마찰판과 클러치판의 독립적인 회전을 위한 한 쌍의 스피들 모터, 마찰판과 클러치판을 실제로 위치시키는 하우징(housing), 그리고, 드래그 토크 측정을 위한 토크 센서 등으로 구성되어 있다. 특히, 클러치의 드래그 토크에 영향을 미치는 인자 중 하나인 마찰판과 클러치판 사이의 간격을 정밀하게 조절하기 위하여, 하우징 내에는 간격을 조절하기 위한 메인 링(main ring)과 조절된 간격 설정된 간격 유지를 위한 보조 링(sub ring)을 위치시켰다. 메인 링을 나사산을 따라 회전함에 따라 마찰판과 클러치판의 간격을 설정할 수 있도록 하였다.

ATF 순환 시스템은 ATF 탱크, ATF 온도 조절을 위한 히터, ATF 펌프 및 유량계, ATF 탱크와 온도 측정을 위한 열전대로 구성되어 있다. ATF 순환 시스템에서 공급되는 ATF는 입력축을 통하여 하우징으로 공급되고, 회전시 발생하는 원심력에 의해 마찰판과 클러치판 사이로 유입되도록 하였다. Fig. 3(b)는 실제 제작된 실험장치에서 마찰판과 클러치판이 위치한 하

우징 및 토크센서 사진을 나타낸다. 하우징 상단에 윈도우를 설치하여 공급되는 ATF의 상태를 확인할 수 있다.

본 연구에서는 드래그 토크와 관련된 인자들의 독립적인 영향을 파악하고자 주된 실험 변수를 선정하고 실험을 수행하였다. 먼저, 회전 속도에 따른 드래그 토크 변화를 분석하기 위하여, 클러치판을 고정시키고 마찰판을 회전시켰으며, 60 초 동안 3500 rpm에 도달하도록 가속하였다. 또한, ATF 온도의 영향을 파악하기 위하여, 공급되는 ATF의 온도를 30 °C에서 110 °C로 변화시켰다. 마지막으로, 마찰판과 클러치판의 간격의 영향을 평가하기 위하여, 이를 0.1~0.3 mm로 변화시켰다. 이러한 실험 변수 값은 실제 차량에서 사용되는 자동변속기와 클러치의 작동 조건을 고려하여 선정되었다. 측정된 드래그 토크 신호에는 실험에 사용된 모터, 또는 펌프의 진동 등에 의하여 발생한 것으로 여겨지는 노이즈 신호들이 함께 관찰되었으므로, 본 연구에서는 구간 평균 처리를 통하여 이러한 성분을 제거하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 입력축의 회전 속도 변화에 따른 드래그 토크 측정결과를 나타내는 대표적인 예로써, 70 °C의 ATF 온도, 0.1 mm의 마찰판/클러치판 간격에서 얻은 결과이다. 드래그 토크는 저속에서 급격하게 증가하여 약 750 rpm에서 최대값에 도달한 후, 서서히 감소하여 약 2,700 rpm부터 낮은 값을 유지하는 것을 알

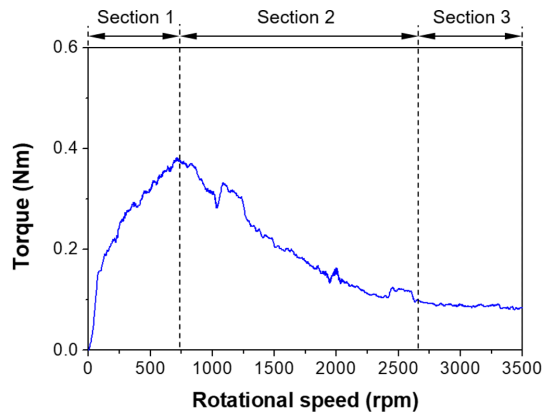


Fig. 4. Variations of drag torque with respect to rotating speed.

수 있다. 이러한 결과는, 속도에 따른 드래그 토크 변화에 대한 기존의 실험 및 이론적 연구 결과와 일치한다[3,4]. 드래그 토크의 변화는 Fig. 4에 제시한 바와 같이, 크게 3가지 구간으로 구분할 수 있었다. 첫번째 구간은 회전이 시작한 이후 최대 드래그 토크가 발생하는 시점까지로써, 회전 속도 증가에 따라 드래그 토크가 증가하는 구간이며, 두번째 구간은 드래그 토크는 감소는 구간을 의미한다. 마지막 구간은, 드래그 토크가 감소한 이후 낮은 토크 값이 비교적 일정하게 유지되는 구간을 나타낸다. 이와 같은 드래그 토크 변화는 마찰판과 클러치판 사이로 유입되는 ATF와 공기의 변화에 기인한다. ATF는 원심력에 의해 분사되므로, 축의 회전 속도가 증가함에 따라 ATF 공급량이 증가하고 드래그 토크도 증가하게 된다. 그러나, ATF는 오일 펌프를 통해 일정한 유량으로 공급되므로, 드래그 토크는 계속 증가할 수 없으며, ATF의 유량에 따라 결정되는 최대 드래그 토크 값에 도달하게 된다. 또한, 회전 속도가 더욱 증가함에 따라, 공급되는 ATF의 양은 일정하므로, 공기가 함께 유입되고, 드래그 토크는 감소하게 된다. 이와 함께, 고속 회전시 발생하는 압력 감소는 ATF내의 공동(cavitation) 형성을 유발할 수 있으며, 이는 전단 응력 감소를 유발하여 드래그 토크 감소에 기여할 것이다 [2]. 또한, 드래그 토크 발생에 따른 마찰열은 ATF의 온도 증가 및 점도 감소를 유발할 수 있으며, 이는 다시 드래그 토크값에 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다.

회전 속도변화에 따른 드래그 토크의 변화를 보다 명확하게 이해하기 위하여, 실험장치에 장착된 윈도우를 통해 마찰판과 클러치판 사이에서의 ATF의 거동을 관찰하였으며, Fig. 5에 그 결과를 제시하였다. Fig. 5(a)는 드래그 토크가 최대값에 근접했을 때(구간 1) 촬영된 사진으로서, 기포의 발생 없이 공급되는 ATF가 흘러 나오는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5(b)는 드래그 토크가 감소하기 시작한 두번째 구간에서 촬영된 이미지이며, 화살표로 표시한 바와 같이, 기포가 발생하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 드래그 토크가 정상상태에 도달한 후(구간 3) 얻은 사진으로써, 기포 발생이 증가한 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이, 기포 발생없이 유입되는 ATF가 그대로 다시 흘러나온다는 관찰 결과는, 최대 드래그 토크 발생 시점에서는 마찰판과 클러치판 사이가 ATF로 대부분 채워져 있다는 것을 의미한다. 그러나, 회전속도가 지속적으로 증가함에 따라 기포 증가가 많아진다는

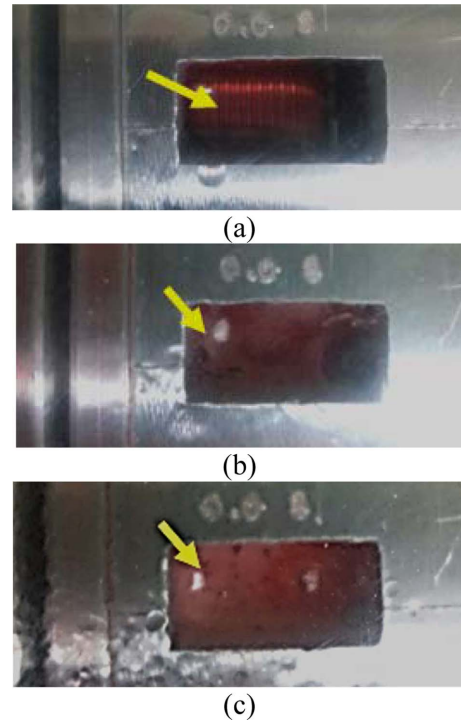
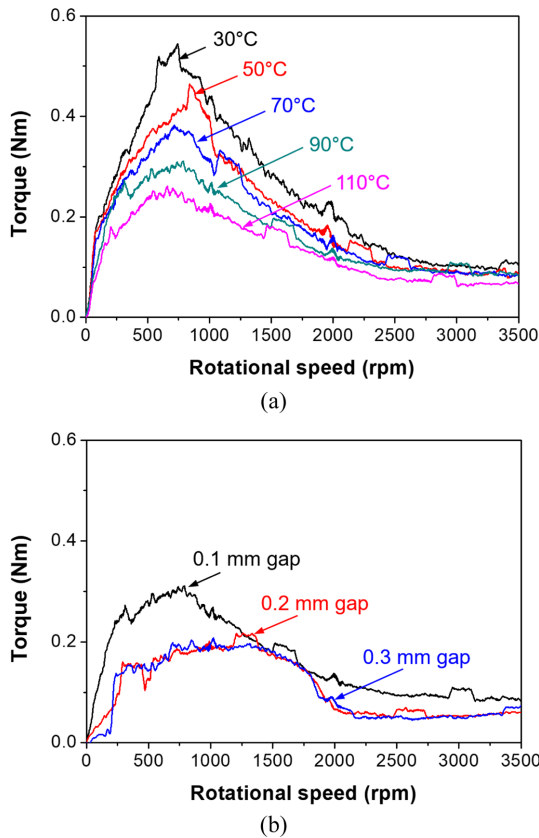


Fig. 5. Photographs of windows of drag torque test system at sections (a) 1, (b) 2, and (c) 3.

관찰 사실은, 마찰판과 클러치판 사이에 존재하는 ATF의 양이 상대적으로 적어지고 공기의 유입이 많아졌다는 것을 나타내며, 드래그 토크가 감소하는 이유를 잘 나타낸다. 결과적으로, Fig. 5에 제시한 관찰 결과를 통하여 회전속도에 따른 드래그 토크의 변화 이유를 보다 명확하게 확인할 수 있다.

Fig. 6은 유입되는 ATF의 온도 변화 및 마찰판과 클러치판의 간격 변화에 따른 드래그 토크의 변화를 나타낸다. Fig. 6(a)에 제시한 결과는 0.1 mm의 간격에서 얻은 것이며, Fig. 6(b)에 제시한 결과는 70 °C의 ATF 온도에서 얻은 것이다. Fig. 6(a)로부터, 온도가 증가함에 따라 최대 드래그 토크가 감소함을 명확하게 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 기존의 연구 결과와 일치한다[4]. 또한, 예상한 바와 같이, 온도가 증가함에 따라 최대 드래그 토크가 감소하는 결과는 ATF 점성 감소에 의한 것으로 생각된다. 그러나, Fig. 6(a)에 제시한 결과로부터, ATF의 온도변화는, 드래그 토크가 최대값에 이르는 시점과 감소한 후 정상상태에 이르는 시점에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(b)로부터, 마찰판과 클러치판의 간격이 0.1 mm



**Fig. 6.** Variations of drag torque as a function of rotational speed with respect to (a) ATF temperature and (b) clearance between friction plate and clutch plate.

일 때, 최대 드래그 토크가 가장 큰 것으로 나타났으며, 0.2 mm와 0.3 mm로 간격이 증가됨에 따라 최대 드래그 토크가 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 간격 증가에 따라 점성에 의한 전단응력이 감소하기 때문으로 생각된다. 그러나, 0.2 mm와 0.3 mm의 간격에서 측정된 드래그 토크의 최대값은 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이는 마찰판과 클러치판의 간격이 0.2 mm 이상에서는 전단응력의 차이가 크지 않기 때문으로 생각된다. 또한, 간격 증가에 따라 최대 토크가 나타나는 시점이 지연되는 것으로 나타났다. 이는 마찰판과 클러치판의 간격이 증가함에 따라 유입될 수 있는 ATF의 유량이 증가하므로, 간격이 ATF로 채워지는 시점이 지연되기 때문으로 설명할 수 있다.

본 연구에서는 회전 속도, ATF 온도, 마찰판과 클러치판의 간격 변화에 따른 특정 자동변속기용 클러치의

드래그 토크 변화를 실험적으로 관찰하였다. 본 실험에 사용된 클러치의 경우, 주어진 조건에서의 최대 드래그 토크는 약 0.2~0.5 N·m로 변하는 것으로 나타났다. 이와 같은 최대 드래그 토크 값 및 속도변화에 따른 드래그 토크 변화 개형은 마찰판에 형성된 마찰재의 표면 형상 및 소재, 유입되는 ATF의 유량 등과 같은 다양한 인자에 의하여 변할 것으로 예상된다. 그러므로, 본 연구에서 제시한 측정 결과를 모두 일반화할 수는 없을 것으로 생각된다. 그러나, 본 연구를 통하여 개발한 드래그 토크 실험 장치와 실험 변수에 따른 측정 결과는 자동변속기를 위한 클러치 개발을 위하여 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 예상되며, 궁극적으로는 자동변속기의 동력 전달 효율을 향상시키는 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 자동변속기의 클러치에서 발생하는 드래그 토크에 대한 실험적 연구로서, 드래그 토크 특성을 파악하기 위한 실험 장치를 설계 및 제작하였으며, 마찰판의 회전 속도, ATF 온도, 마찰판과 클러치판의 간격에 따른 드래그 토크 변화를 평가하였다. ATF의 온도 증가에 따라 드래그 토크 최대값이 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 현상은 온도 상승에 따른 ATF의 점성 감소에 의한 것으로 보인다. 또한, ATF의 온도는 최대 드래그 토크 발생 시점 및 정상상태에 이르는 시점 등에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러므로, 자동변속기 내의 ATF 온도를 적절히 유지하는 것은 드래그 토크를 제어하고 예측하는데 도움이 될 것으로 여겨진다. 마찰판과 클러치판의 간격이 증가함에 따라 최대 드래그 토크가 감소하였을 뿐만 아니라, 그 시점은 지연되는 것으로 나타났는데, 간격이 0.2 mm 이상으로 증가할 경우, 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 드래그 토크 변화 분석하고, 각 변수의 영향을 이해하는 것은 클러치 성능을 평가하는데 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 평가되며, 나아가 높은 에너지 전달 효율을 위한 클러치 설계 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### Acknowledgements

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업

임(과제번호: NRF-2017R1A2B4009651).

### References

- [1] Holmberg, K., Andersson, P., Erdemir, A., "Global energy consumption due to friction in passenger cars", *Tribology International*, Vol. 47, pp. 221-234, 2012.
- [2] Takagi, Y., Nakata, H., Okano, Y., Miyagawa, M., Katayama, N., 2011, "Effect of Two-Phase flow on drag torque in a wet clutch", *J. Advanced Res. Phys.*, Vol. 2, No. 2, pp. 021108, 2011.
- [3] Ryu, J. S. and Sung, I. H., "Effect of angle and density of grooves between friction plate segments on drag torque in wet clutch of automatic transmission", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 30, No. 2, pp. 71-76, 2014.
- [4] Jibin, H., Zengxiong, Peng, Chao, W., "Experimental research on drag torque for single-disk wet clutch", *J. Tribol.*, Vol. 134, No. 1, paper no. 014502, 2012.
- [5] Iqbal, S., Al-Bender, F., Pluymers, B., Desmet, W., "Model for predicting drag torque in open multi-disks wet clutches", *J. Fluids Eng.*, Vol. 136, No. 2, Paper No. FE-13-1241, 2013.
- [6] Kitabayashi, H., Li, C., Hiraki, H., "Analysis of the various factors affecting drag torque in multiple-disk wet clutches", *SAE Technical Paper*, Paper no. 2003-01-1973, 2003.
- [7] Yuan, Y., Liu, E., James, H., "An improved hydrodynamic model for open wet transmission clutches[J]", *J. Fluids Eng.*, Vol. 129, No. 3, pp. 333-337, 2007.
- [8] Aphale, C. R., Cho, J., Shultz, W. W., Ceccio, S. L., Yoshioka, T., and Hiraki, H., "Modeling and parametric study of torque in open clutch disks", *J. Tribol.*, Vol. 128, No. 2, pp. 422-430, 2006.