

클러치 드래그 토크에 미치는 마찰재 면적 및 클리어런스의 영향

류진석¹ · 성인하^{2*}

¹한남대학교 대학원 기계공학과, ²한남대학교 기계공학과

Effects of Friction Plate Area and Clearance on the Drag Torque in a Wet Clutch for an Automatic Transmission

Jin Seok Ryu¹ and In-Ha Sung^{2*}

¹Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Hannam University

²Dept. of Mechanical Engineering, Hannam University

(Received October 12, 2014; Revised November 4, 2014; Accepted November 5, 2014)

Abstract – The reduction of drag torque is an important research issue in terms of improving transmission efficiency. Drag torque in a wet clutch occurs because of the viscous drag generated by the transmission fluid in a narrow gap (clearance) between the friction plate and a separate plate. The objective of this paper is to observe the effects of the friction plate area and the clearance on the drag torque using finite element simulation. The two-phase flow of air and oil fluid is considered and modeled for the simulation. The simulation analysis reveals that as the rotational speed increases, the drag torque generally increases to a critical point and then decreases sharply at a high speed regime. The clearance between the two plates plays an important role in controlling drag torque peak. An increase in the clearance causes a decrease in shear stress; thus, the drag torque also decreases according to Newton's law of viscosity. An observation of the effect of the area of contact between transmission fluid and friction plate shows that the drag torque increases with the contact area. The flow vectors inside the flow channel present clear evidence that the velocity of the fluid flows is faster with a larger friction plate, that is, in the case of a larger contact area. Therefore, the optimum size of the friction plate should be determined carefully, considering both the clutch performance and drag reduction. It is expected that the results from this study can be very useful as a database for clutch design and to predict the drag torque for the initial design with respect to various clutch parameters.

Keywords – computational fluid dynamics (전산유체역학), drag torque (드래그 토크), two-phase flow (이상 유동), volume of fluid method (유체 체적법), wet clutch (습식 클러치)

Nomenclature

R_1 : Inner radius (m) (내경)

R_2 : Outer radius (m) (외경)

r_0 : Radial distance filled with ATF (ATF충진반경)

h : Clearance (mm) (틈새)

T : Drag torque (N·m) (드래그 토크)

μ : Viscosity (Pa·s) (점도)

τ : Shear stress (Pa) (전단응력)

ω : Rotational speed (rpm) (회전속도)

1. 서 론

*Corresponding author : isung@hnu.ac.kr
Tel: +82-42-639-8316, Fax: +82-42-629-8293

현재 자동차 산업에서는 경제적 측면에서 뿐만 아니라 지구 온난화 대책과 환경 보호를 위해서 에너지 효

을 및 연비 향상에 대한 요구가 갈수록 증가하고 있다. 다수의 보고서에 따르면, 자동차 산업에서 승용차의 경우, 연비가 우수한 차량에 대한 투자와 개발, 바이오 연료 사용의 확대, 도로 인프라 확충, 대중교통의 이용 확대 및 친환경적인 운전 습관 등 여러 통합적인 노력을 통하여 2030년까지 약 49%까지 CO₂ 배출을 저감시킬 수 있을 것이라 예측하고 있다. 그 중, 맥킨지 보고서는 연비가 향상된 신차개발을 통해 전체 CO₂ 저감량의 72% 를 담당할 것이라 전망하고 있다[1].

또한, 2013년 CFA(consumer federation of America)의 조사에 따르면, 2009년과 2013년 세계 자동차 시장에 판매된 전체 모델 중 17 mpg(mile/gallon) 이하의 연비를 나타낸 차량을 비교한 결과, 30%에 달하던 2009년에 비해 2013년에는 그 수치가 11%로 현저히 감소한 것을 확인할 수 있다[2].

이러한 높은 연비의 신차 개발을 위해서 완성차 제조 및 부품 업체들은 파워트레인(엔진 및 변속기)효율, 공기역학적 차량 설계 및 경량화에 집중적인 노력이 필요할 것으로 보고 있으며, 이 목표를 달성하기 위한 하나의 중요한 과제는 자동 변속기 내 드래그 토크를 감소시켜 불필요한 연료 소모를 줄이는 것이다.

드래그 토크는 Fig. 1과 같이 평행한 두 평판 사이에 유체가 채워져 있고 한 판이 움직일 때 전단 응력이 발생하게 되는데, 이 전단 응력으로 인해 정지되어 있는 다른 쪽 판이 움직일 수 있게 되는 유체에 의한 토크를 의미한다. 이러한 드래그 토크는 자동변속기 차량의 습식 클러치 내부에서 friction plate와 separate plate 사이의 클리어런스(틈새)에서 자동변속기 오일(automatic transmission fluid, ATF)의 유동에 의해 발생된다고 알려져 있으며, 이는 클러치 팩 내부의 동력 손실 중 약 1/3을 차지할 만큼 중요한 요소이다.

일반적인 자동변속기 차량의 습식 클러치 시스템에서는 ATF는 축으로부터 분사되고, 분사된 ATF는

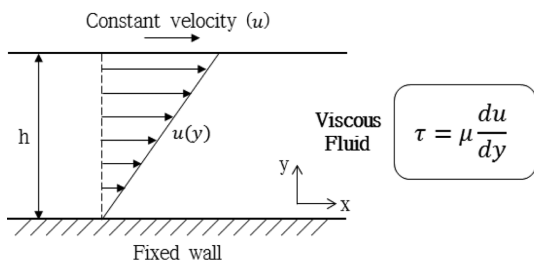


Fig. 1. Distribution of shear stress in flow between two parallel plates.

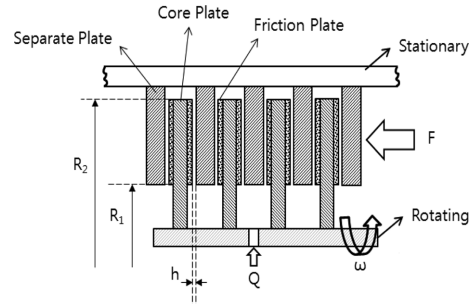


Fig. 2. Schematic of clutch disengagement event.

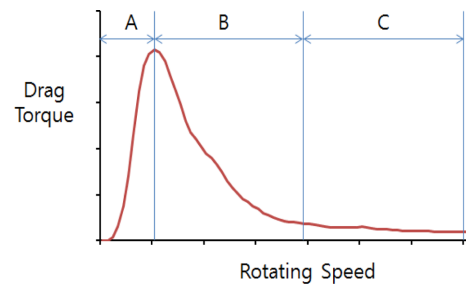


Fig. 3. Typical drag torque curve with respect to rotational speed.

manifold를 거쳐 여러 장의 friction plate와 separate plate의 미세한 틈새로 유입된다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 plate사이의 미세한 틈새(clearance, h) 내의 ATF에 의한 드래그 토크로 인하여 비결속(disengagement) 상태에서도 동력 및 연료 소비가 발생하게 된다.

Fig. 3은 회전속도에 따른 일반적인 드래그 토크의 변화 그래프로서, 드래그 토크는 회전속도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하다가 최대값에 도달한 후에 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 그림에서 A 영역은 축으로부터 분사된 ATF가 friction plate와 separate plate 사이의 틈새를 가득 채우는 영역이고, B 영역은 plate 사이의 틈새를 가득 채운 ATF가 friction plate의 회전에 의한 원심력 및 중력에 의해 클러치 팩 외부로 빠져나가며 공기가 유입되는 구간이다. C 영역에서는 비교적 안정적인 드래그 토크가 발생됨을 알 수 있는데, 이 영역에서는 ATF와 공기가 틈새 내에 미세한 연무(mist)의 형태로 존재하게 된다[3].

1970년대 이후, 많은 연구진들에 의해 여러 가지 설계 변수가 드래그 토크에 미치는 영향에 대해 연구되어 오고 있으며 드래그 토크를 발생시키는 가장 중요한 설계 변수는 ATF의 유량, plate 사이의 틈새와 접촉면적, friction plate의 회전 속도 등으로 보고되고

있다[4-11].

Takaki의 연구[8]에 따르면, 드래그 토크는 ATF 단일 유동에서 공기가 섞이기 시작하면서 감소된다고 알려져 있으며, friction plate의 그루브는 드래그 토크를 제어하는데 중요한 변수 중 하나라는 것을 밝혀냈다. 그루브의 경우 개수에 무관하게 동일한 면적을 가질 수 있도록 적절한 각도를 유지하며 생성해 실험을 진행했으며, 원주 방향의 그루브를 추가해 경향을 살펴 보았다. 연구 결과에 따르면, 그루브의 개수가 증가할수록 드래그 토크가 감소하는 경향을 보였으며, 원주 방향의 그루브는 드래그 토크가 감소하는 것을 방해하는 역할을 함을 밝혀냈다.

이와 같은 기존의 실험적 연구들에도 불구하고, 실제 변속기 클러치 내부에서 여러 변수들의 영향이 복합적으로 나타나는 양상을 보이고, 또한 오일 분사 위치와 균등한 분사량 등 잘 제어되기 어려운 변수들로 인하여 현업에서는 드래그 토크에 대해서 구체적인 설계 가이드라인을 확보하지 못하고 있는 상태이다. 또한 ATF의 점성에 의해 미세한 틈새 내에서 발생하는 드래그 토크를 분석하기 위해 유한요소 해석을 수행함에 있어 이상유동(two-phase flow)을 고려해야 하지만, 다수의 연구에서는 연구의 편의성 및 경향성 고찰에 의의를 두고 있음에 따라 ATF 단상유동(single-phase flow) 해석을 진행하고 있는 실정이다.

이러한 배경으로부터, 본 연구에서는 이상 유동을 고려한 유한요소 해석을 이용하여 plate의 면적, friction plate와 separate plate 사이의 틈새와 같은 작동 조건 변화가 드래그 토크에 어떤 영향을 미치는지에 대해 고찰하고자 한다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 연구방법

Fig. 4는 유한요소 모델링에 사용된 비 결속 상태의 습식 클러치 내 유체 채널의 일정 부분을 간략하게 도식화한 것이다.

그림에서 R_1 은 내경, R_2 는 외경, h 는 friction plate와 separate plate 사이의 틈새를 의미하며, friction plate는 core plate에 부착되어 있고 해석이 시작되면 정지상태에서 3500 rpm까지 회전속도가 선형적으로 증가하게 된다. Separate plate는 모든 방향에 대해 고정되어 있고, friction plate와 separate plate 사이의 틈

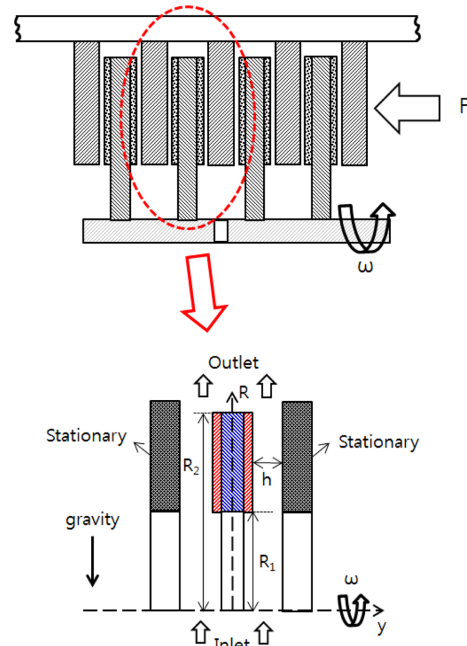


Fig. 4. A simplified clutch model for finite element simulation.

새(그림에서 h)에 변화를 주어 해석을 수행하였다. 입구와 출구는 열려있으며 입구에서는 일정 유량의 ATF가 분사되며, 분사된 ATF는 friction plate와 separate plate 사이의 틈새를 통해 흐르며 원심력에 의해 반경 방향으로 빠져나가게 된다.

Mesh 생성, 해석, 후처리 과정을 진행하는데 상용 소프트웨어인 ADINA(automatic dynamic incremental nonlinear analysis)가 사용되었으며, 실제와 유사한 연구 결과를 도출하기 위해서 각 plate는 세로 방향으로 세워져 있으며 $-z$ 축 방향으로 중력이 가해진다. 대칭 모델의 클러치를 사용함에 따라 본 연구에서는 전체 모델의 1/24(15°)만 모델링 했으며, 회전 방향의 절단면에는 주기 경계 조건(periodic boundary condition)이 부여되었다.

입구 부분에 해당하는 R_1 과 출구 부분에 해당하는 R_2 의 경계에 대해서는 유체가 유입 및 유출되는 데 제약을 두지 않기 위해 열린 경계조건(open boundary condition)을 부여 했으며, 특히 입구 부분의 경우, ATF의 분사 조건을 모사하기 위해 일정 유량에 해당하는 속도 조건을 부여하였다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, plate의 면적을 변화시키기 위해 내경(R_1)을 고정시키고 외경(R_2)을 변화시키며

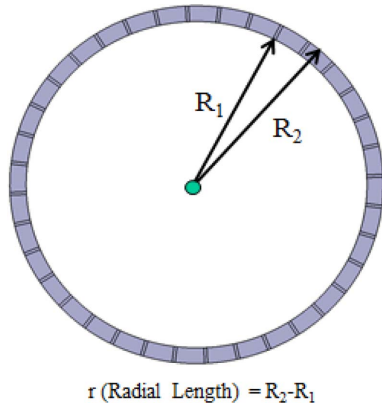


Fig. 5. Definition of the radial length for the variation of contact area.

해석을 진행하였고, friction plate와 separate plate 사이의 틈새는 0.1 mm부터 0.3 mm까지 변화시키며 드래그 토크에 미치는 영향을 해석을 통해 고찰하였다. 이 때, 해석에 사용된 그루브(groove) 모델은 본 연구진의 그루브 각도가 미치는 영향에 대한 선행 연구에서 최저 드래그 토크 값을 나타낸 40도(deg.) 모델을 선정하였다[13]. 그루브 각도는 회전축 중심에서 부터 plate의 원주에 내린 수직선의 방향을 0도로 정의한 것이다.

ATF의 물성은 일반적으로 사용되는 자동변속기 오일의 물성을 사용하였으며, ATF 유동은 좁은 틈새 내에서의 유동이므로 층류로 가정하였고, 해석은 상온에서 수행되며 열전달 및 ATF와 공기 사이의 표면장력

Table 1. Properties of various parameters

Parameters		Value
ATF @20°C	Viscosity (Pas)	2.91
	Density (kg/m ³)	842
Air @20°C	Viscosity (Pas)	1.85e-5
	Density (kg/m ³)	1.177
ATF Flow Rate (liter/min.)		0.1
Rotational Speed (rpm)		0~3500
Angle of Grooves (è)		40
Clearance (mm)		0.1, 0.2, 0.3
Number of Grooves (per 1/24 of whole model)		3
Size of the Model		1/24

은 무시하였다.

공기와 ATF의 2가지 상의 혼합상황에 대한 이상 유동(two-phase flow)을 구현하기 위해 유체 체적법(volume of fluid, VOF)을 사용했으며, 초기 채널 내부는 공기로 가득 차 있고 해석이 진행되면서 입구를 통해 일정한 유량으로 분사된 ATF가 채널 내부를 가득 채우게 된다. ATF 유량은 일정 속도로 일정 시간 분사되는 것으로 가정하여 조절하였다[13]. 채널 내부를 가득 채운 ATF는 플레이트의 회전에 의한 원심력 및 중력에 의해 출구로 빠져나가게 되고 이에 따라 채널 내부로 공기가 유입된다.

Table 1은 유한요소 해석을 위해 사용된 여러 물성치와 해석 범위이다.

2.2. 드래그 토크 산출

1970년대 부터 많은 연구진들에 의해 클러치 내부의 드래그 토크를 예측하는 수학적 모델들이 개발되었다. 층류 유동과 ATF 단일 유동에 기반을 둔 전통적인 수학적 모델링의 경우 고속 영역에서 공기와의 상호 작용에 의한 드래그 토크의 감소를 예측하는데 한계가 있다. 드래그 토크는 유체의 점성에 의한 전단응력과 friction plate의 내경, 외경으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다[12].

$$T = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r \tau dr \quad (1)$$

여기서, T 는 드래그 토크, R_1 는 friction plate의 내경, R_2 는 friction plate의 외경, r 은 평균 반경, τ 는 유체의 전단응력을 의미한다.

본 연구에서는 식 (1)을 이용해 해석으로부터 얻어진 전단응력을 드래그 토크로 환산하였고, 전단응력은 friction plate와 separate plate 간 틈새의 중간 단면에서의 평균값을 취했다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 접촉 면적 변화에 따른 영향

Fig. 6은 접촉 면적의 변화에 따른 드래그 토크의 변화를 나타낸 그래프이다. 여기서, radial length는 Fig. 5에서 정의한 바와 같이, friction plate의 외경과 내경의 차이를 의미하며, 1 mm씩 감소시킨 세가지 모델의 경우, 접촉 면적의 감소율은 약 25% 정도임을 확인할 수 있었다.

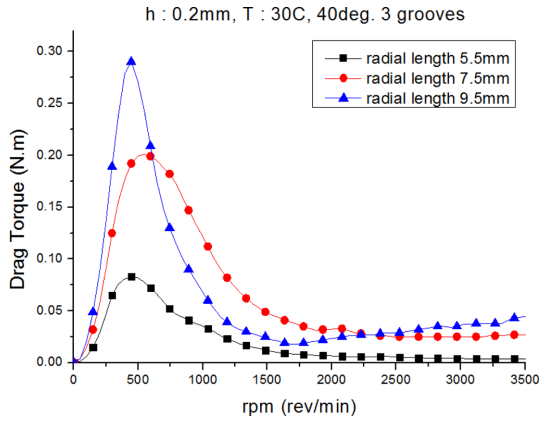


Fig. 6. Drag torque variation with respect to the contact area of friction plate.

결과로부터 우선, 세가지 모델 모두 저속 영역에서는 드래그 토크가 증가하다가 고속 영역에서는 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 저속에서는 ATF가 클러치 내부에 채워져 있어 상대적으로 큰 유체의 전단응력에 의해 드래그 토크가 크게 나타나고, 속도가 증가함에 따라 ATF가 외부로 빠져나가면서 드래그 토크가 감소함에 따른 결과이다. 또한, 접촉 면적이 감소함에 따라 전체적인 드래그 토크가 감소함을 알 수 있는데, 해석결과에서 유한요소모델 반경방향 단면에서의 ATF의 속도 분포를 확인해 보면 radial length 9.5 mm, 7.5 mm 일 때 3500 rpm에서 각각 2.6, 1.5 (m/s)의 최대속도를 보인다. 속도 증가는 전단응력 증가를 가져오므로 이로부터 접촉면적이 클 경우 드래그 토크가 증가함을 알 수 있다.

또한, 결과로부터 radial length 5.5 mm, 9.5 mm에서는 최대 드래그 토크가 500 rpm 부근에서 발생되지만, 7.5 mm에서는 약 700 rpm 부근에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는, radial length 9.5 mm 모델의 경우, 플레이트의 반경이 넓어짐에 따라 원심력이 커지게 되고, 유체가 틈새를 가득 채우기도 전에 외부로 빠져나가기 때문에 최대 토크가 7.5 mm 모델에 비해 더 낮은 rpm에서 나타나는 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 최대 드래그 토크 이후에 급격히 감소하는 영역(Fig. 3에서 B)에서도 함께 설명될 수 있는데, 반경이 커짐에 따라 기울기가 더욱 급해지는 것을 알 수 있다.

한편, 접촉면적 감소율과 드래그 토크 감소율은 일정한 비율을 보이지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

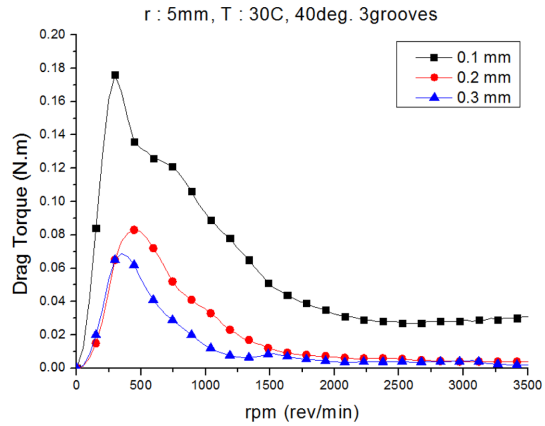


Fig. 7. Drag torque variation with respect to the clearance between friction plate segments.

앞서 제시한 식 (1)을 층류 유동을 가정하고 식을 전개하면 다음과 같다.

$$T = \frac{\pi \mu \omega}{2h} (r_o^4 - R_i^4) \quad (2)$$

여기서, r_o 는 ATF가 채워져 있는 반경을 의미한다. 즉, 층류유동의 가정하에서 드래그 토크는 동일한 점성과 틈새에서 회전속도 및 유체가 충전되는 반경과 내경에 대해 각각 4승에 비례하여 증감하게 된다.

3-2. 틈새의 변화에 따른 영향

Fig. 7은 friction plate와 separate plate 사이의 틈새(clearance) 변화에 따른 드래그 토크의 변화 양상을 나타낸 것이다.

실제 다판의 클러치가 작동함에 있어서 friction plate와 separate plate가 일정하게 배열이 되어 있는 것이 아니라, ATF분사 홀 위치, 점성 및 유량 등에 의해 배열이 시시각각 변화함에 따라 각 plate 사이의 틈새도 변화하게 된다. 이 때, 변화하는 틈새의 크기에 따라 드래그 토크도 변화하게 되는데, 이를 확인하기 위해 본 연구에서는 틈새를 0.1, 0.2, 0.3 (mm)로 변화시키며 해석을 진행하였다.

결과로부터 friction plate와 separate plate 사이의 틈새가 좁아짐에 따라 드래그 토크가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 두 판 사이에서의 전단응력이 두 판 사이의 간격에 반비례하는 뉴턴 유체의 점성 법칙에 잘 일치하는 것으로, 틈새가 좁아지면 전단응력이 증가하여 ATF에 의한 드래그 토크가 증가하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 드래그 토크에 영향을 미치는 다양한 변수들 중 일정한 ATF 분사 조건에서 friction plate 면적, friction plate와 separate plate 사이의 틈새의 변화에 따른 드래그 토크의 변화를 이상유동 해석을 통해 정량적으로 고찰하였다.

Friction plate면적 변화에 의해 ATF-plate간 접촉면적이 변화하는 경우, 해석 결과로부터 접촉 면적이 각 모델에 따라 약 25%씩 선형적으로 증가함에도 불구하고 드래그 토크는 비선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 클러치의 원래 기능인 동력 전달 측면에서 볼 때, 드래그 토크를 감소시키기 위해 접촉 면적을 무한히 줄일 수는 없으므로 설계 단계에서 적절한 범위를 고려해야 할 것이다.

또한, Friction plate와 separate plate 사이의 틈새가 미치는 영향은 틈새가 커짐에 따라 전달용력이 감소하여 드래그 토크가 감소하는 것으로 나타났다.

실제 실험 결과와 유사한 정량적인 드래그 토크 값을 예측하기 위해 수행된 본 해석 결과를 통해 마찰재의 크기, 형상 및 방향과 배열 설계뿐만 아니라 클러치 팩 전체 설계의 기초자료가 되므로 드래그 토크를 제어하는데 설계 단계에서 각 변수의 영향을 예측하는데 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 2014학년도 한남대학교 학술연구 조성비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] McKinsey and Company, "Roads toward a low-carbon future", Published March, 2009.
- [2] Gillis, J., Cooper, M., "On the road to 54 mpg : A progress report on achievability", Published April, 2013 by Consumer Federation of America.
- [3] Ryu, J. S., Sung, I.-H., "Change in the drag torque at an automotive clutch with respect to transmission oil flow rate and rotational speed", Proc. Fall Conference of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, October 2013.
- [4] Madhavan, J., Pandit, G., Barnholt, M., Suppiger, R., "Application of simulation based methods in development of wet clutch system", *SAE Technical Paper*, No.2012-28-0022, 2012.
- [5] Kitabayashi, H., Li, C. Y., Hiraki, H., "Analysis of the various factors affecting drag torque in multiple-plate wet clutches", JSAE/SAE International Spring Fuels & Lubricants Meeting, Yokohama, Japan, 2003.
- [6] Hu, J.-B., Jing, C.-B., Peng, Z.-X., Wang, B., "Research on drag torque prediction model for the wet clutches", *J. Beijing Inst. Technol.*, Vol. 17, No. 4, 405-409, 2008.
- [7] Yuan, Y., Attibele, P., Dong, Y., "CFD Simulation of the Flows Within Disengaged Wet Clutches of an Automatic Transmission", *SAE Technical Paper*, No. 2003-01-0320, 2003.
- [8] Yang, Y., Lam, R. C., Fujii, T., "Prediction of torque response during the engagement of wet friction clutch", *SAE Trans.*, Vol. 107, No. 6, pp. 1625-1635, 1998.
- [9] Lee, H.-Y., Kim, G.-Y., Hur, M.-D., "Analysis of sliding friction and wear properties of clutch facing for automobile (Part 2)", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 21, No. 2, pp. 77-82, 2005.
- [10] Kim, C. K., Lee, I. K., "Failure study for tribological characteristic analysis of a clutch system in passenger cars", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 22, No. 4, pp. 196-202, 2006.
- [11] Takagi, Y., Nakata, H., Okano, Y., Miyagawa, M., Katayama, N., "Effect of two-phase flow on drag torque in a wet clutch", *J. Adv. Res. Phys.*, Vol. 2, No. 2, 021108, 2011.
- [12] Shihua, Y., Peng, Z.-X., Jing, C.-B., "Experimental research and mathematical model of drag torque in single-plate wet clutch", *Chin. J. Mech. Eng. (Engl. Ed.)*, Vol. 23, pp. 1-8, 2011.
- [13] Ryu, J. S., 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.