

록업 클러치 주변의 온도 측정 및 수치 해석

Measurement and Numerical Analysis for Temperature near the Lockup Clutch

고 권 현*, 유 흥 선**, 조 성 욱**, 이 규 봉***
Gwon Hyun Ko, Hong Sun Ryou, Seong Wook Cho, Gyu Bong Lee

ABSTRACT

The present article deals with the measurement and the numerical calculations for the temperature distribution near the facing of the lockup clutch. The rotating telemetry system is introduced for the estimation inside high-speed torque converter. For the numerical calculation, the effect of the convective heat transfer is considered as well as the conduction to the solid. The estimation shows that the oil temperature near facing rapidly rises as the lockup clutch is engaged. The numerical results shows good agreements with the experimental values for the maximum temperature near the facing of the lockup clutch.

주요기술용어 : Lock-up clutch(록업 클러치), Rotating telemetry system(회전무선계측기), Torque converter(토크 컨버터)

Nomenclature

$F_{h,i}$: diffusional energy flux in direction x_i	u_i	: velocity component in direction x_i
\sqrt{g}	: determinant of metric tensor	x_i	: Cartesian coordinate ($i=1,2,3$)
h	: static enthalpy	η	: heat generation factor
p	: pressure	ρ	: density
q	: heat flux induced by friction	τ	: frictional stress
S_h	: energy source	τ_{ij}	: stress tensor component
S_i	: momentum source components		
S_m	: mass source		
T	: temperature		
t	: time		

1. 서 론

토크 컨버터는 엔진에서 발생한 동력을 전달하는 장치로써 자동차의 부드러운 출발과 연속적인 변속을 담당하는 차량용 자동 변속기의 가장 중요한 부분 중 하나이다. 토크 컨버터는 크게 임펠러(impeller), 스테이터(stator), 그리고 터빈(turbine)으로 구성되어 있으며 고속에서의 슬립

* 회원, 중앙대학교 대학원
** 회원, 중앙대학교 기계공학부
*** 회원, 한국생산기술연구원

(slip)으로 인한 손실을 적게하고 마찰을 통해 적절한 회전력을 얻기 위해 록업 클러치가 설치되어 있다. 최근에 자동 변속 차량에 대한 수요가 크게 증가하고 있음에도 불구하고 기존의 수동 변속 차량에 비해 많은 연료 소모는 자동 변속 차량의 큰 단점으로 인식되고 있다. 특히 연료 저감과 효율 증대는 최근의 자동차 산업의 가장 중요한 과제이므로 토크 컨버터의 성능 개선은 매우 중요한 문제로 인식되고 있다.^{1,3)}

토크 컨버터의 성능에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 분석을 통해 설계인자를 도출하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. Bahr 등⁴⁾이나 Brun과 Flack⁵⁾은 LDV(laser doppler velocimetry)을 이용하여 임펠러와 터빈 내부의 유동장을 측정한 바 있으며 Kobayashi 등⁶⁾과 Cigarini 등⁷⁾은 수치해석을 통해 내부 유동장을 해석하고 실험 결과와 비교하였다. 그러나 이러한 연구들은 주로 임펠러와 터빈 내부 유동장의 측정 및 해석에 중점을 두고 있으며 록업 클러치의 체결에 따른 영향은 고려하지 않고 있다. 록업 클러치의 피스톤과 커버가 체결될 때 슬립에 의해 발생하는 마찰열은 온도상승 및 열변형을 일으키게 되고 나아가 체결력 약화의 원인이 되며 록업 클러치의 내구성을 저하시게 된다. 따라서 체결 시 발생하는 마찰열에 의한 록업 클러치 내부의 온도 분포를 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 그러나 록업 클러치의 피스톤과 커버 사이의 간격이 매우 좁고 고속 회전으로 인해 발생된 내부 유동이 매우 복잡하여 마찰재 주위에서의 유동장이나 온도 분포 등의 측정은 현재까지 수행된 바 없으며 수치해석적인 연구자료 또한 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 회전무선계측기를 이용하여 고속으로 회전하는 토크 컨버터 내부의 록업 클러치의 마찰재 주변 온도를 측정하였다. 이와 함께 록업 클러치로의 전도 열전달과 오일 유동에 의한 대류 열전달이 고려된 복합 열전달을 수치적으로 해석하여 토크 컨버터 내부의 온도 분포를 계산하고 실험결과와 비교하여 검증

하였다. 본 연구를 통해 토크 컨버터의 성능 개선 및 기술 개발을 위한 자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

온도 측정을 위한 열전대의 설치에 있어서 가장 큰 문제점은 록업 클러치의 회전으로 인해 열전대가 꼬이게 된다는 점이다. 열전대는 매우 민감한 측정 센서이므로 열전대들이 서로 꼬이게 되면 데이터의 정확도를 크게 저하시킬 뿐만 아니라 고속 회전에 의해 열전대 자체가 파손될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 회전 무선 계측기(Rotating Telemetry System)⁸⁾을 도입하였다. Fig. 1은 회전무선계측기와 열전대의 설치에 대한 개략도를 나타내고 있다. 이 장치의 가장 큰 특징은 측정 대상이 되는 회전체와 같은 속도로 회전하며 측정한다는 것이며 이러한 특징으로 센서의 꼬임을 방지할 수 있게 된다. 다시 말해서 계측기는 고속 회전하는 록업 클러치와 같은 축으로 연결되어 회전되며 이때 축에 설치된 홈을 따라 열전대를 회전체에 연결시킴으로써 열전대의 물리적 손상을 막게 된다.

Fig. 2는 전체적인 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 회전무선계측기는 구동 모터와 토크 컨버터 사이에 위치하게 되며 계측을 위해 필요한 전기를 별도의 전원으로부터 공급받는다. 회전무선계측기의 작동을 위

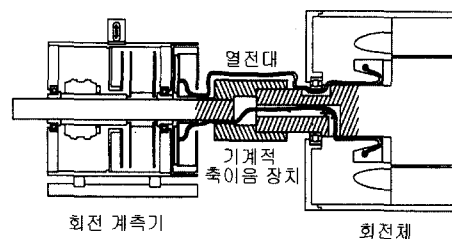


Fig. 1 Connection of rotating telemetry and rotating device

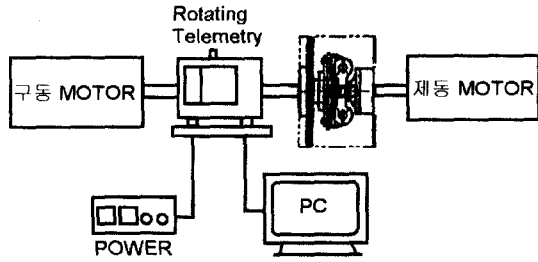


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

한 동력은 구동모터로부터 연계되며 따라서 구동모터는 임펠러와 계측기를 동시에 회전시키게 되므로 계측기와 토크 컨버터의 커버는 같은 각속도로 회전하게 된다. 시간에 따른 측정 데이터는 병렬 포트를 통해 퍼스널 컴퓨터에 입력되어 저장된다. 본 연구에서는 온도 측정을 위해 T형 열전대(T-type thermocouples)를 사용하였다. Fig. 3은 마찰재 주위의 열전대 설치위치를 보여주고 있다. 본 연구에서는 마찰열에 의한 열전달의 영향을 보기 위해서 마찰재의 윗부분과 마찰면, 그리고 아랫부분에 각각 설치하였다.

2.2 실험방법 및 조건

록업 클러치 체결시 마찰재 주변의 온도 측정을 위한 이번 실험은 Table 1에 나타난 바와 같은 조건에서 수행되었다. Case 1은 미끌림 사이클 실험(slip cycle test)으로써 271rpm의 미끌림 속

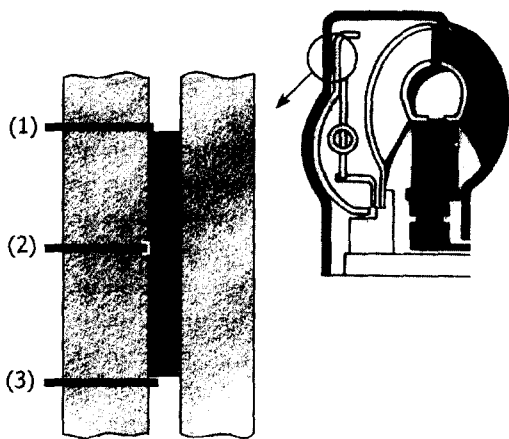


Fig. 3 The schematic for the location of thermocouples

Table 1 Condition for experiment

	Case 1 (Slip cycle test)	Case 2 (Continue slip test)
Slip rpm [rpm]	271	70
t_r/t_s [sec/sec]	2.5/7.5	600/60
Pressure [kgf/cm ²]	4.6	4.0
Torque [kgf · m]	20	15.4

도하에서 2.5초 체결과 7.5초 분리를 하나의 사이클로 하여 반복적으로 수행하였으며, Case 2는 연속 미끌림 실험(continue slip test)으로써 70rpm의 미끌림 속도하에서 10분간의 체결과 1분 동안의 분리를 반복한다. 분리상태에서는 내부의 오일이 순환되어 새로운 오일이 유입된다. Case 1과 2에서 클러치의 접촉면압은 각각 4.6 kgf/cm²과 4.0 kgf/cm²이며, 전달 토크는 각각 20 kgf · m와 15.4 kgf · m이다.

3. 수치해석방법

3.1 지배방정식

토크컨버터 내부의 유동장 및 온도장 해석을 위해 범용 유체해석 프로그램인 STAR-CD V3.100A를 사용하였으며 여기에서 사용된 지배방정식을 카테시안 좌표계로 나타내면 다음과 같다.⁹⁾

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial(\sqrt{g}\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = S_m \tag{1}$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial(\sqrt{g}\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\sqrt{g}\rho h)}{\sqrt{g}\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h - F_{h,ij}) \\ & = \frac{\partial(\sqrt{g}P)}{\sqrt{g}\partial t} + u_j \frac{\partial P}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서 t 는 시간, x_i 는 카테시안 좌표, u_i 는 x_i 방향의 유체 순간속도성분, τ_{ij} 는 응력 텐서 (stress tensor) 성분, S 는 생성항, h 는 정엔탈피 (static enthalpy)를 나타낸다. 지배방정식들은 STAR-CD내에서 일반 좌표계에 대해 변환되며 유한 체적법을 통해 차분하여 해석한다.

3.2 격자구성 및 해석조건

록업 클러치의 체결과 분리는 내부 오일의 유압에 의해 연속적으로 움직이면서 발생되지만 수치해석에서 이러한 계산 범위의 변화를 연속적으로 묘사하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 많은 계산 용량을 요구하기 때문에 본 장에서는 각각의 상태에 대한 계산 격자를 따로 구성하여 계산하였다. 또한 록업 클러치에서 외부 공기로의 열전달을 고려하기 위해서 록업 클러치의 크기 정도의 외부 공기를 포함시켰다. 격자의 구성에는 전산유체역학(computational fluid dynamics)과 구조해석(structural analysis)에서 널리 사용되고 있는 상용 프로그램인 ICFM-CFD를 사용하였다.

Fig. 4는 계산 범위 전체에 대한 3차원 격자를 나타낸 것이다. 전체 격자의 개수는 약 54,000이다. 경계 조건은 모두 벽면으로 처리하여 벽면에서의 오일 유동의 속도는 벽면의 속도와 같게 된다. 해석에 사용된 오일과 외부의 공기에 대한 물성치는 Table 2에 나타낸 바와 같다. 록업 클러치 내부의 열원은 클러치 체결시 발생하는 토크 컨버터 커버와 록업 클러치의 피스톤간의 마찰에 의한 마찰열로써 이때 발생하는 열플럭스를 다음과 같은 단위면적당 마찰열 발생량의 식으로부터 가정하였다.

$$q = \eta \tau v = \eta (\mu p) (\omega r) \quad (4)$$

여기서, η 는 열 발생 계수 (heat generation factor), τ 는 마찰 응력, v 는 속도, μ 는 마찰계수, p 는 접촉 면압, ω 는 상대 각속도이며, 축으로부터 마찰재 중간점까지의 거리 $r=0.1m$ 이다. 피스톤과 커버의 재질은 EN8a steel, 마찰재의 재질은 Resin bonded composite friction material이며 물

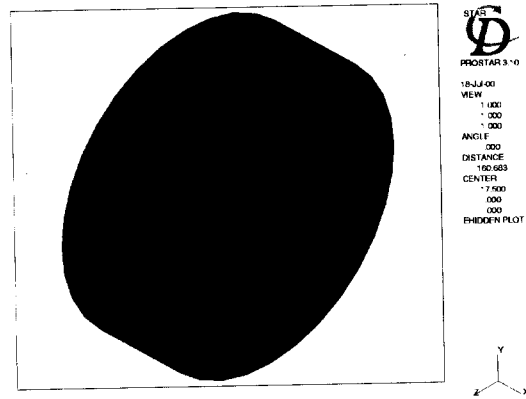


Fig. 4 Three-dimensional grid system

Table 2 Properties of fluids and solids

	EN8a steel	Friction face	Oil	Air
ρ [kg/m ³]	7800	2250	875	1.2
μ [Ns/m ²]	--	--	6.3×10^{-3}	1.79×10^{-5}
k [W/mK]	48	0.9	0.1311	0.0264
C_p [J/kgK]	452	1200	1900	1006

성치는 Table 2에 나타낸 바와 같다.

록업 클러치의 체결은 일정 속도에 이르렀을 때 발생되므로 유체 유동에 의한 대류 열전달의 효과를 고려하기 위해서 먼저 계산된 유동장을 초기 조건으로 가정하고 마찰재 부분에 열플럭스를 대입하여 유동장과 온도장을 함께 계산하였다. 실험에서와 같이 토크컨버터 커버와 록업 클러치 피스톤 사이의 상대 각속도를 Case 1과 2에서 각각 271rpm과 70rpm 으로 주었으며 열발생 계수 η 를 1.0으로 가정하여 식 (4)에 따라 마찰에 의해 발생하는 열플럭스를 계산하였다. 열플럭스는 접촉면의 양쪽 방향으로 고르게 전파되면서 전도에 의한 열전달과 유체 유동에 의한 대류 열전달이 복합적으로 발생하게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 체결 상태와 분리 상태를 각각의 격자에서 불연속적으로 계산하였다. 체결 상태의 결과를 분리 상태의 초기 조건으로 사용하고 다시 분리 상태의 결과를 다음 단계의 체결 상태에 대한 초기 조건으로 사용하면서 계

산하였으며 분리 상태의 계산에 앞서 외부 공기와 내부 오일은 재공급 된다는 가정에서 각각 20℃와 80℃로 주었다. 이처럼 불연속적인 계산을 수행한 것은 두 상태의 계산 도메인에 차이가 있기 때문이며 이로 인해 실험에서와 같은 많은 횟수의 반복은 불가능하였다. 그러나 실험에서도 알 수 있듯이 분리 상태에서 새로운 오일이 주입되면서 순환하고 있기 때문에 최종적인 온도 분포에 있어서는 큰 차이가 없을 것으로 사료되었으므로 Case 1에서는 10사이클을 계산하였으며 Case 2에서는 1사이클을 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 미끌림 사이클 시험(Case 1)에서 록업 클러치 작동 시작을 기준으로 100초에서 200초(10~20사이클)까지의 마찰재 주변(열전대 1)의 온도 변화를 보여준다. 록업 클러치 체결시 마찰재 주변의 오일 온도가 빠르게 상승하여 170℃ 이상까지 이르는 것을 볼 수 있다. 그리고 클러치가 분리되면 새로운 오일의 유입으로 인해 온도가 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 반복 회수에 따른 최고온도의 변화에 대한 수치해석 결과를 나타내고 있다. 반복 초기에 빠른 온도 상승으로 보이고 있으나 체결과 분리 상태가 계속 반복됨에 따라 177℃ 주위에서 수렴하는 결과를 보여주었다. Fig. 7은 록업 클러치가 체결된 상태에서의 온도 분포에 대한 수치해석 결과를

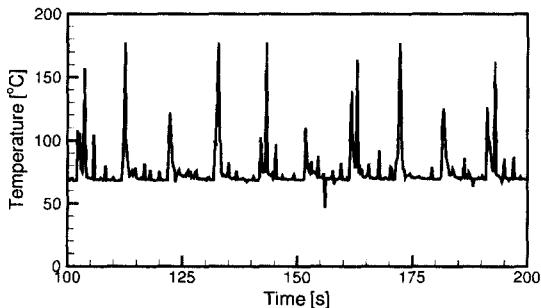


Fig. 5 Temperature variation with time near the facing of lockup clutch(Case 1)

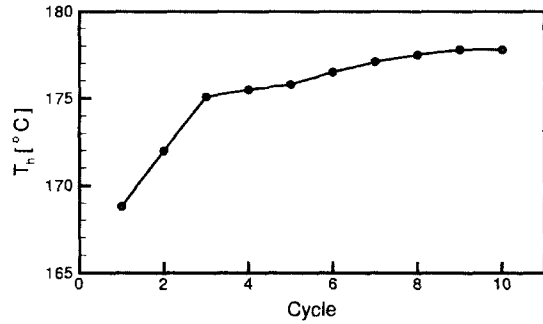


Fig. 6 Calculated Max. temperature variation with time (Case 1)

보여주고 있다. 여기서 보면 열원이 있는 마찰재 부분에서 온도 구배가 상당히 크며 나머지 부분에서는 비교적 좁은 범위내에서 온도 분포가 형성됨을 볼 수 있다. 마찰재 주변에서 최고 온도가 177.8℃를 나타내고 있는데 이것은 실험에서 얻은 값과 잘 일치하고 있다.

Fig. 8은 연속 미끌림 실험(Case 2)에 대한 측정 결과를 보이고 있다. 체결상태가 유지되는 동안에 온도가 꾸준히 증가하고 있으며 마찰부분(열전대 2)의 온도가 가장 높게 나타나고 있으며 순환 오일이 유입되는 마찰재 윗부분(열전대 1)에서 가장 낮은 온도를 보여주고 있다. 록업 클러치가 분리되면 온도는 급격히 감소하며 거의 초기 온도까지 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 앞서 미끌림 사이클 실험에서와 마찬가지로 분

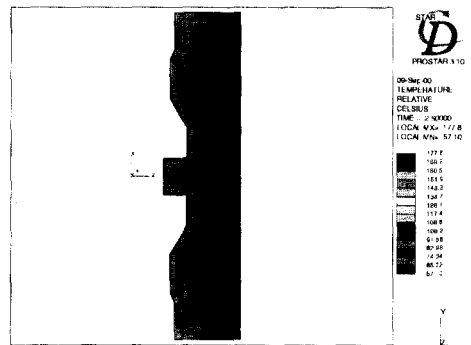


Fig. 7 Temperature distribution inside the torque converter for connection of the lockup clutch (Case 1)

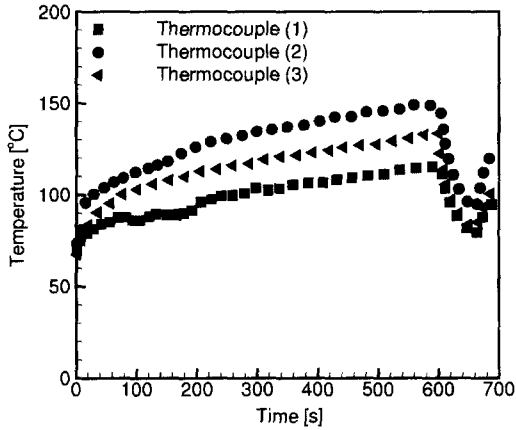


Fig. 8 Temperature variation with time near the facing of lockup clutch(Case 2)

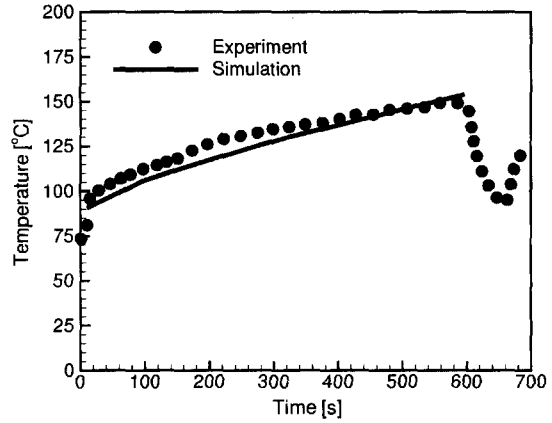


Fig. 10 Comparison the prediction with measurement for temperature variation to time

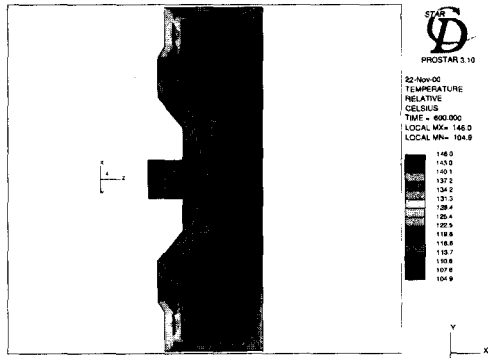


Fig. 9 Temperature distribution inside the torque converter for connection of the lockup clutch (Case 2)

리 상태에서 새로운 오일이 유입되어 순환하기 때문이다. 마찰부의 최고 온도는 약 150 °C이며 마찰재 아랫부분(열전대 3)에서는 약 135 °C을 보이고 있다. Fig. 9는 수치해석 결과로써 록업 클러치 주변의 온도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 마찰재에서의 최고 온도는 146.0 °C이며 마찰재 주변 오일의 최고 온도는 133.7 °C를 보이고 있다. Fig. 10은 시간에 따른 마찰재 주변의 최고 온도 변화에 대한 측정값과 수치해석 결과에 대한 비교를 보여주고 있다. 해석 결과가 최고 온도 변화에 대해서 실험과 좋은 일치를 보이고 있음을 알 수 있으며 본 연구에서 수

행한 수치방식이 마찰열의 전파와 온도 분포의 예측에 있어서 좋은 결과를 보여줄 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 록업 클러치 체결 시의 마찰재 주변에서의 온도를 측정하였으며 복합 열전달을 고려하여 마찰재 주변의 온도분포를 수치적으로 해석하였다. 앞서 제시한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 미끌림 사이클 실험에서는 록업 클러치 체결 시 마찰재 주변의 온도가 순간적으로 170°C 이상의 고온까지 상승하였다.
- 2) 연속 미끌림 실험에서도 시간에 따라 온도가 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있었으며 특히 마찰재의 온도는 약 150°C에 이르는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 수치해석 결과는 시간에 따른 온도 변화와 최고 온도 예측에 있어서 실험과 좋은 일치를 보여주었다.

본 연구를 통해 록업 클러치 체결시 발생하는 마찰열이 마찰재 및 작동 오일의 온도에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 앞으로 다양한 조건에서의 실험과 해석을 통해 여러 설계 인자들이 마찰열 발생 및 냉각에 미치는 영향에 대해서 연구할 계획이다.

후 기

본 연구는 첨단 생산 시스템 개발 지원 과제 “지능형 설계 지원 시스템”의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 1) 신현담, 자동 & 무단 변속기, 도서출판 골든벨, 1999.
- 2) 박병일, 자동차 오토매틱 1, 도서출판 카테크, 1998.
- 3) Y. Kunisaki, T. Kobayashi, T. Saga, N. Taniguchi, S. Segawa, K. Kajitani, T. Fukunaga, T. Tasaka, “A Study on Internal Flow Field of Automotive Torque Converter-Three-Dimensional Flow Analysis around a Stator Cascade of Automotive Torque Converter by using PIV and CT Techniques,” JSAE Review Vol.22, pp. 559-564, 2001.
- 4) H. M. Bahr et al., “Laser Velocimeter Measurements in the Stator of a Torque Converter,” SAE 901769, 1990.
- 5) K. Brun, R. D. Flack, “Laser Velocimetry Measurements in the turbine of an Automotive Torque Converter, Part 2-Unsteady Measurements,” ASME Paper, 95-GT-293, 1995.
- 6) T. Kobayashi et al., “Three Dimensional Flow Simulation in a Torque Converter,” Technical Paper of JSAE, No.9531526, 1995.
- 7) M. Cigarini, S. Jonnavithula, “Fluid Flow in an Automotive Torque Converter : Comparison of Numerical Results with Measurement,” SAE 950673, 1995.
- 8) 하경표, “축방향 냉각통로를 갖는 유동전동기에 대한 포괄적 열해석,” 서울대학교 박사학위 논문, 1999.
- 9) STAR-CD Methodology Version 3.100, Computational Dynamics Ltd, London, 1999.