

차량 연비개선을 위한 자동변속기유 열교환기에 대한 실험적 연구[§]

장충만* · 이용규* · 강병동* · 유재석* · 이종화* · 김현정* · 김동권*

* 아주대학교 기계공학부

Experimental Study on Auto-Transmission Fluid Heat Exchanger for Improving Vehicle Fuel Efficiency

Chung Man Jang*, Yong kyu Lee*, Byeong Dong Kang*, Jai Suk Yoo*,
Jong hwa Lee*, Hyun Jung Kim* and Dong Kwon Kim**

* School of Mechanical Engineering Ajou Univ.

(Received December 27, 2010 ; Revised June 27, 2011 ; Accepted June 28, 2011)

Key Words: ATF W/C Plate-Fin Heat Exchanger(자동 변속기 관형 핀 열교환기), Fuel Economy(연비), Coolant(냉각수) Auto Transmission Fluid(변속기유), Effectiveness(유효도)

초록: 차량에서 구동계의 의한 손실은 전체 연료 소비 손실에서 약 4%를 차지하며 그 중에서도 자동변속기는 구동계 손실에 큰 영향을 끼친다. ATF W/C 열교환기는 근래에 관심이 높아지고 있는 부품인데, 자동변속기 윤활유의 온도를 적정한 상태로 유지시켜 줌으로서 연비 개선 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 ATF W/C 열교환기 단품 특성을 실험적으로 파악하고, ATF W/C 열교환기가 실제 차에 장착되었을 때의 연비 개선 효과를 살펴보았다. 본 연구에서는 실험을 통하여 ATF 와 냉각수의 온도와 유량에 대한 유효도를 파악하고 유효도를 예측하기 위한 상관식을 도출하였다. MATLAB의 Simulink 프로그램을 통하여 실험의 결과를 바탕으로 ATF W/C 열교환기 유무에 따른 연료 소모량을 비교 하여 연비 개선 효과를 분석하였다. 그 결과 ATF W/C 열교환기가 장착된 자동차는 0.992% 연비 개선 효과가 나타났다.

Abstract: Drive-train friction loss in a vehicle may account for 4% of its total fuel consumption loss. An ATF W/C (auto-transmission fluid warmer/cooler) plate-fin heat exchanger is a type of heat exchanger that uses metal plates to transfer heat between the auto-transmission fluid and coolant. The use of an ATF W/C heat exchanger can result in a fuel economy improvement of about 1% in vehicles. An experimental setup for testing the thermal performance of an ATF W/C plate-fin heat exchanger is developed. In this study, the influence of the ATF and coolant, flow rates, and temperature on the efficiency of an ATF W/C heat exchanger are investigated experimentally. From the experimental data, a simple correlation for predicting the efficiency of an ATF W/C heat exchanger is proposed. On the basis of this correlation, the fuel economy of a vehicle with and without an ATF W/C heat exchanger is compared by using Simulink. Finally, it is shown that the fuel economy is improved by 0.992% when an ATF W/C heat exchanger is installed in the vehicle.

- 기호설명 -

C_{ATF} : ATF 열용량 [$W/^\circ C$]
 $C_{coolant}$: 냉각수 열용량 [$W/^\circ C$]
 i : 기어비
 \dot{m}_{ATF} : ATF 질량 유량 [kg/s]
 $\dot{m}_{coolant}$: 냉각수 질량 유량 [kg/s]

P_{DTF} : 구동계 마찰 동력 [W]
 Q_{LHV} : 연료의 저위발열량 [kJ/kg]
 $T_{ATF,in}$: ATF 입구온도 [$^\circ C$]
 $T_{ATF,out}$: ATF 출구온도 [$^\circ C$]
 T_{amb} : 대기온도 [$^\circ C$]
 $T_{coolant,in}$: 냉각수 입구온도 [$^\circ C$]
 $T_{coolant,out}$: 냉각수 출구온도 [$^\circ C$]

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, dkim@ajou.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

그리스문자

ε : 유효도

ρ : 밀도[kg/m^3]
 η_t : 열효율[%]

1. 서론

이산화탄소 규제가 강화되고 유가가 상승함으로 인하여 자동차의 연비에 대한 관심이 증가하고 있다. ATF(Auto Transmission Fluid)는 자동변속기의 윤활유이며 온도에 따라 점도가 바뀌기 때문에 구동계 마찰 동력에 영향을 가지고 있다. 점도에 따라 구동계 마찰 동력이 변하며 이는 연비와 직접적인 관련성이 있어 ATF 관한 연구는 활발히 진행되어 왔다. 관련 연구동향을 조사한 바에 의하면, ATF의 제조사 별 종류에 따른 물성 시험, 마찰특성시험 등을 통한 ATF 특성을 비교 연구.⁽¹⁾ 자동변속기 ATF 펌프 성능 향상에 따른 최적화 기법을 적용한 성능개선 연구.⁽²⁾ 파워트레인 냉각 시스템 효율 개선 방안을 위한 ATF 워머 유입 냉각수 유량 별 연비 시험에 관한 연구 등⁽³⁾의 연구동향을 통해 ATF와 연비개선에 관한 영향인자를 파악할 수 있었다. 하지만 상용화된 ATF W/C 열교환기의 열전달 성능 특성에 관한 연구가 필요하였다. 본 연구에서는 일부의 요소에만 국한하지 않고 실제 차량에서 요구되어지는 다양한 제어변수들을 통하여 실질적인 연비 개선 효과를 위한 연구에 중점을 두었다.

또한 모델기반의 ATF W/C 열교환기의 연비 개선 시뮬레이션이 개발되어 있지 않아 이를 위

해 개발하고자 하였다. Fig. 1은 자동차의 냉각 시스템을 나타낸다. 화살표의 방향은 유체 및 기체의 이동경로를 나타낸다. ATF W/C 열교환기는 냉각 시스템의 한 요소이며 ATF와 냉각수의 열교환 장치이다. ATF W/C 열교환기는 ATF의 온도를 적정 수준으로 유지해 주며 ATF 점도를 낮추어 구동계 마찰 손실을 줄이는 역할을 한다. 전체 연료 소비 손실에서는 약 1%, 구동계 연료 손실 부분 중 25%의 연비 개선 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. ATF W/C 열교환기 단품 특성을 파악하기 위해 실험 장치를 개발하여 단품 성능특성을 파악한다. 실험을 통하여 ATF와 냉각수의 온도와 유량에 대한 유용도의 변화를 파악하고 주요 영향인자를 도출한다. 이를 통하여 ATF W/C 열교환기의 상관식을 제공한다. 상관식을 바탕으로 MATLAB의 Simulink를 통하여 ATF 온도변화와 구동계 마찰 동력을 계산하여, 소모 연료량과 연비 개선에 효과를 도출하고자 한다.

2. 열교환기 이론

ATF W/C 열교환기의 유용도는 식 (1)과 같이 실제 열전달률을 최대 가능한 열전달률에 대한 비로서 정의한다.

$$\varepsilon = \frac{q(\text{실제 열전달률})}{q_{\max}(\text{최대 가능한 열전달률})} \quad (1)$$

Table 1 Properties of ATF used in the experiments

°C	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$
0	860	1.827
10	853.3	1.863
20	846.7	1.900
30	840.1	1.937
40	833.5	1.974
50	827.0	2.011
60	820.4	2.048
70	813.9	2.085
80	807.4	2.121
90	800.9	2.158
100	794.4	2.195

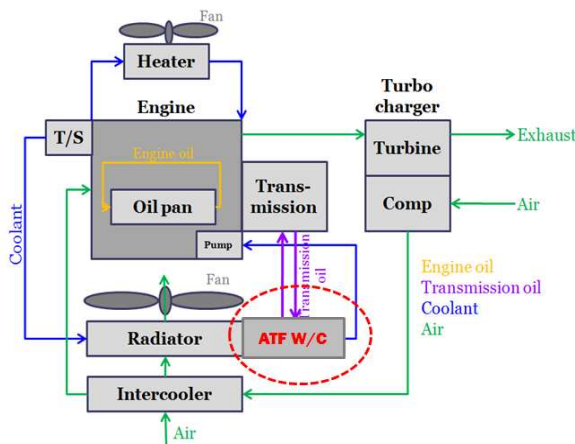


Fig. 1 Cooling systems in vehicle

ATF W/C 열교환기는 ATF 온도변화에 따라 냉각수에 의한 ATF Warming(가열) 단계와 ATF Cooling(냉각) 단계로 나누어 식을 적용하게 된다. 실험에 사용된 냉각수는 글리에틸콜과 물의 1대1 비의 혼합물로써 실험 조건 내에서 ATF 열용량은 냉각수 열용량 보다 항상 작기 때문에 식 (2)와 같이 C_{min} 은 항상 C_{ATF} 이 된다. Table 1은 본 실험에서 사용한 ATF-SP III의 제조사인 (주)미창석유공업에서 제공한 ATF 열적 물성치이다.

$$C_{ATF} < C_{Coolant} (C_{min} = C_{ATF}) \quad (2)$$

각 유체의 열용량 계산은 식 (3)과 같으며

$$C = \dot{m} C_p \quad (3)$$

식 (4)와 (5)와 같이 각 ATF 와 냉각수 열용량을 구할 수 있다.

$$C_{ATF} = \dot{m}_{ATF} C_{p,ATF} \quad (4)$$

$$C_{coolant} = \dot{m}_{coolant} C_{p,coolant} \quad (5)$$

먼저 ATF Warming 단계로 유용도는 식 (6)으로 정의되며

$$\varepsilon = \frac{C_{coolant} (T_{coolant,in} - T_{coolant,out})}{C_{ATF} (T_{coolant,in} - T_{ATF,in})} \quad (6)$$

ATF Cooling 단계의 유용도는 식 (7)로 정의된다.

$$\varepsilon = \frac{C_{coolant} (T_{coolant,out} - T_{coolant,in})}{C_{ATF} (T_{ATF,in} - T_{coolant,in})} \quad (7)$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

ATF W/C 열교환기 성능을 평가하기 위하여 실험 장치를 Fig. 2와 같이 구상하였다. ATF와 냉각수의 항온수조는 300L급 대형수조이며, 항온수조의 부족한 토출 용량을 보완하기 위해 각각

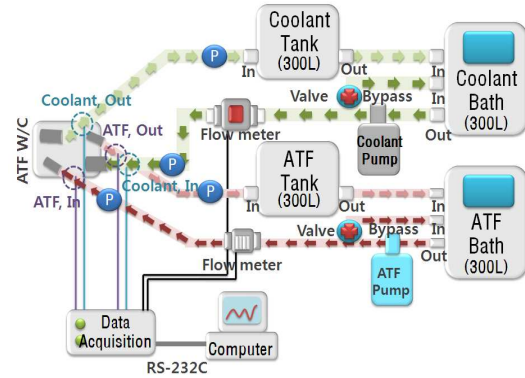


Fig. 2 Schematics of experimental apparatus

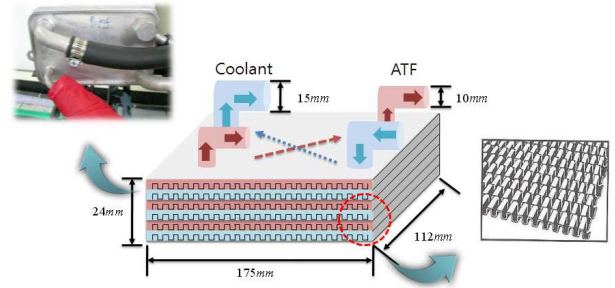


Fig. 3 Counter flow in ATF W/C heat exchanger

의 순환펌프를 사용하였다. 순환펌프와 유량계 사이에 바이패스 밸브를 설치하여 유량을 조절할 수 있게 하였다. ATF와 냉각수 유량을 측정하기 위해 전자식 유량계 와 기어식 유량계를 사용하였다. ATF W/C 열교환기 입·출구에 T-Type 온도 센서를 부착하여 온도를 측정하고 ATF W/C 열교환기의 열손실을 막기 위해 아이소핑크와 단열 테이프를 사용하여 단열하였다. ATF와 냉각수의 열교환 후 수조 탱크로 각 유체를 저장하게 된다. 수조탱크는 열교환을 마친 유체가 다시 항온수조로 들어가는 것을 방지하여 실험 시간 내에 설정된 온도를 안정적으로 토출 하는데 도움을 줄 수 있다. 측정된 온도와 유량은 YOKOGAWA DA100을 통하여 취득하고 DS600과 RS-232C 케이블을 통하여 컴퓨터로 전송하였다. Fig. 3과 같이 ATF W/C 열교환기는 평판 내부에는 튼튼 모양의 핀이 부착되어 있다. 핀에 의하여 유체의 유동방향은 불규칙해지며, 경계층은 완전하게 방해되어 진다. 그 결과 높은 열전달계수와 압력강하가 생기게 된다.⁽⁴⁻⁶⁾ ATF 와 냉각수 각 유체

는 대향유동을 통해 열 교환을 한다. ATF관과 냉각수관의 입·출구가 있으며 얇은 금속 시트의 층으로 구성되어 있다.

3.2 실험방법

ATF W/C 열교환기의 유용도를 계산하고 주요 영향인자를 도출하기 위해 ATF와 냉각수의 유량과 온도를 변경하여 실험하였고, 실험 내에서 식(8)과 같이 유용도의 영향인자들을 나열 할 수 있다.

$$\varepsilon = f(T_{ATF}, T_{coolant}, \dot{m}_{ATF}, \dot{m}_{coolant}) \quad (8)$$

3.2.1 실차 데이터

Table 2와 같이 실제 YF 쏘나타 차량의 ATF와 냉각수의 유량과 온도의 데이터를 기반으로 실험범위를 설정하였다.

Table 2 Data from actual vehicle

	\dot{m} (l/min)	T (°C)
ATF	0 ~ 10	20 ~ 120
Coolant	0 ~ 30	20 ~ 110

Table 3 Experimental conditions of ATF Temperature

\dot{m}_{ATF} (l/min)	$\dot{m}_{coolant}$ (l/min)	$T_{coolant,in}$ (°C)	$T_{ATF,in}$ (°C)
9	18	80	60
			70
			90
			100

Table 4 Experimental conditions of Coolant Temperature

\dot{m}_{ATF} (l/min)	$\dot{m}_{coolant}$ (l/min)	$T_{ATF,in}$ (°C)	$T_{coolant,in}$ (°C)
9	18	30	70
			75
			80
			85
			90

3.2.2 온도변화

Table 3, Table 4와 같이 ATF 및 냉각수의 온도변화에 따른 유용도를 도출하기 위해 실험 조건을 설정하였다.

3.2.3 유량변화

ATF와 냉각수의 유량변화에 따른 유용도를 도출하기 다음과 같은 실험 조건을 설정하였다. Table 5는 ATF Warming 단계로 ATF 유량은 5 ~ 13l/min의 범위로 냉각수 유량은 6 ~ 27l/min 범위로 설정하였다. 또한 냉각수의 온도범위가 6l/min 간격으로 실험하였지만 마지막 조건인 27l/min 일때, 3l/min 간격으로 27L/min이 되는 이유는 실험장치 최대 토출 유량이기 때문이다. ATF 온도는 냉각수온도 보다 낮은 상태인 70°C이며 냉각수는 90°C로 설정하여 ATF Warming 시 유량변화에 따른 유용도를 파악하고자 하였다. Table 6은 ATF Cooling 단계로 각 유체의 유량의 범위는 ATF Warming 단계와 동일하다. ATF 온도는 냉각수 온도 보다 높은 상태인 100°C이며 냉각수는 80°C로 설정하여 ATF Cooling 시 유량변화에 유용도를 파악하고자 하였다.

Table 5 Experimental conditions of ATF Warming

\dot{m}_{ATF} (l/min)	$\dot{m}_{coolant}$ (l/min)					$T_{ATF,in}$ (°C)	$T_{coolant,in}$ (°C)
5	6	12	18	24	27	70	90
7	6	12	18	24	27		
9	6	12	18	24	27		
11	6	12	18	24	27		
13	6	12	18	24	27		

Table 6 Experimental conditions of ATF Cooling

\dot{m}_{ATF} (l/min)	$\dot{m}_{coolant}$ (l/min)					$T_{ATF,in}$ (°C)	$T_{coolant,in}$ (°C)
5	6	12	18	24	27	100	80
7	6	12	18	24	27		
9	6	12	18	24	27		
11	6	12	18	24	27		
13	6	12	18	24	27		

3.3 데이터 취득

Fig. 4와 같이 ATF W/C 열교환기의 ATF 입구 온도($T_{ATF,in}$)와 출구온도($T_{ATF,out}$), 냉각수 입구온도($T_{coolant,in}$)와 출구온도($T_{coolant,out}$) 그리고 ATF 유량 (\dot{m}_{ATF}), 냉각수 유량($\dot{m}_{coolant}$)의 총 6개의 채널을 수집하였다. 온도측정을 위해 호스를 이어주는 황동 너트에 T-Type 온도 센서를 삽입하였다. 또한 Bypass에 의해 조절된 유량은 DAQ 장비로 실시간 유량을 확인 할 수 있었다. 실험은 ATF W/C 열교환기 입·출구 온도 및 각 유체의 유량이 정상상태에 도달 한 후 약 2분 동안의 데이터를 취득한다. 또한 반복실험을 통하여 5%이내의 오차 범위내의 실험결과를 확인하였다.

4. 실험결과 및 토의

4.1 온도변화에 따른 ATF W/C 열교환기의 유용도 변화

ATF 와 냉각수 유량 온도 변화에 대하여 다음과 같은 결과를 도출 할 수 있었다. Fig. 5와 같

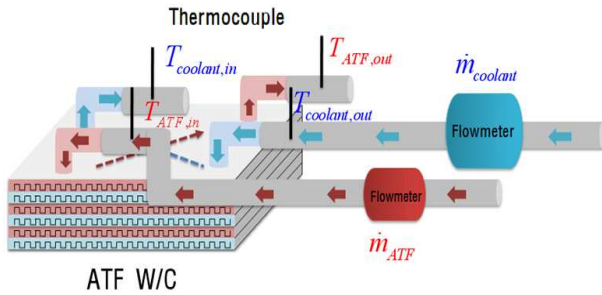


Fig. 4 Acquisition data from ATF plate-fin exchanger

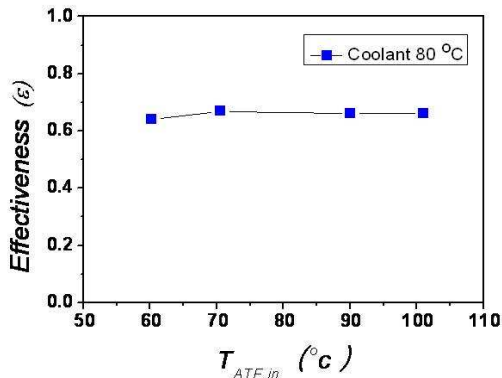


Fig. 5 Effect of ATF temperature on effectiveness

이 ATF 온도변화에 따라서 유용도는 약 0.6%로 거의 일정한 것을 확인할 수 있었고, Fig. 6과 같이 냉각수 온도변화도 유용도는 약 0.6%로 거의 일정한 것을 확인할 수 있었다.

4.2 유량변화에 따른 ATF W/C 열교환기의 유용도 변화

ATF 와 냉각수 유량 변화에 대하여 다음과 같은 결과를 도출 할 수 있었다. Fig. 7, Fig. 8과 같이 ATF Warming 단계와 ATF Cooling 단계에서 모두 ATF 유량이 증가 할수록 유용도가 감소하는 경향을 확인 할 수 있었다. Fig. 9, Fig. 10 과 같이 ATF Warming 단계와 ATF Cooling 단계에서 ATF 유량과 냉각수 유량이 증가하여도 유용도가 거의 일정한 경향을 확인 할 수 있었다. 따라서 앞서 유량 변화에 따른 유용도의 도출 결과를 통해 Fig. 11과 같은 상관식에 대한 그래프를 도출 하였다. ATF Warming과 ATF Cooling 단계에서 약 10%의 범위 내에 경향을 나타내었고 식 (9)와 같은 상관식을 도출하였다.

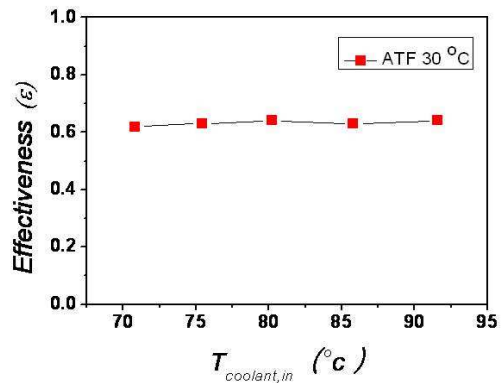


Fig. 6 Effect of coolant temperature on effectiveness

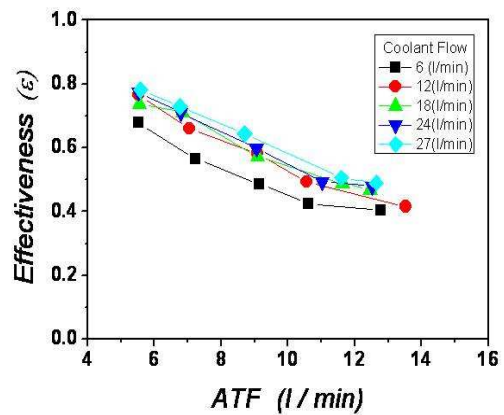


Fig. 7 Effect of ATF flow rate on effectiveness (ATF Warming)

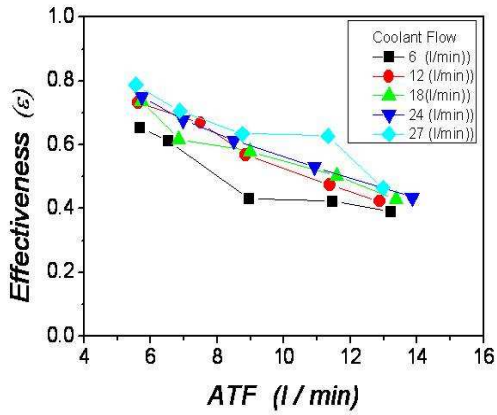


Fig. 8 Effect of ATF flow rate on effectiveness (ATF Cooling)

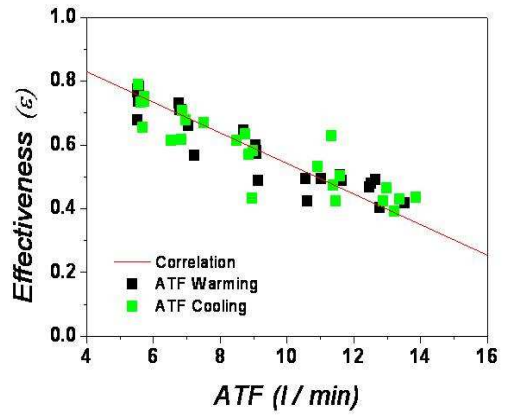


Fig. 11 Correlation and experimental data

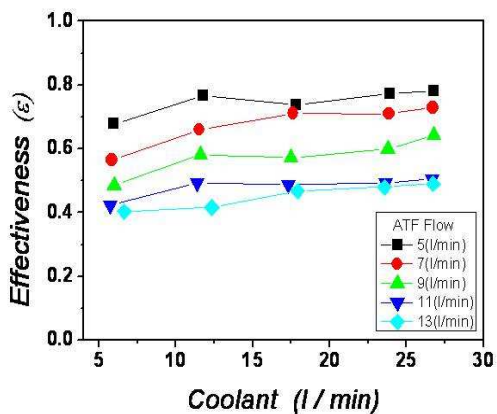


Fig. 9 Effect of coolant flow rate on effectiveness (ATF Warming)

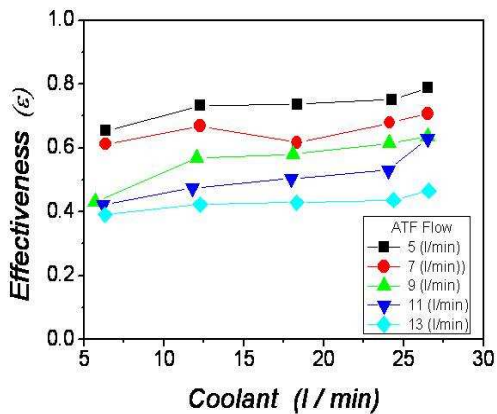


Fig. 10 Effect of coolant flow rate on effectiveness (ATF Cooling)

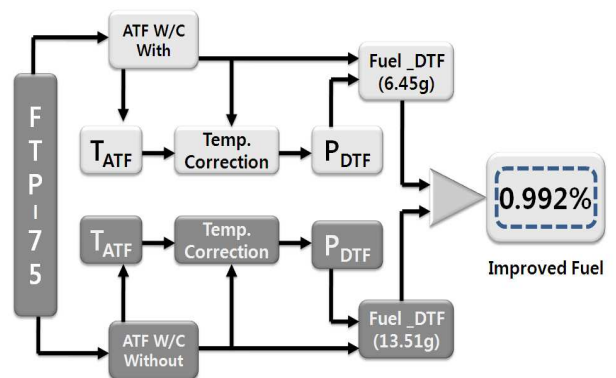


Fig. 12 Simulink model of ATF W/C heat exchanger

$$\varepsilon = 1 - 0.00161 C_{ATF} \tag{9}$$

4.3 Simulink를 이용한 실차에서의 ATF W/C 열교환기 작동 모델링

앞서 실험의 결과를 바탕으로 ATF W/C 열교환기 유무에 따른 연료량을 MATLAB의 Simulink를 통하여 비교 할 수 있다. 실제 자동차의 데이터를 기반으로 비교분석을 하기 위해 선행 연구자에 의해 수집된 데이터를 사용하였다. 차량의 공인 연비 모드 중 FTP(Federal Test Procedure)-75를 대상으로 하였으며, 대상 차량은 국내 K사의 1.6리터 급 가솔린 차량을 선정하였다. Fig. 12는 MATLAB의 Simulink 연비개선 모델을 간략하게 나타낸 것이다. 실제 차량에서 모든 조건을 최적화 충족시켰다. Simulink를 통하여 ATF 온도변화와 구동계 마찰동력을 통해 결국 연료량과 연비

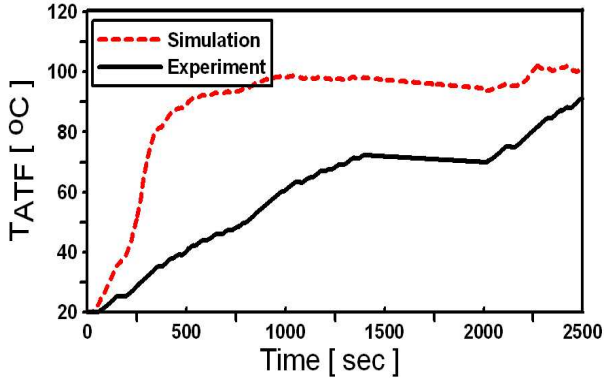


Fig. 13 ATF Temperature of vehicle and model with FTP-75 mode

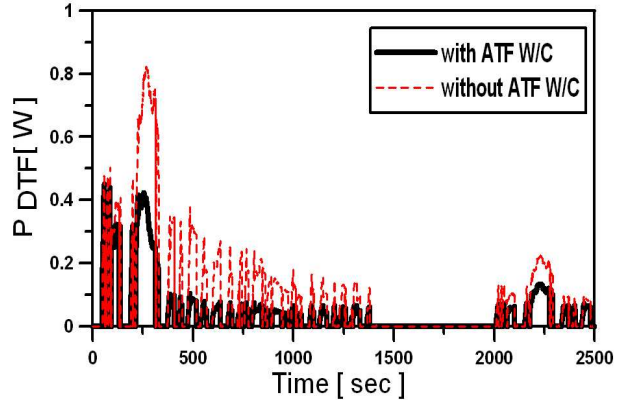


Fig. 14 Drive train friction of vehicle and model with FTP-75 mode

개선에 효과를 도출할 수 있다.

4.3.1 ATF 온도의 모델링

ATF W/C 열교환기의 유무에 따른 단위 시간당 ATF 온도변화의 이론식은 다음과 같다. 식 (10)은 ATF W/C 열교환기가 장착 되었을 때 이며 식 (11)은 장착되지 않았을 때이다. 여기서 ε 는 앞서 도출한 식 (9)을 사용하였다.

$$m_{ATF}c_{p,ATF} \frac{dT_{ATF,in}}{dt} = \dot{Q}_{gen} - hA(T_{coolant} - T_{amb}) \quad (10)$$

Simulink 를 통해 ATF W/C 유무에 따른 단위 시간당 ATF 온도변화를 도출할 수 있었다.

$$m_{ATF}c_{p,ATF} \frac{dT_{ATF,in}}{dt} = \dot{Q}_{gen} - hA(T_{coolant} - T_{amb}) + \varepsilon C_{ATF}(T_{coolant,in} - T_{ATF,in}) \quad (11)$$

Fig. 13은 선행 연구자에 의해 수집한 FTP-75 모드에서의 실차와 Simulink의 ATF 온도변화를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 점선은 Simulink의 ATF 온도가 되며 실선은 선행연구자에 의한 데이터 값이며, 두 선을 비교해 볼 때 시간에 따른 ATF 온도가 ATF W/C 열교환기에 의해 빠르게 워밍업 되는 것을 확인할 수 있다.

4.3.2 구동계 마찰 동력 모델링

구동계 마찰 동력은 식 (12)과 같으며 Simulink 를 통해 구동계 마찰 동력을 확인할 수 있었다.

$$P_{DTF} = C.F(T_{ATF,in})P_{DTF}(VSPD, i) \quad (12)$$

Simulink 프로그램을 통해 ATF W/C 유무에 따른 단위 시간당 동력계 마찰 손실을 비교할 수 있었다. Fig. 14와 같이 구동계 마찰 동력은 ATF W/C 열교환기에 의해 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서 실선은 ATF W/C 열교환기가 장착 했을 때이며, 점선은 ATF W/C 열교환기가 장착되지 않을 때 의 구동 마찰 동력손실을 나타낸다.

4.3.3 연료량 모델링

구동계 마찰 손실을 통해 식 (13)과 같이 연료량을 구할 수 있고, ATF W/C 열교환기 유무에 따른 연료량을 비교할 수 있게 된다.

$$m_{DTF} = \frac{\int_0^t P_{DTF} dt}{(h_R - h_P)} = \frac{Q_{LHV}}{\eta_t \times P_{DTF}} \quad (13)$$

5. 결 론

- (1) ATF 온도와 냉각수 온도의 변화에 따른 유용도는 크게 차이가 없다.
- (2) ATF 유량이 증가 할수록 유용도는 감소하였고 냉각수의 유량은 증가 하여도 유용도의 변화는 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 따라서 다음과 같은 상관식을 도출할 수 있었다.

$$\varepsilon = 1 - 0.00161C_{ATF}$$

- (3) ATF Warming 단계와 ATF Cooling 단계에서 유용도는 10% 내의 비슷한 경향을 보였다.
- (4) 1.6리터 급 가솔린 차량이 FTP-75모드를 주행할 때 구동계 마찰에 의해 소모되는 연료량은

ATF W/C가 장착되지 않을 경우 13.51g이며 ATF W/C가 장착될 경우 6.45g이다. 약 0.992%의 연비개선 효과가 있는 것으로 시뮬레이션 결과 도출 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업인 “CO₂ 저감을 위한 파워트레인 융합기술 및 기반 구축” 과제와 아주대학교 일반연구비(Grant No.20072650)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Cha, S. Y. and Yang, S. W., 2005, " A Study of Effect of Automatic Transmission Fluid on Fuel Economy," *Journal of the KSTLE*, Vol. 21 No. 3, pp. 142~148.
- (2) Sung, W. J. and Oh, J. S., 2005, "Improvement of the Line Pressure Drop of Automatic Transmission at High ATF Temperature and Low Engine Speed Condition Through Performance Improvement of the Oil Pump," *KSAE Annual Conference*, pp. 618~622.
- (3) Kim, D. K., Jung, M. Y., Lee, J. Y. and Kim, K. Y., 2009, " A Study of Improving of Efficiency of Power-Train Cooling System," *KSAE Annual Conference*, pp. 731~736.
- (4) Smith, E. M., 1996, *Thermal Design of Heat Exchangers : a Numerical Approach-Direct Sizing and Stepwise Rating*, Wiley, New York, pp. 4~5.
- (5) Kakac, S. and Liu, H., 2002, *Heat Exchangers : Selection Rating and Thermal Design*, Crc press, New York, pp. 17~19.
- (6) Saunders, E. A. D., 1988, *Heat exchangers Selection Design & Construction* Longman Scientific & Technical, New York, pp. 135~140.