한국분무공학회지 제26권 제3호(2021)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2021.26.3.135

# 하이브리드 자동차용 엔진 내부의 전자식 수온조절기의 감온성 및 유량제어 정확도 향상을 위한 수치 및 실험적 연구

정수진*,† · 정진우** · 하승찬**

# Numerical and Experimental Study to Improve Thermal Sensitivity and Flow Control Accuracy of Electronic Thermostat in the Engine for Hybrid Vehicle

Soo-Jin Jeong, Jinwoo Jeong and Seungchan Ha

**Key Words:** Electronic controlled thermostat(ECT: 전자식 수온조절기), HEV Engine(하이브리드 자동차용 엔진), Flow control strategy(유동제어전략), Thermal sensitivity test(감온성시험), CFD(전산유체역학)

## Abstract

High-efficient HEV Engine cooling systems reflects variable coolant temperature because it can decrease the hydrodynamic frictional losses of lubricated engine parts in light duty conditions. In order to safely raise the operating temperature of passenger cars to a constant higher level, and thus optimize combustion and all accompanying factors, a new thermostat technology was developed : the electronically map-controlled thermostat. In this work, various crystalline plastics such as polyphthalamide (PPA) and polyphenylenesulfide (PPS) mixed with various glass fiber amounts were introduced into plastic fittings of automotive electronic controlled thermostat for the purpose of suppressing influx of coolant into the element and undesirable opening during hot soaking. Skirt was installed around element frame of automotive electronic controlled thermostat for improving thermal sensitivity in terms of response time, hysteresis and melting temperature. To validate the effectiveness and optimum shape of skirt, thermal sensitivity test and three-dimensional CFD simulation have been performed. As a consequence, important improvement in thermal sensitivity with less than 3°C of maximum coolant temperature between opening and engine inlet was obtained.

## 1. 서 론

최근 들어 강화되고 있는 연비규제를 만족하기 적극 개발하고 있는 하이브리드 엔진용 다운사이징 TGDI (Turbo-charged Gasoline Direct Injection)엔진은 분리냉각(split cooling) 및 맵 기반전자제어식(Map based Electronic control) 냉각시스템을 적극 적용하고 있다. 이는 LET(Low End Torque)에서의 연소 최적화 및 저부하 영역에서의 마찰손실을 최소화하여 연비손실을 최소화하려는데 그 사용 목적이 있다. 따라서 HEV용 TGDI엔진은 중고부하 및 급가감속 시의 정확한 냉각수온 조절이 매우 중요하며 따라서 최근 반응성이 빠른 수온조절기의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이를 위해서는 ECU에서 제어가 가능한 감온성 높은 전자식 수온조절기가 필수적으로 필요하다. 따라서 최근 들어 국내외 자

(Received: 26 Aug 2021, Received in revised form: 14 Sep 2021, Accepted: 14 Sep 2021)
*한국자동차연구원 강소특구지원단
**인지컨트롤스 TMS개발실
†책임저자, 회원, 한국자동차연구원 정수진
E-mail : sjjeong@katech.re.kr
TEL : (041)559-3059 FAX : (041)559-3057

동차회사들은 ECU에서 운전조건에 따라 최적의 냉각수온을 제어할 수 있는 전자식 수온조절기를 분리냉각 제어에 적극적으로 활용하고 있다[1,2]. 이를 위하여 전자식 수온조절기는 왁스 내부에 전기식 히터를 삽입하여 히터 내부의 열선으로 전류를 통전하여 수온조절기의 양정을 제어하고 있다.

결국, HEV용 전자식 수온조절기 개발 목적은 높은 다운사이징율을 고려한 각 운전조건에 따라 작동엔진을 최적의 온도로 제어하는 것이며 따라서 부분부하 시의 연비향상, 배출가스 감소 그리고 급가속 및 고부하운전 시의 출력향상 및 노킹억제 효과를 얻을 수 있다.

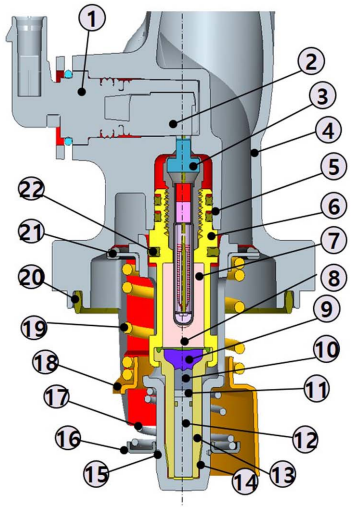
본 연구에서는 HEV용 다운사이징 GDI엔진용 전자식 수온조절기의 감온성능을 향상시키기 위하여 왁스위치의 최적선정 및 히터와 바이패스를 통과한 냉각수의 유동 최적화를 CFD해석 및 감온성 시험을 통하여 수행하였다[3].

전자식 수온조절기의 정확한 온도 및 유량제어를 어렵게 만드는 중요한 문제점은 냉각수의 엘리먼트로 역유입이다. 즉, 엔진의 냉간 시 수온조절기의 피스톤과 밸브가이드 내측 사이에 냉각수가 스며들고 엔진의 열간 시 피스톤의 하강으로 인하여 냉간 시 가이드 표면에 흡착된 부동액이 테프론시트 아래로 유입되는 현상이 발견되고 있다. 테프론시트는 러버피스톤의 파손 방지를 위하여 설치하며 기밀유지 기능이 없기 때문이다[4]. 이후 엔진의 열간 시 잔존한 부동액이 수온조절기의 양정에 영향을 미쳐 개변온도가 빨라져 정확한 온도제어가 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 부동액 유입의 유로파악과 러버 피스톤의 재질변경을 통한 부동액의 엘리먼트로의 유입 및 흡착을 억제하는 연구를 수행하였다.

## 2. 전자식 수온조절기

본 연구에서 사용된 전자식 수온조절기의 구성품 및 작동원리를 나타내기 위하여 Fig. 1에 수온조절기의 단면을 나타내었으며 부품별 명칭을 아래표에 설명하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 왁스 내부에 전기히터가 내장되어 있다. 따라서 엔진 ECU에서 전기히터로의 통전량을 제어함으로써 왁스의 팽창정도를 조절할 수 있어 결국 냉각수의 유량 및 유동방향을 엔진의 운전조건에 따라 제어할 수 있다.

밸브의 양정은 왁스의 팽창 및 수축에 따라 다이아프




| No | Item | No | Item |
|---|---|---|---|
| 1 | Connector Clip | 12 | Piston |
| 2 | Connector Assy. | 13 | Guide |
| 3 | Heater Assy. | 14 | Valve-Guide |
| 4 | Fitting | 15 | Stop Ring |
| 5 | Case O-ring | 16 | By-pass Valve |
| 6 | Wax Case | 17 | By-pass Spring |
| 7 | Wax | 18 | Frame |
| 8 | Diaphragm | 19 | Main-spring |
| 9 | Semi Fluid | 20 | Rubber Ring |
| 10 | Rubber Piston | 21 | R/Valve Assy. |
| 11 | Back-up Plate | 22 | Valve O-ring |

Fig. 1 Electronic controlled thermostat system

램 및 고무 피스톤이 하단 피스톤을 상하로 움직이게 한다.

### 2.1 유로개선을 통한 감온성 향상

Fig. 2에서 보듯이, 전자식 수온조절기를 장착한 HEV용 아킨슨 엔진의 경우 엔진룸의 체적이 매우 좁고 기계식 수온조절기 적용 엔진과의 블록 공용화에 따라 전자식 수온조절기의 왁스의 위치가 불량하여 개선이 필요하게 되었다[5-7].

이러한 문제점은 왁스가 전체 냉각시스템의 온도를 정확히 반영할 수 없다는데 있으며 따라서 엔진의 운전

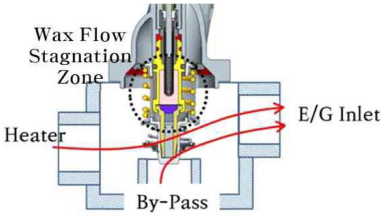
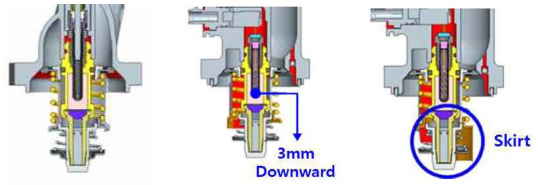



Fig. 2 Mal-distributed flow around ECT




(a) Base Model (b) Wax 3 mm Down (c) with Skirt

Fig. 3 Test & Simulation cases for improving thermal sensitivity

조건에 맞는 정확한 목표 냉각수온을 만족시키기 위한 정확한 양정을 만들어낼 수 없는 심각한 오류를 야기할 수 있다. 따라서 히터와 바이패스를 통과한 뜨거운 유동을 상향 유도할 필요가 대두되었다.

위에서 설명한 히터/바이패스를 통과한 뜨거운유동이 왁스 주위를 통과하지 못하는 문제를 해결하기 위하여 Fig. 3(b)과 같이 왁스를 3 mm 하강하는 방법과 Fig. 3(c)에서 보듯이 수온조절기 프레임 하단에 스커트를 부착하여 3차원 CFD해석 및 실험을 수행하여 감온성 평가를 수행하였다.

2.1.1 CFD 해석

본 연구에서는 스커트 유무에 따른 ECT의 감온성 평가를 위하여 Fig. 4와 같이 3차원 CFD모델을 통하여 해석을 수행하였다. 해석은 Ansys Fluent ver.18.2를 사용하였다.

위 그림에서 볼 수 있듯이, LLC 50%의 유체 물성을 작동유체로 사용하였고, INLET 1,2와 OUTLET 차압은 1,500 Pa이며 온도차는 105°C이다. 그리고 INLET 3의 유량은 2.5 LPM, 온도는 40°C로 설정하였다. 유동조건은 비압축성 정상상태 난류유동이며 난류모델은 RNG-

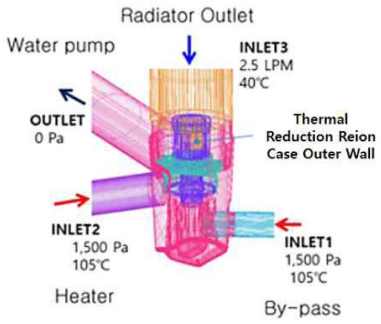
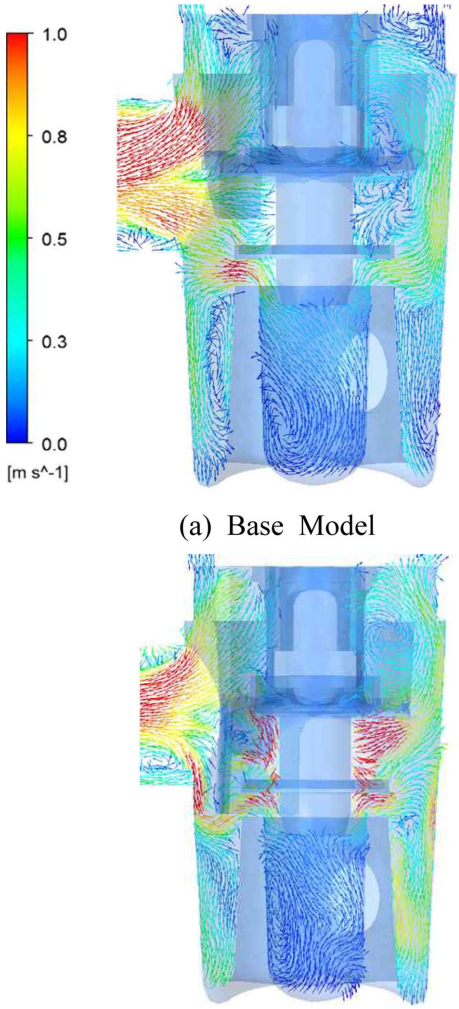



Fig. 4 Computational grids and boundary conditions for CFD



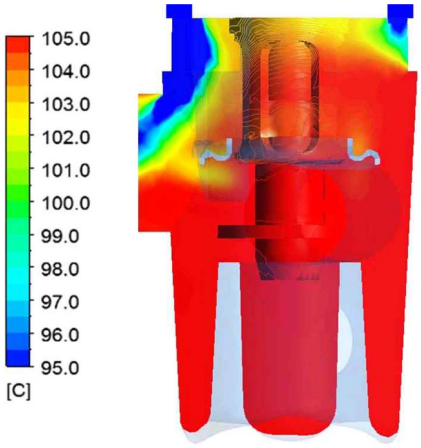

(a) Base Model

(b) with Skirt

Fig. 5 Flow Distributions for w/o and with skirt models

k-ε을 사용하였다.

Fig. 5는 기준모델과 스커트를 장착한 수온 조절기의 엘리먼트 주위의 유속분포를 3차원적으로 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 스커트를 장착한 경우가 히터와 바이패스 관으로부터 유입되는 유량이 잘 혼합되어 보다 균일한 유속이 분포되어 있음을 알 수 있다. Fig. 6는 수온조절기 내부의 온도분포를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 스커트로 인한 히터와 바이패스로부터의 열유속의 감온부에서의 균일한 유속혼합으로 인하여 스커트의 경우가 보다 높은 온도분포가 형성되어있음을 볼 수 있다. 따라서 고온유동의 효과를 감온부에서 보다 민감하게 반영할 수 있을 것으로 사료된다[8,9].




(a) Base Model

(b) with Skirt

Fig. 6 Thermal Distributions for w/o and with skirt models

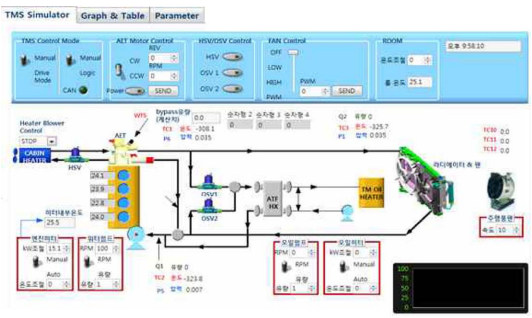
Table 1 Computational results

| Unit: °C | Base Model | w/Skirt | Diff. |
|---|---|---|---|
| Outlet Temp. | 107 | 99.7 | -1.0 |
| Outer Wall (Thermal reduction region) | 103 | 104.5 | 1.3 |

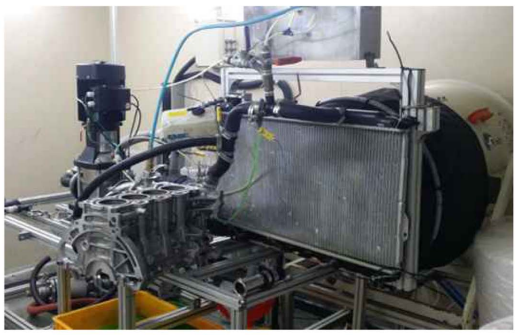
Table 1는 각 모델별 출구 온도와 감온부에서의 온도를 나타내었다. 결과로부터 알 수 있듯이, 스커트 모델의 출구온이 기존 모델 대비 약 1°C 가량의 개선 효과가 나타고 있으며 감온부온 차로 인한 리프트 증감으로 실제 INLET(RAD측) 유량 차가 발생하므로 출구온도차는 더욱 벌어질 것으로 예상된다.

2.1.2 감온성 평가 실험

전자식 수온조절기 개발을 위한 기존 서모스탯과 개선품들의 비교시험을 통한 각 부위별 온도 및 유량을 측정, 개발 제품의 냉각 성능을 Fig. 7와 같은 장치를 이용하여 비교하였다. 실험에 사용된 장치는 자동차 냉각계 리그시험장비 이며, 엔진출력의 35%에 해당하는 발열을 모사할 수 있는 18 kW용량의 히터가 있고 냉각수 유량을 제어할 수 있는 펌프, 라디에이터와 주행 풍 모사 팬이 구비되었으며 대기온도를 제어할 수 있도록 챔버 시스템을 갖추고 있다. 실 차량 엔진(블록) 냉각유로를 모사하여 냉각수온조절밸브의 작동 성능을 확인 할 수 있다. 실험방법 및 순서는 우선 차량 환경과 동일한 냉각수 양을(최소화) 넣을 수 있도록 엔진블록을 장착하고 펌프를 라디에이터 측에 20LPM이 흐를 수 있도록 설정 후 엔진발열모사 히터를 18 kW 발열하여 써모스탯이 최대 개변할 수 있는 115°C까지 기다린 다. 이후 라디에이터를 작동하여 온도를 떨어뜨린다. 이를 2회

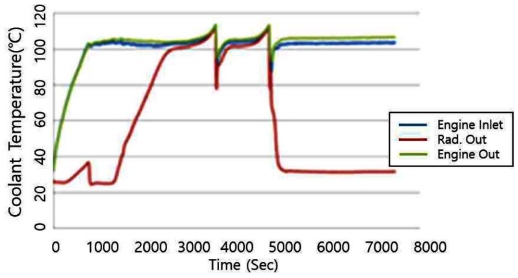



(a) Schematic diagram of Experimental Apparatus (Computer Screen)

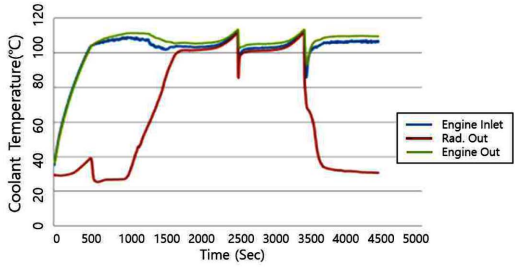


(b) Photo. of Experimental Apparatus

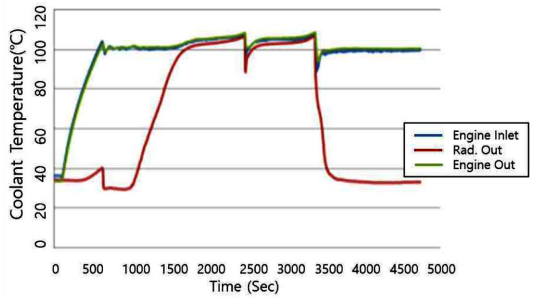
Fig. 7. Experimental apparatus for evaluating thermal sensitivity of ECT




(a) Base model




(b) Wax 3 mm down




(c) with skirt

Fig. 8 Experimental results of temporal variation of coolant temperature for various locations for three cases

반복 실시하는데 이는 제품의 초기 생산 후 특성을 정상작동 할 수 있도록 한다. 그리고 115°C에서 라디에이터 풍량모사를 210 $m^3$/min 으로 작동시켜 엔진 입구측 온도를 측정하여 평가한다.

Fig. 8에 Fig. 3에 나타낸 3가지 경우의 주요부위의 온도특성을 실험적으로 측정하여 나타낸 것이다. 감온성 향상을 위해 히터, 바이패스에서 나온 뜨거운 냉각수가 써머스탯 왁스 부를 지나도록 스커트를 장착하여 유도한 결과, 스커트를 장착한 ECT의 경우가 개변온도 및 엔진입구의 냉각수온 차이가 최대 3°C 미만의 전기식 써모스탯을 개발할 수 있었다. 결과로부터, 기준모델(a)의 경우는 엔진 냉각수 유입부의 온도가 103°C였으며, case (b)의 경우는 106°C 그리고 스커트를 장착한 경우

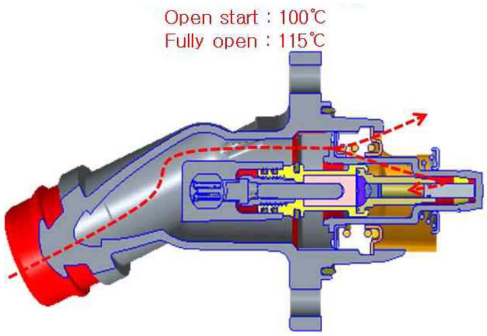



Fig. 9 Coolant influx mechanism for opening (@ full lift opening)

는 99°C임을 알 수 있다.

### 2.2 ECT의 조기개변 원인분석 및 해결

Fig. 9에 나타낸 바와 같이, 냉간시 엘리먼트로 유입되는 부동액으로 인하여 열간 시 기 흡착된 부동액이 테프론시트 아래로 유입되어 외부로 빠져나가지 못하고 양정기능을 하여 개변온도가 빨라지는 이유를 실험을 통하여 분석하였고 이를 억제하기 위하여 유리섬유를 포함하는 Crystalline Plastic계열의 폴리머를 사용한 플라스틱 피팅(fitting)을 만들어 조기개변을 억제하고자 하였다.

#### 2.2.1 내구성 평가를 통한 원인분석

실차 100,000 km 내구성 시험을 한 후 ECT를 분해하여 엘리먼트 내부에 유입된 냉각수 유무를 Fig. 10과 같이 분석하였다. Fig. 10(a)는 세미플루드를 나타낸 것이며 부동액의 양정기능으로 인한 눌림현상을 발견할 수 있었다. Fig. 10(b)에서는 러버피스톤 결과로서 우선 노화로 인한 눌림이 보이고, Fig. 10(c)에서는 가이드 내부를 보여주고 있는데 테프론시트 아래에 스며든 냉각수가 가이드 내부에서 확인되고 있다.

이로써 냉간 시 가이드 내부로 유입된 냉각수가 열간

(a) Semi-fluid (b) Rubber piston (c) Inside the guide

Fig. 10 Tear-down investigation of element part of ECT

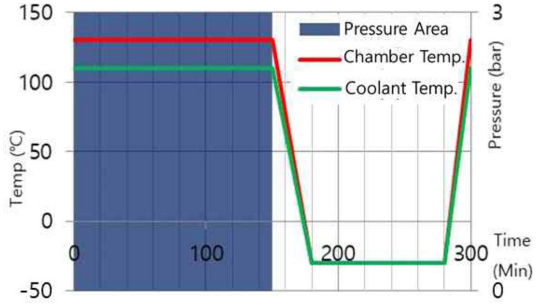



Fig. 11 Thermal shock test cycle

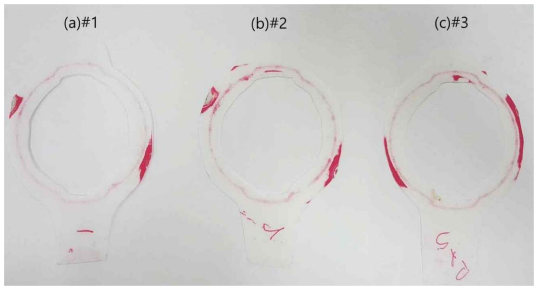



Fig. 12 Surface pressure distributions on the fittings

시 러버피스톤과 테프론 사이로 흘러들기 때문에 개폐가 반복됨에 따라 유입된 냉각수가 양정기능을 하여 개변온도가 빨라진다는 메카니즘을 증명하였다.

2.2.2 열 유동 충격 실험을 통한 조기개변 방지

열(유동) 충격기 사용하여 52일, 250 Cycle (300 min/Cycle)을 반복 실험하여 ECT 피팅에 PPA 및 PPS 소재와 유리섬유의 다양한 혼합을 사용하여 냉각수 유입을 억제할 수 있는 최적의 소재를 연구하였다. Fig. 11에 본 실험에서 사용된 열충격 사이클을 나타내었다.

본 실험의 목적은 플라스틱 피팅(Base: PPA+GF 35%)의 내구평가 후 성능/기능 변화 확인하고 내부동액성 강화 플라스틱 원소재(PPS+GF40%) 시사출 FITTING 내구평가 후 성능/기능 변화 확인하는 것이다. 여기서 GF는 유리섬유를 나타낸다. 즉, 작동에 유해한 손상 없으며 고무류 부품 기능이상 없을 것과 상온저항, 절연저항 이상 없을 것을 확인하는 실험이다.

시료는 총 3가지를 테스트하였으며 각 시료의 재질은 #1(Base)은 PPA+GF35, #2는 PPA+GF40이며 #3는 PPS+GF40%이다.

Fig. 12는 내구 테스트 후 면압지에 나타난 3가지 시료에 대한 면압을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, PPS 재질을 사용한 #3시편에서의 면압분포가 타 경우에 비해 현저히 크게 나타나고 있으며 면압불균일과 집중도 또한 높음을 확인 할 수 있다.

Fig. 13는 3가지 Crystalline Plastic에 유리섬유를 일정량 혼합하여 충격실험 이후의 ECT의 히스테리시스 특성을 분석한 것이다.

결과로부터, #3 시료의 경우 #1, 2 시료 대비 면압 차가 크고 서모스탯 기계적 특성 부분에서 저온 내구시 나타나는 현상(조기개변, 전개양정 증가)이 현저히 나타나므로 ECT의 피팅 소재로는 부적함을 알 수 있었다. 피팅 소재의 문제점으로 인한 #3시편의 경우, tear-down을 통한 분석결과, 가이드 내부 냉각수 유입 후 고착되어 고온시 냉각수의 팽창으로 인해 조기개변이 발생하였으며, 폐변시 러버 피스톤을 과다하게 밀어낸 것으로 추정된다.

## 3. 결 론

본 연구결과, 최대 감온성능을 위한 유동최적화 격벽을 설치하여 결과를 해석하였고 목표하는 데이터를 얻을 수 있었으며 시뮬레이터를 이용하여 검증 하였다.

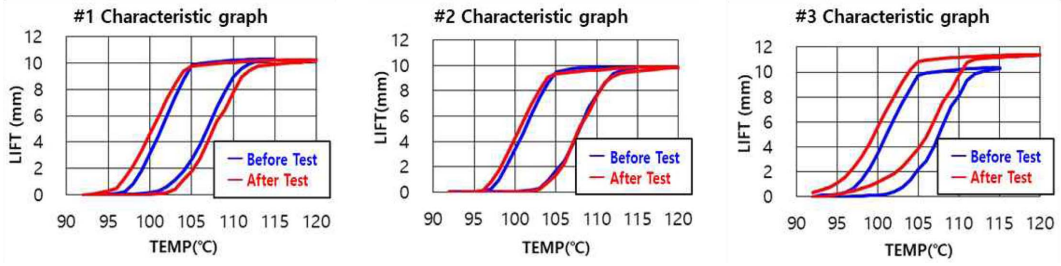



Fig. 13 Hysteresis curves for different rubber piston materials

(1) 연구결과, 최대 감온성능을 위한 유동최적화를 프레임 격벽을 설치하여 얻을 수 있었으며 개선된 전자식 수온기를 1.4~2.0 liter의 GDI 엔진들에 장착 후 TMS (Thermal Management System) 시뮬레이터를 이용하여 실험하였다. 연구결과, 개변온도 및 엔진입구의 냉각수온의 차이가 최대 3°C 미만의 고감도 전자식 수온조절기를 개발할 수 있었다.

(2) 결국, 감온성 향상을 위해 히터, 바이패스에서 나온 뜨거운 냉각수가 써머스탯 왁스 부를 지나도록 유도하기 위한 최적의 스커트를 설계하여 감온성 높은 ECT를 개발하였다.

(3) 이와 더불어, 본 연구에서는 ECT의 문제점중의 하나인 열간 시 조기개변 현상을 해결하기 위하여 내구성 테스트를 통한 Tear-down 분석과 피팅 소재 변경과 열유동 충격실험을 통하여 엔진 냉간 시, 가이드 내부 냉각수 유입 후 고착되어 고온시 냉각수의 팽창으로 인해 조기개변이 발생하였으며 폐변시 러버 피스톤을 과다하게 밀어내어 세미플루드에 과도한 눌림이 발생되는 것을 확인하였다.

(4) 향후 러버피스톤의 재질 및 형상 변경을 통하여 내구성을 보다 향상시킬 계획이다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술진흥원 주관 “신산업진출 산업재편 핵심기술개발사업(과제번호: P138800011)”의 일환으로 수행되었으며, 관계자분들께 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) K. Hwang, I. Hwang, H. Lee, H. Park, H. Choi, K. Lee, W. Kim, H. Kim, B. Han, J. Lee, B. Shin and D. Chae, “Development of New High-Efficiency Kappa 1.6L GDI Engine”, SAE 2016-01-0667, 2016.

(2) C. Donn, W. Zulehner, D. D. Ghebru, U. Spicher and M. Honzen, “Experimental Heat Flux Analysis of an Automotive Diesel Engine in Steady-State Operation and During Warm-up”, SAE 2011-24-0067, 2011.

(3) H. W. Jeong, H. S. Chan, Y. J. Kim, J. H. Jang, S. K. Kim and S. J. Jeong, “Development of Flow Control Strategy for Improving Thermal Sensitivity of Electronic Thermostat for Downsized GDI Engine”, Proceedings of KSAE Autumn Conference, 2017, pp. 88~89.

(4) J. W. Jeong and S-J. Jeong, “Experimental Study to Improve Thermal Sensitivity and Reliability of Electronic Thermostat for Hyundai Kappa Engine”, INZI Controls Internal Report, 2017.

(5) S. K. Kim, Y. J. Kim, H. W. Jeong, W. I. Jeong, J. W. Jeong and S. J. Jeong, “Application of Graphene Platelets on Electronic Controlled Thermostat of TGDI Engine for Improving Thermal Sensitivity”, Transaction of KSAE, Vol. 25, No. 1, 2017, pp. 66~73.

(6) G. Liu, H. Guan, Y. Liu, C. Zhang, D. Gao, W. Zhou and J. Knauf, “Influence of Advanced Technology for Thermal Management on SUV”, SAE 2016-01-0238, 2016.

(7) M. B. Bigdeli, M. Fasano, A. Cardellini, E. Chivazzo and P. Asinari, “A Review on the Heat and Mass Transfer Phenomena in Nanofluid Coolants with Special Focus on Automotive Applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 60, 2016, pp. 1615~1633.

(8) S.-J. Jeong, G. Lee, S. Kim, W-S. Choi, “Numerical Modeling and Experimental Validation of an Integrated Coolant Control Valve for the Optimum Design of Coolant Circuit for a Three-Cylinder GDI Engine”, Transactions of KSAE, Vol. 26, No. 4, 2018, pp. 540~550.

(9) G. Liu, Z. Zhao, H. Guan, Y. Liu, C. Zhang, D. Gao, W. Zhou and J. Knauf, “Influence of Advanced Technology for Thermal Management on SUV”, SAE 2016-01-0238, 2016.