

상변환 물질을 이용한 자동차 냉각 성능 향상에 대한 연구

김기범¹⁾ · 문병현²⁾ · 최경욱²⁾ · 이기형^{*2)}

충북대학교 기계공학부¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

Automotive Engine Cooling Using a Phase Change Material

Ki Bum Kim¹⁾ · Byung Heun Moon²⁾ · Kyung Wook Choi²⁾ · Ki Hyung Lee^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

(Received 5 April 2012 / Revised 21 August 2012 / Accepted 4 September 2012)

Abstract : An automotive cooling system is designed sufficiently large enough to endure the excessive heat load. In general driving condition, the cooling systems are too large to operate optimally. An experimental study was performed to evaluate a novel automotive cooling strategy using the latent heat of a phase change material (PCM). The strategy is expected to reduce the cooling system size up to around 35% and the engine warm-up time around 60%. The strategy will help improve fuel economy and emissions characteristics of vehicles as a result of reduced total body weight and shortened engine warm-up time by a smaller radiator, as well as more stable combustion mode due to constantly maintained coolant temperature.

Key words : PCM(상변환 물질), Heat accumulator(축열기), Heat load(열부하), Engine warm-up(엔진 워업), Coolant(냉각수)

1. 서론

지금까지 자동차의 연비 향상과 배기 저감을 위하여 엔진의 크기를 저감하면서 출력을 향상시키는 연구는 많이 수행 되어 왔으나, 엔진 냉각 시스템의 개선을 통한 자동차의 성능향상 연구는 상대적으로 적었다. 엔진의 냉각시스템을 통해 방출되는 에너지는 엔진 전체 에너지의 약 30%에 해당하기 때문에, 냉각 시스템 개선을 통하여 자동차의 연비와 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.¹⁻³⁾

이번 논문에서는 상변환물질을 이용하여, 고부하시나 극한 운전 조건에서 엔진이 방출하는 열을 저장함으로써, 엔진 냉각시스템의 무게와 부피를 저감 하였다. Heat Accumulator (HA) 내에 저장된 열은 상변환물질의 용해 잠열을 이용하여 엔진의

열 부하가 극에 달할 경우 물질의 물리적 성질만을 이용하여 많은 양의 열에너지를 저장할 수 있다.^{4,6)} 또한, 엔진 냉각수가 과냉각 되는 경우에는 HA 내에 저장된 열을 이용하여 엔진이 과냉각되는 것을 막아 준다. HA를 이용한 엔진 냉각 시스템은 엔진 냉각수의 용량과 부피를 줄여 엔진의 빠른 warm-up 과 냉간 시동 시 발생하는 배기 배출물 저감에 많은 기여를 할 것이다. 이러한 냉각 개념을 실차에 적용하기 위하여 그 가능성 여부를 먼저 해석적 방법으로 조사하였다.^{4,5)} 본 연구에서는 실험적인 방법을 이용하여 해석 결과를 검증하였고, 상변환 물질을 자동차 냉각에 이용하는 방법을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1과 Photo. 1은 본 연구에 사용되어진 냉각 시

*Corresponding author, E-mail: hylee@hanyang.ac.kr

스텝의 개략도와 실험장치 사진이다. Fig. 1에서 화살표는 냉각수가 흐르는 방향을 나타낸다. 개략도와 실험장치 사진에서 보여지는 것처럼 기존의 엔진 냉각 시스템에 HA를 추가로 장착하여 시스템의 냉각 성능을 조사하였다. 또한, 실 엔진 시스템에서 냉각수의 최고 온도는 본 연구를 수행하기 위한 적정온도와 차이가 있으며, 엔진의 연소 조건에 따른 연소실의 열 발생량을 정밀하게 조절할 수 없으므로 Photo. 2과 같이 엔진 연소실 안에 Piston 대신 전기히터를 이용한 Heat piston을 장착하여, 엔진 연소 시 열 발생과 유사한 특성을 구현하였다. Heat piston은 열전달율이 높은 알루미늄으로 제작되었으며, 각각의 Heat piston에는 600 W용량의 Heater가 6개씩 장착되어 있다. 총 24개의 Heater가 장착되었으며, Heater의 총 용량은 14.4 kW이다. 각각의 Heat piston은 실린더에 0.1mm의 공차를 두고 장착되었으며, 별도의 컨트롤러를 통하여 Heat piston의 온도를 제어하였다. Heat piston의 온도를 측정하기 위하여 Heat piston 중앙에 K-type 온도센서를 설치하였으며, 냉각수 온도를 측정하기 위하여 radiator 전·후와 HA 전·후, 그리고 냉각수가 엔진을 통과하기 전·후의 온도를 K-type 온도 센서를 이용하여 측정하였다.

가속구간이나 오르막차선에서 엔진의 부하가 높을 때, 냉각수 온도가 약 110°C 정도이다. 110°C 이상에서 엔진 냉각수의 급격한 온도상승을 막기 위하

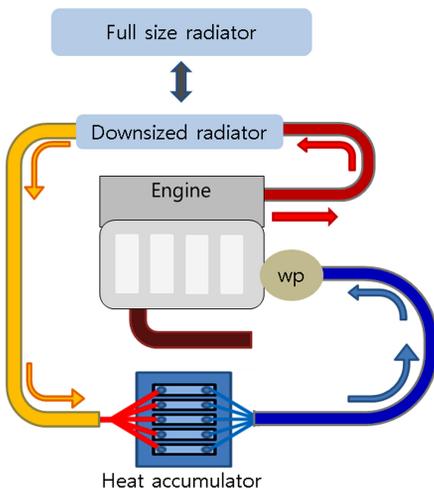


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

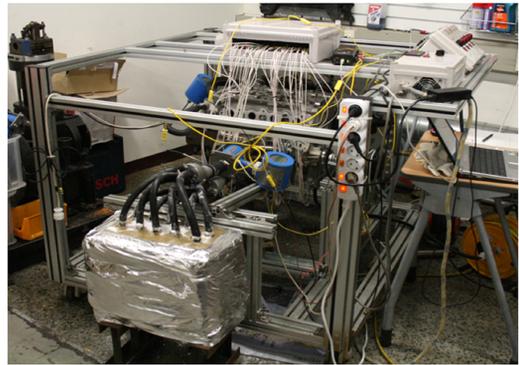


Photo. 1 Photograph of test rig

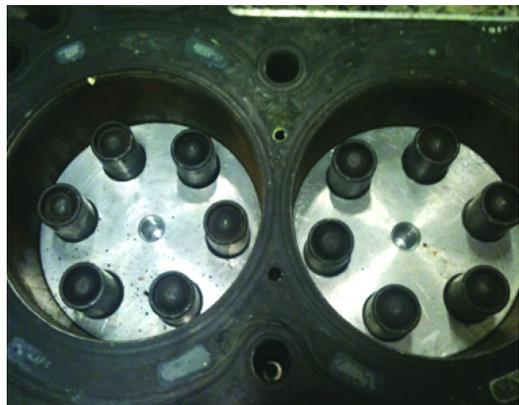


Photo. 2 Photograph of Heat piston

여 사용한 HA는 내부에 상변화 물질(PCM)을 포함하고 있다. HA는 일종의 열교환기로써 대표적으로 두 가지 종류가 있다. 하나는 상변화 물질이 HA 내부에 존재하고, 냉각수가 HA 외부로 흐르며 열 교환이 이루어지는 형태이다. 다른 하나는 본 연구에 사용한 HA로써, 냉각수가 상변화 물질을 담은 HA 안의 유로를 따라 흐르는 형태이다. 상변화 물질의 반응이 빠르고, HA의 두께를 얇게 제작할 수 있는 장점이 있다.⁴⁾ Photo. 3은 본 연구에 사용된 HA의 사진이다. HA는 5개의 상용 Heat core를 사용하여 제작하였고, HA 주변은 단열시켜 상변화 물질의 용해 열이 HA 밖으로 손실되는 것을 방지하였다. HA에 들어간 총 상변화 물질의 질량은 10 kg이며 3390 kJ의 열 에너지를 축적할 수 있는 용량이다. 상변화물질의 양은 본 연구에 사용된 엔진의 열 발생량과 냉각용량을 고려하여 결정되었기에 상용차에 적용할 때에 절대 기준은 아니다.



Photo. 3 Photograph of heat accumulator

상변환물질을 각각 Heat core의 냉각 핀 사이와 Heat core사이에 일정하게 분포하게 하기 위하여, 모두 가열하여 녹인 후 HA에 주입하였다. 액상에서 기상으로 상변환 시의 부피 증가에 비해 본 연구에 사용된 Erythritol의 고상에서 액상으로의 상변환 시 부피의 증가는 약 10% 정도이므로 HA에 상변환 물질을 주입할 때, 10%의 여유 공간을 남겨두어 부피 증가로 HA가 파손되지 않도록 제작하였다. 각각의 Heat core로는 냉각수 분배기를 이용하여 모두 같은 양의 냉각수가 흐르도록 하였고, Heat core를 지난 냉각수는 다시 합쳐진 후 엔진 water pump로 흐르게 된다.

상변환 물질 선정 시에 열적 안전성, 산화반응, 에이징, 독성 여부와 물질의 단가나 실용성을 고려하여야 하고, 열저장 효율 측면에선 높은 용해 잠열을 가진 물질이 유리하다. 일반적으로 사용되는 상변환 물질에 대한 녹는점과 용해 잠열을 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2 그래프에서 Xylitol의 경우 녹는점은 94°C로 엔진 운전 시에 사용하기에 적합한 온도범위를 보여주고 있지만, Xylitol이 녹은 후 다시 냉각하였을 때 다시 고상으로 돌아가지 못하는 Supercooling 현상이 발생한다. 따라서 Xylitol은 엔진냉각용 상변환 물질로 적합하지 못하다. 또한 Sr(OH)₂·8H₂O는 다른 물질에 비하여 매우 높은 잠열 특성을 보여주고 있다. 하지만 Sr(OH)₂·8H₂O는 녹는점이 89°C로서 엔진 냉각 시스템에 적용하기에 온도가 약간 낮으며, 독성이 있어서 적합하지 않다. 위에서 언급한 상변환 물질 선정 조건을 고려했을 때, 339kJ/kg의 높은

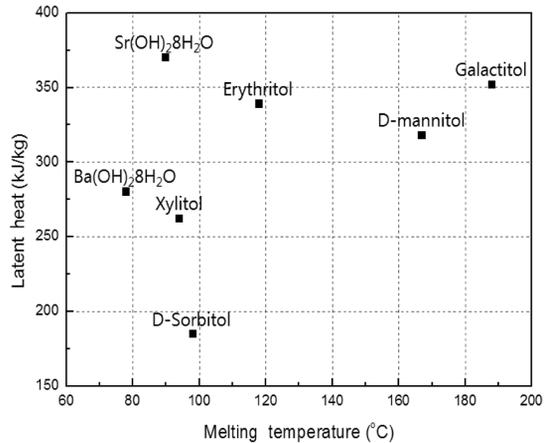


Fig. 2 Latent heat of PCM commonly used in industry

잠열 능력과 118°C의 녹는점을 가진 Erythritol을 본 연구의 적합한 상변환 물질로 선정하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3의 그래프는 Heat piston 온도가 130°C일 경우 엔진 냉각수 pump의 회전수에 따른 냉각수의 온도변화 곡선이다.

Water pump의 회전수가 2000 rpm 이상에서는 냉각수의 온도는 약 93°C에서 일정하게 유지된다. 하지만 water pump의 회전수가 2000 rpm 미만일 경우는 93°C까지 온도가 다다르기 위해서 더 많은 시간이 필요하다. 이는 water pump의 회전수가 느리면 냉각수의 유량이 낮고, 냉각수로의 단면적은 일정하기 때문에, 유량 감소는 냉각수가 엔진을 통과하

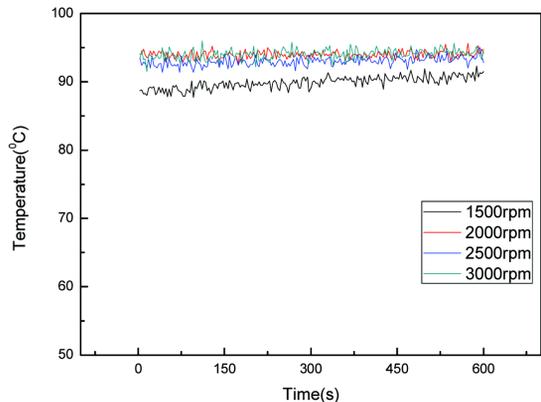


Fig. 3 Coolant temperature at each rpm

는 속도와 직접적인 관련이 있다. 속도가 줄어들어 따라 냉각수의 대류열전달 계수가 낮아지게 되고, 열 교환이 더디어지면서 냉각수의 온도 상승이 지연된다. 이에 따라 엔진 water pump의 회전수는 2000 rpm에 고정하였으며, water pump의 회전수가 2000 rpm일 경우, 엔진 내에서 냉각수 유량은 약 53 l/m이다. Fig. 4의 그래프에서 나타내듯이 온도가 상승함에 냉각수의 비체적이 증가하여 엔진 냉각수의 유량도 증가한다. 본 연구에서 냉각수의 유량을 측정하기 위해 사용된 FLOMAG mp400 flowmeter의 제원을 Table 1에 나타내었다.

실험조건은 기존의 냉각 시스템, Small size radiator만을 이용한 시스템, 그리고 Small size radiator에 HA를 적용한 시스템이다. Small size radiator의 경우 기존 냉각 시스템의 radiator size에 비하여 크기와 방열 면적이 약 35%작다. 다운사이징 한 냉각시스템은 기존 시스템에 비해 냉각수의 용량도 약 13.5 kg 줄고, 그에 따른 시스템 부피도 저감이 되었다. 하지만 HA를 부착함으로써 10 kg의 무게가 증가하여 전체적으로 시스템 중량은 약 35%가저감되었다. 기존 시스템의 radiator와 small size radiator의 냉각을 위하여 물을 분무하는 시스템을 이용하였다.

열 부하 조건은 냉각수 온도가 90°C, 108°C까지 도달하게 한 후, 두 번의 강한 열 부하를 480 sec동안

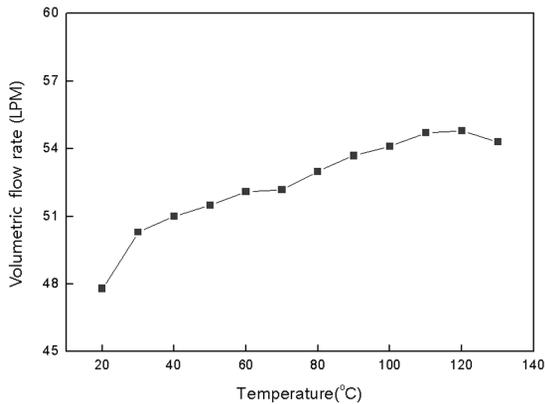


Fig. 4 Coolant flow rate at 2000 rpm

Table 1 FLOMAG MP400 Flowmeter

Maximum operating temperature (°C)	150
Maximum operating pressure (bar)	25
Flow range (m ³ /hr)	1.74-34.7

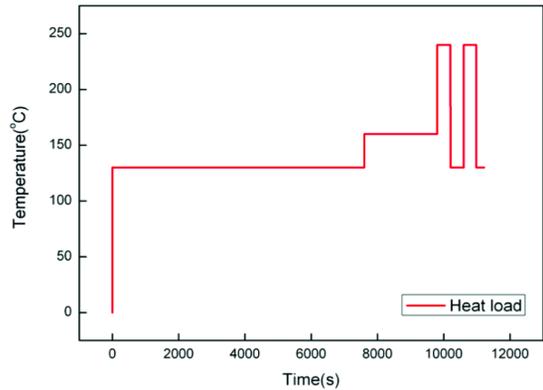


Fig. 5 Time varying heat load

가하고, 열 부하 사이에 480 sec동안 냉각하는 과정을 두 번 반복하여 실험하였다. 열 부하가 강한 경우는 자동차가 급발진이나 언덕길 운행 조건을 모사하기 위함이다. Fig. 5은 냉각 시스템에 가해진 열 부하를 시간에 따라 도시한 그래프로 정확한 열 부하를 추정하기가 불가능하여 히터의 온도로 나타내었다.

3. 실험 결과

Fig. 6는 시간 별로 다르게 주어진 엔진 열 부하에 따른 냉각수의 온도 변화를 보여준다. 이는 참고 문헌 4,5의 해석 결과와 경향이 잘 일치한다. 기존의 시스템에 비해 radiator의 크기가 줄어들어 냉각수의 온도가 90°C 근방까지 빠르게 상승하는 것을 알 수 있다. Radiator의 크기가 약 35%줄어들어 radiator를 통해 방출되는 열량이 줄었기 때문이다. 이는 실제 엔진에서 냉간 시동 시에 엔진을 warm-up하는데 필요한 시간을 약 60%까지 저감할 수 있음을 보여준다. 빠른 warm-up을 통하여 냉간 시동 시 발생할 수 있는 유해 배기 배출물의 발생량을 줄일 수 있다. 이후 약한 열 부하를 추가적으로 가하여 90°C의 냉각수 온도를 108°C까지 상승하게 하였다. 냉각시스템이 소형화되었음에도 약한 열 부하에는 잘 견디는 것을 알 수 있다.

급가속이나 언덕길 운행 조건과 같은 극한 운전 상태를 모사하기 위하여, 두 번의 강한 열 부하를 연속하여 가하였을 때에, 기존의 냉각 시스템을 그대로 사용한 시스템에서는 냉각수의 온도가 129°C까지 상승하는 반면, 소형의 radiator를 가진 냉각시스

템에서의 냉각수 온도는 최고 133°C까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 실 엔진에서 냉각수 온도가 133°C까지 상승한다면 노킹이 발생할 수 있다.

이 두 실험에서 Full size radiator와 small size radiator의 방열량의 차이로 인해 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 small size radiator에서 실험한 peak temperature가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 엔진 warm-up에 필요한 시간을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 극한 조건에서의 열 부하를 감당해 낼 수 없기에 radiator의 크기를 무조건 줄이는 것은 바람직하지 않다. 하지만, 이러한 문제점은 HA를 사용하여 해결할 수 있다. Radiator의 크기를 저감하고 HA를 시스템에 추가 장착했을 경우 냉각수의 온도가 최고 120°C 근방에서 머무는 것을 확인할 수 있다. 이는 상변환 물질이 녹으면서 냉각수로부터 열을 흡수했기 때문이다.

Fig. 7은 냉각수 온도가 118°C이상 상승하는 구간의 그래프이다. 상변환 과정 동안은 냉각수의 온도가 본 연구에 사용된 Erythritol의 녹는점인 118°C근방으로 유지된다. 냉각 과정에서도 HA를 사용하지 않은 시스템에서는 냉각수의 온도가 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있지만 HA를 사용한 실험에서는 HA가 엔진의 극한 운전 시 흡수하여 저장하고 있던 열을 방출함으로써 엔진 냉각수의 온도가 급속히 떨어지는 것을 방지한다. 이 때, HA내의 상변환 물질들은 다시 액체 상태에서 고체상태로 상이 변하기 시작한다. 이 과정이 두 번 반복하는 동안에 상변환 과정은 빠른 속도로 이루어지며, 지속적인 반복 실험에도 HA내의 상변환물질은 화학적 성질을 유지 한다. 산소가 존재하는 환경에서 잦은 상변환 과

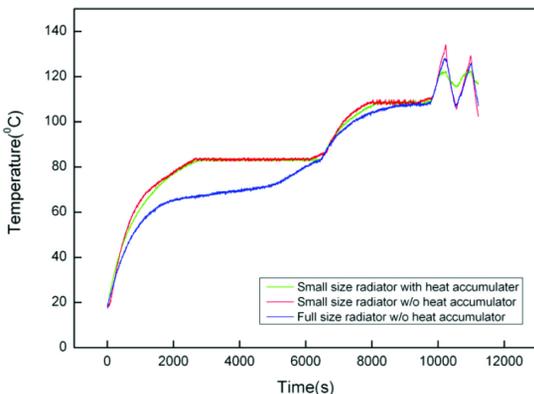


Fig. 6 Coolant temperature responses of three cooling systems

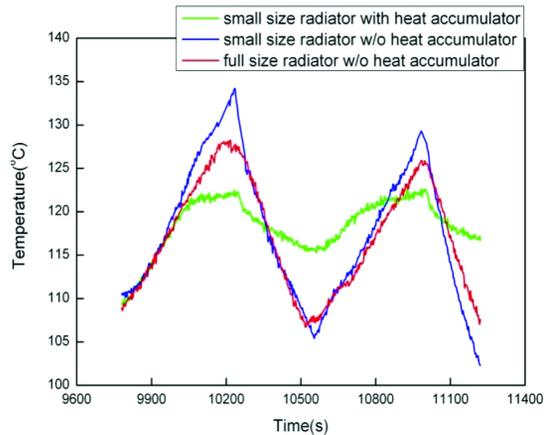


Fig. 7 Coolant temperature responses of three cooling systems from 9600 sec to 1125 sec

정은 상변환 물질의 산화를 초래할 수 있기 때문에, HA 제작 시 내부에 진공을 유지해 주어서 상변환 물질이 산소와 산화하는 것을 방지해 주어야 한다.

냉각수의 온도 변화폭이 크다는 것은 엔진의 연소에 좋지 않은 영향을 미치기에 연비 및 배기 특성을 악화시킬 수 있다. 따라서 상변환 물질을 이용하여 엔진의 운전 중에 냉각수의 온도를 일정하게 유지하면, 연소의 안정화를 기할 수 있기 때문에, 추가적인 연비 및 배기배출 저감이 가능할 것으로 추정된다.

4. 결론

이번 연구에서는 상변환 물질이 들어 있는 HA를 엔진 냉각 시스템에 적용하여 냉각 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 서로 다른 3가지 냉각 시스템의 냉각 성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) HA를 사용하는 새로운 냉각 시스템은 냉각수의 용량과 라디에이터의 부피 및 무게를 줄임으로써 엔진 냉각시스템을 소형화하고 경량화 할 수 있는 장점이 있다.
- 2) 상변환 물질의 용해 잠열을 이용하여 기존의 Radiator보다 방열 면적이 35% 저감된 Radiator를 이용하더라도 냉각수의 온도를 기존 시스템보다 낮게 유지할 수 있다.
- 3) 새로운 엔진 냉각 시스템을 통해 냉간 시동 시 빠

른 엔진 warm-up이 가능하다.

- 4) 본 실험에서는 상변환 물질로 Erythritol을 사용하였으나, 녹는점이 90-110°C 사이이며 용해 잠열이 더욱 높은 상변환 물질을 사용한다면, 엔진 냉각 시스템의 추가적인 소형 및 경량화가 가능할 것이다.

따라서, 엔진의 연비 및 배기 특성은 시스템의 경량화로 인한 1차적인 향상과 냉간 시동시의 빠른 warm-up 및 과도한 운전조건 변화에도 연소실의 온도를 일정하게 유지할 수 있는 장점으로 인하여 향상 시킬수 있으며, 정확한 정량적인 평가는 추후 연구에서 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 2010년 교육 과학 기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(기초연구사업 2010-0007938) 과 지식경제부의 산업원천기술개발사업의 일환으로 진행되었으며, 이에 관계 기관에 감사드립니다.

References

- 1) N. S. Ap and M. Tarquis, "Innovative Engine Cooling Systems Comparison," SAE 2005-01-1378, 2005.
- 2) A. Vegenas, J. G. Hawley, C. J. Brace and M. C. Ward, "On-vehicle Controllable Cooling Jets," SAE 2004-01-0049, 2004.
- 3) K. B. Kim, K. W. Choi, K. H. Lee and K. S. Lee, "Active Coolant Control Strategies in Automotive Engines," Int. J. Automotive Technology, Vol.11, No.6, pp.767-772, 2010.
- 4) K. Kim, K. Choi, Y. Kim, K. Lee and K. Lee, "Feasibility Study on a Novel Cooling Technique Using a Phase Change Material in an Automotive Engine," Energy, Vol.35, Issue 1, pp.478-484, 2010.
- 5) J. Vetrovec, "Engine Cooling System with a Heat Load Averaging Capability," SAE 2008-01-1168, 2008.
- 6) B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza and H. Mehling, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications," Applied Thermal Engineering, Vol.23, Issue 3, pp.251-283, 2003.