

물/부동액-기반 Al_2O_3 나노유체를 이용한 차량용 냉각시스템 성능 향상에 관한 실험적 연구

박용준* · 김현진** · 이승현** · 최태종** · 강예준** · 장석필†

Experimental Investigation on the Thermal Performance Enhancement of Cooling System for Vehicles using Water/Coolant-Based Al_2O_3 Nanofluids

Y.-J. Park, H. J. Kim, S.-H. Lee, T. J. Choi, Y. J. Kang and S. P. Jang

Key Words: Nanofluids(나노유체), Cooling system for vehicle(자동차 냉각시스템), Aluminum oxide(산화알루미늄), NO_x (질소산화물)

Abstract

In this study, the thermal performance of vehicle's cooling system is experimentally investigated using the water/coolant-based Al_2O_3 nanofluids as working fluids. For the purpose, the water/coolant-based Al_2O_3 nanofluids are prepared by two-step method with gum arabic. In order to obtain the well-suspended nanofluids, the agglomerated Al_2O_3 nanoparticles are precipitated using centrifugal force and the experiments are performed with supernatant of them. The thermal conductivity is measured by transient hot wire method and the thermal conductivity of nanofluids is enhanced up to 4.8% as compared to that of base fluids. Moreover, the cooling performance of water/coolant-based Al_2O_3 nanofluids is evaluated using vehicle's engine simulator under the constant RPM condition. The results show that the cooling performance of automobile engine increases up to 5.9% using prepared nanofluids. To investigate the effect of nanofluids on exhaust gas, the NO_x emission is measured during the operation with respect to time and 10.3% of NO_x emission is decreased. The experimental results imply that the water/coolant-based Al_2O_3 nanofluids might be used as a next-generation vehicles' coolant

기호설명

C_p : 비열 [kJ/kgK]
 k : 열전도도 [W/mK]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 q : 방열량 [W]

그리스 문자

η : 성능 향상비

아래첨자

nf : 나노유체
bf : 기본유체

Received: 6 Mar 2015, Received in revised form: 16 Mar 2015, Accepted: 17 Mar 2015)

*회원, 국방기술품질원

**회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

†책임저자, 회원, 한국항공대학교

E-mail : spjang@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0179 FAX : (02)3158-4191

1. 서론

차량용 수랭식 엔진 냉각시스템은 작동중인 고온의

엔진을 안정적으로 냉각할 수 있는 장점이 있으나, 냉각 유체와 라디에이터, 펌프 등 냉각 시스템의 상당한 무게로 인하여 차량의 연비를 개선하는데 큰 장애물이 되고 있다. 또한 라디에이터의 형상은 차량 전면부의 설계를 제한하게 되며, 이로 인해 차량의 공기저항 계수가 증가되는 단점도 가지게 된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 연구자들은 기존에 사용되고 있는 냉각유체보다 열물성치가 뛰어난 나노유체를 차량용 냉각시스템에 적용하여 냉각성능을 높이기 위한 연구를 수행하였다^(1,4). 2011년 Peyghambarzadeh *et al.*은 물-기반 Al_2O_3 나노유체 및 물/EG-기반 Al_2O_3 나노유체를 차량용 라디에이터에 적용하여 열전달 성능이 1%의 부피비에서 40%까지 증가한다고 보고하였고⁽²⁾, Chogule *et al.*은 1%의 부피비의 물기반 CNT 나노유체를 라디에이터의 냉각수로 사용할 경우 열전달 성능이 최대 91%까지 증가한다고 보고하고 있다⁽³⁾. 또한 2014년 Naraki *et al.*은 Cu 나노입자를 0.4%의 부피비로 물에 분산하여 냉각유체로 사용할 경우 라디에이터의 열전달 성능이 최대 8%까지 증가한다고 보고하고 있다⁽⁴⁾. 나노유체를 차량용 냉각장치에 적용한 기존 연구들을 살펴보면, 차량 엔진을 직접 사용하는 대신 엔진의 발열량만을 모사하여 나노유체가 라디에이터에서의 열전달 성능에 미치는 영향을 많이 연구하였다. 그러나 상대적으로 실제 차량 엔진의 냉각 시스템인 워터 자켓(Water Jacket)의 열전달 성능에 관한 연구는 많이 진행되지 않은 상태이다. 또한 나노유체 제작 시 실제 차량에서 사용되고 있는 물과 에틸렌 글리콜을 1:1 비율로 혼합한 냉각유체를 사용하지 않고, 물-기반의 나노유체 또는 에틸렌 글리콜-기반의 나노유체만을 사용하여 연구를 수행하여 실제 차량 운영 조건에서의 실험 결과를 보고하지는 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 차량 엔진 냉각시스템에서 사용되는 냉각수와 동일한 조건인 물과 상용 냉각 유체가 1:1로 혼합된 냉각수를 기본유체로 사용하는 Al_2O_3 나노유체를 Two-step 방법을 이용하여 제작하였다. 제작된 물/냉각유체-기반 Al_2O_3 나노유체가 냉각수로 사용될 때 엔진 내부에서의 열전달 성능을 평가하기 위해 실제 차량 엔진이 장착된 모사 실험장치를 사용하여 동일 RPM 조건에서 실험을 수행하였으며, 엔진 냉각수 입출구의 온도를 시간에 따라 측정하여 물/냉각유체-기반 Al_2O_3 나노유체의 열성능을 평가하였다. 또한 물/냉각유체 기반 Al_2O_3 나노유체를 사용할 때의 배기가스의 NO_x 량도 측정하였다. 마지막으로 이러한 실험결과를 바탕으로 나노유체의 실제 차량 적용가능성에 대해 논의해보았다.

2. 실험장치 및 실험 방법

2.1 나노유체 제작

본 연구에서 사용된 나노입자는 Nanophase사의 Al_2O_3 나노입자를 사용하였으며, 사용된 입자의 평균 크기는 45 nm이다. 나노유체의 제작은 기본유체에 나노입자를 첨가하고 초음파와 에너지를 이용하여 분산부유시키는 방법인 Two-step 방법을 사용하여 제작하였으며, 차량 엔진에 사용되는 냉각수와 동일한 조건에서 엔진 적용 실험을 진행하기 위하여 증류수와 상용냉각유체가 1:1로 혼합된 유체를 기본유체로 사용하여 제작하였다. 나노유체의 분산안정성은 나노유체의 열물성치에 큰 영향을 미친다고 보고되고 있으므로^(5,6,7), 실험에 사용될 나노유체는 높은 분산안정성을 확보해야 한다. 본 연구에서는 제작된 나노유체의 분산안정성 확보를 위하여 0.2 wt.%의 Gum Arabic을 분산제로 추가하여 나노유체의 분산안정성을 확보하고자 하였다.

또한 안정적인 나노유체의 분산을 위하여 Al_2O_3 나노입자를 증류수에 우선 분산 후 5시간 동안 초음파와 에너지를 가하였고, 분산된 물-기반 Al_2O_3 나노유체에 상용 냉각수를 추가하여 다시 5시간 동안 초음파와 에너지를 가하여 분산하였다. 그 후 4025RCF의 원심력을 20분간 가하여 침전된 입자들을 제외시키는 Decanting 방법⁽⁸⁾을 사용하여 높은 분산안정성 확보하였으며, 제작이 완료된 뒤 측정된 물/상용냉각유체-기반 Al_2O_3 나노유체의 부피비는 0.5%이다. 나노유체 제작 후 침전 실험을 수행하였으며, 침전실험 수행 결과 3일 이상 분산안정성을 유지하여 Decanting 방법을 사용하지 않은 유체 보다 높은 분산안정성을 가지는 것으로 확인되었다. 상기된 제작 공정을 통하여 제작된 물/상용냉각유체-기반 Al_2O_3



Fig. 1 Water/Coolant-based Al_2O_3 Nanofluids

나노유체는 높은 분산안정성을 확보하였으며, 이를 이용하여 물성치 측정 및 차량용 엔진 적용 실험을 수행하였다.

2.2 나노유체 제작

초음파 에너지와 Decanting 방법을 이용하여 제작된 높은 분산안정성을 가지는 물/냉각유체-기반 Al_2O_3 나노유체는 비정상열선법(Transient Hot Wire Method)를 이용하여 유효 열전도도를 측정하였다. 유효 열전도도는 $40^\circ C$ 에서부터 자동차 엔진이 정상적으로 작동할 때의 냉각수 온도 근처인 $80^\circ C$ 까지 측정되었으며, 고온에서 유체의 자연대류가 열전도도 측정결과에 미치는 영향을 줄이기 위하여 $70^\circ C$ 이상의 온도에서 측정하는 경우 $0.7 MPa$ 로 가압하여 측정을 수행하였다.

비정상열선법을 이용한 나노유체의 열전도도 측정 장치는 증류수와 에틸렌 글리콜을 이용하여 각각 검증 실험을 수행하였으며, Fig. 2에서 보이는 바와 같이 비정상 열선법을 이용한 열전도도 측정장치의 오차범위인 1%오차 내에서 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

2.3 차량엔진을 이용한 나노유체 냉각성능 평가

물/냉각유체-기반 Al_2O_3 나노유체의 엔진 적용 실험을 위해 실제 EF소나타의 엔진을 사용한 모사 시스템을 사용하였으며, 실험장치는 Fig. 3과 같다. 엔진 실험장치는 실제 자동차 엔진을 이용하였으므로 냉각유체의 온도에 따른 서모스탯의 개폐여부에 따라 유체의 입출구 온도가 달라지게 된다. 실험은 서모스탯이 완전히 열린 시점에서부터 라디에이터를 거쳐 냉각되어 서모스탯이 닫히는 상태까지를 한 주기로 하여 시간에 따라 측정하였으



Fig. 3 Experimental System

며, 엔진에 설치된 냉각유체용 유로 입출구의 온도를 측정하는 방법으로 진행하였다. 또한 실험은 1800 RPM으로 동일한 엔진회전조건에서 수행되었으며, 실험 시 부하는 가하지 않고 수행 되었다. 서모스탯의 개폐 주기가 짧아질수록 엔진에서 발생하는 열을 냉각유체가 빠르게 흡수하는 것으로 볼 수 있으며, 이를 정량적으로 평가하기 위해 일정 열유속 조건에서 열전달량을 나타내는 식 (1)을 이용하여 시간에 따른 변화를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = \dot{m}C_p \frac{d(\Delta T)}{dt} \quad (2)$$

여기서 q , \dot{m} , C_p 와 ΔT 는 방열량, 질량유량, 유체의 비열 및 입출구 온도차이며, 식 (2)를 이용하여 시간에 따른 기본유체 대비 나노유체의 열전달 성능 향상비를 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{\left. \frac{dq}{dt} \right|_{nf}}{\left. \frac{dq}{dt} \right|_{bf}} = \frac{\left. \dot{m}C_p \frac{d(\Delta T)}{dt} \right|_{nf}}{\left. \dot{m}C_p \frac{d(\Delta T)}{dt} \right|_{bf}} \quad (3)$$

일반적으로 엔진 연소 시 열점(Hot spot)이 발생할 경우 노킹(Knocking) 현상의 원인이 되어 NO_x 배출량이 증가하게 된다⁽⁹⁾. 따라서 NO_x 배출량의 감소는 엔진의 열점이 감소함을 의미하며 이는 엔진의 냉각이 효과적으로 되고 있다는 것을 간접적으로 보여주는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 배기가스 분석기를 배기구에 설치하여 기본유체를 사용할 경우와 나노유체를 사용할 때 NO_x 배출량의 변화를 측정 하였다.

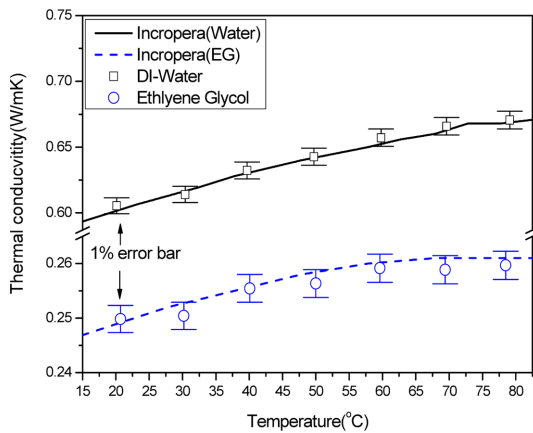


Fig. 2 Validation Results of Thermal Conductivity

3. 실험결과 및 분석

3.1 나노유체 열전도도 측정 결과

자동차의 엔진이 정상적으로 작동할 경우 냉각수의 온도가 80°C 이상 되었을 때 서모스탯이 열리기 시작하여 냉각유체에 의한 엔진의 냉각이 시작되므로, 제작된 물/냉각유체-기반 Al₂O₃ 나노유체의 열전도도는 실제 시스템의 작동온도인 80°C 이상에서 측정 결과가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 40~80°C까지 물/냉각유체-기반 Al₂O₃ 나노유체의 온도를 변화하며 열전도도를 측정하였다. 비정상열선법을 사용하여 측정된 물/냉각유체-기반의 Al₂O₃ 나노유체의 유효 열전도도 측정 결과는 Fig. 4와 같다. 유효 열전도도 측정결과 물/냉각유체-기반의 Al₂O₃ 나노유체의 열전도도는 기본유체 대비 4.8% 증가하는 것으로 측정되었으며, Patel *et al.*⁽¹⁰⁾, Lee *et al.*⁽⁸⁾ 등에 의해 보고된 열전도도의 온도 의존성은 발견되지 않았다.

3.2 차량 엔진을 이용한 나노유체 냉각 성능 평가 결과

본 연구에서 제작된 높은 분산안정성을 가지는 물/냉각유체-기반의 Al₂O₃ 나노유체를 차량용 엔진에 적용하여 냉각성능을 평가한 결과는 Fig. 5와 같다. 입출구 온도는 서모스탯이 완전히 열려 유량이 최대가 되는 시점의 온도부터 시작하여 시간에 따라 온도를 측정하였다. 측정결과 시간이 지날수록 서모스탯이 개폐되는 주기가 짧아지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 물/냉각유체-기반의 Al₂O₃ 나노유체를 냉각수로 사용할 경우 물과 냉각유체를 1:1로 혼합한 기본유체를 냉각수로 사용한 경우 보다 엔진의 열을 빠르게 흡수하기 때문에 온도가 빠르게 변화하는 것으로 볼 수 있다. 이는 물/냉각유체-기반의 Al₂O₃ 나노유체를 냉각수로 사용할 경우 더 높은

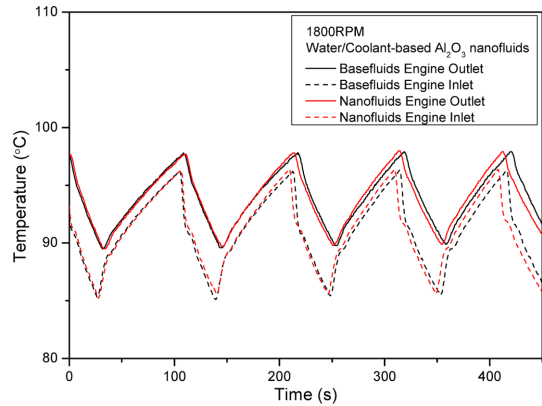


Fig. 5 Measured Temperature at the Engine Inlet and Outlet of Coolant Loop according to Time

냉각성능을 가진다고 볼 수 있으며, 이러한 냉각성능의 증가는 열전도도 측정 결과로부터 설명이 가능하다. 제작된 나노유체의 열전도도는 기본 유체 대비 4.8% 증가하였으며, 이로 인하여 물/냉각유체-기반의 Al₂O₃ 나노유체를 냉각수로 사용할 경우 기본 유체 대비 높은 열전달 성능을 보이는 것으로 볼 수 있다. 그러나 엔진 냉각 성능의 증가가 열전도도 증가 폭 보다 조금 더 큰 것으로 볼 때 나노유체의 열전도도의 향상으로 인한 나노유체의 열전도도 증가 외에도 기존연구자들에 의해 보고되고 있는 Particle Migration 및 열경계층 두께 감소⁽⁴⁾ 등이 영향을 미치는 것으로 사료된다.

실험 결과를 바탕으로 식 (3)을 이용하여 시간에 따른 기본유체 대비 나노유체의 열전달 성능 향상비를 계산한 결과 최대 5.9%까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한 시간에 따른 NO_x의 발생량을 측정된 결과는 Fig. 6과

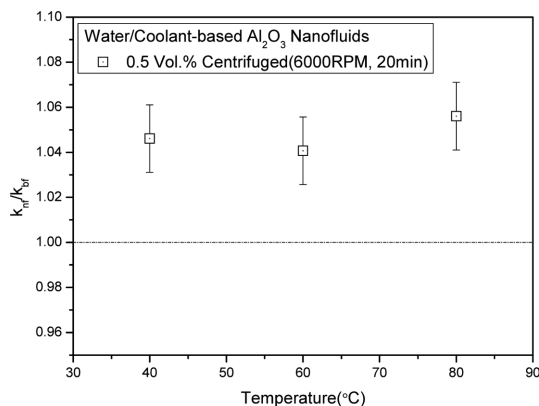


Fig. 4 Thermal Conductivity of Al₂O₃ Nanofluids

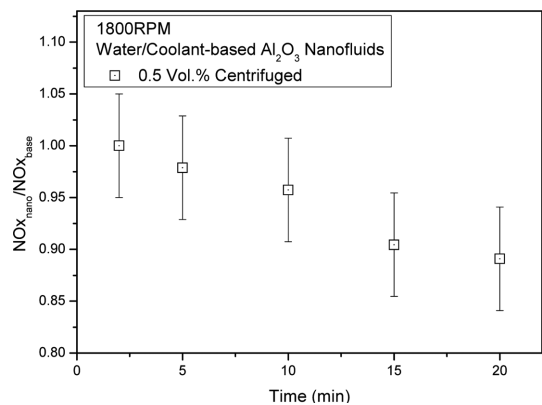


Fig. 6 Ratio of NO_x Emission

같다. 나노유체를 냉각수로 사용할 때 NO_x 발생량이 시간에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 약 15분 이후부터는 NO_x 발생량이 변화하지 않고 일정하게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. NO_x 발생량 측정 결과 나노유체를 냉각수로 사용할 경우 기본 유체를 사용할 때보다 NO_x 발생량이 최대 10.9%까지 감소하는 것으로 측정되었으며, 이는 엔진의 열점(Hot Spot)이 기본유체를 사용할 때보다 나노유체를 사용할 때 효과적으로 제거되고 있음을 암시하고 있다. 실험결과를 바탕으로 본 연구에서 제작된 물/냉각유체-기반의 Al_2O_3 나노유체는 차량용 차세대 냉각수로 사용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 물/냉각유체-기반의 Al_2O_3 나노유체를 이용하여 차량 엔진 냉각 성능 실험을 수행하였다. 이를 위해 나노유체를 Two-step 방법을 사용하여 제작하였으며, 이후 Decanting 방법을 사용하여 높은 분산안정성을 가지는 물/냉각유체-기반의 Al_2O_3 나노유체를 제작하였다. 제작된 나노유체의 열전도도를 비정상열선법(Transient Hot Wire Method)를 사용하여 측정 하였으며, 물/냉각유체-기반의 Al_2O_3 나노유체의 열전도도는 기본유체 대비 4.8% 증가하는 것으로 측정되었다. 제작된 나노유체의 냉각성능평가는 실제 차량엔진이 설치된 모사 실험장치를 사용하여 수행하였으며, 엔진이 동일한 RPM으로 운영될 때 냉각수 입출구의 온도를 시간에 따라 측정된 결과 시간이 지남에 따라 서모스탯의 개폐되는 주기가 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 냉각효율을 시간에 따라 정량적으로 평가한 결과 최대 5.9%까지 냉각성능이 향상되는 것으로 나타났다. 또한 물/냉각유체-기반의 Al_2O_3 나노유체를 사용할 경우 배기가스의 NO_x 발생량이 최대 10.9%까지 감소하였으며, 이는 엔진의 열점(Hot Spot)이 기본유체를 사용할 때보다 나노유체를 사용할 때 효과적으로 제거됨을 단편적으로 보여준다. 연구 결과를 바탕으로 물/냉각유체-기반의 Al_2O_3 나노유체는 차량용 차세대 냉각수로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-

2014R1A2A1A11052109).

참고문헌

- (1) M. Raja, R. Vijayan, S. Suresh and R. Vivekananthan, "Effect of heat transfer enhancement and NO_x emission using Al_2O_3 /water nanofluid as coolant in CI engine", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 20, 2013, pp. 443~449.
- (2) S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, M. Seifi Jamnani and S. M. Hoseini, "Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3 /water nanofluid" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, Issue 10, 2011, pp. 1833~1838.
- (3) S. S. Chougule and S. K. Sahu, "Comparative Study of Cooling Performance of Automobile Radiator Using Al_2O_3 -Water and Carbon Nanotube-Water Nanofluid", *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, Vol. 5, 2014, 011001-1.
- (4) M. Naraki a, S.M. Peyghambarzadeh , S.H. Hashemabadi and Y. Vermahmoudi, "Parametric Study of Overall Heat Transfer Coefficient of CuO Water nanofluids in a car radiator", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 66, 2013, pp. 82~90.
- (5) Liu M.-S., Lin M. C.-C., C. Tsai Y., and Wang C.-C., Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 49, 2006, pp. 3028~3033.
- (6) K. S. Hong, T.-K. Hong, and H.-S. Yanga, Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles, *Applied Physics Letter*, Vol. 88, 2006, 031901.
- (7) N. R. Karthikeyan, J. Philip, and B. Raj, Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids, *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 109, 2008, pp. 50~55.
- (8) J.-H. Lee, S.-H. Lee, and S. P. Jang, "Do Temperature and Nanoparticle Size Affect the Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids?", *Applied Physics Letter*, Vol. 104, 2014, pp. 161908.
- (9) 구자예, "왕복기관", 동명사, 2010, pp. 135~138.
- (10) H. E. Patel, T. Sundararajan and S. K. Das, "An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids", *Journal of Nanopart Research Paper*, Vol. 12, Issue 3, 2010, pp. 1015~1031.