

태양열 집열기 적용을 위한 순수 물과 에탄올 탄소나노유체의 특성 비교 연구

안응진*, 박성식**, 천원기***, 박윤철****, 김남진*****[†]

*제주대학교 에너지공학과(anej515@jejunu.ac.kr), **제주대학교 에너지공학과(pss5153@jejunu.ac.kr),
제주대학교 에너지공학과(wgchunn@jejunu.ac.kr), *제주대학교 기계공학과(ycpark@jejunu.ac.kr),
*****[†] 제주대학교 에너지공학과(jnkim@jejunu.ac.kr)

A Comparative Study on the Characteristics of the Pure water and Ethanol Carbon Nanofluids for Applying Solar Collector

An, Eoung-Jin*, Park, Sung-Seek**, Chun, Won-gee, Park, Yoon-Chul****, Kim, Nam-Jin*****

*Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(anej515@jejunu.ac.kr)
**Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(pss5153@jejunu.ac.kr)
***Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(wgchunn@jejunu.ac.kr)
****Dept. of Mechanical Engineering, Jeju National University(ycpark@jejunu.ac.kr)
*****[†] Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(jnkim@jejunu.ac.kr)

Abstract

In this study, for increasing the efficiency of solar collector, the thermal conductivities and viscosities of the pure water and ethanol oxidized multi-walled carbon nanofluids were measured. Nanofluids were manufactured by ultra-sonic dispersing oxidized multi-walled carbon nanotubes(OMWCNTs) in the pure-water and ethanol at the rates of 0.0005 ~ 0.1 vol%. the Thermal conductivities and viscosities of manufactured nanofluids were measured at the low temperature(10°C), the room temperature(25°C) and the high temperature(70°C). For measuring thermal conductivity and viscosity, we used Transient Hot-wire Method and Rotational Digital Viscometer, respectively. As a result, under given temperature conditions, thermal conductivity of the 0.1 vol% pure-water nanofluid improved 7.98% (10°C), 8.34% (25°C), and 9.14% (70°C), and its viscosity increased by 37.08% (10°C), 33.96% (25°C) and 21.64% (70°C) than the base fluids. Thermal conductivity of the 0.1 vol% ethanol nanofluids improved 33.72% (10°C), 33.14% (25°C), and 32.36% (70°C), and its viscosity increased by 37.93% (10°C), 31.92% (25°C) and 29.42% (70°C) than the base fluids.

Keywords : 산화 다중벽 탄소나노튜브(Oxidized Multi-walled Nanotubes), 증류수(Pure water), 에탄올(Ethanol), 열전도도(Thermal conductivity), 점도(Viscosity),

1. 서 론

태양열 에너지 이용 기술은 태양열의 흡수·저장·열변환의 과정을 거쳐 건물의 냉·난방

및 급탕 등에 활용하는 기술을 말한다. 태양열 에너지는 태양을 에너지원으로 사용하므로 무한히 이용할 수 있으며 CO, CO₂와 같은 온실가스를 배출하지 않는 친환경 에너지

이기 때문에 이를 활용하기 위한 많은 연구가 진행 중이다. 하지만 태양열 에너지는 단위 면적당 공급받을 수 있는 에너지의 양이 적다는 단점이 있다. 이러한 단점을 최소화하고 태양열 에너지를 최대한 활용하기 위해서는 태양열 에너지 이용 시스템의 핵심인 집열기의 효율을 향상시켜야 한다.

태양열 집열기의 효율을 향상시키기 위하여 태양열 집열기와 집열기 내의 히트파이프의 재질, 형상 및 내부 구조를 변화시키는 연구가 진행되어왔다. 하지만 단순히 기하학적 구조를 변경하는 것만으로는 태양열 집열 시스템의 효율을 증가시키는 것에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 태양열 집열기의 히트파이프 작동유체로 우수한 열적 성능을 갖는 나노유체를 적용하여 전체 시스템의 효율을 향상시키고자 하는 연구가 진행 중이다.⁽¹⁾

나노유체란 순수 유체 내에 nm 크기의 입자들이 안정적으로 분산되어 있는 새로운 개념의 유체를 말하며, 높은 열전도도 특성을 갖는 입자로 나노유체를 제조할 경우 나노유체의 열전도도 역시 증가하게 된다. 특히 나노기술이 발달하면서 획기적으로 높은 열전도도 특성을 갖는 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)의 대량생산이 가능해졌으며, 이를 이용한 나노유체의 우수한 열 성능을 열전달 시스템에 적용하려는 연구가 진행되고 있다.

국외에서는 Choi et al.⁽²⁾이 Poly Oil에 탄소나노튜브를 첨가한 유체의 열전도도를 측정하였고, Xie et al.⁽³⁾은 다중벽 탄소나노튜브를 물과 에틸렌글리콜, Decene에 혼합하여 나노유체의 열전도도를 측정하여 열전도도 향상을 확인하였다. 또한 Weerapun Duangthongsuk et al.⁽⁴⁾은 TiO_2 를 순수 물에 분산하여 열전도도를 측정하였다. 국내에서는 Kim et al.⁽⁵⁾이 순수 물에 산화 다중벽 탄소나노튜브를 분산한 나노유체의 열전도도와 점도를 측정하여 열매체로의 적용 가능성을 연구하였으며, Kim et al.⁽⁶⁾은 전기적 폭발법에 의해 생성된 ZnO 나노입자를 에틸렌글리콜에 분산하여 5.5%

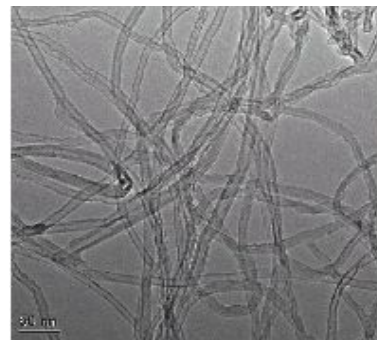
의 부피비에서 최대 26.5%의 열전도도 향상 효과를 확인하였다.

따라서 본 연구에서는, 나노유체를 태양열 집열기에 적용하기 위하여, 순수 물과 에탄올을 기반으로 한 탄소나노유체를 각각 제조하고 온도에 따른 나노유체의 열전도도 및 점도를 비교 분석하였다.

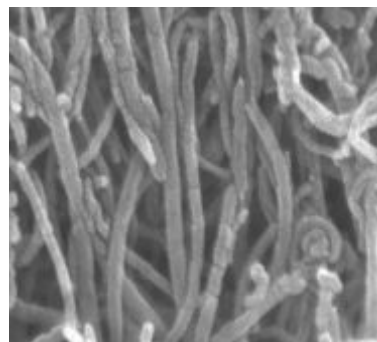
2. 실험 장치 및 방법

2.1 탄소나노튜브

본 연구에서는 화학 증기 증착법에 의해 제조된 다중벽 탄소나노튜브를 황산(H_2SO_4 , 98%)과 질산(HNO_3 , 64%)을 이용하여 산화시켜 실험에 사용하였다. 사용된 CM-100 탄소나노튜브의 물성치는 표 1에 나타내었으며, 그림 1에 CM-100 탄소나노튜브(a)와 산화 CM-100 탄소나노튜브(b)를 장방출주사전자현미경(JSM-06700F)으로 확대하여 찍은 SEM 사진을 나타내었다.



(a) CM-100



(b) Oxidized CM-100

그림 1. SEM photos of Carbon nanotubes.

2.2 나노유체의 제조

나노유체는 열전도도가 높은 나노입자의 영향으로 순수 유체보다 열전도도가 향상된다. 하지만 탄소나노튜브를 유체에 분산하는 경우, 흑연판 사이 상호작용과 같이 튜브와 튜브 간에 반데르발스 힘이 존재하기 때문에 안정적으로 분산하기 어렵다. 유체 내에 탄소나노튜브를 안정적으로 분산시키기 위한 방법으로 기계적 분산법과 물리적 고착에 의한 분산, 화학적 개질에 의한 분산법이 보고되었다. Kim et al.⁽⁵⁾은 위의 분산방법을 적용한 나노유체의 열전도도 및 점도를 비교 분석한 결과 화학적 개질에 의한 분산법과 기계적 분산법을 함께 적용하여 나노유체를 제조하였을 때 가장 우수한 성능을 보인다고 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 선행 연구에서 가장 우수하다고 보고된 산화탄소나노튜브를 순수 물과 증류수 50ml에 각각 0.0005 ~ 0.1 vol%로 혼합비로 변화시키고, 2시간 동안 초음파로 분산하여 나노유체를 제조하였다.

2.3 열전도도 측정

제조된 산화탄소나노유체의 열전도도는 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)을 이용하여 측정하였다. 열전도도 측정 장치는 그림 2와 같이 백금선의 저항 변화를 검출하는 휘트스톤 브릿지(Wheatstone Bridge), 데이터 수집과 저장을 위한 데이터로거(Agilent 34979A)와 컴퓨터, 전원 공급을 위한 전원 공급기(Agilent E3648A)로 구성된다.

백금선이 완전히 잠긴 나노유체를 항온수조를 이용하여 실험온도와 평형을 시킨 후, 가변저항을 조절하여 검류계에 걸리는 전압을 0으로 만들고 직류 전원 공급기로 15V의 전압을 인가시킨다. 전압이 인가되면 백금선의 표면 온도가 변하면서 저항도 함께 변하게 되는데, 이 데이터를 전기저항과 온도의 선형식에 적용하여 나노유체의 온도 변화를 계산하였다. 나노유체의 온도 변화 계산은 Bentley⁽⁷⁾가 제안한 식 (1)을 이용하였으며, 여기서, E_{th} 는 검류계에 걸리는 전압이고, V_s 는 공급전압, T 는 나노유체의 온도, R 은 온도 T 에서의 백금선 저항, R_0 는 0°C에서 백금선

표 1. Properties of MWCNTs (CM-100).

Properties	CM-100
Diameter(nm)	10~15
Length(μ m)	~200
Purity(wt.%)	95
Bulk Density(g/cm ³)	0.05
Surface Area(m ² /g)	225

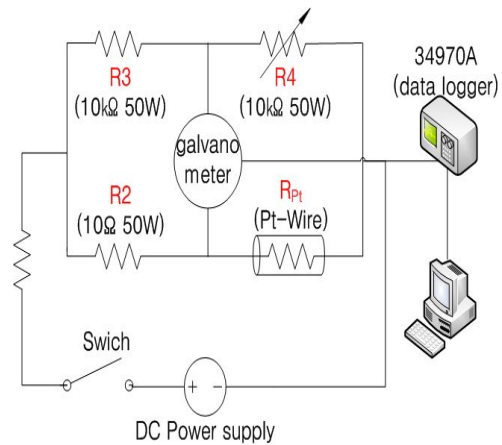


그림 2. Schematic diagram of Wheatstone Bridge.

의 저항이며, α 는 백금의 온도-저항계수이며 0.0039092/°C이다.

$$E_{th} = V_s \left(\frac{R_{pt}}{R_{pt} + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) \quad (1)$$

$$R = R_0 (1 + \alpha d T)$$

위 식 (1)의 전기저항과 온도의 선형식을 이용하여 계산된 온도 데이터를 Nagasaka⁽⁸⁾가 제안한 열선의 온도 변화식을 이용하여 나노유체의 열전도도를 계산하였다

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

여기서 k 는 나노유체의 열전도도이며, T_1 ,

T_2 는 각각 시간 t_1 , t_2 에서의 온도, q 는 열선에 가해지는 전력이다.

나노유체의 열전도도 측정실험은 실험온도 (10°C, 25°C, 70°C)를 일정하게 유지하였고, 실험의 오차를 줄이기 위해 동일조건에서 실험을 10번씩 반복 수행하여 평균값과 기본 유체인 순수 물과 에탄올의 열전도도와 비교하여 열전도도 증가량을 나타내었다.

2.4 점도 측정

본 실험에서는 열전도도 측정실험과 같이 동일한 실험 온도 조건(10°C, 25°C, 70°C)에서 점도를 측정하였다. 점도 측정 실험장치는 점도계(Brookfield DV-II+pro)와 항온수조(TC-502), 컴퓨터로 구성되어 있다.

점도 측정실험은 항온수조로 나노유체를 실험온도로 평형시킨 후에 점도계의 회전수를 충분히 담그고 회전시켜 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 열전도도

그림 3은 열전도도 측정 장치의 정확성을 알아보기 위하여 측정한 순수 물과 에탄올의 열전도도 값을 문헌 값과 비교한 그래프이다. 물과 에탄올의 물성치는 각각 CRC Handbook of Chemistry and Physics⁽⁹⁾와 화학공학정보센터⁽¹⁰⁾에서 제공하는 데이터를 이용하였으며, 온도에 따른 열전도도 측정값과 문헌값을 비교한 결과 1% 이내의 오차로 일치함을 확인하였다. 따라서 본 실험에 사용된 열전도도 측정 장치는 정확하게 만들어졌다고 할 수 있다.

그림 5는 각각 0.0005 vol%와 0.001 vol%의 순수 물과 에탄올 산화탄소나노유체 열전도도의 시간에 따른 변화를 관찰한 그래프이다. 나노유체를 제조한 직후, 2시간 후, 12시간 후의 열전도도를 측정하였고, 시간이 지남에 따라 나노유체의 열전도도 변화는 거의 없다는 것을 확인하였다.

그림 5는 제조한 순수 물, 에탄올 산화탄소나노유체를 체적분율 0.0005 vol%에서 0.1 vol%까지 변화시키며 열전도도 변화를 온도

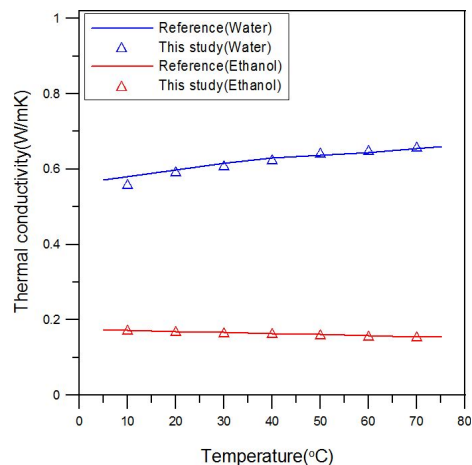


그림 3. Validation of Ethanol to measure the thermal conductivity of the base fluid.

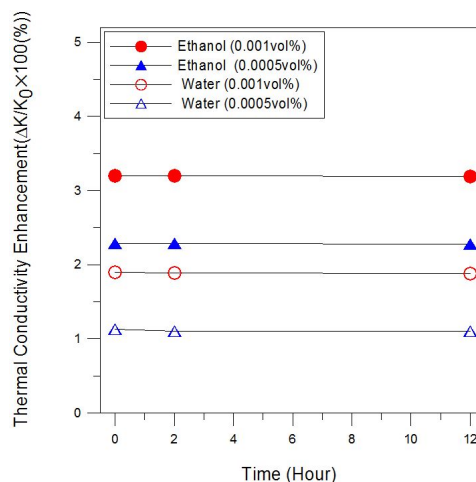


그림 4. Comparison of the thermal conductivity as a function of time.

에 따라 나타낸 그래프이다. 나노유체의 열전도도는 체적분율이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 동일 체적비일 때 기본 유체의 특성에 따라 순수 물은 온도가 증가함에 따라 열전도도 증가폭이 커지며 에탄올은 감소함을 확인하였다. 특히 체적분율 0.1 vol% 일 때, 순수 물 산화나노유체의 경우 열전도도가 10°C일 때 증류수 보다 3.2% 증가 하였으며, 25°C일 때는 3.65%, 70°C일 때는 9.14%가 각각 증가하였다. 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도는 각각 에탄

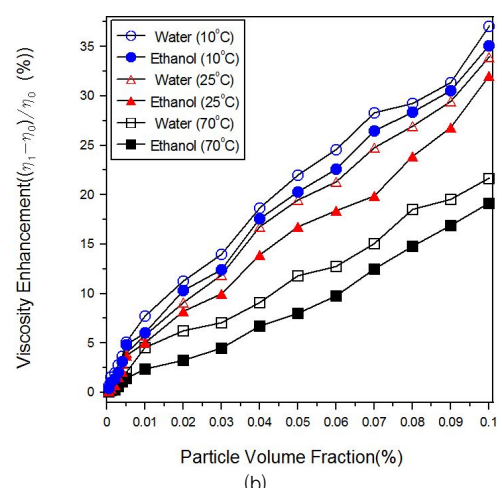
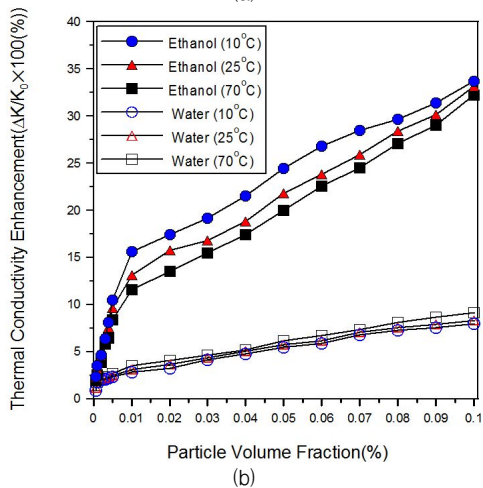
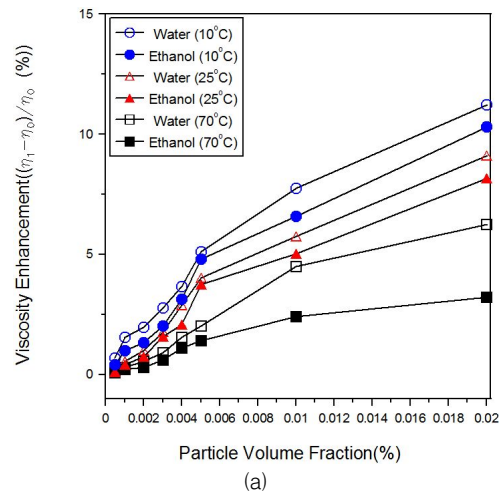
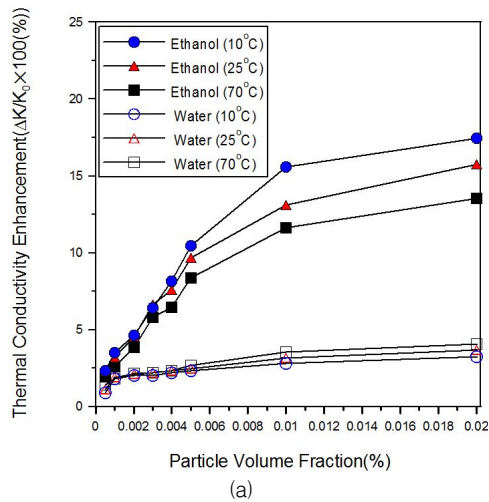


그림 5. Comparison of the thermal conductivity as Temperature(10°C, 25°C, 70°C).

그림 6. Comparison of the viscosity as Temperature(10°C, 25°C, 70°C).

을 보다 10°C일 때 33.72%로 가장 높게 증가하였으며, 25°C일 때 33.14%, 70°C일 때 32.26%의 향상 효과가 있음을 확인하였다.

4.2 점도

그림 6은 순수 물 산화탄소나노유체와 에탄올 산화탄소나노유체의 온도에 따른 점도를 나타낸 그래프이다. 체적분율 0.0005 vol%에서 0.1 vol%까지의 점도 변화를 온도에 따라 나타낸 것이다.

나노유체의 점도는 체적분율이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였으며, 특히 0.1 vol%일 때, 순수나노유체의 경우 10°C일 때 증류수

보다 37.08%의 점도가 증가 하였으며, 25°C일 때는 33.965%, 70°C일 때는 21.64% 증가하였다. 에탄올 산화탄소나노유체의 점도는 에탄올 보다 10°C일 때 35.1%로 가장 높게 증가하였으며, 25°C일 때 32.01%, 70°C일 때 19.12%가 증가함을 확인하였다.

각각 나노유체의 점도 증가는 최대 10°C에서 약 32.5%의 점도 증가율을 보이고 있으나, 물과 에탄올의 점도가 각각 1.3 cP, 1.074 cP인 점을 감안하면 크게 증가했다고 할 수 없다. 따라서 태양열 집열 시스템의 효율을 증가시키기 위하여 히트파이프의 작동유체로 순수 물, 에탄올 산화탄소나노유체를 사

용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 결론

태양열 집열기의 효율 향상을 위해, 집열기의 열매체로 적용시킬 순수 물, 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도 및 점도 특성을 측정본 실험의 결과는 다음과 같다.

- (1) 나노유체의 열전도도 측정에서, 0.1 vol% 체적분율로 혼합하였을 때, 순수 물 산화탄소나노유체는 10°C일 때 증류수 보다 3.2%, 25°C일 때는 3.65%, 70°C일 때는 9.14% 증가하였으며, 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도는 에탄올 보다 10°C일 때 33.72%, 25°C일 때 33.14%, 70°C일 때 32.26%가 증가하였다.
- (2) 동일 체적분율에서의 나노유체의 열전도도는 기본유체의 열전도도 특성과 마찬가지로 순수 물 나노유체의 경우 온도가 증가함에 따라 열전도도 증가폭이 커졌으며, 에탄올 산화탄소나노유체의 경우 온도가 증가함에 따라 열전도도 증가폭이 감소함을 확인하였다.
- (3) 나노유체의 점도는 체적분율 0.1 vol%의 순수 물 산화탄소나노유체는 증류수 보다 10°C에서 37.08%, 25°C에서 33.96%, 70°C에서는 21.64%가 증가하였다. 또한 에탄올 산화탄소나노유체의 점도는 에탄올 보다 10°C에서 35.1%, 25°C에서 32.01%, 70°C에서는 19.124%가 증가하였다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NO. 2011-0029820)

참고문헌

1. Ha H. J., Kong Y. C., Do K. H., Jang S. P., Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Heat Pipes Using Water-based MWCNT Nanofluids. 설비공학회 논문집, 2011, Vol. 23, No. 7, pp. 528-534.
2. Choi. S. U. S., Zhang. Z. G., Yu. W., Lockwood F. E., Crylke, E. A., Anomalous thermal conductivity enhancement in annotube suspension, Appl. Phys. Lett., 2001, Vol. 79, No. 14, pp. 2252-2254.
3. Xie, H., Lee, H., Youn, W., and Choi, M., Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities, Journal of Applied Physics, 2003, Vol. 94, No.8, pp. 4967-4971.
4. Weerapun Duangthongsuk, Somchai Wongwises, Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids, Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, Vol. 33, pp. 706-714.
5. Kim N. J., Park S. S., Lim S. H., Chun W. G., A study on the characteristics of Carbon nanofluids at the room temperature (25°C), International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, Vol. 38 No. 3, pp. 313-318.
6. 김현진, 황교식, 신현교, 이창규, 이경자, 윤종호, 장석필, 전기선 폭발법에 의해 제작된 에틸렌 글리콜 기반 ZnO 나노유체의 열전도도, 대한기계학회 논문집, 2010, Vol. 36, No. 2, pp.111-115.
7. Bently, J. P., Temperature sensor characteristics and measurement system design, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1984, Vol. 17, pp. 430-435.
8. Nagasaka, Y. and Nagashima, A., Absolute Measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, Vol. 14, pp. 1435-1440.
9. Lide, David R, CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC press, 1992, 73rd ed.
10. 화학공학연구정보센터
<http://www.cheric.org/research/kdb/hcprop/showcef.php?cmpid=818&prop=THL>