

<기술논문>

## 핵비등 열전달 효과를 고려한 내연기관 냉각수로의 CFD-FE 연성해석 기법

이명훈\* · 김동광 · 이상규 · 임동렬

고등기술연구원

### Coupled CFD-FE Analysis Method for IC Engine Cooling Water Jacket under Subcooled Nucleate Boiling Conditions

Myunghoon Lee\* · Dongkwang Kim · Sangkyoo Lee · Dongryul Rhim

*Institute for Advanced Engineering, 6332-2 Goan-ri, Baegam-myeon, Yoingin-si, Gyeonggi 449-863, Korea  
(Received 11 July 2005 / Accepted 1 May 2006)*

**Abstract** : The present study is to simulate coolant flow in IC engine cooling passages under subcooled nucleate boiling conditions and investigate thermal stress analysis of the solid part. To consider nucleate boiling heat transfer effect, Chen's empirical formula is used through user subroutine programing in CFD code and then nucleate boiling model is compared with Robinson's experimental results, which shows reasonable agreement. This Chen's nucleate boiling model is applied to single cylinder IC engine model and we do cylinder liner thermal stress analysis using commercial FEM code.

**Key words** : Nucleate boiling(핵 비등), Conjugate heat transfer(복합열전달), Thermal stress(열응력), FVM(유한체 적법), FEM(유한요소법)

#### Nomenclature

$q_{tot}$	: total heat flux, $kW/m^2$
$h_{conv}$	: convective heat transfer coefficient, $W/m^2K$
$h_{nucd}$	: nucleate boiling heat transfer coefficient, $W/m^2K$
$\sigma$	: surface tension(N/m)
$h_{fg}$	: enthalpy of vaporization(J/kg K)
$\rho_l$	: coolant density of liquid phase
$\rho_v$	: coolant density of gas phase

#### 1. 서론

점차 강화되는 배기규제에 맞추어 엔진 또한 고출력, 고효율화가 요구되는 시점에서 자동차 엔진의 냉각수에 의한 열전달은 내연기관의 연소효율, 배기가스, 연료 소모율, 그리고 엔진을 구성하고 있는 요소들의 열적피로 등에 큰 영향을 주기 때문에 그동안 많은 연구자들에 의해 최적의 냉각수로 시스템 설계를 위한 여러 연구들이 수행되었다. 그동안의 국내 연구는 주로 열전달을 고려하지 않은 유동해석에 국한하여 균일한 유동의 흐름을 확보하기 위한 냉각수 유로 개선을 위한 연구가 주를 이뤘다.<sup>1-3)</sup> 하지만 조<sup>4)</sup> 등은 냉각수 유로에서의 유동 및 열전달의 관점에서 CFD와 FEM 코드의 연성해석 방법을 이용하여 대형 디젤엔진의 헤드 및 실린더

\*Corresponding author, E-mail: mhlee@iae.re.kr

라이너 부분의 열적 피로도 해석을 하였다. 또한 Bo<sup>5)</sup>는 핵비등에 의한 열전달 효과를 고려하면서 엔진의 냉각수 유동해석 및 엔진 블록 및 실린더 헤드의 고체 부분과의 온도장 결과를 얻었지만 이를 이용한 엔진 요소들의 열응력 해석까지 나아가지는 않았다. 본 연구는 CFD 코드를 이용하여 냉각수 유로에서의 국부적인 온도상승으로 인한 핵비등의 열전달 효과를 고려하여 냉각수 유동 및 엔진의 고체 부분과의 열전달을 함께 고려하여 해석 하였고, 여기서 얻어진 엔진 고체부분의 온도장을 이용하여 유한 요소 해석 코드에 적용하여 실린더 보어의 열응력에 의한 변형 예측을 하였다.

## 2. 본 론

실린더 내 연소에 의한 국부적인 열부하로 인한 온도 상승은 이 부분을 지나는 냉각수의 포화 온도를 초과함으로써 인하여 핵비등이 일어나는데 이는 급격한 열전달 상승을 동반한다. 순수하게 냉각의 측면에서 볼 때 핵비등은 엔진의 열전달촉진에 의한 열손실을 유발하여 엔진의 냉각 효율을 높일 수 있으나, 이러한 현상이 국부적으로 한정됨에 따라 엔진 내부에 열응력을 발생시킴으로써 재료의 피로에 영향을 미칠 뿐만 아니라 이는 실린더 내 국부적으로 온도구배를 크게 하여 가솔린 엔진의 경우 노크와 같은 현상을 유발하며 또한 최근 NOx 및 PM 배출을 동시에 현저히 저감하는것으로 기대를 모으고 있는 예혼합 압축착화(HCCI)엔진에서는 이러한 부분적인 온도 구배가 예혼합 연소구간에서 화학 반응에 영향을 주어 자발화 시점 등이 달라지는 등의 문제가 발생하게 된다. 이처럼 엔진 냉각수의 핵비등에 의한 열전달이 내연기관 엔진의 연소과정에 미치는 영향이 크고 또한 엔진 부품들의 열적 손상 등에 대한 설계에 대한 관심이 증대 되면서 이를 고려한 냉각수의 유동 및 열전달해석을 하는 것은 의미가 있다. 다음 장에서 핵비등 열전달에 대한 모델링 과정과 이 모델에 대한 타당성을 실험결과와 비교하고 검증된 핵비등 열전달 모델을 실제 냉각유체의 유동 및 엔진 고체와의 복합열전달 해석과정에 적용하여 핵비등 열전달이 미치는 엔진 냉각시스템에 미치는 영향에 대하여 살펴보기로 한다.

### 2.1 핵비등 열전달 모델링

핵 비등 열전달에 관한 실험 관계식으로 다음과 같이 Rohsenow<sup>5)</sup> 그리고 Chen<sup>6)</sup> 등의 식이 널리 알려져 쓰이고 있다.

- Rohsenow Model

$$q_{tot} = q_{conv} + q_{vc} \tag{1}$$

$$q_{vc} = C_{sf} \mu_l h_{lv} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \left( \frac{c_{pl} \Delta T_{sat}}{h_{lv} Pr^{1.7}} \right) \tag{2}$$

where,

$C_{sf}$  : Rohsenow empirical surface-fluid coefficient

$g$  : The acceleration due to gravity

$\rho_l$  : Fluid density

$\mu_l$  : Fluid viscosity

$\rho_v$  : Coolant vapor density

$h_{lv}$  : Latent heat of vaporization

- Chen's model

$$q_{tot} = h_{conv} (T_{wall} - T_{bulk}) + h_{nucd} (T_{wall} - T_{sat}) \tag{3}$$

$$h_{nucd} = 0.00122 \left[ \frac{k_l^{0.079} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{lv}^{0.24} \rho_v^{0.24}} \right] \Delta T_{sat}^{0.24} \Delta P_{sat}^{0.75} \cdot S \tag{4}$$

where,

$T_{wall}$  : Wall temperature

$T_{bulk}$  : Fluid bulk temperature

$T_{sat}$  : fluid saturation temperature

$\Delta T_{sat}$  :  $T_{wall} - T_{sat}$

$\Delta P_{sat}$  :  $P_{wall} - P_{sat}$

$P_{wall}$  :  $133.32e^E$

S : suppression factor.

위에서 언급한 Rohsenow와 Chen의 핵비등 열전달 모델을 Robinson<sup>7)</sup>의 실험결과와 비교하였다. Robinson이 실험에서 사용한 형상은 Fig. 1과 같이 수평한 241 mm 길이의 사각형 덕트로 입구 수직 단면적은 16×10 mm<sup>2</sup>이고, 유체의 핵비등을 일으키는 고온의 표면은 10×50 mm<sup>2</sup> 면적을 갖으며 입구로부터 76 mm 떨어진 곳에 위치하고 있다. 고체부분의 재질은 알루미늄 합금이고, 이 사이를 체적기준으

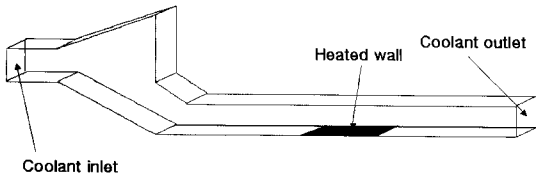


Fig. 1 Geometry of the flow channel

로 50%의 에틸렌 글리콜(Ethylene glycol) 부동액과 50%의 물의 혼합물이 흐른다. 냉각수의 밀도, 점성 계수, 비열 등의 물성치는 Alsamani<sup>8)</sup> 등이 제안한 온도에 따른 경험식을 제안하였지만, Fig. 2~4에서와 같이 것과 같이 실험값<sup>9)</sup>과는 차이가 있어서, 실제 엔진의 냉각수가 작동하는 온도 범위에 해당하는 물성치를 취하기 위하여 실험 측정치에 선형적 외삽법을 이용하여 온도에 따른 함수로 표현한 것을 사용 하였다. Table 1에서는 핵비등 열전달을 모델링에 대한 검증은 위하여 입구 속도와 초기 온도를 고정시키고 압력을 변화시키는 해석 조건에 대하여 정리를 하였다.

유동해석에는 열유체공학 상용 CFD 코드인 STAR-CD 3.2를 사용하였다. 정상유동으로 가정하였고, RNG k-ε 난류모델을 사용하였으며, 편미분 방정식의 차분 방법으로는 MARS(Monotone Advection and Reconstruction Scheme)와 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 이용하였다. 냉각수로 입구로 들어갈 때의 온도는 363K로 가정하였고 밀도, 점성계수, 비열 등은 Fig. 2~4과 같이 온도에 따른 함수로 고려하여 적용하였다.

Fig. 5는 Rohsenow와 Chen의 핵비등 열전달 모델을 실험결과와 함께 비교한 것이다. 입구 속도가 다른 CASE B와 D에 대해서 열전달 계수를 비교한 것이다. 입구속도가 0.25m/s일때, Chen 모델의 경우는 실험결과보다 과대 예측을 하는 반면, Rohsenow 모델은 과소예측하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 Chen의 결과가 실험 결과에 근접함을 알 수 있다. 입구속도 0.5 m/s 증가 했을 경우 Chen의 모델이 0.25m/s 결과 보다 정량적으로는 일치하지 않지만 정성적으로 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. Fig. 5를 통해서 과냉 영역에서는 Chen의 모델이 핵비등에 의한 열

Table 1 The test data for validation

C A S E	Pressure (bar)	Inlet velocity (m/s)	T <sub>inlet</sub> (K)
A	1	0.25	363
B	2	0.25	363
C	3	0.25	363
D	2	0.5	363

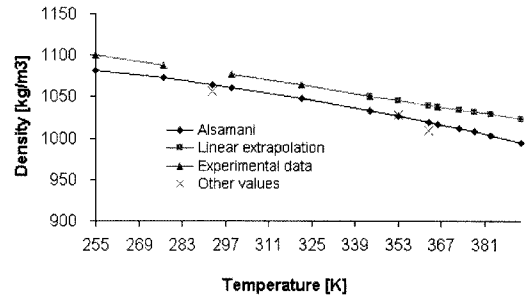


Fig. 2 Density profile of the ethylene glycol water mixture (50%/ 50%)

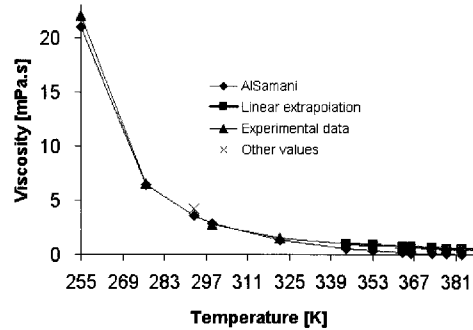


Fig. 3 Viscosity profile of the ethylene glycol water mixture (50%/ 50%)

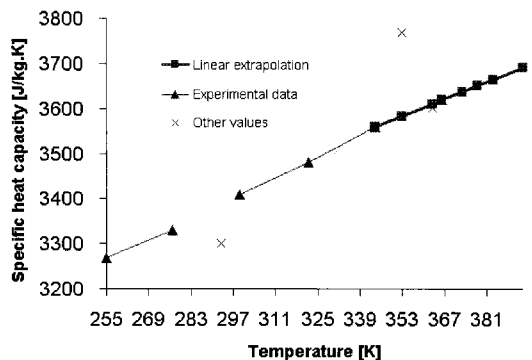


Fig. 4 Specific heat capacity profile of the ethylene glycol water mixture (50%/ 50%)

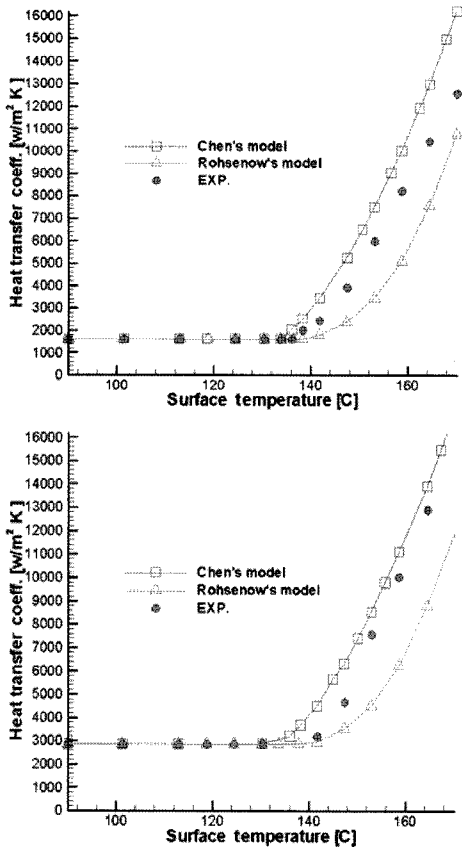


Fig. 5 Comparison of two nucleate heat transfer model at inlet velocity =0.25 m/s (upper) , 0.5m/s (down)

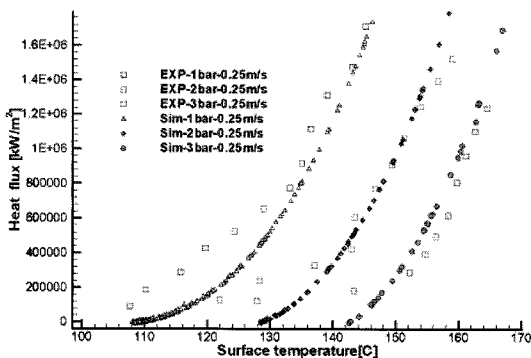


Fig. 6 Comparisons of the predicted(Chen's model) and measured heat flux versus wall surface temperature under different pressure conditions.

전달 모델로 더 적합하다고 판단된다.

Fig. 6은 Robinson<sup>7)</sup>의 실험결과와 Chen 모델을 이용한 해석 결과를 비교 한 것이다. 열유속(Heat flux)

을 CASE A, B, C 별로 표면온도에 따라 함께 비교한 것이데, 부분적으로 실험값과 정량적으로는 정확히 맞지는 않지만 압력이 증가함에 따라 핵비등이 일어나는 시점과 온도상승에 따른 열 유속 증가의 경향이 정성적으로는 잘 일치함을 볼 수 있다. 이를 통해 Chen이 제안한 핵비등 열전달 모델링을 실제 엔진의 냉각시스템 해석에 적용할 수 있을 것으로 생각한다.

## 2.2 단기통 엔진의 유동 및 열전달 해석

Cho<sup>4)</sup>등이 대형 디젤엔진의 유동 및 열전달해석에 있어서 사용한 방법은 냉각수 유동을 따로 해석하여 얻은 대류 열전달 계수를 고체부분의 경계 조건으로 주어 고체부분의 열전달해석을 따로 수행하는 것이었다. 본 연구에서는 고체와 유체의 격자를 만들어서 열-유동해석을 동시에 진행하는 복합열전달해석 기법을 사용하였다. 열-유동해석에서 얻은 온도결과는 FEM코드의 열응력 계산에 필요한 입력조건으로 들어간다. 이러한 방법을 사용하여 기존의 열-유동해석에서 필요한 대류 열전달 계수를 맵핑시키는 과정이 생략되었고 해석의 정확도와 편이성을 높였다. Fig. 7은 본 연구에서 사용된 830CC 단기통 엔진의 격자생성 및 구성 요소들을 보여주고 있다. 그림과 같이 냉각수 유로 및 실린더 블록, 헤드, 개스킷 약 500,000개의 사면체 격자를 생성하였다. 해석 방법은 핵비등 열전달 검증을 위한 해석방법과 동일하게 적용하였다. 열 경계 조건은 Fig. 8과 같이 실린더 라이너의 경우 상사점과 하사점에서의 1-D연소해석을 통하여 실린더 내 온도를 구한후 그 사이를 10등분하여 그림과 같이 영역별로 온도 경계 조건을 부여하였다.<sup>4)</sup> 또한 실린더 헤드영역 또한 그림과 같이 5영역으로 나눠 온도 경계 조건을 부여하였다.

Table 2 Engine specification

Engine specification	
Bore	102 mm
Stroke	100 mm
Connecting rod length	167 mm
Compression ratio	17.5:1
Coolant inlet flow rate	0.7 liter/sec

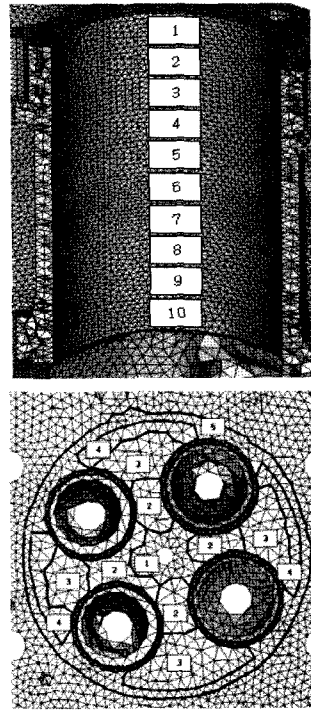
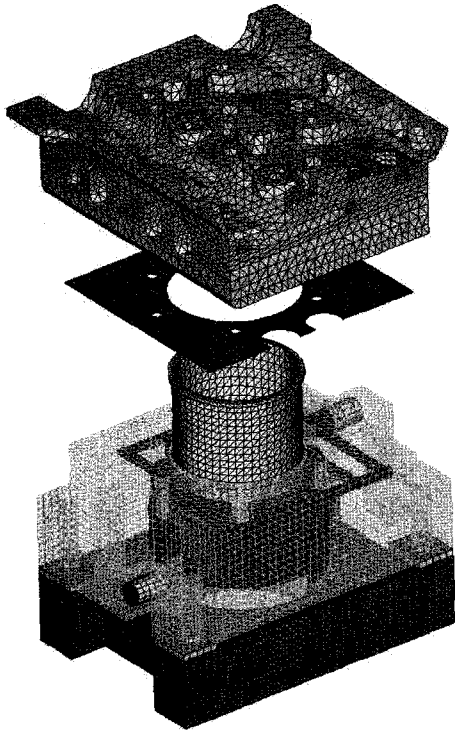


Fig. 7 Mesh generations of one cylinder IC engine for conjugate heat transfer simulations

Fig. 8 Thermal boundary conditions of the cylinder liner and head

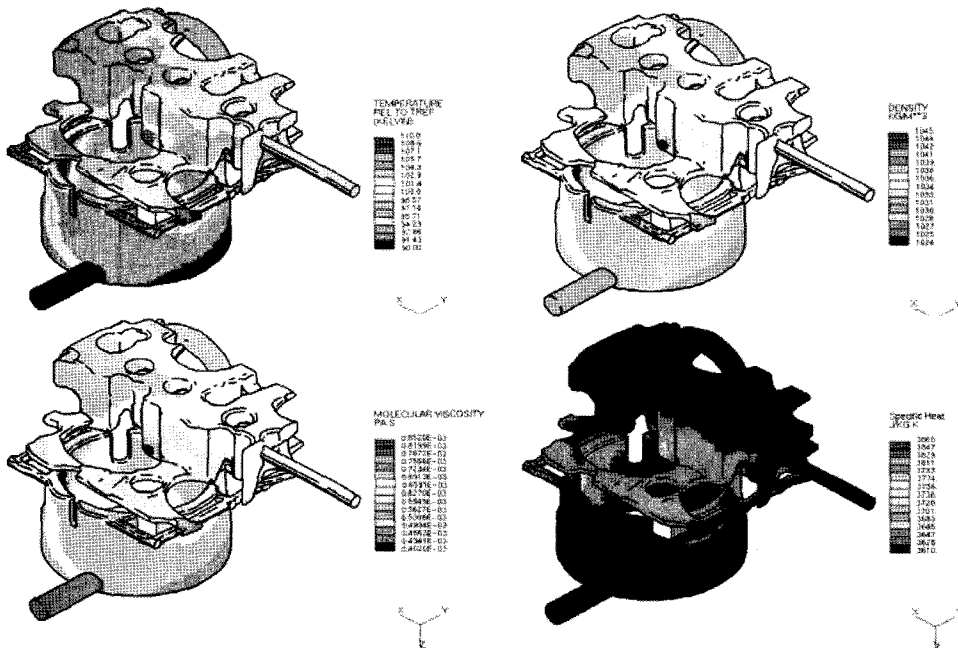


Fig. 9 Temperature, density, viscosity and specific heat field

### 3. 결과 및 분석

Fig. 10~11에 걸쳐 CFD를 이용한 유동 및 복합열 전달 해석의 결과를 핵비등 열전달을 적용한 것과 그렇지 않은 것으로 비교하여 나타내었다. 우선 Fig.

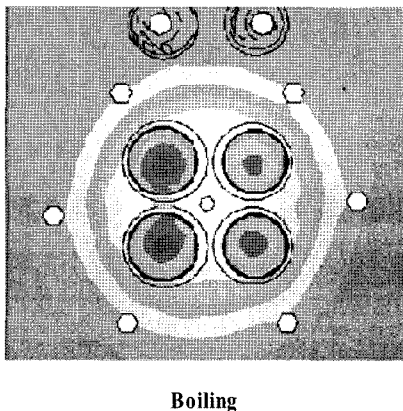
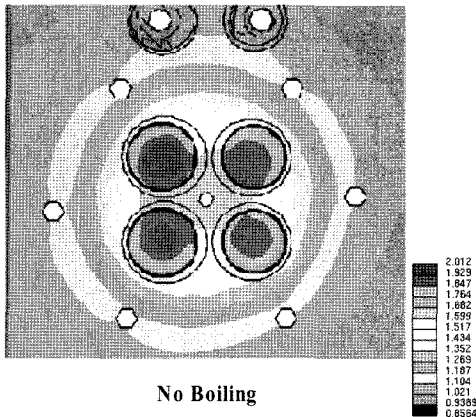
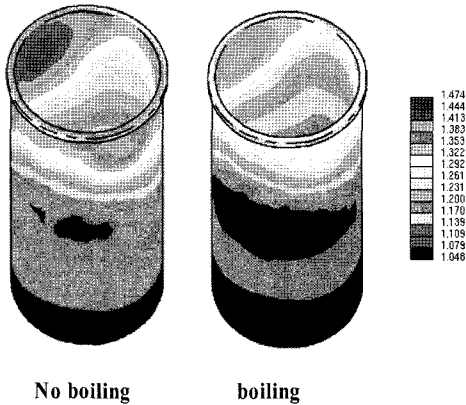


Fig. 10 Comparisons of the predicted normal temperature without/with nucleate boiling conditions

10에 실린더 라이너(Cylinder liner) 및 파이어 데크(Fire deck)의 노멀 온도분포를 나타내었는데, 여기서 노멀 온도(Normal temperature)란 계산 결과로 나온 온도 분포를 포화온도로 나누어 준 값으로 핵비등이 일어나는 영역을 보다 쉽게 구별하기 위하여 그와 같은 방법을 취하였다. Fig. 10에서 보면 핵비등 모델이 적용했을 때 그렇지 않은 경우보다 실린더 라이너의 최고 온도영역이 핵비등에 의한 열손실로 인하여 고온영역의 온도가 상대적으로 낮아졌음을 보인다.

Fig. 11에서는 엔진의 고체부분과 냉각수의 열전달 계수를 나타내었다. 핵비등 모델이 활성화된 결과에서 점선의 원으로 표시된 A와 A' 영역을 비교하면 핵비등에 의한 열전달이 일어나고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 12에서는 엔진 실린더 라이너의 온도분포를 이용하여 이를 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v.6.3을 이용하여 열응력해석 결과를 보이고 있다. 열응력에 의한 실린더 라이너의 변형된 결과를 200배 확대하여 변형정도를 쉽게 보일 수 있도록 하였다. Fig. 12에서처럼 실린더 라이너의 상대적 고온영역인 상단 부에서 더욱 많은 변형이 일어났음을 알 수 있고, 핵비등 열전달을 고려한 것과 그렇지 않은 것의 결과가 확연히 차이를 보이므로 핵비등이 일어나는 조건에서는 이를 고려하여 해석을 진행하는 것이 필수적이다. 그러나 본 연구는 실린더 라이너의 변형에 영향을 주는 인자들 즉, 열하중 뿐만 아니라 볼트 체결력과 실린더의 가스 폭발 압력 등 실린더 라이너의 변형에 영향을 주는 요소들이 종합적으로 고려되지 못했다. 이러한 모든 요소들을 적용하여 실린더의 라이너 및 헤드 부분의 변형 예측은 또 다른 큰 범위의 연구 주제가 되기 때문이다. 따라서 본 연구는 엔진을 이루는 주요 부분에 대한 CFD의 온도장 결과를 이용하여 FEM 코드를 통한 열응력 해석하는 과정까지에 대한 해석 기법에 대한 것으로 한정 한다.

### 4. 결론

1) 핵 비등 열전달 모델을 적용하여 내연기관의 냉각수로 유동 및 엔진 요소의 온도장을 예측하였으며 이를 통해 핵비등 열전달이 온도장에 미치

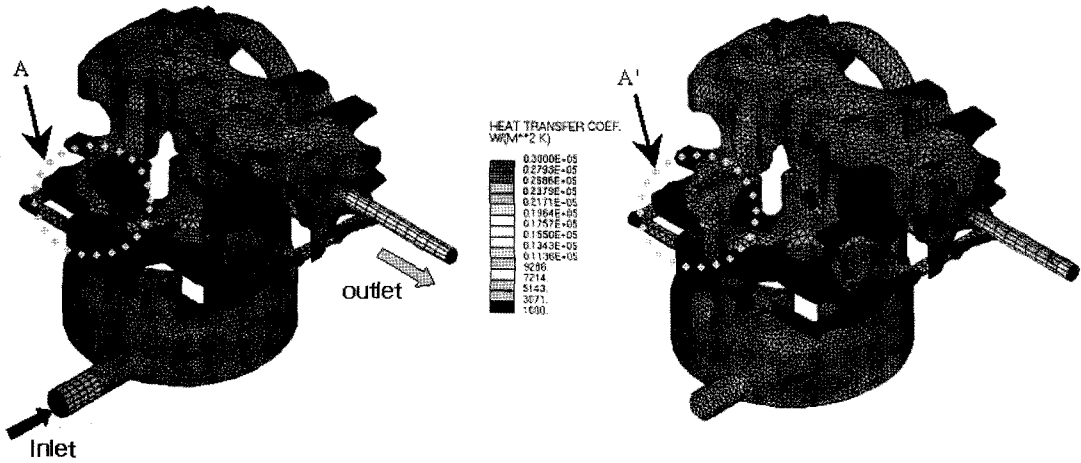


Fig. 11 Comparisons of the predicted heat transfer coefficient without/with nucleate boiling conditions

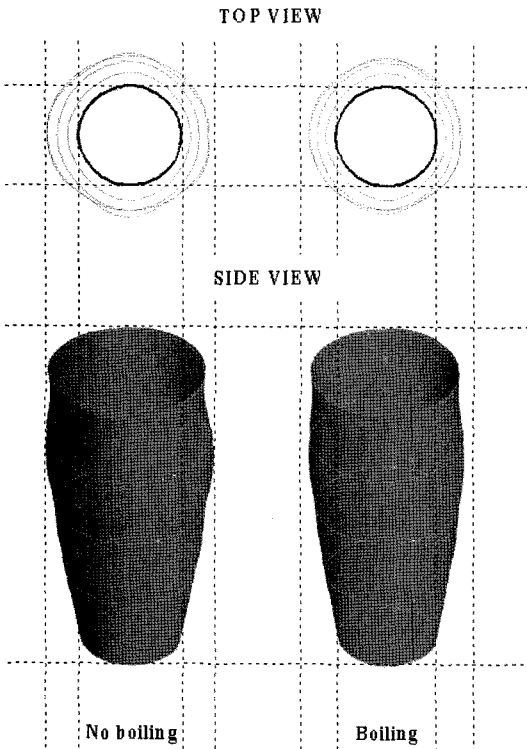


Fig. 12 Liner deformation by thermal stress : scale  $\times 200$

는 영향을 확인하였다.

2) 냉각수로 유동 및 복합 열전달 해석을 통하여 엔진 요소들의 온도장을 예측하였고, 기존의 CFD 해석 결과의 FE 해석 조건으로의 Mapping 과정 없이 열응력 해석할 수 있는 기법을 제시하였다.

## 후 기

본 연구는 자동차 기반기술개발사업 중 예혼합압 축착화 연소엔진의 기반 및 실용화 기술개발과제의 지원을 받아 진행되었습니다. 감사를 드립니다.

## References

- 1) N. Hur, S. Y. Yoon, W. K. Cho and K. H. Kim, "A Numerical Simulation of Flows in an Engine Cooling Passage," Transactions of KSAE, Vol.1, No.1, pp.32-40, 1993.
- 2) D. K. Lee, K. S. Lee and J. H. Lee, "Numerical Analysis of 3-D Flow Filed in the Engine Block Coolant Passage," Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.134-152, 1999.
- 3) K. U. Baek, B. H. Lee, S. H. Lee and N. H. Cho, "CFD Simulation of Coolant Flow in a Large Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.270-274, 1999.
- 4) N. H. Cho, S. U. Lee, S. K. Lee and S. H. Lee, "Finite Element Analysis of Thermal Fatigue Safety for a Heavy-Duty Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.122-129, 2004.
- 5) T. Bo, "CFD Homogeneous Mixing Flow Modeling to Simulate Subcooled Nucleate Boiling Flow," SAE 2004-01-1512, 2004.
- 6) R. Stone, Introduction to Internal Combustion

- Engines, MACMILLAN, pp.442-448, 1992.
- 7) K. Robinson, IC Engine Coolant Heat Transfer Studies, Ph. D. Dissertation, University of Bath, UK, 2001.
  - 8) K. Alshamani, "A Comparison of the Hydraulic Performance of Ethylene Glycol and Propylene Glycol Aqueous Solutions as Automotive Coolants," SAE 2001-01-1730, 2001.
  - 9) [http://www.engineeringtoolbox.com/24\\_146.html](http://www.engineeringtoolbox.com/24_146.html)
  - 10) N. A. F Campbell, D. G. Tilley and S. A. MacGregor, L. Wong, "Incorporating Nucleate Boiling in a Precision Cooling Strategy for Combustion Engines," SAE 971791, 1997.
  - 11) S. G. Kandlikar, "Heat Transfer Characteristics in Partial Boiling, Fully Developed Boiling, and Significant Void Flow Regions of Sub-cooled Flow Boiling," Journal of Heat Transfer, Vol.120, pp.395-401, 1998.
  - 12) F. Maassen, F. Koch, M. Schwaderlapp, T. Ortjohann and J. Dohmen, "Analytical and Empirical Method for Optimization of Cylinder Liner Bore Distortion," SAE 2001-0-0569, 2001.
  - 13) A. P. Kleemann, P. Menegazzi, S. Henriot and A. Marchal, "Numerical Study on Knock for an SI Engine by Thermally Coupling Combustion Chamber and Cooling Circuit Simulations," SAE 2003-01-0563, 2003.