

# 선박용 대형 디젤 엔진 열 해석을 위한 CFD-FEM 연계 방법의 적용

김 한 상 · 민 경 덕\*

서울대학교 기계항공공학부

## Application of CFD-FEM Coupling Methodology to Thermal Analysis on the Large-size Marine Diesel Engine

Han-Sang Kim · Kyoungdoug Min\*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 18 April 2007 / Accepted 6 August 2007)

**Abstract** : Temperatures of engine head and liner depend on many factors such as spray and combustion process, coolant passage flow and engine related structures. To estimate the temperature distribution of engine structure, multi-dimensional computational fluid dynamics (CFD) codes have been mainly adopted. In this case, it is of great importance to obtain the realistic wall temperature distribution of entire engine structure. In the present work, a CFD-FEM coupling methodology was presented to address this demand. This approach was applied to a real large-size marine diesel engine. CFD combustion and coolant flow simulations were coupled to FEM temperature analysis. Wall heat flux and wall temperature data were interfaced between combustion simulation and solid component temperature analysis via translator by a commercial CFD package named FIRE by AVL. Heat transfer coefficient and surface temperature data were exchanged and mapped between coolant flow simulation and FEM temperature analysis. Results indicate that there exists the optimum cell thickness near combustion chamber wall to reasonably predict the wall heat flux during combustion period. The present study also shows that the effect of cell refining on predicting in-cylinder pressure during combustion is negligible. Hence, the basic guidance on obtaining the wall heat flux needed for the reasonable CFD-FEM coupling analysis has been established. It is expected that this coupling methodology is a robust tool for practical engine design and can be applied to further assessment of the temperature distribution of other engine components.

**Key words** : Combustion process(연소 과정), Coolant passage(냉각수 유로), Temperature distribution(온도 분포), Coupling methodology(연계 방법), Diesel engine(디젤 엔진), Wall heat flux(벽면 열 유속)

### Nomenclature

$h_c$  : heat transfer coefficient of coolant, W/m<sup>2</sup>K

$T_c$  : coolant temperature, K

$T_s$  : solid wall temperature, K

$T_{wall}$  : wall temperature, K

$q_{wall}$  : wall heat flux, W/m<sup>2</sup>

### Subscripts

c : coolant

s : solid

\*Corresponding author, E-mail: kdmin@snu.ac.kr

### 1. 서론

열기관으로서 열효율이 우수하고, 부분 부하에서도 열효율이 높고, 고출력을 요하는 연속 운전에서도 높은 신뢰성을 가지며, 초 저질유 혹은 가스 연료까지 다양한 연료의 적용이 가능하여, 선박 추진 기관으로서 디젤 기관의 우위는 앞으로도 지속되리라 예상할 수 있다.

다른 엔진과 마찬가지로 선박용 디젤 엔진의 경우도 엔진 자체의 무게 저감과 연료 경제성의 개선은 출력 밀도와 최고 출력의 향상을 위한 필수적인 과제로 이에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그렇지만, 출력 밀도의 향상은 다수의 설계 조건에 의하여 제약을 받는데, 그 중 가장 중요한 인자는 엔진 구성 요소들의 온도 분포이다.<sup>1)</sup> 특히 선박용 디젤 엔진 설계 시 큰 문제점은 작동 영역이 고온이므로, 구성 부품들의 열적 내구성이 약해지며, 이는 재료의 열팽창, 열변형을 수반하여 엔진 성능 및 진동 문제에 영향을 미치는 물론이고 엔진 자체의 내구성에 심각한 영향을 미치는 것이다. 예를 들어, 연료 분무에 이용되는 atomizer의 크랙(crack) 현상, 실린더 라이너(liner)의 scuffing 현상 등이 대표적인 예이다. 이런 현상들을 파악, 개선하기 위해서는 연소실 및 관련 부품들의 온도 해석 및 측정이 필수적인데, 온도의 측정만으로는 자세한 온도 분포의 파악에는 큰 한계가 있으므로, 체계적인 해석법의 구축을 통한 온도 데이터의 확보가 필요하다.

따라서 최근에는 CFD를 이용한 다차원 해석이 온도 분포 예측에 많이 적용되는 추세이다. 온도 분포 해석의 신뢰도 확보를 위해서는 정확한 벽 경계 조건의 지정이 매우 중요한데, CFD 해석만으로는 타당한 벽면 경계 조건 지정이 실질적으로 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 보다 정확한 벽 경계 조건 지정을 통한 신뢰성 높은 결과를 얻기 위해서는 CFD-FEM 연계(coupling) 해석이 필요하다.

본 연구에서는 선박용 저속 엔진의 연소실과 관련 구조물들의 온도 분포에 관한 신뢰도 높은 데이터를 확보하기 위한 일환으로 CFD-FEM 연계 해석 방법을 정립하였다. 그리고, 이를 선박용 디젤 엔진 실린더 커버(cover) 및 라이너(liner), 냉각

수 유로에 적용하여 AVL사의 상용 CFD 해석 코드인 FIRE를 이용한 연소 해석, 냉각수 유로 해석과 FEM을 이용한 실린더 커버 및 라이너 온도 분포 해석을 수행하였고, CFD 해석 결과를 검토, 제시하였다.

### 2. CFD-FEM 연계 해석 방법

#### 2.1 연계 해석법의 개요

CFD-FEM 연계 해석은 보다 정확한 벽 경계 조건을 지정하기 위한 효과적인 방법으로 인식되어 최근 많이 적용되는 추세이다. 본 연구에서는 CFD-FEM 연계 해석 개념을 선박용 대형 디젤 엔진의 연소 해석과 냉각수 유동 분포 해석에 각각 적용하였다.

첫째, 연소 해석과 FEM 온도 분포 해석 간 연계 해석 과정을 Fig. 1에 정리하여 나타내었다. CFD를 이용한 타당한 연소 해석을 위해서는 연소실 벽 온도( $T_{wall}$ ) 분포가 경계 조건으로 제공되어야 하고, FEM 온도 분포 해석을 위해서는 연소실 벽면 열 유속( $q_{wall}$ )의 지정이 필수적이다. 즉, FEM 해석의 결과인 구조물의 표면 온도 분포가 CFD 연소 해석에서는 경계 조건이 되고, CFD 연소 해석의 결과인 벽면 열 유속은 FEM 해석의 경계 조건이 되므로 연계 해석이 필요함을 알 수 있다.

그런데, FEM 온도 분포 해석은 정상 상태 해석인데 반하여, CFD 연소 해석은 비정상 상태 해석이므로 시간에 따른 혹은 크랭크 각에 따른 열 유속을 얻을 수 있다. 이러한 열 유속을 정상 상태의 FEM 온

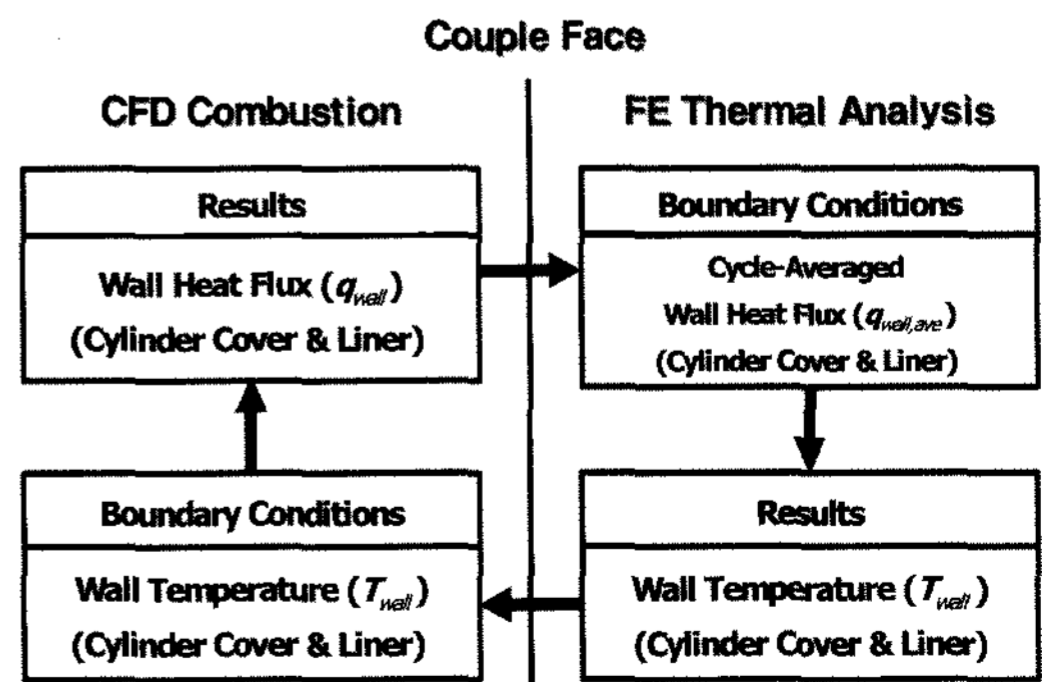


Fig. 1 Diagram of coupling process between CFD combustion simulation and FEM thermal analysis

도 분포 해석에 경계 조건으로 제공하기 위해서는 시간에 따른 벽면 열 유속의 평균값을 계산해야만 한다. 특히, 엔진 내 CFD 유동 및 연소 해석의 경우, 밸브 및 피스톤의 움직임을 모두 포함하므로 경계 조건 교환 과정은 매우 복잡해진다.<sup>2)</sup>

둘째, 냉각수 유로 온도 분포 해석과 FEM 온도 분포 해석 간 연계 해석 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 냉각수 유로 CFD 해석은 경계 조건으로 냉각수에 접하는 고체 벽 온도( $T_s$ )의 제공이 필수적이다. 반면, FEM 온도 분포 해석은 경계 조건으로 냉각수 열 전달 계수( $h_c$ )와 고체 벽에 접하는 냉각수 온도( $T_c$ )의 제공이 필수적이다.

### 2.2 연계 해석 데이터 인터페이스

CFD와 FEM 해석 간 연계 해석을 위해서는 두 해석 간 공유하는 경계면에서의 데이터 교환이 필수적인데, 이를 위해서는 CFD 및 FEM 해석에서 사용된 격자의 공유 경계에 해당하는 격자점에서의 값들을 타 해석의 경계 조건으로 사용 가능하게 하는 데이터 인터페이스(interface)가 필요하다. 데이터 인터페이스는 CFD와 FEM 해석의 격자수와 형태가 서로 다르므로 일종의 translator 역할을 할 수 있어야 하며 격자점에서의 값들을 보간하는 기능도 수행하여야 한다. Fig. 3에 CFD와 FEM 해석 격자 간 데이터의 교환을 위한 보간 개념을 간단히 제시하였다. 본 연구에서는 FIRE에서 제공되는 translator를 이용하여 두 해석 간 경계 데이터를 교환하였다.

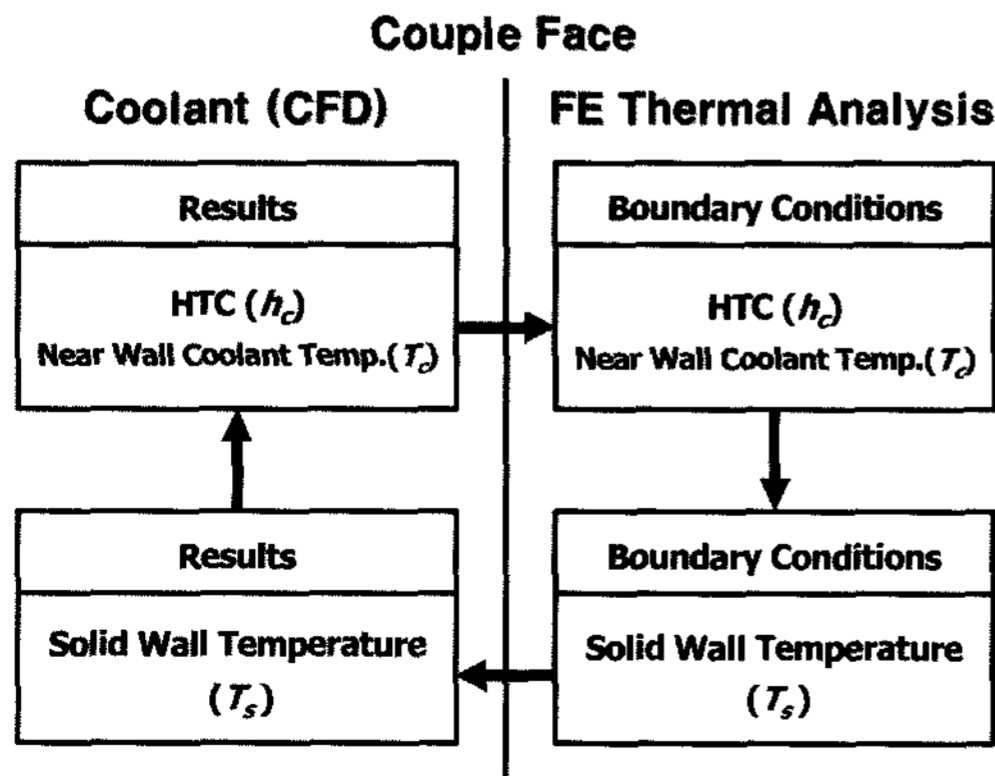


Fig. 2 Diagram of coupling process between CFD coolant analysis and FEM thermal analysis

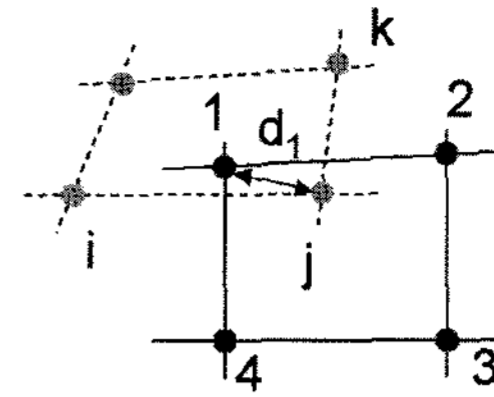


Fig. 3 Boundary data interpolation between CFD mesh and FEM mesh (by AVL)

## 3. CFD를 이용한 엔진 온도 분포 해석

### 3.1 연소실 내 분무 및 연소 해석

#### 3.1.1 엔진 제원 및 해석 격자

해석 대상은 선박용 저속 대형 디젤 엔진 실린더 커버 및 라이너이며 관련 제원은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 분무 및 연소 해석을 수행하기 위한 격자를 생성하였으며, 격자 set을 Fig. 4에 나타내었다. 대형 선박용 엔진의 경우, 보어(bore)의 크기가 크므로 매우 많은 수의 해석 격자가 필요하지만, 해석 격자의 수는 해석 소요 시간과 정확도 등을 감안하여 적절하게 선정되었다. 총 해석 격자의 수는 EVC(Exhaust Valve Closing) 조건의 경우 493,286 개이고, TDC에서는 164,435개이다.

#### 3.1.2 분무, 자발화 및 연소 모델

해석 대상 엔진의 경우 5개의 분사 홀을 가진 atomizer가 120° 간격으로 총 3개가 배치되어 있다.

Table 1 Engine specifications and operating conditions

Engine	Low speed marine diesel engine
Bore (mm)	900
Stroke (mm)	2300
Compression ratio	16.8
Engine speed (rpm)	104
Load (%)	100

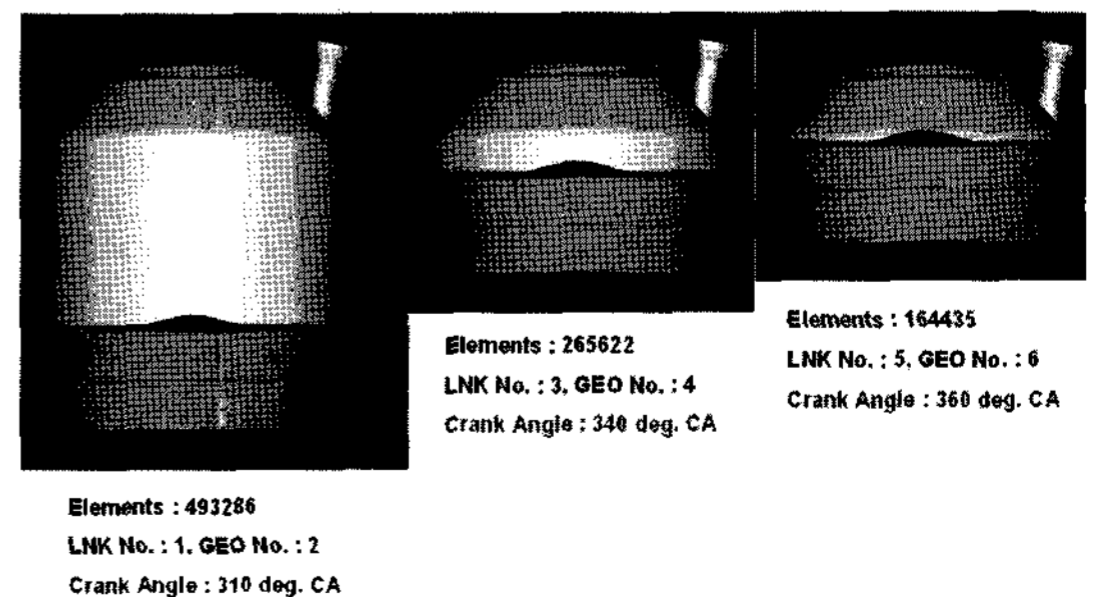


Fig. 4 Computational mesh sets for moving piston simulation

분무의 시작은 1 ATDC deg이며, 17.3 deg. 동안 지속된다. 분사되는 연료량은 1 홀 당 엔진 1 회전 당 8.7733 g으로 지정하였다. 본 해석에서는 디젤 엔진 해석에 널리 적용되고 있는 shell 모델을 이용, 자발화 과정을 모델링하였으며, 선박용 저속 디젤 엔진의 연소 과정을 디젤 엔진 연소에 준한다고 보고 연소 특성 모사를 위해 Eddy-Break Up<sup>3)</sup> 모델을 사용하였다.

### 3.1.3 계산 수행 과정

배기 포트가 닫힌 시점(EVC)부터 계산을 시작하였다. 소기 포트에 의한 유동을 근사적으로 고려하기 위해 초기의 유동 형태를 스월(swirl) 유동으로 가정하고, 스월 비(swirl ratio)를 지정하였다. 초기 난류 운동 에너지는 평균 피스톤 속도에 의한 운동 에너지의 10%로 지정하여 계산을 수행하였다.

실린더 커버, 라이너, 피스톤 등 연소 관련 주요 구조물의 온도 경계 조건은 경계를 분할한 후 측정 데이터를 참고하여 지정하였다. 해석은 EVC부터 EOC(End of Combustion)까지 수행되었다. 피스톤의 움직임을 포함하는 분무 및 연소 해석의 경우, 해의 정확도 유지를 위하여 시간 간격을 가급적 작게 유지하는 것이 바람직하다. 더욱이 선박용 저속 엔진의 경우 회전수가 자동차용 엔진의 약 1/10이므로, 1 deg. 당 시간 간격은 그에 반비례하여 증가한다. 따라서 해의 정확도와 효율성 등을 모두 감안하여 실린더 내 유동 해석에서는 0.1-0.2 deg. 간격, 분무와 연소 해석에서는 0.05-0.1 deg. 간격으로 계산을 수행하였다.

## 3.2 냉각수 유로 유동 분포 해석

선박용 엔진의 내구성 예측 및 개선을 위해 엔진에 가해지는 열적, 기계적 부하를 효과적으로 파악하기 위한 방법 중 하나가 엔진 주요 구조물들의 금속면 온도를 예측하는 것인데, 이를 위해서는 금속면 온도에 직접적 영향을 미치는 냉각수 온도 분포 파악이 필수적이다.

### 3.2.1 해석 격자

대개의 경우 엔진 냉각수 유로는 복잡한 형상 때문에 자동 격자를 생성한다. 자동 격자 생성법을 이용하면 본 연구의 냉각수 유로의 형상이 복잡하고

크기가 매우 크므로 불가피하게 많은 수의 격자가 생성된다. 특히, 냉각수 유로에 다수의 branch 형상이 존재하므로, 격자 수 증가를 최대한 억제하면서 이를 고려한 타당한 유동 해석을 위한 격자 지정을 위하여 블록(block) 격자 생성기인 ICEM-CFD HEXA를 이용하여 격자를 생성하였다. Fig. 5에 냉각수 유로 해석용 격자를 나타내었다.

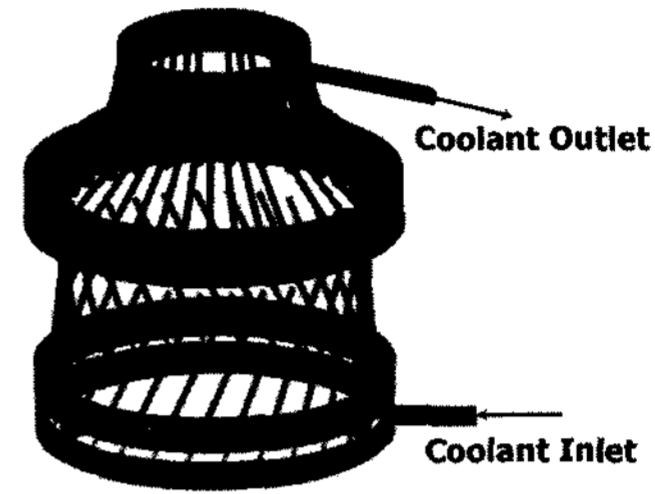


Fig. 5 Computational mesh of coolant passages used for this study

### 3.2.2 해석 과정 및 경계 조건

냉각수 온도 분포 해석은 정상 상태 해석으로, 입구 경계 조건으로 냉각수 유량(36.25 m<sup>3</sup>/h), 압력(2.894 bar), 온도(75°C) 등을 지정하였다. 벽 온도 경계 조건은 축 방향으로 온도를 다르게 지정하였다. FEM 해석과의 연계를 위해 연계되는 면만 따로 지정하여 놓고, 나머지 연계되지 않는 접합면들은 이전에 지정한 값들을 그대로 이용하였다. 연계되는 면의 온도 및 열전달 계수 값들은 FIRE 코드 수행 시 사용자 지정 함수(user function)를 통해 각 절점(node)별로 입력되어 이용되며 연계 과정의 진행에 따라 각 절점에서의 값은 계속 수정(update)된다.

## 4. 해석 결과

### 4.1 연소 해석 결과

#### 4.1.1 연계 해석을 적용한 벽면 열 유속 해석

연소실 내 온도 분포 해석의 신뢰도 확보를 위해서는 연소 과정 중 연소실 벽으로의 열 유속을 정확히 예측하는 것이 요구된다.

그런데, 기존의 벽 법칙(law of wall)을 이용하는 상용 CFD 코드를 적용한 해석 수행의 경우 열 유속 예측의 정확도 확보를 위해서는 벽에 접하는 셀의 수직 간격을 적절히 유지하여야 한다.<sup>4)</sup> 그러므로,

벽으로부터 어느 정도의 셀 크기(벽으로부터의 수직 거리)를 유지하여야 해석의 신뢰도를 실용적 측면에서 확보할 수 있는지를 파악하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서 초기에 적용된 연소 해석용 격자의 벽 근처 셀 크기는 약 2.2-2.5 mm이지만, 초기에 적용된 벽 근처 셀 크기가 해석의 신뢰성 확보 측면에서 적절한 것인지를 검토하기 위하여 벽 근처의 셀 크기를 6 mm로부터 3, 2, 0.5, 0.25 mm로 각각 변화시켜 격자를 생성하고 연소 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 벽 근처 셀 크기에 따른 실린더 라이너 벽에서의 면적 평균 열 유속을 크랭크 각에 따라 나타낸 것이다. 벽 근처에서의 셀 크기가 작을수록 평균 열 유속은 증가함을 알 수 있으나, 두께 0.5 mm인 경우부터는 증가 폭이 크게 줄어들어 두께 0.25 mm인 경우와 비교하면 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 계산 수행 시간과 정확도를 모두 고려할 때, 벽 근처 셀 크기를 0.5 mm로 설정하는 것이 적합할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 초기에 적용된 연소 해석용 격자의 벽 근처 셀 크기(약 2.2-2.5 mm)의 약 1/4로 세분화된 0.5-0.6 mm의 수정된 격자를 생성하여 해석에 적용, 연소실 혹은 실린더 라이너 벽에서의 열 유속 계산 시 신뢰도를 확보하였다.

기존 격자(Base Mesh)와 세분화된 격자(Refined Mesh)를 적용한 해석에 대한 연소 압력 비교가 Fig. 7에 제시되어 있다. 벽면 셀 크기에 따른 연소 압력 데이터를 비교, 분석해 본 결과 대형 엔진의 경우,

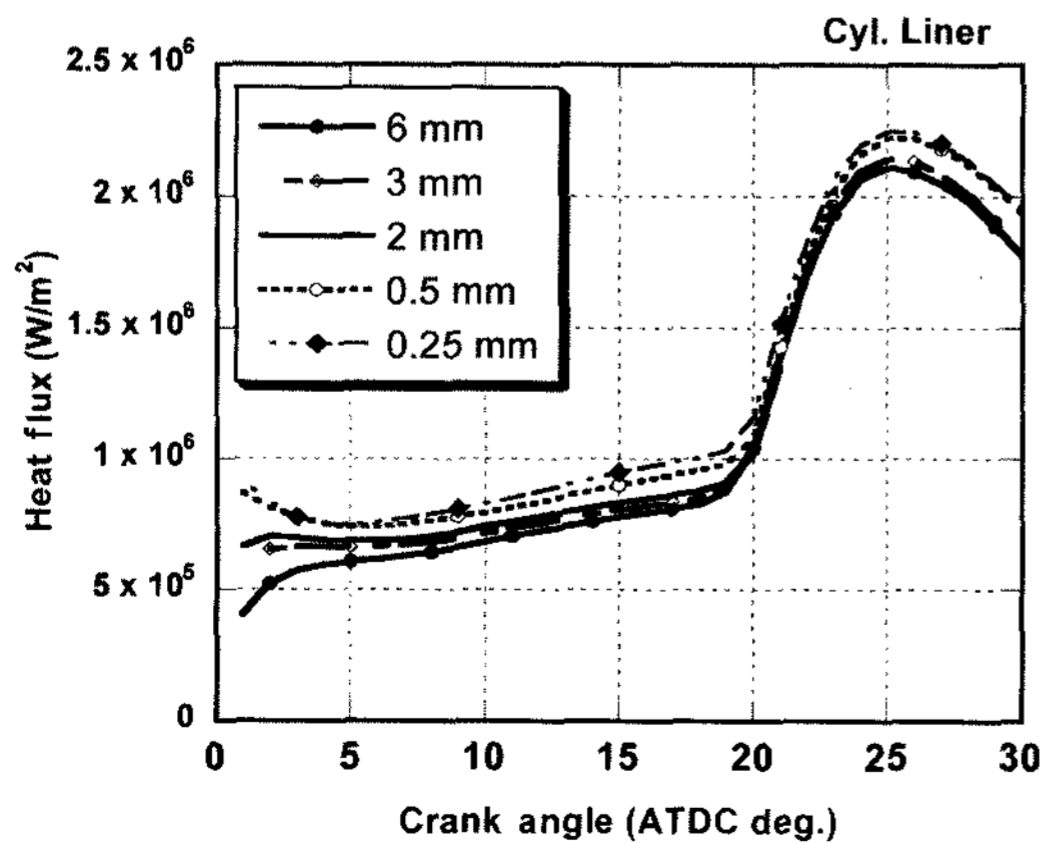


Fig. 6 Comparison of area averaged heat flux of cylinder liner for various wall refined meshes

벽면 근처 격자의 세분화 정도에 따라 연소 압력 예측에는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

또한, Fig. 7에서는 연소실 벽의 온도를 CFD-FEM 연계 해석으로부터 얻어진 평균 온도로 일정하게 지정(Wall Temp. = Constant)한 경우와 분할된 경계에 대하여 CFD-FEM 연계 해석으로부터 얻어진 벽 온도 분포를 각각 지정(Wall Temp. = Section Define)한 경우에 대한 압력 비교도 함께 나타내었다. 격자 세분화 정도와 마찬가지로 연소실 벽 온도의 지정 방식도 연소 압력 예측에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

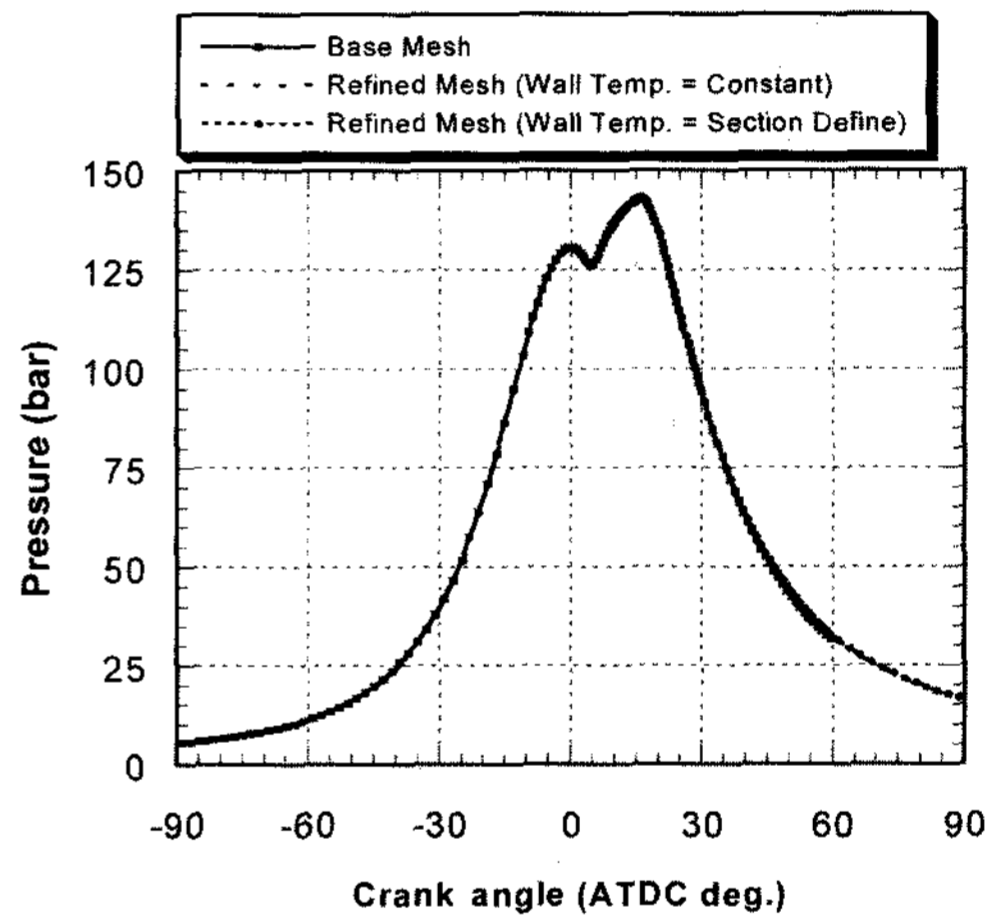


Fig. 7 In-cylinder pressure profiles for base and wall refined meshes

본 연구에서는 연소실 벽면 온도를 분할된 구간(section)별로 각각 다르게 지정하는 것이 물리적으로 보다 타당할 것으로 판단되어, 이 조건을 이용하여 해석을 수행하고 그 결과들을 비교하였다.

4.1.2 분무, 자발화 및 연소 해석

선박용 디젤 엔진의 TDC에서의 연소실 내의 압력 및 온도 분포는 가급적 정확히 계산되어야 한다. 왜냐 하면 연소 과정에서 연소실 내 압력을 타당하게 예측하기 위해 필요한 분무 및 연소 모델에 포함되어 있는 실험 상수들의 값을 선정하는 데 필수적이기 때문이다.

본 연구에서는 EVC에서의 연소실 내 압력 및 온도에 대한 실험 데이터를 이용하여 계산을 수행하는 방법(Calculation)과 TDC에서의 압력을 실험값과

Matching하여 계산을 수행하는 방법(Calculation (Tuned))의 2가지를 이용하여 해석을 진행하였고 그 결과를 Fig. 8에 정리하여 나타내었다.

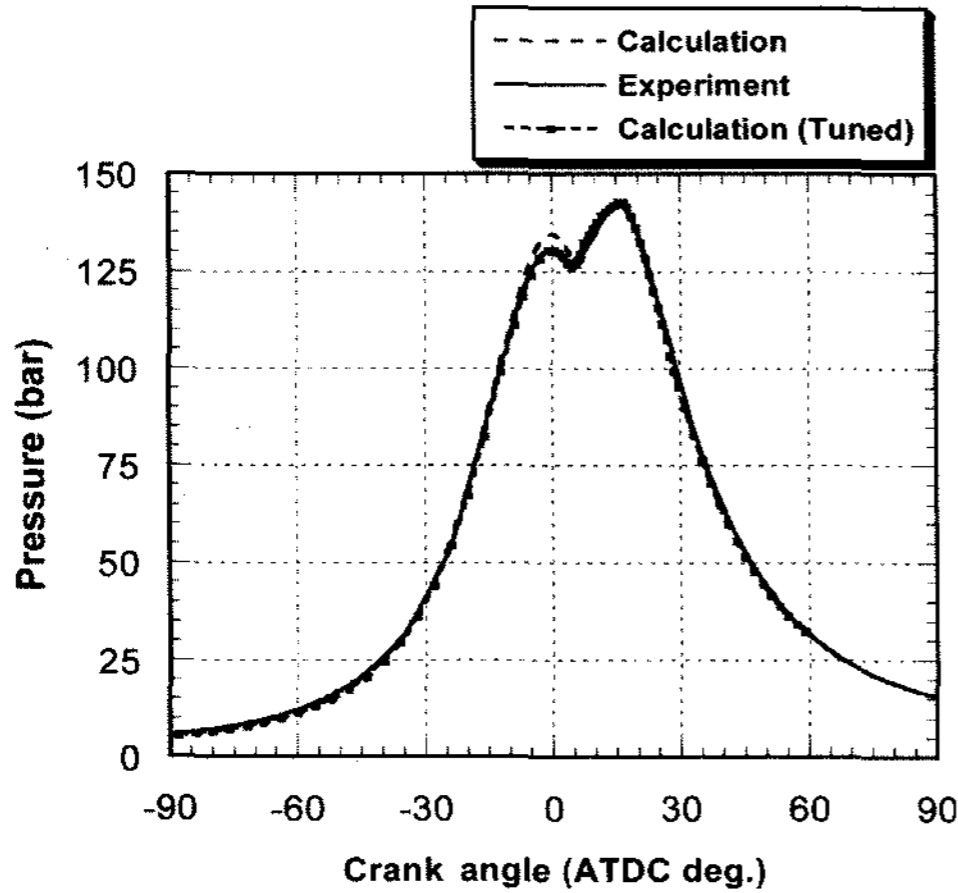


Fig. 8 Comparison of calculated in-cylinder pressure profile with measured

EVC에서 연소실 내 압력과 온도에 대한 실험 데이터를 이용하여 압축 과정 해석을 수행한 경우, TDC에서의 압력은 계산 값이 측정된 값보다 크고 이후 분무 및 연소 모델을 적용한 해석에서도 실험 값에 비해서는 연소 과정 초기에 다소 높은 압력이 얻어짐을 알 수 있다. 이는 선박용 디젤 엔진과 같은 대형 엔진의 경우 실제 작동 시 압축 과정 중 발생하는 blow-by의 영향이 소형 엔진에 비해 상대적으로 큰 영향을 미치지만 해석에서는 포함되지 않았기 때문으로 생각된다. EVC에서의 압력 조정에 의해 압축 과정 해석을 반복 수행하여 TDC에서의 압력을 실험값과 거의 일치되도록 한 경우는 연소 과정에서도 실험값과 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 냉각 유로 열전달 계수와 온도 분포

Fig. 9는 냉각수 해석에서 얻어진 열전달 계수와 벽면 근처 냉각수 온도 분포를 FEM 해석 격자에 mapping한 결과를 나타내고 있다.

연계 해석에서 열전달 계수 분포는 FEM 온도 분포 해석의 경계 조건으로 이용되는데, 효과적인 데이터 교환이 이루어짐을 알 수 있다. 해석을 통해 얻어진 냉각수 유로 열전달 계수와 온도 분포를 Fig.

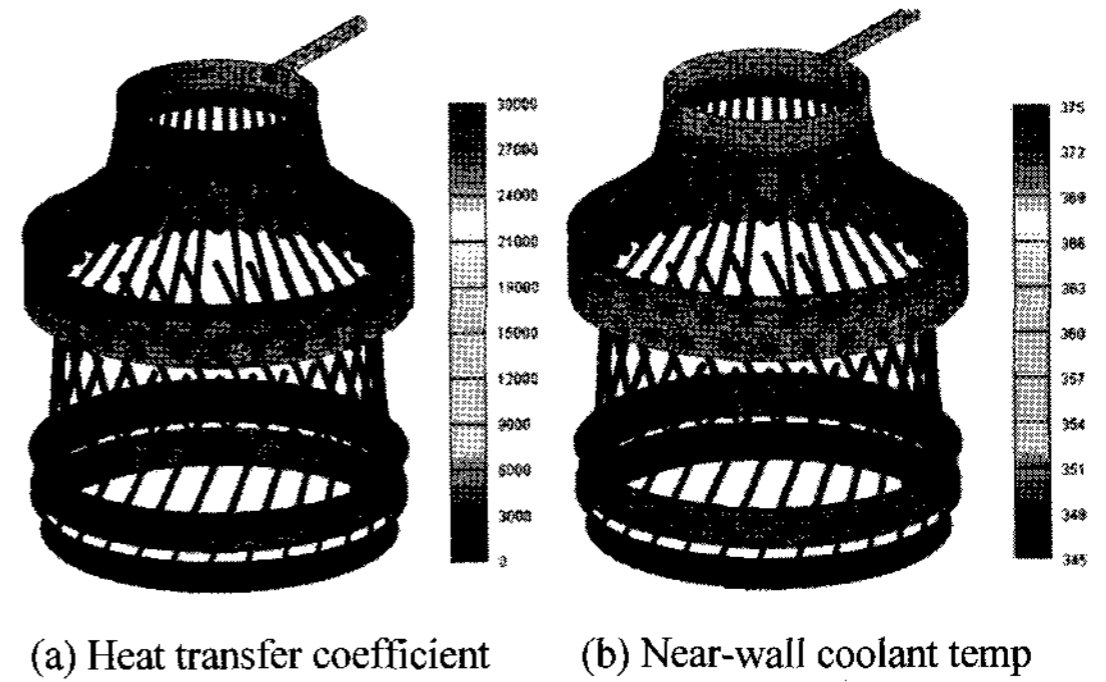


Fig. 9 Mapped values into FEM shell face for coupling analysis

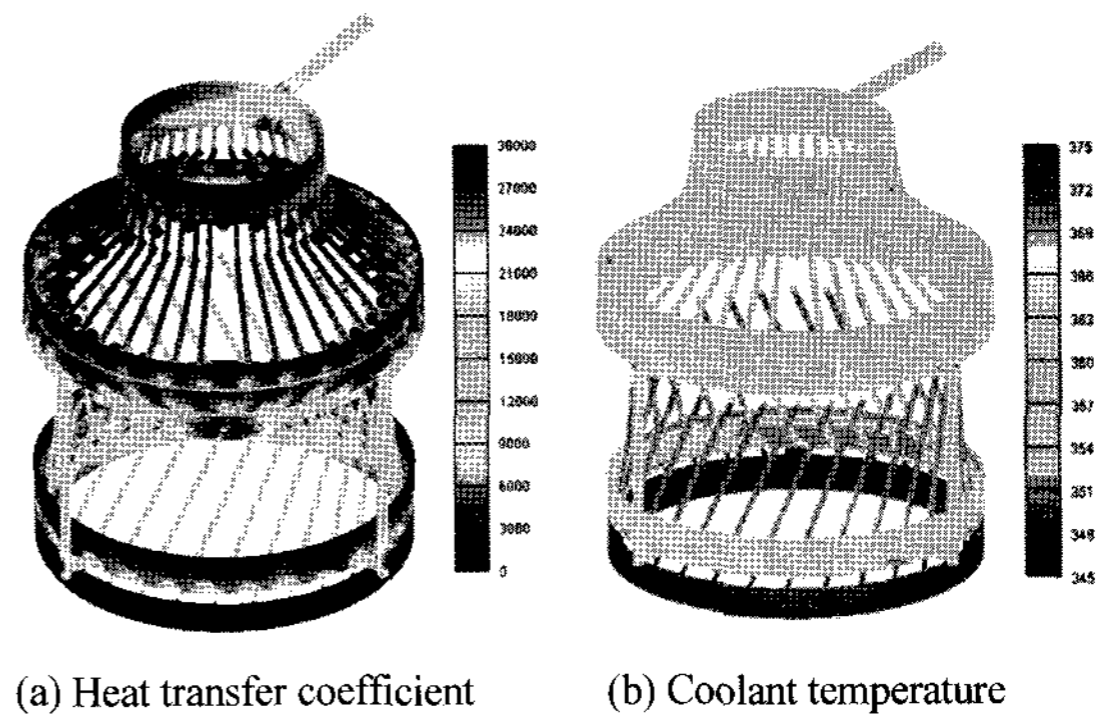


Fig. 10 Calculated heat transfer coefficient and coolant temperature distributions for coolant passage

10에 나타내었다. 열전달 계수는 일부분을 제외하고는 약 4000-10000 W/m<sup>2</sup>의 범위에 있음을 알 수 있다. 열전달 계수가 큰 부분은 유동 속도가 증가하는 부분과 거의 일치하는 경향인데, 이는 유동 속도를 국부적으로 감소시키는 재순환 영역을 작게 하는 것이 냉각 성능 개선에 매우 효과적임을 나타낸다. 냉각 시스템의 과열 혹은 과냉 정도를 평가할 수 있는 냉각수 온도 분포는 전체적으로 커버 위쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보이는데, 이는 위쪽으로 갈수록 연소에 의한 열 유속이 벽면에 크게 영향을 미치기 때문이다.

본 연구에서는 해석 결과의 검증용으로 측정된 냉각수 출구 온도를 사용하였다. 연계 해석을 통해 수렴되어 얻어진 냉각수 출구 온도는 84.3°C로 측정값 82°C와 상대 오차 3%로 일치함을 알 수 있다.

예측된 출구 온도의 경우, 측정값과 다소 차이가 나타나는데, 이는 다음과 같이 분석할 수 있다.

냉각수 유동을 정확히 예측하기 위해서는 벽 근처에서 매우 조밀한 격자를 이용한 벽 경계층과 표면 거칠기에 대한 효과적인 모델링이 요구되는데, 냉각수 유로의 물리적인 크기가 큰 관계로 격자 수 증가에 따른 컴퓨터 계산 속도의 제한으로 정확도 향상에 여전히 한계가 존재하기 때문이다.

따라서 해석의 정확도를 보다 향상시키기 위해서는 조밀한 격자를 적용하고 냉각수 유로의 모든 경계에 대한 연계 해석을 적용할 필요가 있을 것으로 생각된다. 또한, 벽 근처에서의 냉각수 온도 구배 및 온도 변화에 따른 냉각수의 물성치 변화를 모사하여 벽 근처에서의 갑작스런 표면 가열에 의한 점도의 감소 효과 등도 추가 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.<sup>9)</sup>

## 5. 결론

선박용 대형 디젤 엔진 연소실 및 관련 구조물의 온도 분포 예측을 위하여 CFD-FEM 연계 해석을 적용한 분무, 연소 해석 및 냉각수 유로 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 벽면 셀 분할을 통한 민감도 해석을 수행한 결과, 벽면 열 유속의 정확한 예측을 위해서는 벽면 근처의 셀 두께를 0.5 mm로 선정하는 것이 적절하며 벽면 셀 분할은 연소 압력 예측에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.
- 2) 연소 해석 결과의 신뢰도 검증을 위해 실험값과 비교한 결과, TDC에서의 실린더 내 압력은 거의 일치하고(0.02% 차이), 연소 최고 압력은 0.2% 내로 일치하는 결과를 얻었다. 이를 통해 FEM 온도 해석을 위해 요구되는 연소 과정 중 벽면 열 유속을 정확히 예측할 수 있는 기초를 마련하였다.
- 3) CFD 연소 해석과 FEM 열전달 해석 사이의 연계를 위해 비정상 해석으로 계산된 연소 해석 결과의 평균값을 계산하여 FEM 온도 해석의 입력으로 사용하였다. 또한, FEM 온도 해석의 결과로 주어지는 온도 경계 조건을 각 표면에서의 평균 온도를 계산하여 CFD 해석의 경계 조건으로 제공

하였다. 이를 통하여 CFD-FEM 해석 간 경계 데이터의 공유 및 교환을 가능하게 하는 연계 해석 기법을 확립하여 연소실 구조물 표면 온도를 보다 신뢰도 높게 예측할 수 있는 기반을 마련하였다.

## 후 기

본 연구는 두산엔진(주)에서 지원한 연구과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 본 연구의 진행을 위한 FIRE 코드 사용에 조언을 주신 AVL Korea 관계자들에게도 감사드립니다.

## References

- 1) J. Xin, S. Shih, E. Itano and Y. Maeda, "Integration of 3D Combustion Simulations and Conjugate Heat Transfer Analysis to Quantitatively Evaluate Component Temperatures," SAE 2003-01-3128, 2003.
- 2) K. J. Wieser and A. O. Ennemoser, "3D-CFD Diesel Combustion and Accurate Heat Transfer Modeling for Diesel Engines," THIESEL 2002 Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, pp.445-454, 2002.
- 3) B. F. Magnussen and B. W. Hjertager, "On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow," 19th AIAA Aerospace Meeting, St. Louis, U.S.A., 1981.
- 4) Zhiyu Han and Rolf D. Reitz, "A Temperature Wall Function Formulation for Variable-Density Turbulent Flows with Application to Engine Convective Heat Transfer Modeling," Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.40, No.3, pp.613-625, 1997.
- 5) K. Robinson, J. G. Hawley, G. P. Hammond and N. J. Owen, "Convective Coolant Heat Transfer in Internal Combustion Engines," Journal of Automobile Engineering, Institution of Mechanical Engineers, Vol.217, pp.133-146, 2003.