

# LHR 엔진 설계를 위한 엔진 사이클 시뮬레이션 및 FEM 검증 Engine Cycle Simulation and FEM Validation for LHR Engine Design

이교승 · 백문열

K. S. Lee and M. Y. Baek

**Key Words** : Cycle Simulation(사이클 시뮬레이션), LHR Engine(저열손실 엔진), FEM(유한요소법), Quartz(수정)

**Abstract** : It has been an earnest wish for engineers to convert heat loss from engine into power, but it is almost impossible in actual application. The serious problem in engine operation without cooling is that the cylinder material is sometimes melted by exceeding melting temperature. Following the first law of thermodynamics, it is possible that heat loss to cooling water can be converted into mechanical work through crankshaft. In this study, LHR(Low Heat Rejection) engine coated with zirconia and made by quartz was introduced as one of the promising engine and several useful qualitative and quantitative data were drawn.

## 1. 서 론

엔진의 연소효율은 30-40% 정도로 공급된 에너지의 상당부분이 동력발생을 위한 유용한 일로 바뀌지 못한 채 소산되는데, 최대부하 상태에서는 배출가스와 공기, 냉각오일 및 냉각수로의 열전달 형태로 그리고 부분부하 상태에서는 대부분이 냉각수로의 열전달 형태로 바뀌게 된다.<sup>1)</sup>

열역학 제1법칙에 의하면 냉각수로 방출된 열량을 크랭크축을 통한 유용한 일로의 변화가 가능하나, 과거 수십 년 동안에는 여러 가지 문제로 인하여 실제 적용이 거의 불가능하였다. 그 중 가장 큰 문제점은 적절한 열전달 없이 엔진을 운전할 경우, 연소실을 구성하고 있는 금속물질의 표면온도가 금속의 녹는점 이상 상승하기 때문에 엔진 전체가 망실되는 경우가 발생하기 때문이다. 그러나 이와 같은 문제는 세라믹 물질의 엔진적용과 함께 감소하게 되었으며, 최근에는 저열손실 엔진(LHR, Low Heat Rejection)이 관심의 대상으로 부상하게 되었다. 저열손실 엔진은 단열엔진(adiabatic engine)이라 불리어지기도 하는데, 실린더 냉각 열손실의 감소는 연소실 내부의 온도상승을 촉발하고, 비정상적인 연소노킹(knocking)은 연소실 온도가 상승함에 따라 빈번히 발생하므로 LHR 엔진의 개념을 HCSI

엔진(Homogeneous Charged Spark Ignition Engine)보다는 착화 지연 보상에 따른 효율상승을 도모할 수 있는 디젤엔진의 적용함이 보다 바람직하다고 할 수 있다.

LHR 디젤엔진의 주요 개념은 연소가스로부터 연소실 벽면으로 전달되는 대류열전달을 감소시키는 것이었으나 확산 연소기간(diffusion combustion period) 동안 발생하는 soot에 의한 복사열전달 역시 중요한 변수이다. 세라믹 재질의 엔진 적용에 관한 연구는 지난 10년간 많은 발전을 거듭해 왔으며 평균 피스톤 온도와 실린더 헤드 온도가 1100°C 이상 되는 LHR 디젤엔진도 가능하게 되었다.<sup>2)</sup> 세라믹 재질을 사용하는 엔진의 경우, 세라믹 재질로 헤드의 화염접촉면과 피스톤 크라운의 코팅을 하게 된다.

본 연구에서는 헤드와 피스톤에 지르코니아(zirconia)로 코팅한 LHR디젤엔진의 성능을 기존 엔진과 주어진 운전조건에서 비교하였고 가시화 및 여러 가지 연구목적으로 필요한, 실린더 라이너가 수정(quartz)으로 만들어진 LHR 디젤엔진의 설계 가능성을 고찰해보았다.

## 2. 엔진 시뮬레이션

본 연구에서 수행된 엔진성능 및 열전달특성 해석은 University of Michigan, ARC(Automotive Research Center)와 이교승이 공동 개발한 자연흡기식 DI 디젤엔진(Naturally Aspirated DI Diesel

접수일 : 2005년 3월 6일  
이교승(책임저자) : 경기공업대학 자동차과  
E-mail : leeks@kinst.ac.kr Tel : 031-4964-777  
백문열 : 경기공업대학 자동차과

Engine)용 사이클 시뮬레이션 프로그램을 수정 보완하여 사용하였으며, 엔진속도는 1500rpm이다.<sup>3)</sup> 엔진 연소 시뮬레이션 프로그램의 경우, 단일영역(one-zone), 2영역(two-zone)<sup>4)</sup>, 다영역(multi-zone)<sup>5)</sup> 및 다차원(multi-dimension) 프로그램이 있으나, 본 연구에서는 단순한 연소현상을 고려하기 위하여 보유하고 있는 상기 프로그램 중 제일 간단한 단일영역 모델을 사용하였다.

2.1 해석모델

해석대상은 기본엔진과 5개의 LHR 디젤엔진 모델로 분류되며, 상세한 재원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of simulation model

Model	description
baseline	DI, NA, 6 cylinder, watercooling displacement volume : 7500 cc 118(B) x 115(S) mm Comp. ratio : 17.5 Max. Torque : 475 Nm @1500 rpm Max. Power : 123 kW @2200 rpm
case01	Head & Piston : 0.5mm zirconia coating Liner : cast iron
case02	Head & Piston : 1.0mm zirconia coating Liner : cast iron
case03	Head & Piston : cast iron Liner : quartz
case04	Head & Piston : 0.5mm zirconia coating Liner : quartz
case05	Head & Piston : quartz Liner : quartz

2.2 엔진 시뮬레이션 프로그램의 구성 및 기본가정

엔진 시뮬레이션의 해석대상은 연소실과 흡·배기 매니폴드로 구성되며 설계변수와 운전조건에 따른 연소상태의 예측이 그 주된 목적이다. 엔진연소는 열역학적 해석과 열전달 해석이 동시에 이루어져야 하므로 질량유동과 에너지전달이 명확히 정의되어야 한다.

전체 프로그램은 질량보존식과 에너지보존식을 가스교환과정, 연소모델, 난류모델, 열전달모델 그리고 마찰모델에 적용하여 반복계산에 의해 미분방정식을 해결하는 방식이며, 기본가정은 다음과 같다.

(i) 실린더내부는 부피가 변화하는 검사체적으로 내부압력은 공간적으로 균일하게 분포되어 있고 누출이 없는 개방시스템이다.

(ii) 1000K 이하의 온도에서는 실린더내부의 내용물은 화학반응을 하지 않는 균질혼합 상태의 이상기체이고, 1000K 이상에서는 화학평형상태에 있는 기연가스 영역으로 취급하며, hydrocarbon-air 연소이론을 바탕으로 계산한다.

(iii) 흡기 및 배기밸브를 통과하는 질량유동은 준정상(quasi-steady), 단열, 1차원 유동이다.

(iv) 연소과정은 균일하게 분포된 열방출 과정으로 모델링하며 열방출률은 실험적으로 구한 연료연소율에 비례한다고 가정한다.

(v) 열전달은 강제대류열전달과 복사열전달로 나눌 수 있는데, 대류열전달의 경우, 난류 파이프 유동을 사용하며, 특성속도(characteristic velocity)를 정의하여 평균운동에너지와 난류운동에너지를 구한다. 복사열전달의 경우, 연소 및 팽창행정 동안만 고려한다.

(vi) 계산을 위한 초기값은 유사 연구 및 실험값을 바탕으로 사용하였으나, 본 엔진 시뮬레이션의 경우는 다영역모델과 달리 초기값이 수렴 및 수렴 속도에 미치는 영향은 거의 없다.

Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 프로그램의 흐름도를 도시하였다.

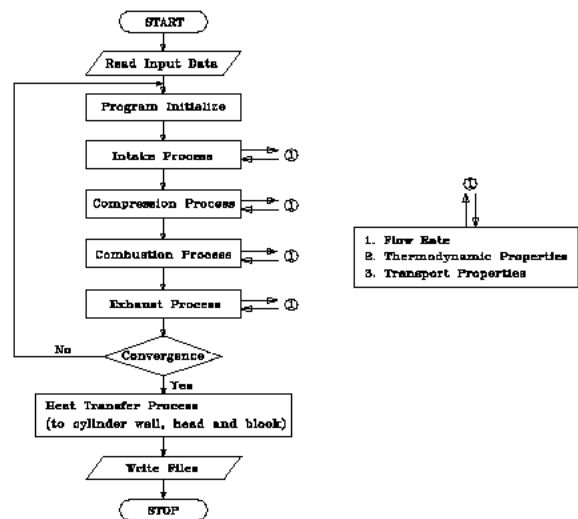


Fig. 1 Flowchart of engine cycle simulation

3. FEM 해석

최근 실린더 라이너를 수정(quartz)으로 만든 LHR 엔진의 시도가 빈번히 이루어지고 있으며, 미

쓰비씨 수정(quartz) 엔진의 경우 상당한 내구성을 겸비하고 있는 것으로 알려지고 있다. GM에서도 수정(quartz) 엔진에 대한 연구가 3년전부터 시작되어 활발히 진행 중이다. 수정(quartz)은 지르코니아(zirconia)와 같은 세라믹 재료와는 또 다른 형태의 단열물질로서 수정(quartz) 라이너는 오일 및 냉각수에 의한 엔진냉각이 필요 없다는 중요한 특성을 가지고 있다. 그러나 수정(quartz)으로 만들어진 실린더 라이너는 엔진운전 중 쉽게 부서지는데, 이는 수정(quartz)은 전통적인 엔진부품 재료인 주철(cast-iron)과는 전혀 다른 물질특성을 갖기 때문이다. 따라서 라이너 파손을 피하기 위해서는 수정(quartz) 라이너의 열 및 역학적 거동이 명확히 규명되어야 하고 이를 바탕으로 최적의 엔진구성이 이루어져야 한다.

3.1 FEM 모델

수정(quartz) 라이너의 3차원 모델은 높이 124.8mm, 두께 13.625mm, 안지름 92mm 그리고 바깥지름 119.25mm의 실린더 형으로서, 700개의 요소(element)로 직교좌표계를 사용하여 구성되었다. 경계조건으로는 실린더의 윗부분과 아랫부분에는 냉각수 조건을, 내부 표면은 마찰과 연소에 의한 조건을, 그리고 외부 표면은 주변 공기에 의한 강제대류 열전달 조건을 부여하였다. 구속조건으로는 실린더 윗면과 아랫면에서 실제 구속조건에 맞춰 변위를 고정하였다. 특히 연소실 내부의 연소열과 연소압력의 경우, 본 연구에서 수행된 엔진 사이클 시뮬레이션의 결과를 경계조건으로 사용하였다. 수정(quartz) 라이너의 물성치는 온도변화를 고려해 온도 종속적으로 주어졌으며 자세한 물성치를 Table 2에 나타내었다.

3.2 가정 및 경계조건

실제 엔진 운전 시, 엔진은 연소와 마찰로부터 유발된 열부하와 연소압력 및 클램핑힘(clamping force)에 의한 기계적 부하를 동시에 받게 되는데, 엔진에 영향을 미치는 전술된 부하들은 시간변화에 따라 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 따라서 FEM 해석을 통해 실제 엔진 운전조건을 명확히 기술하기 위해서는 몇 가지 이론적인 가정을 수반하게 되는데, 본 연구에서 사용된 가정은 다음과 같다.

첫째, 주어진 시간에서 엔진은 준정상상태(quasi-steady state)이다. 둘째, 열적 침투 깊이(thermal

penetration depth) 내로의 열 충격(thermal shock)은 무시한다. 셋째, 연소압력과 열유속은 시간에 대해 일정한 형태(profile)를 갖는 반면 라이너 길이방향으로는 변화한다. 넷째, 마찰에 의한 열원은 스텝 형태(stepwise function)로 주어진다. 또한 해석을 위한 경계조건을 살펴보면, 첫째 엔진 연소실로부터의 연소가스온도 및 압력은 엔진 시뮬레이션으로부터 구한다. 둘째 연소실내의 대류열전달계수 분포는 GM Motors의 실험값에 기초를 둔다.<sup>6)</sup> 셋째 실린더 위·아래 면에서의 냉각수 조건은 각각 90°C 및 30°C이고 외부는 강제대류 조건을 부여하였다. 넷째 응력 해석을 위하여 실린더 윗면과 아랫면의 일정 지점에 변위를 실험값을 바탕으로 고정하였다.<sup>6)</sup> 본 연구에서는 2종류의 범용 프로그램, HYPERMESH 3.0 (pre- and post-process)와 ABAQUS 5.8 (solver)을 사용하여 수정(quartz) 라이너의 온도분포 및 응력분포를 해석하였다.

Table 2 Material property of quartz liner

Density, $\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	2.2 x 10 <sup>3</sup>
Young's Modulus, E, [GPa]	70
Poisson's Ratio, $\nu$	0.17
Specific Heat, C <sub>p</sub> , [J/kg · K]	100°C 772
	500°C 964
	900°C 1052
Thermal Conductivity, $\kappa$ [W/m · K]	20°C 1.36
	100°C 1.46
	200°C 1.55
	300°C 1.67
	400°C 1.84
	950°C 2.88
Thermal Expansion Coeff., $\beta$ [1/K x 10 <sup>-7</sup> ]	100°C 5.1
	200°C 5.8
	300°C 5.9
	600°C 5.4
	900°C 4.8

4. 결 과

4.1 엔진 시뮬레이션 결과

Fig. 2에는 한 사이클 동안의 평균 당량비( $\Phi$ ) 변화를 도시하였다. 일반적인 경우, NA 엔진은  $0.2 \leq \Phi_{NA} \leq 0.7$  그리고 과급엔진은  $0.16 \leq \Phi_{TC} \leq 0.5$ 이다. 따라서 case05를 제외한 모든 경우에서 만족스러운 결과를 보이고 있다. Case05의 결과는 Table 3의 체적효율 결과와 비교해보면 원인을 분석할 수 있다.

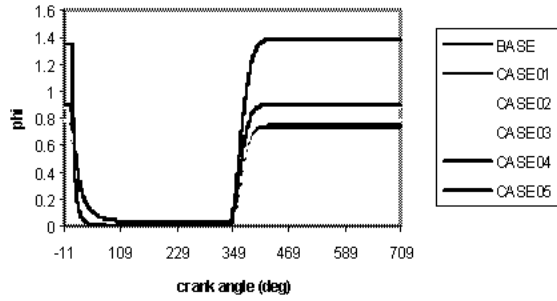


Fig. 2 In-cylinder mean equivalence ratio vs. crank angle

Table 3 Volumetric efficiency

Model	V.E.(%)
baseline	88.9
case01	86.8
case02	84.5
case03	74.4
case04	73.0
case05	46.3

체적효율은 세라믹 재질의 코팅이나 수정(quartz)의 삽입에 따라 감소하게 되는데 연소실을 모두 수정(quartz)으로 만든 case05는 연소실 표면온도가 급격히 상승하여 결과적으로 연소실 온도 역시 상승하는 효과를 가져와 공기의 유입을 방해하므로 체적효율의 급격한 감소를 가져온다. Fig. 3은 한 사이클 동안의 평균 연소실 온도를 나타내었다. Baseline 엔진에서 case05까지 점차 온도가 상승함을 알 수 있다. 따라서 Table 4에 나타난 배기가스의 온도 역시 타당함을 확인할 수 있다.

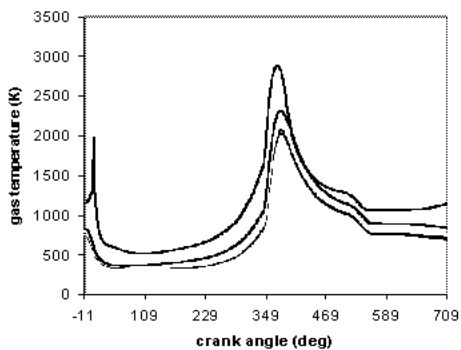


Fig. 3 In-cylinder mean gas temperature vs. crank angle

Table 4 Exhaust gas temperature

Model	E.G.T. (°C)
baseline	503
case01	539
case02	582
case03	670
case04	692
case05	837

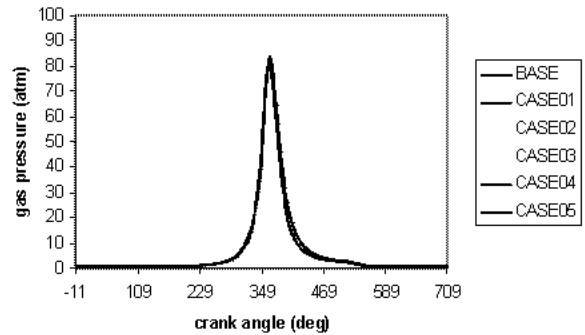


Fig. 4 In-cylinder mean gas pressure vs. crank angle

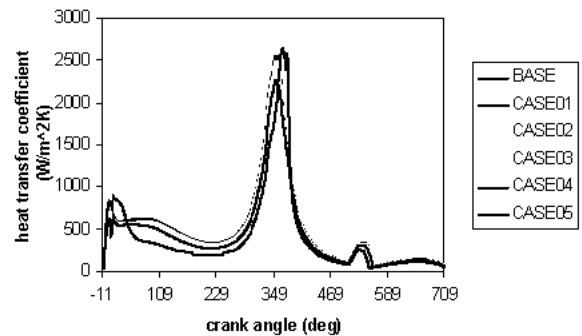


Fig. 5 In-cylinder mean gas heat transfer coefficient vs. crank angle

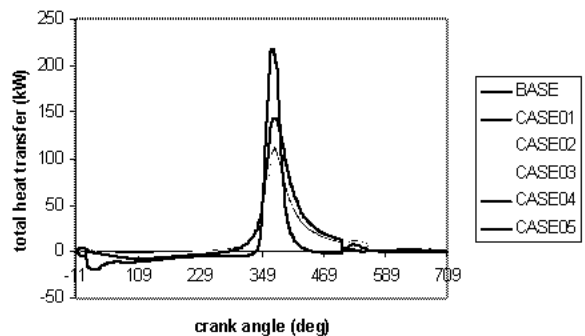


Fig. 6 Total heat transfer to wall vs. crank angle

Fig. 5와 6은 한 사이클 동안의 연소실 내부의 열 전달 계수와 연소실 벽면으로의 열전달량을 각각 나타내었다. Case05를 제외하고는 유사한 형태를 보이며 baseline에서 case04까지 점차 증가하는 모습을 보인다. Case05의 경우 흡입과정 초기에 보다 복잡한 유동 메커니즘으로 인하여 열전달 계수 역시 선형적인 증가를 하지 못하고 불규칙적인 변화를 보인다. 이는 Table 3에 나타난 체적효율의 감소와도 같은 원인이다.

연소실 벽면으로의 열전달 역시 case05를 제외하고는 유사한 형태를 보인다. 그러나 크기 면에서는 case01, baseline, 02, 04, 03, 05의 순서로 증가하며 case05의 경우 연소가 활발한 연소 및 팽창구간을 제외하고는 오히려 연소실 벽면에서 연소가스로 열이 전달되는 특이한 현상이 발생한다.

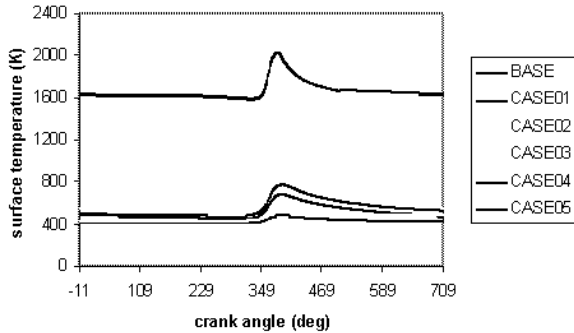


Fig. 7 Mean piston surface temperature vs. crank angle

Fig. 7에는 한 사이클 동안의 피스톤 표면온도의 변화를 나타내었다. 역시 case05를 제외하고는 유사한 분포형태를 보인다. 특이한 점은 case02와 04의 결과인데 대부분의 구간에서는 1.0mm 코팅의 case02 피스톤이 높은 온도를 보이거나 수정(quartz) 라이너의 영향으로 최고 피스톤 온도는 case04가 보다 높게 나타난다.

Baseline 엔진을 수정한 5개 엔진에 대한 성능분석이 본 연구의 최종목적이며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 주어진 조건하에서 최적의 엔진 설계 변수를 찾기 위하여 여러 가지 조합의 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과 헤드와 피스톤 표면을 0.3mm 지르코니아(zirconia)로 코팅을 하고 라이너는 기존의 주철(cast-iron)을 사용한 경우가 출력비교에 한하여 최적임을 밝혔으며, Table 5에는 최고 효율을 나타내는 최적 설계변수의 경우도 함께 제시하였다.

Table 5 BMEP and diesel work

Model	BMEP(atm)	Diesel work (kW/cycle)
baseline	11.82	5.758
optimized case	11.88	5.800
case01	11.85	5.764
case02	11.79	5.696
case03	11.03	4.996
case04	11.05	5.000
case05	8.52	2.864

4.2 FEM 해석 결과

Fig. 8에는 수정(quartz) 라이너의 정상상태 온도 분포를 도시하였다. 최고온도는 연소실 내부에서 발생하며 730K (457°C)이다. 상사점으로 갈수록 피스톤 속도가 감소하게 되고 따라서 중간행정(mid-stroke) 부분이 최고의 마찰력을 발생시킨다. 결과적

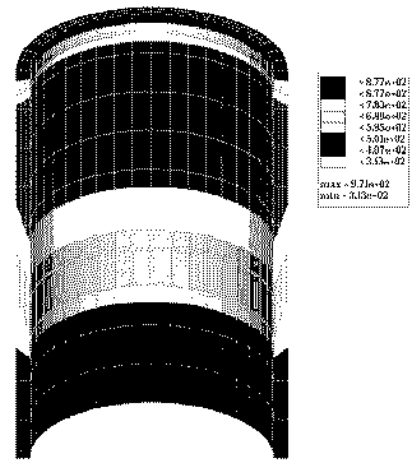


Fig. 8 Steady state temperature distribution of quartz liner [K]

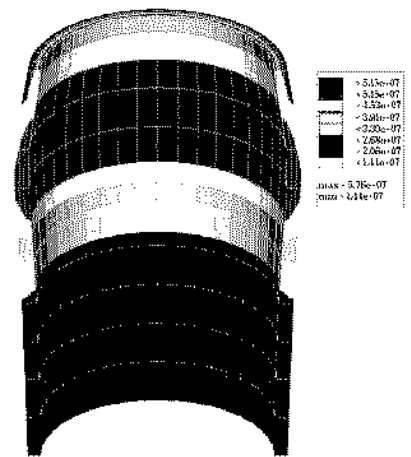


Fig. 9 Steady state stress distribution of quartz liner with deformation [MPa]

으로 마찰과 연소에 의한 복합작용에 의해 상사점에서 조금 떨어진 위치에서 최고온도가 발생하게 된다.

Fig. 9에는 정상상태 응력분포를 Von-Mises Stress로 나타내었다. 온도와 연소압력에 의한 복합적인 응력은 연소실 내부와 상사점의 내부표면에서 높게 발생한다. 최고응력은 60.8 MPa이다.

Fig. 10~12는 시간변화에 따른 온도분포의 변화를 보여주고 있으며, Fig. 13~15는 시간변화에 따른 응력분포 및 변형정도를 나타낸다.

수정(quartz)은 일반적으로 압축력에는 강한 반면, 인장력에는 취약한 특성을 보인다. 전형적인 인장강도(tensile strength)는 (50±a) MPa 정도이며 따라서 최대응력을 줄이는 방향으로 설계변경이 이루어져야 할 것이다. 즉 예를 들어 두께보강 혹은 보다 강력한 외부 냉각방식이 고려되어야 한다.

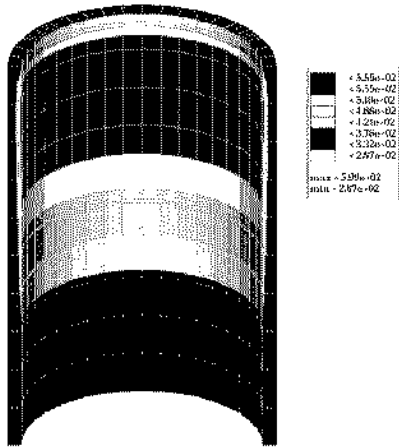


Fig. 10 Transient temperature distribution of quartz liner at 5 second after firing [K]

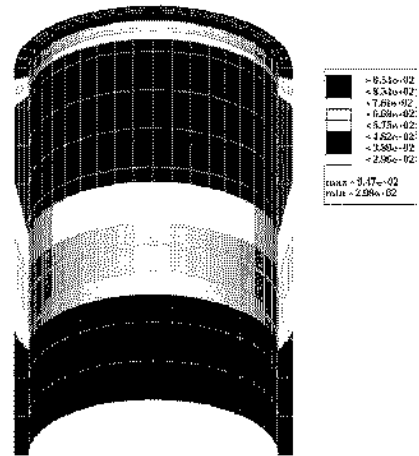


Fig. 12 Transient temperature distribution of quartz liner at 100 second after firing [K]

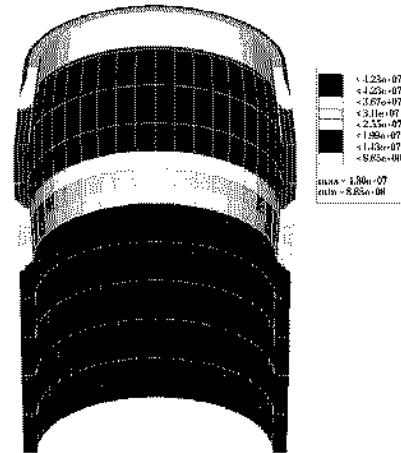


Fig. 13 Transient stress distribution of quartz liner with deformation at 5 second after firing [MPa]

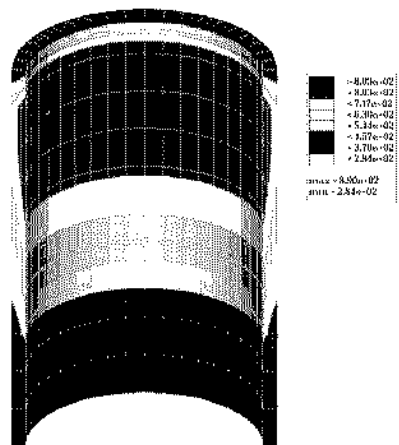


Fig. 11 Transient temperature distribution of quartz liner at 50 second after firing [K]

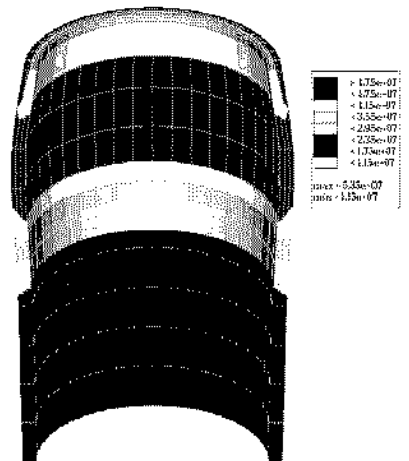


Fig. 14 Transient stress distribution of quartz liner with deformation at 50 second after firing [MPa]

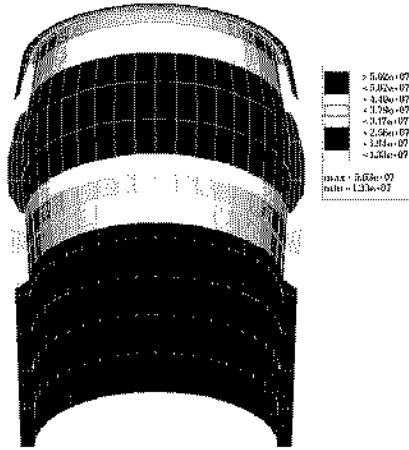


Fig. 15 Transient stress distribution of quartz liner with deformation at 100 second after firing [MPa]

### 5. 결 론

본 연구에서는 헤드와 피스톤에 지르코니아(zirconia)로 코팅한 LHR 디젤엔진의 성능을 기존 엔진과 비교하였고, 실린더 라이너가 수정(quartz)으로 만들어진 LHR 디젤엔진의 설계 가능성을 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 체적효율은 세라믹 재료의 코팅이나 수정(quartz)의 삽입에 따라 감소하게 되는데, 연소실 표면온도가 상승하여 결과적으로 연소실 온도 역시 상승하는 효과를 가져와 공기의 유입을 방해하므로 체적효율의 감소를 가져온다.
- 2) 세라믹 재료의 코팅이나 수정(quartz)의 삽입으로 인해, 경우에 따라 연소 및 팽창구간을 제외하고는 오히려 연소실 벽면에서 연소가스로 열이 전달되는 특이한 현상이 발생한다.
- 3) 엔진 연소실 내부에 세라믹 재료의 코팅이나 수정(quartz)의 삽입했을 경우, 체적효율의 저하로 base line 엔진에 비해 출력성능이 저하됨을 알 수 있다.
- 4) 수정(quartz)은 압축력에는 강한 반면, 인장력에는 취약한 특성을 보이므로, 두께보강 혹은 보다 강력한 외부 냉각에 의해 최대응력을 줄이는 방향으로 설계변경이 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

1. John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion

Engine Fundamentals", McGraw-Hill, Seoul  
 2. Dennis Assanis, 1985, "A Computational Simulation of the Turbocharged Turbocompounded Diesel Engine System for Studies of Low Heat Rejection Engine Performance", Ph.D. Thesis, MIT., U.S.A.  
 3. K. S. Lee, 1997, "Study on Heat Transfer and Thermal Behavior Characteristics of Naturally Aspirated Diesel Engine", Ph.D. Thesis, Yonsei Univ., Seoul Korea  
 4. 이교승 외 3인, 2000, "2영역 모델을 이용한 EGR 사용 직접분사식 디젤엔진의 NOx 생성예측", 대한기계학회논문집, B권, 제24권, 제3호, pp. 390-401  
 5. Dohoy Jung, 2001, "A Multi-Zone Direct-Injection Diesel Spray Combustion Model For Cycle Simulation Studies of Large-Bore Engine Performance and Emissions", Ph.D. Thesis, University of Michigan, U.S.A.  
 6. K. S. Lee and Dennis N. Assanis, 2000, "Thermo-mechanical Analysis of Optically Accessible Quartz Cylinder Under Fired Engine Operation", International J. of Automotive Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 79-87