

〈논 문〉 SAE NO. 97370101

# 터보과급 및 EGR을 사용하는 직접분사식 디젤엔진의 연소특성에 미치는 Ar과 He첨가의 영향

## Effects of Ar/He Dilution on Combustion Characteristics in DI Diesel Engine using Turbocharging and EGR

권영동\*, 김용모\*, 박신배\*\*, 백현종\*\*, 이동권\*\*  
Y. D. Kwon, Y. M. Kim, S. B. Park, H. J. Paik, D. K. Lee

### ABSTRACT

The combustion characteristics of DI Diesel engine using turbocharging and EGR are numerically studied. Computations are carried out for the wide range of turbocharged pressures, EGR ratios, and Ar/He dilution. Numerical results indicate that the Ar/He dilution in the intake gas significantly influence the engine performance, the spray combustion process, and the pollutant formation.

주요기술용어 : Fuel Spray(연료분무), Atomization(미립화), Autoignition(자발화), EGR(배기가스 순환), Pollutant Formation(공해가스생성), Ar/He Dilution(Ar 및 He 첨가)

### 1. 서 론

날로 심각해지고 있는 자동차 배출가스에 의한 환경오염으로 인해 배출가스에 대한 규제가 강화됨에 따라 디젤엔진에서 발생하는 Soot와 NO<sub>x</sub>의 배출을 최소화하는 기술개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이와같이 저 Soot/NO<sub>x</sub> 배출 및 연료의 경제성 그리고 기관의 내구성을 만족시키는 문제는 오늘날 많은 연구자들의 큰 관심사가 되고 있다. 이러한 저공해 디젤엔진의 최적연소와 관련된 기술중 EGR은 배기가스중의 NO<sub>x</sub>를 줄이는 필수적인 요소로 고려되고 있지만

반면 그에 상응하는 Soot의 증가와 엔진성능의 저하를 가져온다.<sup>1),2)</sup> 이러한 원인은 엔진작동시 EGR을 통해 배기가스로 부터 유입되는 CO<sub>2</sub>의 상대적으로 낮은 비열비로 인해 연소실온도 및 엔진의 연소특성이 저하되는데 기인한다. 따라서 상대적으로 큰 비열비를 갖는 Ar과 He과 같은 첨가제를 통해 연소실내의 평균비열비를 증가시켜 엔진의 연소특성을 향상시켜 줌으로써 EGR을 통해 저하된 엔진성능을 증대시킬 수 있게 된다.<sup>3)</sup> 그리고 EGR를 사용하게 될 때는 흡기중의 대체된 산소의 양을 확보하여 같은 분사연료량으로 엔진출력을 얻기 위해 터보과급이나 수퍼과급 등의 방법을 통해 흡기압력을 높이는 것이 불가피하다. 터보과급 디젤엔진의 경우 과급기를 통한 기관의 흡기용량의 증대로 기관의 출력 및

\*정회원, 한양대학교 기계공학과

\*\*국방과학연구소

성능이 향상되며 이러한 과급압력은 디젤엔진이 매우 희박한 상태에서 작동하기 때문에 NO<sub>x</sub>와 Soot의 발생량을 동시에 줄일 수 있는 가능성을 가지고 있다.<sup>(4)~(6)</sup>

본 연구에서는 고압상태에서 작동하는 터보과급과 EGR을 사용하는 직접분사식 디젤엔진의 과급압력 및 Ar과 He의 첨가비율이 엔진성능 및 분무연소특성 그리고 매연가스 배출과정에 미치는 영향을 체계적으로 해석하였다.

## 2. 물리모델 및 수치모델

기상과 액상에서 발생하는 중요한 물리적 현상들은 비정상, 다차원 연립방정식으로 모델링된다. Eulerian-Lagrangian 다상 유동해석법은 기상의 지배방정식은 Euler 좌표계에서 표현되는 반면 액상의 지배방정식은 Lagrange 좌표계에서 표현된다. 기상과 액상의 지배방정식은 질량, 운동량, 열전달률을 나타내는 상호 관련된 생성항으로 결합된다. 본 연구에서는 연료 제트의 미립화 과정과 액적분열과정을 고려해 주기 위해 Reitz의 파동 불안정모델<sup>7)</sup>을 사용하였고, 난류에 의한 액적의 Dispersion을 고려해 주기 위한 Stochastic 액적추적모델<sup>12)</sup>, 액적 사이의 충돌과 결합을 고려한 O'Rourke의 액적충돌모델<sup>13)</sup>, 액적의 벽면충돌과정을 모사하기 위한 수정된 Jet 모델<sup>14)</sup>, 그리고 액적내부의 열전달과정을 고려하기 위해 무한전도 액적가열모델<sup>15)</sup>을 사용하였다. 그리고 액상과 기상간의 질량, 운동량, 그리고 열전달 계산에서 난류의 시간척도와 길이척도는 k-ε 난류 모델에 의해 나타난다. 저온영역의 화학반응모델로는 5개의 화학종과 8개의 화학반응을 포함하는 Shell 점화모델<sup>8)</sup>을 사용하였으며 화학반응식에서 질량보존을 고려하기 위해 Schäpertöns와 Lee에 의해 제안된 방법<sup>9)</sup>을 이용하였다. 또한 고온 영역에서 연료의 연소반응율은 수정된 Eddy Breakup 연소모델<sup>10)</sup>을 사용하여 계산하였다. 그리고, Soot 모델로는 Hiroyasu의 Soot 생성모델<sup>11)</sup>과 Nagle과 Strickland-Constable의 산화모델<sup>11)</sup>을 사용하였고 NO 모델은 확장된 Zeldovich NO모델<sup>11)</sup>에 기초하여 모델링하였다. 본 연구에서 사

용한 Emission 모델에 대해 간략하게 기술하면 다음과 같다.

Soot의 질량변화율(dM<sub>s</sub>/dt)은 Arrhenius 일단계반응형태로 나타내었을 때 Soot의 생성을 산화율의 차와 같으며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{sf}}{dt} - \frac{dM_{so}}{dt} \quad (1)$$

이때 Soot의 생성율(dM<sub>sf</sub>/dt)은 아래에 기술된 Hiroyasu의 Soot 생성모델<sup>11)</sup>을 사용하였다.

$$\frac{dM_{sf}}{dt} = K_I M_{iv} \quad (2)$$

여기서 M<sub>iv</sub>은 연료증기의 질량

$$K_I = A_I P^{0.5} \exp(-E_I/RT)$$

$$A_I = 100, E_I = 12500(\text{cal/mole})$$

그리고 Soot의 산화율(dM<sub>so</sub>/dt)은 Nagle과 Strickland-Constable의 산화모델<sup>11)</sup>을 이용하여 모델링하였다. 이 모델에서는 탄소의 산화반응이 Surface Chemistry에 의존하는 화학반응기구에 의해 일어난다고 가정하고 탄소의 산화율(g-atom carbon/sec-cm<sup>2</sup>)을 아래와 같이 정의한다.

$$R_{\text{Total}} = \left( \frac{K_A P_{O_2}}{1 + K_Z P_{O_2}} \right) x + K_B P_{O_2} (1 - x) \quad (3)$$

여기서  $x = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + (K_T/K_B)}$ , P<sub>O<sub>2</sub></sub>는 산소의 부분압

$$K_A = 20 \exp(-30,000/RT)$$

$$K_B = 4.46 \times 10^{-3} \exp(-15,200/RT)$$

$$K_T = 1.51 \times 10^5 \exp(-97,000/RT)$$

$$K_Z = 21.3 \exp(4,100/RT)$$

Soot의 산화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM_{so}}{dt} = \frac{6M_{wc}}{\rho_s D_s} M_s R_{total} \quad (4)$$

여기서  $M_s$ =Soot의 질량,  $M_{wc}$ =탄소의 분자량  
 $\rho_s$ =Soot의 밀도(2.0g/cm<sup>3</sup>),  
 $D_s$ =Soot의 직경(3×10<sup>-6</sup>cm)

NO 생성율을 모델링하기 위해 확장된 Zeldovich NO모델<sup>11)</sup>을 사용하였고 화학반응식은 다음과 같다.



위의 반응식을 풀기 위해 질소의 농도가 정상상태에 있다고 가정하였고 아래와 같은 화학평형식을 가정하였다.



결과적인 NO 생성율은 다음과 같다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f}[O][N_2] \times \left\{ \frac{1 - [NO]^2 / K_{12}[O_2][N_2]}{1 + k_{1b}[NO] / (k_{2f}[O_2] + k_{3f}[OH])} \right\} \beta_{NO} \quad (6)$$

여기서 O, OH, O<sub>2</sub> 그리고 N<sub>2</sub>는 국부적으로 열평형상태에 도달하였다고 가정하였다. 그리고 반응계수는 Bowman<sup>10)</sup>이 제시한 값을 사용하였다. 여기서  $K_{12} = (k_{1f}/k_{1b})(k_{2f}/k_{2b})$ 는 식(5.1)과 (5.2)에 해당하는 반응에 대한 평형상수를 나타낸다. 또한  $\beta_{NO}$ 는 Zeldovich NO모델로부터 계산된 값을 실험치와 정량적으로 비교하기 위해 사용된 보정계수이고 EPA규정에 따라 NO를 NO<sub>x</sub>로 전환하기 위한 추가적인 계수로 1.533을 사용하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 과급압력 및 EGR이 직접분사식 디젤엔진의 엔진성능 및 연소특성에 미치는 영향

과급압력 및 EGR이 직접분사식 디젤엔진의 엔진성능, 연소특성 및 배기가스의 생성과정에 미치는 영향을 수치해석하기 위해 채택한 엔진의 계원은 Table 1에 주어져 있다. 사용된 연료는 Tridecan(C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>)이고 터보과급 및 EGR을 사용하는 디젤엔진의 주요작동변수인 흡기의 초기압력과 혼합기조성비를 변화시켜가면서 수치계산을 수행하여 실험결과<sup>4)</sup>와 비교해 보았으며 초기 선회분포에 대하여는 강체회전으로 가정하였다. 이 엔진은 편심된 피스톤 보울과 분사기를 갖고 있으나 전체 연소실을 계산영역으로 하는 경우는 과도한 수치계산시간이 소요되므로 Fig.1에서와 같이 연소실형상을 확대칭이고 실린더헤드의 중앙에 4개의 분사가 등각도로 위치하는 것으로 가정하여 전체 연소실의 1/4에 해당되는 유동장에 대하여 격자를 형성하였다.

Fig.2는 표준공기상태(O<sub>2</sub>=21%)에서 흡기의 초기압력상승에 따른 실린더내의 압력변화를 실험치<sup>3)</sup>와 비교한 결과이다. 수치계산 결과는 실험

Table 1 Engine Specification

Cylinder bore×stroke(mm)	125.0×110.0
Displacement volum(cc)	1349.9
Compression ratio	16.0
Number of nozzle×diameter(mm)	4×0.24
Engine speed(rpm)	1500(constant)
Combustion Chamber	Bowl in piston
Needle opening pressure(MPa)	19.6
Spray angle	10deg
Start of injection	-12.0° CA
Fuel injected(g/cyc)	0.05
Intake air pressure	*Natural *Incremental boost pressure (up to 80 kPa gage)
Intake air temperature	35°C

치와 전체적인 압력변화경향은 거의 일치하지만 초기압력이 상대적으로 높은 160.1kPa과 179.8kPa인 경우 연소실내의 최고압력을 다소 과대 예측을 하며 상대적으로 압력이 낮은 101.3kPa과 140.5kPa의 경우에는 다소 과소예측하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 실험치와의 오차는 실제엔진의 기하학적 조건 및 작동조건을 수치모델에서 단순화시켜 모델한 것에 주로 기인 하는 것으로 보이며 부분적으로는 본 연구에서 사용한 수치 및 물리모델의 한계로 사료된다. 하지만 엔진의 상세한 기하학적 데이터와 수치계산과정에서 고려하지 않은 고압상태에서의 액적의 초입계 증발특성과 실제가스의 효과, 그리고 연소실 벽면에서의 열전달과정 등을 고려하여 수치계산을 수행하는 경우 실험치에 훨씬 근접한 수치해석 결과를 얻을 것으로 사료된다. 한편 엔진내의 압력이 과급됨에 따라 실린더내의 혼합기의 밀도증가로 연료분무의 분열 및 증발특성이 향상되며 이는 연료증기의 공기와의 빠른 혼합을 유도하여 연소반응을 촉진시켜 점화지연을 단축시키게 되고 상대적으로 높은 초기압력인 179.8kPa인 경우 낮은 압력의 101.3kPa인 경우에 비해 점화지연이 4° 가량 단축됨을 알 수 있고 또한 연소실내의 최고압력은 초기압력이 101.3kPa인 경우

5.2MPa에서 179.8kPa인 경우 8.5MPa까지 크게 증가함을 볼 수 있다. Fig.3은 과급압력이 연소실 최대압력과 단위출력당 연료소비율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 흡기의 초기압력이 101.3kPa에서 179.8kPa까지 증가함에 따라 연

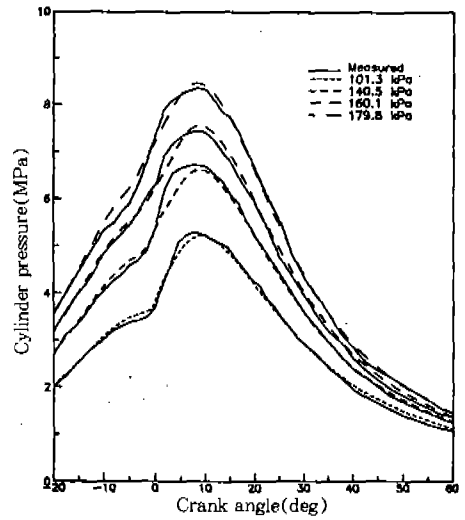


Fig.2 Computed and Measured Pressures in the Combustion Chamber for the Intake Gas Pressures

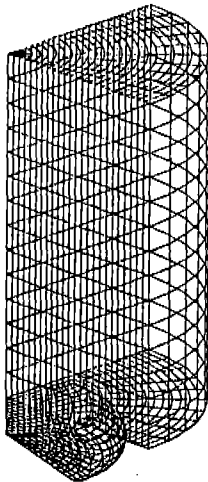


Fig.1 Three-Dimensional and Axisymmetric Computational Domain

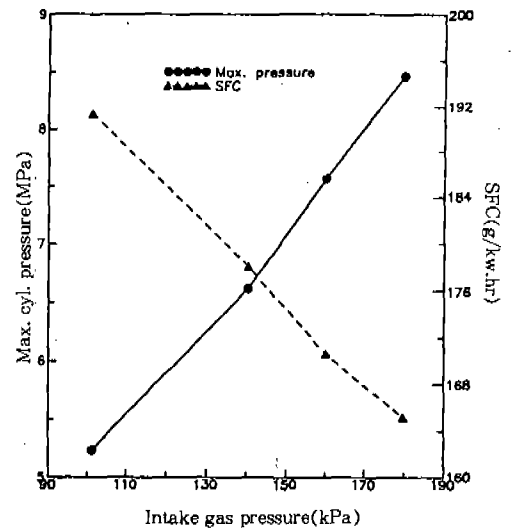


Fig.3 Effects of Intake Gas Pressure on Peak Cylinder Pressures and Specific Fuel Consumption

소실 최대압력은 대략 5.2MPa에서 8.5MPa까지의 증가를 가져왔고 단위출력당 연료소비율 또한 초기압력의 증가와 함께 감소하는 경향을 보였으며 초기압력이 101.3kPa에서 179.8kPa까지 증가함에 따라 연료소비율은 약 15% 이상의 감소를 가져와 엔진성능이 향상됨을 알 수 있다.

Fig.4는 흡기의 초기압력증가가 NO<sub>x</sub> 및 Soot

의 발생에 미치는 영향을 보여준다. 흡기압력이 상승함에 따라 혼합기의 밀도가 증가하므로 급격한 액적분열 및 증발과정을 통해 연소반응이 촉진되고 점화지연의 단축을 가져오며 NO<sub>x</sub>의 발생 시점 및 발생을 또한 압력상승에 따라 증가하게 된다. 과급압력이 140.5kPa에서 160.1kPa로 과급됨에 따라 NO<sub>x</sub>는 거의 증가하지 않으나 압력

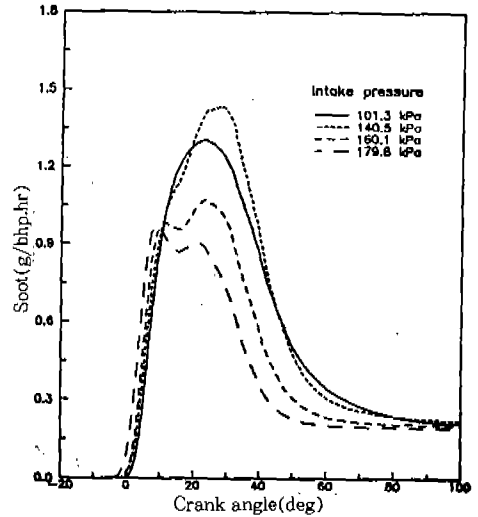
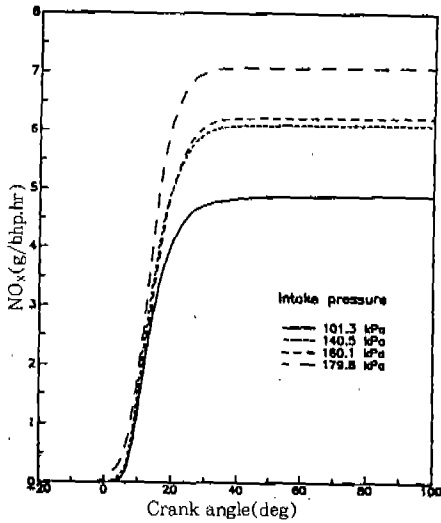
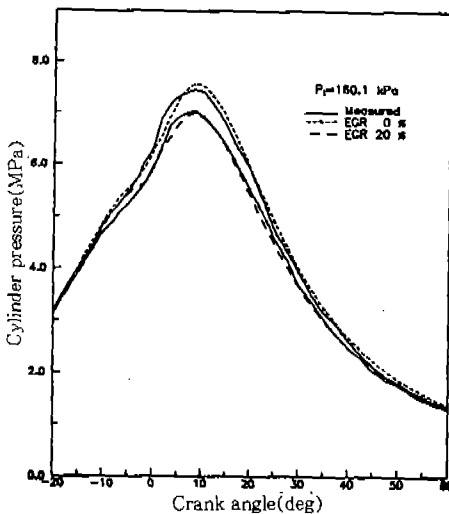
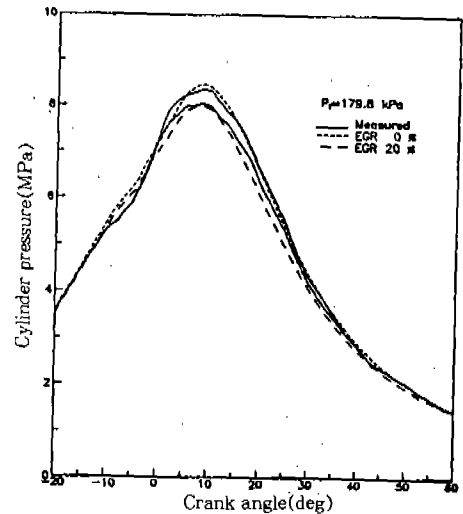


Fig.4 NO<sub>x</sub> and Soot Histories for the Intake Gas Pressures



(a) P<sub>1</sub> = 160.1kPa, T<sub>1</sub> = 35°C



(b) P<sub>1</sub> = 179.8kPa, T<sub>1</sub> = 35°C

Fig.5 Computed and Measured Pressures in the Combustion Chamber for the EGR Ratios

을 179.8kPa로 증가시키면 다시 상승하게 된다. Soot의 발생과정을 살펴보면 압력이 증가할수록 연소초기의 Soot의 발생율은 증가하나 후기 연소기간동안에 과급압력에 의한 과잉공기와 연소가스의 혼합이 촉진되어 Soot의 산화율이 증가됨으로써 Soot의 배출량이 감소하게 된다.

Fig.5는 흡기의 초기압력이 160.1kPa과 179.8kPa인 경우 EGR율이 엔진내부의 압력변화에 미치는 영향을 실험치와 비교한 그림이다. 여기서 사용된 EGR율의 정의는 물농도를 기초로 하여 총 흡입공기중에 재순환된 배기가스의 비율을 나타내며 이때 분사된 연료가 완전연소된다는 가정하에 흡기와 배출가스중의 산소와 이산화탄소를 통해 계산된다. 그림에서 보듯이 EGR율을 20%( $O_2=16.8\%$ )까지 증가시켰을 때 엔진내의 최고압력은 감소하게 되고 점화지연기간도 증가함을 보여준다. 이는 흡기에 상대적으로 열용량이 큰  $CO_2$ 가 첨가됨에 따라 엔진내의 평균비열비가 감소하여 연소특성의 저하를 가져와 실린더내의 최고압력과 온도가 감소하게 된 것에 기인하는 것으로 볼 수 있다. EGR율의 증가에 따른 엔진내부의 최고압력의 감소는 상대적으로 압력이 낮은 160.1kPa인 경우가 더 크게 나타났고 이는 흡기중의 일부가 배출가스로 대체됨에 따라 EGR을 사용하지 않은 경우에 비해 산소의 양이 감소함으로 엔진의 연소특성이 저하된 것에 기인했다고 볼 수 있으며 따라서 EGR을 사용하게 될 때는 흡기중의 대체된 산소의 양을 확보하고 엔진성능을 향상시키기 위해 터보과급이나 수퍼과급 등의 방법으로 흡기압력을 증가시켜 주는 것이 필요하다고 볼 수 있다. Fig.6은 EGR율에 따른 연소실 최대압력과 단위출력당 연료소비율(SFC)을 나타내고 있다. EGR율이 증가함에 따라 최고 실린더압력은 감소되고 SFC가 증가하게 된다. 초기 압력이 179.8kPa인 경우 EGR율을 20%에서 40%로 증가시키에 따라 최고압력 및 엔진성능에 급격한 감소를 가져왔으며 이 경우 엔진의 연소특성 및 성능저하를 막기 위해 적절한 EGR율과 상승된 과급압력 및 분사압력, 그리고 분사시기 등의 조절이 필요할 것으로 사료된다.

Fig.7은 흡기의 초기압력이 160.1kPa과 179.8kPa인 경우 EGR율이  $NO_x$  및 Soot의 발생에 미치는 영향을 나타내고 있다. EGR율이 증가됨에 따라 산소량의 감소와 상대적으로 열용량이 큰  $CO_2$ 양의 증가로 인해 점화지연이 증가하고 열방출량 및 화염온도가 감소하게 되어  $NO_x$ 는 급격히 감소하게 된다. 하지만 EGR율의 증가로 흡기중의 산소의 양이 감소함으로 연소후반부에 생성된 Soot의 산화율이 감소하여 Soot은 증가하게 되며 이러한 경향은 상대적으로 흡기압력 및 밀도가 낮은 160.1kPa인 경우 더 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig.8은 초기압력 179.8kPa에서 크랭크각에 따른 EGR의 영향을 보여주는 엔진내부의 연료증기 및 분무의 분포, 속도벡터, 온도장,  $NO$ 와 Soot의 분포이다. 일반적으로 디젤연료분무의 연소과정은 침투된 연료분무의 중간부위측면에 형성된 와동의 중심점근방에서 연료증기가 공기와 혼합된 뒤 자발화가 일어나고 증발된 연료증기와 공기의 혼합기속으로 급격히 화염이 전파된 후 연료분무의 외부에 화염경계면이 형성되어 연료분무의 증발과 연소가 점진적으로 진행된다.<sup>17)</sup> EGR율이 20%인 경우 엔진내에 유입된  $CO_2$ 와

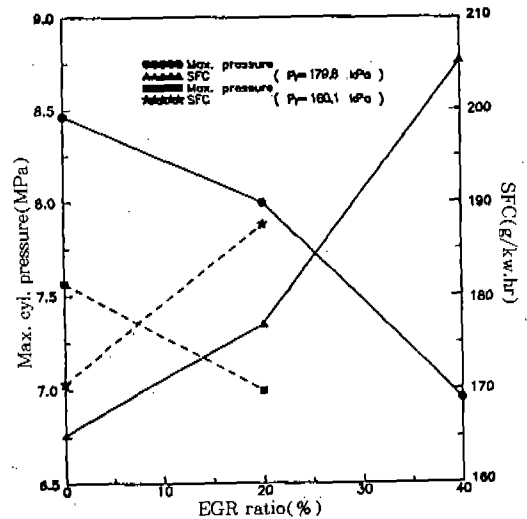


Fig.6 Effects of EGR Ration on Peak Cylinder Pressures and Specific Fuel Consumption

감소된 산소량으로 인해 점화지연이 길어지고 연소특성이 저하되므로 분사된 연료분무의 증발 및 연소반응이 지연되어 자발화와 이후의 연소반응에 의해 형성된 엔진내의 속도장의 강도가 현저히 감소됨을 알 수 있다. 이는 증발된 연료증기와 주위공기와의 혼합과정을 감소시키게 되고 연

소후반부에서 Soot의 산화율을 감소시키게 된다. 연료분무의 중간부위측면에 위치한 와동의 중심부 근방에서 공기와 연료증기의 혼합이 촉진되어 자발화이후 연소반응이 진행되는 이러한 고온영역을 중심으로 NO가 생성되고 있으며 EGR율이 20%인 경우는 감소된 연소실 온도에 의해

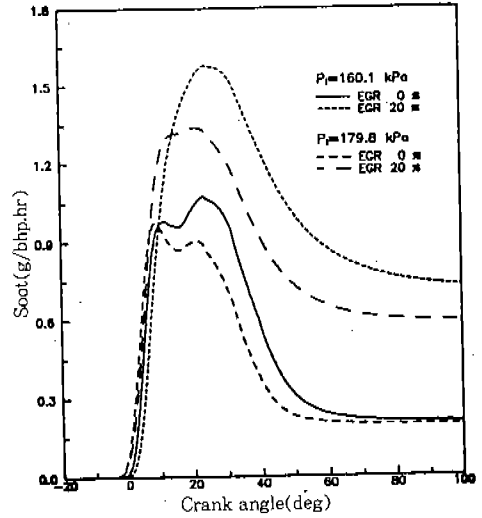
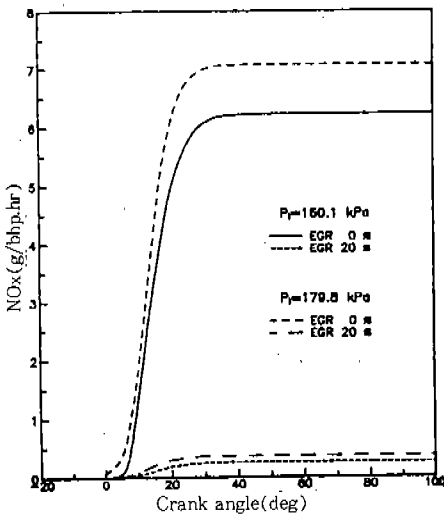
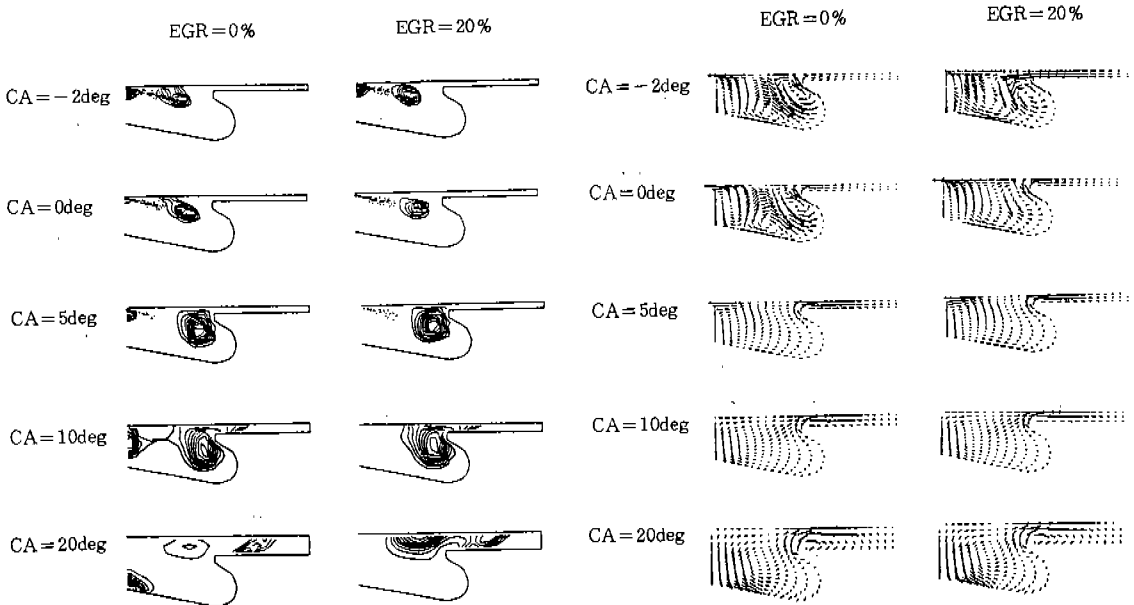
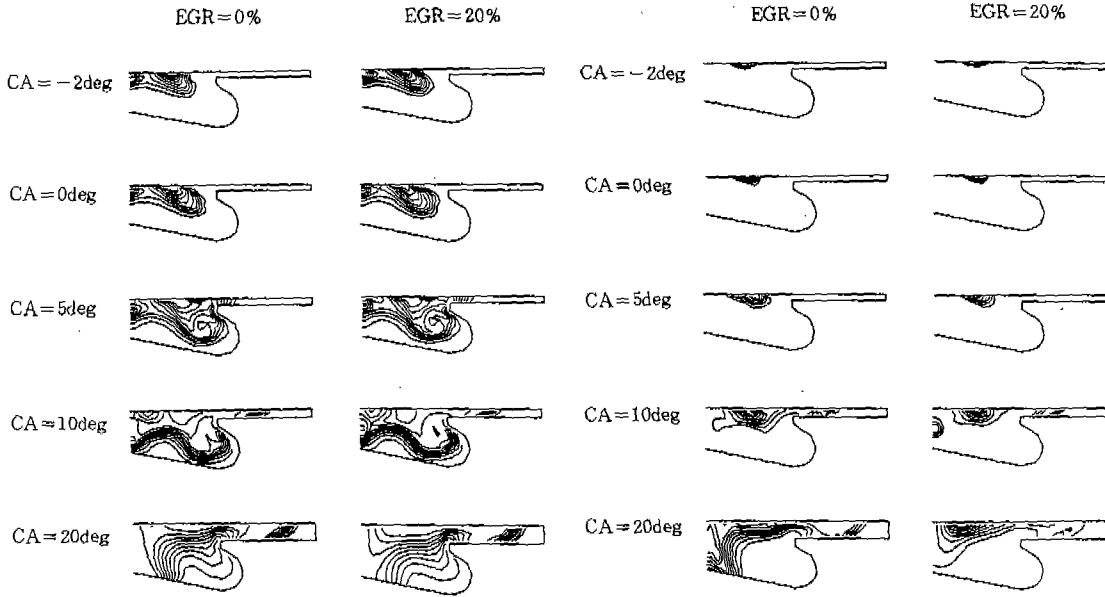


Fig.7 NO<sub>x</sub> and Soot Histories for the EGR Ratios



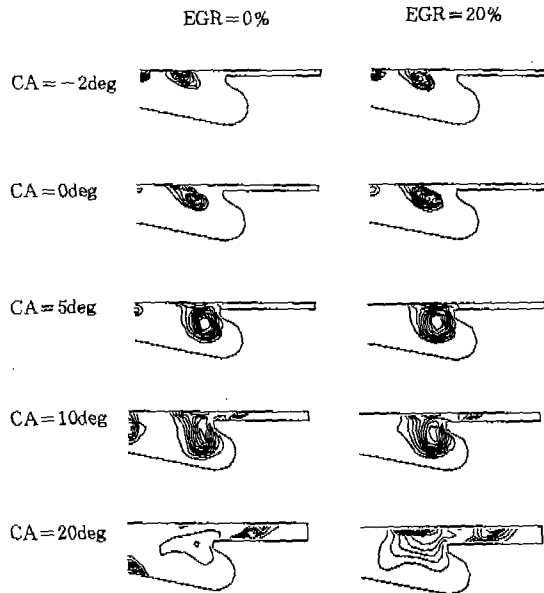
(a) Vapor Fuel and Droplet Distribution

(b) Velocity Vectors



(c) Contours of Temperature

(d) Contours of NO Mass Fraction



(e) Contours of Soot Mass Fraction

Fig.8 Instantaneous Flowfield in the Combustion Chamber for the EGR Ratios ( $P_1 = 179.8\text{kPa}$ ,  $T_1 = 35^\circ\text{C}$ )



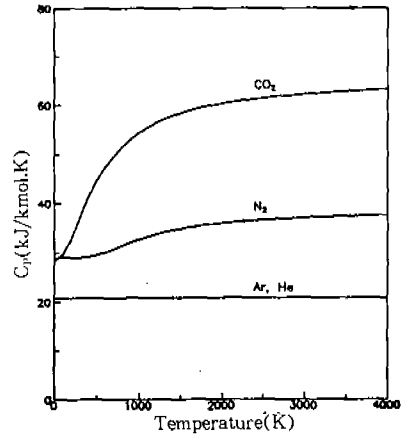
Thermal NO의 발생이 지연되어 그 발생량이 크게 감소하게 된다. 또한 Soot은 연료증기의 농도가 농후하고 온도가 높은 연료분부의 선단끝부분에서 크게 발생되고 있으며 EGR율이 증가함에 따라 흡기중의 산소양의 감소와 연소실온도의 하강으로 인해 연소후반부에 생성된 Soot의 산화율이 저하되어 Soot의 발생량이 현저하게 증가된다.

### 3.2 EGR을 사용하는 직접분사식 디젤엔진의 엔진성능 및 연소특성에 미치는 Ar과 He의 영향

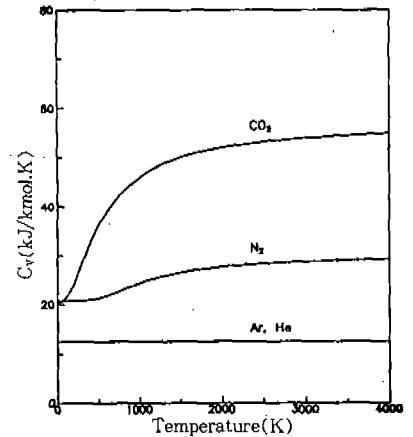
EGR을 사용하는 직접분사식 디젤엔진의 엔진성능, 연소특성 및 배기가스의 생성과정에 미치는 Ar과 He의 영향을 수치해석하기 위해 채택한 엔진의 제원은 앞서 제시한 Table 1과 같다. 수치계산은 흡기의 초기압력 179.8kPa, 초기온도 35°C인 경우에 대하여 Ar과 He의 비율을 20%까지 증가시켜 혼합기조성비를 변화시켜가면서 수치계산을 수행하였다.

Fig.9는 N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, He의 온도에 따른 정압비열(C<sub>p</sub>), 정적비열(C<sub>v</sub>), 그리고 비열비값을 나타낸다. 그림에서 보듯이 상대적으로 열용량이 큰 CO<sub>2</sub>는 온도증가에 따라 다른 기체에 비해 정압 및 정적비열값이 크게 상승하고 있으며 단원자분자인 Ar과 He은 온도증가에 따라 비열값이 변화하지 않음을 알 수 있다. 한편 Fig.9(c)의 온도에 따른 비열비를 보면 CO<sub>2</sub>의 경우 온도증가에 따라 C<sub>p</sub>값의 증가와 함께 동시에 C<sub>v</sub>가 크게 증대됨으로 결과적으로 감소된 비열비를 받게 되는 반면 Ar과 He은 온도증가에 따라 일정한 값을 가지며 상대적으로 큰 비열비를 가진다. 엔진작동시 EGR을 통해 배기가스로부터 첨가된 CO<sub>2</sub>는 연소실내의 평균비열비를 낮춤으로 연소실온도 및 엔진의 연소특성을 저하시키나 이 경우 알콘과 헬륨의 첨가는 엔진내부의 평균비열비를 증가시켜 연소특성을 향상시킴으로써 EGR을 통해 저하된 엔진성능을 증대시킬 수 있게 된다.

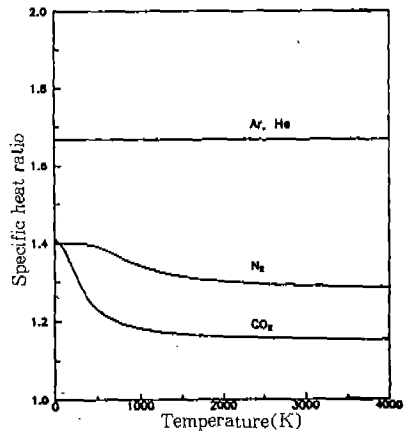
Fig.10은 흡기의 초기압력이 179.8kPa인 경우 흡입공기중의 산소의 양을 21%로 고정시킨 상



(a)



(b)



(c)

Fig.9 Constant-Pressure Specific Heats, Constant-Volume Specific Heats, Specific Heat Ratios versus Temperature

태에서 질소 대신 불활성가스인 아르곤과 헬륨을 첨가했을 경우 실린더내의 압력변화를 나타낸다.  $N_2$ 에 비해 상대적으로 열용량이 작은 아르곤과 헬륨의 첨가는 엔진내부의 평균비열비를 증가시켜 연소특성을 향상시킴으로써 점화지연을 단축시키고 연소온도 및 실린더 최고압력을 증가시킴을 알 수 있다. Fig.10(a)에서 보는 바와 같이 아르곤의 농도를 10% 증가시켰을 경우 표준공기상태 ( $O_2=21\%$ ,  $N_2=79\%$ )에 비해 실린더내의 최고압력이 크게 증가되지 않으나 질소의 20%를 아르곤으로 대체했을 경우 최고압력이 9MPa까지 증가하게 된다. 또한 Fig.10(b)를 보면 헬륨의 농도가 10%인 경우 앞서 살펴본 20% 아르곤의 경우와 같은 최고압력(9MPa)을 얻었고 농도를 20%까지 증가시키면 최고압력을 약 10MPa까지 증가하게 된다.

Fig.11은 흡기의 초기압력이 179.8kPa인 경우 아르곤과 헬륨의 농도가 연소실 최대압력과 단위출력당 연료소비율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 아르곤과 헬륨의 농도를 20%까지 증가시켰을 경우 각각 9.0MPa과 9.8MPa의 최고압력을 얻을 수 있었고 연료소비율의 경우 각각 약 3%와 6%의 감소를 가져와 엔진성

능의 향상을 가져왔으며 이와같은 성능향상에는 헬륨의 경우가 더 큰 영향을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 이유는 아르곤과 헬륨이 온도에 따라 같은 비열값을 갖지만 헬륨의 경우 그 분자량( $M_{He}=4.003$ )이 아르곤( $M_{Ar}=39.948$ )의 1/10에 해당함으로 연소실내의 같은 온도와 압력을 갖는 혼합기에 포함되었을 때 헬륨의 경우가 아르곤에 비해 상대적으로 혼합기의 밀도가 감소됨으로 연소실내의 평균비열비는 상승하고 또한 분사된 연료분무의 침투깊이가 증가하게 됨으로 연료액적의 증발율 및 난류혼합이 증가하게 된다. 이와같이 상대적으로 분자량이 작은 헬륨의 경우가 엔진내의 혼합기의 평균비열비를 증가시켜줌으로써 연소특성 및 최고압력이 증대하여 더 큰 효과를 나타내게 된다.

Fig.12는 흡입공기중의 산소의 양을 21%로 고정시킨 상태에서 질소 대신 대체된 아르곤의 농도가  $NO_x$  및 Soot의 생성에 미치는 영향을 보여준다. 수치계산은 아르곤의 농도가 증가함에 따라 엔진내부의 평균비열비가 증가함으로 최고압력 및 연소실온도가 상승하여  $NO_x$ 의 양은 증가하고 Soot은 아르곤의 농도가 증가함에 따라 향상된 연소특성으로 인해 연소초기의 발생율은 증가

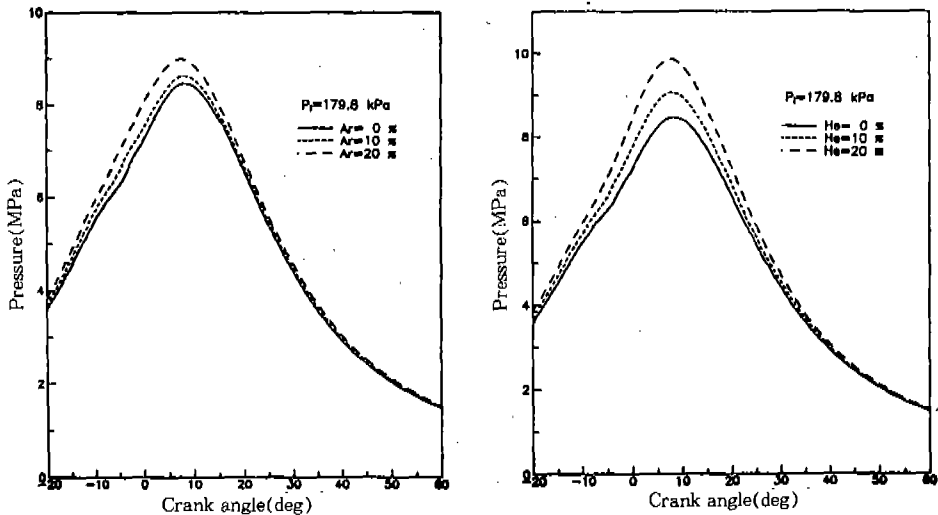


Fig.10 Cylinder Pressures for the Argon and Helium Dilution( $P_1=179.8kPa$ ,  $T_1=35^\circ C$ )

함을 보이고 연소후반부에서 산화율이 다소 감소하며 생성된 Soot의 양은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig.13은 흡입공기중의 산소의 양을 21%로 고정시킨 상태에서 질소 대신 대체된 헬륨의 농

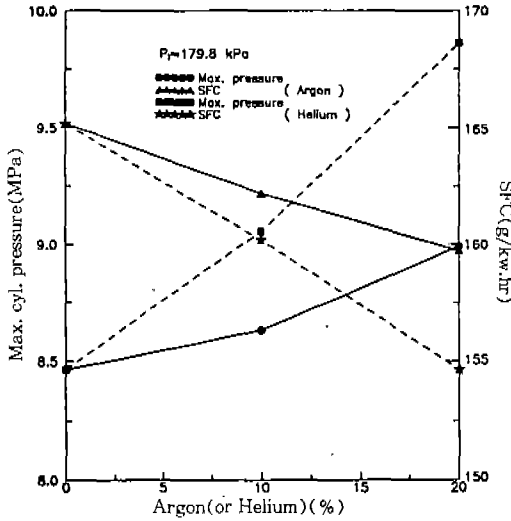


Fig.11 Dilution Effects on Peak Cylinder Pressures and Specific Fuel Consumption ( $P_i=179.8\text{kPa}$ ,  $T_i=35^\circ\text{C}$ )

도가  $\text{NO}_x$  및 Soot의 생성에 미치는 영향을 보여준다.  $\text{N}_2$ 에 비해 상대적으로 열용량이 작은 헬륨의 농도가 증가함에 따라 엔진내부의 평균비열비가 크게 증가되어 실린더 최고압력 및 연소실 온도가 상승하므로  $\text{NO}_x$ 의 양은 헬륨을 20%까지 증가시켰을 경우 연소종결후의 평균값이 2배 가량 증가하게 됨을 알 수 있다. 헬륨의 농도가 증가함에 따라 엔진성능은 향상되지만  $\text{NO}_x$ 의 배출측면에서는 역효과를 가져옴을 알 수 있다. Soot은 헬륨의 농도가 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig.14는 초기압력 179.8kPa에서 Ar과 He을 20% 첨가시켰을 때의 엔진내부의 연료분기 및 분무의 분포, 속도벡터, 온도장,  $\text{NO}$ 와 Soot의 분포를 나타낸다. Ar을 첨가하는 경우 상대적으로 큰 혼합기의 밀도로 인해 연료분무의 관통거리가 감소하여 인젝타 근방에서 연료액적이 주로 증발하게 된다. 또한 He을 첨가하는 경우에는 혼합기의 평균비열비가 상대적으로 증가되어 점화 지연이 단축되고 반응이 종결되는 크랭크각  $20^\circ$  근방에서 연료분기가 현저히 감소하게 된다. 온도장을 살펴보면 Ar에 비해서 He을 첨가시킨 경우 연소실 전반에 걸쳐 약간 상승된 온도 분포를 가지게되어 상대적으로 높은 Thermal

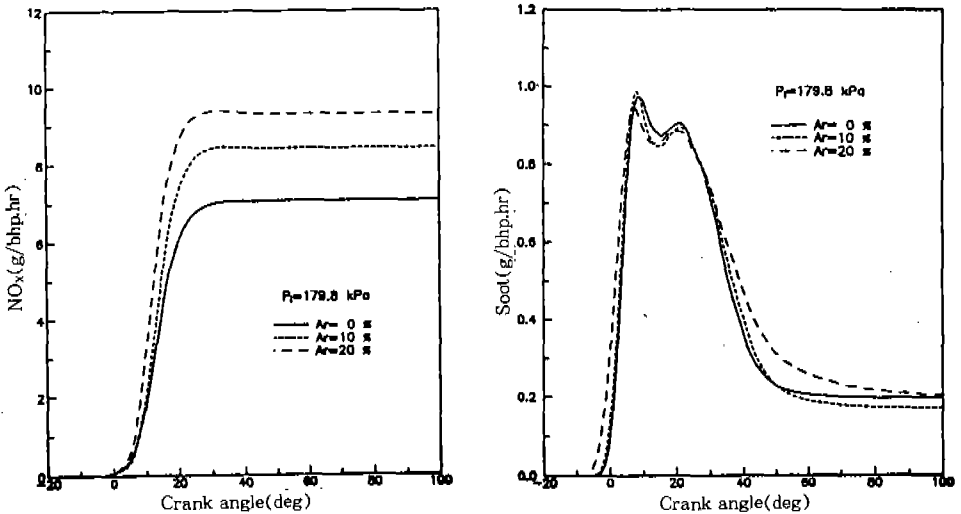


Fig.12  $\text{NO}_x$  and Soot Histories for the Argon Dilution ( $P_i=179.8\text{kPa}$ ,  $T_i=35^\circ\text{C}$ )

$\text{NO}_x$ 의 분포를 가지게 된다. Fig.14(a)의 연료증기의 분포에서 알 수 있듯이 Ar이 첨가된 경우는 노즐입구근방에서 연료증기가 농후하게 나타나고 He을 첨가한 경우에는 연료소모율이 증가하여 피스톤보울 끝단에서 연료증기가 감소

되며 Soot의 발생량은 연료증기가 밀집된 지점에서 높게 나타난다. He을 첨가하는 경우 상대적으로 상승된 연소실온도로 인해 연소후반기에서 Soot의 산화율을 촉진시켜 결과적으로 Ar이 첨가된 경우에 비해 Soot의 발생이 저감된다.

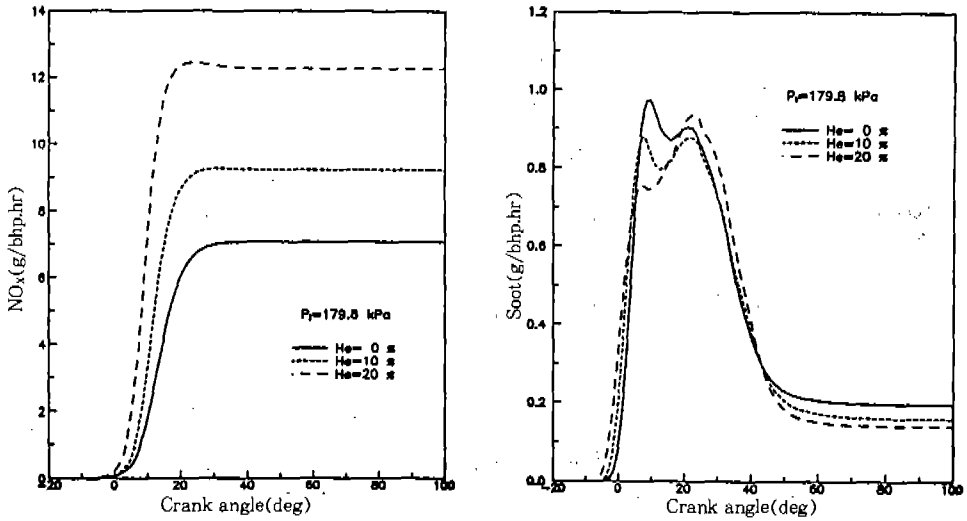
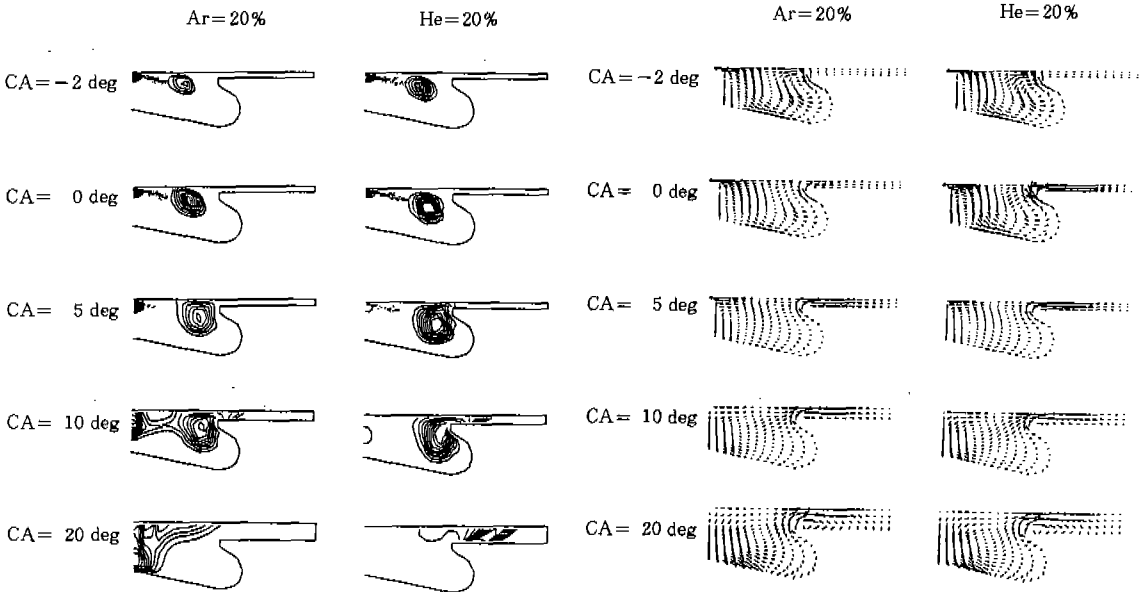
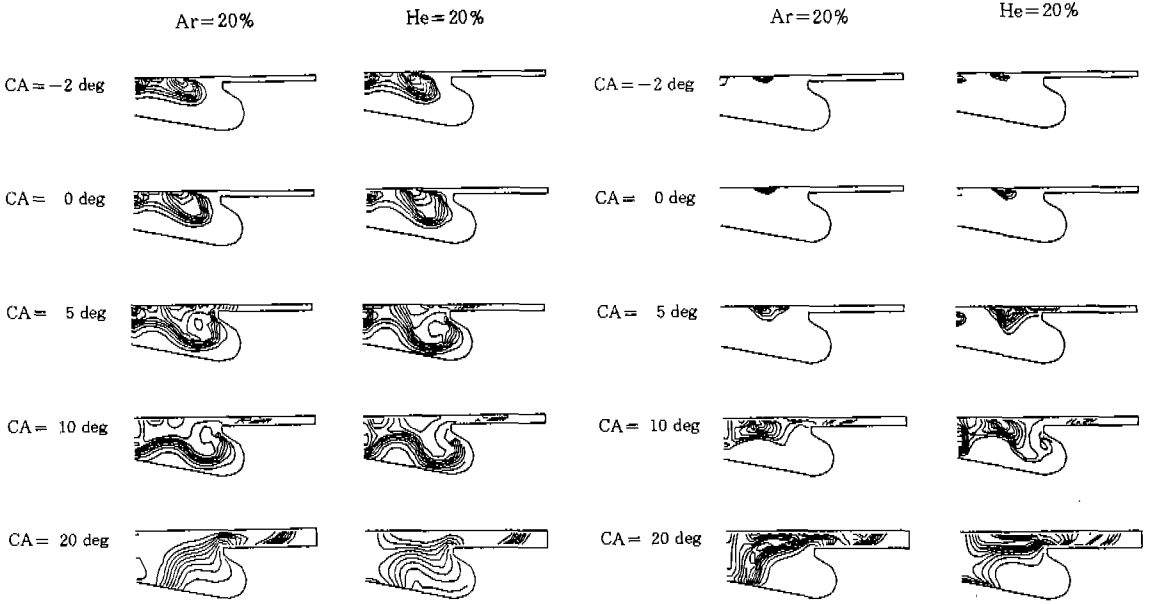


Fig.13  $\text{NO}_x$  and Soot Histories for the Helium Dilution ( $P_i=179.8\text{kPa}$ ,  $T_i=35^\circ\text{C}$ )



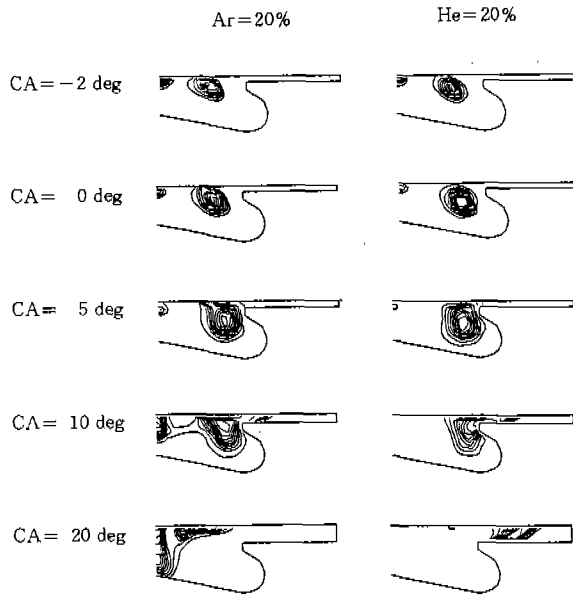
(a) Vapor Fuel and Droplet Distribution

(b) Velocity Vectors



(c) Contours of Temperature

(d) Contours of NO Mass Fraction



(e) Contours of Soot Mass Fraction

Fig.14 Instantaneous Flowfield in the Combustion Chamber for the Ar and He Dilution ( $P_i=179.8\text{kPa}$ ,  $T_i=35^\circ\text{C}$ )

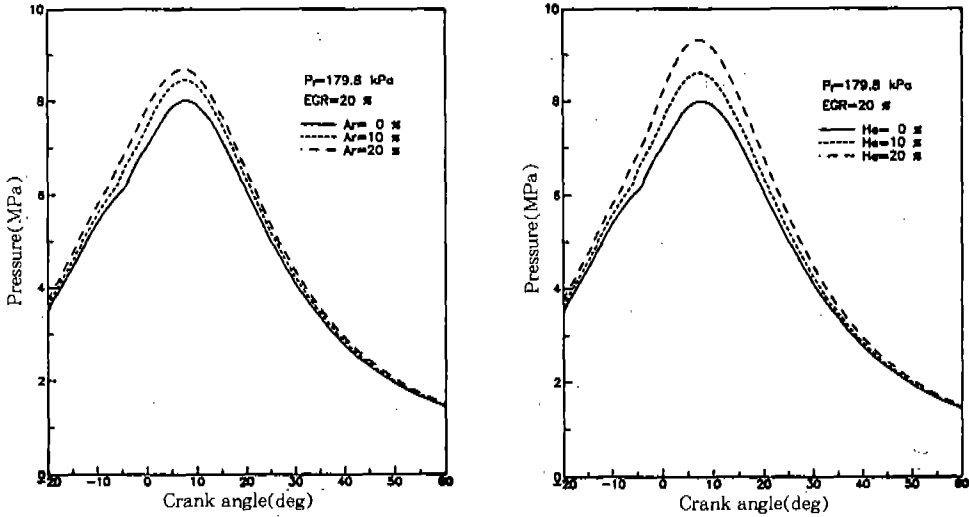


Fig.15 Cylinder Pressures for the Argon and Helium Dilution ( $P_i = 179.8\text{kPa}$ ,  $T_i = 35^\circ\text{C}$ ,  $\text{EGR} = 20\%$ )

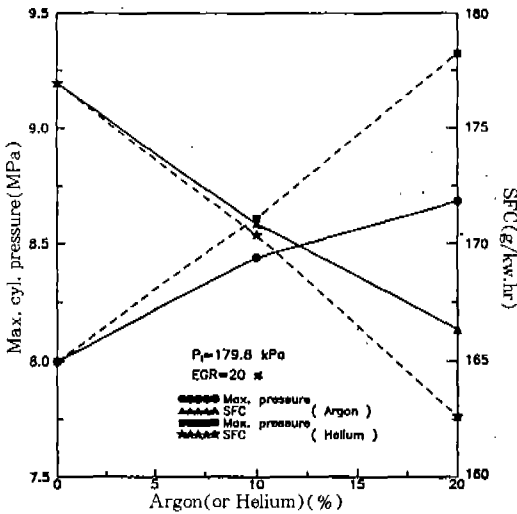


Fig.16 Dilution Effects on Peak Cylinder Pressures and Specific Fuel Consumption ( $P_i = 179.8\text{kPa}$ ,  $T_i = 35^\circ\text{C}$ ,  $\text{EGR} = 20\%$ )

Fig.15는 흡기의 초기압력이 179.8kPa이고 EGR율이 20%인 상태에서 신기에서 질소 대신 알곤과 헬륨을 첨가제로 사용했을 경우 실린더내의 압력변화를 나타낸다. Fig.15에서 보는바와 같이 Ar의 농도를 10% 증가시켰을 경우는 표준공기상태 ( $O_2 = 21\%$ ,  $N_2 = 79\%$ )에서의 최고압력인 8.5MPa에 해당하는 최고압력을 얻을 수

있었고 He에 비해 Ar으로 대체했을 경우는 최고압력이 상대적으로 낮게 상승함을 알 수 있다. 헬륨의 영향을 살펴보면 분자량이 작은 헬륨의 농도증가에 따라 엔진내의 평균비열비가 크게 상승하므로 EGR의 사용으로 감소된 연소특성을 보상함으로써 연소실내의 최고압력의 증가와 점화지연의 단축을 가져온다. Fig.16은 흡기의 초기압력이 179.8kPa이고 EGR율이 20%인 상태에서  $N_2$  대신 사용된 불활성가스인 알곤과 헬륨의 농도가 연소실 최대압력과 단위출력당 연료소비율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 알곤과 헬륨의 농도를 20%까지 증가시켰을 경우 각각 8.7MPa과 9.3MPa의 최고압력을 얻을 수 있었고 연료소비율의 경우 알곤이나 헬륨을 첨가하지 않은 경우에 비해 각각 약 7%와 9%의 감소를 가져와 엔진성능의 향상을 가져왔다. 이와같은 성능향상에는 EGR을 사용하지 않았을 경우와 마찬가지로 헬륨의 경우가 더 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

Fig.17은 EGR율이 20%인 경우 ( $O_2 = 16.8$ ) 흡기에서 질소 대신 대체된 알곤의 농도가  $NO_x$  및 Soot의 생성에 미치는 영향을 보여준다. 그림에서 보듯이 알곤의 농도가 증가함에 따라 엔진 내부의 평균비열비의 증가로 연소실 최고압력 및 연소실온도가 상승하여  $NO_x$ 의 양은 증가함을 보

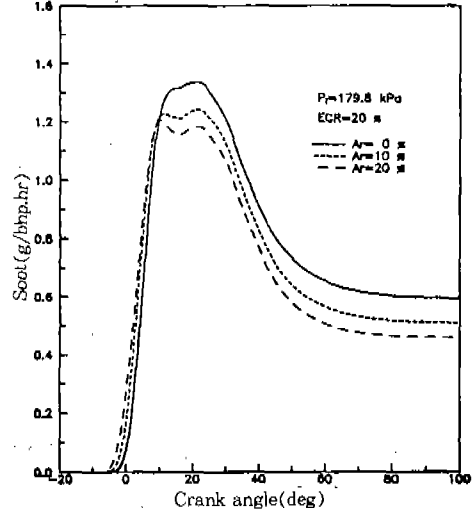
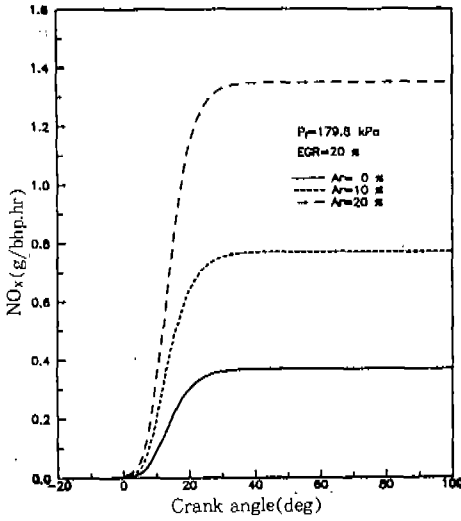


Fig.17 NO<sub>x</sub> and Soot Histories for the Argon Dilution( $P_i=179.8\text{kPa}$ ,  $T_i=35^\circ\text{C}$ , EGR=20%)

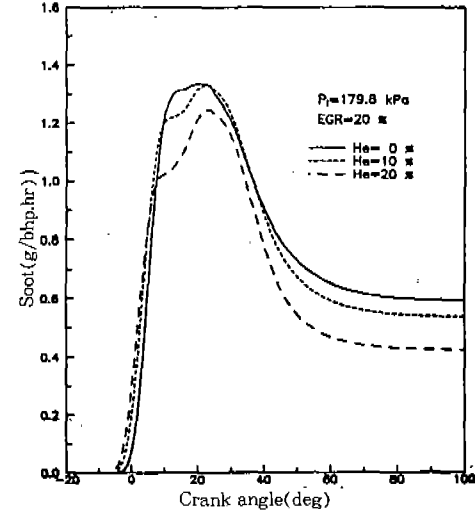
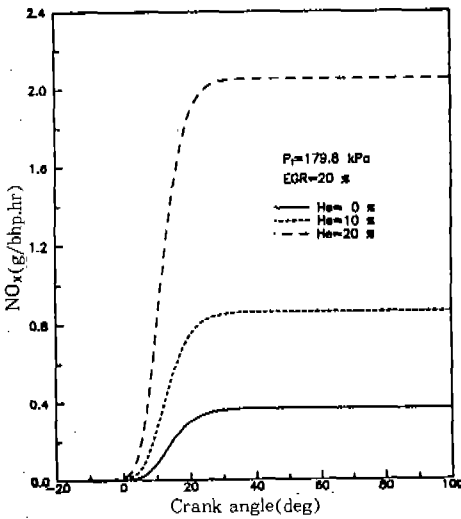


Fig.18 NO<sub>x</sub> and Soot Histories for the Helium Dilution( $P_i=179.8\text{kPa}$ ,  $T_i=35^\circ\text{C}$ , EGR=20%)

이나 EGR율이 0%인 경우 알곤의 농도가 20% 일 때의 NO<sub>x</sub> 배출량(9.5g/bhp.hr)에 비해 현저 히 낮은 배출량(1.35g/bhp.hr)을 볼 수 있다. 알 곤의 농도가 증가함에 따라 향상된 연소특성으로 인해 연소후반부에서 Soot의 산화율이 증가하므 로 EGR율이 0%인 경우에 비해 알곤의 농도증 가에 따른 Soot 배출량의 감소율이 증가함을 알 수 있다.

Fig.18은 EGR율이 20%인 경우( $O_2=16.8$ ) 흡기에서 질소 대신 대체된 헬륨의 농도가 NO<sub>x</sub> 및 Soot의 생성에 미치는 영향을 보여준다. NO<sub>x</sub>의 양이 헬륨을 첨가하지 않은 경우에 비해 상대 적으로 큰 상승을 보이고 있으나 앞서 살펴본 알 곤의 경우와 마찬가지로 헬륨을 20%까지 증가 시켰을 경우 연소종결후의 평형값이 EGR율이 0 %인 경우의 배출량(12.5g/bhp.hr)에 비해 80

%가량 크게 감소된 배출량(2.5g/bhp.hr)을 얻었다. Soot의 발생량은 헬륨의 농도가 증가함에 따라 감소하며 He의 10% 첨가에 비해 20% 첨가인 경우가 Soot 배출량이 크게 저감됨을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

터보과급 및 EGR을 사용하는 디젤엔진의 연소과정과 매연가스 배출특성에 대한 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 엔진작동시 EGR을 통해 배기가스로 부터 첨가된 CO<sub>2</sub>는 연소실내의 평균비열비를 낮춤으로 연소실온도 및 엔진의 연소특성을 저하시키나 알콘과 헬륨의 첨가는 엔진내부의 평균비열비를 증가시켜 연소특성을 향상시킴으로써 EGR을 통해 저하된 엔진 성능을 향상시키게 된다.
- 2) EGR을 사용하는 직접분사식 디젤엔진에서 흡기의 초기압력이 179.8kPa이고 EGR율이 20%인 경우 흡기에서 질소 대신 알콘과 헬륨을 대체하여 사용했을 때 알콘의 농도를 10%로 증가시키기에 따라 표준공기상태(O<sub>2</sub>=21%, N<sub>2</sub>=79%)에서의 최고압력인 8.5MPa에 해당하는 최고압력을 얻음으로써 EGR에 의해 떨어진 엔진성능을 향상시킬 수 있었다. 또한 Ar과 He첨가제의 농도증가에 따라 엔진내의 평균비열비가 크게 상승하므로 점화지연이 단축되고 최고압력이 증가되어 단위출력당 연료소비율이 감소되어 첨가제를 사용하지 않은 경우에 비해 엔진성능의 현저한 향상을 나타내었다. 이와같은 Ar과 He첨가에 의한 성능향상은 EGR을 사용하지 않았을 경우에도 비슷한 경향이 나타났으며 He첨가의 경우가 더 큰 효과가 있음을 알 수 있었다.
- 3) EGR율이 20%인 경우(O<sub>2</sub>=16.8) 흡기에서 첨가된 알콘과 헬륨이 NO<sub>x</sub> 및 Soot의 생성에 미치는 영향을 보면 알콘과 헬륨의 농도가 10%인 경우 발생된 NO<sub>x</sub>의 양이 두배이상 증가했고 분자량이 작고 평균비

열비가 큰 He을 첨가하는 경우가 NO<sub>x</sub>의 배출량이 Ar을 첨가하는 경우보다 높게 나타났다. 그리고 첨가된 알콘과 헬륨의 농도가 20%인 경우는 10%인 경우에비해 NO<sub>x</sub>배출량은 크게 증가하고 Soot의 배출량은 감소하게 됨을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소와 교육부(기계공학 연구지원 사업)에 의해 지원되었고 수치계산은 시스템공학센터의 Cray C-90 Supercomputer를 사용하여 수행하였으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Y. M. Kim, Y. D. Kwon, H. J. Kim, and S. W. Kim, "Numerical Study on Ignition and Combustion Process of a Diesel Spray in EGR Environment", SAE Paper 960874, 1996.
2. 김용모, 권영동, 김세원, "직접분사식 디젤엔진의 매연가스 배출특성과 엔진성능에 미치는 분사압력의 영향", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집 vol.2, pp.443~450, 1996.
3. S. W. Kim, J. K. Lee, and J. M. Lim, "A Theoretical & Experimental Studies on the Performance of Diesel Engine with Artificial Air Intake", SAE Paper 931898
4. Uchida N., Daisho Y., Saito T., and Sugano H., "Combined Effects fo EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emissions", SAE Paper 930601
5. Saito, T., Daisho, Y., Uchida, N., Ikeya, N., "Effects of Combustion Chamber Geometry on Diesel Combustion", SAE Paper 861186, 1986.
6. J. O. Chae, Jianwen Li, J. K. Park., Y. J. Choi., S. M. Lee, and Y. S. Jeong, "Effect



- of Intake Composition on Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine at High Intake Pressure”, Third KSME-JSME Thermal Engineering Conference (1996), vol.2, pp.213~218.
7. Reitz, R. D., “Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays”, *Atomization and Spray Technology*, 3, pp.309~337. 1987.
  8. Halstead, M., Kirsh, L., and Quinn, C., “The Autoignition of Hydrocarbon Fuels at High Temperatures and Pressures-Fitting of a Mathematical Model”, *Combust. Flame*, 30, pp.45~60. 1977.
  9. Schaperton, H., and Lee, W., “Multidimensional Modeling of Knocking Combustion in SI Engine”, SAE Paper 850502, 1985.
  10. Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., “On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion”, *16th Symposium on Combustion*, Combustion Institute, pp. 719~729, 1976.
  11. M. A. Patterson, S. C. Kong, G. J. Hampson, and R. D. Reitz, “Modeling the Effects of Fuel Injection Characteristics on Diesel Engine Soot and NO<sub>x</sub> Emissions”, SAE Paper 940523, 1994.
  12. Faeth, G. M., “Mixing, Transport and Combustion in Spray”, *Prog. Energy Comb. Sci.*, 13, pp.293~34, 1987.
  13. O'Rourke, P. J., “Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays”, Los Alamos Laboratory report LA-9069-T, 1981.
  14. J. D. Naber and R. D. Reitz, “Modeling Engine Spray/Wall Impingement”, SAE Paper 880107, 1988.
  15. Abramzon, B. and Sirignano, “Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations”, AIAA Paper 88-0636, 26th Aerospace Science Meeting, 1988.
  16. Bowman, C. T. “Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 1, pp.33~45, 1975.
  17. 김용모, 권영동, 김후중, 김세원, “Diesel Spray의 점화와 연소특성 해석”, *한국자동차 공학회논문집*, vol.5, no.1, pp.15~26, 1997.