

대형 디젤 엔진의 연료 분사 노즐 형상이 NO_x 발생량 및 연료소비율에 미치는 영향 연구

윤옥현[†] · 김기두* · 하지수*

(원고접수일 : 2004년 7월 2일, 심사완료일 : 2004년 9월 2일)

A Study on the Optimization of Fuel Injection Nozzle Geometry for Reducing NO_x Emission in a Large Diesel Engine

Wook-Hyeon Yoon[†] · Ki-Doo Kim* · Ji-Soo Ha*

Abstract : Numerical simulations have been carried out to investigate the effect of nozzle hole geometry on the combustion characteristics of the large diesel engine, 6S90MC-C. Spray and combustion phenomena were examined numerically using FIRE code. Wave breakup and Zeldovich models were adopted to describe the atomization characteristics and NO_x formation processes. Predictions on the cylinder peak pressure and NO_x emission were first verified with the experimental data to confirm the reliability of numerical calculations. The comparison results showed good agreements within the range of 0.64% and 4.6% respectively. Finally, the effects of fuel spray angle and diameter on the engine performance were investigated numerically to find the optimum nozzle hole geometry considering fuel consumption, NO_x emission and heat flux of the combustion chamber wall. It was concluded that the combustion gas recirculation in cylinder by changing fuel injection direction is an effective method to reduce NO_x emission by about 10% with increasing fuel oil consumption, 1.4% in a large diesel engine.

Key words : Fuel Spray Angle(연료분사방향), Nozzle Hole Diameter(노즐 홀 직경), Droplet Breakup Model(액적분열모델), Fuel Consumption(연비), NO_x(질소산화물)

1. 서 론

세계적으로 내연기관에 대한 배기가스 오염 물질 규제는 점차 심화되어 엔진 설계 및 제작자에

게 가장 중요한 문제가 되었다. 선박용 주기관 및 육상용 내연 발전으로 많이 사용되고 있는 대형 디젤 기관도 배기 가스 오염 물질 저감을 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 더불어 연료소비율 및 연소실 주요 부품의 열부하가 증가 되지 않도록

[†] 책임저자(현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실), E-mail : whyoun@hhi.co.kr, T : (052)230-3227
* 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실

록 하기 위한 연구도 병행되고 있다.

배기가스 오염 물질은 주로 연소실에서의 연소에 의해 발생하며, 특히 주요 규제 대상인 질소산화물(NOx)은 연소를 개선함으로써 많은 양을 줄일 수 있으며 별도의 장치가 필요하지 않은 장점이 있다. 대형 디젤 엔진의 연소 개선을 위한 방법에는 연료 노즐의 형상, 엔진의 압축비, 연소실 형상, 배기 밸브 Timing, 흡기 압력 및 온도를 최적화하는 것 등이 있다. 이중, 매우 큰 연소실 공간, 2개 이상의 연료 노즐 및 연소실 내의 강한 공기 유동 등의 대형 엔진이 가지는 특징으로 인해 연료 노즐 홀의 방향과 지름의 변경이 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. 이는 연료 노즐 홀의 방향과 지름이 분사된 연료 분무의 도달거리(penetration)와 위치를 결정하고 연료의 증발과정, 공기와의 혼합 및 연소에 영향을 주기 때문이다. 그러나 2 사이클의 특성과 3차원적인 디젤 연료의 분무 및 공기 유동 특성에 영향을 받는 대형 디젤 기관의 연소를 이해하고 연료소비율 및 열부하를 만족시키면서 배기가스 오염 물질 저감 방안을 도출하는 것은 어려운 문제이다. 이의 해결에는 컴퓨터에 의한 3차원 연소 해석 방법이 유용하다.

본 연구에서는 대형 디젤 기관인 6S90MC-C에 대해 3차원 연소 해석을 수행하여 실험 결과와 비교를 통해 신뢰성을 평가하였다. 또한 연료 노즐의 분사방향 및 노즐 홀 지름에 따른 엔진 연소 및 성능 특성을 검토하여 연료소비율과 NOx 발생량이 최적화되는 노즐 형상을 도출하였다.

2. 연소해석 검증

2.1 수치해석 모델

2.1.1 액적 분열 모델(Droplet Breakup Model)

연료 액적과 주위 기체와의 모멘텀 교환에 기인한 액적분열을 모사하기 위하여 Reitz가 제시한 WAVE 분열 모델을 사용하였다^[1]. Reitz는 blobs(노즐출구직경과 같은 크기의 액적)이 분사되고 blobs이 깨져서 새로 생성되는 액적들의 크

기는 blobs의 표면에서 발생하는 불안정한 파동(wave)의 파장(wavelength)에 의해 결정된다고 보고 다음과 같은 식을 제시하였다.

Rayleigh:

$$r = \min \left[\frac{(3\pi a^2 W / 2\Omega)^{0.33}}{(3a^2 A / 4)^{0.3}} (B_0 A > a) \right] \quad (1)$$

Stripping:

$$r = B_0 A \quad (B_0 A \leq a) \quad (2)$$

여기서, $B_0 = 0.61$, r = 자액적(product drop) 반지름, a = 모액적(parent drop) 반지름, Ω = 파의 최대 성장률(maximum growth rate), A = 파의 최대 성장률에 해당하는 파장이다.

그리고, N_0 개의 액적들이 있는 모액적의 시간에 따른 반지름 변화율은 Reitz와 Diwakar^[2]가 표현한대로 다음과 같다.

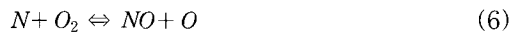
$$\frac{da}{dt} = -(a - r) / \tau \quad (r \leq a) \quad (3)$$

$$\tau = 3.726 B_1 a / A \Omega \quad (4)$$

(4)식의 액적분열시간(τ)을 결정하기 위해서는 상수 B_1 의 값을 알아야하는데 이 값은 연료분무 가시화 실험^[3]에 의해 도출하였다.

2.1.2 NOx 생성 모델(NOx Formation Model)

NOx 생성의 반응 메카니즘은 열적 NO 생성을 표현하는 extended Zeldovich 메카니즘을 사용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.



NO는 당량비가 0.9 근처인 연료가 약간 희박한 상태에서 최대값을 가진다. 대부분의 이론 당량비 및 연료가 희박한 화염에서는 OH의 발생이 매우 작기 때문에 Zeldovich 메카니즘의 (7)식은 무시할 수 있다. 그리고 열적 NO가 생성되는 시간은

연소가 일어나는 시간보다 매우 느리기 때문에 연소 및 NO 생성 과정은 분리될 수 있다고 가정할 수 있다. 이 가정이 사용되면 (5)와 (6)식은 부분 평형(partial equilibrium)에 있다고 할 수 있고 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$N_2 + O_2 = 2NO \quad (8)$$

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_f[N_2][O_2] \quad (9)$$

$$k_f = \beta_{NO} \frac{A_{NO}}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

여기서, k_f = 정반응의 반응률, β_{NO} = 보정계수, A_{NO} = pre-exponential factor, E_a = 활성화 에너지, R = 일반기체상수, T = 온도이다.

Table 1 Summarization of sub-models

Physical phenomena	Model
Spray breakup	WAVE breakup ^[1]
Spray-wall impingement	Senta et al. ^{[4][15]}
Drop drag	Schiller & Naumann ^[6]
Drop evaporation	Dukowicz ^[7]
Drop coalescence & collision	Dukowicz ^[8]
Ignition	Theobald & Cheng ^[9]
Combustion	Eddy breakup ^[10]
NOx formation	Zeldovich[eqn. (9)]
Turbulence dispersion	Gosman & Ioannides ^[11]

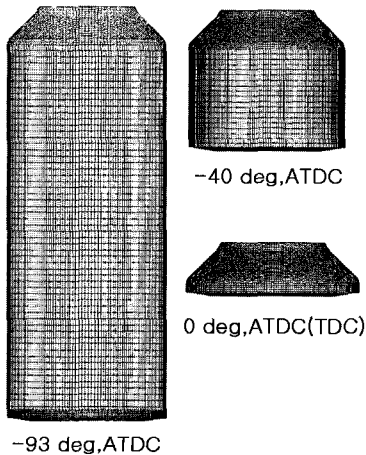


Fig. 1 Moving mesh generation

본 연구의 3차원 연소해석에 사용된 전산해석도구는 AVL에서 개발한 FIRE code이고 여기에서 사용된 모델들은 Table 1에 요약하였다. 피스톤의 움직임을 모사하기 위한 이동격자는 Fig. 1에 나타내었고, 해석 구간은 배기밸브가 닫힌 후부터 (-93도 ATDC) 열리기 전까지(98도 ATDC)이다.

2.2 해석 결과

6S90MC-C 엔진에 대해 3차원 연소 해석을 수행하였으며, 주요 해석 조건 및 엔진 사양은 Table 2에 나타내었다. 초기 조건 및 연료분사량은 실험 조건에 의한 것이다.

Table 2 Engine specifications

Engine	6S90MC-C
Bore	900 mm
Stroke	3188 mm
Connecting rod length	3270 mm
Load	100%
RPM	76
Initial Conditions	4.34 bar, 360 K at -93° ATDC
Fuel Injection Rate	196.9 g/cylinder/cycle
Injection Start	-1.4° ATDC

연료분사 노즐은 Fig. 2와 같이 한 실린더에 2개가 있으며 각 연료분사 노즐은 5개의 노즐 홀(nozzle hole)을 갖는다. 각 노즐 홀은 연소실에서 연료 분사 방향이 각각 다르며, 이는 공기와 적절한 혼합을 위한 것이다.

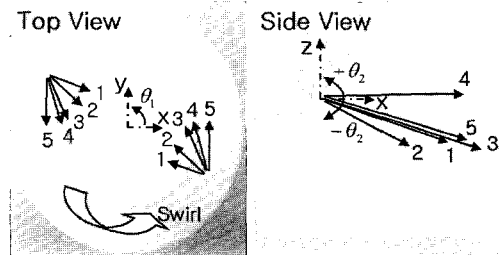


Fig. 2 Fuel spray angles

노즐 홀 5번은 라이너 벽면을 향하고 있고, 4번은 상부의 연소실로 향하고 있다. 연료의 분무 방향은 소기구에 의해 생성되는 연소실 내 스윙 방향과 같으며, 연소실 벽면의 온도 경계조건은 기존 측정된 결과를 이용하여 설정하였다.

연소 해석 결과의 연소실 압력 데이터를 실험 결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림과 같이 최대 연소실 압력은 0.64% 이내의 오차를 가지며, 전체적인 압력 경향도 매우 유사하다. NOx 발생량에 대한 계산 및 측정 결과는 Fig. 4에 나타내었으며, 약 4.6%의 오차 범위에서 잘 일치하였다.

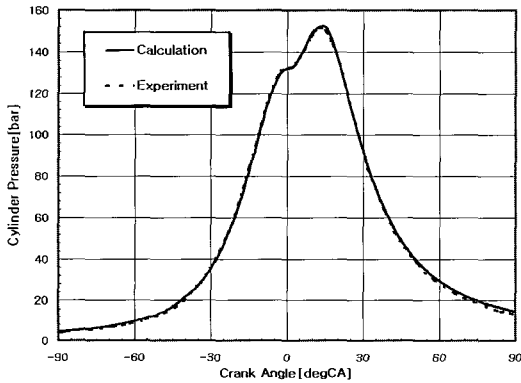


Fig. 3 Predicted and measured cylinder pressure

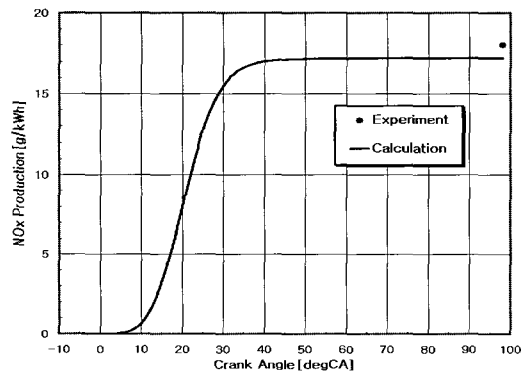


Fig. 4 Predicted and measured NOx production

Fig. 5에 피스톤 상부면의 반경방향에 따른 온도 측정 및 계산 결과를 나타내었다. 실험 결과는 피스톤 상부 표면에서 측정된 평균 온도이고, 계

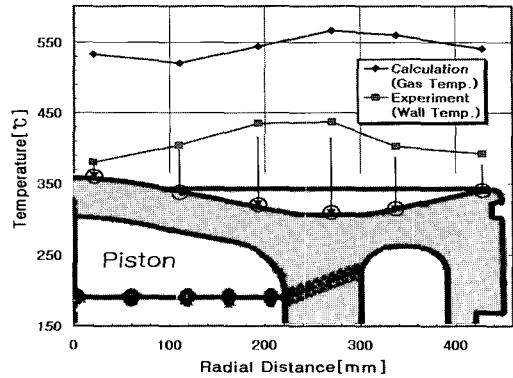


Fig. 5 Comparison of the piston gas-side temperature(Calculation) with piston wall temperature(Experiment)

산 결과는 피스톤 상부 표면에 접하는 가스 측 평균 온도이다. 전체적인 경향은 서로 잘 일치하고 있는데, 이는 가스 측 온도로부터 피스톤 표면으로 열전달이 이루어짐을 감안할 때, 실린더 내 연소계산이 공간적으로 정확히 모사되고 있음을 보여주고 있다.

3. 연료분사 방향 및 지름 변경 해석

3.1 해석 모델

연료분사 노즐 홀의 분사 방향 및 지름에 따른 엔진의 연소 및 성능 특성을 평가하기 위해 6S90MC-C 엔진에 대한 연소 해석을 수행하였다. 변경된 노즐 사양은 Table 3에 나타내었고, 실린더 원주방향으로의 노즐 홀의 분사 방향 변화 (θ_1)는 Fig. 6에 나타내었다. 기존의 형상인 Case 1에 비해 Case 2는 1번 노즐 홀의 분사 방향을 연소실의 스윙(Swirl) 방향과는 반대로 하고 나머지 노즐 홀의 방향은 Case 1과 동일하게 하였다. 이는 1번에서 분사된 연료가 연소되면 그 연소된 영역으로 다른 편 3, 4, 5번 연료 분사 노즐에서 분사된 연료의 연소 가스가 서로 만나면서 연소가 이루어지도록 한 것이다. 이때 이 연소 영역은 다른 연료 분사 노즐의 연소가스에 의한 CGR (Combustion Gas Recirculation)의 효과로 NOx 발생량이 저감될 것으로 기대 된다.

Case 3은 노즐 홀 1번을 Case 2보다 중심을 향하도록 하였으며, 2번을 1번과 더 가깝게 하였다. 이에 따라 1번 노즐에서 분사된 연료의 연소 가스는 다른 편 노즐 3~5번 홀에서 분사된 연료와 만나며, 또한 이 연소 가스는 스윙의 영향에 의해 원주 방향으로 회전하게 되어 Fig. 6과 같이 다른 편 노즐 2번 홀에서 분사된 연료와 만나 내부 연소가스 재순환에 의한 NOx 저감 효과가 기대된다. 그리고 1 및 다른 편 노즐 2번에서 연소된 가스는 원주 방향으로 회전하면서 다른 노즐에 연소가스 재순환의 효과를 가져와 NOx 저감의 효과가 기대되며, 공간적으로도 기존의 Case 1보다는 연소실 공기를 효과적으로 이용할 것으로 판단된다.

Table 3 Fuel spray angles of each case

Hole No.		1	2	3	4	5
Case 1 (ref.)	θ_1	163	138	112	105	83
	θ_2	-12	-16	-11	+1	-8
Case 2	θ_1	213	138	112	105	83
	θ_2	-12	-16	-11	+1	-8
Case 3	θ_1	200	143	112	105	83
	θ_2	-19	-16	-12	+1	-8

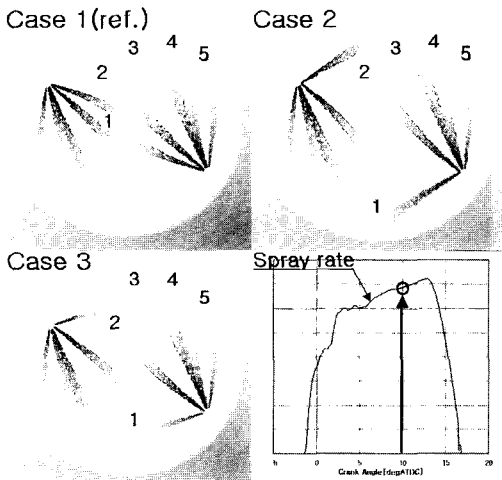


Fig. 6 Top view of the fuel spray direction

1번 노즐 홀의 지름은 3번 노즐 홀에서 분사되는 연료와 충돌이 발생하지 않도록 지름을 1.8mm에서 1.5mm로 줄였고, 동일한 노즐 출구 면적을 위해 2 및 3번 노즐 홀은 1.9mm에서 2.0mm로 증가시켰다.

3.2 해석 결과

각 Case에 대한 열발생을 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 각 Case의 열발생을 비교해 보면, Case 2 및 3은 초기에 Case 1과 유사한 연소 형태를 보이나, 크랭크 각도 9도 정도 이후에는 Case 1에 비해 더 많은 연소가 발생한다. 이는 Case 2 및 3인 경우가 1 및 2번 노즐 홀에서 분사되는 연료 액적이 공간적으로 잘 분포하기 때문이다. 크랭크 각도 13도 부근에서 열발생율은 최대 값을 보이며, Case 2가 Case 3보다는 낮은데, 이는 Case 3 노즐의 1 및 2번이 Case 2 노즐의 1 및 2번 보다는 공간적으로 잘 분포해 있기 때문으로 판단된다. 크랭크 각도 17도 이후에는 Case 1의 경우 보다 나머지 두 경우의 연소가 적게 이루어지며, 이는 초기에 연소가 많이 이루어진 결과에 기인한다.

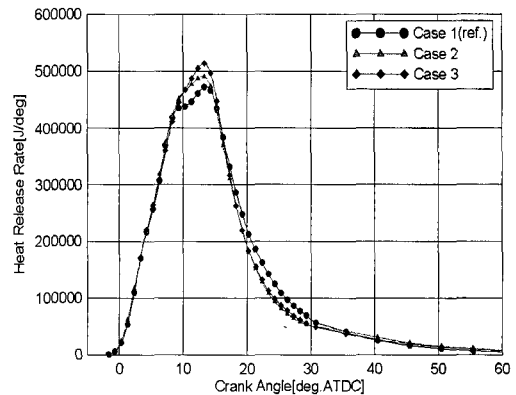


Fig. 7 Predicted heat release rate

Fig. 8에 각 Case 해석 결과의 연소실 압력 데이터를 나타내었다. Case 1과 비교하여 보면, 나머지 두개의 경우는 열발생율의 영향을 받아 크랭크 각도 9도 이후 연소실 압력이 많이 높아지나,

크랭크 각도 24도 이후에는 낮아진다. 이는 Case 1번인 경우, 후반의 연소가 크기 때문이다. Case 2 및 3을 비교하여 보면, Case 3의 최대 값이 다소 높으며, 이후에도 계속 유지되어 연료소비율의 개선이 기대된다.

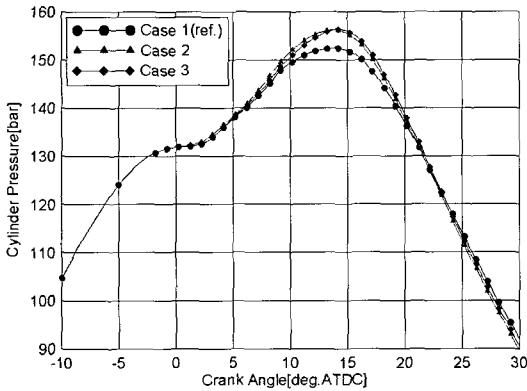


Fig. 8 Predicted cylinder pressure

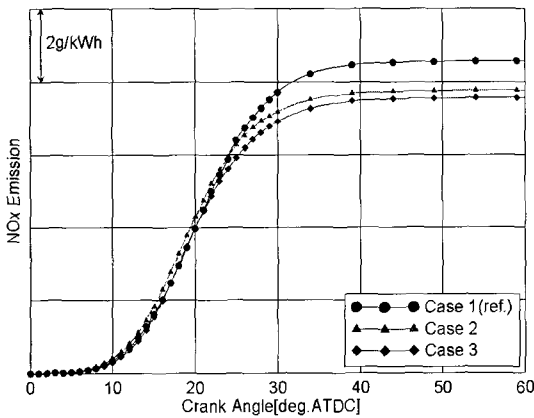


Fig. 9 Predicted NOx emission

Fig. 9에 각 Case의 NOx 생성량을 나타내었다. Case 1에 비해 Case 2 및 3인 경우, 크랭크 각도 20도 정도 이후 많은 감소를 보인다. 그리고 Case 2 및 3을 비교하여 보면, Case 3이 다소 적은 NOx 생성량을 보인다. 이의 원인을 살펴보기 위해 Fig. 10에 크랭크 각도 30도에서 연소실의 NOx 생성량 분포를 나타내었다. Case 2인 경우, Case 1보다 주요 NOx 생성영역의 스웰 방향에서 NOx가 많이 저감되었음을 알 수 있으며, 이

는 다른 편의 노즐 홀 1번에서 분사된 연료에 의한 연소가스에 기인하는 것으로 판단된다. Case 3인 경우는 Case 1 및 2보다는 주요 NOx 생성영역에서 NOx가 적음을 알 수 있으며, 이는 주 연소 노즐 홀인 3~5번에서 분사된 연료가 1 및 2번 노즐 홀에서 분사된 연료의 연소 가스와 만나는 내부 연소가스 재순환 효과 때문으로 판단된다.

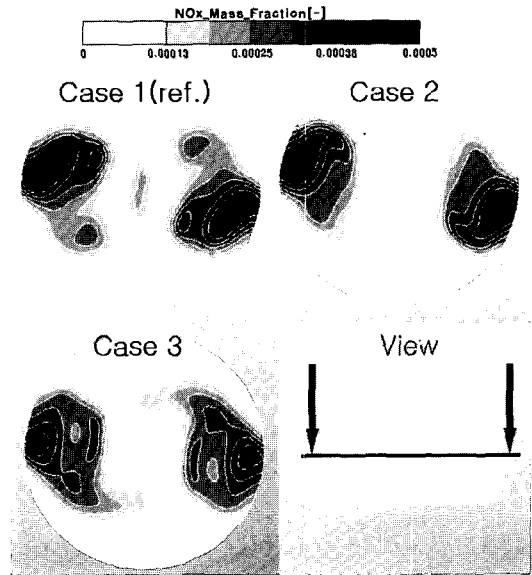


Fig. 10 Predicted NOx mass fraction

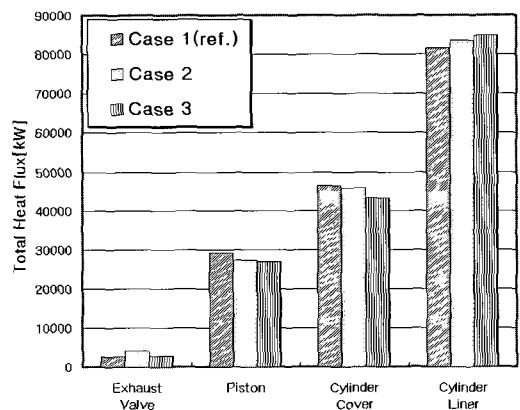


Fig. 11 Predicted total heat flux

Fig. 11에 각 Case에 대해 연소실 주위 부품으로 전달되는 전열량을 나타내었다. 피스톤과 실

린더 커버(Cover) 부위로의 전열량은 Case 2 및 3이 기존의 Case 1보다는 낮았으나, 라이너쪽으로는 더 많다. 열부하의 측면에서는 피스톤이 주요 평가 대상이므로 Case 2 및 3은 연소실 주위 부품의 열부하 문제는 없을 것으로 판단된다.

2. 본 연구에서 제시한 연료 노즐 형상으로 연료 소비율을 크게 악화시키지 않고 11% 정도의 NOx 저감 효과를 가져 왔다.

참고문헌

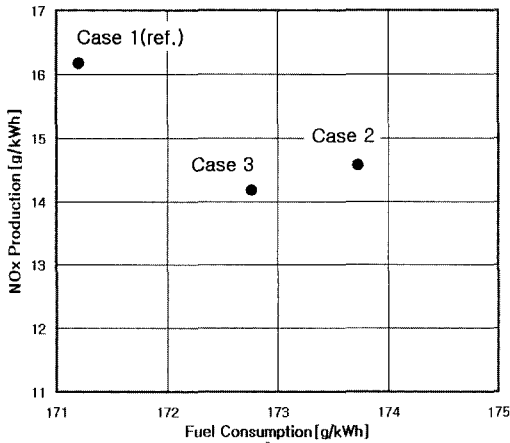


Fig. 12 NOx vs. fuel consumption trade-off points

Fig. 12에 각 Case에 대해 연료소비율 및 NOx 계산 결과를 나타내었다. Case 2의 NOx 생성량은 Case 1보다 1.6g/kWh 정도 감소되었으나 연료소비율은 2.5g/kWh 정도 증가되었다. Case 3의 NOx 발생량은 2g/kWh 정도 감소되었으나 연료소비율은 1.5g/kWh 정도 증가되었다. 이에 따라 11%정도의 NOx 저감을 가져온 Case 3이 Case 2보다 우수한 성능을 나타내었다.

4. 결 론

대형 디젤 기관인 6S90MC-C에 대한 3차원 연소 해석을 통해 연료분사 노즐 홀의 분사 방향 및 지름이 엔진 연소 특성 및 성능에 미치는 영향을 평가한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 연소실 최고압력, NOx 발생량의 해석결과는 실험치와 각각 0.64%, 4.6%내의 적은 오차를 나타내며, 피스톤 표면온도의 계산치는 실험 온도 값과 유사한 분포를 나타냄으로써 계산의 신뢰성을 검증하였다.

[1] Reitz, R. D., "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays", Atomization and Spray Technology, vol. 3, 1987, pp. 309-33

[2] Reitz, R.D. and Diwakar, R., "Structure of High-Pressure Fuel Sprays", SAE paper 870598, 1987.

[3] Kim, J.Y., Yoon, W.H. and Ha, J.S., "A Study on the Numerical Prediction of Heat Release Rate and NOx Production in Medium-Speed Marine Diesel Engines", ASME ICED/RTD Fall Technical Conference, Erie, Pennsylvania, 2003, p. 137.

[4] Senda, J., Kobayashi, M., Iwashita, S., and Fujimoto, H., "Modeling on Diesel Spray Impinging on Flat Wall", Int. symposium COMODIA 94, 1994, pp. 411-416.

[5] Senda, J., Kobayashi, M., Iwashita, S., and Fujimoto, H., "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall", SAE paper 941894, 1994.

[6] Schiller, L. and Naumann, A.Z., VDI 77, 1993, pp. 318-320.

[7] Dukowicz, J.K., "Quasi-steady droplet change in the presence of convection, informal report Los Alamos Scientific Laboratory", LA7997-MS.

[8] Dukowicz, J.K., "A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays", J. Comp. Physics, vol. 35, 1980, pp. 229-253.

[9] Theobald, M.A. and Cheng, W.K., "A Numerical Study of Diesel Ignition",

Energy-sources technology conference and exhibition, 87-FE-2, 1987.

- [10] Magnussen B.F. and Hjertager B.H., "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", Sixteenth International Symposium on Combustion, 1977.
- [11] Gosman, A.D. and Ioannides, E., "Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors", AIAA, 1981, pp. 81-323.

저 자 소 개



윤옥현 (尹旭鉉)

1970년 8월생. 1997년 울산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1999년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사). 1999년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



김기두 (金基斗)

1968년 1월생. 1990년 충북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1992년 한양대학교 기계공학과 졸업(석사). 1992년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



하지수 (河芝洙)

1960년 6월생. 1983년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사). 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(박사). 1991년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.