

## 천연가스의 고압 간접 분사에 따른 과소 팽창 제트의 충격파 구조와 천이 거동에 관한 수치적 연구

문성준 · 정수진\*

한국자동차연구원 하이브리드동력센터

### Numerical Study on the Shock Wave Structure and Transitional Behavior of Under-expanded Jet for High-pressure Port Injection of Compressed Natural Gas

Seong-Joon Moon · Soo-Jin Jeong\*

Advanced Powertrain R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

(Received 29 November 2019 / Revised 15 January 2020 / Accepted 9 February 2020)

**Abstract** : To maximize the combustion efficiency of manifold port injection for the CNG(compressed natural gas) engine, the gaseous fuel should be injected at a high pressure using a gas injector, which allows for sufficient fuel supply and good mixture formation in the cylinder. In particular, the increase of the NPR(nozzle pressure ratio) because of the high-pressure injection causes shockwave formation near the nozzle exit as well as a change in the shock patterns in the gas jet. The characteristics of gas jets are regarded as a key design factor because they have a direct influence on the amount of fuel supply into the cylinder and on the mixture formation around the nozzle exit of the gas injector. The experiments for investigating the characteristics of shockwaves, however, are very expensive and time-consuming. Therefore, a three-dimensional numerical model was developed in this study to examine the characteristics of shockwave structures and the change in the shock of the underexpanded gas jet for various injection conditions, using DES(detached eddy simulation) based on the Eulerian approach. In addition, the analysis results were verified by comparing the penetration length with the test results of the previous studies [10]. The obtained computation result is in good agreement with the experimental value, with a less than 5 % difference. It can be found that the normal pattern of repeated barrel shockwaves, the regular reflection pattern with reflection shock added, and the Mach disk pattern with Mach disk shock, are successively generated as the NPR increases. Additionally, this study investigated the effect of geometrical modification on the shock structure by comparing two different geometries: a flattened nozzle exit and an inner-stepped nozzle exit. For the results, Mach disks started to emerge over an NPR of 3.37 in the case of the flattened nozzle exit. On the other hand, in the case of the inner-stepped nozzle exit, Mach disks began to occur when the NPR was over 6. The study results show that the inner-stepped nozzle exit has a much stronger Mach disk inhibition effect, resulting in good mixture formation even at higher NPR conditions compared with the flattened nozzle exit.

**Key words** : Compressed natural gas engine(압축천연가스엔진), Under-expanded nozzle(과소 팽창 노즐), Under-expanded jets(과소 팽창 제트), Shock waves(충격파), Shock cell(충격파 셀), Transitional behavior(천이 거동), Detached eddy simulation(분리 와류 모사)

### 1. 서론

최근 자동차 및 선박 관련 산업은 화석연료의 사용에 따른 환경오염과 에너지자원 고갈 문제를 해결하기 위하여 다양한 친환경 플랫폼이 중심이 되는 새로운 시장으로의 변화에 직면하고 있다. 그러나 이러한 변화에 대응

하기 위해서는 친환경차의 성능과 안전, 가격, 인프라 등에 관한 문제가 해결되어야 한다. 청정연료를 사용하는 대체연료 엔진은 이러한 문제를 빠른 시간 안에 해결할 수 있는 가장 현실적인 대안으로 주목받고 있다.

가장 유망한 대체연료로 알려진 천연가스는 풍부한

\*Corresponding author, E-mail: [sjjeong@katech.re.kr](mailto:sjjeong@katech.re.kr)

\*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

매장량과 배출가스의 청정성으로 인해 중장기적인 화석 연료의 대안으로 인식되고 있다. 천연가스를 연료로 사용하는 불꽃점화방식의 엔진은 공기연료비율(공연비, air/fuel ratio)이 엔진 성능에 큰 영향을 준다. 따라서 이와 관련된 많은 연구가 진행되었다.

천연 가스의 직접 분사(DI, Direct Injection)와 간접 분사(PI, Port Injection)는 가장 대표적인 가스 엔진의 연료 공급 방법이다.<sup>1,2)</sup> 직접 분사 방식에 적용하는 가스 분사 시스템은 가스 연료의 품질과 흡기 효율의 정확한 제어가 필요하기 때문에 높은 사양의 요구 조건에 부합해야 한다.<sup>3)</sup> 하지만 간접 분사 방식에서는 흡기 중에 가스 연료가 흡기 매니 폴더에 분사되며, 공기와 가스로 이루어진 혼합기가 실린더 내로 유입되기 때문에 연료 분사 시스템에 대한 요구 사양이 상대적으로 낮다.<sup>4)</sup> 그러나 간접 분사 방식에서는 불안정한 가스 분사량과 높은 사이클 변동(CCV, Cycle-to-Cycle Variations)을 겪는다. 간접 분사 방식에서는 혼합기의 상태에 따라 엔진의 연소 및 배출가스 특성이 결정되기 때문에 가스 엔진의 연소 성능 최적화를 위해서는 가스 분사기의 과소팽창 제트와 천이 거동에 대한 연구가 필요하다.

최근 들어, Vuorinen 등<sup>5)</sup>은 거대와류모사(LES, Large Eddy Simulation)와 레이저유도형광분석법(PLIF, Planar Laser-Induced Fluorescent)을 통해 고압 분사에 따른 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub> 가스 각각의 제트 특성을 비교 분석하고, 제트 침투, 가스 분사 압력과 실린더 압력 사이의 관계에 대한 연구를 수행하였다. Dong 등<sup>6)</sup>은 CH<sub>4</sub> 가스의 분사 실험 및 2차정도 상류차분법을 활용한 K-ε 난류모델을 사용하여, 마하 수(Mach number) 변화에 대한 과소팽창 제트의 충격과 구조와 비정상 거동이 가스 분사기의 제어에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. 그러나 이 논문에서 사용한 k-ε 난류모델은 본 연구와 유사한 축대칭 과소팽창 노즐의 압축성 제트류 해석에 적용했을 경우, 난류운동에너지를 과대평가하여 혼합율을 실험보다 높게 예측하는 약점이 있다.<sup>9)</sup> 따라서 많은 연구가 이 효과를 고려하기 위한 k-ε 모델의 수정에 집중되어져 왔다.<sup>9,12)</sup> 그러나 이러한 와점성계수를 국부적인 난류에너지의 최대값을 사용한 속도 스케일 및 난류 마하수의 함수로 모델링하는 방법은 벽 근처에서의 수치적 경직도를 높이므로 그 적용에 한계가 있는 것이 사실이다.

그러나 최근들어 LES와 DES 같은 고정도 난류모델의 상용화가 진행되면서 이들 모델의 적용 및 검증에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Mansouri 등<sup>7)</sup>은 스윙형 예혼합 버너에 분리와류모사

(DES, Detached Eddy Simulation)를 적용하여, 실험과 비교를 통해 DES 난류모델의 경쟁력을 입증하였고, 와류와 화염 간의 비정상적인 유동을 포착해서 난류와 화학반응 간의 상호 작용 여부를 검증하였다. 그리고 Bensayah와 Mahfoudi은 축대칭 과대팽창노즐에서 압축성 유동 특성을 전산모사하기 위해 K-Omega 모델과 DES 모델을 연계한 3차원 압축성 유동해석을 수행하여 노즐의 중심축 및 벽면근처에서의 마하수 분포를 예측하여 그 결과를 실험 및 기타 다양한 RANS 형태의 난류모델들과 비교를 통해 압축성 유동의 흐름 구조와 충격과 포착에 DES 모델의 높은 예측 정확도를 검증하였다.

따라서 본 연구에서는 DES 난류모델을 사용하여 간접 분사방식에서 고압 분사되는 가스의 노즐 분사 특성을 수치적으로 계산하였다. 가스 분사기의 노즐을 통해 고압 분사되는 가스는 과소팽창제트(Under-expanded jet)를 형성한다. 본 연구에서는 이 제트의 노즐압력비(NPR, Nozzle Pressure Ratio)에 따른 천이과정과 충격과 구조를 수치해석을 통해 면밀하게 분석하고, 노즐 주변의 벽면에 따른 공기 혼합 특성과 흡기 온도에 따른 공기 혼합 특성을 분석하였다. 이러한 분석 결과를 토대로 간접분사 방식에서 가스 분사기 노즐의 적절한 설계안을 제시하였다.

## 2. 수치 해석

### 2.1 해석 대상

가스 분사기는 솔레노이드 방식을 채택하고 있으며, 노즐 팁에 있는 4개의 홀에서 분사되는 가스는 원뿔형상의 분사 구조를 가진다(Fig. 1 참조). 노즐 팁의 최소목에서 순간적으로 응축된 가스는 노즐 출구로 분사된 이후에 급속히 팽창한다. 이때 형성되는 거대 와동은 과소팽창 제트를 형성하며, 노즐압력비(NPR, Nozzle Pressure Ratio)에 따라 가스 제트 내부의 충격과 구조는 크게 변화한다.<sup>9)</sup>

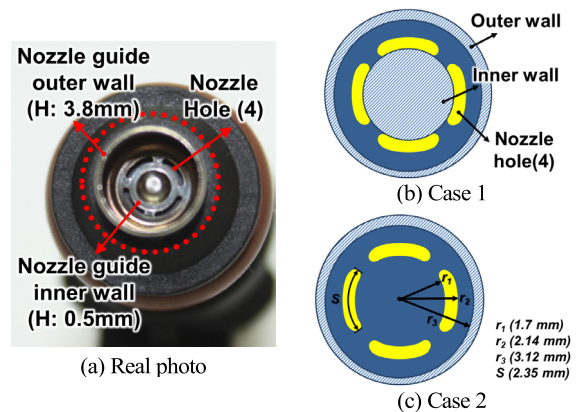


Fig. 1 Nozzle exit bottom view (with case 1, 2)

## 2.2 해석 모델

본 연구에서는 높은 레이놀즈수 유동에서 노즐 끝단 박리 영역의 비정상 난류 구조를 포착하기 위해 DES 모델을 사용하였다. DES 모델은 RANS 모델과 LES 모델을 결합한 형태로서, RANS 모델의 빠른 계산 속도와 LES 모델의 정밀한 유동 포착을 결합한 모델이다. 본 연구에서는 RANS K-Omega SST 모델의 변형인 K-Omega SST DES 모델을 적용하였다(Table 1 참조). 이 모델은 Wilcox K-Omega와 K-epsilon 모델을 결합한 하이브리드 모델로서 벽과의 거리에 따라 적절한 난류모델로 변환되고, 변환에 따른 수치적인 불안정성은 혼성함수를 통해 개선한 모델이다. 그리고 격자가 충분히 미세한 영역에서는 식 (1)과 같은 난류운동에너지를 위한 수송방정식에서 소산 부분이 수정되면서, DES 모델이 적용된다. k-equation 소산항에서 Omega는 아래 식 (2), (3)과 같이 대체된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{v}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] \quad (1)$$

$$+ P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k$$

$$\tilde{\omega} = \omega \phi \quad (2)$$

$$\phi = \max\left(\frac{l_t}{C_{DES^\Delta}}, F, 1\right) \quad (3)$$

여기서, 식 (1)의  $\bar{v}$ 는 평균 유속,  $\mu$ 는 동점도,  $\sigma_k$ 와  $\sigma_\omega$ ,  $C_{k1}$ 와  $C_{k2}$ 는 모델 상수,  $P_k$ 와  $P_\omega$ 는 생성항,  $f_{\beta^*}$ 는 자유 전단 수정계수,  $f_\beta$ 는 와류 신장 수정 계수,  $S_k$ 와  $S_\omega$ 는 소스 항,  $k_0$ 와  $\omega_0$ 는 주변 난류 값을 의미한다. 식 (3)의  $l_t$ 는 DES 모델의 난류길이척도(Turbulent length scale)로 식 (4)와 같고,  $\Delta$ 는 셀 중심과 인접 셀 중심 사이의 최대 거리이고,  $F$ 는  $1 - F_2$ 와 같으며, 여기서  $F_2$ 는 식 (5)와 같은 혼성함수이다.

$$l_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega} \quad (4)$$

$$F_2 = \tanh\left(\left(\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right)\right)^2\right) \quad (5)$$

여기서, 모델상수인  $\beta^*$ 는 0.09이고,  $d$ 는 벽면과의 거리를 의미한다. 식 (3)에서  $C_{DES^\Delta}$ 가  $l_t$  보다 크거나 같은 영역에서는  $\phi$ 가 1에 근사하기 때문에 RANS 모델로 처리되고,  $C_{DES^\Delta}$ 가  $l_t$  보다 작은 영역에서는  $\phi$ 가 1보다 커지므로 LES 모델로 계산된다. 모델상수인  $C_{DES}$ 는 식 (6)과 같이 K-Omega와 K-Epsilon의 혼합을 통해 평가된다.

$$C_{DES} = C_{DES,k-\omega} F_1 + C_{DES,k-\epsilon} (1 - F_1) \quad (6)$$

여기서, 모델상수인  $C_{DES,k-\omega}$ 는 0.78,  $C_{DES,k-\epsilon}$ 은 0.61이고,  $F_1$ 은 식 (7)과 같이 정의된다.

$$F_1 = \tanh\left(\left[\min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega d}, \frac{500\nu}{d^2 CD_{kw}}\right), \frac{2k}{d^2 CD_{kw}}\right)\right]^4\right) \quad (7)$$

여기서,  $d$ 는 벽면과의 거리,  $\nu$ 는 점도,  $CD_{kw}$ 는  $\max\left(\frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-20}\right)$ 와 같다.

## 2.3 해석 조건

본 연구에서는 천연가스의 노즐 분사 유동을 3차원 압축성 난류유동으로 전산모사하기 위해, 유한체적법(FVM, Finite Volume Method) 기반의 STAR-CCM+14.02를 사용하였다. 그리고 유동은 오일러리안 기반의 연속 상태를 가정하였고, 높은 레이놀즈수 유동에서 노즐 끝단 박리 영역에서 발생하는 비정상 난류유동을 면밀하게 분석하기 위하여, K-Omega SST 모델과 DES 모델을 연계하여 적용하였고, 정밀해를 산출하기 위해 2차정도 상류 차분법을 적용하였다(Table 1 참조). 해석 대상은 Fig. 2(a)와 같이 4개의 노즐 홀과 노즐 가이드, 챔버로 구성되었으며, 계산을 위해 Fig. 2(b)와 같이 3,478,441개의 육면체 격자(Polyhedral mesh)를 구성하였다. 그리고 노즐 홀과 노즐 가이드 주변의 비정상 유동을 포착하기 위해, 프리즘 형태의 격자를 배치하였다. 노즐 가이드 벽면은 단열 벽을 적용하였고, 입구와 출구 경계조건은 Table 1에 나타내었다. 그리고 시간간격은  $1.0 \times 10^{-5}$ s로 설정하였다. 한편, 작동유체인 천연가스의 화학적인 조성을 고려한 물성은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 96.51 % 메탄(CH<sub>4</sub>), 1.2 % 에탄(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), 0.18 % 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), 1.81 % 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 0.22 % 아산화질소(N<sub>2</sub>) 비율의 단상유동으로 계산한다. 천연가스와 공기의 상호관계(온도·압력·밀도)에 따른 계산을 위해 각각의 조성에 따른 비중을 고려한 다항식 만들어서 전산해석에 적용하였다(Table 1 참조).

## 2.4 해석 검증

상기와 같은 해석을 통해 산출한 해석 결과는 Yu 등<sup>10</sup>이 수행한 분사된 질소가스(N<sub>2</sub>)를 레이저유도형광분석법을 통해 가시화한 실험 결과와 비교하였다. Fig. 3은 동일한 인젝터에서 가스 공급압력 7 bar 일 때 분사기간 2.0 ms에서 분사된 가스의 농도 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 분사된 가스(N<sub>2</sub> 또는 CNG)의 분사 길이(Penetration length)는 가시성을 고려해서 농도 70 %를 기준으로 비교하였다.

Table 1 Numerical conditions

Analysis model					
Tool	STAR-CCM+14.02				
Boundary condition	Implicit unsteady				
Turbulence model	SST(Menter) K-Omega DES				
Difference method	2nd-order upwind scheme				
Time step	0.001 [msec]				
Boundary conditions					
Inlet static pressure [bar]	4, 5, 7, 9 (rail)				
Inlet temperature [°C]	25				
Outlet static pressure [bar]	0 (chamber)				
Outlet temperature [°C]	25, 50				
Inlet turbulent length scale [ $l_0$ ]	0.0847 mm				
Inlet turbulence intensity [ $I_0$ ]	0.15				
Working condition					
Working fluid	Nature gas, Air				
Temperature [°C]	24.0, 36.0, 48.0				
Pressure [bar]	4, 5, 7, 9 (rail)				
Nature gas properties					
Species	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
[%]	96.5	1.2	0.18	0.22	1.89
Density	Ideal gas(Compressible)				
Dynamic viscosity	Polynomial function(T)				
Specific heat					
Thermal conductivity					

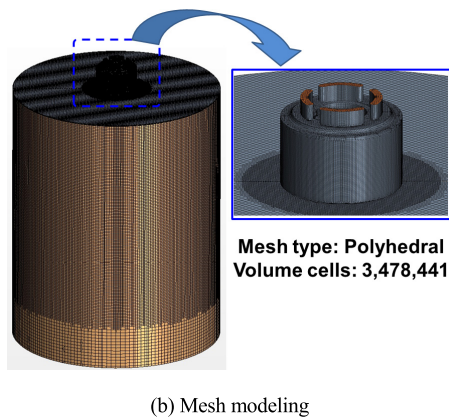
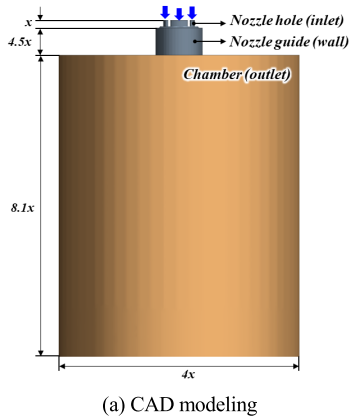


Fig. 2 CAD/Mesh modeling of gas injection chamber

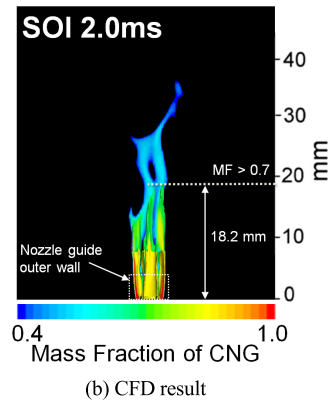
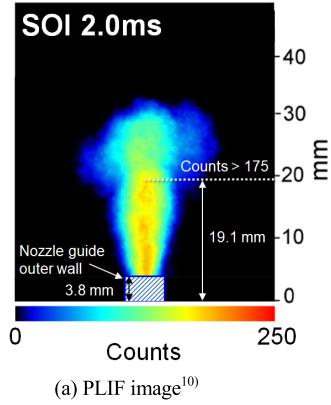


Fig. 3 Comparison of gas concentration fields and penetration length of injected gas using (a) tracer based PLIF<sup>10)</sup>, (b) K-Omega SST DES at 7 bar pressure (@ NPR 3.37)

Fig. 3(a)는 참고문헌 [10]의 가시화 결과로서 N<sub>2</sub> 가스의 농도 분포를 나타내며, 가스 분사 길이는 19.3 mm로 측정되었다. Fig. 3(b)는 본 연구의 해석 결과로서 공급압력 7 bar에서 CNG 가스의 농도 분포를 나타내며, 가스 분사 길이는 18.2 mm로 산출된다. 따라서 농도에 따른 분사 길이 오차는 4.7 % 수준으로 신뢰할 만하다고 판단하였다. 또한 Fig. 3(b)의 하단 부와 같이 노즐 가이드 벽면 내부에서 가스 제트의 충격과 거동이 포착되었다. 이는 참고문헌 [10]의 실험과 참고문헌 [6]의 RANS 모델을 통한 해석으로는 포착할 수 없는 영역으로서, 참고문헌 [7],[8]과 같이 압축성 유체의 제트 특성 포착에 있어서 DES 모델의 우수성을 확인할 수 있다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 NPR에 따른 가스 농도 분포

가스 제트는 노즐을 지나는 순간부터 급격한 체적 감소와 함께 잠재적인 팽창 힘이 축적된다. 가스 분사 직후에는 잠재된 힘의 분출로 인해 가스는 급격히 팽창하면서 과소팽창제트가 형성되고, 팽창된 가스는 잠재된 힘



의 손실과 함께 다시 수축된다. 이러한 팽창과 수축을 반복하면서 노즐 바깥으로 분사되는 가스 제트는 노즐압력비에 따라 제트 내부에 3가지의 충격파 구조가 형성된다.<sup>9)</sup> 이러한 가스 제트의 팽창과 수축 패턴은 어느 정도 반복되다가 노즐과 멀어지면서 서서히 소멸한다. 간접분사방식에서는 이러한 가스 제트 내부의 충격파 구조에 따른 가스 연료와 흡기 간의 혼합 특성의 변화가 연소실 내 혼합기 품질에 큰 영향을 준다.

과소팽창제트에서 충격셀(Shock cell)의 지름은 노즐압력비에 따라 민감하게 변화한다.<sup>6)</sup> 그리고 충격파의 체적(또는 폭)이 증가하면, 제트 내부에는 단계별로 충격파가 생성된다. 본 연구에서는 노즐압력비에 따른 과소팽창제트의 변화를 충격셀의 변화에 따라 3가지 패턴으로 구분하였다(Fig. 6 참조). Fig. 6(a)와 같이 정상패턴(Regular pattern)에서 생성된 과소팽창제트는 노즐압력비(NPR 1.87)가 낮기 때문에 상대적으로 약한 팽창 힘을 가지며, 이로 인해 제트 내부에는 환형(또는 배럴형) 충격셀(Barrel shock)이 연속해서 나타나는 패턴이 형성된다. Fig. 6(b)와 같은 정반사 패턴(Regular reflection pattern)에서는 높은 노즐압력비(NPR 2.54)에 의해 팽창 힘과 함께 압축 힘도 증가하면서, 초음속 제트 내부에는 배럴 충격셀과 반사 충격셀이 연속해서 나타나는 패턴이 형성된다. Fig. 6(c)의 마하디스크 패턴(Mach disk pattern)에서는 보다 높은 노즐압력비(NPR 3.37)에 의해 배럴 충격셀과 반사 충격셀이 이루는 초음속 제트 내부에 아음속 영역이 형성되는 것으로서, 이러한 제트 내부의 아음속 영역에는 마하디스크(Mach disk shock)가 발생한다.<sup>11)</sup>

본 연구에서 레일 공급 압력이 4~9 bar일 때 가스 분사기의 분사 압력과 노즐 주변 압력을 통해 NPR을 산출하였다(NPR 1.87~4.11). Fig. 4는 분사시작시점(SOI, Start of Injection) 2.0 msec 일 때 NPR에 따른 가스 제트의 농도 분포를 산출한 결과이다. Fig. 4(a)와 같이 NPR이 2.0 이하일 때에는 아주 얇은 충격셀이 형성되면서 분사가 가운데 쪽으로 모이는 형태의 제트 구조를 보여주지만, Fig. 4(b), (c), (d)와 같이  $2.0 < NPR < 4.5$  일 때에는 충격셀의 체적이 증가하면서 분사가 주변부로 확산되는 제트 구조를 보여준다. 그리고 Fig. 4(d)에서는 충격셀의 체적이 다른 NPR일 때 보다 크게 증가해서, 노즐 가이드 벽면을 타고 슬립되어 흘러내리는 제트 구조가 나타난다.

NPR 1.87에서 순수 가스는 최대 7.38 mm 지점까지 분사되며, 90% 가스는 최대 15.24 mm 지점까지 분사된다. NPR 2.54에서 순수 가스는 최대 7.39 mm 지점까지 분사되고, 90% 가스는 최대 19.64 mm 지점까지 분사된다. 그리고 NPR 3.37에서 순수 가스는 최대 7.4 mm, 90% 가스는 최대 15.2 mm 지점까지 분사되며, 낮은 NPR 조건보다

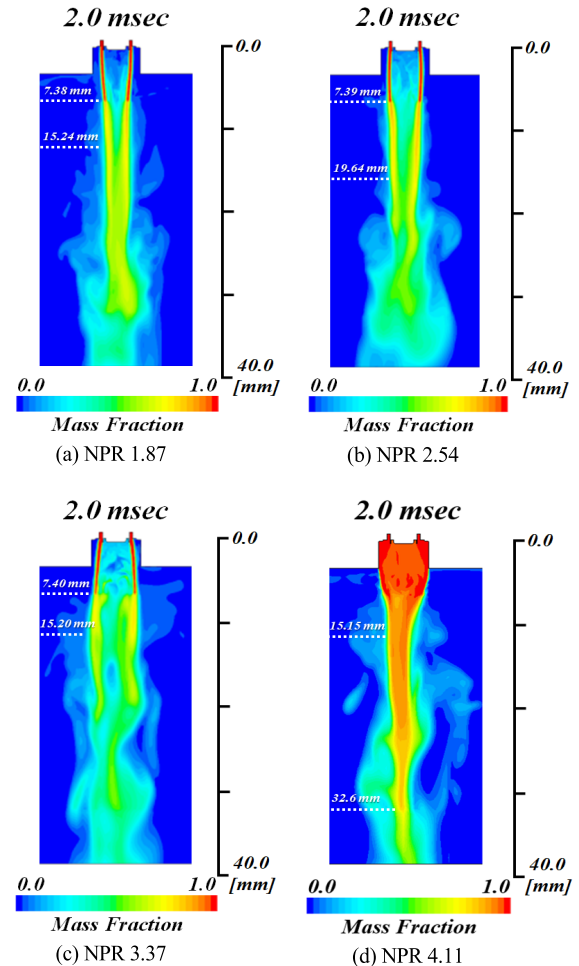


Fig. 4 Computational results of mass fraction according to the NPR (@ SOI 2 msec)

가스제트의 직진성이 감소한다. 이는 NPR이 증가하면서 가스 제트의 유동 방향이 노즐 가장자리로 확산된 것에 기인한다. NPR 4.11에서 순수 가스는 최대 15.15 mm 지점까지 분사되며, 90% 가스는 최대 32.6 mm 지점까지 분사된다. NPR 4.11에서는 충격셀의 체적이 노즐 가이드를 포함한 체적보다 크게 증가하면서, 가스 농도가 전반적으로 크게 증가하고, 노즐과 멀리 떨어진 지점까지 높은 농도의 가스가 분사되는 것으로 판단된다.

### 3.2 챔버 온도에 따른 충격파 구조

본 연구에서는 노즐 주변의 챔버 온도 증가에 따른 가스 제트의 특성을 수치해석을 통해 분석하였다. 노즐 주변 온도는 차량용 가스엔진의 실제 운전영역 내에서 발생하는 온도 범위인 25~50 °C 수준으로 정하였다. Fig. 5는 NPR 3.37일 때 노즐 주변 온도에 따른 가스 제트의 속도 분포를 계산한 결과이다. 가스 제트는 Barrel shock과 Reflection shock이 나타나는 정반사 패턴을 나타낸다.

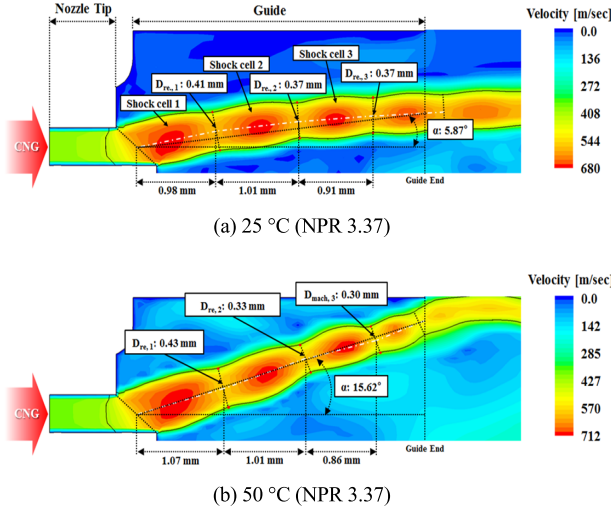


Fig. 5 Computational results of velocity according to chamber temperature (@ SOI 2 msec)

본 연구에서는 노즐 홀과 동일한 방향의 직선을 기준 (0°)으로 정하고, 가스제트의 진행 방향과 이루는 각도를 충격파 각도 ( $\alpha$ )로 정의하였다. Fig. 5와 같이  $\alpha$  값을 비교한 결과, 25 °C에서는 5.87°로 나타나고, 50 °C에서는 15.62°로 나타난다. 노즐 주변 온도가 높을 때 가스제트의 직진성이 상대적으로 저하되면서, 분사 진행 방향이 가장자리로 이동함을 알 수 있다. 이는 노즐 주변의 온도가 증가함에 따라 흡기의 팽창 힘에 강해져서, 가스 제트의 후류가 뒤로 밀리면서 노즐 가이드 벽면을 타고 분사되는 경향이 나타나는 것으로 판단된다. 낮은 NPR 조건에서 노즐 주변 온도 상승에 의해 가스 제트가 노즐 가이드 벽면에 일찍 닿게 되면, 가스 제트의 힘이 빠르게 손실되기 때문에 제트는 슬립라인을 형성하면서 빠르게 소멸한다.

### 3.3 노즐 주변 벽면 충돌에 따른 충격파 구조

레이를 통해 공급되는 가스 연료의 초기 압력과 속도는 내부 유로 중간지점까지 거의 일정하게 유지되지만 가스 분사기의 노즐 입구 주변의 최소 목을 지나면서 큰 압력 손실이 발생하고, 이후 노즐 홀 입구에 도달하면서, 초기 공급 압력의 손실과 함께 분사 속도는 급격하게 증가한다. 이러한 압축성 유동에서 유속과 음속 간의 속도 비를 마하 수(M, Mach number)로 나타낼 수 있다. 충격파가 형성되는 가스 제트는 마하 수 1을 기준으로 경계가 형성되며, 일반적으로  $M < 0.8$  구간을 아음속(Subsonic)이라고 하고,  $0.8 < M < 1.2$  구간을 천음속(Transonic)이라고 한다. 그리고  $1.2 < M$  구간은 초음속(Supersonic)이라고 하며, 초음속 영역에서는 충격파가 발달하는 가스제트가 형성된다.

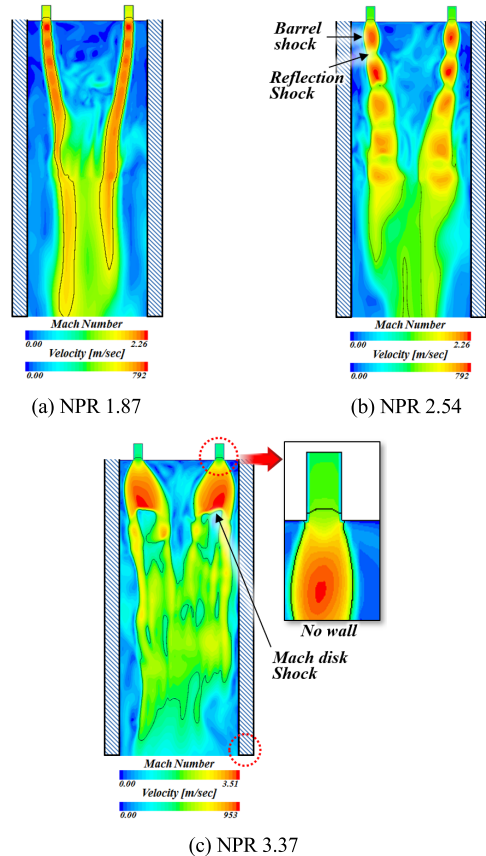


Fig. 6 Computational results of Mach number (and velocity) according to the NPR (@ SOI 2 msec) without nozzle wall model

Fig. 6은 노즐 끝단에 별도의 가이드 벽면이 없는 가스 분사기에서 NPR 조건에 따라 변화하는 가스 제트의 마하수 분포를 계산한 결과이다. NPR 1.87은 Barrel shock이 반복되는 정상 패턴이 나타나며, NPR 2.54는 Barrel shock과 Reflection shock이 반복되는 정반사 패턴이 나타난다. 그리고 NPR 3.37에서는 First shock cell에 Barrel shock, Reflection shock과 함께 Mach disk shock이 형성되는 마하디스크 패턴이 나타나며, 제트 내부에는 아음속 영역 ( $Ma < 1$ )이 형성된다.

Fig. 7은 노즐 끝단에 가이드 벽면이 있는 가스분사기에서 가스 제트의 마하수 분포를 계산한 결과이다. NPR 1.87 ~ 3.37까지 마하디스크 패턴이 나타나지 않았으며, NPR 6 이상까지 공급압력을 증가시켜야 비로소 마하패턴이 발생한다.

마하디스크 패턴에서는 과소팽창 제트의 체적(또는 폭)이 증가하기 때문에 팽창된 제트는 가이드 벽면에 충돌하며, 제트 내 아음속 영역으로 인해 제트의 후류는 빠르게 슬립하게 된다. 따라서 흡기와 혼합영역이 노즐과 가까운 위치에 형성될 수 있으며, 이 경우에는 흡기와 혼합영역이 작기 때문에 혼합 품질에 불리하게 작용

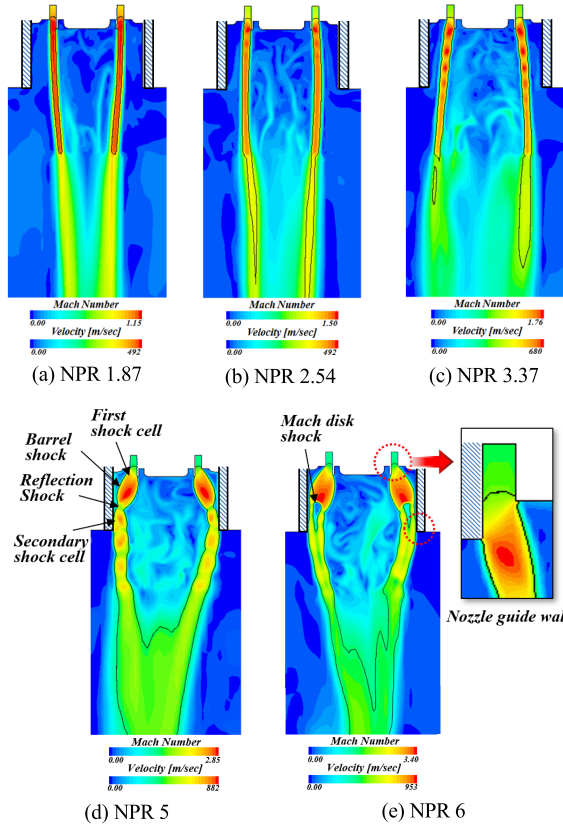


Fig. 7 Computational results of Mach number (and velocity) according to the NPR (@ SOI 2 msec) with nozzle guide wall model

할 수 있다. 즉 연료량 확보가 중요한 간접분사방식의 가스엔진에서는 노즐 끝단의 가이드 벽면 설계를 통해 상대적으로 높은 공급압력에서도 가스 제트 내부에 마하디스크가 형성되지 않도록 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 가스 분사기에서 고압 분사된 가스의 과소팽창 제트 형성과 제트 내부 충격파 구조에 대한 분석을 통해 가스 분사기 노즐의 설계 가이드라인을 제시하고자 하였다. 이를 위해 기체로 분사되는 가스 분사기의 내부 유동을 3차원 압축성 난류유동으로 전산모사하기 위해 유한체적법(FVM, Finite Volume Method) 기반의 STAR-CCM+14.02를 사용하였다. 그리고 유동은 오일러리안 기반의 연속상태를 가정하고, 난류모델은 K-Omega SST 와 DES 모델을 연계하여 적용하였다. 한편, 분사기에서 분사된 천연가스의 상세한 분무형상을 예측하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 개발한 해석모델의 예측정확도를 검증

하기 위하여 과소팽창 노즐에서 발달한 가스제트에 대한 해석 결과를 참고문헌 [10]의 실험과 비교한 결과 분사 길이는 상대오차 4.7% 수준의 정확도를 보였으며, 참고문헌 [6],[11]과 같이 NPR 1.87에서는 Barrel shock이 반복되는 정상패턴이 나타나고, NPR 2.54에서는 Reflection shock이 추가된 정반사 패턴이 나타나며, NPR 3.37에서는 Mach disk shock이 추가된 마하디스크 패턴이 발생한다.

- 2) 마하디스크가 발생하는 NPR 3.37에서는 충격파의 노즐 가이드 벽면 충돌로 인해 분사 직진성이 감소하며, 노즐 출구로부터 먼 거리까지 높은 농도의 가스가 전달되지 않기 때문에 혼합기 형성이 불리해진다.
- 3) 동일한 NPR에서 노즐 주변 온도가 증가하게 되면 충격파의 진행 방향이 노즐 가이드 벽면을 향하기 때문에 가스의 분사 직진성이 빠르게 감소한다.
- 4) 노즐 끝단이 평평한 모델과 단차 모델을 비교한 결과로서 평평한 모델에서는 NPR 3.37에서 마하디스크가 발생하지만 단차 모델에서는 NPR 6 이상에서 마하디스크가 발생한다. 노즐 끝단의 단차 모델은 기존 단차가 없는 모델에 비해 1.78배 수준의 고압 분사에서도 마하디스크가 생성되지 않기 때문에 혼합기 형성에 유리할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 “소재부품기술개발사업(소재부품패키지형, 20004900)”의 일환으로 수행되었으며, 관계자분들께 진심으로 감사드립니다.

#### References

- 1) I. Chitsaz, M. H. Saidi, A. A. Mozafari and A. Hajjalimohammadi, “Experimental and Numerical Investigation on the Jet Characteristics of Spark Ignition Direct Injection Gaseous Injector,” Applied Energy, Vol.105, pp.8-16, 2013.
- 2) Q. Zhang, M. H. Li and S. D. Shao, “Combustion Process and Emissions of a Heavy-duty Engine Fueled with Directly Injected Natural Gas and Pilot Diesel,” Applied Energy, Vol.157, pp.217-228, 2015.
- 3) T. I. Mohamad, A. Yusoff, S. Abdullah, M. Jermy, M. Harrison and H. H. Geok, “The Combustion and Performance of a Converted Direct Injection Compressed Natural Gas Engine Using Spark Plug Fuel Injector,” SAE 2010-32-0078, 2010.
- 4) K. Ryu, “Effects of Pilot Injection Timing on the Combustion and Emissions Characteristics in a

- Diesel Engine Using Biodiesel-CNG Dual Fuel,” *Applied Energy*, Vol.111, pp.721-730, 2013.
- 5) V. Vuorinen, A. Wehrfritz, C. Duwig and B. J. Boersma, “Large-eddy Simulation on the Effect of Injection Pressure and Density on Fuel Jet Mixing in Gas Engines,” *Fuel*, Vol.130, pp.241-250, 2014.
  - 6) Q. Dong, Y. Li, E. Song, C. Yao, L. Fan and J. Sun, “The Characteristic Analysis of High-pressure Gas Jets for Natural Gas Engine Based on Shock Wave Structure,” *Energy Conversion and Management*, Vol.149, pp.26-38, 2017.
  - 7) Z. Mansouri, M. Aouissi and T. Boushaki, “Detached Eddy Simulation of High Turbulent Swirling Reacting Flow in a Premixed Model Burner,” *Combustion Science and Technology*, Vol.188, Issues 11-12, pp.1777-1798, 2016.
  - 8) K. Bensayah and E. A. Mahfoudi, “Detached Eddy Simulation of Compressible Flow with Rapid Expanded Divergent Contour,” *International Journal of Heat and Technology*, Vol.36, No.1, pp.359-366, 2018.
  - 9) P. S. Cumber, M. Fairweather, S. A. E. G. Falle and J. R. Giddings, “Predictions of the Structure of Turbulent, Moderately Underexpanded Jets,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol.116, No.4, pp.707-713, 1994.
  - 10) J. Yu, H. Hillamo, T. Sarjovaara, T. Hulkkonen, O. Kaario and M. Larmi, “Experimental Study on Structure and Mixing of Low-pressure Gas Jet Using Tracer-based PLIF Technique,” SAE 2011-24-0039, 2011.
  - 11) F. Chen, A. Allou, Q. Douasbin, L. Selle and J. D. Parisse, “Influence of Straight Nozzle Geometry on the Supersonic Under-expanded Gas Jets,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol.339, pp.92-104, 2018.
  - 12) S. G. Chuech, M. -C. Lai and G. M. Faeth, “Structure of Turbulent Sonic Under-expanded Free Jets,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol.27, No.5, pp.549-559, 1989.