한국분무공학회지 제26권 제4호(2021)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2021.26.4.197

Hole drilling angle이 가솔린 직접 분사식 인젝터의 내부 유동에 미치는 영향

김휘준* · 박성욱†

Effects of Hole Drilling Angle on Internal Flow of Gasoline Direct Injection Injector

Huijun Kim and Sungwook Park

Key Words: GDI injector(가솔린 직접 분사식 인젝터), Cavitation(캐비테이션), Discharge coefficient(토출계수)

Abstract

In gasoline direct injection injectors, cavitation can be generated inside the hole because of their high injection pressure. In this paper, the effects of cavitation development in injector were investigated depending on the various hole drilling angles were investigated by a numerical method. In order to verify the internal flow model, injection rate and injection quantity of individual holes were measured. The BOSCH long tube method was used to measure the injection rate. As a result, even if the hole diameters were the same, the discharge coefficient differed by up to 10% depending on the hole angle. Moreover, if the hole drilling angle became greater than 30°, the area coefficient and the discharge coefficient decreased as the nozzle outlet was blocked due to cavitation.

기호설명

A_{hole} : Hole 출구 면적
A_{liquid} : Hole 출구에서의 액상이 차지하는 면적
C_d : 노즐 토출 계수
C_a : 노즐 면적 계수
h : Spray cone angle 측정 단면 사이 거리
m : 실제 분사량(mg/shot)
m_{theory} : 이론 분사량
P_{inj} : 분사 압력 (bar)
ρ : 연료 밀도
V : Hole 출구에서의 액상의 속도
r_1, r_2 : 분사율 측정 단면의 반경

(Received: 12 Nov 2021, Received in revised form: 24 Nov 2021, Accepted: 25 Nov 2021)
*한양대학교 융합기계공학과
†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : parks@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)2220-4588

1. 서 론

전 세계적으로 배기 및 연비 규제가 강화되고 있어 포트 분사식(PFI) 엔진보다는 직접 분사식(GDI) 엔진이 많이 개발되고 있다. GDI 엔진은 실린더 내부에 연료를 직접 분사하기 때문에 연료의 증발열을 이용하여 실린더 내부의 온도를 낮출 수 있다. 노킹의 위험으로 인해 가솔린 엔진은 실린더 내부의 최대 온도가 제한되는데, 내부 온도가 낮아지면 더 높은 압축비를 적용할 수 있어 일반적으로 PFI 엔진에 비해 열효율이 더 높다고 평가된다. 또한 연료의 분사 시기와 공연비를 더욱 정확하게 제어할 수 있다는 장점이 있다[1-2].

하지만 GDI injector는 분사가 가능한 시기가 제한되

기 때문에 분사된 연료와 흡기가 혼합되는데 걸리는 시간이 짧다는 단점이 있다. 혼합기가 균질하게 형성되지 않아 공기에 비해 연료가 한 구역에 쏠리는 현상이 발생하면 입자상 물질의 배출이 증가하며 열효율이 감소할 수 있다. Addepalli[3]의 연구에 따르면 이론적으로 균질한 혼합기를 형성해주었을 때 비균질한 case에 비해서 IMEP와 최대 열발생률이 높게 예측되었다.

따라서 연료를 빠르게 증발시키고 공기와 혼합하기위해서 연료의 분사 압력을 높이려는 연구가 진행되고 있다. Lee and Park[4]은 분사 압력에 따른 미립화 성능에 대해 Phase Doppler particle analyzer(PDPA) 장비를 활용하여 조사하였다. 그 결과 분사 압력이 100 bar에서 300 bar까지 증가하였을 때 액적의 평균 직경이 25% 감소하였다는 결과를 얻었다.

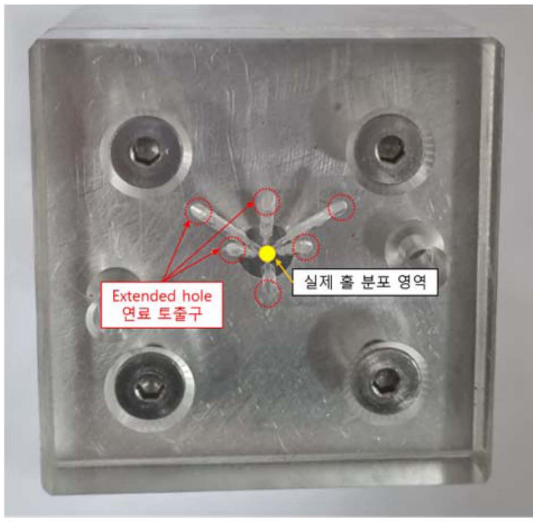
하지만 높은 분사 압력으로 연료가 분사되면 노즐 홀 내부에서 cavitation이 발생하게 되어 노즐 유효 면적이 감소하고, 그로 인해 분사 유량이 감소한다. 분사 유량이 감소하면 동일한 양의 연료를 분사하기 위해서 더 많은 시간이 걸리므로 cavitation의 발생에 대한 연구가 매우 중요하다.

하지만 GDI injector의 노즐 홀은 매우 작아서 가시화를 통해 실제 크기의 노즐 홀에서 발생하는 cavitation을 연구하는 것은 매우 힘들다. 따라서 많은 연구자[5-6]들은 CFD 모델링을 통해서 injector 내부의 cavitation 형성에 대해 연구하고 있다.

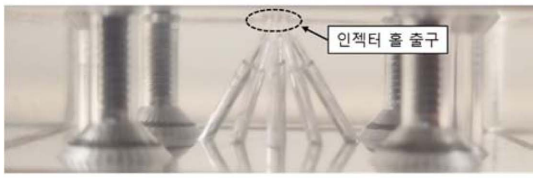
본 연구에서 hole drilling angle는 injector 축과 노즐 홀 축이 이루는 각도를 의미하며 hole drilling angle는 cavitation의 생성에 미치는 중요한 인자 중 하나이다. 또한 side-mount multi-hole GDI injector는 6개의 노즐 홀의 방향이 각기 다르기 때문에 각 노즐 홀에서 발생하는 cavitation의 양상이 다르다. 따라서 분사가 진행되면서 각 노즐 홀로 들어가는 유량에 차이가 발생한다. 이 논문에서는 hole drilling angle에 따라서 발생하는 cavitation의 형상과 그에 따른 유량 및 plume jet의 변화를 해석적 연구를 통해 조사하였다.

2. 연구 방법

이 논문에서는 내부 유동 해석 모델을 검증하기위해 reference injector의 분사율과 홀 간 유량 편차를 측정하여 해석 결과와 비교하였다.



(a)



(b)

Fig. 1 Extended hole to measure the injection quantity of each hole (a) bottom view, (b) side view

2.1 홀 간 유량 편차 측정

Figure 1은 노즐 홀 간 유량 편차 측정을 위한 extended hole이다. GDI injector는 홀 간 간격이 매우 좁기 때문에 각 홀에서 분사되는 연료를 분리하기가 어렵다. 따라서 hole drilling angle 과 동일한 방향으로 홀을 더 길게 연장한 extended hole을 제작하였다. 이후 extended hole의 각 토출구에서 나오는 연료의 무게를 전자 저울을 사용하여 측정하였다. 또한 2000회 반복 분사하여 각 분사 시에 발생할 수 있는 오차의 영향을 최소화하였다. Extended hole을 사용하였을 때 back pressure등의 영향을 받는지를 확인하기위해서 extended hole 설치 이전과 이후의 분사량을 비교하였다. 그 결과 Table 1처럼 두 case의 유량의 차이는 5% 미만으로 유사하였다. 따라서

Table 1 Effect of extended hole on injection quantity

Without extended hole	With extended hole	Error by extended hole
7.2 mg/shot	7.4 mg/shot	2.78%

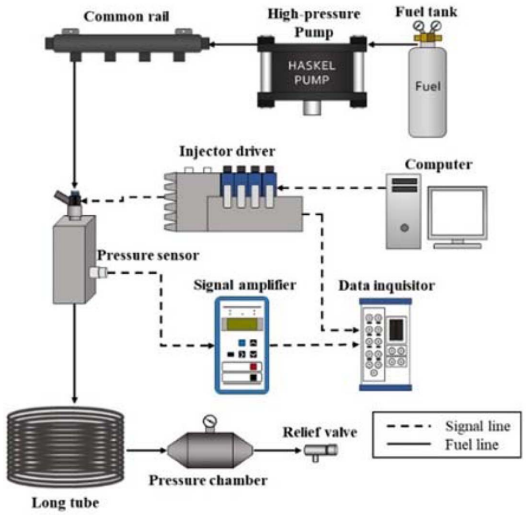


Fig. 2 Schematic diagram of injection rate measurement

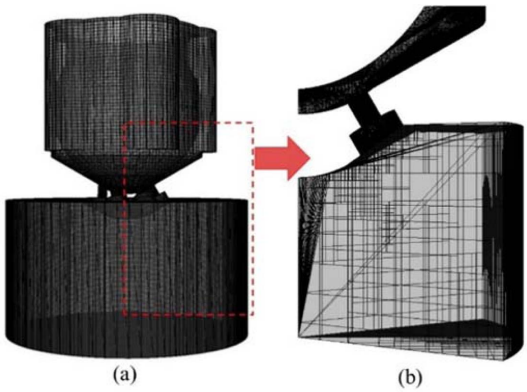


Fig. 3 Computational domain of internal flow simulation (a) reference injector, (b) sector mesh

extended hole을 설치하더라도 분사 과정에 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻었다.

2.2 분사율 측정 실험

Figure 2은 분사율 측정 실험의 장치도이다. 분사율 측정 실험은 BOSCH 사에서 제안한 long tube method[7]를 사용하였으며 장관의 길이는 30 m이다. injector는 NI compactRIO 장비로 제어되었으며 압력 센서에 의해 측정된 분사율 파형은 amplifier에 의해 증폭되었다. 분사 압력 100 bar 조건에서 100회 분사하여 평균화한 값을 내부 유동 해석의 검증을 위해 사용하였다. 장관 내부의 압력은 10 bar로 유지하여 노이즈에 의한 데이터 오염을 최소화 하면서 분사율 측정에 영향을 주지 않도록 하였다.

2.3 내부 유동 해석 모델

GDI injector의 내부 유동을 해석하기 위해서 CONVERGE program을 사용하였다. 먼저 모델의 검증을 위해서 실험에 사용된 reference injector의 내부 유동 해석을 진행하였다.

하지만 노즐 홀 각도에 따라서 cavitation의 발생 양상이 달라져 reference injector에서는 cavitation이 적게 발생하는 홀 쪽으로 유량이 집중되므로 hole drilling angle만의 영향을 조사하는 것은 어렵다고 판단하였다. 따라서 모델 검증 이후에는 reference injector와 노즐 홀 직경, 길이, sac volume 은 동일하고, hole drilling angle만 다른 injector 형상을 제작하여 hole drilling angle의 영향을 조사하였다. 또한 해석 시간을 줄이기 위해서 6분할 섹터 mesh를 사용하였다.

Figure 3은 내부 유동 해석에 사용된 mesh이다. 모델 검증을 위한 reference injector의 내부 유동 해석에 사용된 mesh는 약 1M개의 cell로 구성되어 있으며 Fig. 3(b)의 섹터 mesh는 그의 6분의 1인 160K 개의 cell로 이루어져있다.

Turbulence model은 Yakhot와 Orszag[8]가 제안한 RNG k-epsilon model을 사용하였다. RNG k-epsilon model은 turbulent kinetic energy 수송 방정식과 turbulent dissipation 수송 방정식을 풀어서 난류 유동을 모사하는 모델이다.

또한 injector 내부의 기상과 액상의 유동을 모사하기 위해서 VOF model을 사용하였다. VOF model은 cell 내부의 기상의 부피 비율을 계산하여 multi-phase 유동의 경계 면을 추적하는 모델로 아래와 같은 지배 방정식을 통해 각 cell에서의 기상의 부피 비율을 계산한다.

내부 유동 해석 조건은 Table 2에 나타나있다. 분사 압력은 분사율 측정 실험과 동일하게 100 bar로 설정되었으며 hole drilling angle은 10°부터 50°까지 변화시켜

Table 2 Numerical conditions

Injection condition	Value
Injection pressure	100 bar
Ambient pressure	1.0 bar
Fuel temperature	25°C

가면서 내부 유동의 변화를 관찰하였다.

정량적 비교를 위해 discharge coefficient와 area coefficient가 아래와 같은 식으로 계산되었다. Discharge coefficient는 이론 분사량 대비 실제 분사량을 의미하며, area coefficient는 노즐 전체 출구 면적 대비 액상이 차지하는 면적의 비율을 의미한다.

$$C_d = m/m_{theory} \quad (1)$$

$$m_{theory} = \rho A_{hole} V \quad (2)$$

$$V = \sqrt{2P_{inj}/\rho} \quad (3)$$

$$C_a = A_{liquid}/A_{hole} \quad (4)$$

C_d는 discharge coefficient, V는 출구 속도, A_{hole}은 전체 홀 면적, A_{liquid}는 노즐 출구에서 액상이 차지하는 면적이다. 출구 속도는 Bernoulli equation을 통해 계산되었다. C_a는 area coefficient를 의미하며 내부 유동 해석 결과에서 노즐 출구에서의 액상이 차지하는 면적을 바탕으로 계산되었다.

또한 steady state에서 spray cone angle이 측정되었다. Fig. 4는 spray cone angle의 측정 지점을 보여주며 측정 방법은 아래와 같다.

① 홀 출구에서의 plume jet의 단면과 그로부터 2 mm 떨어진 지점에서의 단면에서의 liquid mass fraction을 조사

② 두 단면의 hydraulic diameter (r_1, r_2)를 계산

③ 두 단면 사이의 plume jet가 원뿔대 형상을 띈다고 가정하였을 때 spray cone angle은 아래 식을 통해 간접적으로 계산이 가능(h는 두 단면 사이의 거리로 2 mm의 값을 가짐)

$$Spray\ cone\ angle = 2tan^{-1}((r_1 - r_2)/h) \quad (5)$$

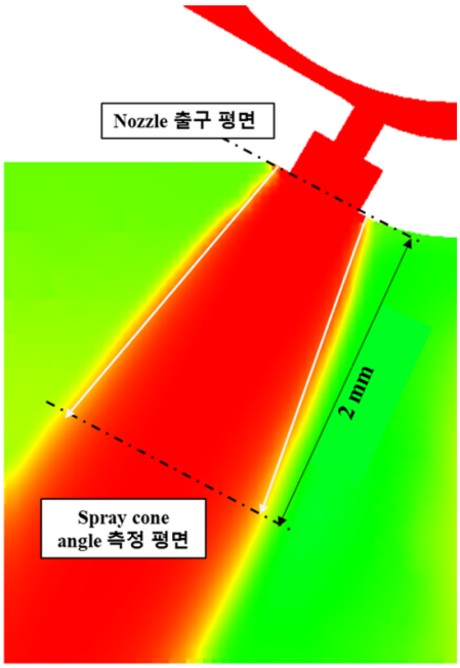


Fig. 4 Spray cone angle measurement

3. 해석 결과

3.1 해석 모델 검증 결과

Figure 5는 실제 GDI injector의 분사율 측정 결과와 내부 유동 해석 결과를 보여준다. 실험 결과와 해석 예측 값의 결정 계수(R^2)는 0.9932로 높았다. 따라서 본 연구의 내부 유동 해석 모델이 분사 지연과 분사율을 실험과 유사하게 예측하였다고 볼 수 있다.

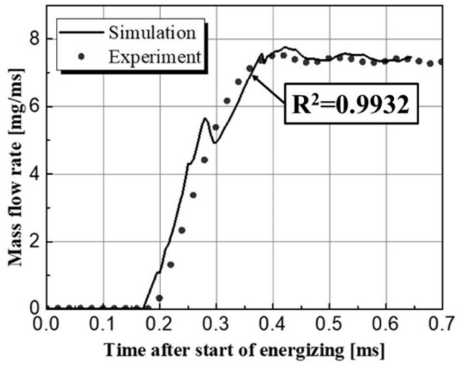


Fig. 5 Injection rate estimation with various base grid size

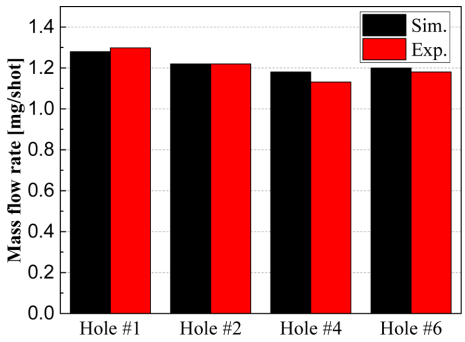


Fig. 6 Injection quantity of each injector hole

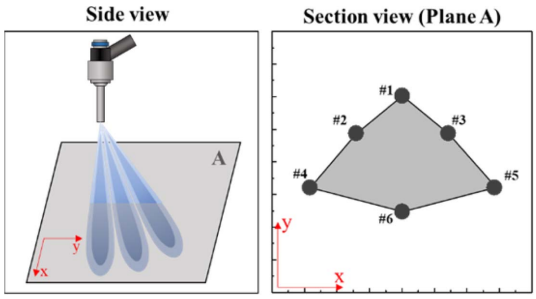


Fig. 7 Nozzle hole configuration of reference injector

Figure 6은 extended hole을 사용하여 각 홀에서 분사되는 연료량을 따로 측정한 후, 내부 유동 해석을 통해 계산된 각 홀의 분사량과 비교한 것이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 홀 배열이 대칭을 이루고 있으므로 hole #2와 #3, hole #4와 #5는 분사량이 동일하기 때문에 hole #1, 2, 4, 6의 분사량만을 표기하였다. 그 결과, 분사율 측정 결과와 마찬가지로 실험과 해석 결과가 유사함을 확인하였다. 또한 측정 결과에 따르면 hole drilling angle에 따라서 최대 10%의 유량 차이가 발생하였다.

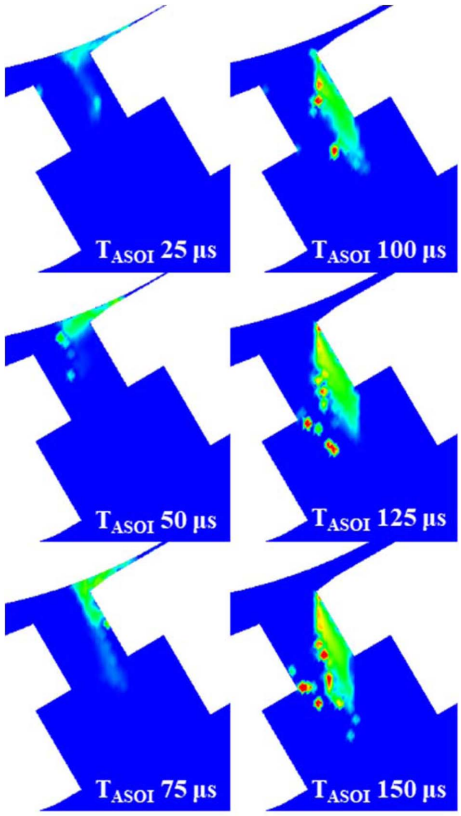


Fig. 8 Cavitation rate variation with time variable

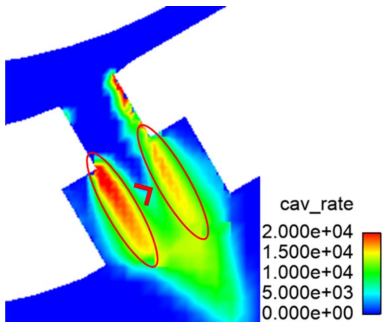


Fig. 9 Cavitation rate at steady state

3.2 Injector 홀에서의 cavitation의 발생

Figure 8은 분사 초기에 시간에 따른 cavitation의 발생 양상을 보여준다. TASOI(Time after start of injection) 75 μs 이전에는 injector 니들이 굉장히 조금 열려있기 때문에 니들과 외벽 사이의 틈 직후에 cavitation이 발생한다. 이후 니들이 더 열리면서 이 영역에서는 cavitation이 발생하지 않고, 대신에 홀 입구의 코너에서 cavitation이 발생하였다.

Stephole에서도 유로가 갑자기 넓어지기 때문에 cavitation이 발생한다. 하지만 stephole의 형상은 전 방위적으로 동일하게 넓어지지만 cavitation은 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 홀 내부에서 발생하는 cavitation과 반대쪽에 있는 벽에서 더 크게 발생한다. Huang 등[9]의 연구 결과에 따르면 홀 내부의 cavitation은 유동의 쏠림을 야기하고, 이후 cavitation 영역을 벗어나면서 쏠림의 반작용으로 인해 cavitation이 발생한 벽 쪽으로 휘어진다. 따라서 결과적으로 유동이 cavitation이 발생한 벽 쪽으로 향하기 때문에 그 반대쪽에서는 cavitation이 더 크게 발생하는 것으로 추정된다.

3.3 Hole drilling angle이 내부 유동에 미치는 영향

Figure 10은 hole drilling angle에 따른 cavitation의 발생 양상을 보여준다. hole drilling angle이 10°일 때는 sac volume 쪽 벽에서 cavitation이 발생하였으나 20°가 되면 반대쪽 벽에서도 cavitation이 발생한다. 양쪽 벽 모두에서 cavitation이 발생하였다는 것은 각 방향으로 홀에 유입되는 유동의 운동량이 서로 균형을 이루었다는 것을 의미한다. 이후 30° 이상이 되면 sac volume 쪽 벽에서는 더 이상 cavitation이 발생하지 않았다. Hole drilling angle이 증가할수록 cavitation rate는 증가하는 경향을 보였고, 특히 30°이상에서는 hole drilling angle이 증가할수록 홀 출구와 stephole에서 cavitation이 발생하는 영

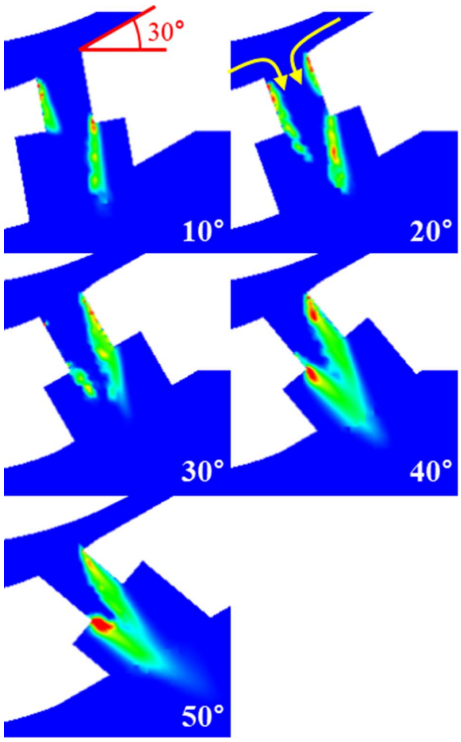


Fig. 10 Cavitation rate variation depending on hole drilling angle

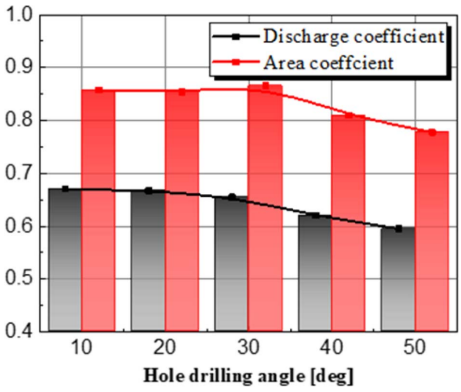


Fig. 11 Discharge coefficient and area coefficient with various hole drilling angle

역이 넓어졌다.

Figure 11은 hole drilling angle에 따른 discharge coefficient와 area coefficient의 차이를 보여준다. Discharge coefficient는 cavitation이 양쪽 벽에 모두 생기는 20° case에서 최대가 되었다. 이후 hole drilling angle이 증가할수록 cavitation이 크게 발생하기 때문에 유량이 감소

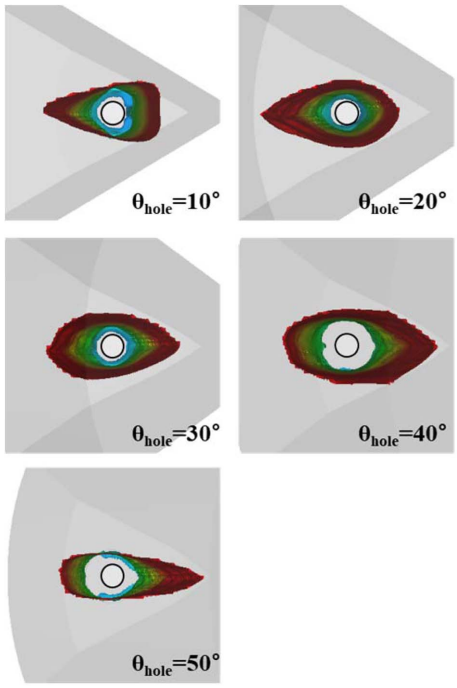


Fig. 12 Iso-surface of plume jet (liquid mass fraction= 0.8)

하여 discharge coefficient가 감소하였다. 그에 비해 area coefficient는 10°에서 30° 까지는 큰 변화가 없었으며 이후 급격하게 감소하였다. Area coefficient의 증가는 홀 출구에서 cavitation으로 인해 기상이 차지하는 영역이 증가하였다는 것을 다시 한번 확인시켜준다. 이로 인해 비교적 일정하게 유지되던 discharge coefficient 또한 hole drilling angle이 30° case보다 커지면 더 빠르게 감소한다.

Figure 12는 액상의 질량 분율이 80%인 iso-surface를 홀 정면에서 바라본 형상이다. Plume jets의 단면은 30°에서 거의 대칭이 되며 나머지 case에서는 유선형을 띈다. 홀에서 cavitation이 더 강하게 발생한 방향으로 유동이 rebound 되어 넓어진 것이 단면에서 뾰족하게 나타난 것으로 추정된다. 특히 50° case에서는 유량이 크게 감소하여 상하 방향의 폭이 크게 감소한 것을 볼 수 있다.

Figure 13은 hole drilling angle에 따른 spray cone angle의 변화를 보여준다. Spray cone angle은 30°에서 최대가 되며 이후 급격히 감소하는 모습을 볼 수 있다. Hole drilling angle이 커질수록 cavitation이 더 크게 발달하기 때문에 10°에서 30° case까지 spray cone angle은 증가한

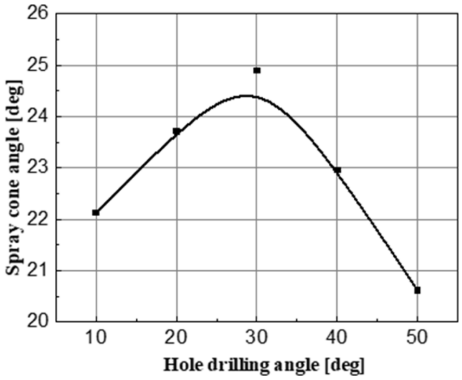


Fig. 13 Spray cone angle variation depending on hole drilling angle

다. 하지만 hole drilling angle이 30° 보다 커지면 nozzle effective area가 감소하여 유량이 빠르게 감소하기 때문에 spray cone angle또한 급격히 감소한다.

4. 결 론

이 논문에서는 GDI injector의 내부에 생기는 cavitation에 대하여 조사하였다. 또한 hole drilling angle이 내부 cavitation의 형성에 미치는 영향과 그에 따른 discharge coefficient, area coefficient 및 spray cone angle에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과는 아래와 같다.

(1) 분사율 측정 결과와 홀 간 유량 편차를 측정하여 모델의 validation을 진행하였다. 그 결과 실험과 유사한 예측 결과를 보였기 때문에 사용된 내부 유동 해석 모델의 신뢰성이 확보되었다고 판단하였다.

(2) 분사 초기, injector 니들이 열리는 정도에 따라서 cavitation이 발생하는 위치가 변경되었다. 처음에는 니들과 외벽 사이에서 cavitation이 발생하였으나 니들이 점차 열리면서 유속이 빨라져 홀 내부와 stephole에서 cavitation이 발생하게 되었다.

(3) Discharge coefficient는 hole drilling angle이 20° 일 때, area coefficient는 30°일 때 최대가 되었으며 이후에는 cavitation의 성장에 의해서 점차 감소하였다.

(4) Spray cone angle는 hole drilling angle이 30° 일 때 최대가 되었다. Cavitation의 성장이 spray cone angle을 증가시키는 것으로 보이며 30° 이상에서는 cavitation의 증가로인한 area coefficient의 감소가 유량을 감소시켜 spray cone angle이 급격하게 감소하였다.

후 기

이 연구는 사단계 BK21사업 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) F. Zhao, M. C. Lai and D. L. Harrington, “Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 25, No. 5, 1999, pp. 437~562.

(2) B. A. VanDerWege, Z. Han, C. O. Iyer, R. H. Muñoz and J. Yi, “Development and Analysis of a Spray-Guided DISI Combustion System Concept,” SAE Technical Paper 2003-01-3105, 2003.

(3) S. Addepalli, O. Saw and J. Mallikarjuna, “Effect of Mixture Distribution on Combustion and Emission Characteristics in a GDI Engine - A CFD Analysis,” SAE Technical Paper 2017-24-0036, 2017.

(4) S. Lee and S. Park, “Experimental study on spray break-up and atomization processes from GDI injector using high injection pressure up to 30 MPa,” International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 45, 2014, pp. 14~22.

(5) B. Befrui, G. Corbinelli, M. D'Onofrio and D. Varble, “GDI Multi-Hole Injector Internal Flow and Spray Analysis,” SAE Technical Paper 2011-01-1211, 2011

(6) K. Saha, S. Som, M. Battistoni, Y. Li, E. Pomraning and P. K. Senecal, “Numerical Investigation of Two-Phase Flow Evolution of In- and Near-Nozzle Regions of a Gasoline Direct Injection Engine During Needle Transients,” SAE Int. J. Engines, Vol. 9, No. 2, 2016, pp. 1230~1240.

(7) W. Bosch, “The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection,” SAE Transactions, Vol. 75, No. 3, 1967, pp. 641~662.

(8) V. Yakhot, S. A. Orszag, “Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory,” J. Sci. Comput, Vol. 1, 1986, pp. 3~51.

(9) W. Huang, S. Moon, J. Wang, K. Murayama, T. Arima, Y. Sasaki and A. Arioka, “Nozzle tip wetting in gasoline direct injection injector and its link with nozzle internal flow,” Int. J. of Engine Research, Vol. 21, No. 2, 2020, pp. 340~351.