

직접분사식 가솔린 선회 분사기에서의 내부 유동특성에 관한 수치 해석

A numerical study on the characteristics of internal flows in a gasoline direct swirl injector

배수호*, 문수연**, 이충원**

S. H. Bae*, S. Y. Moon** and C. W. Lee**

ABSTRACT

The internal flow characteristics of a gasoline direct injector have been studied to improve fuel economy and reduce exhaust emissions. Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to examine the internal flow of the GDI with the purpose of designing the optimum geometry of the injector. This study tests orifice length, cone angle, swirl angle, orifice diameter and needle lift. The results show that optimum sizes of the orifice length, cone angle, swirl angle, orifice diameter and needle lift are 0.8mm, 140°, 120°, 80mm and 70 μ m, respectively. The size of the lift does not affect the formation of the air core significantly near the tip of the needle compared to the ball-type needle. The vena contracta phenomenon near the orifice inlet can be released by smoothing the edge.

주요기술용어 : Gasoline direct injector (가솔린 직접분사기), High pressure swirl injector (고압선회 분사기), Spray penetration(분무침투깊이)

1. 서 론

최근 자동차의 급속한 보급에 따라 배기가스에 의한 대기오염과 이산화탄소 배출에 의한 지구온실 효과, NOx의 배출로 인한 스모그 등의 폐해가 갈수록 심해지고 있다. 그에 따라 배출가스 저감과 CO₂ 배출량을 줄이기 위해 대폭적인 연비율 향상시킬 수 있는 자동차 기술개발은 시급한 시대적 과제라고 할 수 있다. 이러한 문제는 두 가지 작동방식을 갖는 가솔린 직접분사기를 채택함으로써 연비향상과 배기가스 저감을 통하여 해결 할 수 있다. 그러나 이러한 가솔린 직접분사기(GDI)는 몇 가지

의 문제점을 가지고 있다. 냉간 시동 시의 과도한 미연탄화수소(UHC)와 NOx문제 그리고 낮은 변환 효율 등이 그것이다. Zhao⁽¹⁾ 등은 이러한 문제가 인젝터에 밀접한 관련이 있다고 말하고 있다. 또한 그들은 실린더 내부의 주위 공기의 압력이 높아짐에 따라 침투와 분산도가 감소함을 말하고 있다. 따라서 인젝터는 빠른 응답성과 재현성을 가지고 있어야 한다.

압력 스윙 인젝터의 내부 유동은 대단히 복잡하여 실험과 함께 수치해석을 통해 그 특성을 연구하여 왔다. 초기에는 비점성 이론^(2,3)에 기초하여 시도되었다. Dumouchel⁽⁴⁾ 등은 고압선회분사기(HPSI)에서의 유동을 이차원의 점성유체로 가정하여 유선식과 와도식을 이용하여 수치적인 해를 구하였다. Ren과 Shen⁽⁵⁾은 불형의 HPSI의 내부유동을 삼차원으로 해석하였다.

* 경북대학교 대학원

** 경북대학교

Jang⁽⁶⁾ 등은 시작품의 HPSI의 특성을 수치적으로 연구하였다. Ren⁽⁷⁾ 등은 상용코드인 FIRE를 이용하여 HPSI의 내부유동을 천이유동으로 해석하여 계산치와 실험치를 비교하여 검증하였고 동적 유량(dynamic flowrate), 임시적 콘각도(temporal cone angle) 및 질량 유량(mass flowrate)을 이론식으로 나타내었다. 또한 그들은 니들이 만개하기 전에 유동이 정상상태로 매우 빨리 도달함을 보여주었다. Min⁽⁸⁾ 등은 외부에서 개폐되는 DI 인젝터를 개발하여 Star-CD로 인젝터의 내부유동을 해석하였고 이 결과를 KIVA-III와 연결하여 외부유동을 계산하여 노즐에서 30mm되는 지점에서의 Sauter Mean Diameter(SMD)가 15 μm 이하가 되도록 노즐을 최적화하였다. 일반적으로 HPSI 설계에 있어 고려되어야 할 사항 즉 설계변수로는 크게 니들의 형태와 직경, 시트각(seat angle), 오리피스 구조, 니들 행정(needle lift), 스윌러(swirler)의 구조 등이 있다.

본 연구에서는 상용코드인 CFD-ACE+ 5.0을 사용하여 이러한 설계변수들을 변화시켜 내부 유동의 특성을 이해함으로써 최적 형상의 인젝터를 설계하는 기초자료를 확보하고자 한다.

2. 수치적 방법

스윌 인젝터의 노즐 내부의 유동은 연속방정식과 Navier-Stokes식에 의해 지배된다. 이론식은 CFD-ACE 매뉴얼⁽⁹⁾로부터 직교좌표 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \overline{u_i u_j} \right\} \tag{2}$$

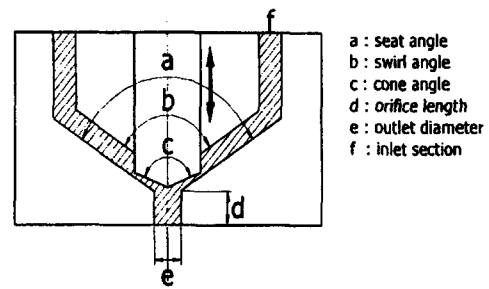
u_i 는 직교좌표의 i 속도 성분이고 ρ 는 유체의 밀도, p 는 정압, μ 는 점성계수이다. 계산

방법은 엇갈림 격자를 이용한 SIMPLEC 방법을 사용하였고 난류모델은 Baldwin and Lomax 모델⁽¹⁰⁾을 사용하여 해석하였다.

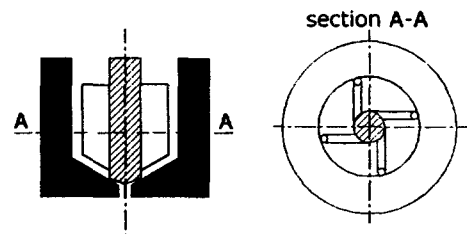
3. 계산 결과 및 고찰

본 연구에서는 기본적으로 이차원, 스윌이 없는 유동으로 가정하여 수치해석을 수행하였다. 또한 실제유동을 삼차원을 계산하여 실험치와 비교, 검증하였다. 위와 같이 이차원으로 가정한 이유는 스윌 조건에서 보다 스윌이 없는 조건에서 설계형상의 변화가 유량의 변화에 민감한 영향을 주기 때문이다. 또한 설계변수의 변화가 유량에 큰 영향을 줌으로써 쉽게 최적형상을 설계하고자 함에 있다. 마지막으로 스윌 조건에서는 니들의 끝에서의 와류를 관찰하기 힘든 이유도 있다.

Fig. 1은 직분식 가솔린 분사기의 계산영역으로 설계노즐의 설계변수와 정면도 그리고 단면 A-A를 보여주고 있다.



(a) design variable



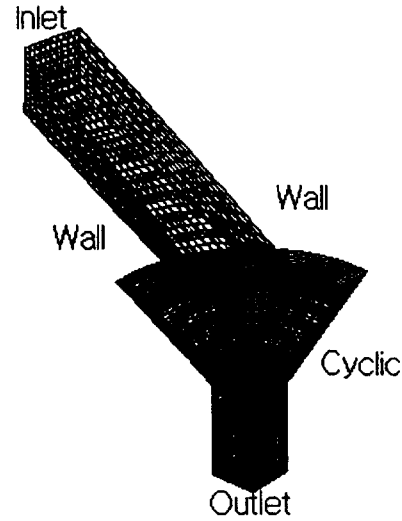
(b) Axial view (c) Horizontal view

Fig. 1. Geometry of a cone type nozzle

계산에 사용된 콘 형식의 노즐의 격자는 Fig. 2와 같으며 이차원의 경우는 총격자점의 수가 3315개 이고 삼차원의 경우에는 22075개이다. 입구조건은 $p_{tot} = 3MPa$, 출구조건은 대기압이다. 경계조건은 Fig. 2에서 보여지는 것과 같다. 특히 이차원에서는 축대칭(Axisymmetry) 조건으로 계산하였고 삼차원에서는 사이클릭(Cyclic) 조건으로 하여 전체계산 영역의 1/4을 계산하여 결과를 얻었다.

Table1. Specifications of a geometric variables

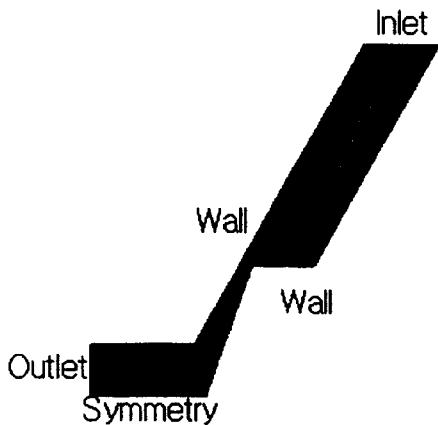
| Design variables | Specification |
|------------------------|--------------------------------|
| Inlet depth[mm] | 0.5 |
| do[mm] | 0.8 |
| lo/do | 0.5, 1.0, 2, 3 |
| Needle cone angle[°] | 100, 110, 120, 130, 140, 150 |
| Swirler cone angle[°] | 80, 90, 100, 110, 120, 130 |
| Seat angle[°] | The same as Swirler cone angle |
| Needle lift[μm] | 50, 70, 100, 120, 150 |
| No. of Swirl ports | 4 |
| Needle type | cone |



(b) 3D grids

Fig. 2. Grid generations of cone type nozzle

특히 삼차원의 경우 분사 압력을 4.5MPa일 경우를 수치 해석하여 Park⁽¹¹⁾ 등의 실험치와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 비록 계산치가 실험치 보다 조금 과대 평가되었지만 전체적인 경향은 동일하게 나타나고 있다. 이러한 차이의 원인은 오리피스 입구의 공동현상과 데드 볼륨(dead volume)의 영향으로 보여진다. 설계 변수는 Table 1에서 주어진 바와 같이 스윙각(swirl angle), 콘각(cone angle), 시트각(seat angle), 오리피스 길이(orifice length), 출구 직경(outlet diameter)등을 선택하였다.



(b) 2D grids

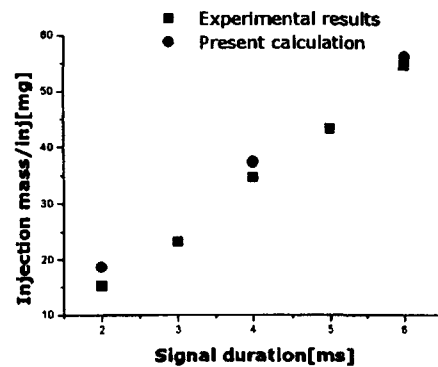


Fig. 3. Comparisons of calculations with experimental results

Fig. 4는 스윙각을 120°로 고정⁽¹¹⁾하여 두고 니들 행정을 보통의 상용 인젝터에서 사용되는 70 μm에서 콘각을 120° 부터 160°까지 변화시키면서 계산한 질량 유량을 도시한 것이다. 이 그래프에서 질량유량이 콘각 140°를 기준으로 기울기가 완만해 가는 것을 볼 수 있다. 따라서 140°를 질량유량에 대한 최적의 콘각으로 선정하였다.

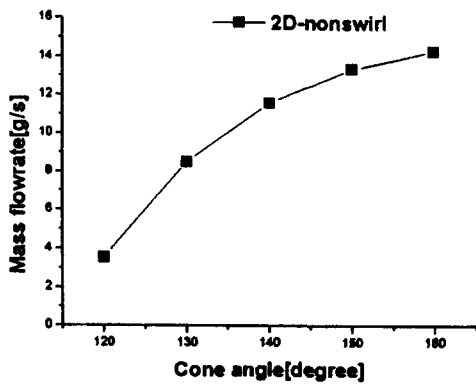


Fig. 4 Distribution of mass flowrate with changes of a cone angle

Fig. 5는 콘각 140°, 니들 행정 70 μm으로 고정하여 두고 스윙각을 110°에서 130°까지 변화시키면서 질량유량에 대한 최적의 스윙 각도를 구한 그래프이다. 보통 상용으로 사용되는 GDI 인젝터의 질량유량의 사용범위가 10g/s에서 15g/s 정도인 점을 고려하여 스윙각 120°를 최적치로 선정하였다.

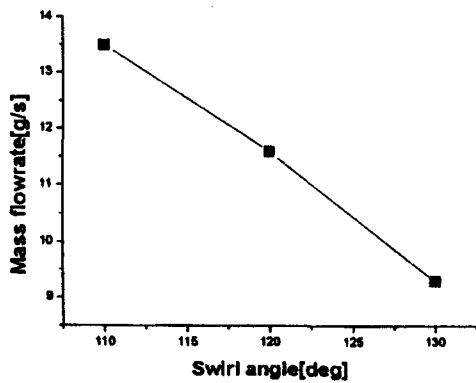


Fig. 5 Distribution of mass flowrate with changes of a swirl angle

Fig. 6은 질량유량에 대한 스윙각, 콘각 그리고 니들 행정에 대한 종합적인 영향을 그래프로 도시하고 있다. 질량 유량은 니들 행정이 적을 경우 선형적으로 증가하다가 점차 일정한 값에 도달하는 것처럼 보인다. 이는 출구 단면적이 고정되어 있어 유로 단면적이 제한되기 때문으로 생각된다. 그리고 스윙각과 콘각이 커질수록 질량유량이 수렴하는 것을 알 수 있다. 이것은 스윙각 120°, 콘각 140° 값을 넘은 후에는 스윙각과 콘각의 변화가 질량유량에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다. 이 두선이 교차하는 영역은 80~90 μm 정도가 됨으로 최적치는 스윙각 120°, 콘각 140°, 니들 행정 70 μm 정도가 된다.

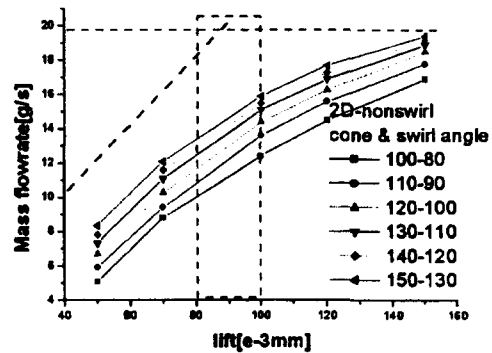


Fig. 6 Effects of swirl angles and cone angles and lifts on mass flowrate

Fig. 7은 출구 지름을 변화시키면서 질량유량의 변화를 살펴보았다. 본 연구에서는 상용으로 사용되는 GDI 인젝터의 질량유량의 사용범위가 10g/s에서 15g/s 정도인 점을 고려하여 보았을 때 출구직경을 0.8mm를 최적치로 볼 수 있다. Fig. 8은 출구 지름에 따른 내부 유동의 속도 벡터를 살펴본 것이다. 여기에서 속도 벡터의 크기와 헤드는 동일하게 하여 벡터의 방향을 살펴보았다. 출구직경이 0.8mm인 경우에는 니들 끝과 오리피스 입구의 커빙이에서 생기는 와류가 가장 작음을 알 수 있다. 그래서 출구 지름 0.8mm를 최적치로 보고 이를 선정하였다. Fig. 9에서는 오리피스 길이와 출구 지름에 따른 질량 유량의 변화를 살펴보았다. 그래프에서 오리피스 길이와 출구 지름길이의 비가 1인 부분에서 최대의 질량유량을 얻을 수 있다. 이는 유체가 축류현상의 영향으로 오리

피스 길이가 긴 경우에 오리피스 벽면에 재부착되기 때문인 것으로 보인다. 이와는 반대로 오리피스 길이가 짧을 경우 유체는 오리피스 벽면에 재부착하지 못하고 그대로 빠져나간다. 따라서 유효 유로 단면적이 줄어든다고 볼 수 있다.

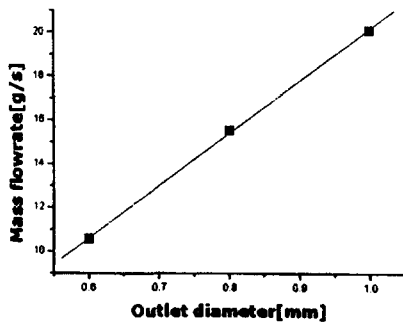


Fig. 7 Distribution of mass flowrate with respect to the outlet diameter

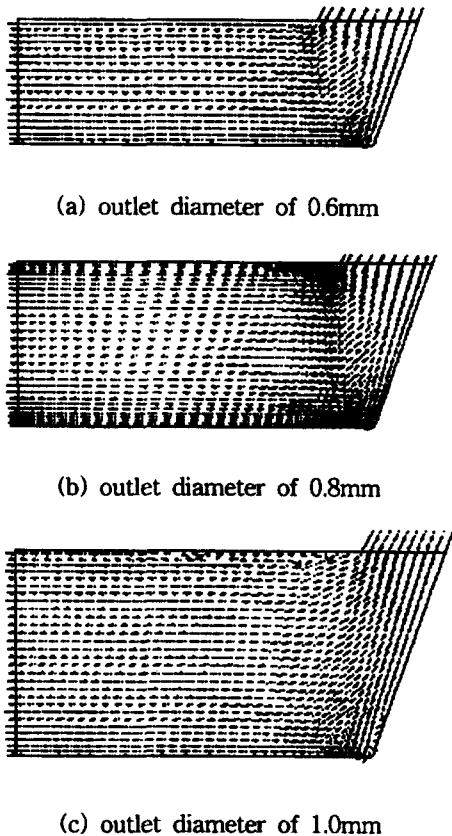


Fig. 8 velocity vectors near the orifice

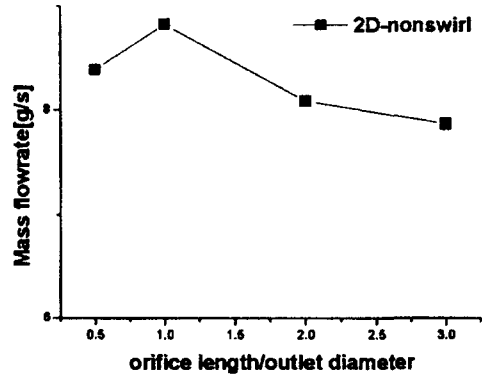


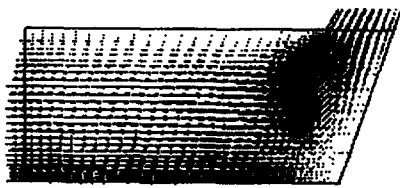
Fig. 9 Distribution of mass flowrate with respect to the ratio of a orifice length to the outlet diameter

Fig. 10과 11은 니들 행정에 따른 영향을 보여 주고 있다. Fig. 10(a)와 11(a)를 살펴보면 니들 행정이 커질 경우에 니들 팁에서의 속도의 감소가 작아짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 10(b)와 11(b)에서 나타나 듯이 니들 행정이 커질수록 니들 팁 부근에서 압력이 대기압 이하로 떨어짐을 볼 수 있다. 이러한 현상들은 니들 끝 부근에서 생기는 와류의 영향으로 여겨지며 니들 행정이 커짐으로 해서 와류의 영향은 줄어들고 있다. 이러한 결과는 Kashiwaya⁽¹²⁾에서도 동일하게 나타나고 있다. 그러나 ball-type의 경우와는 달리 cone-type의 경우에는 니들 행정에 따른 니들 팁에서의 와류의 크기가 그렇게 크지 않음을 알 수 있다.

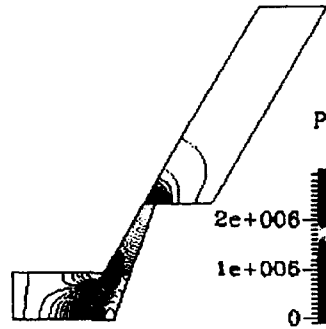
4. 결 론

본 연구에서는 기존의 GDI 인젝터를 바탕으로 하여 새로운 인젝터를 디자인하였다. 이 인젝터를 수치해석한 결과는 각각 다음과 같다. 오리피스 길이와 출구 직경의 비는 1, 콘각 140°, 스웰각 120°, 오리피스 길이 0.8mm, 니들 행정 70 μ m으로 선정하였다. 그리고 오리피스

의 입구에서의 축류현상(vena contracta)은 모서리를 둥근 모서리로 만들면 해결할 수 있다. 본 연구에서 개발한 인젝터에서는 ball-type의 인젝터와는 달리 니들 행정에 의한 와류의 영향이 그렇게 크게 나타나지 않았다.

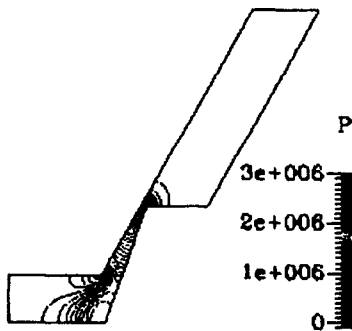


(a) Velocity vectors near the tip of a needle



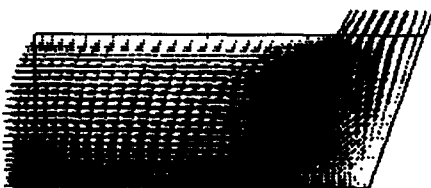
(b) Pressure contours

Fig. 11 Characteristics of internal flows of the GDSI with the cone angle of 140°, the swirl angle of 120° and the needle lift of 100 μm



(b) Pressure contours

Fig. 10 Characteristics of internal flows of the GDSI with the cone angle of 140°, the swirl angle of 120° and the needle lift of 50 μm



(a) Velocity vectors near the tip of a needle

참고문헌

1. Zhao, F. Q., Lai, M. C., and Harrington, D. L., "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines," SAE Paper 970627.
2. Taylor, G. I., "The Mechanics of Swirl Atomizers, Seventh International Congress of Applied Mechanics," Vol. 2, 1948, pp. 280-285
3. Giffen, E., and Muraszew, A., "Atomization of Liquid Fuels," Chapman and Hall, London, 1958
4. Dumouchel, C., Bloor, M. I. G., Dombrowski, N., Ingham, D. B., and Ledoux, M., "Viscous Flow in a Swirl Atomizer," Chemical Engineering Science, Vol. 48, No. 1, pp.81-87
5. Ren, W. M., Shen, J., and Nally, J. G., SAE Technical Paper 971641 1997
6. Jang, C., Bae, C., and Choi, S., "Characterization of Prototype High Pressure Swirl Injector Nozzles-Part

- II:CFD Evaluation of Internal Flow," J. Atomization and Sprays (will be published in 2000)
7. W. M. Ren and S. Nally, "Transient Flows in High Pressure Swirl Injector," SAE Technical Paper 980499, 1998.
 8. Min Xu and Lee E. Markle, "CFD-Aided Development of Spray for an Outwardly Opening Direct Injection Gasoline Injector," SAE Technical Paper 980493, 1998.
 9. CFD-ACE Theory Manual, CFDRC, pp. 51-5.41998.
 10. Baldwin, B. S., and Lomax, H., "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Flows," AIAA-78-257
 11. Park, Y. K., Moon, S. Y., Lee, C. W., "Design and Development of a new Gasoline Direct Swirl Injector," J. of Automobile Engineering
 12. Kashiwaya, M., Kosuge, K., Nakagawa, K., and Okamoto, Y., "The Effect of Atomization of Fuel Injectors on Engine Performance," SAE Technical paper 900261, 1990.