정적연소기 부실내 잔류공기 소기특성에 대한 수치해석적 연구

허형석† ·서용권*

Numerical Study on Scavenge Characteristics in a Subchamber of Constant Volume Combustor

Hyeung Seok Heo and Yong Kweon Suh

Key Words: HCCI(균일 예혼합 압축 점화), Subchamber(부실), Constant Volume Combustor(정적 연소기), Scavenge Characteristic(소기 특성)

Abstract

In this paper, we present scavenge characteristics in a small subchamber of HCCI. It is very important to enhance scavenge rate because ignition in a chamber sometimes does not happen. To understand this phenomenon numerical tool was performed using the FLUENT which is a commercial code. Focus is given to the effect on the scavenge rate of the geometric factor that is the angle of nozzle injection. The numerical results show that the scavenge ones in the subchamber heavily depend on the nozzle angle. It was found that the scavenge rate is more effective at angled nozzle.

1. 서 론

자동차 엔진의 성능은 시간이 갈수록 점점 더 좋아지고 있고 자동차의 수요도 더욱더 높아지고 있다. 하지만 늘어나는 자동차 수요의 증가와 같이 늘어난 자동차의 배출가스를 줄일려는 세계적인 관심이 증대되고 있다. 이러한 추세에 따라 차세대 엔진 개발에 박차를 가하고 있다. 이것은 곧 각종 유해배출가스 및 CO_2를 줄이는 방법이 필요하게 되는데 이를 위한 현재로서의 방안은 희박 연소의 실현이다. 그러나 이 방법은 느린 연소속도, 실화 유발 등 문제점이 있다. 이를 극복하기 위하여 초희박연소가 가능한 HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition; 예혼합 압축착화) 엔진이 있다.

이 엔진은 가솔린기관의 저배기 특성과 디젤기관의 고효율 특성을 함께 지니고 있지만 확실한 자기 착화원의 확보와 자기착화시기의 제어기술의 부재로 인해 폭넓은 작동영역에 있어 사이클 안정성의 실현이 곤란하다는 단점이 있다. 그래서 이러한 장단점을 보완할 수 있는 신개념의 엔진 설계가 필요하게 된다.

신개념 엔진설계의 방법으로 엔진내에 장착할 수 있는 초소형 부실을 제작하여 그 내부에 스파크 플러그를 장착하고 이 플러그를 점화, 발생한 화염은 부실벽에 있는 다수의 연락공을 통해서 주실로 분출시켜 이 에너지를 이용하여 초희박혼합기를 착화하려는 방법이다.(1) 이 개념을 이용하면 신개념의 엔진설계로서 개발가능성은 있지만 국내 기술로서는 정적연소기를 이용한 실험을 통한 초기 연구 단계에 불과하다.(2)

가장 큰 문제는 초소형 부실내에서 발생한 문제로 실화가 발생하게 된다는 것인데 이것은 부

† 책임저자, 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과
E-mail : hsheo@donga.ac.kr
TEL : (051)200-6982 FAX : (051)200-7656
* 회원 : 동아대학교 기계산업 시스템공학부

실내 잔류가스가 적절히 소기되지 못하고 있다는 것이다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 여러개의 부실을 제작하여 실험을 수행할 수 있으나 제작비 절감, 시행 착오의 감소를 위하여 수치해석을 수행할 필요가 있다.

컴퓨터의 급진적인 발전으로 이 정도의 해석을 수행하기 위해서 몇 년전에는 계산시간이 몇 달이 소요되었지만 요즈음 단 몇주, 몇일이면 수행이 가능하게 되었다. 이러한 해석방법을 이용하여 엔진에 유동 및 연소특성을 연구하고 있다.[3~7]

위와 같은 연구의 바탕으로 하여 부실내 유동 및 잔류가스의 특성연구가 실험적으로 불가능하여 본 연구는 CH_4를 분사한 후 부실내에서 문제시 되는 잔류가스(잔류 공기)의 소기량에 대하여 수치해석적으로 예측하고자 한다.

2. 유동모델 및 수치해석 기법

2.1 유동 모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 해석모델의 형상이다. *x, y, z*는 부실의 폭, 높이 방향의 좌표이다. *H, D, d*는 부실의 깊이, 지름 그리고 노즐의 지름이다. 부실의 체적은 4cc이며 노즐의 직경은 1mm이다. 노즐의 위치는 두가지의 경우를 수행하였으며 case 1는 실제 실험장치에 준하여 *S*=7mm, θ=90도 이고 case 2는 *S*=6mm, θ=30도 이다.

부실내로 분사되는 연료는 고압 분사특성을 가지고 있으며 이것은 노즐내에 흐르는 압축성 유동특성을 가지고 있다. 그래서 일반적인 지배방정식에서 벗어나 다음과 같은 질량유량식(1)과 분출속도(2), 마하수(3)를 언급할 수가 있다. 이러한 식을 바탕으로 경계조건을 부여할 수 있는 경계물성치를 구하였으며 수치해석에 필요한 경계조건을 부여하였다.

$$\dot{m}_{max} = A^* p_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (1)$$

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} \cdot RT_t} \quad (2)$$

$$M = \sqrt{\gamma RT^*} \quad (3)$$

여기서 $\dot{m}$은 질량유량이고 A^*는 임계단면, p_0 초기압력, γ는 비열비, R는 기체상수, T_0는 초기 온도, V는 분출속도, T_t는 정체온도, M는 마하수, T^*는 임계온도를 나타낸다.

2.2 경계조건 및 사용 CFD 소프트웨어

Fig. 1에서 보여준 해석 모델에 대하여 입출구 경계조건으로 입구유속 및 압력은 125m/s, 5kg$_f$/cm^2(abs), 출구압력으로 1kg$_f$/cm^2(abs)을 사용하였다. 입구에는 CH_4가 흘러 들어가고 부실내에는 공기가 있는 상태에서 해석을 수행하였다. 그리고 유동을 지배하는 방정식은 일반적인 *k*-ε 난류 모델을 사용하였다.

한편, 본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증되어 있는 상용코드(FLUENT 6.0)를 사용하였다.

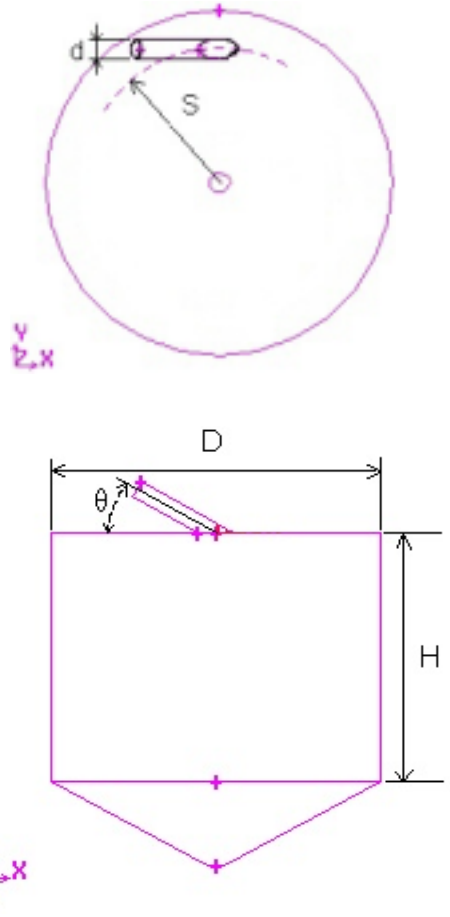


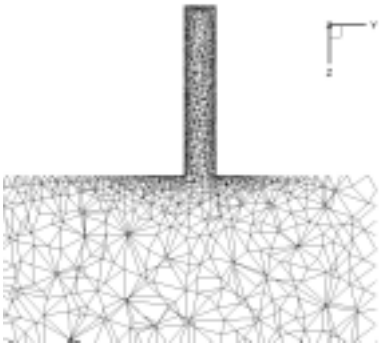
Fig. 1 Perscpective view of the flow domain surrounded by a subchamber

3. 결과 및 검토

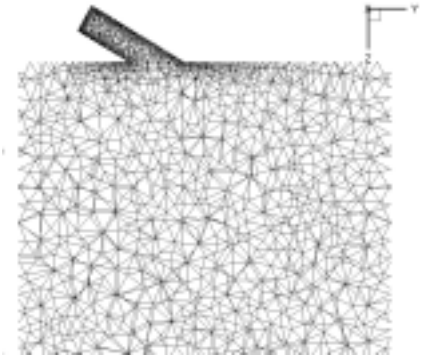
Fig. 2는 각 case에 대한 격자계를 나타낸 것이다. 노즐부분이 부실에 비하여 상대적으로 작기 때문에 해석의 정확성을 위하여 이 부분의 격자를 집중하였다. Case 1의 경우 약 10만개, case 2의 경우 약22만개의 격자계를 구성하였다.

Fig. 3는 각 case에 대한 노즐부에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. Case 1의 경우 주 유동 방향이 부실아래방향으로 집중되고 있는 것을 확인할 수 있다. Case 2의 경우 주 유동방향이 부실 벽을 향하고 있는 것을 볼 수 있는데 이 유동 특성에 의해 부실 내 스월유동이 발생될 것으로 추측할 수 있다.

Fig. 4는 부실 출구부에서의 마하수 분포를 나타내고 있다. 마하수가 약 1을 하고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 유출되는 부분에서의 유량이 더 이상 증가되지 않는 질식 유동 현상으로 해석된다.

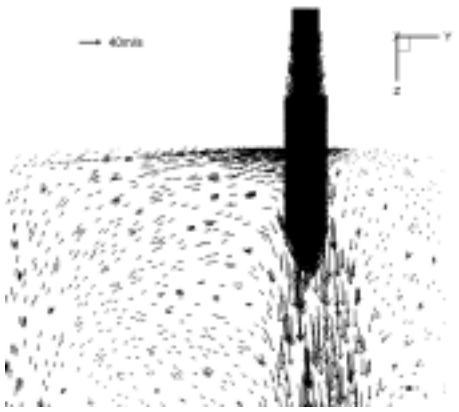


(a)

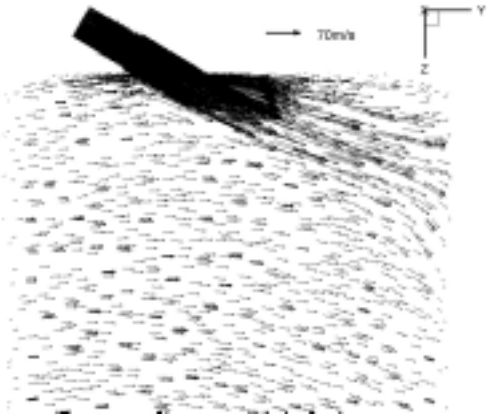


(b)

Fig. 2 Grid generation for each case, (a) case 1, (b) case 2

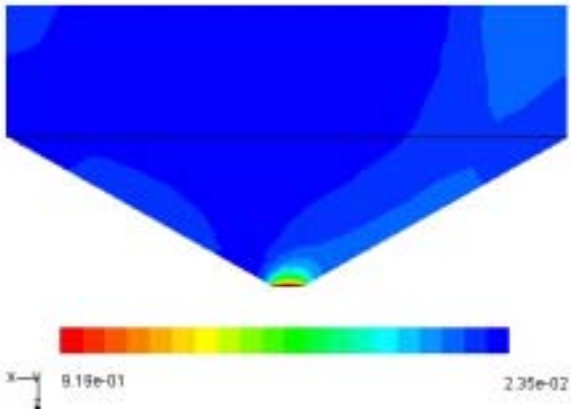


(a)



(b)

Fig. 3 Velocity distribution for each case, (a) case 1, (b) case 2



(a)

Fig. 4 Mach number distribution

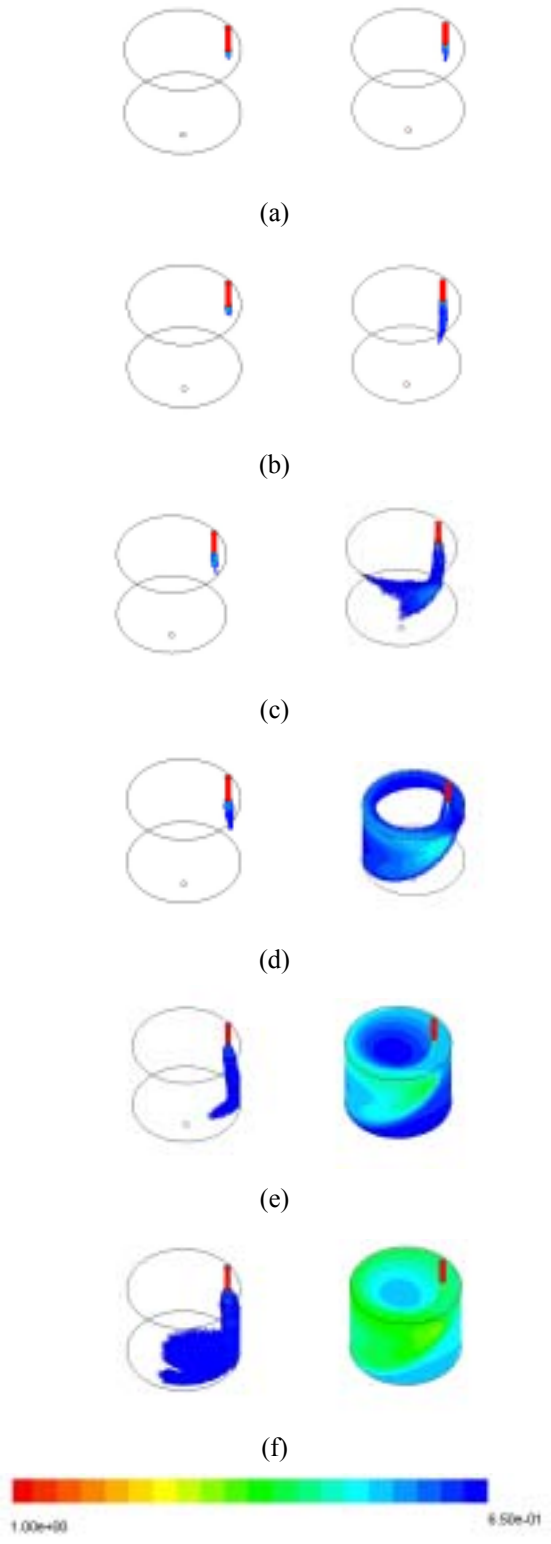


Fig. 5 Case 1 (left) and case 2 (right) results of Ch_4 deformation after each time, (a) 10ms, (b) 20ms, (c) 25ms, (d) 30ms, (e) 35ms, (f) 40ms

Fig. 5는 각 시간단계에 따라 CH_4의 거동을 추적한 것으로 이때의 CH_4의 양은 최소 0.65에서 최대 1까지의 분포를 나타내었다. 그림의 좌측은 case 1의 경우에 대한 결과로 부실내로 노즐의 각도가 수직인 경우에 대한 분포결과이고 우측의 그림들은 case 2의 경우에 대한 결과로 부실내로 노즐의 각도가 30도 기울어진 경우에 대한 결과이다. 25ms시점에서 각 노즐에서 분사된 CH_4는 경사진 노즐의 경우에서 더 빨리 부실내로 분사되고 있는 것을 볼 수 있다. 30ms시점에서는 case 1의 경우에서는 부실내에 이제 분사되는 모양이지만 case 2에서는 부실벽을 회전하고 있는 상태이다. 결국 40ms시점에서는 case 1는 CH_4가 바닥에 분포하고 있는 동안 case 2는 부실내를 꽉채우고 있다. 그리고 중요한 것은 30ms와 40ms의 결과를 case 1과 case 2와 비교해 보면 case 2에서 CH_4가 더욱더 높은 비중을 차지하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것을 통해서 CH_4의 더 높은 비중을 차지하고 있는 case 2가 부실 내부에 있는 잔류공기를 더 빨리 빠져나가게 한다는 것을 예측할 수 있다.

지금까지는 부실내의 특성을 정성적으로 알아보았지만 정량적인 분석이 필요하다 다음에서는 노즐의 위치 및 각도를 변경하여 부실내 잔류공기 농도를 알아 보겠다.

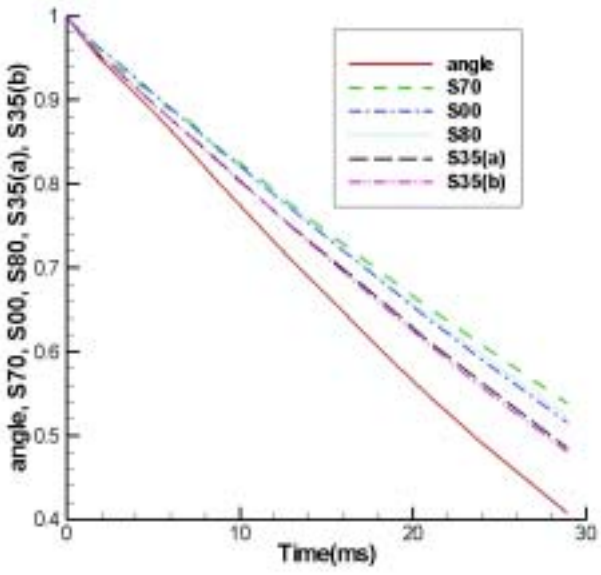


Fig. 6 Air mass-average weight as a function of time

Fig. 6은 노즐의 각도가 30도(angle), 노즐의 각도가 90도에서 위치가 다른 경우(S70, S00, S80, S35은 중심에서 각각 7, 0, 8, 3.5㎜ 떨어진 위치)에 대한 부실내 분포하는 공기량을 1을 기준으로 하여 시간이 지남에 따라 잔류하여 남아 있는 정도를 나타내고 있다.

Angle을 나타내고 있는 분포선과 R70을 나타내고 있는 분포선에서 기존의 연구결과에 대하여 확연하게 구분할 수 있는데 시간이 지남에 따라 잔류하는 공기량을 노즐각 30도의 경우가 더욱더 빨리 줄고 있음을 알 수 있다. 이것은 R70의 경우에는 노즐에서 분사된 CH_4가 시간이 지남에 따라 부실내의 공기를 고립시키는 와류를 발달 형성하게 되어 고립된 공기는 출구로 향하여 쉽게 빠져 나오지 못하는 결과를 낳게 된 결과로 해석이 된다. Angle의 경우는 30도 경사방향으로 분사된 CH_4는 부실내에서 swirl을 형성하게 되고 이 유동은 부실내의 공기가 쉽게 빠져 나가는 결정적인 요소가 된다.

다음은 R80, R00, R35에 대한 설명이다. R80의 경우에서는 R70에 비하여 상대적으로 부실출구와의 거리에서 먼 위치에 있지만 보다 효과적인 결과를 낳았다. R00의 경우는 부실출구와 상대적으로 가까운 노즐의 위치이며 이것은 조금더 빠른 공기 소기 특성을 보일 거라고 추측하였지만 R35에 비하여 그다지 효과적인 결과를 얻지 못하였다.

그리고 R35(a)와 R35(b)는 격자계의 충실도를 확인한 것으로 각각35만개, 14만개의 격자수를 가지고 해석을 수행한 것이다. 해석결과에 큰차이를 나타내지는 않는 것을 볼 수 있으며 상대적으로 작은 격자수에 대해서도 해석이 가능함을 확인할 수 있었다.

지금까지의 모든 내용을 종합하여 부실내 유동특성 및 농도 분포들을 알아보았다. 이를 바탕으로 수직으로 위치한 노즐의 위치를 변경하여 부실내 공기의 잔류량의 변화를 분석하여 보았고 차후 연구 계획으로 노즐의 각도를 변화하여 분석하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 정적 연소기 부실내의 소기특성에 대하여 노즐의 위치 및 각도가 다른 경우에 대한 영향을 분석하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 경사진 노즐에서 분사된 연료는 부실내에서 스월유동이 발생하는 것을 확인하였다.

(2) 부실내 잔류공기 소기량은 노즐이 각을 진 경우에 더욱더 많아졌다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 과제번호 R01-2003-000-11622-0에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 조상무, 전재혁, 장인선, 박권화, 정성식, 2003, "라디칼인젝터를 적용한 정적연소기의 연소특성에 관한 계산적 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제27권 제 9호, pp. 1309 ~ 1316.

(2) Bae, C. S., 2003, "Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Early Disel Injection Strategy," HCCI 엔진 연소기술 Workshop, pp. 49 ~ 59.

(3) 양두한, 박영구, 2003, "정적챔버내 연료분무의 수치해석적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 974 ~ 979.

(4) 정해영, 이기형, 이창식, 2003, "연료 물성치 변화가 HCCI용 스월 인젝터의 분무특성에 미치는 영향," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 478 ~ 483.

(5) 심영삼, 황순철, 김덕줄, 2003, "분위기 조건에 따른 GDI 분무거동의 수치적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 466 ~ 471.

(6) Park, S. W. Kim, H, J. and Lee, C. S., 2003, "Numerical and Experimental Analysis of Spray Atomization Characteristics of a GDI Injector," *KSME International Journal,* Vol. 17, NO. 3, pp. 449~456.

(7) Park, S. W. Kim, H, J. and Lee, C. S., 2003, "Numerical and Experimental Analysis of Spray Atomization Characteristics of a GDI Injector," *KSME International Journal,* Vol. 17, NO. 11, pp. 1812~1819.