엔진 예혼합실의 소기 특성에 대한 이론 및 수치해석적 연구

허형석† ·서용권*

Theoretical and Numerical Study on Scavenge Characteristics from a prechamber for use in an engine

Hyeung Seok Heo and Yong Kweon Suh

Key Words: HCCI(예혼합압축착화), Prechamber(예혼합실), Scavenge Chamber(소기 특성),

Abstract

In this paper, we present the theoretical and numerical results of scavenge characteristics in a small prechamber of an HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) engine. Two theoretical models are proposed in prediction of the scavenge time and the efficiency ; one is the non-mixing models in which it is assumed that the input gas(CH_4) and the existing gas(air) do not mix with each other, and the other is the fully-mixed model in which the two gases are assumed to mix completely before ejecting to the ambient air. Focus is also given to the effect on the scavenge performance of the size of the chamber oulet.

1. 서 론

자동차로부터 발생하는 NOx, CO, HC 등과 같은 유해배출물 감소 및 청정 연소기에 대한 요구는 날로 증가하고 있다. 이러한 요구들을 충족할 수 있는 방법으로 희박연소기가 최근 연구 및 상용화 되었다. 하지만 이 방법도 느린 화염전파 및 실화 문제를 안고 있다. 그래서 이러한 복합적인 문제점을 해결하기 위하여 새로운 엔진으로 HCCI (Homo geneous Charge Compression Ignition: 예혼합압축착화)엔진이 연구되고 있다.

이 HCCI 엔진은 스파크 점화 엔진과 압축착화 엔진에 대한 대체 엔진으로 고효율과 저 NOx, PM(Paticular Matter)을 기대할 수 가 있다. 이 엔진에 대한 설계의 개념은 처음에는 스파크 엔진에서부터 주실과 부실을 분리하는 것으로부터 시작되었다. 부실은 예혼합실로써 스파크 점화된 화염은 중간에 연결되어 있는 오리피스를 통해서 부실로 전파된다. 이 결과로 전파된 화염은 주실내의 화염원 그리고 난류 발생원이 되어 주실내 전체 화염을 형성하게 된다. 이러한 기술을 이용하게 되면 희박한 혼합기를 이용하더라도 급속한 연소를 가능하다. 즉 희박연소의 실현으로 유해배출물들을 줄일 수 있다는 것이다.[1, Fig. 1]

이러한 HCCI 엔진에 대한 개념으로 이전의 연구자들은 다음과 같은 연구를 수행하였다. 국외의 연구들을 살펴보면, Dale 등[2]은 실험적으로 보다 높은 에너지 공급원으로 작용할 수 있는 대체 점화 시스템에 대해서 가스 혼합기에 적용 및 연구를 수행하였다. Smith 등[3]은 수치해석적인 방법으로 자기 착화 과정을 HCT 코드를 이용하여 연구를 수행하였다. Maigaard 등[4]은 HCCI 엔진에 대하여 여러종류의 화학반응에 대해서 화학반응 모델을 제시하였다. Aceves 등[5]은 수치해석적으로 NOx, HC, CO 배출특성을 연구하였다. Kong 등[6]은 CHEMKIN과 KIVA CODE를 이용하여 HCCI 엔진에 대한 예혼합특성을 살펴보았다. 국내 연구들을 살펴보면, 박 등[7, 8]은 직접분사 익젝터에 대해서 무화 특성에 대하여 수치해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 국내 연구를 아직 시작단계에 있으며 선직국의 기술수준에 미치지 못하고 있다.

본 연구는 부실내 잔류가스의 소기 특성에 대해 수치해석적인 방법과 동시에 이론해석을 수행함으로써 이론과 수치해석이 상호보완될 수 있도록 하고자 한다. 그리하여 궁극적으로는 이론해

† 동아대학교 기계공학과 대학원
E-mail : hsheo@donga.ac.kr
TEL : (051)200-6982 FAX : (051)200-7656
* 동아대학교 기계산업시스템공학부

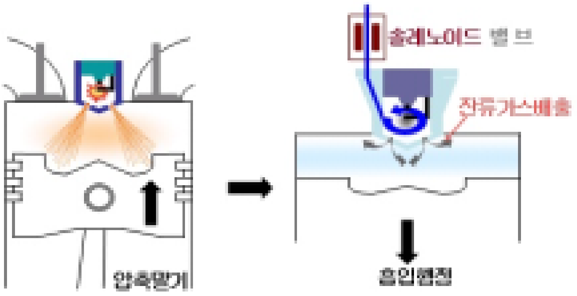


Fig. 1 Concept sketch of the HCCI engine with a prechamber

석의 방법이 과연 실제 설계에 응용될 수 있는 것인지를 파악하는 것이 본 연구의 주된 연구목표이다.

2. 이론모델 및 수치해석

2.1 이 론

실제 엔진에서 한 사이클 동안 부실은 신기(여기서는 CH_4)와 연소가스(혹은 잔류가스; 여기서는 공기)가 교대로 차지하는 형태를 띈다. 한 사이클 동안의 주실 및 부실의 상황을 살펴보면, 먼저 신기가 부실 내로 유입되면서 이 전 사이클 동안 연소한 잔류기체를 배출시킨다. 다음, 부실 내의 스파크 플러그의 점화에 의해 부실이 연소하면 부실내는 고온 고압의 화염으로 가득 차고 이어서 화염이 연락공을 통해 주실로 분출된다. 주실에서는 분출된 고온의 화염을 핵으로 하여 동시다발적으로 연소가 이루어진다. 이러한 과정이 반복되는 것이 HCCI엔진의 기본개념이다(Fig. 1.). 본 연구는 이러한 과정에서 신기에 대한 잔류 기체의 배출시간을 정확히 예측하는 이론식을 제시하는 것이 주된 목표이다.

부실 내의 스파크 플러그는 본 이론해석에서는 완전히 무시한다. 그리고 부실에서 주실로 화염 혹은 잔류가스를 배출시키는 연락공은 1개로 가정한다. 그러나 이론해석의 입장에서는 연락공의 개수가 문제되는 것은 아니고 연락공의 전체 단면적만이 중요하다. 본 연구에서는 특별히 입구 직경을 1mm로 고정하고 출구 직경을 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm의 4가지로 또는 연속적으로 변화시키면서 출구 직경의 영향을 검토하였다. 부실의 형상도 이론해석에서는 문제시되지 않고 체적의 크기만이 중요하다. 본 연구에서는 부실의 체적을 4cc로 고정하였다.

이론해석에서 부실은 Fig. 2와 같이 두 가지 형태로 모델링한다. (a)는 비혼합모델(non-mixing model)로서, 부실 내에 유입된 기체가 잔류가스와 전혀 혼합되지 않은 상태로 존재하고 유입된 기체가 잔류 기체를 그대로 출구로 밀어내는 형태이다. 사실, 이 모델이 이론적으로는 가장 이상적인 모델이며 설계자의 입장에서는 가장 바람직한 소기 형태라 말할 수 있다. (b)는 완전 혼합모델(fully-mixed model)로서, 부실로 유입된 기체가 유입 즉시 잔류 기체와 완전히 혼합되고(따라서 부실 내 기체는 항상 균질혼합의 상태로 존재하는 것으로 가정)배출할 때는 완전히 혼합된 상태라 가정한다. 두 가지 모델 모두에서 신기는 일정한 압력과 온도로 유지되는 신기저장 탱크에서부터 공급된다.

본 연구에서는 신기의 저장탱크 압력을 $p_{00} = 5$ [bar], 온도를 $T_{00} = 300$ [K]로 가정하였으며, 밀도 ρ_{00}는 이상기체 상태방정식으로부터 구해진다.

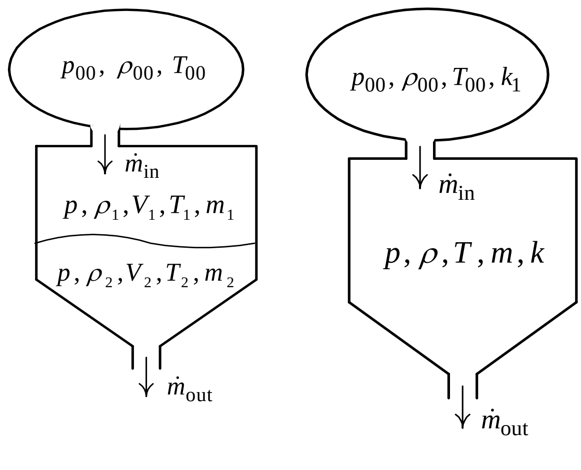
2.1.1 비혼합 모델(Non-mixing model)

이 모델에서는 부실내는 Fig. 2(a)에서처럼 입구 근처에서 신기만으로 채워진 체적 V_1의 영역과 출구 근처에서 잔류가스만으로 채워진 체적 V_2의 영역으로 이루어지며 두 영역은 전혀 혼합되지 않는 것으로 가정한다. 단, 압력은 동일한 것으로 가정한다. 우선 두 공간에 대해 연속방정식을 적용하면 아래와 같다.

$$\frac{dm_1}{dt} = f_1 \quad (1)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = -f_2 \quad (2)$$

여기서 시간함수인 m_1, m_2는 두 영역 내 기체 질량, f_1, f_2는 각각 영역 1로 유입되는 질량유량 및 영역 2로부터 외기로 배출되는 질량유량이다. f_1은 부실 입구에서의 초킹(choking)의 발생 여부에 따라 다음과 같은 식으로 표현된다.



(a) Non-mixing model (b) Fully-mixed model

Fig. 2 Theoretical model

$$f_1 = f(A_1, p_{00}, p, \rho_{00}, k_1)$$
$$= A_1 \sqrt{\frac{2k_1}{k_1 - 1} p_{00}\ \rho_{00} \left(\frac{p}{p_{00}}\right)^{2/k_1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{00}}\right)^{(k_1-1)/k_1}\right]}$$
$$\text{for } \frac{p}{p_{00}} \geq \left(\frac{2}{k_1+1}\right)^{k_1/(k_1-1)} \qquad (\qquad)$$
$$= A_1 \sqrt{k_1 \left(\frac{2}{k_1+1}\right)^{(k_1+1)/(k_1-1)} p_{00}\ \rho_{00}}$$
$$\text{for } \frac{p}{p_{00}} < \left(\frac{2}{k_1+1}\right)^{k_1/(k_1-1)} \qquad (\qquad)$$

여기서, A_1은 부실 입구 단면적이고, p는 부실 내 압력, k_1은 신기의 비열비이다.

배출질량유량 f_2 는 아래와 같이 하여 구한다.

$$f_2 = f(A_2,\ p,\ p_a,\ \rho_2,\ k_2)$$

여기서, A_2는 부실 출구 단면적, ρ_2는 외기(공기)의 밀도, k_2는 잔류가스의 비열비이다, p_a 는 외기 압력으로서 1[bar]로 가정한다.

식(1)과 (2)에 사용된 질량은 아래와 같이 표현된다.

$$m_1 = \rho_1 V_1, \qquad (3)$$
$$m_2 = \rho_2 V_2 \qquad (4)$$

여기서, ρ_1은 영역 1에 있는 신기의 밀도이다. 한편, 두 영역의 체적을 합하면 늘 일정한 양 V_0가 되어야 하므로,

$$V_1 + V_2 = V_0 = \text{const} \qquad (5)$$

이다.

영역 1로 유입되는 신기의 에너지는 영역 1에서 누적되므로 $d(\rho_1 V_1 T_1)/dt = T_{00} f_1$와 같이 쓸 수 있다. 여기서 T_1은 영역 1에서의 온도이다. 신기에 대한 이상기체 상태방정식을 적용하면 이 식은 아래와 같이 된다.

$$\frac{d(pV_1)}{dt} = R_1 T_{00} f_1 \qquad (6)$$

여기서 R_1은 신기의 기체상수이다.

영역 2의 잔류가스는 영역 1의 신기와 동일한 압력으로 유지되는 것으로 가정하고, 그 상태변화는 등엔트로피 과정으로 가정하여

$$p/\rho_2^{k_2} = \text{const} \qquad (7)$$

의 식을 적용한다.

정리하면, 7개의 미지변수 m_1, m_2, ρ_1, ρ_2, p, V_1, V_2가 (1) ~ (7)의 7개 식에 의해 결정된다.

이 방정식 시스템을 풀기 위해, 우선 식 (1), (2)의 질량 m_1, m_2을 식 (3), (4)로 소거한다. 다음, 식 (5)와 (7)을 시간미분하여 동적 방정식을 얻은 뒤 최종적으로 압력에 대한 동적 방정식을 구하면 아래와 같이 된다.

$$\frac{dp}{dt} = g = \frac{k_2 p}{k_2 V_1 + V_2} \left(\frac{R_1 T_{00} f_1}{p} - \frac{f_2}{\rho_2}\right) \qquad (8)$$

이 식으로 압력이 결정되면, 영역 2의 체적은

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{f_2}{\rho_2} - \frac{V_2 g}{k_2 p} \qquad (9)$$

으로 구해지며, 체적 V_1은 식 (5)에 의해, 밀도 ρ_1은 식 (1)과 (3)에 의해 구해진다. 또한 밀도 ρ_2는 식 (7)로써 구한다.

지금까지 제시한 방정식들 중에서 식 (8)과 (9)와 같은 동적 방정식들은 Euler 외재적 방법을 사용하여 해를 구하였으며, 시간 간격은 0.02ms로 하였다.

부실의 입구 유속 u_{e1}은, 초킹 발생시는

$$u_{e1} = \sqrt{\frac{2k_1}{k_1+1} R_1 T_{00}} \qquad (10)$$

으로, 초킹 미발생시는

$$M_{e1} = \sqrt{\frac{2}{k_1-1}\left[\left(\frac{p_{00}}{p}\right)^{(k_1-1)/k_1} - 1\right]} \qquad (11)$$
$$T_{e1} = T_{00}\left(\frac{p}{p_{00}}\right)^{(k_1-1)/k_1} \qquad (12)$$
$$u_{e1} = M_{e1}\sqrt{k_1 R_1 T_{e1}} \qquad (13)$$

으로 구한다. 여기서, M_{e1}, T_{e1}은 부실 입구의 마하 수와 온도이다. 그리고 부실의 출구 유속은, 초킹 발생시

$$u_{e2} = \sqrt{\frac{2k_2}{k_2+1} R_2 T_2} \qquad (14)$$

으로, 초킹이 미발생시

$$M_{e2} = \sqrt{\frac{2}{k_2-1}\left[\left(\frac{p}{p_a}\right)^{(k_2-1)/k_2} - 1\right]} \qquad (15)$$
$$T_{e2} = T_2\left(\frac{p_a}{p}\right)^{(k_2-1)/k_2} \qquad (16)$$
$$u_{e2} = M_{e2}\sqrt{k_2 R_2 T_{e2}} \qquad (17)$$

으로 구한다. 여기서, M_{e2}, T_{e2}는 부실 출구에서의 마하 수와 온도이다.

2.1.2 완전 혼합 모델(fully-mixed model)

이 모델에서는 부실내에서 신기와 잔류가스가 완전히 혼합되어 균질의 상태로 존재하는 것으로 가정한다. 부실 내 전체 질량 m은 다음과 같이 각 성분 질량의 합과 같다.

$$m = m_1 + m_2 \qquad (18)$$

한편, 혼합기체의 상태는 Dalton의 분압모델[9]의 개념을 적용하여

$$p_1 V_0 = n_1 \overline{R} T \qquad (19)$$
$$p_2 V_0 = n_2 \overline{R} T \qquad (20)$$

의 식으로 표현한다. 여기서 $\overline{R}$은 일반 기체상수, p_1, p_2는 각각 신기와 잔류가스의 분압을 나

타내며, T는 부실 내 온도, n_1, n_2는 각 기체의 몰(mole) 수로서 몰 중량(molecular weight) M_1, M_2로부터 아래 식으로 구해진다.

$$n_1 = m_1/M_1 \tag{21}$$

$$n_2 = m_2/M_2 \tag{22}$$

부실내 총 압력은 분압 p_1, p_2의 합과 같다:

$$p = p_1 + p_2 \tag{23}$$

부실 내 총 질량 m의 방정식은 아래와 같이 연속방정식에 의해 간단히 표현된다.

$$\frac{dm}{dt} = f_1 - f_2 \tag{24}$$

여기서, f_1, f_2는

$$f_1 = f(A_1, p_{00}, p, \rho_{00}, k_1)$$

$$f_2 = f(A_2, p, p_a, \rho, k)$$

와 같다. 혼합기체의 비기체 상수 k는 아래 식으로 구해야 한다.

$$k = \frac{1}{n_1 + n_2}(n_1 k_1 + n_2 k_2) \tag{25}$$

신기의 질량 m_1의 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{dm_1}{dt} = f_1 - \left(\frac{m_1}{m}\right) f_2 \tag{26}$$

에너지 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{dH}{dt} = c_{p1} f_1 T_{00} - \left(\frac{m_1}{m} c_{p1} + \frac{m_2}{m} c_{p2}\right) f_2 T \tag{27}$$

여기서, 엔탈피 H는

$$H = (m_1 c_{p1} + m_2 c_{p2}) T \tag{28}$$

와 같다. 그리고 c_{p1}, c_{p2}는 신기와 잔류가스의 비정압비열이다.

계산순서는, 먼저 식 (24)에 의해 부실 내 총 질량 m을 구하고, 이어서 밀도 ρ를 구한 뒤, 식 (26)으로 m_1을 구한다. 다음, 식 (18)로 m_2를 구한 뒤 식 (27)과 (28)로 H와 T를 차례대로 계산한다. 그리고, n_1, n_2를 식 (21), (22)로 구하며, p_1, p_2를 식 (19), (20)으로 구하고, (23)으로 총 압력을 계산한다. 마지막으로 식 (25)에 의해 k를 계산하면, 한 시간 스텝에서의 계산과정이 끝난다.

2.2 3차원 수치해석

Fig. 3은 상용 CFD 툴에 의한 3차원 수치해석을 위해 설정한 유동영역의 개략도이다. *H, D, d, s*는 부실의 깊이, 지름, 노즐의 지름, 중심에서의 거리이다. 본 연구에서는 H=14mm, D=19mm, d_1=1mm로 정하며, d_2 는 1mm, 2mm, 3mm의 세가지, 그리고 s=3.5mm로 설정한다.

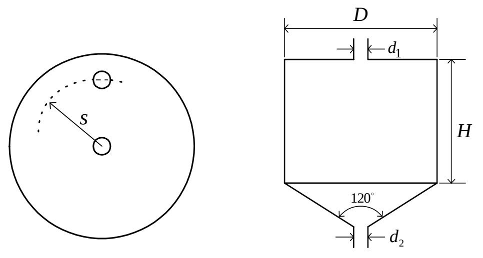


Fig. 3 Top and sectional views of the subchamber subjected to the 3-D CFD.

여기서도 출구의 압력은 앞에서와 같이 1[bar]로 고정시켰다. 그러나 앞과 달리 신기저장 탱크는 제거하여 계산효율의 증대를 도모하였다. 단, 입구 유속은 신기저장 탱크의 압력을 5[bar]로 가정하고 항상 초킹이 발생한다고 가정하여 419m/s로, 그리고 입구 압력도 이에 상응하는 값인 2.7[bar]로 설정하였다. 경계조건은 입구에서 메탄이 유입되고 부실내에는 공기가 이미 있는 상태이고 출구에는 메탄과 공기가 같이 유출되는 조건이다.

본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증되어있는 상용코드(FLUENT 6.0)를 사용하였다. 그리고 난류 모델은 일반적인 표준 k-ε 난류 모델을 사용하였다. 격자계는 비정렬격자계를 사용하며 격자수는 약 9만개이며 유속이 급변하는 입구와 출구부에서는 격자계를 상대적으로 더욱 조밀하게 하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 비혼합 모델(Non-mixing model)

Fig. 4는 비혼합 모델의 이론해석 결과로서 입구 노즐의 직경이 1mm일 때 부실내 잔류가스의 질량분율(mass fraction)의 시간변화를 출구 노즐의 크기별로 나타낸 것이다. 모든 경우에 있어서 잔류가스는 유한한 시간 내에 모두 소기된다. 그리고 당연시되지만, 출구 노즐의 직경이 클수록 소기 시간은 더욱 짧아지고 있음을 알 수 있다. 질량분율 10%인 시점을 비교해 보면 출구 직경이 1mm일 때는 10.5ms, 2mm일 때는 5ms, 3mm일 때는 3.9ms 정도이다. 실제에서는 두 기체가 혼합되고 또 더욱이 신기가 유입된 뒤 미처 충분히 혼합되기 전에 곧바로 출구를 통해 배출될 수 있기 때문에 실제 소기 시간은 더 증가할 것으로 예측할 수 있다. 즉 실제의 소기 시간은 비혼합 모델로 예측한 소기 시간보다 항상 더 클 것으로 짐작할 수 있다.

Fig. 5는 입구 노즐의 직경이 1mm이고 출구 노즐의 크기를 달리하였을 때 출구 노즐에서의 유출 속도를 나타내고 있다. 0.5mm와 1mm의 경우

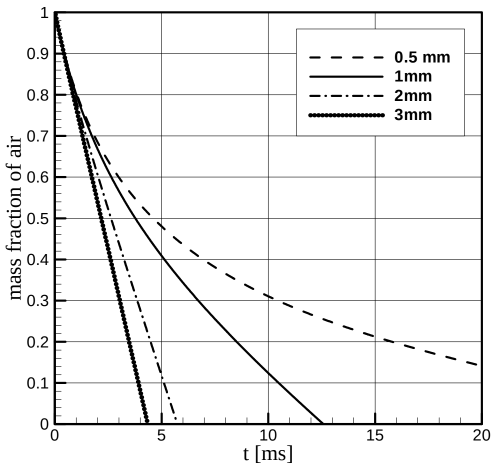


Fig. 4 Mass fraction of the air obtained from the non-mixing model for four outlet diameters.

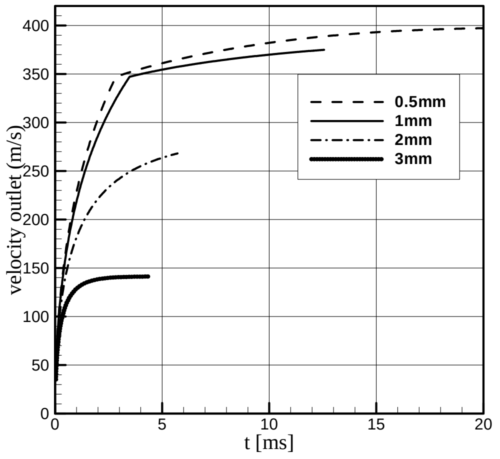


Fig. 5 Velocity at the outlet obtained by the non-mixing model for four oulet diameters.

는 3ms 근처에서 이미 출구에서 초킹이 발생함을 알 수 있다. 이는 출구가 작기 때문에 부실 내 압력이 쉽사리 증가되기 때문이다. 그리고 출구 직경이 커질수록 전반적으로 배출속도는 감소된다. 특히 직경 3mm의 경우에는 2ms 경부터 정상 상태에 도달한다.

3.2 완전 혼합 모델(Flly-mixed model)

Fig. 6과 7은 완전 혼합 모델을 이용한 이론해석 결과와 FLUENT의 3차원 수치해석 결과를 비교한 것으로서 입구 노즐의 크기가 1mm일 때 부실내 공기의 질량분율과 유출 속도를 출구 노즐 크기별로 나타낸 것이다.

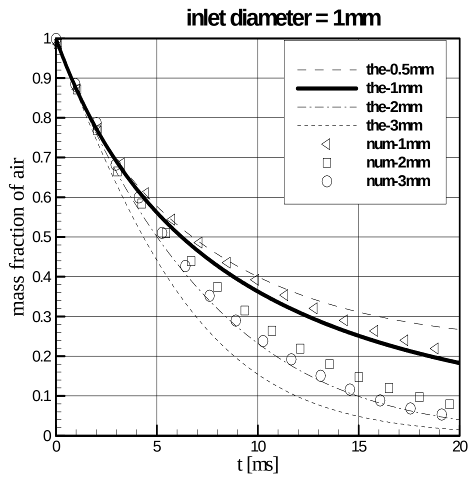


Fig. 6 Mass fraction of the air obtained by the fully-mixed model(lines) and 3-D CFD (symbols).

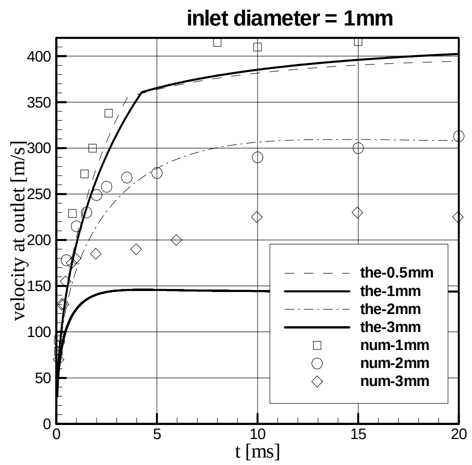


Fig. 7 Velocity at the outlet obtained by the fully-mixed model(lines) and 3-D CFD (symbols).

Fig. 6을 보면 완전 혼합 모델을 적용한 이론해석이 3차원 CFD 수치해석 결과에 비하여 다소 빠른 소기시간을 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 앞의 비혼합 모델과 비교하면 완전혼합 모델의 결과가 훨씬 더 정확히 3-D 수치해석 결과를 예측하고 있고, 또 설계에 이론 해석의 결과를 바로 적용해도 큰 무리가 없을 정도임을 알 수 있다.

이론해석의 결과가 여기서도 더 짧은 소기시간을 예측하고 있음은, 유입된 신기가 충분히 혼합되기 전에 바로 유출구를 통해 외기로 배출되고 있음을 암시한다. 그것은 Fig. 7의 유출 속도의

크기에서도 알 수 있다. 이론해석에 비해 수치해석의 결과가 전반적으로 더 크게 예측하고 있는 것은 다음과 같이 생각할 수 있다. 우선, 유입된 질량만큼 배출되는 것으로 가정하면, 배출 속도가 크다는 것은 배출되는 혼합기체의 밀도가 이론적으로 완전히 혼합된 상태로 배출하는 경우보다 상대적으로 더 작음을 의미하며, 이는 유입된 메탄이 잔류가스인 공기와 충분히 혼합되기 전 상태에서 배출된다는 것을 의미한다. Fig. 7에서 또한 출구 직경이 작을수록 이론해석의 결과가 수치해석 결과와 더 잘 일치하는 것은, 출구 직경이 작을 때는 기체가 곧바로 배출하기보다는 부실 내에서 더 오랫동안 머물면서 잔류가스와 혼합할 시간이 그만큼 더 많기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8은 입구 노즐의 크기가 1mm이고 출구노즐의 크기가 3mm일 때 메탄의 질량분률의 분포를 34-100%의 범위에서 나타내었다. 이 그림은 3차원 해석의 결과이며 이해를 쉽게 하기 위하여 단면만을 나타내었다. Fig. 8(a)는 분사된 직후의 분포이다. 노즐에서 분사된 메탄은 34%의 질량분율의 분포에 있어서는 아직 출구 벽면에 도달하지 않은 상태다. Fig. 8(b)는 질량분율 분포가 벽면에 도달한 것을 볼 수 있다. 출구 근처에서는 제트의 일부분이 출구로 배출되며 나머지 부분은 다시 부실 내로 재순환되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 이론 및 수치해석을 통하여 HCCI 엔진의 부실 내 소기특성에 대하여 연구하였으며 유입노즐의 직경 1mm에 대한 해석결과 다음과 같이 결론지을 수 있다.

(1) 본 연구에서 제시한 완전혼합 이론해석 모델은 3-D 수치해석 결과와 비교적 잘 일치하여 초기의 부실설계 단계에서 직접 적용할 수 있다.

(2) 동일한 소기특성을 얻기 위한 부실 내 유입 질량은 출구 직경이 작을수록 증가한다.

(3) 출구 직경 3mm 이상에서는 직경이 변하여도 소기특성은 거의 변하지 않는다.

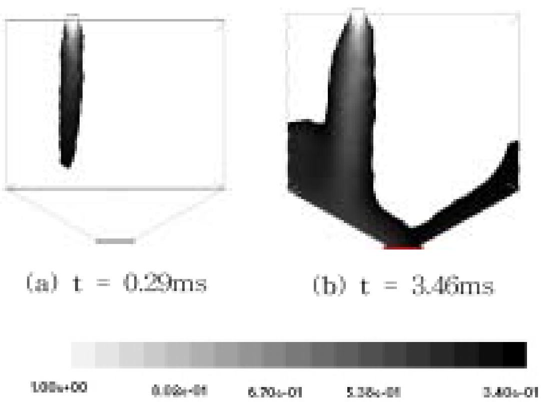


Fig. 8 Distribution of CH4 obtained from the 3-D numerical computation.

후 기

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

참고문헌

(1) Y. Shigeki, O. NOrio, and H. Tatsuya, 1985, "Ignition and Burning Process in a Diviede Chamber Bomb", *Combustion and Flame 59*, pp. 177~187.

(2) J. D. Dale, M. D. Checkel, and P. R. Smy, 1997, "Application of High Energy Ignition Systems to Engines", *Prog Energy Combust*, Vol 23 , pp. 379~398.

(3) J. R. Smith, S. M. Aceves, and W. Pitz, 1997, "Modeling of Homogeneous Charge Compression Ignition Engine(HCCI) of Methane. Lawrence livermore National Laboratory report UCRL-JC-127387.

(4) P. Maigaard, F. Mauss, and M. Kraft, 2000, "Homogeneous Charge Compression Ignition Engine; a Simulation Study on the effects of inhomogeneities. *ASME Paper 200-ICE-275.*

(5) S. M. Aceves, D. L. Flowers, J. Martinez-Frias, J. R. Smith, R, Dibble and J. Girard, 2001, "HCCI combustion: Analysis and Experiment", *ASME paper 20001-01-02077.*

(6) S. C. Kong, R. D. Reitz, 2003, "Numerical Study of Premixed HCCI Engine Combustion and its Sentively to Computational Mesh and Model Uncertainties", *Combust. Theory Modelling 7*, pp. 417~433.

(7) S. W. Park, H. J. Kim, and C. S. Lee, 2003, "Numerical and Experimental Analysis of Spray Atomization Characteristics of a GDI Injector", *KSME Int. J.* Vol. 17. No. 3, p, 449.

(8) S. W. Park, H. J. Kim, and C. S. Lee, 2003, "Numerical and Experimental Analysis of Spray Atomization Characteristics of a GDI Injector", *KSME Int. J.* Vol. 17. No. 11, p, 1812.

(9) G. J. Van Wylon, R. E. Sonntag 1976, *Fundamentals of Classical Thermodynamic*, John wiley and Sons, New York, p. 425.