스월 인젝터 내 압축성 유동 해석

서 용 권*[1], 강 상 모[1], 허 형 석[1]

ANALYSIS ON COMPRESSIBLE FLOW WITHIN A SWIRL INJECTOR

Y.K. Suh*[1], S.M. Kang[1] and H.S. Heo[1]

In the present, The theoretical and numerical results of gas flow characteristics inside a swirl injector are presented. For this purpose a one-dimensional (theoretical) model and 2D/3D CFD models are proposed for use in the design of the injector. It was found that contradictory to the classical theory about the compressible flow, the swirl has a significant effect on the mass flow rate and the choking conditions. It was found that the one-dimensional model provides reasonably accurate results compared with the 2D/3D numerical results, and thus can be used at the initial stage of the swirl-injector design process.

Key Words: 스월 인젝터(Swirl Injector), 스월 각(Swirl Angle), 스월 마하수(Swirl Mach Number), 초킹(Choking)

1. 서 론

스월 인젝터는 연소실내에 연료를 분사하는 장치로, 이것을 통한 연료의 선회를 이용하여 연소효과를 높이기 위해 많이 사용된다. 최근에 이 기기는 다음과 같은 종류로 발전하고 있다. 단일 성분의 유체에 선회를 주면서 분사하는 스월 인젝터, 연료와 공기를 동축상에서 별도의 통로를 통해 동시에 분사하는 스월 동축형 인젝터, 그리고 스월 효과없이 동축상에서 연료를 분사하는 동축 인젝터가 있다. 다음은 스월 인젝터 또는 단순한 인젝터에 대한 최근의 연구동향이다.

홍문근 등[1]은 동축형 분사기 노즐 부근에서 물의 분무 전개 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 물과 공기의 혼합효과를 높이는 방법을 찾고자 하였다. 송범근 등[2]과 정해영 등[3]은 자동차 엔진에 사용되는 스월 인젝터에 대한 실험적 연구를 통해 분무 메카니즘 및 분무 유동 특성을 연구하였다. 그리고 임지혁 등[4]과 이권희 등[5]은 스월 동축형 인젝터를 설계하여 배압변화에 따른 유동 특성과 음향학적 효과를 분석하는 실험적인 연구들을 수행하였다. 그러나 대부분의 연구들은 연료가 액체인 경우에만 국한하였으며, 수치해석보다는 실험적으로 집중하여 인젝터 설계에 많은 시행착오를 거치고 있다.

접수일: 2006년 3월 3일, 심사완료일: 2006년 6월 7일.

1 정회원, 동아대학교 기계공학부

* Corresponding author E-mail: jksuh@dau.ac.kr

본 연구에서는 스월 인젝터의 설계와 관련하여 공기 혹은 기체연료가 인젝터 내부에 흐를 때 발생하는 압축성 유동 특성에 대해서 연구하고자 한다. 그리고 복잡한 스월 인젝터 내부 유동에 대해 1차원적 이론해석으로 단순화시킨 해석방법을 개발하고, 상용 CFD 해석툴(CFX-5)에 의한 2차원 및 3차원 해석결과와 비교함으로써 인젝터 설계자들이 제품설계시 요구되는 정밀도와 설계기간등을 고려하여 적합한 해석방법을 채택하도록 유도하고자 한다.

2. 이론해석(1차원 압축성 유동)

스월 인젝터는 크게 네 부분 즉 유입부, 원추부, 유출부, 급확대부로 나눌 수 있다. 유입부는 몇 개의 사각 채널을 통해 유체가 유입되는 부분이고, 원추부는 원추 형상으로 이 형상을 따라 유체가 흘러 가면서 압축되며, 유출부는 원관형태로서 급확대부로 연결된다. 이 중에서 콘 형태의 원추부를 제외하면 단면적이 일정한 채널 흐름이므로 압축성 유체역학의 기본 식을 사용하면 압력, 온도, 속도 등의 변화를 쉽게 예측할 수 있다. 그러나 원추방향 흐름과 동시에 원주방향 유동(스월)이 존재하며, 더구나 단면적이 변하기 때문에 이에 대한 기본 방정식의 정립은 1차원 해석 방법의 개발을 위해 꼭 필요하다.

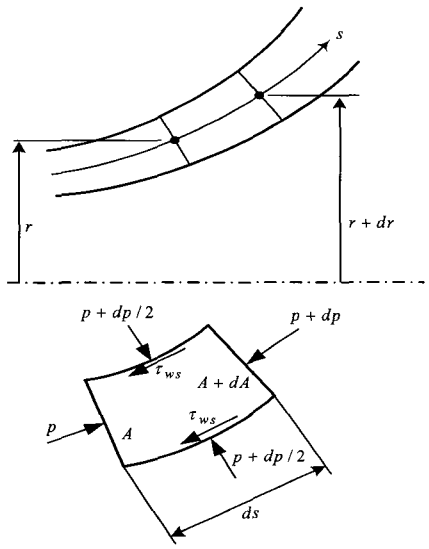

Fig. 1 Principle of cone flow

Fig. 1은 축대칭형 곡면과 곡면 사이의 틈새를 통해 밀도 ρ의 압축성 유체가 스월성분을 가지면서 흐르는 경우를 나타낸 것으로 인젝터의 원추부를 모델링한 것이다. 이 축단면상에서 틈새를 따르는 방향을 s, 원주방향을 Θ의 좌표로 나타내고, 유동속도의 절대값을 V, 그것의 s- 및 Θ-방향 성분을 각각 V_s 및 V_Θ이라 하자. s에 수직인 방향의 단면적을 A라 할 때 정상상태의 압축성 유동에 대한 연속방정식은 아래와 같다.

$$\frac{d\rho}{\rho}+\frac{dV_s}{V_s}+\frac{dA}{A}=0 \tag{1}$$

그리고, 곡면에서의 마찰력을 고려한 s- 및 Θ-방향의 운동량 방정식은 각각 아래와 같다.

$$\frac{dp}{p}+\frac{\rho}{2p}dV_s^2-\frac{\rho V_\Theta^2}{p}\frac{dr}{r}+\frac{\rho VV_s}{p}\frac{fds}{2D_h}=0 \tag{2}$$

$$\frac{dV_\Theta^2}{2V_\Theta^2}+\frac{dr}{r}+\frac{V}{V_s}\frac{fds}{2D_h}=0 \tag{3}$$

여기서 p는 유체의 압력, r은 반경 방향 좌표, f는 마찰 계수, D_h는 단면의 수력직경이다. 또한, 위 식들에서 r과 s는 서로 독립된 좌표는 아니다. 즉 Fig. 1에서 명시한 바와 같이, s가 변하면 r도 이에 따라 종속적으로 변하는 좌표이다. 즉 식 (1-3)으로 시작되는 해석은 1차원적이다. 이 식의 유도에서 상하 곡면에서의 전단응력 τ_w와 그것의 각 방향 성분 τ_{ws}, $\tau_{w\Theta}$은 아래와 같이 표현되었다.

$$(\tau_w,\ \tau_{ws},\ \tau_{w\Theta})=\frac{f}{8}\rho V(V,\ V_s,\ V_\Theta)$$

유체의 온도를 T라 하고 정압비열을 c_p라 할 때 에너지 방정식은 아래와 같이 표시한다.

$$\frac{dT}{T}+\frac{VdV}{2c_pT}=0 \tag{4}$$

한편, 상태방정식은 아래와 같다.

$$\frac{dp}{p}=\frac{d\rho}{\rho}+\frac{dT}{T} \tag{5}$$

유체의 비열비를 k, 기체상수를 R이라 할 때 마하수와 유속과의 관계는 아래와 같다.

$$(V^2,\ V_s^2,\ V_\Theta^2)=(M^2,\ M_s^2,\ M_\Theta^2)kRT \tag{6}$$

여기서, M_s와 M_Θ는 각각 s- 및 Θ-방향의 마하수 성분으로서 $M=\sqrt{M_s^2+M_\Theta^2}$의 관계를 가진다. 본 논문에서 M_Θ를 스월마하수(swirl Mach number)라 부른다. 식 (6)을 식 (4)에 대입하여 V를 소거하면 다음과 같다.

$$\frac{dT}{T}+\frac{k_1dM^2}{1+k_1M^2}=0 \tag{7}$$

여기서 $k_1=(k-1)/2$이다. 식 (5)를 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 $d\rho/\rho$를 소거하면 아래와 같다.

$$\frac{dp}{p}-\frac{dT}{T}+\frac{dV_s}{V_s}+\frac{dA}{A}=0 \tag{8}$$

$$\frac{dp}{p}+\frac{dV_s^2}{2RT}-\frac{V_\Theta^2}{RT}\frac{dr}{r}+\frac{1}{RT}VV_s\frac{fds}{2D_h}=0 \tag{9}$$

식 (9)에서 식 (8)을 빼고 식 (6)을 적용하면 다음과 같이 마하수와의 관계만으로 정리된다.

$$C_{11}dN_s+C_{12}dN_\Theta=-kN_\Theta\frac{dr}{r}-\frac{dA}{A}+kMM_s\frac{fds}{2D_h} \tag{10}$$

여기서 $(N_s, N_\Theta)=(M_s^2, M_\Theta^2)$이다. 한편, 식 (3)은 아래와 같이 정리된다.

$$C_{21}dN_s+C_{22}dN_\Theta=-\frac{dr}{r}-\frac{M}{M_s}\frac{fds}{2D_h} \tag{11}$$

여기서, 상수 C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}는 아래와 같다.

$$C_{11}=\frac{(1-kN_s)(1+k_1N)+k_1N_s(1+kN_s)}{2N_s(1+k_1N)}$$

$$C_{12}=\frac{k_1(1+kN_s)}{2(1+k_1N)}$$

$$C_{21}=\frac{-k_1}{2(1+k_1N)}$$

$$C_{22}=\frac{1-k_1N}{2N_\Theta(1+k_1N)}$$

초킹(choking)은 행렬식 $C=C_{11}C_{22}-C_{12}C_{21}$이 0이 될 때 발생하며, 이 때 $M_s=1$이 된다.

상하의 두 곡면이 원추형이고 틈새가 균일한 경우에는 $dA/A=dr/r$이 되어 식 (10)와 식 (11)으로부터 아래 식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{dN_s}{ds}=\frac{1}{C}\Big[\{C_{12}-C_{22}(1+kN_\Theta)\}\frac{r'}{r}+M(C_{22}kM_s+C_{12}/M_s)\frac{f}{2D_h}\Big] \tag{12}$$

$$\frac{dN_\Theta}{ds}=\frac{1}{C}\Big[\{C_{21}(1+kN_\Theta)-C_{11}\}\frac{r'}{r}-M(C_{21}kM_s+C_{11}/M_s)\frac{f}{2D_h}\Big] \tag{13}$$

여기서 $r'=dr/ds$으로서, 반 원추각을 γ 라 할 때 유동 방향으로 유로가 넓어지는 경우에는 $r'=\sin\gamma$, 유로가 좁아지는 경우에는 $r'=-\sin\gamma$ 이다. 틈새 크기를 h라 하면 수력직경은 $D_h=2h$가 된다. 마찰 계수는 채널의 표면이 매끈한 경우 Blasius의 식

$$f=\frac{0.3164}{Re^{0.25}}\quad(4\times10^3\le Re\le10^5) \tag{14}$$

을 사용할 수 있다. 여기서 레이놀즈수는 $Re=\rho D_hV/\mu$이고, μ는 점성계수이다. 그리고 V는 원추부내 절대속도이다. 전형적인 값은, $\mu=10^{-5}$[Pa.s], $\rho=0.7$[kg/m^3], $h=0.3$[mm], R=287[J/kg.K], T_t=300[K], k=1.4, M=0.5의 경우, $V=169$[m/s]이며, $Re=7100$ 이어서 범위 내에 든다.

한편, 스월 인젝터의 유출부에 해당하는 경우로서, 두 동심 원통 사이의 흐름인 경우에는 위 식들에서 r'을 0으로 설정하면 된다.

일반적으로 정압 p와 정체압 p_t의 관계식은 다음과 같다.

$$p=p_t(1+k_1M^2)^{\frac{-k}{k-1}} \tag{15}$$

그리고 초킹이 발생하는 조건에서 $M_s=1$되는 지점의 압력을 p_*, 그 때의 스월 마하수를 $M_{\Theta*}$라 할 때 임계압력비 p_t/p_*는

$$\frac{p_t}{p_*}=(1+k_1M_{\Theta*}^2)^{\frac{k}{k-1}} \tag{16}$$

이 된다. 이 식을 보면 임계압력비는 스월 마하수 $M_{\Theta*}$에 따라 달라짐을 확인할 수 있다.

질량 유량은 $\dot m=\rho V_sA$로부터

$$\dot m=\sqrt{\frac{k}{RT_t}}Ap_tM_s(1+k_1M^2)^{(k+1)/(2-2k)} \tag{17}$$

의 식으로 구할 수 있다. 초킹 발생시의 질량유량을 $\dot m_*$, 발생지점의 단면적을 A_*라 할 때 $M_s=1$에 의해 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot m_*=\sqrt{\frac{k}{RT_t}}A_*p_t(1+k_1M_{\Theta*}^2)^{(k+1)/(2-2k)} \tag{18}$$

한편, 원추면 사이의 틈새가 균일한 경우, $dA/A=dr/r$인 점을 적용하고, 또 마찰효과를 무시할 수 있는 경우로서 $f=0$를 가정할 때, 식 (10,11)에서 dr/r을 소거한 뒤 $x=N_s$, $y=N_\Theta$ 라 두면

$$\frac{dy}{dx}=\frac{-C_{11}+(1+ky)C_{21}}{C_{12}-(1+ky)C_{22}} \tag{19}$$

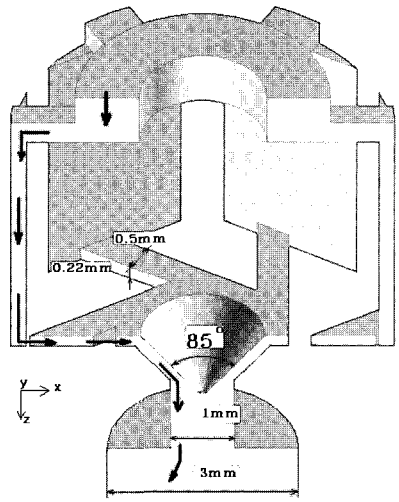

Fig. 2 Perspective view of the swirl injector model used for 3D CFD

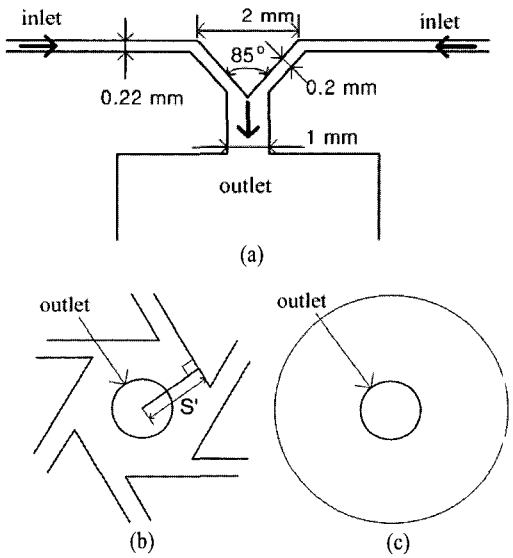

Fig. 3 Perspective view of the swirl injector used for 2D CFD; (a) full axi-symmetric model, (b) planar inlet model, (c) planar axi-symmetric inlet model

을 얻게 된다. 그리고 $z = r/r_*$(혹은 A/A_*)라 두면 식 (10)은 아래 식과 같이 된다.

$$\frac{dz}{dx} = -z\left(C_{21} + C_{22}\frac{dy}{dx}\right) \tag{20}$$

여기서 r_*는, 초킹이 발생하여 $M_s = 1$되는 최소 단면적 지점의 r을 나타낸다. 식 (19)와 식 (20)은 초킹 발생시의 최소 단면적 지점 $z = 1$에서 $x = 1$(마하수 M_s가 1이므로) 및 임의의 y값(즉 임의의 $M_{\theta *}$값)이 주어진다면 아음속 영역 ($0 \le x \le 1$)과 초음속 영역($x \ge 1$) 에 대한 M_θ와 A/A_*를 M_s를 독립변수로 하여 계산할 수 있게 한다.

3. 2차원 및 3차원 수치해석

3.1 스월 인젝터의 형상

Fig. 2는 스월 인젝터 내부유로의 3차원 개략도이다. 이 그림은 현재 상용화된 Mitsubishi사의 고압선회 GDI 인젝터의 형상을 바탕으로 구성되었으며 화살표는 유체의 이동경로를 나타낸 것이다. 여기서 직경 3mm의 부분은 수치해석의 편이를 위해 임의적으로 부착시킨 출구를 나타낸다. Fig. 3은 실제의 3차원 형상에 대하여 2차원 수치해석을 위해 단순화 한 것이다. Fig. 3(a)는 3차원 형상의 유입부분을 두 개의 디스크 사이의 틈새 유동으로 단순화한 2차원 유로의 단면도이다. Fig. 3(b)는 원추부로 들어오는 사각 채널의 편심거리(s')를 변화시켜 그에 따른 출구 스월각의 변화를 분석하기 위한 것이고 Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)의 형상을 더욱 단순화한 것으로, 입구와 출구의 직경은 같고 일정한 입구 스월각으로 유입된 경우에 있어서 출구압력의 변화에 따른 출구 스월각의 변화를 알아보기 위한 것이다.

상용 코드로 3차원해석을 수행하는 경우에는 계산시간이 현재 컴퓨터의 능력으로 1주 이상이 시간이 소요되었다. 그래서 2차원해석을 통하여 계산시간을 줄일 수 있는지 검토하였으며 결과적으로는 이것이 타당한 것으로 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 극히 중요한 몇 가지 파라미터에서만 3차원 해석을 수행하고 대부분은 2차원으로 해석을 수행한다.

3.2 격자 및 경계조건

본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증되어 있는 상용코드 CFX-5를 사용하였다.

계산 격자는 3차원 해석시 총 120만개의 비정열 격자를 사용하였다. Fig. 3(a)와 같이 2차원 해석의 경우에는 총11만개의 격자를 적용하였고 케익모양으로 단순하게 적용시킨후 양면을 주기조건으로 적용시켜 계산시간의 단축을 도모하였다. 또한 유동에 가장 큰 영향을 미치는 원추부에는 격자를 집중시켰다.

계산에 사용된 난류모델은 표준 k-ε 모델이고 입구와 출구는 모두 압력을 지정하는 형태를 적용 하였고 입구 전압은 5[atm]으로 출구 정압은 5[atm] 보다 낮은 압력을 조건으로 하

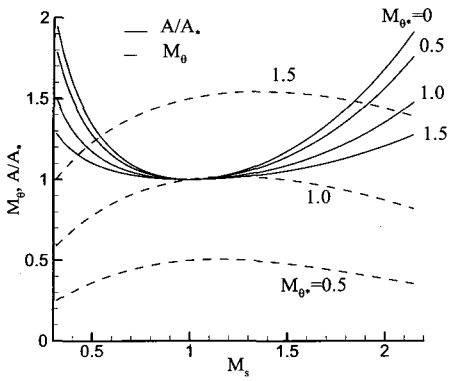

Fig. 4 Dependence of the area ratio A/A_* and the swirl Mach number on the axial Mach number M_s for selected critical swirl Mach numbers, $M_{\theta*}$ at $k=1.4$

여 초킹영역까지 포함시켰다. 2차원 해석에서는 입구에서 속도성분을 변화시켜 결과를 고찰해보았다. 작동유체로는 CH4를 사용하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 1차원 이론해석 결과

여기서 먼저 비열비 1.4인 공기에 대해서 계산을 수행하여 가장 흔한 기체인 공기에 대해 data base화하였으며, 그리고 4.3절에서 CH4에 대한 일차원 이론 해석과 상용 코드해석을 비교할 때는 CH4에 대한 비열비로 계산한 결과를 제시하기로 한다.

Table. 1은 원추부에 대해 $k=1.4$(공기)에서 여러 가지 스월 마하수에 대해 계산한 압력비와 무차원 질량유량의 결과를 보여주고 있다. 여기서 식 (14)에 의한 마찰계수 f는 레이놀즈 수를 8700으로 하여 계산하였다. 그리고 레이놀즈 수는 상용 코드 해석시 계산이 수렴된 조건에서 출구 유량으로 평균유속을 구한 뒤 상온에서의 공기의 점성계수를 기준으로 그리고 출구관 직경을 스월 마하수가 0인 경우는 잘 알려진 압력비 1.89가 확인되고 있으며, 초킹 발생 지점의 스월 마하수가 증가할수록 압력비 또한 증가하며 질량유량은 오히려 감소하고 있다. 따라서, 물론 스월을 발생시키는 타당한 이유는 있겠지만 이에 따라 질량유량이 감소하기 때문에 스월 인젝터를 설계할 때에는 이 점에 유의하지 않으면 안된다.

Fig. 4는 $k=1.4$와 몇 가지 $M_{\theta*}$값에서 M_s의 변화에 따른 A/A_*와 M_θ의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림을 보면, 단면적비 A/A_*는 $M_s=1$되는 지점에서 최소가 되며, 이는 스월 없는 압축성 유동의 경우와 전적으로 동일한 결과이다. 아음속 영역(여기서 아음속 초음속의 구분은 M_s를 기준으로 한 것임)에서는 흐름 방향으로 단면적이 감소할 때 축방향 마하수 M_s는 동시에 증가한다. 그러나 M_s의 증가율은 임계 스월 마하수 $M_{\theta*}$에 따라 약간 다르다. 단면적 감소율이 같다는 조건 하에서 $M_{\theta*}$가 크면 M_s의 증가율은 더 크다.

초음속 영역에서는 반대로 단면적이 증가할 때 M_s는 증가하지만 $M_{\theta*}$의 크기에 따른 증가율의 차이는 아음속 영역보다는 더 심하다. 한편, 아음속 영역에서는 흐름 방향으로 단면적이 감소할 때 스월 마하수 M_θ는 대체로 증가하여 M_s와 같은 경향을 보이지만 초음속 영역에서는 단면적의 증가와 더불어 M_θ는 오히려 감소하기 때문에 M_s와는 반대의 경향을 보이는 것이 특이하다.

Fig. 5는 $k=1.4$와 몇 가지 $M_{\theta*}$에서 스월각 $\alpha_{sw}=\tan^{-1}\frac{M_\theta}{M_s}$의 M_s의 변화에 따른 분포를 보여주고 있다. 스월각은 M_s의 증가와 더불어 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보인다.

4.2 3D CFD 결과

Figs. 6-10은 3차원 스월 인젝터의 입구 전압과 출구 정압을 각각 5[atm]과 1[atm]으로 고정시킨 조건에서 계산한 수치해석 결과로서, 유속분포와, 유선, 압력장, 온도장, 마하수의 분포를 나타내고 있다.

Fig. 6(a)는 스월을 일으키는 입구채널의 xy-평면(축직각 단면)에서의 속도분포를 나타내고 있다. 채널을 통과한 유체는 편심된 입구 채널의 구조에 의해 반시계방향으로 회전하며

Table. 1 Pressure ratio and mass-flow-ratio at the choking condition calculated for various swirl Mach numbers, $M_{\theta*}$ at $k=1.4$(air)

$M_{\theta*}$	p_t/p_*	$\frac{\dot{m}_*}{A_* p_t \sqrt{k/RT_t}}$
0	1.89	0.579
0.2	1.94	0.567
0.4	2.08	0.535
0.6	2.32	0.486
0.8	2.70	0.427
1.0	3.25	0.364
1.2	4.02	0.304
1.5	5.77	0.223
2.0	11.3	0.125
3.0	46.8	0.037

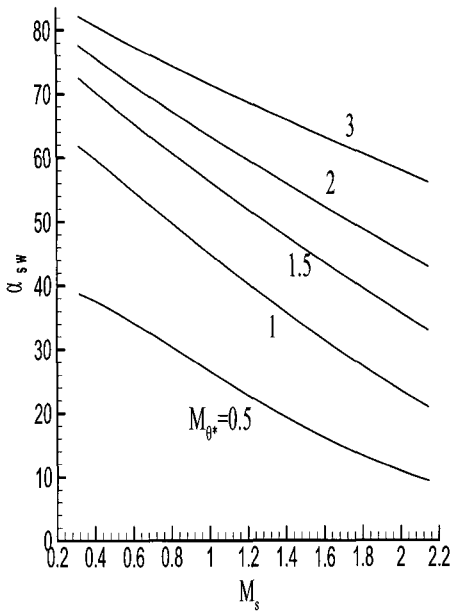

Fig. 5 Dependence of the swirl angle α_{sw} on the axial Mach number M_s at selected critical swirl Mach number $M_{\theta*}$ at $k=1.4$

원추부의 틈새로 유입되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6(b)에서 보면, 원추부의 틈새를 회전하면서 유출부로 향한 유체는 유출부 벽면 근처를 주로 흐르며 환상모양을 이루고 있다. 이는 원추부의 출구단면적에 비해 유출부의 단면적이 더 커서 급확대효과가 있기 때문이다. 흐름은 가장 아랫쪽에 있는 급확대 영역에서 스월에 따른 원심력으로 다시 원추 모양으로 벌어지며 구석에서는 전형적인 구석와류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 유출부의 중심에서는 역류를 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건에서의 유선을 나타내었다. 채널을 통해 유입되는 유체가 원추를 지나고 나서 회전을 하고 있는 것을 입체적으로 확인할 수 있다. 그리고 유출부에서는 45정도의 스월각을 형성하고 있지만 급확대 영역에서는 스월각이 작아지고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 유출부에서의 벽면 마찰과 압력손실에 의한 영향으로 생각된다.

Fig. 8은 전압력 분포를 나타내고 있다. 원추를 통과하면서 압력강하가 크게 발생하고 있고 또한 유출부의 출구를 통과한 뒤에도 상당한 압력 강하가 발생하고 있다. 특히 유출부와 급확대 영역에서는 얇은 전단층 유동의 영역에서 압력이 높게 나타나는데, 이는 동압의 효과 때문이다.(즉 정압은 전단층 영역과 그 외의 영역에서 비슷하게 나타나고 있다.)

Fig. 9는 정온도의 분포를 나타내고 있다. 원추부에서는 완전기체의 등엔트로피 흐름에서 볼 수 있는 특징을 확인할 수 있다. 즉 아음속 유동이므로 단면적이 감소하는 원추부에서는

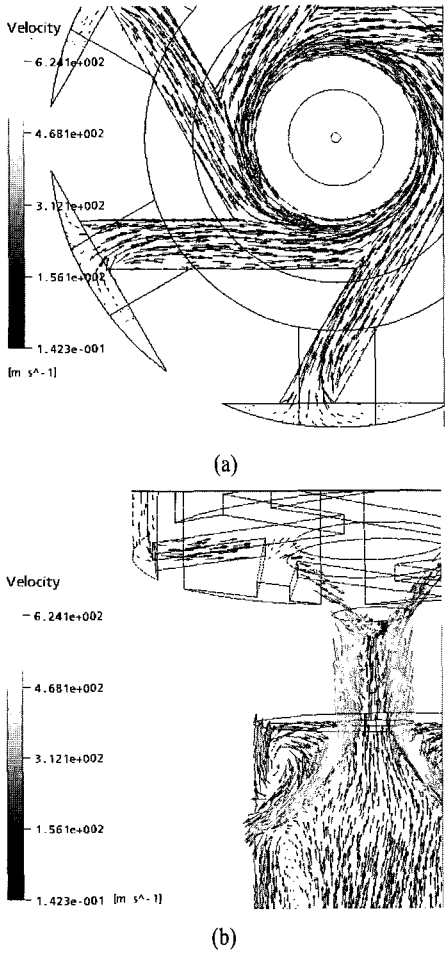

Fig. 6 Velocity distributions (CFD-3D); (a) perspective top view, (b) perspective sectional view

하류로 갈수록 온도가 떨어지고 있는 것이다.

Fig. 10은 마하수 분포를 나타내고 있다. 원추부를 지나면서 마하수가 상당히 증가하고 있는데, 이는 원추부에서 최소단면적을 이루어 음속에 이르게 되는 1D이론에서 확인할 수 있는 전형적인 특징이다. 그리고 유출부와 급확대 영역에서 마하수가 1보다는 큰 값을 나타내고 있는데 이 또한 초킹 발생과 관련하여 1D 이론 해석과 일치하는 것이다.

4.3 원추부 입구 속도분포와 초킹현상

Fig. 11은 3D-CFD결과로서 유입부와 원추부가 만나는 반경 1mm의 원주 상에서의 속도분포를 r-성분(V_r)과 θ-성분(V_θ)으로 나누어서 나타내었다. 여섯개의 채널로부터 유입되기 때문에 그림과 같이 공간적으로 여섯 주기의 유속변동을 보이고 있으며 V_θ성분이 V_r성분보다 3배이상 강한 것을 알 수

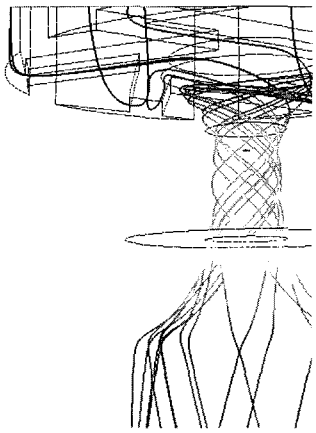

Fig. 7 Streamline distribution (CFD-3D)

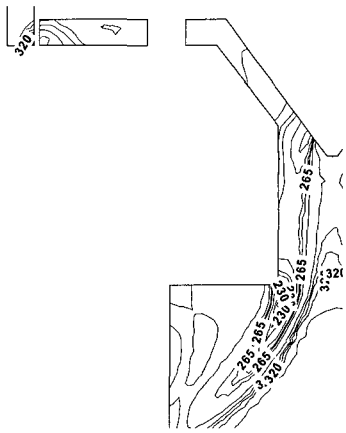

Fig. 9 Static temperature distribution [°K] (CFD-3D)

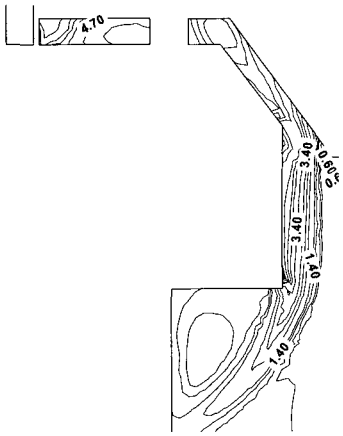

Fig. 8 Total pressure distribution [bar] (CFD-3D)

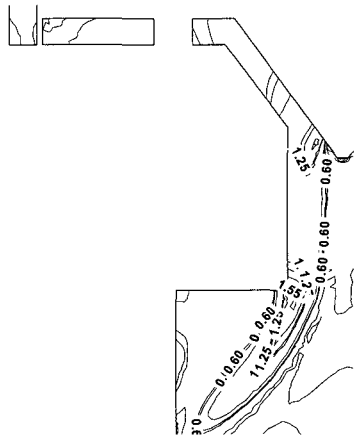

Fig. 10 Mach number distribution (CFD-3D)

있다. 여기서 평균유속을 구하여 스월각 $\alpha_{sw}=74.4^{\circ}$ 얻을 수 있었다. 이 결과는 2D해석에서 입력조건으로 사용되었다.

Fig. 12는 수치해석을 통해 얻어진 질량유량을 출구압력의 변화에 따라 나타낸 것이다. 입구 스월각 74.4° 에서는 3D 해석의 결과(symbol:○)가 2D 해석의 결과와 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 배압이 감소할수록 유량이 점점 증가하고 임계압력에서 일정 유량이 되는 초킹현상을 확인할 수 있다. 그리고 스월각을 점점 감소시켰을 때의 유량변화도 나타내었는데 스월각이 0도인 것은 방사형으로 유입되는 경우이며, 이 때 배압이 3.1[atm] 정도 이하이면 초킹이 일어난다. 그리고 스월각이 증가할수록 초킹은 더 낮은 압력에서 일어나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 12과 같은 경우의 1D 해석결과이다. 전반적으로 앞의 2D와 3D의 해석 결과와 대체로 잘 일치하고 있다. 초킹 유량이 평균적으로 10% 정도 작은 결과를 보이고 있지만, 3D, 2D해석에 비하여 빠른 시간 내에 결과를 얻을 수가 있다는 장점이 있기 때문에 인젝터 설계의 초기 단계에서 유용하게 적용될 수 있다고 판단된다.

4.4 유입부의 흐름특성

실제 스월 인젝터는 Fig. 2에서 도시한 바와 같이 여섯 개의 편심된 채널이 있고 이를 통과하면서 유체는 스월 성분을 가지게 된다. 인젝터 설계자의 입장에서는 이 편심량에 따라서 스월효과가 어떻게 달라지는지를 예측하는 것이 중요할 것이다. 본 연구에서는 따라서 Fig. 3(b)의 2차원 모델에 대한 수치해석을 수행하였으며, 다양한 편심량과 배압에 대한 스월각을 구한 결과를 제시하고자 한다. 동시에 배압의 변화에 따라서 스월각이 달라지는 현상을 보다 단순한 모델인 Fig. 3(c)에 대한 수치해석을 통해 분석하고자 한다.

Table. 2는 Fig. 3(b)의 구조에서 입구전압과 출구정압을 고

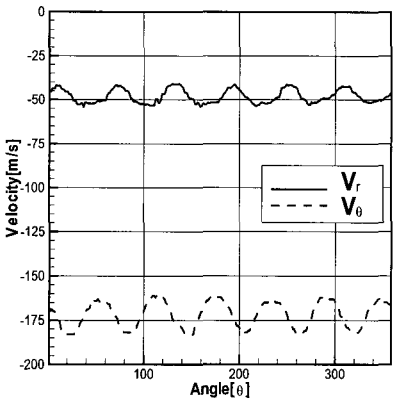

Fig. 11 Distribution of the velocity components along the Θ-direction at the circle of 1mm radius at the inlet section

정시킨 상태에서 입구 직관의 편심양(s')에 따른 출구 스월각(공간평균)의 변화를 나타내고 있다. Table에서 하첨자 m은 공간평균을 의미한다. 편심양이 클수록 출구 스월각이 커지고 있음을 확인할 수 있다.

Table. 3은 입구전압을 5[am]으로, 편심양을 s'=1.35로 고정

Table. 2 the swirl angle of outlet at s' = 1.20, 1.35, 1.50 for same back pressure

Pin [atm]	Pout [atm]	$V_{\theta m}$	V_m	Out_angle[°]	s'
5	1	-471.292	-350.768	53.4	1.20
5	1	-483.508	-350.371	54.1	1.35
5	1	-492.146	-340.877	55.3	1.50

Table. 3 the swirl angle of outlet at s' = 1.35 for other back pressures

Pin [atm]	Pout [atm]	$V_{\theta m}$	V_m	Out_angle[°]	s'
5	4	-228.757	-88.120	68.94	1.35
5	3	-334.785	-139.907	67.32	1.35
5	2	-422.753	-211.727	63.40	1.35
5	1	-483.508	-350.371	54.10	1.35

Table. 4 the swirl angle of inlet and outlet at axi-symmetric inlet model for other back pressures

Pin[atm]	Pout[atm]	In_angle[°]	Out_ang le [°]
5	3	45	36.00
5	2	45	30.00
5	1	45	25.34

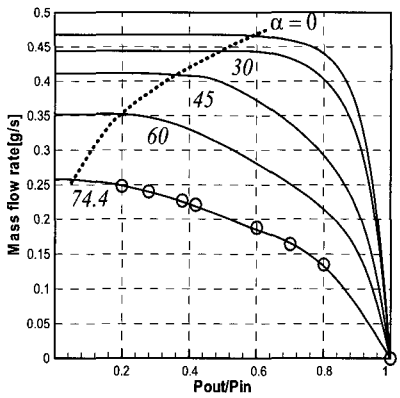

Fig. 12 Mass flow rate obtained by 2D(lines) and 3D(symbols☺) with the constant inlet pressure P_{in} = 5 [atm]

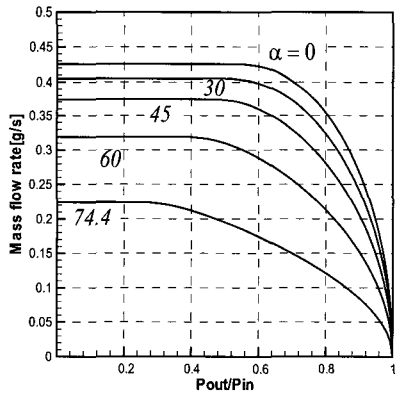

Fig. 13 Mass flow rate given from the 1D theoretical model with the constant inlet pressure P_{in} = 5 [atm]

하고 배압을 변화시켰을 때의 결과이다. 출구압이 감소할수록 출구 스월각이 감소하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이에 대한 보다 근본적인 원인 분석은 아래에서 설명한다.

Table. 4는 Fig. 3(c)의 원판 채널의 경우에 대한 결과이다. 앞에서와 같이 배압이 감소할수록 출구 스월각은 작아지고 있다. 즉 Table. 3과 같은 경향을 보이고 있다. 이와 같이 배압이 감소할수록(압력비가 클수록) 출구 스월각이 감소하는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 입구양을 하첨자 1로 출구양을 하첨자 2로 나타내면, 우선 연속법칙에 의해 $\rho_1 V_{r1} r_1 = \rho_2 V_{r2} r_2$ 이다. 한편 입구면과 출구면 사이의 각운동량 보존의 원리에 의해 $r_1 V_{\Theta 1} = r_2 V_{\Theta 2}$이다. 위 두식에서 $\tan\alpha_{swl2} = (\rho_2/\rho_1)\tan\alpha_{swl}$의 관계를 얻을 수 있다. 유입

부의 흐름이 아음속이므로 밀도비 ρ_2/ρ_1은 항상 1보다 작고, 따라서 출구 스월각은 항상 입구 스월각보다 작게 된다. 또한 출구 압력(배압)이 감소하면 압력비가 증가하여 밀도비는 감소하므로 동일한 입구 스월각에서 출구 스월각은 감소한다.

5. 결 론

본 연구에서는 1차원 이론해석과 2, 3차원 CFD해석을 통하여 스월 인젝터 내부의 유동에 대하여 연구하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 스월양이 증가할수록 초킹이 발생하는 임계압력비 (p_t/p_*)는 커진다.
(2) 단면적이 감소할 때 스월 마하수는 아음속 영역에서는 증가하며 초음속 영역에서는 대체로 감소한다.
(3) 스월각이 증가하면 초킹 발생시의 질량 유량이 감소한다.
(4) 실제의 여섯개 유입채널의 편심량에 따른 스월각의 데이터를 확보하여 인젝터 설계자가 적용할 수 있도록 하였으며, 보다 단순한 유입채널의 모델에 대한 해석을 통해 배압의 변화에 따른 스월각의 변화를 예측할 수 있었다.
(5) 스월 인젝터에 대한 3차원 수치해석을 성공리에 수행하였으며, 그 결과는 축대칭 2차원 수치해석의 결과와 일치하였다.
(6) 1차원 이론해석을 통하여 초킹 발생시의 질량유량을 10% 이내의 오차로 예측할 수 있었으며, 이로부터 1차원 모델은 인젝터의 설계 시 효과적으로 이용할 수 있음을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

[1] 홍문근, Cartellier, A., Hopfinger, E. J., 2004, "동축형 노즐 부근에서의 분무 전개 특성," 제3회 *한국유체공학 학술대회 논문집*, p.1047 -1050.
[2] 송범근, 김원태, 강신재, 2003, "가솔린 직접분사식 고압 선회 분사기의 분무 영역별 분무 특성 고찰," *대한기계학회 논문집 B권*, 제27권, 제1호, p.9-16.
[3] 정해영, 이기형, 이창식, 2003, "연료 물성치 변화가HCCI용 스월 인젝터의 분무특성에 미치는 영향," *대한기계학회 추계학술대회 논문집*, p.478.
[4] 임지혁, 강동준, 윤영빈, 2004, "스월 동축형 인젝터의 분사조건에 따른 Self-Pulsation 특성에 관한 연구," *대한기계학회 추계학술대회 논문집*, p.407-410.
[5] 이권희, 토시아키 세토구치, 김희동, 2004, "초음속 이중 동축 스월 제트에 관한 실험적 연구," *제3회 한국유체공학 학술대회 논문집*, p.579-582.