

분사기 내 압축성 스월 유동에 대한 연구

서 용 권^{*1}, 강 상 모^{*2}, 허 형 석^{*3}

Study on Compressible Swirl Flow within an Injector

Y. K. Suh, S. M. Kang and H. S. Heo

In this paper, we present the theoretical and numerical results of flow characteristics of a gas in a swirl injector. Proposed in this study are one-dimensional (theoretical) model and 2D/3D CFD models for use in the design of the injector. It was found that contrary to the classical theory about the compressible flow, the swirl gives a significant effect on the mass flow rate and the choking conditions. The one-dimensional model was found to provide reasonably accurate results compared with the 2D/3D numerical results, so that it can be employed in 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

분사기에서 스월을 유발시키는 스월 인젝터는 연소실내에 연료를 분사하는 장치로 이것을 통한 연료의 선화를 이용하여 연소효과를 높이기 위한 장치로 많이 사용된다. 최근에 이 기기는 다음과 같은 종류로 발전하고 있다. 단일 성분의 유체를 선화를 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 특성을 실험적으로 연구를 수행하였으며 물과 공기의 혼합효과를 높이는 방법을 찾

고자 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.

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.

*1 정희원, 동아대학교 기계공학부

*2 정희원, 동아대학교 기계공학부

*3 학생회원, 동아대학교 대학원 기계공학부

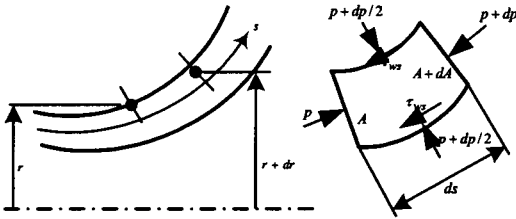


Fig. 1 Principle of cone flow

2. 이론해석(1차원 압축성 유동)

스웰 인젝터는 크게 네 부분 즉 유입부, 원추부, 유출부, 급확대부로 나눌 수 있다. 유입부는 몇 개의 사각 채널을 통해 유체가 유입되는 부분이

고, 원추부는 원추 형상으로 이 형상을 따라 유체가 흘러 가면서 압축되며, 유출부는 원관형태로서 급확대부로 연결된다.

Fig. 1은 원추부에 대한 축대칭형 곡면과 곡면 사이의 틈새를 통해 밀도 ρ 의 압축성 유체가 스웰성분을 가지면서 흐르는 경우를 나타낸 것으로 인젝터의 원추부를 모델링한 것이다. 이 축단면 상에서 틈새를 따르는 방향을 s , 원주방향을 θ 의 좌표로 나타내고, 유동속도의 절댓값을 V , 그것의 s - 및 θ -방향 성분을 각각 V_s 및 V_θ 이라 하자. s 에 수직인 방향의 단면적을 A 라 할 때 정상상태의 압축성 유동에 대한 연속방정식과 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식과 상태방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV_s}{V_s} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{\rho}{2p} dV_s^2 - \frac{\rho V_\theta^2}{p} \frac{dr}{r} + \frac{\rho V V_s}{p} \frac{fks}{2D_h} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dV_\theta^2}{2V_\theta^2} + \frac{dr}{r} + \frac{V}{V_s} \frac{fks}{2D_h} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{V dV}{2c_p T} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \quad (5)$$

위식들을 다시 정리하면 다음과 같이 마하수와와의 관계만으로 정리된다.

$$C_{11} dN_s + C_{12} dN_\theta = -k N_\theta \frac{dr}{r} - \frac{dA}{A} + k M M_s \frac{fks}{2D_h} \quad (6)$$

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

$$C_{21} dN_s + C_{22} dN_\theta = -\frac{dr}{r} - \frac{M}{M_s} \frac{fks}{2D_h} \quad (7)$$

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

$$C_{11} = \frac{(1 - k N_\theta)(1 + k_1 N) + k_1 N_s(1 + k N_s)}{2 N_s(1 + k_1 N)}$$

$$C_{12} = \frac{k_1(1 + k N_s)}{2(1 + k_1 N)}$$

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

$$C_{22} = \frac{1 - k_1 N}{2 N_\theta(1 + k_1 N)}$$

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.

초킹 발생시의 질량유량을 \dot{m}_* , 발생지점의 단면적을 A_* 라 할 때 $M_s = 1$ 에 의해 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{m}_* = \sqrt{\frac{k}{RT_*}} A_* p_* (1 + k_1 M_{\theta*}^2)^{(k+1)/(2-2k)} \quad (8)$$

3. 2차원 및 3차원 수치해석

3.1 스웰 인젝터의 형상

Fig. 2(a)는 스웰 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. 2(b)은 실제의 3차원 형상에 대하여 2차원 수치해석으로 단순화 한 것이다. Fig. 3는 3차원 형상의 유입부분을 두 개의 디스크 사이의 틈새 유동으로 단순화한 2차원 유로의 단면도이다.

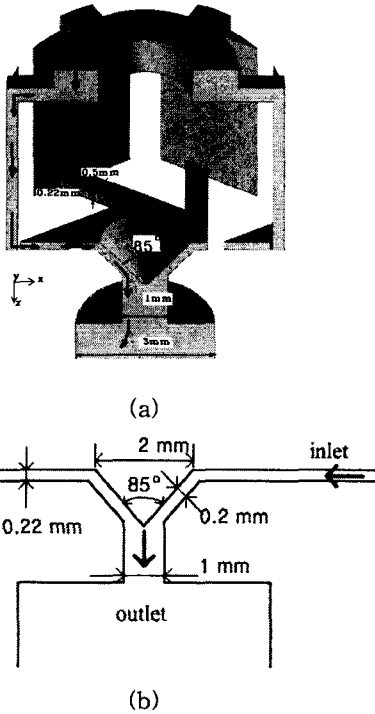


Table. 1 Pressure ratio and mass-flow-ratio at the choking condition calculated for various swirl Mach numbers, M_{θ} at $k=1.4$

M_{θ}	p_t/p_*	$\frac{\dot{m}_*}{A_* p_t \sqrt{k/RT_t}}$
0	1.89	0.579
0.4	2.08	0.535
1.2	4.02	0.304
1.5	5.77	0.223
2.0	11.3	0.125
3.0	46.8	0.037

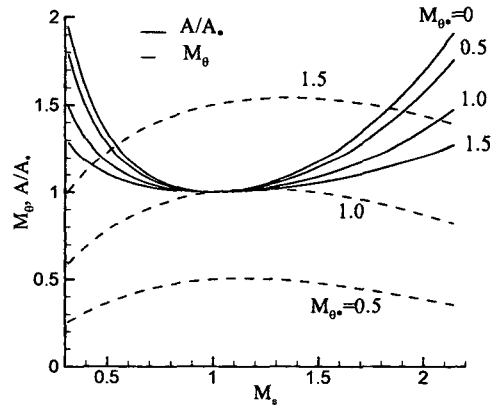


Fig. 3 Dependence of the area ratio A/A_* and the swirl Mach number on the axial Mach number M_s for some critical swirl Mach numbers, M_{θ} at $k=1.4$

Fig. 2 Perspective view of the swirl injector model for use in the CFD:(a)3D (b) 2D

3.2 격자 및 경계조건

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

계산 격자는 3차원 해석시 총 120만개의 비정렬 격자를 사용하였다. Fig. 3와 같이 2차원 해석의 경우에는 총11만개의 격자를 적용하였고 케익 모양으로 단순하게 적용시킨후 양면을 주기조건으로 적용시켜 계산시간의 단축을 도모하였다.

계산에 사용된 난류모델은 표준 k-ε 모델이고 입구와 출구는 모두 압력을 지정하는 형태를 적용하였고 입구 압력은 5[atm.abs 이하 atm으로 표기]으로 출구압력은 5[atm]보다 낮은 압력을 조건으로 하여 초킹영역까지 포함시켰다. 2차원 해석에서는 입구에서 속도성분을 변화시켜 결과를 고찰해보았다. 작동유체로는 CH4를 사용하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 1차원 이론해석 결과

Table. 1은 원추부에 대해 $k=1.4$ 에서 여러 가

지 스윙 마하수에 대해 계산한 압력비와 무차원 질량유량의 결과를 보여주고 있다. 스윙 마하수가 0인 경우는 잘 알려진 압력비 1.89가 확인되고 있으며, 초킹 발생 지점의 스윙 마하수가 증가할수록 압력비 또한 증가하며 질량유량은 오히려 감소하고 있다. 따라서, 물론 스윙을 발생시키는 타당한 이유는 있겠지만 이에 따라 질량유량이 감소하기 때문에 스윙 인젝터를 설계할 때에는 이 점에 유의하지 않으면 안된다.

Fig. 3는 $k=1.4$ 와 몇 가지 M_{θ} 값에서 M_s 의 변화에 따른 A/A_* 와 M_{θ} 의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림을 보면, 단면적비 A/A_* 는

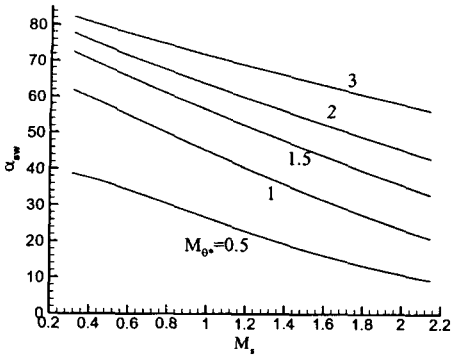


Fig. 4 Dependence of the swirl angle α_{sw} on the axial Mach number M_s at some critical swirl Mach number M_{0*} at $k=1.4$

$M_s=1$ 되는 지점에서 최소가 되며, 이는 스월 없는 압축성 유동의 경우와 전적으로 동일한 결과이다. 아음속 영역(여기서 아음속 초음속의 구분은 M_s 를 기준으로 한 것임)에서는 흐름 방향으로 단면적이 감소할 때 축방향 마하수 M_s 는 동시에 증가한다. 그러나 M_s 의 증가율은 임계 스월 마하수 M_{0*} 에 따라 약간 다르다. 단면적 감소율이 같다는 조건 하에서 M_{0*} 가 크면 M_s 의 증가율은 더 크다.

초음속 영역에서는 반대로 단면적이 증가할 때 M_s 는 증가하지만 M_{0*} 의 크기에 따른 증가율의 차이는 아음속 영역보다는 더 심하다. 한편, 아음속 영역에서는 흐름 방향으로 단면적이 감소할 때 스월 마하수 M_0 는 대체로 증가하여 M_s 와 같은 경향을 보이지만 초음속 영역에서는 단면적의 증가와 더불어 M_0 는 오히려 감소하기 때문에 M_s 와는 반대의 경향을 보이는 것이 특이하다.

Fig. 4는 $k=1.4$ 와 몇 가지 M_{0*} 에서 스월각

$$\alpha_{sw} = \tan^{-1} \frac{M_0}{M_s}$$

의 M_s 의 변화에 따른 분포를 보여주고 있다. 스월 각은 M_s 의 증가와 더불어 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보인다.

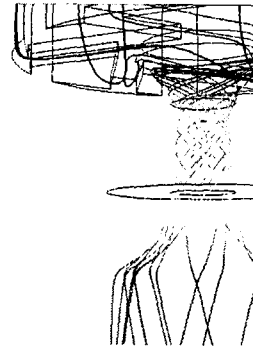


Fig. 5 Streamline distribution (CFD-3D)

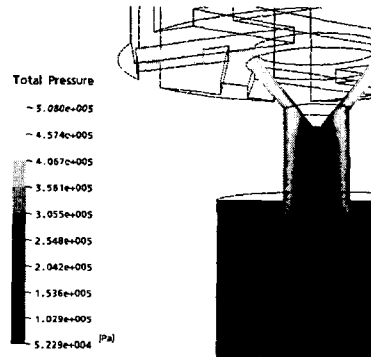


Fig. 6 Total pressure distribution (CFD-3D)

4.2 3D CFD 결과

Fig. 5, 6, 7, 8은 3차원 스월 인젝터의 입구전 압과 출구전압을 각각 5[atm]과 1[atm]으로 고정시킨 조건에서 계산한 수치해석 결과로서, 유선, 압력장, 온도장, 마하수의 분포를 나타내고 있다.

Fig. 5은 유선을 나타내었다. 채널을 통해 유입되는 유체가 원추를 지나고 나서 회전을 하고 있는 것을 입체적으로 확인할 수 있다. 그리고 유출부에서는 45° 정도의 스월각을 형성하고 있지만 급확대 영역에서는 스월각이 작아지고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 유출부에서의 벽면 마찰과 압력손실에 의한 영향으로 생각된다.

Fig. 6은 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 정압

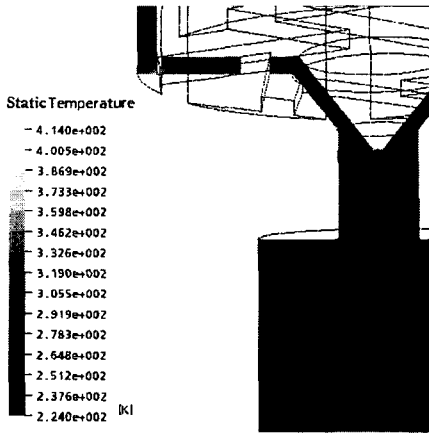


Fig. 7 Static temperature distribution (CFD-3D)

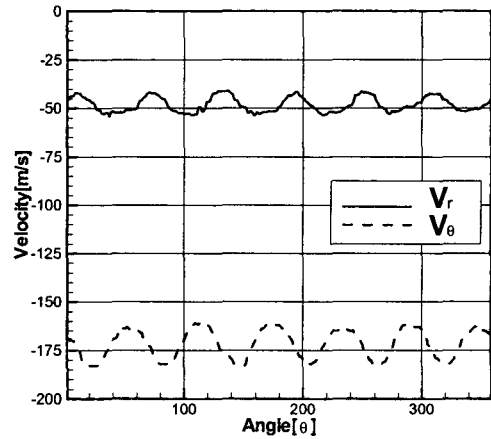


Fig. 9 Distribution of the velocity components along the θ direction at the circle of 1mm radius at the inlet section pressure $p_t=5[atm]$.

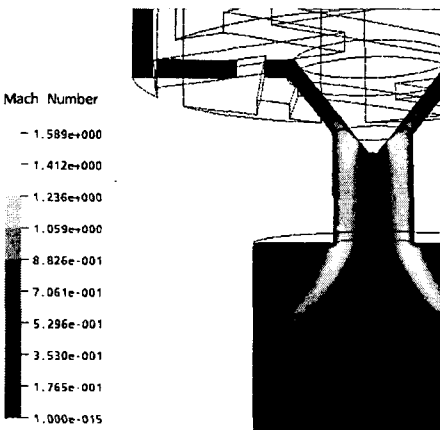


Fig. 8 Mach number distribution(CFD-3D)

은 전단층 영역과 그 외의 영역에서 비슷하게 나타나고 있다.)

Fig. 7는 정온도의 분포를 나타내고 있다. 원추부에서는 완전기체의 등엔트로피 흐름에서 볼 수 있는 특징을 확인할 수 있다. 즉 아음속 유동이므로 단면적이 감소하는 원추부에서는 하류로 갈수록 온도가 떨어지고 있는 것이다.

Fig. 8은 마하수 분포를 나타내고 있다. 원추부를 지나면서 마하수가 상당히 증가하고 있는데, 이는 1D이론에서도 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. 9은 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_θ 성분이 V_r 성분보다 3배 이상 강한 것을 알 수 있다. 여기서 우리는 평균유속을 구하여 스윙각 $\alpha_{sw}=74.4^\circ$ 얻을 수 있었다. 이 결과는 2D해석에서 입력조건으로 사용되었다.

Fig. 10는 수치해석을 통해 얻어진 질량유량을 출구압력의 변화에 따라 나타낸 것이다. 입구 스윙각 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 스윙각을 점점 감소시켰을 때의 유량변화도 나타내었는데 스윙각이 0도인 것은 방사형으로 유입되는 경우이며, 이 때 배압이 3.1[atm] 정도 이하이면 초킹이 일어난다. 그리고 스윙각이 증가할수록 초킹은 더 낮은 압력에서 일어나는 것을 확인할 수 있다.

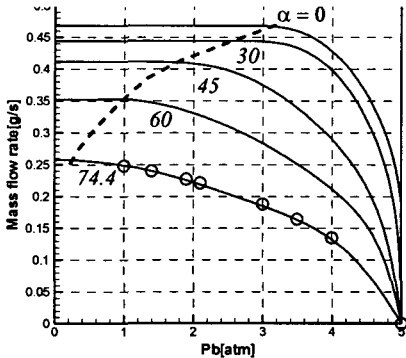


Fig. 10 Mass flow rate obtained by 2D(lines) and 3D(symbols:O)

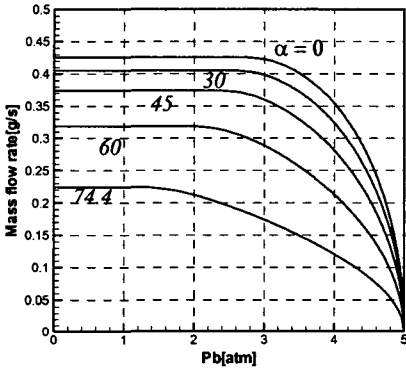


Fig. 11 Mass flow rate given from the 1D theoretical model with the constant inlet

Fig. 11은 Fig. 11과 같은 경우의 1D 해석결과이다. 전반적으로 앞의 2D와 3D의 해석 결과와 대체로 잘 일치하고 있다. 초킹 유량이 평균적으로 10% 정도 작은 결과를 보이고 있지만, 3D, 2D 해석에 비하여 빠른 시간 내에 결과를 얻을 수가 있다는 장점이 있기 때문에 인젝터 설계의 초기 단계에서 유용하게 적용될 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 1차원 이론해석과 2, 3차원 CFD 해석을 통하여 스웰 인젝터에 대하여 연구하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 스웰양이 증가할수록 초킹이 발생하는 임계 압력비(p_i/p_*)는 커진다.
- (2) 단면적이 감소할 때 스웰 마하수는 아음속 영역에서는 증가하며 초음속 영역에서는 대체로

감소한다.

- (3) 스웰각이 증가하면 초킹 발생시의 질량 유량이 감소한다.
- (4) 실제의 6개 유입채널의 편심량에 따른 스웰각의 데이터를 확보하여 인젝터 설계자가 적용할 수 있도록 하였으며, 보다 단순한 유입채널의 모델에 대한 해석을 통해 배압의 변화에 따른 스웰각의 변화를 예측할 수 있었다.
- (5) 스웰 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 설계시 효과적으로 이용할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 과제 번호 R01-2003-000-11622-0와 산업자원부의 지역혁신 인력양성 사업에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

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