54 대한기계학회논문집 B권, 제27권 제1호, pp. 54~60, 2003

기체유동에서 발생하는 복합초킹 현상에 관한 연구

이준희* · 백승철** · 최보규*** · 김희동†

(2002년 5월 29일 접수, 2002년 12월 7일 심사완료)

A Study of the Compound Choking Phenomenon in Gas Flows

Jun-Hee Lee, Seung-Cheol Baek, Bo-Gyu Choi and Heuy-Dong Kim

Key Words : Compound Choking(복합 초킹), Internal Flow(내부 유동), Compressible Flow(압축성 유동), Choking Condition(초킹 조건), Shock Wave(충격파), Supersonic Nozzle(초음속 노즐)

Abstract

Compound choking frequently occurs at a minimum area of the flow passage, where two or more streams which have different stagnation properties are merged. This phenomenon is especially important in that the flow choking may not be given by Mach number, M=1 at the nozzle throat. In order to obtain a detailed understanding of the flow characteristics involved in the compound flow choking, the two-dimensional, compressible, Navier-Stokes equations are solved using a fully implicit finite volume method and the predicted solutions are compared with the results of the one-dimensional theoretical analysis. Stagnation pressure and temperature of each stream are changed to investigate the effects on the compound choking. The results show that stagnation pressures of each stream affect Mach number and static pressure distributions downstream of the exit of the convergent nozzle. However, the flow characteristics of the compound choking are not significantly dependent on the total temperature ratio.

1. 서 론

일반적으로 단일 축소- 확대 유로에서 발생하는 기체유동의 초킹현상은 노즐목에서 유속이 음속에 도달할 때 발생하며, 이 때 노즐목 하류에서 발생하는 압력변화는 노즐목 상류에 영향을 미치지 못한다. 결과적으로 노즐목 하류의 압력이 어느 임계압력 이하로 되면, 노즐목에서의 유속은 음속으로 되며, 유동의 마하수는 1.0 으로 된다. 이 경우 유로 내의 유동상태는 노즐목 상류의 유동조건에 의해서만 결정되며, 노즐목 하류의 유동은 상류의 상태량으로부터 용이하게 예측할 수 있다. 그러나 압력과 온도 등 상태량이 다른 다수의 유동이 혼합하여 노즐을 통과하는 경우의 초킹조건은 일차원 기체역학 이론으로부터 얻어지는 M=1.0 의 조건과 일치하지 않으며, 이는 노즐목에서 속도구배와 운동량의 구배가 존재하기 때문이다. 이러한 유동의 초크현상을 일반적으로 복합초크(compound choking)라 하며, 이젝터[1,2] 및 스크램젯 엔진[3-5] 등에서 빈번히 발생한다.

기체유동이 노즐목에서 복합초크하는 경우, 유동의 주요 특성은 단일 노즐과는 다르며, 복합초크는 추력 및 유동의 혼합, 압축 등 시스템 전체 성능을 결정하게 된다. 따라서 이러한 시스템의 효율적인 운전을 위해서는 운전조건에 대한 각 유동의 압력, 온도, 속도분포 등의 특성을 알아야 한다.

복합초크에 관한 기존의 연구로는 Fabri 등[6]과 Chow 등[7]이 고압의 주제트가 초음속으로 팽창하고 보조제트가 노즐목에서 음속에 도달하는 경우, 유동은 노즐벽과 팽창된 주제트의 경계에서 초크하는 것을 발견하였으며, 이 때 배압이 감소하여도 하류의 유동조건은 상류의 유동상태에 영

* 회원, 안동대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과
*** 회원, (주)동화엔텍 기술연구소
† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail : kimhd@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)841-1630

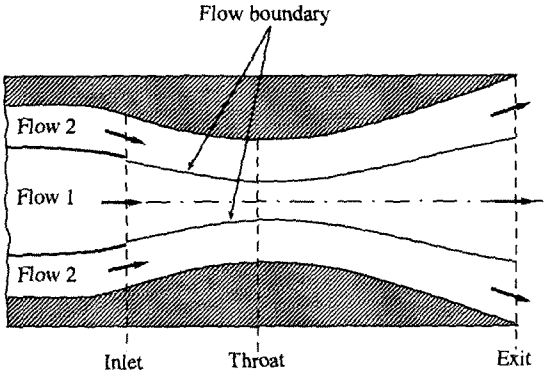

Fig. 1 Schematic of a two stream nozzle flow

향을 미치지 않는 것으로 보고하였다. 또 Bernstein 등[8]과 Hoge 등[9]은 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 상류에 분리판이 설치된 축소- 확대 노즐 내부에 정체실의 조건이 서로 다른 유동이 존재하는 경우, 노즐목에서의 유동이 초음속과 아음속으로 존재하는 상태에서 노즐목 하류의 유동이 초음속으로 가속될 수 있다는 것을 발견한 바 있다. 이는 축소- 확대 노즐의 목에서 유동이 복합초크하기 때문으로 알려져 있으나, 복합초크 유동에 관한 물리적 이해는 매우 어렵다. 예를 들면 유동의 혼합, 점성이나 열전달 효과, 경계층의 영향 등으로 인하여 기체역학 이론에서 주어지는 1 차원 초킹현상이 노즐목에서 발생하는 것은 불가능하며, 이에 대한 구체적인 복합초크의 발생 기구를 조사한 연구사례는 현재까지 드물다.

최근 Lee 등[10]은 정체실의 압력조건이 상이한 복합유동에서 두 유동의 전압비 $\phi(=p_{02}/p_{01})$의 변화가 유동의 복합초크에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수치계산 및 이론해석을 수행하였고 기존의 실험결과[11]와 비교하였다. 그 결과 노즐출구면에서 발생하는 마하수 분포로부터 유동이 아음속과 초음속으로 공존하는 상태로 복합초크가 발생함을 알았다. 그러나 복합초크 현상에 미치는 전온도, 전압력 등의 영향을 상세하게 조사하지 않았다.

본 연구에서는 공기를 작동유체로 사용하는 축소노즐 유동에 대하여 압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 수치계산하여 상류 정체실의 전압 및 전온도가 복합초크의 유동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 또 1 차원 기체방정식을 이용하여 복합초크 현상의 물리 및 조건을 비교하였다.

일반적으로 상류 정체실의 온도와 압력이 서로 다른 경우, 노즐 내부의 유동은 노즐 출구의 유동조건이 초크하는 경우와 초크하지 않은 조건에 대하여 상이할 것으로 예상되므로, 본 연구에서는 노즐의 배압 p_a를 대기압으로 가정하고 상류 정체실에서 유동의 압력비가 $p_{02}/p_{01}(=\phi)=0.9$ 인 경우, $p_{01}/p_a=1.67\sim2.27$ 의 범위에서 이론해석과 수치해석을 수행하였다. 또 두 유동의 온도가 복합초크 유동장에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전온도가 $T_{01}=300K$ 일 때 유동의 전온도비를 $T_{02}/T_{01}(=\zeta)=1.0, 0.9, 0.8, 0.7$ 로 변화시켰다.

2. 복합 유동의 이론해석

Fig. 2 는 노즐 입구에서 서로 다른 상태량을 갖는 여러 유동이 존재하는 경우 노즐 내부의 압력분포를 나타낸다. 곡선 a 와 곡선 b 는 노즐 내부의 복합유동이 아음속 상태인 경우를 나타내며, 곡선 c, d, e 는 노즐목에서 복합유동이 초크하는 경우이다. 이 때 곡선 c 는 노즐목 하류의 유동이 아음속이며, 곡선 d 는 초음속, 그리고 곡선 e 는 노즐 확대부에서 복합충격파(compound shock wave)가 발생하여 노즐 출구의 유동이 아음속 상태로 되는 경우이다.

그림에서 각 유동을 일차원 유동으로 가정하여, 식 (1)로부터 유로 단면적과 압력과의 관계를 얻을 수 있다.[12]

$$\frac{dA_i}{dx}=\frac{A_i}{\gamma_i}\left(\frac{1}{M_i^2}-1\right)\frac{d}{dx}(\ln p) \tag{1}$$

식 (1)에서 A_i, γ_i, M_i는 유동 i의 유로 단면적, 비열비 및 마하수이며, x 와 p는 노즐 축방향의 거리와 정압을 나타낸다.

또 위의 식에서 $dA/dx=\sum_{i=1}^{n}(dA_i/dx)$ 이므로 식 (1)은 다음으로 씌여진다.

$$\frac{d}{dx}(\ln p)=\frac{\dfrac{dA}{dx}}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i}{\gamma_i}\left(\frac{1}{M_i^2}-1\right)}=\frac{1}{\beta}\frac{dA}{dx} \tag{2}$$

$$\beta=\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i}{\gamma_i}\left(\frac{1}{M_i^2}-1\right) \tag{3}$$

위의 식 (3)에서 β는 복합유동의 상태, 즉 유동이 아음속, 음속 또는 초음속으로 되는 상태를 결정하는 중요한 변수이다.

각 유동에 대한 정체실의 전압(p_{0i}), 국소 정압

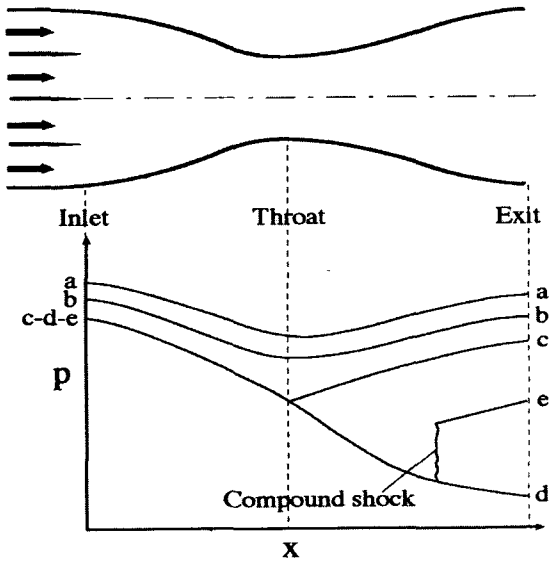

Fig. 2 Compound-compressible flow in multi-streams

및 비열비가 주어지면, 등엔트로피 관계식으로부터 유로내 임의의 위치에서 마하수는 식 (4)로 주어진다.

$$M_i^2 = \frac{2}{\gamma_i - 1}\left(\left(\frac{p_{0i}}{p}\right)^{\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}} - 1\right) \tag{4}$$

한편 Fig. 2 에서 곡선 a 와 b 의 경우, 노즐 내부에서 발생하는 유동은 아음속이므로 식 (3)에서 $\beta>0$ 이며, 유로 단면적이 감소하면 압력은 감소하고 유로단면적이 증가하면 압력이 증가한다.

더욱이 β와 압력과의 관계는 식 (5)로 주어지며, 여기서 β는 압력의 부호와 동일하므로 곡선 a 와 곡선 b 의 경우, 축소부에서 노즐 내의 압력이 감소할수록 β는 감소하여 노즐목에서 최소가 되며, 노즐 확대부에서 압력과 β는 증가하게 된다.

$$\frac{d\beta}{dp} = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i}{p\gamma_i^2 M_i^4}\left[\left(1 - M_i^2\right)^2 + 2\left(1 + \frac{\gamma_i - 1}{2} M_i^2\right)\right] > 0 \tag{5}$$

그러나 Fig. 2 에서 곡선 c, d 및 e 의 경우, 노즐목에서 β 가 0 으로 되어 식 (2)는 특이점을 가지게 되므로 노즐목에서의 압력을 결정할 수 없다. 따라서 식 (2)에 L'Hospital 정리를 적용하여 식 (6)으로 주어지는 바와 같이 노즐목 및 확대부에서 압력을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dx}(\ln p) = \pm\sqrt{\frac{\dfrac{d^2A}{dx^2}}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i}{\gamma_i^2 M_i^4}\left[\left(1 - M_i^2\right)^2 + 2\left(1 + \frac{\gamma_i - 1}{2} M_i^2\right)\right]}} \tag{6}$$

Fig. 2 에서 곡선 c 의 경우, 노즐목에서 $\beta=0$ 이며 노즐내의 압력은 식 (6)으로부터 얻어진다. 한편, 곡선 d 와 e 의 경우, 식 (5)로부터 $d\beta/dp>0$ 이므로, 노즐 확대부에서는 $d\beta/dx$ 가 음의 값을 갖는다 ($\beta<0$). 따라서, 식 (2)와 식 (5)에 의해 압력과 β는 노즐 확대부에서 감소한다. 즉 Fig. 2 에서 노즐 출구의 배압이 곡선 c 이하인 경우, 배압이 감소하여도 입구압력 및 유량에 영향을 미치지 않으며, 이 경우를 복합유동의 초킹상태로 정의한다.

한편, 복합유동에서 노즐 내부의 유동상태는 노즐목에서의 정압, 유로면적, 마하수 등의 상태량이 주어지는 경우 식 (2)에 의해 정해진다. 즉 복합유동이 노즐목에서 초크하는 경우 $\beta=0$ 이므로, 이 때 노즐목에서의 유동상태를 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 식 (7)로 나타낼 수 있으며, 식 (2)를 적용하면 노즐 내부의 각 지점에서의 정압 및 마하수가 구해진다. 여기서 각 유동의 질량유량은 국소 정압과 국소 면적의 함수이므로, 다음의 식 (8)로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{\dot{m}_2\sqrt{T_{02}}}{\dot{m}_1\sqrt{T_{01}}} = {} & \left(\frac{\gamma_2 p_{02}}{\gamma_1 p_{01}}\right)\left\{\frac{\gamma_1 - 1}{2}\left[\left(\frac{p}{p_{01}}\right)^{\frac{1-\gamma_1}{\gamma_1}} - 1\right]^{-1} - 1\right\} \\ & \times\left(\frac{p}{p_{02}}\right)^{\frac{1}{\gamma_2}}\sqrt{\frac{2}{R_2}\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_2 - 1}\right)\left[1 - \left(\frac{p}{p_{02}}\right)^{\frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_2}}\right]} \\ & \div\left\{1 - \frac{\gamma_2 - 1}{2}\left[\left\{\frac{p}{p_{02}}\right\}^{\frac{1-\gamma_2}{\gamma_2}} - 1\right]^{-1}\right\} \\ & \div\left(\frac{p}{p_{01}}\right)^{\frac{1}{\gamma_1}}\sqrt{\frac{2}{R_1}\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_1 - 1}\right)\left[1 - \left(\frac{p}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1}}\right]}\end{aligned} \tag{7}$$

$$\dot{m}_i = \frac{A_i p_{0i}}{\sqrt{T_{0i}}}\left(\frac{p}{p_{0i}}\right)^{\frac{1}{\gamma_i}}\sqrt{\frac{2}{R_i}\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_i-1}\right)\left[1-\left(\frac{p}{p_{0i}}\right)^{\frac{\gamma_i-1}{\gamma_i}}\right]} \quad (8)$$

3. 수치계산 방법

본 연구에서는 축소노즐 상류에 분리판을 설치하여, 서로 다른 두 유동이 축소노즐의 출구에서 복합초크하는 경우를 고려한다. Fig. 3 에는 본 연구의 수치계산을 위한 유동장을 개략적으로 나타내었다. 그림에서 유동 1 과 유동 2 를 구분하는 분리판은 기하학적으로 매우 날카로운 끝단을 가지도록 하여, 두유동이 분리판의 끝단에서 혼합하도록 되어 있다. 그림에 나타낸 축소노즐은 출구에서 목높이 D 를 가지는 2 차원 유로로 되어 있으며, 분리판의 끝단은 축소노즐의 중간 부분 정도에 위치하도록 하였다. 본 연구에서는 분리판 의 위/아래의 두유동이 복합초크하는 과정을 모사하기 위하여, 2 차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 수치계산 하였다. 지배방정식과 상세한 수치계산법에 대해서는 문헌(10)에 상세하게 기술되어 있으므로, 여기에서는 생략한다.

축소노즐의 입구에서 서로 다른 압력과 온도를 가지는 두 유동은 축소노즐에서 혼합하여 대기로 방출되며, 수치계산에 적용된 경계조건으로 각 유동에 전압 p_{01}, p_{02} 와 전온도 T_{01}, T_{02} 의 유입조건을 적용하였으며, 유출조건으로 노즐의 배압 p_a 를 대기압으로 가정하였다. 또한 고체벽에는 단열 no-slip 조건을 적용하였다.

4. 계산결과 및 고찰

Fig. 4 는 두 유동의 전온도(T_{01}=T_{02}=300K, ζ=1.0)가 동일하고 ϕ(=p_{02}/p_{01})=0.9 인 경우, p_{01}/p_a 가 노즐

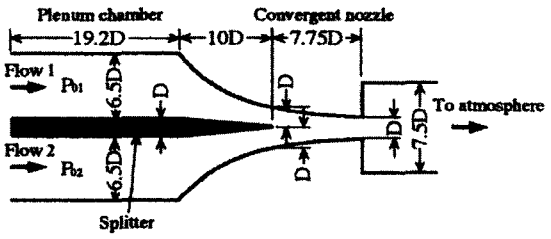

Fig. 3 Computational domain for computation

중심축의 정압분포에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 횡축은 분리판을 원점으로 하여 노즐 중심축 방향의 거리 x 를 노즐 출구 직경의 2 배로 무차원화한 값이며, 종축의 값은 노즐중심축의 정압 p 를 유동 1 의 상류압력 p_{01} 으로 무차원화 하였다.

그림의 수치계산 결과로부터 p_{01}/p_a=1.68 인 경우 축소노즐의 내부에서 발생하는 압력은 분리판 하류로부터 단조롭게 감소하여 노즐 출구 하류에서는 거의 일정한 분포를 가지게 된다. p_{01}/p_a=1.88 로 다소 증가하게 되면 노즐내부에서 발생하는 압력은 유사한 경향을 보이지만, 노즐 출구 하류에서 압력은 더 낮아지게 된다. p_{01}/p_a=2.07 인 경우 노즐 출구로부터 하류에서 압력의 변동이 발생하게 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 압력변동은 축소노즐의 목에서 유동이 복합초크하여 노즐 출구의 하류에서 충격파 시스템이 발생하기 때문이다. 그림으로부터 p_{01}/p_a 가 2.27 보다 더 증가하는 경우 노즐 내부에서 발생하는 압력분포는 더 이상 p_{01}/p_a 에 의존하지 않게 되며, 노즐 출구에서 발생하는 충격파의 강도나 위치 등은 다소 변화하는 것으로 보여진다. 노즐내부에서 발생하는 압력이 p_{01}/p_a 에 의존하지 않는다는 것은 노즐 목에서 유동이 복합초크한다는 것을 의미한다.

최근 문헌(11)에서는 ϕ=0.9 의 경우 p_{01}/p_a=1.97 근처에서 복합초크가 발생한다는 것을 실험적으로 확인하였다. 본 연구의 결과에 의하면 p_{01}/p_a 가 1.88 에서 2.07 의 사이에서 발생하므로, 본 수치계산의 결과는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 보여

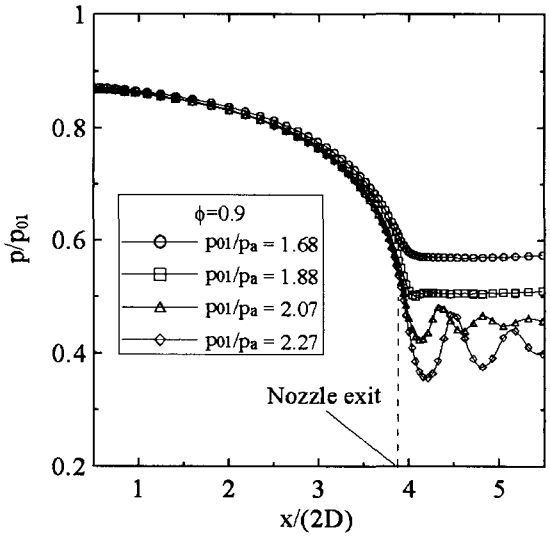

Fig. 4 Static pressure distributions along nozzle axis (T_{01}=300, ζ=1.0)

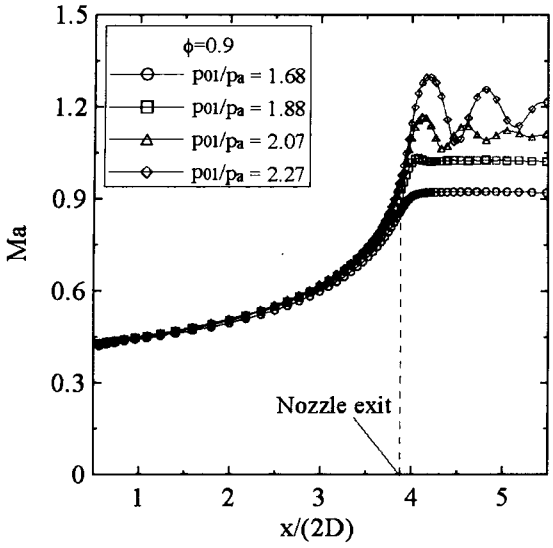

Fig. 5 Mach number distributions along nozzle axis (T_{01}=300, ζ=1.0)

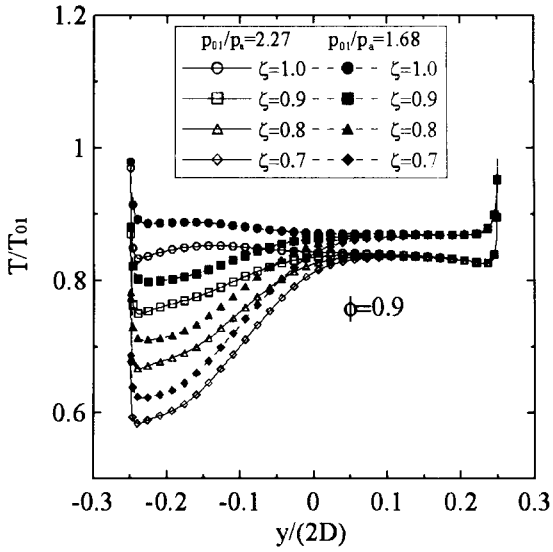

Fig. 6 Static temperature distributions at nozzle exit (T_{01}=300K)

진다. 또 최근 문헌(10)에서는 앞의 식 (3)의 β<0.001 인 경우 축소노즐의 목에서 복합초크가 발생한다고 보고하였다. 본 연구의 결과로부터 p_{01}/p_a=1.68, 1.88, 2.07 및 2.27 인 경우 얻어지는 β 는 각각 0.0072, 0.0032, 0.0017 및 0.0010 이므로, 본 수치계산 결과는 문헌(10)의 결과와 비교적 잘 일치한다.

Fig. 5 에는 Fig. 4 와 동일한 유동조건인 경우, 수치계산에서 얻어진 노즐 중심축에서 발생하는 마하수 분포를 나타내었다. 그림으로부터 p_{01}/p_a 가 2.07 보다 큰 경우 노즐내부의 마하수 분포는 p_{01}/p_a 에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 p_{01}/p_a 가 1.88 보다 작은 경우 노즐내에서 발생하는 마하수는 p_{01}/p_a 에 다소 의존하는 것으로 보인다. 또 노즐 출구 하류에서 발생하는 마하수 분포로부터, p_{01}/p_a 가 2.07 보다 큰 경우에 충격파 시스템의 발생으로 인하여 유동은 초음속과 음속이 교대로 나타나게 되지만, p_{01}/p_a 가 1.88 보다 작은 경우에 노즐 출구에서 유동은 아음속이다.

Fig. 6 에서는 축소노즐의 복합유동에서 전온도비 ζ가 복합유동의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 전온도 T_{01}=300K 인 경우, ζ를 변화시켜 노즐 출구에서 유동이 복합초크하는 경우(p_{01}/p_a=2.27)와 초크하지 않은 경우(p_{01}/p_a=1.68)를 비교하였다. 그림으로부터 노즐출구면에서 발생하는 유동의 온도는 ζ의 값에 의존하게 되지만, 유동이 복합초크하는 경우와 하지 않은 경우에 상당히 달라지게 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 복

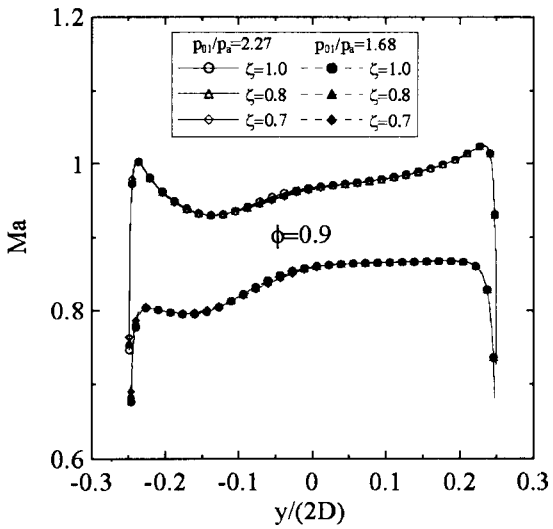

Fig. 7 Mach number distributions at nozzle exit (T_{01}=300K)

합초크 유동을 1 차원적으로 해석하기 위해서는 노즐출구에서 유동의 마하수를 1 차원 복합마하수 형태로 취급하지 않으면 안된다는 것을 의미한다.

Fig. 7 에는 ϕ=0.9 으로 일정하고, 노즐 출구면에서 유동이 복합초크하는 경우(p_{01}/p_a=2.27)와 하지 않은 경우(p_{01}/p_a=1.68)에 대하여, ζ가 노즐 출구 마하수 분포에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 유동이 복합초크하는 경우 노즐 출구면에서

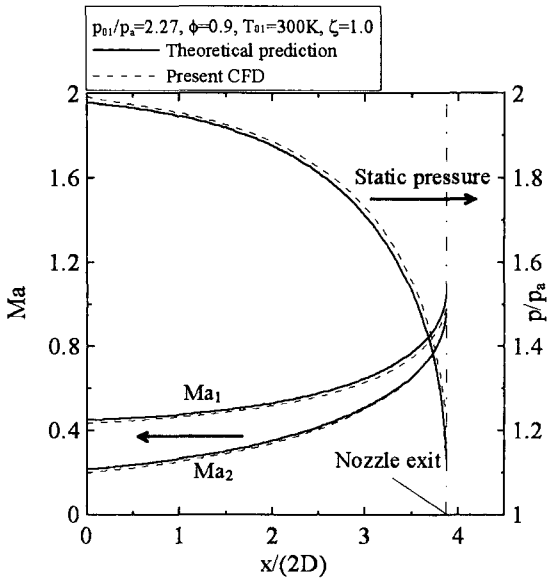

Fig. 8 Comparison between CFD and theoretical predictions

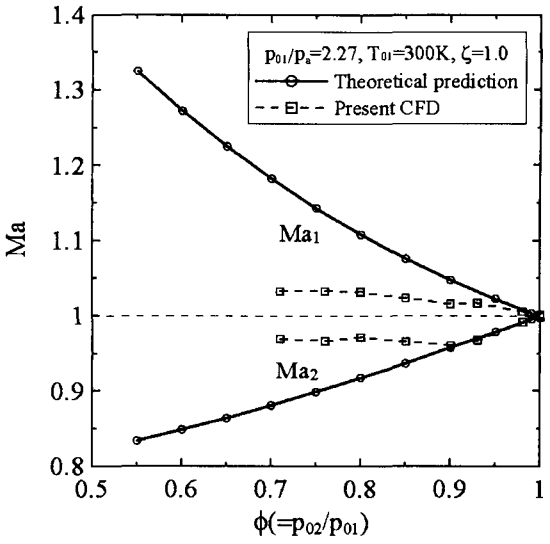

Fig. 9 Comparison between CFD and theoretical predictions of Mach number at nozzle exit

초음속유동과 아음속유동이 공존하게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 노즐 출구면에서 유동이 복합초크 하는지에 상관없이 ζ는 마하수 분포에 영향을 미치지 않는다. 이러한 결과로부터 노즐출구면에서 Ma>1.0 인 초음속 유동과 Ma<1.0 인 아음속 유동이 공존하는 상태에서 복합초크현상을 설명하기 위해서는 복합마하수의 개념 도입이 필요하며, 이에 대한 체계적인 연구가 요망된다.

Fig. 8 에는 p_{01}/p_a=2.27, ϕ=0.9, 그리고 ζ=1.0 인 경우, 수치계산과 이론해석으로부터 얻어진 유동 1 과 2 의 마하수 및 정압분포를 비교하였다. 그림으로부터 본 연구의 이론해석과 수치계산은 매우 잘 일치하며, 두 유동의 마하수는 축소노즐의 출구로 접근할수록 급격하게 변화하여 1.0 으로 접근한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 에는 p_{01}/p_a=2.27 그리고 ζ=1.0 인 경우, ϕ가 노즐 출구면에서 발생하는 마하수에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 이론해석결과와 수치계산결과의 차이는 ϕ가 작아질수록 매우 커지게 된다. 이것은 본 연구의 이론해석이 1 차원 이론에 근거한 것이며, 실제의 유동에서 ϕ가 1.0 보다 작아지는 경우 두 유동간에 발생하는 복잡한 혼합과정이나 점성효과 등을 모사하는데는 한계가 있기 때문이다. 그러나 ϕ가 1.0 에 가깝게 되면 이론계산결과는 수치해석결과와 비교적 잘 일치한다.

그림으로부터 축소노즐의 목에서 복합초크가 발생하는 경우 ϕ가 작아지면 노즐목에서 마하수변화가 커지게 되므로, 초음속유동과 아음속 유동을 일의적으로 취급할 수 있는 복합초크의 해석법이 요구된다. 본 연구의 이론해석과 수치해석 결과에서 정성적 경향은 서로 일치하는 것을 알 수 있다

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식의 수치해법과 1차원 이론해석을 행하여, 기체유동의 복합초킹 현상에 대해 다음의 결론을 얻었다.

(1) 본 연구의 수치계산과 1 차원 이론해석은 정성적으로 일치하며, 정체실 압력이 상이한 두 유동의 유속은 노즐 축소부에서 노즐 출구방향으로 각각 다른 마하수로 증가하고, 노즐 출구에서는 유동의 초음속 영역과 아음속 영역이 공존하는 상태에서 복합 초크가 발생한다.

(2) 전압비 ϕ=0.9 및 p_{01}/p_a= 1.68~1.88 의 조건에서 복합유동의 마하수와 정압분포는 p_{01}/p_a 의 영향을 받지만, p_{01}/p_a가 증가하여 임계압력비에 이르는 경우 복합초크가 발생하여 노즐내부 및 출구의 유동상태는 변화가 없고, 노즐출구 하류방향의 복합유동장에는 다수의 충격파 시스템이 발생하여 압력과 마하수의 급격한 변화를 일으킨다.

(3) 일정한 전압조건에서 복합 유동의 전온도비 $\zeta(=T_{02}/T_{01})$가 감소하여도 마하수 분포는 변하지 않으며, 유동의 복합초크시에도 온도의 변화가 유동특성에 큰 영향을 주지 않는다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

(1) Woo, S. H., Kim, T. H., and Kim, H. D., 1999, "Further Consideration on Internal Gas Flow Choke," Proceedings of the KSME 1999 Spring Annual Meeting B, pp. 379～384.

(2) German, R. C., Bauer, R. C. and Panesci, J. H., 1966, "Methods for Determining the Performance of Ejector-Diffuser Systems," *Journal of Spacecraft*, Vol.3, No.2, pp. 193～200.

(3) Clark, L. T., 1995, "Application of Compound Flow Analysis to Supersonic Ejector-Mixer Performance Prediction," AIAA Paper, No. 95-0645.

(4) Lewis, M. J. and Hastings, D. E., 1987, "The Influence of Flow Non-Uniformities in Air-Breathing Hypersonic Propulsion Systems," AIAA Paper, No.87-2079, pp. 1～14.

(5) Schindel, L., 1999, "Effect of Nonuniform Nozzle Flow on Scramjet Performance," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.15, No.2, pp. 363～364.

(6) Fabri, J., Grives, E., and Siestrunk, R., 1953, "Etude Aerodynamique des Trompes Supersoniques," *G. für luftfahrt*, pp. 101～111.

(7) Chow, W. L., and Addy, A. L., 1964, "Interaction between Primary and Secondary Streams of Supersonic Ejector Systems and their Performance Characteristics," *AIAA Journal*, Vol. 2, pp. 686～695.

(8) Bernstein, A., Heiser, W. H. and Hevenor, C., 1967, "Compound-Compressible Nozzle Flow," *Trans. of the ASME Journal of Applied Mechanics*, pp. 548～554.

(9) Hoge, H. J., and Segars, R. A., 1965, "Choked Flow:A Generalization of the Concept and Some Experimental Data," *AIAA Journal*, Vol.3, pp. 2177～2184.

(10) Lee, J. H., Kim, H. D., and Park, J. H., 2001, "A Fundamental Study of the Compound Choking in Gas Flow," *Journal of KSPE*(to be published).

(11) Kwon, J. K., Masusaka, K., Miyazato, Y., Katanoda, H., Masuda, M., and Matsuo, K., 2001, "Compound Choking of a Two-Parallel Stream through a Nozzle," Proceeding of 6th Asian Symposium on Visualization, pp. 109～111.

(12) Shapiro, A. H., 1953, "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow," Ronald Press Co., New York.