

축소 유로내의 두 평행 유동에 대한 해석

권진경* · 김태욱* · 김진현* · 김재열*

Analysis on Two Parallel Flows in Convergent Channel

Jinkyung Kwon* · Taewook Kim* · Jinhyun Kim* · Jaeyeel Kim*

ABSTRACT

Compound flow by confluence of two parallel flows through a convergent channel and its choking phenomenon are calculated by one-dimensional isentropic model and completely mixing model. Optical observations and pressure measurements for subsonic/subsonic compound flows are carried out and compared with the results of one-dimensional calculations. As a result, it is found that inlet conditions of one flow influence the behavior of the other flow as well as the choking condition and present experimental data agree well with the results of one-dimensional calculations

초 록

축소 유로에서의 두 평행 유동의 합류에 의한 복합유동과 그 초킹 현상이 일차원 등엔트로피 모델과 완전혼합 모델에 의해 계산되었다. 아음속-아음속의 복합유동에 대해 압력측정과 광학 측정이 실시되었으며 그 결과를 일차원 계산의 결과와 비교하였다. 결과적으로 복합유동의 한쪽 유동의 입구조건은 다른 유동의 거동과 초킹 조건에 영향을 미침을 알 수 있었으며 본 실험의 결과는 일차원 계산 결과와 비교적 잘 일치함을 알았다.

Key Words: Compound flow(복합유동), Compound Choking(복합초킹), Convergent Channel(축소유로), Flow Visualization(유동가시화)

1. 서 론

기체가 축소 유로 내에서 정체압에서 배압까지 가속 팽창하는 경우, 어느 임계 압력비가 되면 출구 유속은 음속에 도달하게 되며 이때 유로의 질량유량은 최대가 된다. 임계 압력 이하로의 배압

감소는 노즐 내 유동에 영향을 미치지 못하며 유동상태는 상류의 정체점 조건에 의해서만 결정된다. 이와 같은 단일 유동의 초킹(Choking) 현상은 그 발생 기구가 이론적으로 정립되어 있다. 한편 서로 다른 정체압과 유속을 가지는 다수의 유동들로 구성된 복합유동(Compound Flow)이 단일 유로 내를 흐르는 경우에도 위와 유사한 초킹현상이 발생할 수 있다. 복합유동장에서 발생하는 초킹을 일반적으로 복합초킹(Compound

† 2006년 4월 3일 접수 ~ 2006년 11월 15일 심사완료

* 정회원, 상주대학교 기계공학과

연락처, E-mail: cen55@hanmail.net

Choking)[1]이라 하며 그 발생 기구나 유동 특성에 대해 다양한 연구가 이루어져 왔다[2,3]. 특히 최근 스크램제트 엔진분야의 기술발전과 더불어 복합초킹의 해석은 더욱 중요한 의미를 가지게 되었으며[4,5] 화학공정이나 제트추력, 소음제어, 냉동시스템 등에 다양하게 적용되는 이젝터의 정확한 성능 해석을 위해서도 복합초킹 현상에 대한 이해는 매우 중요하다[6,7]. 기존 연구에 의하면 복합유동은 단일 유동의 음속 초킹과는 달리 초음속과 아음속의 복합유동 상태에서 초킹한다는 것이 밝혀졌다. 즉 초킹 유로 단면에 아음속 영역이 존재함에도 불구하고 초킹영역 하류의 영향은 상류로 전파하지 못하게 된다. 그러나 실제 복합유동장은 유동간 속도차에 의한 혼합층의 발달과 점성, 열전달 또는 다차원 효과 등에 의해 매우 복잡해지며 유동의 거동과 복합초킹의 발생 메커니즘에 대한 해석 역시 복잡해진다. 본 논문에서는 축소유로 내를 평행하게 흐르는 두 유동으로 구성된 2유동 복합유동을 대상으로 두 유동간의 혼합을 고려하지 않는 일차원 등엔트로피 모델과 유동의 혼합과 등엔트로피 팽창을 함께 고려한 일차원 완전혼합 모델을 통해 유동장의 계산을 수행하였으며 복합초킹의 조건은 Pearson 등[1]과 Bernstein등[2]에 의해 제안된 일차원 복합음파(Compound Sound Wave)의 개념을 적용한 복합초킹 조건을 적용하였다. 복합유동장의 입구 유속은 아음속/아음속, 초음속/아음속, 초음속/초음속으로 다양하게 조합하였으며 각각의 유동의 입구조건이 유동장 전체와 복합초킹의 발생 조건에 미치는 영향을 고찰하였다. 실험은 2유동 대기 분출식 풍동을 통해 아음속/아음속 복합유동을 대상으로 압력측정과 유동가시화를 실시하였으며 실험 결과와 1차원 계산의 결과들을 비교하였다.

2. 일차원 이론해석

2.1 일차원 등엔트로피 계산

Pearson 등[1]과 Bernstein 등[2]은 복합유동의 초킹 역시 단일 유동에서와 마찬가지로 축소-확대노

즐의 목 또는 축소노즐의 출구에서의 유속이 음속이 되어 하류의 압력변동이 상류로 전파하지 못하는 상태에서 발생한다고 가정하여 일차원 등엔트로피 복합음파의 개념을 도입하여 이론적인 복합초킹의 조건을 도출하였다. 2유동 복합유동의 경우 이론적인 복합초킹의 조건은 아래와 같다.

$$\frac{A_1}{\gamma_1} \left[\left(\frac{1}{M_1} \right)^2 - 1 \right] + \frac{A_2}{\gamma_2} \left[\left(\frac{1}{M_2} \right)^2 - 1 \right] = 0 \quad (1)$$

위의 A 는 유동단면적을 γ 는 비열비, M 은 마하수를 나타내며 하첨자 1, 2는 각각의 유동을 의미한다. 위 식에 의하면 복합초킹은 단일유동의 음속초킹과는 달리 두 유동 중 한쪽 유동은 초음속, 다른 한쪽 유동은 아음속 상태에서 발생하게 된다.

복합유동장의 거동을 해석하기 위해 먼저 Fig. 1과 같이 서로 다른 유속의 간단한 2유동 일차원 등엔트로피 복합유동 모델을 제안하였다. 유체는 공기로 상하 유동간의 접촉면에 대해 정압 p 전온도 T_0 는 같고 전압 p_0 밀도 ρ 는 다르다. 해석의 간략화를 위해 유로 내 유동간 혼합이나 마찰, 열전달은 무시하며 유동은 등엔트로피, 정상류로 가정된다. 하첨자 in, e는 각각 축소유로의 입구과 출구를 의미하며 유동은 축소유로 내로 평행하게 유입되어 복합유동을 구성한다고 가정한다. 축소유로의 형상은 $A/A_{in}=1-0.5(x/L)$ (여기서 A 는 입구로부터 하류 방향 x 에서 전체 유로 단면적, A_{in} 은 유로 입구 전체 단면적, L 은 유로 길이)이다. 복합유동 모델에 일차원 연속방정식, 운동량방정식, 등엔트

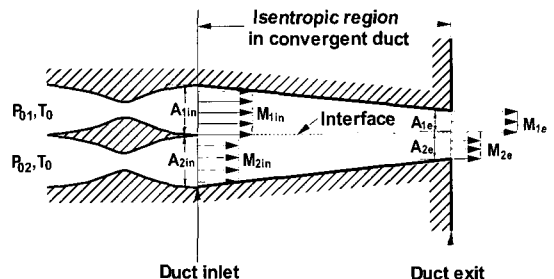


Fig. 1 One-Dimensional Isentropic Compound Flow Model

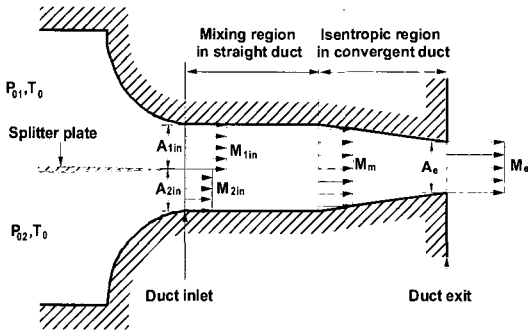


Fig. 2 One-Dimensional Completely Mixing Model

로피 관계식을 적용하여 유속, 단면적, 압력에 관한 다음 eq. (2), (3)을 유도하였다.

$$\frac{dA_1}{dx} = \frac{A_1}{\gamma} \left(\frac{1}{M_1^2} - 1 \right) \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{\beta} \frac{p}{A} \frac{dA}{dx} \quad (3)$$

여기서 β 는 복합유동지수(Compound Flow Indicator)[2]를 의미한다. eq. (2), (3)의 정압 p 를 고속유동의 전압 p_{01} 으로, 단면적 A_1 을 전체 입구단면적 A_{in} 으로, 하류방향 거리 x 는 전체 유로 길이 L 로 각각 무차원화 하면 다음과 같다.

$$\frac{d(A_1/A_m)}{d(x/L)} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{A_1}{A_m} \right) \left(\frac{1}{M_1^2} - 1 \right) \frac{1}{p/p_{01}} \frac{d(p/p_{01})}{d(x/L)} \quad (4)$$

$$\frac{d(p/p_{01})}{d(x/L)} = \frac{1}{\beta} \frac{(p/p_{01})}{(A/A_m)} \frac{d(A/A_m)}{d(x/L)} \quad (5)$$

또한 유로 내 단면적은 다음과 같다

$$A_2/A_m = A/A_m - A_1/A_m \quad (6)$$

하류 방향으로의 계산을 위한 차분법을 적용하기 위해 입구에서 하류의 축 방향으로 미소 거리 Δx 만큼 n 등분하면 단면적과 압력의 변화는 다음 eq. (7), (8)에 의해 각각 구할 수 있다.

$$\left(\frac{A_1}{A_m} \right)_{n+1} = \left(\frac{A_1}{A_m} \right)_n + \left[\frac{d(A_1/A_m)}{d(x/L)} \right]_n \Delta \left(\frac{x}{L} \right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{p}{p_{01}} \right)_{n+1} = \left(\frac{p}{p_{01}} \right)_n + \left[\frac{d(p/p_{01})}{d(x/L)} \right]_n \Delta \left(\frac{x}{L} \right) \quad (8)$$

유동모델은 등엔트로피 유동으로 가정되었으므로 각 유동의 마하수 M_1, M_2 는 eq. (8)의 무차원 압력으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$(M_1)_{n+1} = \left[\frac{2}{\gamma-1} \left\{ \left[\frac{1}{(p/p_{01})_{n+1}} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$(M_2)_{n+1} = \left[\frac{2}{\gamma-1} \left\{ \left[\frac{(p_{02}/p_{01})}{(p/p_{01})_{n+1}} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Figure 1의 유동모델에서 각 유동의 입구 마하수 M_{1in}, M_{2in} 과 입구 단면적 A_{1in}/A_{in} , 유로 형상 $A(x/L)/A_{in}$ 이 주어진다면 eq. (4)~(10)을 이용하여 유동의 속도, 단면적, 압력의 변화를 계산할 수 있다. 이때 하류의 어느 지점에서 각 유동의 마하수와 유동 단면적이 eq. (1)의 조건을 만족시킬 때 복합초킹이 발생하였다고 보고 계산을 종결하였다.

2.2 일차원 완전혼합 계산

실제 복합유동에서는 유동의 속도차로 인해 혼합층이 존재하며 혼합층은 유로의 입구형상, 길이에 따라 하류로 갈수록 성장할 것이다. 유동 혼합은 고속유동은 감속, 저속유동은 가속시키는 효과가 있으므로 위의 일차원 등엔트로피 모델에 의한 계산은 실제 유동과 차이를 나타내게 될 것이다. 따라서 본 절에서는 유동의 혼합을 고려하여 Fig. 2에 보인 일차원 완전혼합 모델에 의한 계산을 수행하였다. 유로는 일정 단면적의 완전 혼합영역과 등엔트로피의 축소영역으로 구별된다. 혼합영역의 출구에서 유동은 완전혼합에 의해 균일유동이 되며 축소영역에서 등엔트로피 팽창하여 출구로 배출된다. 연속방정식과 운동량 방정식으로부터

$$\dot{m}_{1in} + \dot{m}_{2in} = \dot{m}_m \quad (11)$$

$$p_{in} A_m + \rho_{1in} u_{1in}^2 A_{1in} + p_{2in} u_{2in}^2 A_{2in} = p_m A_m + \rho_m u_m^2 A_m \quad (12)$$

질량유량은 다음과 같다.

$$\dot{m} = \frac{p_0 A}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (13)$$

앞의 일차원 등엔트로피 모델의 형상을 참조하여 Fig. 2의 모델에서 $A_{1in}=A_{2in}=A_e$, $A_{in}=A_e$ 로 하였으며 $\gamma_1=\gamma_2=\gamma$ 로, $T_{01}=T_{02}=T_{0m}$ 으로 가정하였다. 위 식을 eq. (11)에 대입하면

$$s_m^{1/(\gamma-1)} \left(\sqrt{1-s_m} + \sigma \sqrt{1-s_m/\sigma} \right) = 2s_m^{1/(\gamma-1)} \sigma_m \sqrt{1-s_m/\sigma_m} \quad (14)$$

여기서 $s_m \equiv (p_m/p_{01})^{(\gamma-1)/\gamma}$, $s_m \equiv (p_m/p_{01})^{(\gamma-1)/\gamma}$, $\sigma \equiv (p_{02}/p_{01})^{(\gamma-1)/\gamma} = \phi^{(\gamma-1)/\gamma}$, $\sigma_m \equiv (p_{0m}/p_{01})^{(\gamma-1)/\gamma}$ 을 각각 의미한다. $u = \sqrt{(2\gamma RT_0/\gamma-1) \left\{ (1-p/p_0)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\}}$ 와 상태방정식을 eq. (12)에 적용하면

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{\gamma-1} s_m^{1/(\gamma-1)} \sqrt{1-\frac{s_m}{\sigma_m}} \left(\sqrt{1-s_m} + \sigma \sqrt{1-\frac{s_m}{\sigma}} \right) - \frac{\gamma}{\gamma-1} s_m^{1/(\gamma-1)} (1+\sigma-2s_m) \\ = s_m^{\gamma/(\gamma-1)} - s_m^{\gamma/(\gamma-1)} \end{aligned} \quad (15)$$

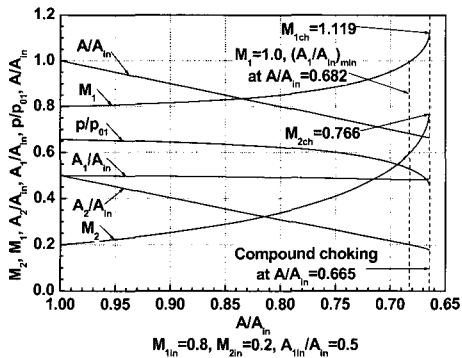
단일 등엔트로피 유동은 축소유로 출구에서 $(p_e/p_{0e})^* = (2/\gamma+1)^{\gamma/(\gamma-1)}$ 의 조건에서 초킹하며 완전 혼합영역의 출구와 등엔트로피영역의 출구에서의 전압은 동일하므로 초킹이 발생하는 압력비는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_{01}}{p_e} \right)_{ch} &= \frac{p_{01}}{p_{0m}} \left(\frac{p_{0e}}{p_e} \right)^* = \left(\frac{\gamma+1}{2\sigma_m} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \left(\frac{p_{02}}{p_e} \right)_{ch} &= \phi \left(\frac{p_{01}}{p_e} \right)_{ch} \end{aligned} \quad (16)$$

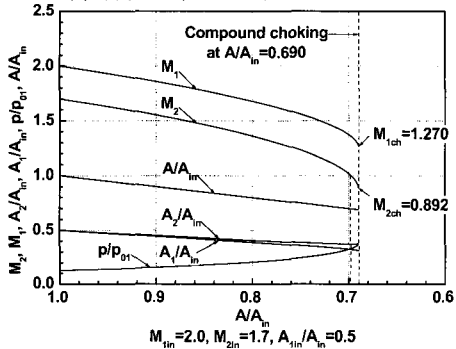
비열비 γ 와 두 유동의 전압비 $\phi = p_{02}/p_{01}$ 가 주어진다면 s_m 과 σ_m 이 eq. (14)와 (15)에 의해 계산되며 eq. (16)을 통해 초킹조건 $(p_{01}/p_e)_{ch}$ 와 $(p_{02}/p_e)_{ch}$ 을 계산할 수 있다. 위의 일차원 완전 혼합 모델에 의한 계산 결과는 일차원 등엔트로피 모델의 계산결과 및 실험결과와 3장에서 비교된다.

23 계산 결과

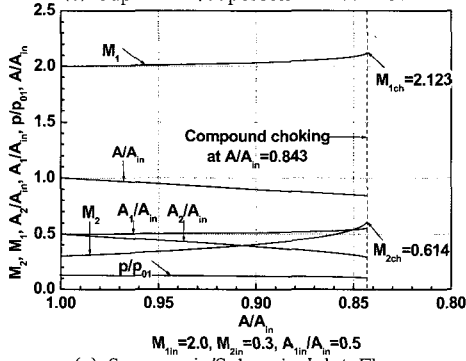
Figure 3은 2.1절의 일차원 등엔트로피 모델에 의한 복합유동장의 계산결과이다. Fig. 3(a)는 입구 마하수 M_{1in} , M_{2in} 이 각각 0.8, 0.2, 입구 면적비 A_{1in}/A_{in} 가 0.5인 아음속/아음속 입구 유속의 복합유동이 $A/A_{in}=1-0.5(x/L)$ 의 축소 유로 내를 흐를 때 유동 마하수, 단면적, 정압의 변화를 보여준다. 가로축은 유로 단면적과 입구 면적의 비로 나타낸 하류방향의 거리이다. 각각의 유동은 하류로 갈수록 가속 팽창되며 고속유동은 면적비 $A/A_{in}=0.682$ 에서 최소 단면적이 되고 이때 유동 마하수는 1에 도달한 후 초음속 유동으로 팽창된다. 면적비 $A/A_{in}=0.665$ 의 위치에서 복합유동은 eq. (1)을 만족하여 이론적으로 복합초킹하게 되며 이때 고속유동은 마하수 1.119로 초음속, 저속유동은 마하수 0.766으로 아음속 상태이다. 유로 내 두 유동의 마하수 차이는 하류로 갈수록 감소하며 고속유동의 단면적은 거의 변화하지 않으나 저속유동의 단면적은 크게 감소를 볼 수 있다. Fig. 3(b)는 입구 마하수가 각각 2.0, 1.7, 입구 면적비 0.5의 초음속/초음속 복합유동에 대한 결과이다. 각 유동은 하류로 갈수록 감속되며 정압은 증가하는 감속, 압축유동이다. 저속유동은 면적비 약 0.7에서부터 아음속으로 감속되나 고속유동은 초음속을 유지하며 면적비 0.69에서 복합초킹한다. 각 유동의 하류방향 마하수, 면적변화의 차이는 작으며 아음속/아음속 유동과는 달리 고속유동의 면적변화가 조금 더 크다. Fig. 3(c)와 (d)는 입구유속이 초음속/아음속으로 조합된 복합유동의 계산 결과이다. Fig. 3(c)의 입구 마하수는 2.0, 0.3으로 마하수, 단면적, 압력의 변화는 아음속/아음속 복합유동과 동일한 가속, 팽창유동을 보이며 고속유동과 저속유동은 복합초킹할 때까지 각각 초음속과 아음속을 계속 유지한다. Fig. 3(d)는 입구 마하수가 2.0, 0.9의 경우로 위와 반대로 감속, 압축 유동의 패턴을 보이며 복합초킹이 발생하는 거리가 매우 짧으며 마하수, 단면적의 변화도 작다. 이와 같이 초음속/아음속 입구 유속의 복합유동은 축소유로 내에서 가속, 팽창유동과 감속, 압축유동 중 한 가지 유동의 특성을 나타내게



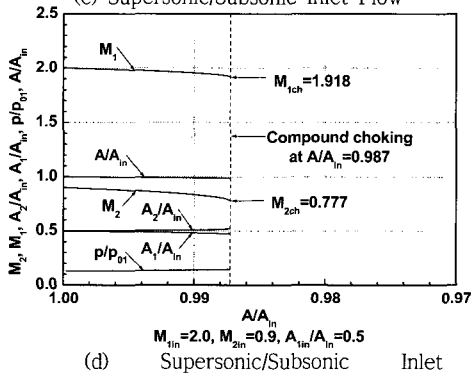
(a) Subsonic/Subsonic Inlet Flow



(b) Supersonic/Supersonic Inlet Flow

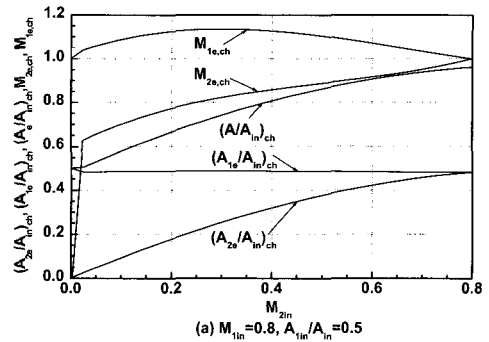


(c) Supersonic/Subsonic Inlet Flow

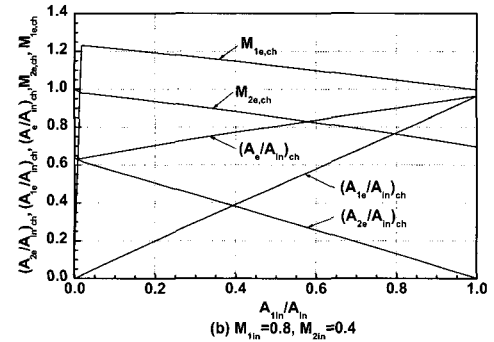


(d) Supersonic/Subsonic Inlet

Fig. 3 Calculated Mach Number, Cross Section and Static Pressure of Compound Flows

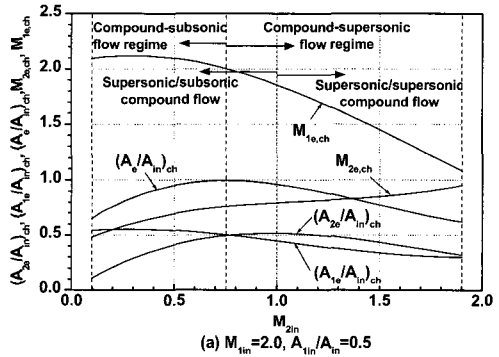


(a) $M_{1in}=0.8, M_{2in}/A_{in}=0.5$

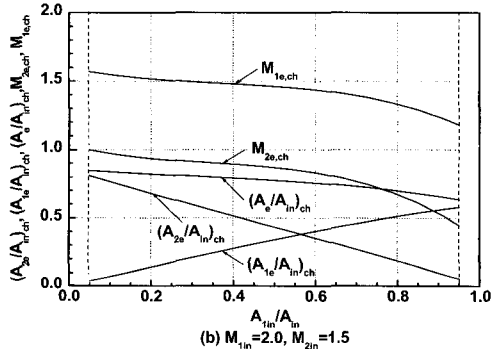


(b) $M_{1in}=0.8, M_{2in}=0.4$

Fig. 4 Compound Choking Condition (Subsonic/Subsonic Inlet Flow)



(a) $M_{1in}=2.0, M_{2in}/A_{in}=0.5$



(b) $M_{1in}=2.0, M_{2in}=1.5$

Fig. 5 Compound Choking Condition (Supersonic/Subsonic and Supersonic/Supersonic Inlet Flows)

되며 이는 복합유동을 구성하는 각 유동의 입구 마하수와 면적에 의해 결정된다. Fig. 4(a), (b)는 입구 유속이 아음속/아음속인 복합유동에 대해 한쪽 유동의 입구 마하수와 면적의 변화가 다른 유동의 거동과 복합초킹 위치에 미치는 영향을 보여준다. Fig. 4(a)는 고속유동의 입구 마하수와 면적비를 각각 0.8과 0.5로 고정하고 저속유동의 입구 마하수를 변화시킨 경우 계산 결과이다. 그림에서 하첨자 e, ch는 각각 유로의 출구, 복합초킹 상태를 의미하며 복합초킹이 발생한 지점을 유로의 출구로 가정하고 복합초킹시 출구 마하수와 면적, 면적비 (A/A_{in})로 나타낸 복합초킹의 발생 위치를 나타낸다. 저속유동의 입구 마하수가 증가할수록 즉 입구 유속차가 작을수록 복합초킹의 발생거리가 짧아지며 이는 두 유동의 입구 유속차가 작을수록 복합초킹이 발생하기 쉬움을 의미한다. 복합초킹시 고속유동의 출구 마하수는 항상 1보다 크고 그 값은 M_{2in} 이 약 0.35일 때 최대이며 저속유동의 복합초킹 마하수는 항상 1보다 작다. 복합초크시 고속유동의 유동면적은 입구 마하수의 영향을 거의 받지 않으나 저속유동의 유동면적은 그 영향이 클 수 있으며 이는 Fig. 3의 복합유동장내에서 고속, 저속 유동의 면적변화와 동일한 경향이다. Fig. 4(b)는 고속유동의 입구 단면적 변화의 영향을 보여준다. 고정된 각 유동의 입구 마하수 0.8, 0.4에 대해 고속유동의 입구면적이 증가할수록 고속, 저속유동의 복합초킹시 출구 마하수는 감소한다. 복합초킹의 발생거리와 저속유동의 초킹시 출구 단면적은 감소하게 되나 고속유동의 단면적은 증가한다. Fig. 5(a), (b)는 초음속/아음속과 초음속/초음속의 입구 유속 복합유동에서 한쪽 유동의 입구 마하수와 면적의 변화의 영향을 나타낸다. Fig. 5(a)는 고속유동의 입구 마하수를 2.0, 입구 면적비를 0.5로 고정하고 저속유동의 입구 마하수를 아음속에서 초음속 영역까지 확대한 경우이다. 그림 중간의 점선은 저속유동의 입구 유속을 초음속과 아음속으로 구분하는 경계이며 좌측의 파선은 입구 유속이 초음속/아음속인 복합유동이 축소유로 내에서 가속, 팽창유

동의 특성을 보이는 영역과 감속유동의 특성을 보이는 영역으로 구분되는 기준이다. 아음속/아음속 복합유동을 포함하여 이 파선의 좌측영역은 아음속 단일유동과 유사한 유동 특성을 보이므로 복합 아음속 유동(Compound Subsonic Flow)으로, 초음속/초음속 복합유동을 포함하여 파선의 우측영역은 초음속 단일 유동과 유사하므로 복합 초음속 유동(Compound Supersonic Flow)으로 분류 될 수 있다. 점선과 파선은 일치하지 않으며 저속유동의 입구 마하수가 0.756에서 1.0사이인 영역은 저속유동의 입구 유속이 아음속임에도 불구하고 복합 초음속 유동으로 분류된다. $(A_e/A_{in})_{ch}$ 로 나타낸 복합 초킹 발생거리는 복합 아음속 유동 영역에서는 M_{2in} 이 증가함에 따라 짧아지며 복합 초음속 유동 영역에서는 M_{2in} 이 증가할수록 길어진다. Fig. 5(b)는 초음속/초음속 복합유동의 각 입구 마하수를 고정하고 고속유동의 입구 면적을 변화시켰을 때의 영향을 보여준다. Fig. 4 (b)의 아음속/아음속 복합유동에 대한 계산 결과와 유사한 경향을 보이지만 복합초킹의 발생 거리는 반대의 경향을 보인다. 이와 같은 이론해석의 결과는 실제 유동장에도 정성적으로 적용될 수 있을 것이다. 예를 들어 스크램제트 엔진의 공기흡입구는 극초음속의 자유유동과 가열된 기체표면에서 발달한 초음속의 두꺼운 경계층으로 구성된 복합유동을 흡입하게 되며 이때 공기흡입구에서 초킹현상이 발생하게 되면 엔진의 불시동(unstart)현상과 출력저하를 야기하게 된다. Fig. 5의 결과에 의하면 이 경우 경계층 내부의 유속을 증가시킨다든지 경계층 두께를 감소시킴으로써 어느 정도 초킹을 지연시킬 수 있을 것이다. 물론 실제 복합 유동장은 내부에 충격파나 유속차에 의한 강한 혼합층이 발생하게 되므로 적용을 위해서는 보다 정확한 유동 해석이 필요하게 된다.

3. 실험적 연구

3.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 2유동 대기 분출식 풍동의 개

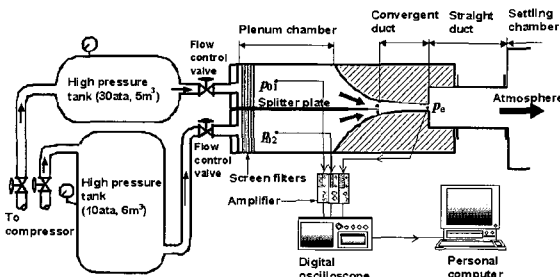


Fig. 6 Experimental Apparatus and Instruments

략도를 Fig. 6에 나타냈다. 두 고압탱크의 공기는 조절밸브와 스크린필터를 통해 챔버로 유입된다. 챔버는 분리판에 의해 분리되며 하류의 축소유로로 거의 평행한 아음속/아음속의 복합유동을 유입시키게 된다. 축소유로는 슈리렌법(Schlieren Method)에 의해 가시화되며 축소유로 입구와 출구, 각각의 유동의 챔버에서 설치된 압력센서를 통해 정압과 전압을 측정하여 실험적 복합초킹의 조건을 구하였다.

3.2 실험결과

Figure 7은 두 유동 중 상부 유동의 챔버압 p_{01} 을 190kPa로 일정하게 유지한 후 두 유동의 전압비 $\phi (=p_{02}/p_{01})$ 를 변화시켜가며 실시한 슈리렌 가시화 결과이다. Fig. 7 (a)~(c)는 모두 유로 출구에서 복합초킹이 발생한 상태이며 이는 후술하는 압력측정을 통해서도 확인된다. 초킹의 발생에 의해 유동의 출구에서는 일련의 충격과 구조가 관찰된다. 2.1절의 계산에 의하면 Fig. 7(a)의 경우 입구 마하수는 $M_{1in}=M_{2in}=0.31$, (b)의 경우 $M_{1in}=0.44$, $M_{2in}=0.19$, (c)의 경우 $M_{1in}=0.58$, $M_{2in}=0.10$ 정도이다. 즉 ϕ 가 감소할수록 두 유동의 속도차는 증가하며 이로 인해 혼합층은 더욱 발달하게 된다. 이는 위 슈리렌 사진에서도 확인할 수 있으며 ϕ 가 감소할수록 복합초킹 조건의 실험치와 등엔트로피 계산치의 차가 커지게 됨을 유추해볼 수 있다. Figure 8에는 ϕ 를 0.8로 일정하게 유지한 상태에서 하부 유동의 챔버압과 대기압의 비 p_{02}/p_a 를 증가시키면서 두 유동의 챔버압과 유로의 출구 정압의 비 p_{01}/p_e 와

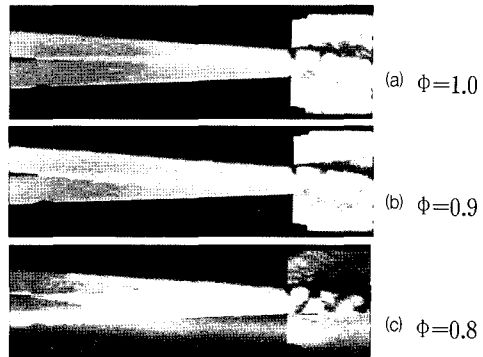


Fig. 7 Results of Schlieren Visualization

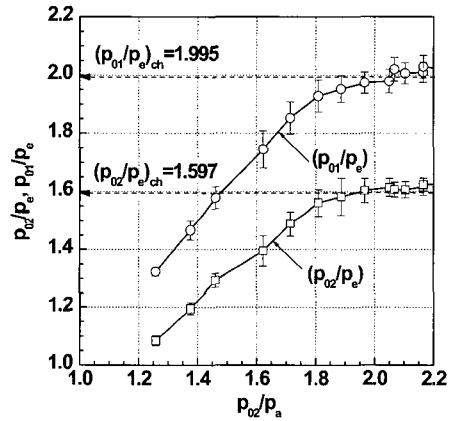


Fig. 8 Two Plenum Chamber Pressures and Duct Exit Static Pressure ($\phi=0.8$)

p_{02}/p_e 을 측정한 결과이다. p_{02}/p_a 의 증가에 따라 p_{01}/p_e 과 p_{02}/p_e 는 동시에 증가하나 어느 임계압력 이상에서는 더 이상 증가하지 않으며 이는 유로의 출구가 복합초킹 상태에 도달했음을 의미한다. 2유동 풍동 내에서 유동은 서로 간에 영향을 미치므로 유동 불안정성에 기인한 압력 측정치의 편차가 존재하며 이 편차는 초킹 직전에는 상당히 크나 초킹이 발생한 후에는 감소하였다. 일차원 등엔트로피 계산에 의한 복합초킹 조건을 $(p_{01}/p_e)_{ch}$ 와 $(p_{02}/p_e)_{ch}$ 로 나타냈으며 실험치와 계산치에는 오차가 존재함을 볼 수 있다. 초킹상태의 압력측정치 p_{01}/p_e 와 p_{02}/p_e 에 2장의 해석을 적용하면 출구에서 각 유동의 마하수를 계산할 수 있다. 압력 측정치로부터 $\phi=1.0$ 의 경우 $M_{1e}=M_{2e}=1.0$, $\phi=0.9$ 의 경우

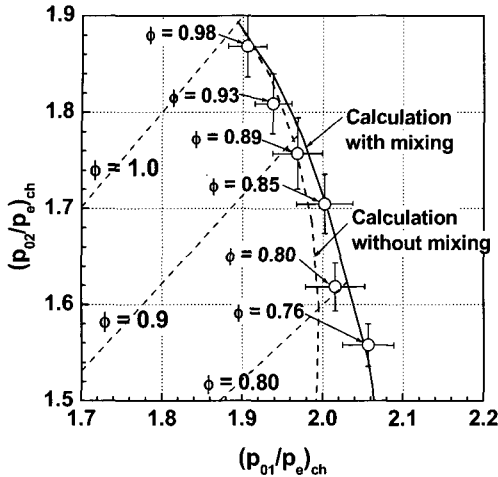


Fig. 9 Comparison of Theoretical and Experimental Compound Choking Condition

$M_{1e}=1.03$, $M_{2e}=0.94$, $\phi=0.8$ 의 경우 $M_{1e}=1.04$, $M_{2e}=0.85$, $\phi=0.7$ 의 경우 $M_{1e}=1.04$, $M_{2e}=0.70$ 정도로 계산된다. 즉 복합초킹이 발생했을 때 출구의 유속은 고속측은 초음속, 저속측은 아음속을 유지함을 알 수 있다. Figure 9에는 복합초킹 조건의 일차원 계산치와 실험치의 비교를 나타낸다. 실선은 일차원 완전혼합 모델에 의한 계산치이며 점선은 일차원 등엔트로피 모델에 의한 계산치이다. $\phi=1.0 \sim 0.89$ 의 범위에서는 일차원 등엔트로피 계산결과와 거의 일치하나 $\phi=0.85 \sim 0.76$ 의 범위에서는 유동간의 속도차가 커지므로 혼합과 마찰의 영향을 무시한 등엔트로피 계산과는 차이를 보이며 일차원 완전혼합 계산치에 근접함을 볼 수 있다. 본 유동계산 모델의 적용한계를 위해서는 초음속 유동을 포함한 보다 넓은 범위의 유속조합에 대한 실험이 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

두 평행유동에 의한 복합유동장의 거동을 일차원 등엔트로피 모델과 일차원 완전혼합 모델을 통해 고찰하였다. 두 아음속 유동으로 구성된 복합유동에 대해 압력측정과 유동가시화를 실시

하였으며 복합유동 조건의 실험치는 두 유동의 전압비 ϕ 가 약 0.9이상에서는 등엔트로피 계산치와 그 이하에서는 완전혼합 계산치와 일치함을 확인하였다. 이를 통해 두 유동간의 혼합이 복합초킹의 발생조건에 영향을 미침을 알 수 있었다. 이론 해석에 따르면 유로의 입구에서 각각의 유동의 마하수와 면적비에 따라 축소유로내의 복합유동은 복합아음속유동과 복합초음속유동으로 대별되는 유동특성을 나타냄을 확인하였으며 이론계산과 압력측정을 통해 복합초킹이 발생했을 때 출구의 유속은 고속유동측은 초음속, 저속유동측은 아음속 상태를 유지함을 확인하였다.

참고 문헌

1. Pearson, H., Holliday, J. B. and Smith, S. F., "The Theory of the Cylindrical Ejector Supersonic Propelling Nozzle", Journal of Royal Aeronautical Society, Vol. 62, 1958, pp.746-751
2. Bernstein, A., Heiser, W. H. and Hevenor, C., "Compound-Compressible Nozzle Flow", Trans. of the ASME, Journal of Applied Mechanics, 1967, pp.548-554
3. Hoge, H.J. and Segars, R. A., "Choked Flow : A Generalization of the Concept and Some Experimental Data", AIAA Journal, Vol. 3, No. 12, 1965, pp.2177-2183
4. Lewis, M. J. and Hastings, D. E., "The Influence of Flow Non-Uniformities in Air-Breathing Hypersonic Propulsion Systems", AIAA Paper, No. 87-2079, 1987, pp.1-14
5. Schindel, L., "Effect of Nonuniform Nozzle Flow on Scramjet Performance", Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, No. 2, 1999, pp.363-364
6. Clark, L. T., "Application of Compound Flow Analysis to Supersonic Ejector Mixer Performance Prediction", AIAA Paper, No. 95-0645, 1995
7. Chou, S. K., Yang, P. R. and Yap, C., "Maximum Mass Flow Ratio due to Secondary Flow Choking in An Ejector Refrigeration System", International Journal of Refrigeration, Vol. 24, 2001, pp.486-499