

# Flush 흡입관 설계를 위한 매개변수 연구

이진규<sup>\*1</sup>, 정석영<sup>\*2</sup>, 안창수<sup>\*3</sup>

## A Parametric Study for the Design of Flush inlet

J. G. Lee, S. Y. Jung and C. S. Ahn

Flush inlet, which has been chosen for modern air vehicles to take advantage of structure compactness and small RCS, gives rise to some aerodynamic problems such as flow separation and distortion due to vortices which deteriorate the performance of both inlet and engine. In this study, pressure recoveries at inlet exit plane were evaluated through numerical analyses of 3D turbulent flow for various inlet shapes and flight conditions. Inlet shape was controlled by changing ramp angle and width of throat, and effects of mass flow rate and angle of attack were investigated.

**Key Words:** Flush 흡입관(Flush Inlet), 압력회수율(Total Pressure Recovery), 유량비(Mass Flow Ratio)

### 1. 서 론

본 연구는 RCS(Radar Cross-Section) 특성을 향상시키기 위해 많이 사용되고 있는 flush 흡입관의 유동특성에 관한 것이다. Flush 흡입관은 기존의 scoop 흡입관의 특징과 달리 동체 외부의 배치에 대한 고려가 필요 없고, 이로 인한 공력 하중 감소로 흡입관 및 관련 구조물의 구조적인 부담이 감소되며, 흡입관으로 인한 항력발산을 제거할 수 있다. 또한 외부로의 돌출물이 없으므로 전방 radar 반사 특성을 최소화시킬 수 있기 때문에 RCS가 감소되어 스텔스 성능이 향상된다[1]. 이와 관련하여 flush 흡입관에 관한 연구가 NACA Ames Aeronautical Research Lab.에서 1940~1950년대에 활발히 진행되었다[2,3].

일반적인 scoop형의 아음속 흡입관과 다르게 NACA flush 흡입관의 특징적인 유동현상은 입구의 측면 벽의 형상에 기인한다. Divergent 형태의 측면 벽은 동체를 따라서 발달하는 경계층의 생성을 국부

적으로 억제시켜서 와류를 발생시킨다. 와류는 높은 운동에너지를 가지는 외부유동을 흡입관으로 유입시켜주고, 흡입관 위 벽면을 따라 생성되는 경계층 바깥의 유동을 경계층 안쪽으로 옮겨주므로 경계층의 발생을 억제시킨다. 유량비가 작으면 와류의 영향이 작아지고, 흡입관 내부 벽면에서의 경계층 두께는 증가하며, 역압력 구배로 인한 유동 박리현상이 발생하여 압력회수율은 낮아지게 된다. 와류만을 고려하면, 와류 코어(core)에서의 공기의 질이 나쁘므로 압력회수율에는 부정적인 효과를 주게 된다. 결과적으로 flush 흡입관의 압력회수율은 와류의 세기와 경계층의 발달정도에 따라 달라지며, 이는 유입 유량비에 좌우된다.

흡입관에 관한 선행연구들은 3차원 문제를 2차원화하여 수치해석을 수행하여왔다. 하지만, 2차원 해석에 의한 계산은 빠른 해석결과를 취득할 수 있는 장점이 있지만, 3차원 효과와 음의 반음각에 대한 효과를 볼 수 없는 단점을 가진다. 특히, flush 흡입관의 경우 앞서 설명한 유동특성을 가지므로 3차원 해석을 통한 흡입관 성능 저하 및 효과를 검토하는 것이 필수적이다. 이를 위해 그림 1과 같이 원통형 동체에 장착된 flush 흡입관의 3차원 수치해석을 수

\*1 정회원, 국방과학연구소

\*2 정회원, 국방과학연구소

\*3 정회원, 국방과학연구소

행하였고, 흡입관 성능에 미치는 여러 가지 인자를 분석함으로써, flush 흡입관 설계를 위한 토대를 마련하고자 한다.

## 2. 수치해석 기법

### 2.1 수치기법

지배방정식은 Reynolds 평균된 완전기체에 대한 압축성 Navier-Stokes(NS) 방정식이며 일반좌표계에서 보존형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial F_j}{\partial \xi_j} = \frac{1}{Re} \frac{\partial G_j}{\partial \xi_j}$$

여기에서  $\mathbf{Q}$ 는 보존량 벡터 ( $\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e$ )이고,  $F_j$ 는 플럭스 벡터를 나타낸다. 정상해를 얻기 위해 내재적 방법인 Beam-Warming의 근사 인수화 방법(approximate factorization algorithm)을 이용했다. 수치해석에서 Pulliam의 대각화 알고리즘(scalar penta-diagonal transformation)을 이용하였으며, 다음과 같은 형태를 띠게 된다.

$$\begin{aligned} (I + \Delta t \delta_\xi A_1^n) \Delta \mathbf{Q}^{**} &= \text{RHS} \\ (I + \Delta t \delta_\eta A_2^n) \Delta \mathbf{Q}^* &= \Delta \mathbf{Q}^{**} \\ (I + \Delta t \delta_\zeta A_3^n) \Delta \mathbf{Q}^n &= \Delta \mathbf{Q}^* \\ \mathbf{Q}^{n+1} &= \mathbf{Q}^n + \Delta \mathbf{Q}^n \end{aligned}$$

여기에서  $A_j$ 는 비점성 플럭스 Jacobian 행렬이다.

RHS는 중심 차분법을 이용한 공간차분화를 시켜 주며, 해의 불안정성을 해소하기 위하여 Jameson 형태의 인공 감쇠항을 사용한다. 난류모델은 Baldwin-Lomax의 대수모델[4]을 적용하였으며 수렴성을 증가시키기 위하여 위치에 따라 다른 시간간격(local time step)을 적용했다.

### 2.2 격자생성

공간격자를 생성하기 위해서 대수적 격자 생성기법을 적용한 CFD-GEOM[5]을 이용하여, 그림 2와 같은 다중블럭 정렬 격자체를 구성하여 주었다. 이때, 흡입관 내부 유동장의 경계층을 포함할 수 있도록 벽면 근처에서 계산에 충분한 격자점을 밀집시켜 주어야 하므로, 흡입관 주위의 외부격자에서 동체로부터 떨어진 첫 번째 격자의 최대 높이는  $y^+ \sim 0.01$  이 되도록 하였다. Flush 흡입관 형태의 경우 흡입

관 측면 벽을 타고 생성되는 와류가 측면으로 유입되는 유량과 관계가 있으므로, 흡입관 주위 외부격자의 첫 격자점의 높이가 수치해석을 수행할 때 중요한 변수가 된다. 최종 격자는 표 1과 같이 630,000여개의 격자점을 가지며, 7개의 블록으로 구성했다.

Table 1 Computational grid

Block	Region	Grid points
1	External	88,218
2	External	88,218
3	External	62,361
4	External	16,400
5	Internal	93,480
6	Internal	150,100
7	Internal	135,564
total		634,341

### 2.3 경계조건 및 초기조건

흡입관 내부의 아음속 유출면에서 경계조건으로는 유량비를 고정시켜주었으며, 외부 유동장의 원방 경계조건으로는 국부적으로 1차원 Riemann 변수를 이용하여 적용하였고, 벽면 경계조건은 단일조건과 점착(no-slip)조건을 이용했다. 흡입관 내부 유동장의 초기조건으로 목조건(throat condition), 즉 목에서의 마하수를 이용하여 초기 유동값을 주었고, 전체 외부 유동장의 초기조건으로는 자유류 조건을 적용하였다.

## 3. 흡입관 유동 해석 결과

흡입관의 기본적인 요구조건은 유동의 속도를 줄이고 압력을 상승시키는 것으로 흡입관 내의 유동의 에너지 손실은 보통 압력회수율(total pressure recovery)이라는 항목으로 나타내게 되며, 전압력의 손실을 일컫는다. 본 연구에서는 flush 흡입관 성능을 압력회수율에 국한하여 다루었으며, 다음과 같이 면적가중 평균치를 사용하여 구하였다.

$$PR = \frac{1}{P_{t\infty} A_{exit}} \int_{exit} P_t dA$$

여기에서  $P_{t\infty}$ 와  $P_t$ 는 각각 자유류와 흡입관 출구에서의 전압력을 나타내며,  $A_{exit}$ 는 흡입관 출구 면적이다.

Flush 흡입관의 ramp 평면 형상은 선행연구[2]에

서 높은 압력회수율을 얻을 수 있는 급은 divergent 형태로 만들었다. 그림 3은 대표적인 ramp의 표면 압력분포를 보여준다. 흡입관 최전방부에서의 압력 구배는 유동이 flush 흡입관 안으로 흡입될 수 있게 도와주며, 서로 반대방향으로 회전하는 와류가 생성되게 한다. 또한 와류의 영향으로 ramp 측면 벽을 따라 압력구배의 변화가 ramp 윗면에서의 변화보다 급하게 되어, 흐름이 흡입관 안쪽으로 흘러감에 따라 ramp 측면 벽으로부터 와류가 박리되어 흡입관 안쪽으로 들어가게 된다. 이처럼 flush 흡입관의 유동은 이차유동(와류)과 역압력 구배에 의한 유동의 박리 및 벽면 경계층과의 상호작용 등 복잡한 유동 현상을 유발하는 3차원 유동이다.

Flush 흡입관 성능에 미치는 여러 가지 매개변수로서 다음 사항에 대해서 검토해 보았다.

- (1) 유량비 (MFR, mass flow ratio)
- (2) 받음각 (angle of attack)
- (3) ramp 각 (ramp angle)
- (4) 목의 종횡비 (throat aspect ratio)

### 3.1 유량비 (MFR, mass flow ratio)

계산은 ramp 각 7도에 대하여 수치계산을 수행하였다. 흡입 유량은 아래 식과 같이 무차원화한 유량비(MFR)로 환산하면, 다음과 같다.

$$MFR = \frac{\dot{m}}{\rho_{\infty} M_{\infty} c_{\infty} A_{th}} = \frac{A_{\infty}}{A_{th}}$$

여기에서  $\dot{m}$ 은 흡입 유량이며,  $\rho_{\infty}$ 와  $M_{\infty}$ ,  $c_{\infty}$ ,  $A_{\infty}$ 는 각각 자유류의 공기밀도와 마하수, 음속, 공역학적 면적(aerodynamic area : 자유류 조건에서 요구된 공기유량이 흘러가는 가상의 면적)이며  $A_{th}$ 는 흡입관의 목단면적이다.

그림 4는 유량비에 따른 압력회수율을 나타낸다. 일반적으로 Flush 흡입관은 유량비가 증가할 때 압력회수율이 증가하는 특성을 보이지만, 유량비 0.89를 넘어 서면 오히려 유입된 와류와 경계층의 상호작용으로 흡입관의 효율이 떨어짐을 볼 수 있으며, 받음각이 1도 일 때보다 5도에서 뚜렷한 경향을 보여주고 있다. 그림 5는 받음각 5도일 때 유량비에 따른 흡입관 출구 단면에서의 전압력 선도이다. 유량비가 0.89를 넘어가면 와류가 경계층 생성을 억제시켜주는 효과보다는 와류 코어(core)에서의 전압력 손실의 효과가 지배적이므로 압력회수율에는 부정적인 효과를 주게 된다.

### 3.2 받음각 (angle of attack)

유량비 0.87, ramp 각 0도일 때, 받음각 -5, -3, 0, 1, 3, 5도에 대해서 해석을 수행하였다. 그림 6으로부터 받음각이 증가함에 따라 압력회수율도 선형에 가깝게 증가함을 알 수 있다. 실제 받음각이 증가함에 따라 유동이 보다 쉽게 흡입관으로 들어오며, 원형 실린더를 따라 유입되는 경계층의 두께가 두껍지 않으므로 보다 높은 에너지를 가지는 유동이 흡입관에 유입된다. 그림 8로부터 이를 확인할 수 있다. 그림 7에서 흡입관 출구에서의 전압력분포를 볼 수 있으며, 받음각이 증가함에 따라 낮은 전압력을 가지는 영역이 작아짐을 알 수 있고, 유선의 패턴은 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 flush 흡입관의 ramp 평면 형상이 동일하면 받음각 변화에 따른 흡입관 출구에서의 와류의 코어 위치 등과 같은 유동 패턴의 변화는 크지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 ramp 각 (ramp angle)

유량비 0.87 조건에서 ramp 각 0도와 7도에 대해 해석을 수행하였으며, 결과는 그림 9와 같다. 그림 10은 ramp 평면 형상과 ramp 윗면을 이루는 곡선을 비교하였다. 동일한 목 단면 형상과 같은 ramp 평면 형상을 가지는 흡입관에서는 ramp 각이 있는 경우 높은 압력회수율을 보여주고 있다.

### 3.4 목의 종횡비 (throat aspect ratio)

유량비 0.89, ramp 각 7도에서 목의 종횡비를 변화시켜주며 해석을 수행하였고, 목의 최대 폭은 흡입관 출구단면의 지름으로 범위를 제한을 해주었다. 그림 11과 그림 12의 받음각 1도와 5도에 대한 해석 결과로부터 목의 단면 형상은, 단면적이 일정하다면 폭이 증가할수록, 유동의 전압 회복에 보다 적합한 사각형상에 가까워지고 결과적으로 흡입관 효율이 증가함을 볼 수 있다. 목의 폭이 증가하면, ramp 평면 형상에서 ramp divergent 각이 증가하게 되며, 이로 인해 강한 와류가 발생되고, 더 빨리 측면 벽으로부터 와류가 떨어지게 된다. 또한 목의 폭이 증가하면, 목의 높이는 낮아지게 되어 ramp 윗면을 따라 발달하는 경계층과 와류와의 간격은 좁아지고, 와류와 경계층간의 간섭은 더 활발히 일어나게 되며, 와류는 경계층의 발달을 지연시킨다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 원통형 동체에 부착되는 flush 흡입관의 성능에 영향을 미치는 주요 매개변수에 대한 연구를 위하여 전산유체역학(CFD)을 이용한 수치해석을 수행하였고, 흡입관 출구 면에서 압력회수율을 계산함으로써 흡입관의 성능을 분석하였다. 해석 결과로부터 flush 흡입관 내부에서의 특징적 유동 형태를 볼 수 있었다. 즉, 흡입관 ramp 윗벽을 따라 성장하는 경계층과 ramp 측면 벽을 따라 생성된 강한 와류의 간섭을 확인 할 수 있었다.

결과적으로 향상된 성능의 flush 흡입관 설계를 위한 설계 인자로는 ramp 각과 목의 중형비임을 flush 흡입관 성능 평가로부터 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Taskinoglu, E. and Knight, D., "Numerical Analysis of Submerged Inlets," AIAA Paper 2002-3147, June 2002.
- [2] Sacks, A.H. and Spreiter, J.R. "Theoretical Investigation of Submerged Inlets at Low Speed," NACA TN-2323, Aug., 1951.
- [3] Mossman, E.A. and Randall, L.M., "An Experimental Investigation of the Design Variables for NACA Submerged Duct Entrances," NACA RM-A7I30, Jan. 1948.
- [4] Baldwin, B.S. and Lomax, H., "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-257, Jan. 1978.
- [5] CFD Research Corporation, Huntsville, AL, *CFD-GEOM User's Manual*, 2002.

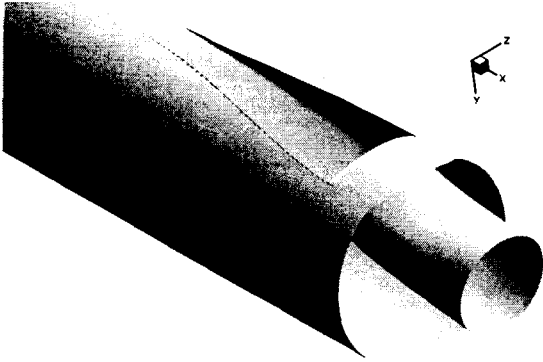


Fig. 1 Geometry of a flush inlet

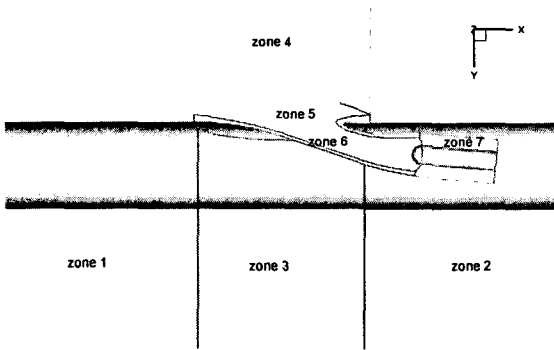


Fig. 2 Flow domain for computational grid

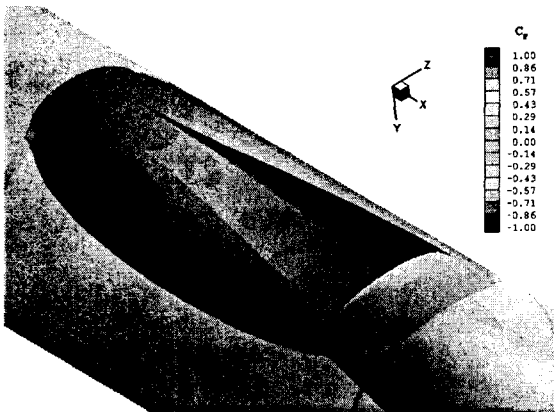


Fig. 3 Pressure coefficient contour ( $\alpha=5.0^\circ$ , MFR=0.87)

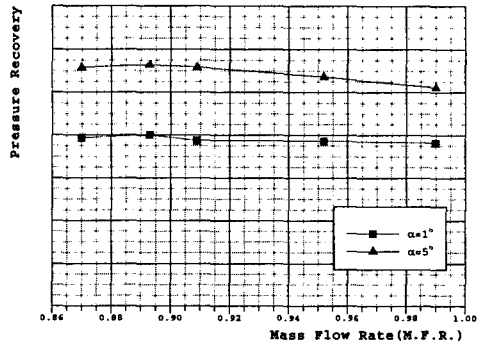


Fig. 4 Pressure recovery at the exit of inlet for each mass flow ratio

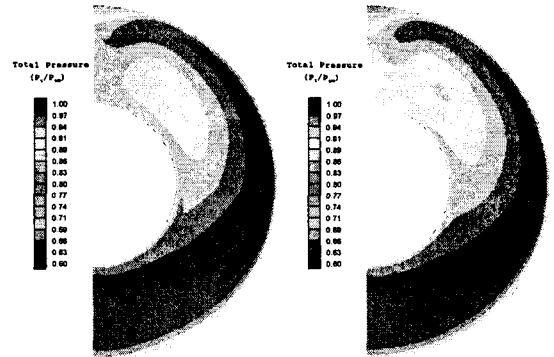


Fig. 5 Comparison of total pressure distribution at the exit plane ( $\alpha=5.0^\circ$ , MFR = 0.89 (left-hand), 0.99 (right-hand))

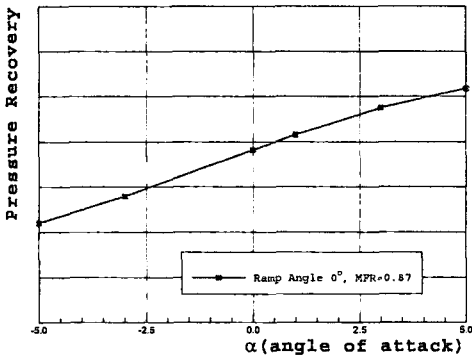
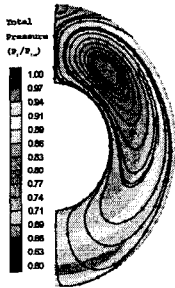
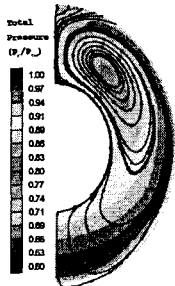


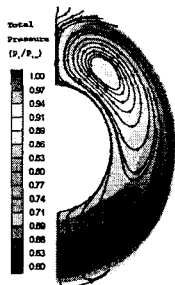
Fig. 6 Pressure recovery at the exit plane for MFR = 0.87



(a)  $\alpha = -5^\circ$

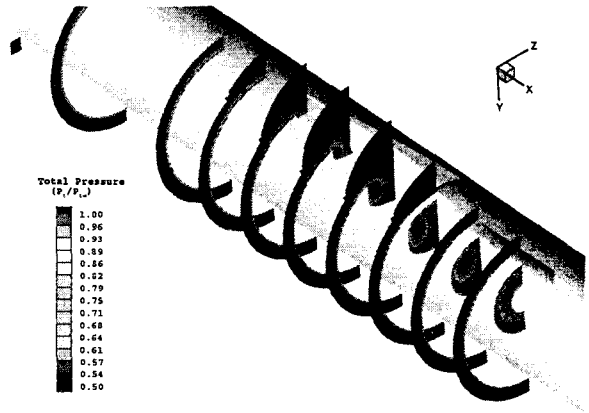


(b)  $\alpha = 0^\circ$

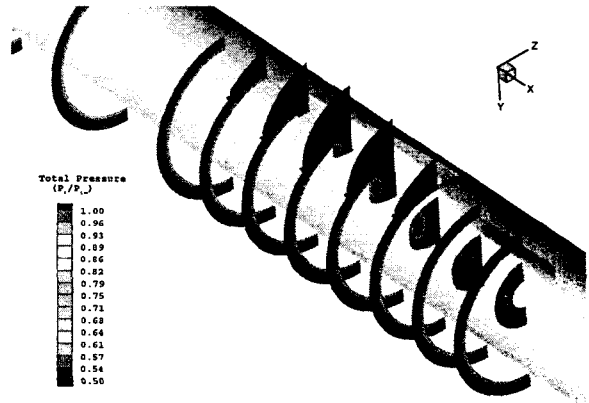


(c)  $\alpha = 5^\circ$

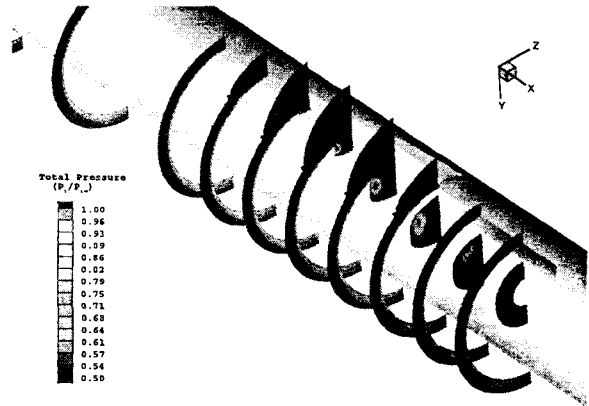
Fig. 7 Comparison of total pressure distributions and streamlines at the exit plane (MFR = 0.87)



(a)  $\alpha = -5.0^\circ$



(b)  $\alpha = 0.0^\circ$



(c)  $\alpha = 5.0^\circ$

Fig. 8 Total pressure contour (MFR = 0.87)

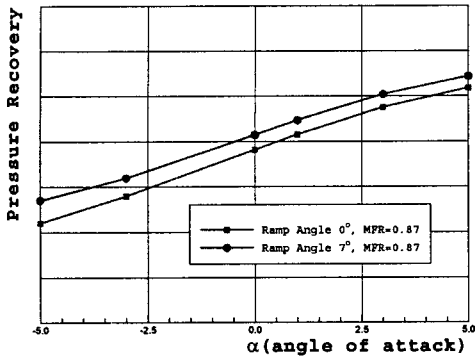


Fig. 9 Pressure recovery for each ramp angle (MFR = 0.87)

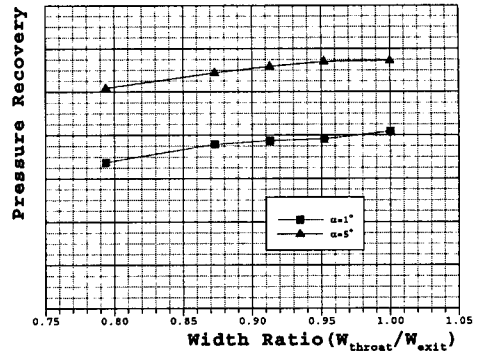


Fig. 11 Pressure recovery at the exit plane as a function of width ratio ( $W_{throat}/W_{exit}$ )

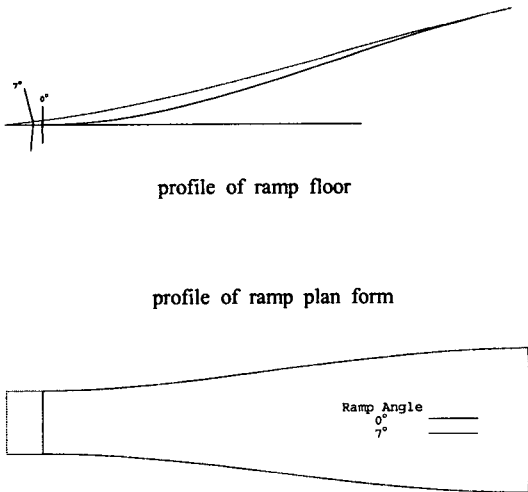


Fig. 10 Geometrical comparison for two ramp angles

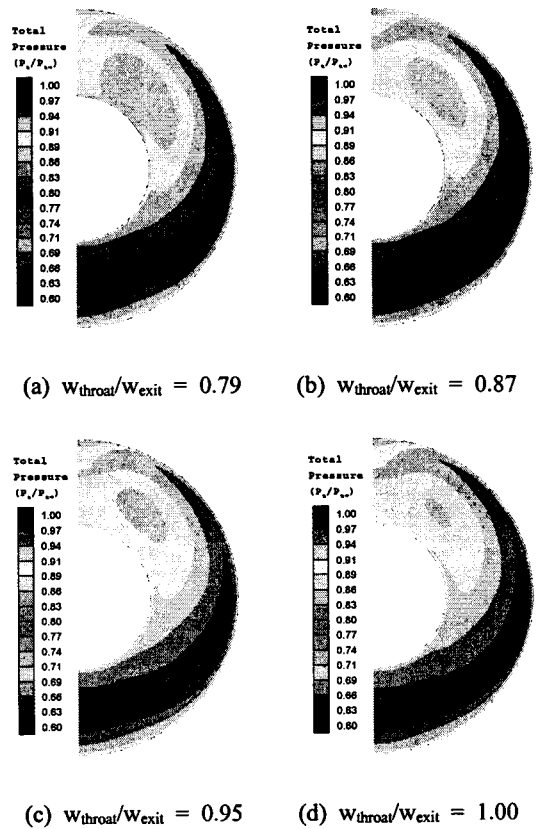


Fig. 12 Comparison of total pressure distribution at the exit plane (MFR = 0.89)