

한가지 확대관에서 경계층리탈과 조종에 대한 연구

최성국, 대기훈

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《기초과학부문을 발전시켜야 나라의 과학기술수준을 빨리 높일수 있고 인민경제 여러 분야에서 나서는 과학기술적문제들을 원만히 풀수 있으며 과학기술을 주체성있게 발전시켜 나갈수 있습니다.》(《김정일선집》 증보판 제10권 485페이지)

우리는 현실에서 많이 제기되고있는 확대관에서의 경계층리탈에 대한 연구를 진행하였다. 일반적으로 경계층리탈은 큰 에네르기손실을 가져오며 확대관은 가스타빈을 비롯한 여러가지 열교환장치들에서 많이 리용되고있다.

선행연구[1]에서는 레널즈수가 $Re = 2 \times 10^4$ 인 실험조건에서 확대관에서의 리탈특성을 연구하였다. 선행연구[2, 4]에서는 확대관에서의 흐름특성을 수값모의방법으로 연구하였고 선행연구[3]에서는 확대관내부의 층류에서 경계층리탈을 줄이기 위한 연구를 진행하였다.

론문에서는 한가지 확대관에서의 경계층리탈과정을 $SSTk-\omega$ 모형을 리용한 수값모의 방법으로 연구하고 리탈을 줄이기 위한 한가지 방법을 제기하였다.

1. 기본방정식

비압축성점성류체에 대한 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (i, j=1, 2) \quad (2)$$

여기서 u_i , x_i 는 속도 및 위치, t 는 시간, p 는 압력, ρ 는 밀도이다. τ_{ij} 는 다음과 같이 표시되는 응력텐소르이다.

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij}, \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

여기서 μ 는 동력학적점성계수, s_{ij} 는 변형속도텐소르이다.

$SSTk-\omega$ 모형의 수송방정식은 다음과 같다.

회리점성

$$\mu_T = \frac{\rho k / \omega}{\max[1, \Omega F_2 / (a_1 \omega)]}, \quad a_1 = 0.31 \quad (4)$$

란류에네르기수송방정식

$$\frac{\overline{Dk}}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_j} - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

비산일수송방정식

$$\frac{\overline{D}\omega}{Dt} = P_\omega - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_2) \frac{\sigma}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (6)$$

여기서

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y^2}, \frac{500 \mu}{\rho \omega y^2} \right) \right] \right\}$$

확대판에서 평균압력회복결수는 다음과 같이 계산된다.[3]

$$\overline{C}_p = \frac{\overline{p}_{\text{출}} - \overline{p}_{\text{입}}}{\frac{1}{2} \rho \overline{u}_{\text{입}}^2} \quad (7)$$

여기서 $\overline{p}_{\text{출}}$ 는 확대부출구에서의 압력, $\overline{p}_{\text{입}}$ 와 $\overline{u}_{\text{입}}$ 는 확대판입구에서의 압력과 속도이다.

확대판의 성능은 다음과 같이 표시되는 효율에 의하여 평가된다.

$$\eta = \frac{\overline{C}_p}{C_{p_{\text{이상}}}} \quad (8)$$

$\overline{C}_{p_{\text{이상}}}$ 는 이상적인 압력회복결수로서 다음과 같이 표시된다.

$$\overline{C}_{p_{\text{이상}}} = 1 - \left(\frac{1}{AR} \right)^2 \quad (AR: \text{확대판출구와 입구에서의 면적비})$$

x 축자름면에서의 평균압력결수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{\overline{p}_x - \overline{p}_{\text{입}}}{\frac{1}{2} \rho \overline{u}_{\text{입}}^2} \quad (9)$$

2. 경계층리탈에 대한 수값모의

선행연구[1]에서는 레널즈수가 $Re = 2 \times 10^4$ 인 실험조건에서 한가지 확대판의 내부흐름에 대하여 연구하였다.(그림 1)

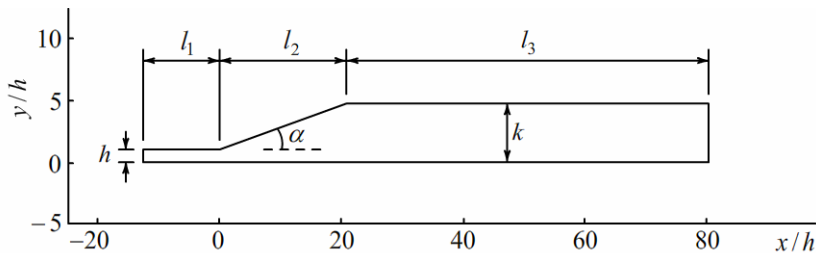


그림 1. 한가지 확대판

확대판의 입구너비는 h , 출구너비는 $4.7h$ 로서 출구와 입구에서의 면적비는 $AR=4.7$ 이다. 확대판의 매 부분의 길이는 각각 $l_1 = 6.5h$, $l_2 = 21h$, $l_3 = 60h$ 이다.

확대판내부흐름을 수값모의방법으로 연구하기 위하여 Ansys Fluent16.1에서 선행연구[1]와 동일한 치수를 가진 기하학적도형에 대하여 그물을 작성하고 계산을 진행하였다.

그물은 벽근방에서 $y^{+1} < 1$ 을 만족시키도록 작성하였다.

류체가 공기인 경우 축대칭, 비정상문제로 설정하고 무차원시간걸음(수값모의에서 시간걸음과 류체립자가 확대관을 통과하는데 걸리는 시간의 비)은

$$\Delta T = \frac{\Delta t}{l/u} = 9.75 \times 10^{-3}$$

으로 설정하였다. 확대관입구와 출구에 대해서는 각각 속도조건과 압력조건을 설정하고 막 흐름모형은 선행연구[2]에 기초하여 SST $k-\omega$ 모형을 설정하였다.

수값모의결과를 통하여 확대관에서의 경계층리탈이 면적이 커지다가 일정해지는 꺾인 부분에서 일어난다는것을 알수 있다.

확대관에서 평균압력계수의 수값모의결과와 실험결과는 큰 차이가 없다.(그림 2) 이것은 수값모의방법이 타당하다는것을 보여준다.

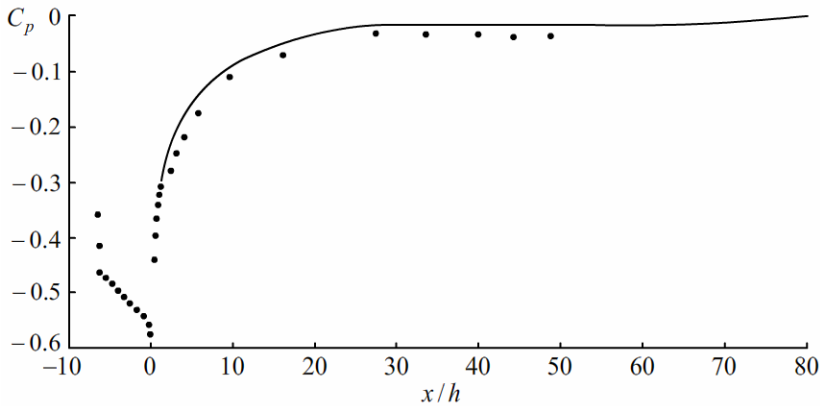


그림 2. 확대관의 평균압력계수
— 수치모의결과, · 실험값

다음으로 레널즈수에 따르는 확대관흐름의 특성을 연구하기 위하여 레널즈수가 4×10^4 , 6×10^4 , 8×10^4 , 1×10^5 인 경우에 수값모의를 진행하였다.

레널즈수에 따르는 평균회복압력계수를 다음의 표에 보여주었다.

표. 레널즈수에 따르는 평균회복압력계수(\bar{C}_p)

Re	2×10^4	4×10^4	6×10^4	8×10^4	1×10^5
\bar{C}_p	0.35	0.42	0.48	0.5	0.5

표에서 보는바와 같이 레널즈수가 커질수록 확대관에서의 효율이 약간씩 커지다가 일정해진다.

3. 경계층리탈조종을 위한 한가지 방법

확대관에서 경계층리탈범위를 줄이기 위하여 경계층리탈이 생기는 벽외부에 구멍들을 형성하는 방법이 널리 이용되고있다. 선행연구[3]에서는 레널즈수가 작은 층흐름이 진행되는 확대관에서 경계층리탈이 생기는 벽외부에 타원모양의 구멍을 형성하면 리탈범위를 줄일수 있다는것을 밝혔다.

론문에서는 경계층리탈이 일어나는 확대판외부에 구멍과 함께 구멍에 련결된 곡선을 형성해주었다.(그림 3) 구멍을 형성해주는 이유는 구멍안에 높은 운동량을 가진 회리들이 생기게 하여 경계층리탈범위를 줄이는데 있다.

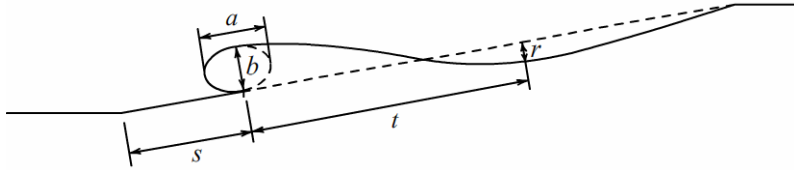


그림 3. 확대판벽에 형성한 구멍

구멍의 기하학적치수는 경계층리탈범위를 타산한데 기초하여

$$\frac{s}{h}=4, \quad \frac{a}{h}=0.2, \quad \frac{b}{h}=0.1, \quad \frac{t}{h}=10, \quad \frac{r}{h}=1$$

로 설정하였다. 그리고 구멍이 없는 확대판의 평균압력계수와 구멍이 있는 확대판의 평균압력계수를 비교해보았다.(그림 4, 5) 그림을 통하여 확대판에 구멍을 형성해주면 경계층의 리탈을 줄여 확대판의 성능을 개선할수 있다는것을 알수 있다.

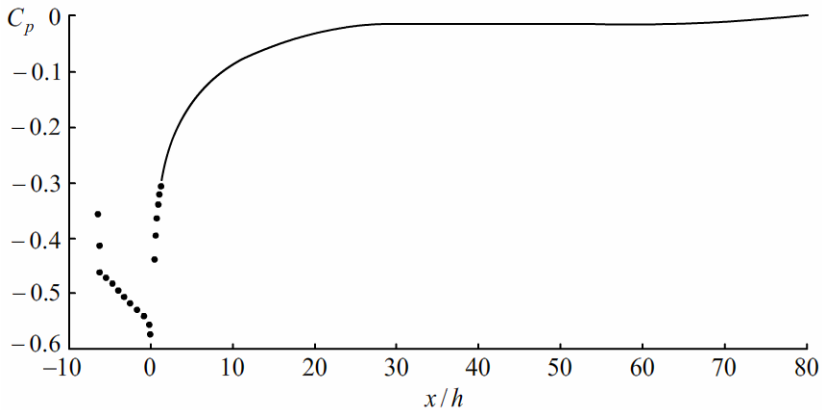


그림 4. 구멍이 없는 확대판의 평균압력계수
— 수값모의결과, · 실험값

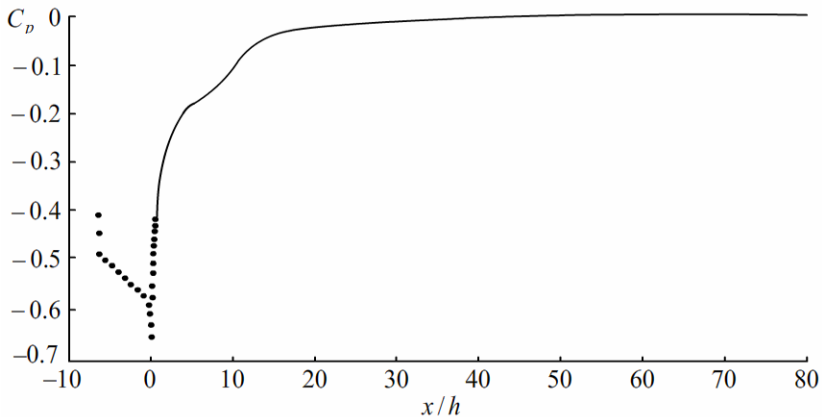


그림 5. 구멍이 있는 확대판의 평균압력계수
— 수값모의결과, · 실험값

맺 는 말

본문에서는 한가지 확대판에서의 경계층리탈과정에 대한 수값모의를 진행하고 리탈을 없애기 위한 조종방법을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. Obi et al.; Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows, Springer, 1, 1993.
- [2] H. Lan et al.; J. Heat Transfer, 130, 112, 2009.
- [3] A. Mariotti et al.; J. Mech., 41, 138, 2013.
- [4] S. M. Behery.; Comput. Fluids, 44, 248, 2011.

주체106(2017)년 12월 5일 원고접수

Separation and Control of Boundary Layer in a Diffuser

Choe Song Guk, Thae Ki Hun

We performed the numerical simulation to decide flow separation of a diffuser and proposed a control method. The result showed a good agreement with performance of a diffuser.

Key words: diffuser, boundary layer