

# 후류가 익렬 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

김형주\* · 조강래\*\* · 주원구\*\*\*

## Study of the Effects of Wakes on Cascade Flow

Hyung-Joo Kim, Kang-Rae Cho and Won-Gu Joo

**Key Words:** Axial Compressor, Cascade, Rotor-Stator Interaction, Wakes, Unsteady, Viscous

### Abstract

This paper is concerned with the viscous interaction between rotor and stator. The viscous interaction is caused by wakes from upstream blades. The rotor cascade in the experiment was composed with five blades, and cylinders were placed to make the stator wakes and their locations were about 50 percent upstream of blade chord. The locations of cylinders were varied in the direction of cascade axis with 0, 12.5, 25, 50, and 75 percent of pitch length. The static pressure distributions on the blade surfaces and the velocity distributions in the cascade flow were measured. From the experimental result it was found that the value of velocity defect by a cylinder wake might vary depending on the wake position within the cascade but the value at the cascade exit approached to some constant value regardless of the difference of wake locus. The momentum defect at the downstream from the cascade and the pressure distribution on the blade surfaces showed that the wake flowing near the blade surfaces caused the decrease of lift and the increase of drag regardless of the disappearance of flow separation.

### 기호설명

- x : 익렬축 방향과 수직 방향 좌표 (전연이 원점)
- y : 익 벽면으로부터의 수직 거리
- z : 익 표면의 위치 (전연이 원점)
- C : 익현장
- Cx : x방향으로의 익현장
- P : 익렬 피치길이
- Cp : 압력 계수 ( $= (p - p_1) / 0.5\rho U^2$ )
- p : 익 표면 정압
- p<sub>1</sub> : 입구 압력
- U : 입구 유속
- U<sub>m</sub> : 측정 단면에서의 평균 유속
- U<sub>0</sub> : 주유동속도

- u<sub>c</sub> : 후류 중심에서의 속도
- u' : 속도 변동
- ρ : 공기 밀도

### 1. 서론

현대의 축류 압축기는 경제적이면서도 높은 효율을 목적으로 보다 작은 간격으로 동익과 정익을 배치하는 추세에 있으므로, 블레이드 간의 간섭이 더욱 중요하게 된다. 블레이드 간의 간섭은 익렬간 상대 운동으로 인한 포테셜 유동장의 변화에 의한 간섭과 전방의 익으로부터 발생하는 후류(wake)에 의한 간섭으로 나누어 질 수 있다. 후류에 의한 간섭은 점성효과에 의한 간섭으로 후방으로 익현장 길이의 1.5배까지 지배적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

지금까지 이러한 전방 익렬에 의해 발생된 후

\* 연세대학교 대학원 기계공학과  
 \*\* 연세대학교 기전공학부  
 \*\*\* 연세대학교 기전공학부

류가 후방 익렬에 주는 영향을 알기 위해 수행된 연구들은 다음과 같다. Fottner<sup>(1)</sup> 등은 압력과 Hot-film 측정을 통해서 익에서의 laminar separation bubble을 연구하였다. Schulte<sup>(2)</sup> 등은 LP turbine의 경계층을 익 표면에 Hot-film을 설치함으로써 측정하였는데, 후류가 재부착(reattachment)을 발생시킴으로 정상 유동 상태에 비해서 형상 손실(profile loss)을 감소시킨다는 결론을 내렸다. Cumpsty<sup>(3)</sup> 등은 경계층 열선을 사용하여 압축기 블레이드의 경계층의 천이 및 발달에 관하여 연구하였다. Lakshminarayana<sup>(4)</sup> 등은 전방 동익 후류가 유동 박리, 공력학적 손실, 이차 유동(secondary flow)과 유로 내부에서의 3차원 속도 성분에 주는 영향을 연구하였다. Gallus<sup>(5)</sup> 등은 열선을 이용하여 동익의 후류가 압축기 익렬 내부의 박리 영역의 발달에 큰 영향을 준다는 사실과 이러한 영향에 의한 간섭을 확인하였다.

본 연구에서는 이상과 같은 후류에 관한 제한적인 연구를 종합적으로 연구하기 위해 NACA 65-0910 익형을 이용하여 후류의 상대적 위치 변화에 따른 익렬 내부 유동장을 측정하여 후류가 익면 압력 분포에 미치는 영향, 익렬 내부에서 후류가 소멸되는 성질 및 손실 메카니즘에 관한 연구를 수행하였고, 경계층을 측정함으로써 후류가 경계층의 천이 및 발달에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

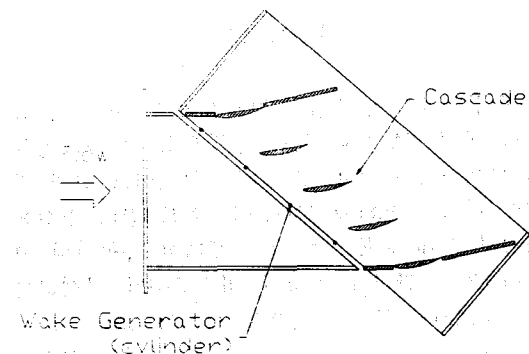


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

본 연구에서 캐스캐이드 실험장치는 Fig. 1과 같이 제작하여 실험하였다. 실험에 사용된 풍동은 취출형(Blow-down type) 풍동이다. 이 풍동 출구의 시험부 단면은 457×457(mm)이며, 실험 조건에서 난류 강도는 0.3% 미만이다. 노즐은 2:1의 축소비로 축소되어 폭 457 mm, 높이 200 mm 인 사각덕트와 연결되어 있다. 이어서 연결된 시험부 덕트는 폭 1050 mm, 높이 200 mm 인 사각형 단면을 가지고 내부에 5개의 익형으로 구성된 익렬을 설치할 수 있도록 설계되었다. 익형은 NACA65-0910으로 익현장 150 mm 이고, 익형의 높이(스팬) 200 mm 이다. 익형의 엇갈림각은 40°, 날개각은 50° 이다. 또한, 익형 간 피치는 177 mm 로 배열되었다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서는 상류 후류의 익렬에의 영향을 보기 위하여 익렬축과 수직전방으로 코드 길이의 50%에 해당하는 75mm 지점에 Fig. 2에서 제시되는 것처럼 전연 전방 위치를 기준으로하여 익 전연에서부터 피치 P의 12.5%, 25%, 50%, 75%, 100%의 위치에 실린더 위치를 바꾸어 위치시키며(후류가 지나가는 레적이 부압면에서 압력면으로의 순서대로 case 1, case 2, case 3, case 4, case 5로 명명한다.) 측정을 하였고, 이 결과를 균일 입구 조건, 즉 전방에 후류가 존재하지 않는 경우와 비교하였다. 실린더의 직경은 균일 유동장에서의 익렬 후류의 운동량 두께(momentum thickness)와 같은 운동량 두께를 갖도록 정하였다. 그 결과로서 실린더의 직경은 3.5mm로 정하였다. 본 실험에 사용되는 익형은 NACA65-0910으로서 설계 입구 유동각(design inlet flow angle)은 49°이며, 이 때의 영각은 10.7° (입사각으로는

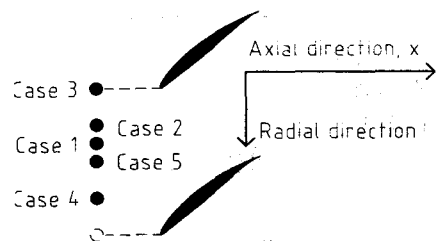


Fig.2 Locations of cylinders

0°)이었다. 본 실험은 설계 유동각에서 실시되었다.

### 2.2.1 익 표면 정압 분포 측정

익 표면 정압 측정은 압력면에 9개의 압력 측정 탭을, 압력의 변화가 심할 것으로 예측되는 부압면에는 더 많은 14개의 정압 측정 탭을 설치하여 수행하였다. 압력 측정에는 Scanivalve Corp.사의 16ch scanivalve가 사용되었다.

### 2.2.2 익릴 내부 유로 유동장 측정

익릴 내부 유동장은 단일 경사 열선을 사용하여 측정하였다. 데이터 획득 속도는 2500 Hz로 설정하고 5,000개의 샘플을 평균 내었다. 익릴 전방의 2개와 익릴 내부의 7개의 익릴축 방향의 단면에서 측정하였고, 익릴 후방에서 4개의 단면에서 3차원 유속을 측정하였다. 익릴 전방과 내부에서의 측정점은 부압면(suction-surface)에서 압력면(pressure-surface)까지 1피치 구간의 20개 점으로 하였고, 익릴 후방에서는 주기성을 확인하기 위하여 1 피치 반의 구간에 대해서 30개 점으로 하였다.

### 2.2.3 익 경계층 속도 측정

경계층 측정에 사용된 센서는 TSI사의 단일 필름 프로우브(single film type probe)를 사용하였고, 박리점이 이동하는 경우를 고려해서 장시간에서의 측정치를 평균할 수 있도록 데이터 획득 속도를 1,000 Hz로 낮추고, 데이터 개수는 두배로 많은 10,000개로 하여 이들을 평균하여 제시하였다.

측정은 프로우브를 익 표면에 밀착시킨 상태에서 측정을 시작하였다. 프로우브가 익 표면과 닿고있는 상태에서는 일정한 출력 값이 유지되다가 떨어지는 순간부터 올바른 측정치가 나타났으므로 이러한 상태에서부터 데이터를 획득하였다.

## 3. 결과 및 고찰

실험 결과 후류의 궤적이 익면과 비교적 멀리

떨어져 지나는 경우인 case 3, case 4의 경우는 익면 압력 분포 및 경계층 속도 분포에서 균일 유동 조건인 case 0의 경우와 거의 유사하게 나타났다. 따라서, 본 장에서는 case 0, case 1, case 2, case 5의 경우에 대해서 측정치를 제시하고 고찰하도록 한다.

### 3.1 익 표면 정압 분포

Fig.3은 후류의 위치에 따라 나타나는 압력 분포를 후류가 없을 때의 것과 비교되어 있다. 압력면에 나타나는 압력분포는 후류의 유무에 따라 큰 변화는 없으나 후류가 익면에 가까울수록, 즉 case 2, case 1, case 5의 순으로 분포상태에는 거의 변함이 없지만 압력의 크기는 약간이지만 작아지고 있다.

한편 부압면측의 압력분포는 후류의 존재로 인해, 그리고 후류의 위치에 따라 압력분포의 형태와 그 값은 압력면의 그들에 비해 변화가 크다. 즉, 압력의 절대치는 후류가 익면을 가까이 지나갈수록, 즉 case 2, case 1, case 5의 순으로 작아지고 있다. 압력면과 부압면 상의 압력분포  $C_p$ 의 차이는 익현에 거의 수직인 힘을 나타내며, 익현에 대한 영각이 10.7°로 크지 않기 때문에 Fig.3에서의  $C_p$ 의 차이에 의한 힘은 양력과 같다고 볼 수 있다. 그러나, 압력 분포가 후연까지 측정되지 않았기 때문에 양력의 크기로 제시할 수는 없으나 양력의 상당부분을 담당하는 익형 80%까지의 압력분포가 거의 균일하게 변화하고 있는

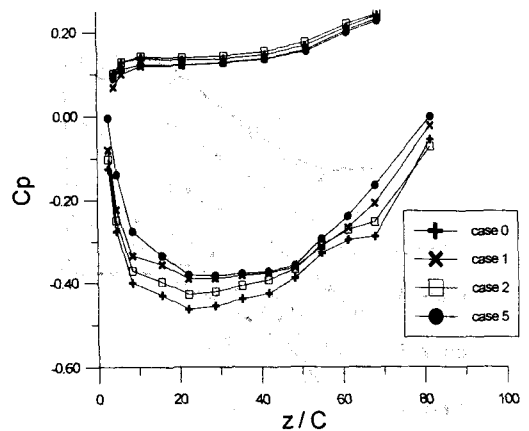


Fig.3 Distributions of blade pressure

것으로 보아 위의 압력분포의 변화는 후류가 존재함으로써 양력을 감소시키고 후류의 통과 위치가 익면에 가까울수록 양력을 크게 감소시킨다고 할 수 있다. 부압면의 압력분포는  $z/C=60\%$  부근에서 후류가 없는 case 0에서 압력 상승이 크게 둔화되고 case 2의 경우도 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나, 후류가 부압면에 보다 접근한 case 1과 후류가 전면에 부딪치고 압력면에 접근해서 지나가는 case 5의 경우 압력회복은 후연으로 향하여 둔화됨이 없이 빠르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 나중에 경계층 부분에서 설명되는 유동박리의 소멸로 인한 것으로 설명될 수 있다.

### 3.2 익렬 내부 유동장

익렬 내부 유로의 유동장을 측정된 결과로서 속도 벡터와 후류의 궤적을 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4에서 보면, 실린더의 위치가 변함에 따라 익렬 내부에서의 후류의 궤적은 굽은 점선으로 표시된 바와 같이 이동함을 알 수 있다.

이렇게 후류의 궤적이 바뀌면서 익렬 내부에서 후류의 강도 또한 변화할 것이다. 후류의 세기는 속도 결손 (velocity defect)에 의해 살필 수 있으며, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{velocity defect} = \frac{U_m - u_c}{U_m} \quad (1)$$

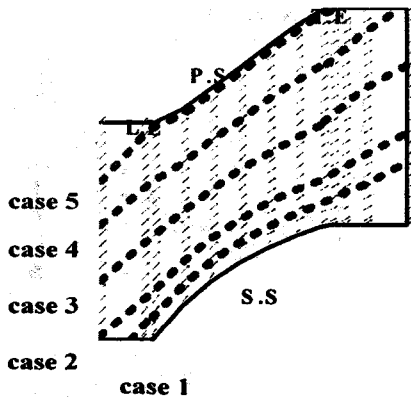


Fig.4 Velocity vector diagram

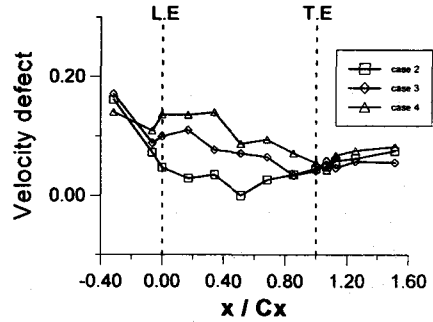


Fig.5 Wake decay characteristics

여기서  $U_m$ 은 측정 단면에서의 속도의 평균이며,  $u_c$ 는 측정 단면에서의 후류의 중심의 속도이다. 익면 부근을 지나는 후류의 경우 후류로서의 형태를 식별하기 어려웠으므로 case 1과 case 5의 속도 결손 분포는 제시할 수 없고 case 2에서 case 4까지의 속도 결손 분포를 제시한 결과 Fig.5와 같다. 실린더 후류가 익 통로 중앙부에서 압력면 쪽을 지나는 후류(case 4)의 경우 익 통로 내에서도 속도 결손량은 비교적 완만하고 균일하게 감소하고 있다고 할 수 있다. 한편 부압면 쪽을 지나실 실린더 후류(case 2)의 경우는 익 통로 중간 위치까지 후류 속도 결손이 크게 감소하면서 중간 이후는 다시 증대하고 익렬 출구에 이르러 실린더의 모든 후류의 속도 결손의 크기는 후류의 경로에 관계없이 거의 일정한 값으로 되고 있다. 이와 같은 익렬 통로 내에서의 속도 결손량의 변화는 유동이 가속되는 곳에서는 작은 속도일수록 크게 가속되고 속도 결손이 감소로 나타나는 점을 고려하면 익 통로내의 속도 분포의 영향을 받은 결과라고 설명될 수 있다. 그 결과 익 통로 출구에서의 균일 유동장에서는 거의 같은 속도 결손량으로 나타난다고 할 수 있다.

다음에 실린더 후류에 의한 익렬 유동의 운동량 손실을 검토한다. 익렬 하류에는 익의 후류와 실린더 후류가 겹치게 되며 case 1과 case 5의 경우 두 개 후류를 구별할 수 없게 된다. 그러므로 평균 유속이 갖는 운동량과 두가지 후류에 의한 유동장이 평균 유출 방향으로 갖는 운동량의 차이, 즉 운동량 결손량  $\Delta\theta_{II}$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta_u &= \int_{i_{min}} \rho \left\{ 1 - \left( \frac{u}{U_m} \right)^2 \right\} dy \\ &= \sum \rho \left\{ 1 - \left( \frac{u}{U_m} \right)^2 \right\} \cdot \Delta y \end{aligned} \quad (2)$$

실린더 후류가 없는 균일 유동 유입일 때의 운동량 결손량을  $(\Delta\theta_u)_0$ 라고 하면, 상류쪽의 실린더 후류로 인한 운동량 결손량의  $(\Delta\theta_u)_0$ 에 대한 비  $\Delta\theta_u / (\Delta\theta_u)_0$ 는 Fig.6과 같다. 실린더 후류가 부압면 가까이를 지나는 case 1의 경우에는 균일 유입 유동의 경우에 비해 운동량 결손이 약 2.7배로 나타나고 있다. 이것은 실린더 후류로 인해 평균 유출 방향으로 익 항력이 2.7배로 증대함을 의미한다. 그러나 case 2와 case 3의 경우는 거의 1과 같고 case 4, case 5와 같이 압력면에 접근함에 따라 익 항력은 1.2배, 1.4배로 증대한다. 이상으로 익릴 상류의 실린더 후류가 익면 가까이를 지나갈수록, 특히 부압면 쪽을 지나가는 경우 유동손실, 즉 항력이 크게 나타남을 알 수 있다.

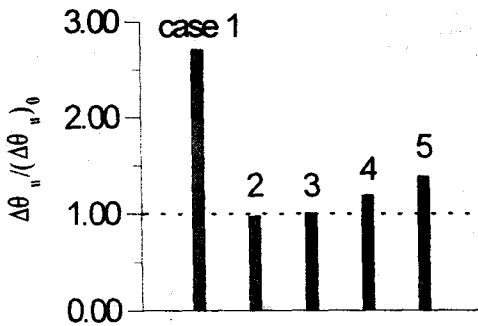
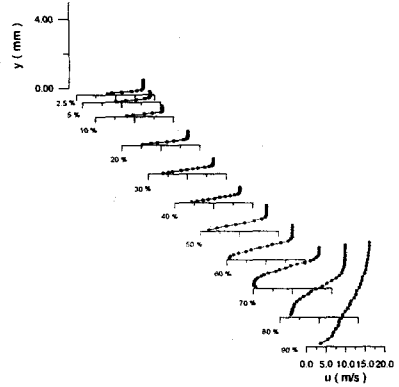


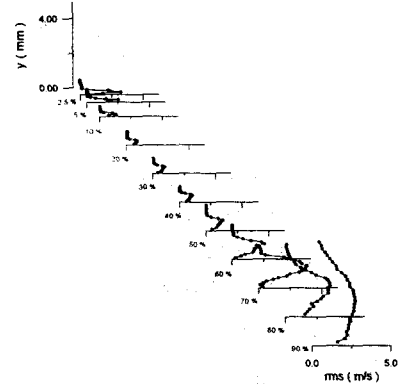
Fig.6 Momentum defect at x/Cx=1.5

### 3.3 익 표면 경계층

Fig. 7은 균일유동인 경우(case 0)에 익 표면에서의 속도 분포 및 속도변동(RMS)을 표시 하였다. 익 표면을 지날수록 경계층 두께가 증가하며, 난류 강도의 척도가 될 수 있는 속도변동이 익 후연으로 갈수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 익 후방으로 갈수록 난류 성분이 강해진다는 사실을 의미한다. 그리고, 익 전연에



(a) Velocity profile (case 0)

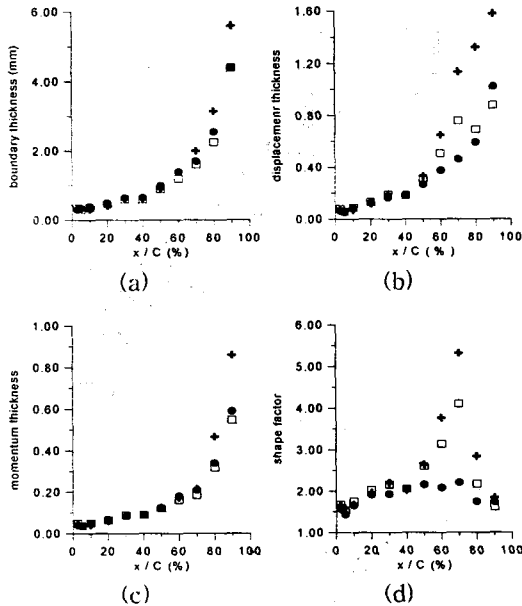


(b) Velocity fluctuation (case 0)

Fig.7 Velocity profile and fluctuation (case 0) along suction surface

서 약 60%와 70%의 부압면에서는 속도 프로파일로 미루어 볼 때, 박리가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이는 익 표면 정압 분포의 결과와 부합한다고 할 수 있다. 또한, 약 80%와 90% 지점에서는 벽 근처 부근에서 속도 프로파일이 상대적으로 일그러진 형상을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 박리가 일어난 후, 벽 근처에서 역류가 발생하고 있으나 열선의 특성 상 이러한 역류를 측정하지 못 함으로 생기는 결과라고 생각할 수 있다.

Fig.8은 부압면 경계층에 대해서 경계층 두께, 배제 두께, 운동량 두께와 형상계수를 계산한 결과이다. 경계층 두께를 보면, 익현장의 약 60%까지는 3가지의 후류에 대한 값이 비슷함을 볼 수 있으나, 이후부터는 박리가 발생하는 case 0의 경



(a) : boundary thickness  
 (b) : displacement thickness  
 (c) : momentum thickness  
 (d) : shape factor  
 ( +:case 0, □:case 2, ●:case 5 )

Fig.8 Boundary layer characteristics

우에 박리가 발생하지 않는 case 2와 case 5의 경우보다 더 큰 경계층 두께를 갖음을 알 수 있다. 배제 두께를 보면, case 0의 경우에 익현장의 약 50%부터 급격히 커지게 됨을 알 수 있으며, case 2에서 보이는 불균일점은 속도 프로파일로 미루어 보건대 약 60%에서 박리가 생긴 후의 재부착에 의해 생기는 것이라고 설명될 수 있다. 이것은 형상 계수(배제 두께/운동량 두께)에 의해 설명할 수 있다. 박리가 발생할 것으로 예상되는 약 60%에서 형상계수가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 박리가 발생하지 않는 case 5의 경우에는 형상계수가 낮은 값으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. case 2의 경우는 박리로 인해 형상계수가 증대하다가 재부착함으로써 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 익현장의 40% 지점에서의 속도 프로파일과 속도 변동을 보여준다. 속도 프로파일에 있어서 4가지 후류위치에 있어서 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나, 속도변동에 있어서 후류가

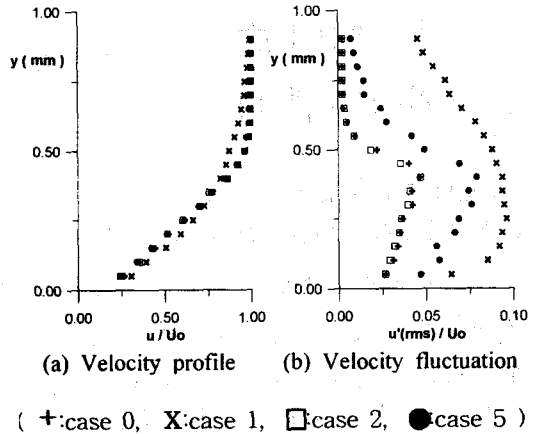


Fig.9 Velocity profile and fluctuation along the suction surface at 40 % chord length

익 부압면을 따라 유동되어가는 case 1과 익 전연에 충돌하는 case 5에서는 다른 경우와 비교해서 더 큰 속도 변동을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 case 1과 case 5의 경우에 높은 난류 강도를 가진 후류가 익 표면에 부딪히면서 익 전연에서부터 난류 성분이 강해져서 부압면에 따른 유동에 높은 속도변동을 보이는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 익현장의 70%되는 지점에서의 속도 분포 및 속도변동이다. 이 점에서는 이미 case 0과 case 2의 경우 박리가 발생하고 있음을 알 수 있다. 박리가 일어나지 않는 case 1과 case 5의 경계층 내의 하부영역에서의 속도 변동은 박리가

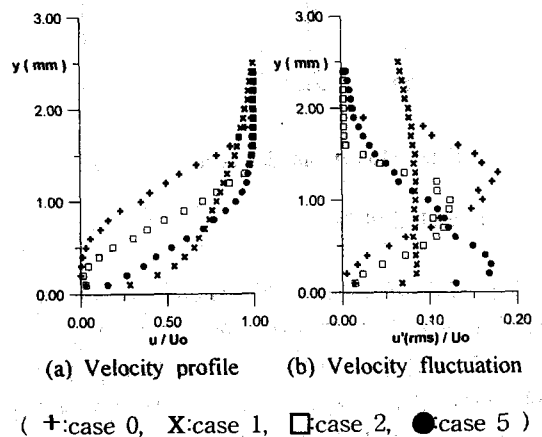


Fig.10 Velocity profile and fluctuation along the suction surface at 70 % chord length

일어나는 경우보다 크고 경계층 내의 상부 영역에서는 역전되어 박리가 일어나는 경우의 속도변동이 크게 나타나고 있다. 이와 같은 변동속도의 분포는 박리의 억제와 발생을 설명하고 있다고 본다. 그러므로, 강한 난류 성분을 지닌 후류가 익 경계층 가까이를 지나는 경우에 case 1과 case 5처럼 박리가 억제 또는 지연될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

실린더 후류가 정지 익렬의 상류 쪽에서 그 상대 위치를 달리하여 통과함으로써 익렬 익에 미치는 영향은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 실린더 후류가 익렬의 표면과 비교적 멀리 떨어져(case 2, 3, 4) 통과하는 경우 익면 상의 압력 분포 및 경계층 거동에는 변함이 없고 실린더 후류가 없는 균일 유동의 경우와 유사하다.

2. 익렬 익면과 멀리 떨어져 지나가는 후류 중에서 익 부압면 쪽일수록 익렬통로 내의 속도 분포의 영향을 크게 받아 후류의 속도 결손의 크기는 크게 변화하지만 익렬 출구에서는 후류의 경로에 관계없이 거의 같은 크기를 가진다.

3. 익렬 익면 가까이를 지나가는 실린더 후류의 경우 익면에 가까운 실린더 후류일수록 익렬 익의 양력을 감소시키며 특히, 부압면에 가까운 후류일수록 익렬 익의 항력을 급격히 증대시킨다.

4. 실린더 후류가 익면 가까이를 지나가는 경우 경계층 하부층의 속도 변동을 증대시키고 유동박리를 억제 또는 지연시키는 효과가 있다. 그러나 실린더 후류로 인해 박리가 억제되었다고 하여 익렬 익의 양력 및 항력은 익면에서 멀리 통과하는 실린더 후류의 경우보다 좋아지지 않는다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단 특정연구 과제(98-0200-13-01-3)로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

립니다.

#### 참고문헌

- (1) L. Fottner, 1995, "The Effect of Incoming Wakes on Boundary Layer Transition of a Highly Loaded Turbine Cascade", AGARD, CP-571
- (2) V. Schulte, H. P. Hodson, 1998, "Unsteady Wake-Induced Boundary Layer Transition in High Lift LP Turbines", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 120, pp. 28~35
- (3) N. A. Cumpsty, 1990, "Compressor Blade Boundary Layers", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 112, pp. 222~240
- (4) B. Lakshminarayana, 1990, "Three-Dimensional Separated Flow Field in the Endwall Region of an Annular Compressor Cascade in the Presence of Rotor-Stator Interaction", Vol. 112, pp. 669~690
- (5) H. E. Gallus, 1991, "Three-Dimensional Wake Decay Inside of a Compressor Cascade and Its Influence on the Downstream Unsteady Flow Field", Vol. 113, pp. 180~197