

축류압축기 회전익 후방의 허브부근에서 후류의 특성*

정의준
기계공학과

<요 약>

축류압축기 회전익의 후방유동장을 45° 단일경사열선을 이용하여 측정하였고 특히 회전익 후방유동중 허브부근의 후류특성을 절현비에 따라 제시하였다.

유동장은 회전익으로부터 회전에너지 받기 때문에 회전익이 회전하는 방향으로 회전하며 스패(span)의 중간위치에서 후류의 중심들은 익현방향과 거의 일치한다. 또한 허브부근에서 후류의 중심들은 절현비가 큰 경우 회전하는 방향으로 편향되어 나타나고 있으나 절현비가 작은 경우에는 회전익의 회전방향과 반대방향으로 편향되어 나타나는데 이는 후류의 경계와 결합된 와류 때문인 것으로 보여진다. 이러한 사실은 절현비가 큰 경우 말발굽와류, 코너와류 그리고 후류가 뚜렷이 구별되어 나타나고 있으나 절현비가 작은 경우 이러한 와류들과 후류는 서로 결합되어 새로운 와류를 형성하는 것으로부터 알 수 있다. 이러한 효과는 스패의 $r/r_0 = 0.718$ 이상에서 사라진다.

THE CHARACTERISTICS OF THE WAKE NEAR THE HUB BEHIND AN AXIAL COMPRESSOR ROTOR

Wui Jun Chung
Dept. of Mechanical Engineering

<Abstract>

Measurement was made of the flow behind the rotor of a compressor by using a 45-degree-slanted hot wire. The characteristics of the wake near the hub flow behind the

* 이 논문은 1996년 울산대학교 대학연구비에 의해 이루어진 연구결과임

rotor are investigated by the change of the pitch-chord ratio.

The flow field rotors in rotational direction because of the field accepting the energy from a rotor. The trace of the wake center in the mid-span region almost lies on an extended line in the chord-wise direction, irrespective of pitch-chord ratios. In the hub region, the wake center is shifted toward the rotational direction in the case of large pitch-chord ratio but it is shifted toward the anti-rotational direction in the case of small one because of the vortex mixing with the boundaries of the wake. Also Near the hub region the horse shoe vortex, the corner vortex and the wake appear clearly in the large pitch-chord ratio, but in the small pitch chord ratio these vortices and the wake are combined and form a new vortex. This effect disappears in the upper region from the $r/r_o = 0.718$.

1. 서 론

축류압축기 회전익 내의 유동통로는 허브와 케이싱으로 인한 환상형과 3 차원 형상을 한 회전익에 의하여 복잡한 구조로 되어있다. 그러므로 회전익을 통과하는 유동은 3 차원 유동통로, 원심력, 코리올리 힘과 익 간극에 의한 누설유동으로 인하여 더욱 더 복잡하게 된다.

압축기의 효율과 성능을 향상시킨다는 관점에서 회전익 후방 유동장을 이해한다는 것은 매우 중요하다. 후방유동장 중 허브부근에서는 말발굽와류, 코너와류 및 후류가 혼합하여 대단히 복잡한 2차 유동을 형성한다. 그러므로 후방유동장을 해석하기 위해서는 먼저 복잡한 허브부근의 유동을 이해하여야 한다.

이와같은 관점에서 회전익 후방의 허브부근의 유동장을 후류를 통해 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 측정장치

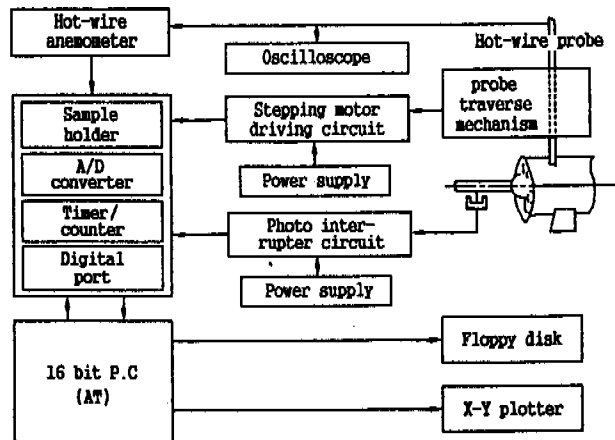


Fig.1 Schematic diagram of the measuring system

경사열선 풍속계로 회전역 후방의 회전하는 유동장을 측정하였다. 유동장에서 3차원 속도성분에 대한 측정장치는 그림 1과 같이 두개의 부분으로 되어있다.

첫번째 부분은 퍼스널 컴퓨터로 제어되는 모터에 의한 이동장치이며 이 이동장치는 프로브를 회전시키며 또한 축방향, 반경방향으로 이송시킬 수 있다. 두번째 부분은 열선풍속계의 아날로그 신호를 받아들여 디지털 신호로 변환시켜서 퍼스널 컴퓨터 보조기억장치에 저장하는 데이터 처리장치이다.

측정방법은 열선을 장착한 프로브를 측정위치까지 이동시킨후 퍼스널 컴퓨터는 팜 단속기 역할을 하는 디스크에 의해 광선의 차단을 감지하고 광선이 차단되는 동안 데이터를 받아들여 샘플링 홀더를 거쳐 A/D 변환기로 보내며 이곳에서 아날로그 데이터를 디지털 신호로 바꾼다. 계산방법은 앞서 얻은 데이터로 열선의 검정장치에서 얻어진 출력과 유체 속도의 관계로 부터 유동장의 3 차원 속도 성분을 구한다. 경사열선으로 회전하는 유동장의 측정방법, 계산방법 및 열선의 검정방법은 조강래,정의준⁽³⁾에서 자세히 소개하였다.

회전의 후방유동장을 주기적이라고 가정할 수 있으므로 열선풍속계의 반복된 출력은 평균하여 사용하였다. A/D 변환기의 샘플링 주파수는 45 kHz로 고정시켰으며 이같은 주파수로 90개의 데이터를 얻었다. 프로브가 한 방향에서 얻은 평균값은 500번 반복된 출력의 평균값이다.

2-2. 실험장치

실험용 압축기는 2단으로 되어있다. 실험을 위하여 제 1단의 회전익수를 8개 혹은 24개로 하였고 제 2단은 유동을 일으키기 위해 설치하였다. 또한 유량조절은 압축기 관 끝에 설치한 댐퍼로 하였다. 익은 NACA 65-계열이며 익현길이(C):60mm, 익 두께:10%, 스펜:104mm, 익 간극:2.3mm 이다. 압축기의 개략도 및 익 형상은 조강래, 정의준⁽³⁾에 제시하였다.

2-3. 실험방법

익의 회전속도는 1380rpm이고 측정되는 유동단면은 축방향으로 $z/C = 0.083$ 부터 $z/C = 0.075$ 까지이며 각 단면의 측정은 설계영각($\alpha = 10.7^\circ$)에서 익현비가 변화하는 경우에 수행하였다.

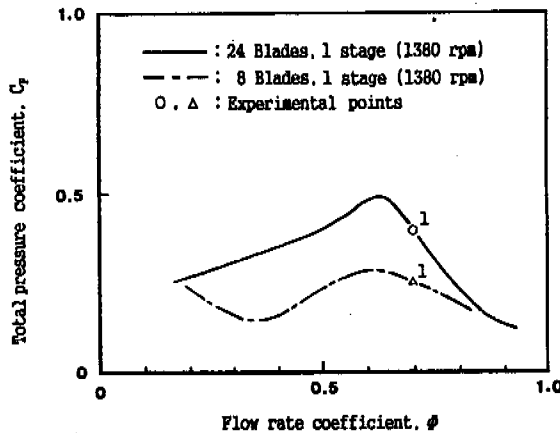


Fig.2 Performance curves of the experimental compressor

그림 2에서 표시된 점선 및 실선은 익현비 $t/C = 0.90$ 혹은 $t/C = 2.71$ 일 경우 제 1단의 회전익에 대한 성능곡선이며 점 1은 각 익현비에서 설계점을 나타낸다.

축방향에 수직인 각 측정단면은 반경방향으로 18개점 원주방향으로 90개점으로 구성되어 있으며 원주방향 90개점은 1피치 보다 조금 큰 구간에 대한 샘플링 데이터 갯수다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 3차원 속도성분

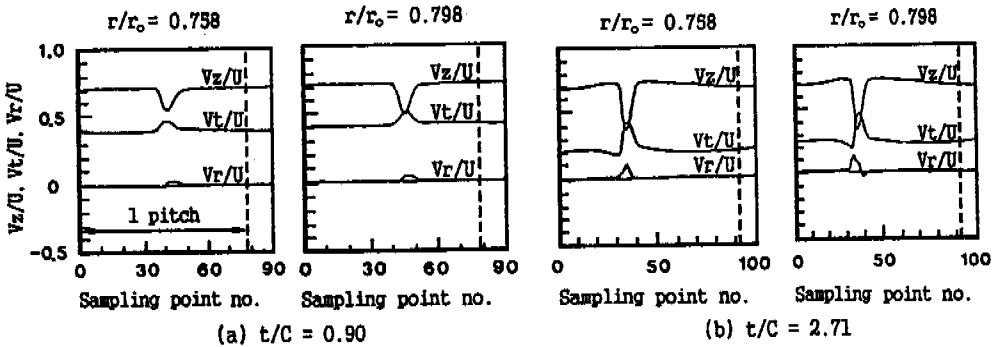


Fig.3 Distributions of velocity components near mid span region with pitch-chord ratio at $z/C = 0.083$ under design attack angle ($\alpha = 10.7^\circ$)

그림 3(a,b) 및 그림 4(a,b)는 절현비를 변화시키는 경우에 설계영각($\alpha = 10.7^\circ$)에서 첫번째 측정단면($z/C = 0.083$) 중 익 중간부분 및 허브의 3차원 속도분포를 나타내고 있다.

익 중간부분에서 대표적인 속도분포를 나타내는 그림 3(a,b)에서 축방향 속도(V_z)가 갑자기 감소하는 부분이 후류이다. 이 후류의 중심을 기준으로 좌, 우가 각각 압력부, 부압부이다. 이 그림으로부터 익 중앙에서 후류의 압력부와 부압부는 거의 대칭을 이루고 있다.

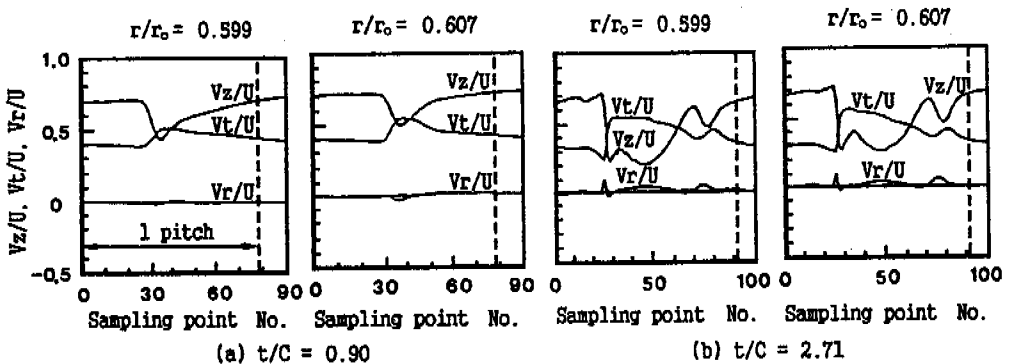


Fig.4 Distributions of velocity components near hub region with pitch-chord ratio at $z/C = 0.083$ under design attack angle ($\alpha = 10.7^\circ$)

그림 4(a,b)는 허브근처의 대표적인 3차원 속도분포이다. 이 그림에서 후류중심을 기준으로 한 압력부 및 부압부는 비 대칭 모양을 보여주고 있다. 특히 절현비 $t/C=0.90$ 인 그림 4(a)는 비대칭 정도가 심하다. 익현비 $t/C=2.71$ 을 나타내는 그림 4(b)에서 V_z 는 후류의 부압부쪽으로 넓은 영역에 걸쳐 작아졌다가 커지며 앞서보다 크기는 적지만 다시 작아졌다가 커진다. Inoue⁽¹⁾ 와 Lakshi- minarayana⁽²⁾은 전자를 코너와류, 후자를 말발굽와류라고 설명하였다.

3-2. 후류중심의 상대위치

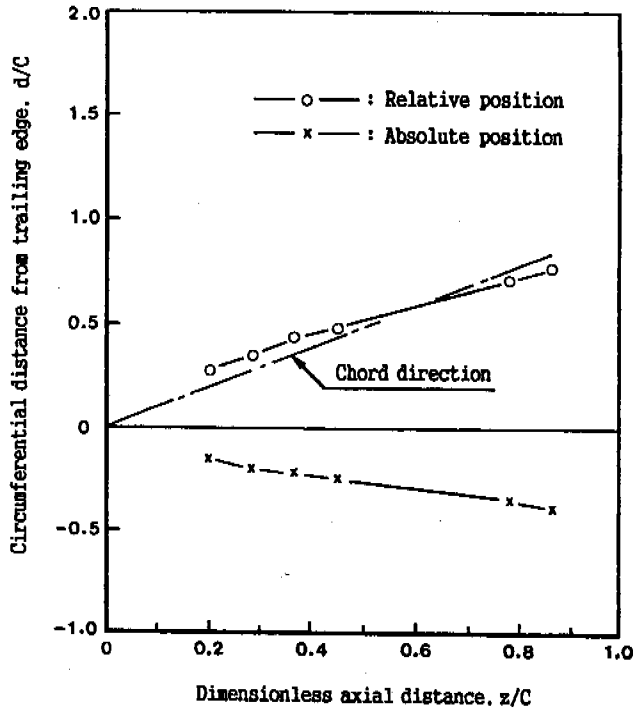


Fig.5 Circumferential relative and absolute positions of wake center with axial distance at $r/r_0 = 0.972$ under design attack angle ($\alpha = 10.7^\circ$) for $t/C = 0.90$ (Positive values of d/C corresponding to anti- rotational direction)

그림 5는 반경위치 $r/r_0 = 0.972$ 에서 후류중심의 절대위치와 상대위치를 나타낸다. 후류중심의 절대위치가 축방향으로 음의 속도성분을 나타낸다는 사실은 후류는 축방향으로 진행함과 동시에 익의 회전방향의 속도성분을 갖는다는 것을 의미한다. 이것으로부터 유추해 보면 회전의 후방의 전 유동은 축방향으로 진행됨과 동시에 익의 회전방향으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 회전이 유체에 원주방향의 속도성분으로 표시되는 에너지를 주고있다는 사실을 확인시켜 주는 것이며 이러한 결과는 타당하다.

그림 6 및 그림 7은 각각 2개의 익현비에 대하여 후류중심의 상대위치에 대한 궤적을 축방향으로 나타내고 있다.

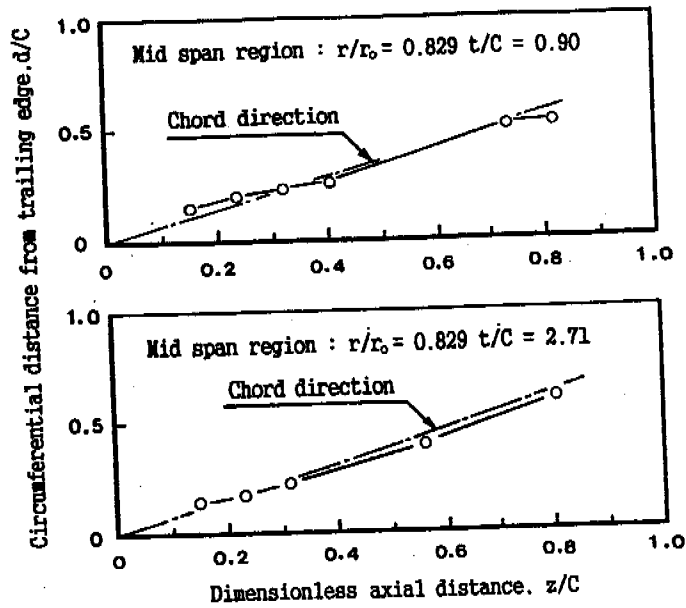


Fig.6 Circumferential relative positions of wake center with axial distance at mid span region under design attack angle ($\alpha = 10.7^\circ$) (Positive values of d/C corresponding to anti-rotational direction)

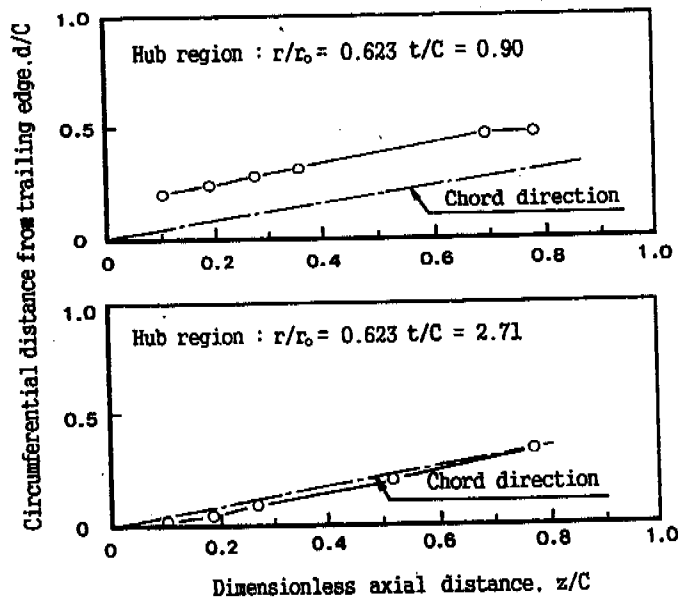


Fig.7 Circumferential relative positions of wake center with axial distance near hub region under design attack angle ($\alpha = 10.7^\circ$) (Positive values of d/C corresponding to anti-rotational direction)

그림 6인 의 중앙 부근에서는 후류중심의 상대위치 궤적은 익현비에 관계없이 익현의 연장선과 일치한다. 그러므로 설계유량에서 유동은 익현비에 관계없이 설계조건과 같이 나타난다. 허브부근의 유동상태를 나타내는 그림 7에서 익현비 $t/C = 2.71$ 의 후류중심에 대한 상대궤적은 익현방향의 연장선과 거의 일치한다. 이것 역시 설계유량에서 유동은 설계조건대로 됨을 보여주고 있다. 그러나 익현비 $t/C = 0.90$ 에서 후류중심의 상대궤적은 익현방향의 연장선과 일치하지 않고 익의 반 회전방향으로 평행하게 편향되어 나타난다. 이렇게 나타나는 이유에 대해서는 다음부분의 그림 8을 통해 설명하고자 한다.

3-3. 허브근처의 후류

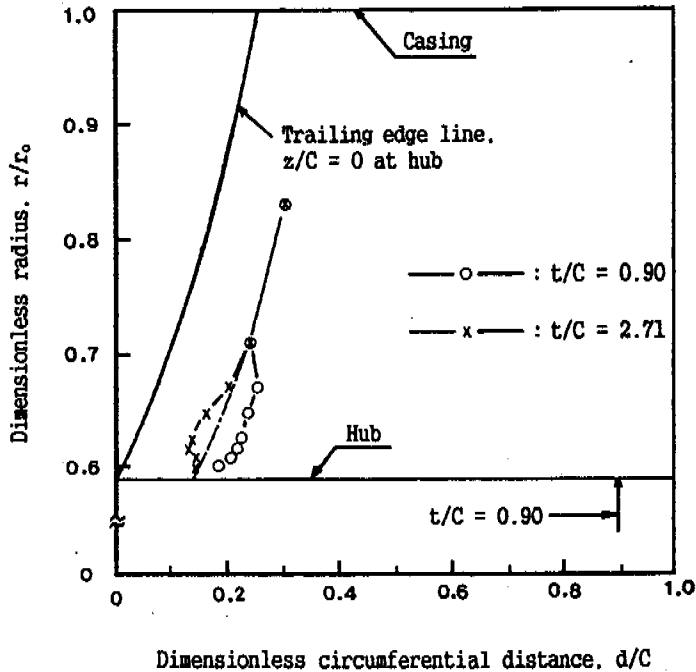


Fig.8 Radial and circumferential positions of wake center at axial distance $z/C = 0.083$

허브영역에서 익현비가 큰($t/C=2.71$) 경우 코너와류, 말발굽와류 및 후류는 잘 구별된다. 그러나 익현비가 작은($t/C=0.90$) 경우 이러한 와류들과 후류는 구별되지 않고 다만 후류의 부압부 쪽 경계층이 압력부쪽 경계층 보다 두텁게 나타나고 있다. 후류 중심의 궤적은 $t/C=0.90$ 일 경우 $t/C=2.71$ 일 경우에 익의 회전방향으로 조금 편향된 경우보다 훨씬 많이 익의 반 회전방향으로 편향되어 있다. 이와같은 사실은 앞부분에서 이미 지적하였다.

그림 4에서 V_z 가 갑자기 감소한 영역의 최소점을 후류의 중심이라고 간주한다. 측정단면 $z/C=0.083$ 에서 2개의 익현비의 경우에 대하여 후류의 중심위치를 후연을 따라 그림 8에 표시하였다. 이 그림으로부터 반경위치가 $r/r_0 = 0.718$ 보다 큰 경우에는 후류중심이 익현비에 관계없이 후연선에 평행하게 나타난다. 그러나 반경위치가 $r/r_0 = 0.718$ 보다 적은 경우에는 익현비가 $t/C = 2.71$ 일 경우에 후류중심선은 후연선에 평행한 선으로 부터 익의 회전방향으로 벗어난다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명 될 수 있다. 후류영역에서 후류의 압력부쪽에 발생한 후속와류는 압력부의 경계층과 혼합되며 이런 혼합현상의 결과로 후류의 압력부 경계층내에 V_z 의 최

소값이 나타나며 이 최소값이 마치 후류의 중심인 것 처럼 보인다. $t/C = 2.71$ 일 경우 후류의 중심선이 익의 회전방향으로 편향되는데 반하여 익현비가 $t/C = 0.90$ 일 경우에는 이 중심선이 익의 반 회전방향으로 편향된다. 이 현상을 설명하면 말발굽 와류 및 코너와류는 회전방향이 같으며 두개의 와류들은 서로 접근하여 하나의 새로운 유동장을 형성한다. 새로운 와류는 후류 중심의 본래 위치에 가까운 위치에 나타나서 후류의 부압부와 결합한다. 마침내 결합된 2차유동의 중심이 본래 후류의 부압부에 나타나고 이것이 마치 후류중심인 것처럼 되며 그 결과 그 평행선으로 부터 편심된다. 새로운 와류가 후류의 부압부와 결합하는 이유는 똑 같은 유량에서 익현비가 적을수록 압력부와 부압부의 압력차는 커진다. 그러므로 2개의 와류가 결합하여 생긴 새로운 와류는 바로 이웃하는 압력부쪽으로부터 부압부쪽으로 익현비 $t/C = 0.90$ 경우가 익현비 $t/C = 2.71$ 경우보다 빨리 접근하기 때문이다.

4. 결 론

축류압축기를 설계영역에서 운전할때 익현비의 변화에 따라 회전익 후방유동에서 허브부근의 후류중심에 대한 궤적을 관찰하면 다음과 같다.

- 1) 회전익 후방유동은 회전익으로부터 에너지를 받기 때문에 익의 회전방향으로 회전한다.
- 2) 익 중앙부근에서 후류중심의 상대위치는 익현비에 관계없이 익현방향과 일치한다. 그러나 허브부근에서 후류중심의 상대위치는 후류의 경계층과 결합하기 때문에 익현방향을 기준으로 하여 익현비가 큰($t/C=2.71$) 경우 익의 회전방향으로, 익현비가 작은($t/C=0.90$) 경우 반 회전방향으로 편향된다.
- 3) 허브부근에서 말발굽와류, 코너와류 및 후류는 익현비가 큰($t/C=2.71$) 경우에는 분명히 나타나 익현비가 작은($t/C=0.90$) 경우 이 와류들과 후류는 서로 결합하여 하나의 새로운 와류를 형성한다. 이러한 효과는 반경위치 $r/r_0 = 0.718$ 보다 큰 영역에서는 사라진다.

NOMENCLATURE

C	: Blade chord length
C_p	: Total pressure rise coefficients
d	: Circumferential distance from trailing edge
r	: Radius
r_0	: Radius of blade tip
t	: Blade pitch
U	: Peripheral speed of blade at tip
V	: Absolute velocity behind a rotor
V_r, V_θ, V_z	: Velocity components in r, θ , z direction of absolute velocity

- z : Axial distance from trailing edge of the rotor
 ϕ : Flow rate coefficient
 α : Attack angle at mid-span

REFERENCES

1. Inoue, m., et al., "Three-Dimensional Structure and Decay of Vorticity Behind an Axial Flow Rotating Blade Row," ASME, J. of Eng. for Gas Turbine and power, Vol. 106, July 1984, pp. 561-568.
2. Davino, R. M., Lashminarayana, B., "Characteristics of Mean Velocity in the Tip Region of Turbomachinery Rotor Exit," AIAA J., Vol. 20, No. 4, Apr. 1982, pp. 528-535.
3. 조강래, 정의준, "축류압축기 회전익의 후방유동장(1)-누설와류의 궤적-", 대한기계학회 논문집, 제15권, 제3호, 1991, pp. 963-969.