

주기적 후류가 누설유동이 존재하는 익렬 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

임지현[†] · 김동현* · 주원구**

Experimental Study on the Effects of Upstream Periodic Wakes on Cascade with Tip Clearance

Im Ji Hyun, Kim Dong Hyun and Joo Won Goo

Key Words : Axial compressor, Cascade, Tip leakage flow, Vortex

Abstract

To research on change of blade row flow field with tip clearance caused by upstream periodic wake, an apparatus that generate periodic wake through traversing cylinders were installed. Then how movement of upstream wake affect cascade flow and tip leakage flow were measured. Cylinder was installed in front of 50% of chord length, and traversing velocity was calculated at approximately 11.7m/s regarding inlet velocity and chord length. To measure three-dimensional velocity of flow inside blade row, single slanted hot-wire was used. From the results, when the periodic wake is inserted, the flow inside of cascade is dominantly affected by vortex that is generated from cylinder. This periodic wake affects passage vortex and tip leakage vortex.

기호설명

C	: blade chord length, mm
C_x	: axial chord length, mm
l	: blade span, mm
s	: pitch, mm
S_c	: rod pitch, mm
t	: time, sec
T	: wake passing period, sec
U	: inlet velocity, m/s
V_c	: velocity of rod, m/s
ω	: reduced frequency, $\left(\frac{V_c}{S_c}\right) \times \left(\frac{C}{U}\right)$
x	: axial distance, mm
y	: distance normal to the blade, mm
z	: distance along span, mm

1. 서론

일반적으로 축류 터보기계 내부의 유동은 허브와 케이싱 및 3 차원 익형으로 형성된 환형 통로 내부의 3 차원 유동으로서 벽면 및 익 표면에서 발생하는 점성 경계층, 2 차 유동의 발생, 익의 회전에 의한 원심력 및 전향력, 회전익 말단 틈새에서의 누설 유동과 이들의 상호 작용으로 복잡한 유동을 이루고 있다. 이러한 복잡한 구조의 유동은 회전차의 효율 저하와 소음을 야기하게 된다. 이 중 누설 유동에 의한 손실은 전체 터보기계의 손실의 20~40%를 차지하는 것으로 알려져 있다. 따라서 익말단 틈새가 존재하는 익렬 내부 유동에 주기적인 후류가 유입되는 경우에 익렬 내부 유동장의 특성 변화에 대해서 연구할 필요가 있으며 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

Gallus 등은 실린더 로터와 환형 압축기 익렬을 이용하여 익렬 내부의 피치 중간점 및 출구에서의 3 차원 속도장과 난류 구조를 측정하여, 후류가 익렬 내부의 박리 영역의 발달에 큰 영향을 준다는 것을 보였다.

[†] 연세대학교 기계공학과

* LG 전자

** 연세대학교 기계공학부

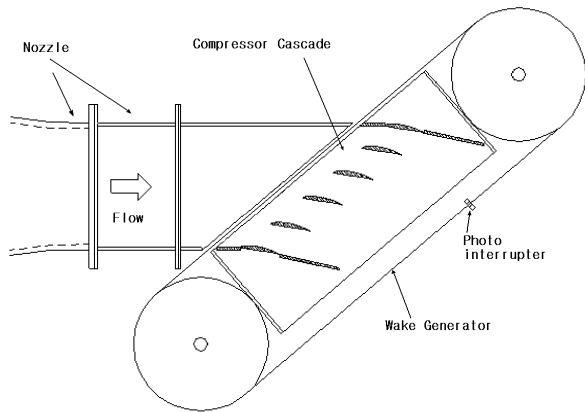


Fig. 1 Experimental apparatus

Kang 등은 팁 간극의 변화에 따른 유동장 및 정압 분포의 변화를 측정하고 유동 가시화를 이용 벽면에서의 유동을 관찰하였다. 팁 간극에 따라 Passage vortex 의 중심과 누설 와류의 위치가 변화가 생기고 익의 부하가 증가하는 것을 보였다.

임인원 등은 주기적 후류발생장치를 이용하여 부압면의 경계층 속도를 측정하여 주기적 후류가 경계층의 주기적 천이로 인하여 유동 박리를 지연시키거나 감소시킨다고 하였다.

본 연구는 45° 단일 경사열선을 사용하고, 6 개의 NACA65 계열 익으로 구성된 익렬 실험장치를 이용하여 익현장의 1%에 해당하는 익 말단 틈새가 존재하는 경우, 후류가 유입되지 않는 경우과, 주기적 후류가 유입되는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 두가지 경우 모두에 대해서 스팬 방향으로는 바닥에서 스팬 중앙까지, 피치 방향으로는 부압면에서 압력면까지 전체 영역에 대해서 3 차원 유동장을 측정하여 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 실험용 익렬장치를 제작하여 실험하였다. 실험에 사용된 풍동은 취출형(Blow-down type)이다. 이 풍동 출구의 시험부 단면은 457×457(mm)이며, 실험 조건에서의 난류 강도는 0.3% 미만이다. 여기에 축소비가 2:1 인 사각형 노즐(폭 457mm×높이 200mm)이 연결되었다. 이어서 여기에 연결된 시험부는 폭 1050 mm 이고, 높이 200 mm 의 사각단면 덕트이며 내부에 6 개의 익이 직선익렬로서 배치되어 있다. 익형은 NACA65-0910 으로 익현장 150 mm 이고, 종횡비는 1.2, 현절비는 1.067, 엇갈림각은 39° 이다.

Fig. 1 에 제시된 후류 생성 장치의 실린더는 익렬 후방에서 운동량 손실과 같은 운동량 두께를 갖도록 지름을 3.5mm 로 선정했고, 실린더 사이의 간격은 140mm 로 고정하였다. 실린더의 이동 속도는 11.4 m/s, 한 피치에 유입된 후류의 개수를 의미하는 reduced frequency(ω)는 0.7 이다.

2.2 실험 방법

본 연구에서 주기적 후류의 영향을 보기 위하여 타이밍 벨트위에 실린더를 부착하여 실험용 익렬 주위를 회전시켰다. 익렬 축과 수직전방으로 코드 길이의 50 %에 해당되는 75mm 지점을 실린더가 지나가도록 하였다.

측정위치는 익렬 내부에서 피치방향으로 18 개 지점, 스팬방향으로 익말단 틈새가 존재하는 바닥에서 스팬 중앙부까지 14 개의 측정점을 정하고, 대하여 측정하였다. 누설 유동이나 경계층이 존재

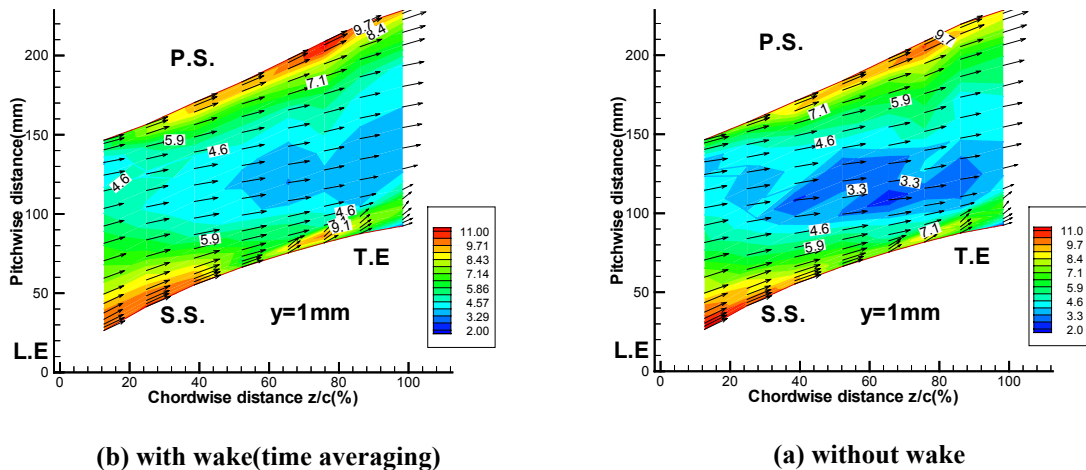


Fig. 2 Velocity vector & tangential velocity contour

하는 익의 코너 영역에는 측정점을 조밀하게 분포시켰다.

속도 측정을 위해서 Kanomax 사의 45° 단일경사열선을 이용하였으며, 속도 검정을 통한 환산계수의 오차는 3%이내이다. 주기적 후류가 유입될 경우, 환산 주파수를 0.7 로 고정하고 주기적 후류의 한 주기 내에 50 개의 데이터를 얻을 수 있도록 샘플링 율을 4140Hz 로 설정하였으며, Photo-interrupter 를 이용하여 같은 위상에서 100 개의 샘플을 획득하여 위상평균 속도를 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간 평균 유동장

후류가 없는 경우와 후류가 있는 경우의 시간 평균된 유동장을 비교해보면 전체적인 유동 형태

는 거의 차이가 없는 것으로 보인다. Fig. 2 는 익 말단 틈새가 존재하는 바닥에서 1mm 떨어진 위치에서의 속도 벡터와 피치 방향의 속도분포 이다. 벡터 분포를 보면 후류의 유무에 관계없이 일정한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 익현장의 50% 이후 위치에서는 후류가 있는 경우의 시간 평균된 유동장의 피치 방향 속도가 후류가 없는 경우에 비해 크게 나타나고 있으며, 특히 익현장의 40% 이후에서는 부압면과 압력면 부근에서는 후류가 없는 경우의 피치 방향 속도의 약 1.1 배의 피치 방향 속도가 나타나는 것을 알 수 있다. 이것으로 미루어 후류가 존재하는 경우 누설 유동이 변화하는 것을 짐작할 수 있으며 이에 대한 내용은 3.2 절에서 자세히 다루도록 하겠다.

Fig. 2 의 피치 방향 속도의 분포를 보면 후류가 존재하는 경우 익렬 내부의 유동장이 후류가 없는 경우와는 다르다는 것을 알 수 있으며, Fig. 3 을

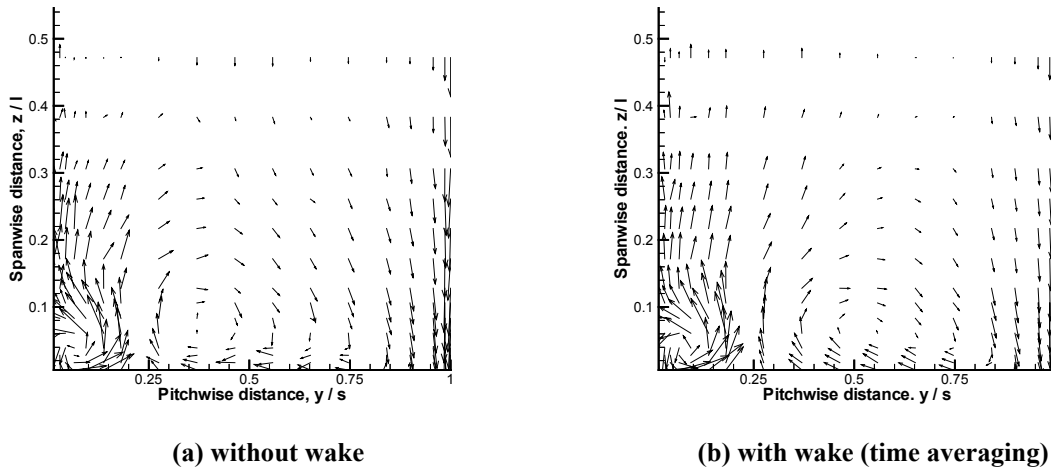


Fig. 3 Secondary flow vector ($x/C_x = 100\%$)

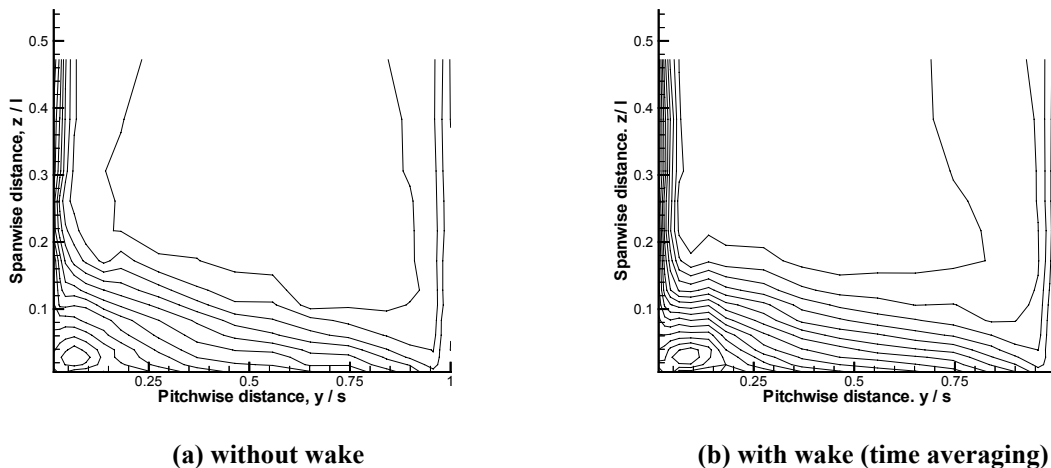


Fig. 4 Absolute velocity contour ($x/C_x = 100\%$)

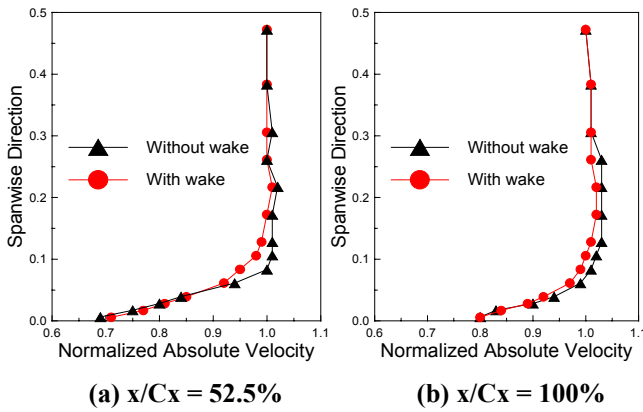


Fig. 5 Velocity profile near pressure surface

통해 주기적 후류가 유입되는 경우의 시간 평균된 유동장에서 Passage vortex 의 중심이 후류가 없는 경우에 비해 피치의 10% 거리만큼 압력면 쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 이는 상류로부터 유입되는 주기적인 후류에 의해서 익렬 내부 유동장이 교란을 받음으로써 나타나는 현상이라고 본다. 반면 후류가 유입되는 경우의 시간 평균 유동장에서 누설 와류는 후류가 없는 경우와 같은 크기와 위치를 가진다.

3.2 경계층 유동

익렬의 상류에서 주기적 후류가 유입되는 경우의 표면에서의 경계층이 얇아져서 유동의 박리를 지연시키거나 감소시킨다는 사실이 알려져 있다. 본 실험에서는 익 표면에서의 경계층의 변화를 살펴 볼 수 없으나 익말단 틈새가 존재하는 바닥의 경계층의 속도 분포는 확인할 수 있었다.

Fig. 4 는 익렬의 뒷전에 해당하는 부분의 절대 속도 분포이다. 부압면에서 피칭 중앙부까지의 속

도 분포에는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있으나, 압력면 근처의 속도 분포를 보면 주기적인 후류가 유입되는 경우, 피치 방향의 동일한 위치에서 최고 속도가 나타나는 스패 방향의 위치가 후류가 없는 경우에 비해 위 쪽으로 올라가 있음을 확인할 수 있다. 이는 주기적 후류가 유입되는 경우 압력면 근처에서는 바닥의 경계층이 후류가 없는 경우에 비해 두껍다는 것을 알려준다.

Fig. 5 는 부압면에서 압력면으로 피치 길이의 약 88%에 해당하는 부분에서의 스패방향으로의 속도 분포이다. Fig. 5 의 (a)와 (b)는 각각 익현장의 52.5%와 100%에 해당하는 위치이다. 앞서 Fig. 4 에서 확인한 바와 같이 주기적 후류가 유입되는 경우의 경계층 두께가 두꺼워지는 것이 Fig. 5 의 (a)와 (b)에서 모두 관찰되고 있음을 알 수 있다. 이는 후류에 의한 속도 결손과 후류의 경계층 내부 유동장의 교란에 의한 결과라 보여진다.

3.3 누설 유동의 변화

앞서 제시된 Fig. 3 의 2 차 유동 벡터를 보면 누설 유동의 의한 누설 와류와 Passage vortex 의 존재를 확인할 수 있다. 그러나 Passage vortex 의 위상 변화와는 달리 후류가 유입되는 경우의 시간 평균된 2 차 속도 벡터에서 누설 와류는 후류가 유입되지 않는 경우와 비교해보면 크기나 와류 중심 위치에 별 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 2 에서 제시된 익말 단 틈새 부근에서의 피치 방향 속도 분포를 보면 주기적 후류가 유입되는 경우의 속도가 후류가 없는 경우에 비해 다소 크게 나타나고 있음을 보았다. 이와 같은 차이에 기인한 변화를 확인하기 위해서 주기적 후류가 유입되는 경우의 시간 평균 유동장과 후류가 없는

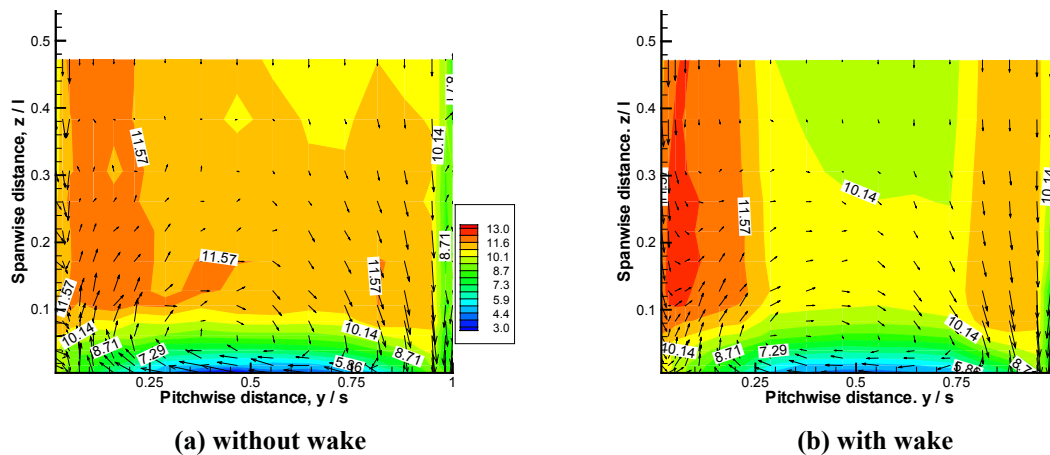


Fig. 6 Secondary flow vector & tangential velocity contour (x/Cx = 39%)

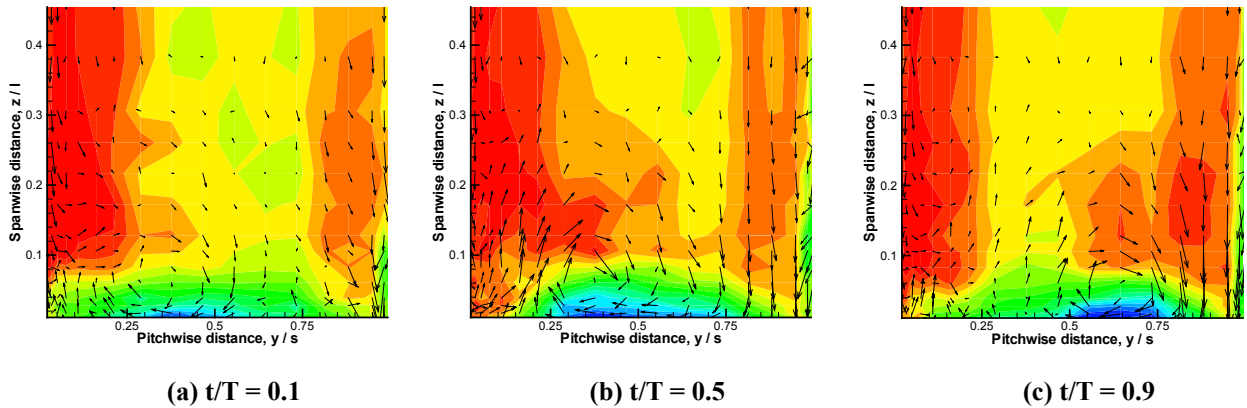


Fig. 7 Secondary flow vector & tangential velocity contour ($x/C_x = 39\%$)

경우, 모두 누설 와류가 존재하는 익현장 위치 ($x/C_x=52.5\%$)의 앞 부분에 해당하는 익현장의 39%에 해당하는 위치에서의 속도 분포를 확인하고자 한다.

Fig. 6은 익현장의 39% 위치에서의 후류가 없는 경우와 주기적 후류가 유입되는 경우의 시간 평균 유동장의 2차 유동 벡터와 피치 방향 속도의 분포를 나타낸 것이다. 두가지 경우 모두에서 면의 중앙부 하단에 Passage vortex가 존재하는 것을 확인 할 수 있으며, 전체적인 피치 방향 속도의 분포는 유사함을 알 수 있다. 그러나 부압면의 익말단 부에 해당하는 좌측 하단의 피치 방향 속도를 보면 주기적 후류가 유입되는 경우가 후류가 없는 경우에 비해 속도가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 6에 제시된 2차 유동 벡터와 피치 방향 속도 분포는 후류가 유입되는 한 주기의 속도를 시간 평균한 것이므로 부압면 익말단 부근에서 나타나는 속도 분포의 차이는 주기적 후류의 유입으로 인한 속도 교란의 결과로 여겨지며, 이로써 누설 유동이 시작되는 위치라고 판단되는 익현장의 40~50%의 위치에서 주기적 후류의 유입으로 인한 누설 유동에 변화가 나타날 것이라는 예측을 할 수 있다.

이러한 주기적 후류의 유입으로 인해 나타나는 누설 유동의 시작 부분의 2차 유동 벡터와 피치 방향 속도의 분포가 Fig. 7에 제시되어 있다. Fig. 7은 익현장의 39%에 해당하는 위치에서의 위상 평균 유동장을 시간의 변화에 따라 도시한 것이다. Fig. 7을 보면 주기적 후류가 부압면에서 압력면으로 이동하면서 유로 내부의 Passage vortex가 부압면에서 압력면으로 이동하는 것을 확인 할 수가 있고 이에 따라 익말단 텃 부근의 유동이 변화하는 것을 확인 할 수가 있다. Fig. 2의 시간 평균 유동장의 비교에서 나타나는 피치 방향 속도의 변화가 Fig. 7에서 나타나는 유동 교란에 의한 것이라고 볼 수 있으며, Fig. 6에서 볼 수 있는 주기적

후류가 유입되는 경우 익말단 틈새 영역에서의 피치 방향 속도의 증가는 Fig. 7의 (b)와 같이 특정 위상에서 주기적 후류의 유입으로 인하여 익말단 틈새에서 피치 방향 속도가 급격히 증가하기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 후류가 존재하지 않는 경우 익현장의 50% 부근에서 발생하는 누설 유동이 주기적 후류가 유입되는 경우 익현장의 50%보다 이전 위치에서 위상에 따라서 발생과 소멸을 반복하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

익현장의 1%에 해당하는 익말단 틈새가 존재하는 익렬 실험 장치에서 주기적 후류가 유입되는 경우와 후류가 없는 경우의 익렬 내부 유동장을 측정, 비교하여 위에 제시된 바와 같은 결과를 얻었으며 이를 정리하면 다음과 같다.

1. 주기적 후류가 유입되는 경우의 시간 평균 유동장과 후류가 없는 경우의 익 사이 유동은 유사한 양상을 보이나 후류가 있는 경우 익말단 틈새 영역에서 피치 방향 속도가 크게 나타났으며, 익의 뒷전에서 Passage vortex의 중심이 압력면 쪽으로 이동한 것을 알 수 있었고, 누설 와류의 경우 크기나 분포에 변화가 없었다.
2. 주기적 후류가 유입되는 경우 압력면 부근에서 경계층이 다소 두껍게 나타나는 것을 볼 수 있었으며 이는 후류의 유입으로 인한 경계층 내부의 속도 교란에 의한 영향이라 보여진다.
3. 익현장의 39% 부근에서 주기적 후류가 유입되는 경우의 시간평균 유동장에서 미약하게 누설 유동이 나타나는 것을 확인하였고, 위상 평균 유동장을 통해 이러한 차이가 후류에 의한 익말단 틈새 영역에서의 피치 방향 속도의 변화에 기인한

것임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) C. Poengen, H.E. Gallus, 1991, "Three Dimensional Wake Decay Inside of a Compressor Cascade and Its Influence on the Downstream Unsteady Flow Field", T. of ASME, J. of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 180-197
- (2) S. Kang, C. Hirsch, 1993, "Experimental Study on the Three-Dimensional Flow Within a Compressor Cascade With Tip Clearance", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 435~452
- (3) N. A. Cumpsty, 1989, "Compressor aerodynamics", Longman Scientific & Technical
- (4) 임인원, 2001, "주기적 후류가 하류의 익렬 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구", 연세대학교 석사학위 논문
- (5) S. Kang, C. Hirsch, 1994, "Tip Leakage Flow in a Linear Compressor Cascade", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 657~664
- (6) H. E. Gallus, 1991, "Three-Dimensional Wake Decay Inside of a Compressor Cascade and Its Influence on the Downstream Unsteady Flow Field", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 180~197