

〈論 文〉

## 선형터빈 케스케이드 통로내의 2차 유동과 손실에 관한 연구

이기백\* · 양장식\*\* · 나종문\*\*\*

(1994년 9월 5일 접수)

### The Experimental Investigation of the Secondary Flow and Losses Within the Plane Turbine Cascade Passage

Ki Baik Lee, Jang Sik Yang and Jong Moon Ra

**Key Words :** Laser Light Sheet (레이저 가시화장치), Image Processing System (화상처리장치), Passage Vortex (통로와류), Aerodynamic Loss (공력손실), Limiting Streamlines (한계유선)

#### Abstract

This paper represents the results of the experiments of the three-dimensional flow and the aerodynamic loss caused by the three-dimensional flow within the plane bucket blades. To research the secondary flow and the aerodynamic loss, the large-scale plane bucket blade of 1st-stage in the low pressure steam turbine is made of FRP. The detailed investigation of the secondary flow and the aerodynamic loss using 5-hole pressure probe within turbine cascade has been carried out in the low speed wind tunnel. The limiting streamlines of the suction and endwall surface have been visualized by the oil film method. The flow visualization of the secondary flow has been performed by the laser light sheet technique and image processing system. By using the method mentioned above, it is possible to observe the evolution of the pitchwise mass-averaged flow deviation angle and total pressure loss coefficient, the secondary flow, and the aerodynamic loss through the cascade.

#### 기 호 설 명

$C$  : 블레이드 코드길이  
 $C_{ax}$  : X축 방향의 블레이드 코드길이  
 $C_{pt}$  : 전압손실계수(식(1))  
 $\bar{C}_{pt}$  : 피치방향의 질량평균 전압손실계수(식(2))  
 $\bar{C}_{pt}$  : 질량평균 전압손실계수(식(4))  
 $P_t$  : 전압  
 $U_0$  : 상류측 자유유동속도

$\rho_0$  : 상류측 자유유동의 밀도  
 $H$  : 블레이드 높이  
 $P$  : 블레이드 피치길이  
 $X$  : 케스케이드내 유동방향의 좌표  
 $Y$  : 케스케이드 피치방향의 좌표  
 $Z$  : 케스케이드 높이방향의 좌표  
 $S$  : 흡입면 (suction surface)의 표면길이  
 $Sl$  : 측정단면의 길이  
 $Slot1\sim 8$  : 5공 프로브의 측정단면

상첨자

— : 피치방향의 질량평균

\*정회원, 부산대학교 기계공학과 및 기계기술연구소

\*\*부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*정회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

= : 전 측정단면에 걸친 질량평균

하첨자

0 : 상류측 유동조건

## 1. 서 론

터빈은 크게 가스터빈과 증기터빈 두 종류가 있으며, 이러한 터빈의 구성요소 중의 하나인 블레이드는 정익(stator), 혹은 노즐(nozzle)과 동익(rotor), 혹은 버킷(bucket)으로 구분할 수 있다. 정익 혹은 노즐 블레이드는 유동을 가속시키기 위한 안내역할을 하고, 정익을 통과한 유동은 동익 혹은 버킷으로 들어와 동익과 버킷에 동력을 전달하는 수단으로 사용되고 있다. 이들 중 증기터빈에서는 증기에 의한 수적(water droplet)과 보일러의 부식에 의한 슬래그(slag) 입자들이 발생하며, 이러한 수적과 슬래그 입자들은 노즐과 버킷 블레이드에 충돌하여 블레이드의 표면에 침식(erosion)을 일으켜 블레이드의 수명을 단축시키는 원인이 되고 있다. 이를 방지하기 위해 블레이드 표면을 코팅하는 기법과 수적을 제거하기 위해 블레이드의 흡입면(suction surface)과 압력면(pressure surface)에 흡입 홈(suction slot)을 설치하여 수적을 제거하는 기법<sup>(1)</sup>을 채택하고 있으며, 또한 블레이드 표면에 수막(water film)을 형성하여 수적 및 슬래그의 충돌을 방지하는 기법<sup>(1)</sup>들이 고안되고 있다. 그러나 이러한 기법들에 의해 제거되지 않는 수적과 슬래그는 터빈 블레이드 통로내의 복잡한 3차원 유동에 의해 블레이드 표면에 재침식시키는 원인이 되기 때문에 터빈 블레이드 통로내의 3차원 유동연구가 선행되어야 한다.

터빈 케이스케이드 통로내의 3차원 유동연구는 많이 수행되었고 연구동향은 다음과 같다. Langston 등<sup>(2)</sup>은 선회각(turning angle)이 약 70°이고, 형상비(aspect ratio)가 0.988인 확대된 선형 케이스케이드 통로 내의 3차원 유동특성과 끝벽(endwall)의 전단응력분포와 흡입면의 가시화 및 공력손실의 발달과정을 연구하였고, Marchal 등<sup>(3)</sup>은 형상비가 0.83인 정익(선회각 : 67°)과 형상비가 0.79인 동익(선회각 : 100°)의 통로 내에서 발생하는 2차 유동(secondary flow)과 스모그 가시화와 유막법을 이용해 2차 유동의 구조와 흡입면의 한계유선(limiting streamline) 등을 관찰하였다. 또한

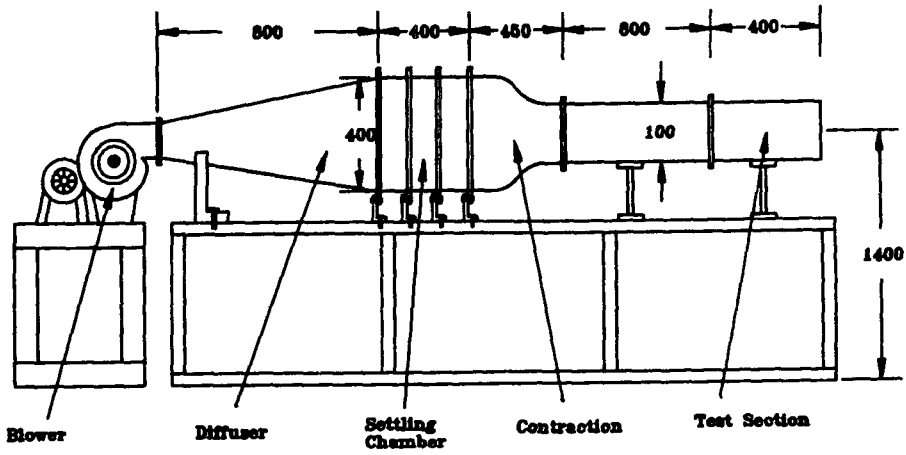
Langston<sup>(4)</sup>은 1977년에 발표된 모델을 이용해 터빈 통로내의 압력면과 흡입면의 압력차에 의해 발생하는 횡단유동(cross flow)에 관한 유동현상을 Johnston의 삼각법을 이용해 유동을 해석하였다. 그리고 Gregory-Smith 등<sup>(5)</sup>은 5공 프로브(5-hole probe)와 3공 프로브(3-hole probe) 이용해 형상비가 1.77이고 선회각이 110°인 확대된 동익 통로 내에서 발생하는 2차 유동현상과 공력손실의 발달과정을 연구하였고, Yamamoto<sup>(6,7)</sup>는 선형터빈 케이스케이드내의 정익(형상비 : 1.36, 선회각 : 65°)과 동익(형상비 : 1.37, 선회각 : 102°)에서 발생하는 2차 유동과 2차 유동에 의한 공력손실의 전개과정에 대한 연구를 수행하였다. Goldstein 등<sup>(8)</sup>은 나프탈렌 승화기법을 이용해 형상비가 3.55이고 선회각이 108°인 케이스케이드 끝벽의 열전달 특성에 대해 연구하였다. 또한 Chung<sup>(9,10)</sup> 등은 형상비 3.55이고 선회각이 107°인 확대된 터빈 케이스케이드내의 유동장을 tuft grid와 유막법을 이용해 안장점과 한계유선들을 관찰하였고 케이스케이드 통로내에 펜스를 설치하여 2차 유동의 성장을 억제하는 방법에 관한 연구를 수행하였다.

일반적으로 산업용 증기터빈은 고압력터빈(high pressure turbine), 중압력터빈(intermediate pressure turbine), 저압력터빈(low pressure turbine)으로 구성되어 있는데 본 연구에서는 저압력터빈의 1단(1st stage) 버킷 블레이드를 선택하였다. 그리고 기존의 연구들은 110° 미만의 선회각과 0.79 이상인 형상비에 대해서 연구가 수행되었다. 그러나 본 연구의 블레이드는 선회각이 약 122°의 높은 선회각과 0.725의 적은 형상비를 채택하였다. 이와 같은 모델을 이용해 블레이드 통로내에서 발생하는 2차 유동과 2차 유동에 의한 공력손실 그리고 높은 선회각에 의한 2차 유동의 피치방향의 질량평균 유동편이각(flow deviation angle)의 전개과정을 연구하고, 유막법과 레이저 가시화기법(laser light sheet technique)<sup>(11)</sup>을 이용해 끝벽의 한계유선들과 블레이드 흡입면의 한계유선들 및 케이스케이드 통로내의 2차 유동의 구조를 관찰하고자 한다.

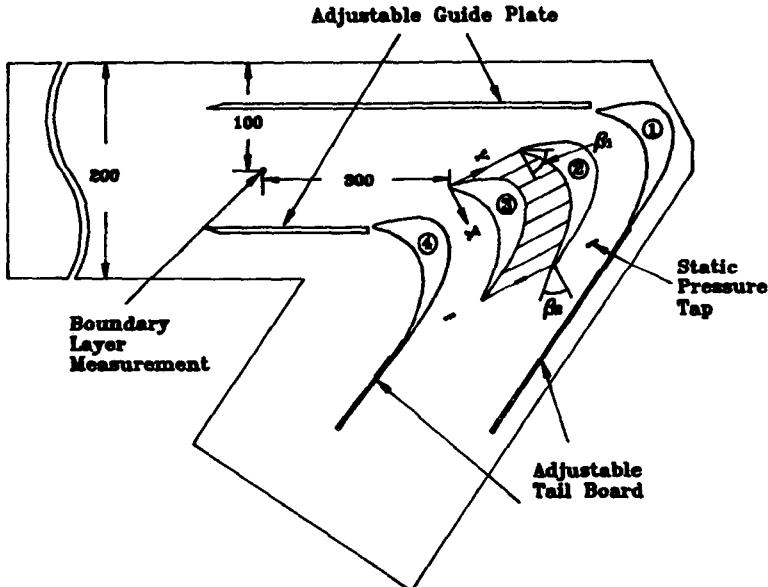
## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용한 풍동은 아음속 개방형 풍동으로써 전체시스템은 Fig. 1(a)에 나타내었다. 송풍



(a)



(b)

Fig. 1 Experimental apparatus of the turbine cascade

기(10hp)로부터 유입된 유입공기는 확대부와 정체실(settling chamber) 그리고 노즐을 통해 가속되도록 설계하였다. 또한 입구유로부, 블레이드 설치부, 출구유로부는 두께 15 mm인 아크릴로 제작하였으며, 입구유로부의 단면은 200×100 mm이고, 정체실의 단면은 400×400 mm으로 구성하였다. Fig. 1(b)는 블레이드 설치부를 나타낸 그림이다. 실험에 이용된 블레이드는 저압력 증기터빈 중 1단의 블레이드로써 실제의 블레이드는 휘어진 3차원 형상이지만 유동의 복잡성때문에 미드스팬(mid-

span)의 단면을 모델로 한 2차원 형상으로 실제 크기의 4배로 FRP 합성수지로 제작하였고, 블레이드 통로 내의 유동장을 측정하기 위해 블레이드를 4개 설치하였다. 3번 블레이드의 앞전(leading edge)을 중심으로 피치방향을 Y축, 흐름방향을 X축, 블레이드의 높이방향을 Z축으로 설정하였다.

1번과 4번 블레이드와 연결되어 있는 입구유로부의 측벽(side wall)의 경계층 두께를 줄이기 위해 안내판(guide plate)에 블리드 홈(bleed slot)을 설

치하였으며, 또한 블레이드 통로내의 속도, 압력, 정압을 측정하기 위해 5공 프로브를 사용하였고 각 측정단면(Y-Z면)은 8개 ( $X/Cax=0.0, 0.143, 0.286, 0.429, 0.572, 0.715, 0.857, 1.0$ )로 구성하였다. 캐스케이드 통로내의 유동의 주기성을 확인하기 위해 측정단면  $X/Cax=1.0$ 과 끝벽과의 교차면의 중앙을 중심으로 좌우에 4 mm 간격으로 3개의 정압공(외경 0.8 mm, 내경 0.4 mm)을 각각의 캐스케이드 통로에 설치하였다. 각 통로의 동일한 위치에 설치되어 있는 정압공의 압력차가 최대(0.5 mmH<sub>2</sub>O)일 때까지 유동조절판(adjustable tail board)의 각도를 조절하며, 유동의 주기성을 확인하였다. 블레이드의 형상 및 주요 치수는 Table 1에 나타내었다.

5공 프로브는 비영위법(non-nulling method)를 이용해 보정<sup>(12)</sup>하였으며, 각 측정단면에서 5공 프로브를 이송하기 위해 3차원 이송장치를 제작하였다. 각 측정단면의 홈(slot)은 4 mm이고, 측정단

Table 1 The bucket blade geometry

Cord length(C)	143 mm
Axial cord length(Cax)	138 mm
Inlet flow angle( $\beta_1$ )	63°
Outlet flow angle( $\beta_2$ )	-59°
Aspect ratio(H/C)	0.725
Solidity(C/P)	1.788
Reynolds number( $U_0 \cdot C/\nu$ )	$2.7 \times 10^5$

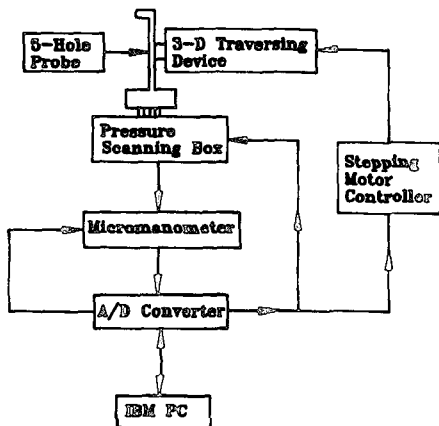


Fig. 2 Schematic diagram of velocity measurement system

면의 홈 위를 움직이도록 두께 3 mm인 아크릴 슬라이딩판(sliding plate)을 설치하고, 슬라이딩판 위에 5공 프로브를 장착하였다. 그리고 슬라이딩판 사이에 와셀린 오일을 주입하여 홈사이의 유입공기의 누수를 최대한 방지하였다. Fig. 2는 5공 프로브(united sensors & control, DC125 : 프로브 선단 직경 3.175 mm)의 압력측정 시스템을 나타낸 그림이다. 5공 프로브를 임의의 측정단면에 설치하면, 5공 프로브의 5개의 압력은 IBM PC를 통해 A/D 변환기(PCL-718)의 디지털 출력포트에서 출력되어지는 디지털 신호가 압력 스캐닝박스(furness controls limited-FC091)에 입력되어져 순차적으로 압력 스캐닝박스가 개방되어 5개의 압력이 압력 스캐닝박스에 전달되어지고 각각의 압력은 마이크로마노미터(furness controls, FC012)를 거쳐 A/D 변환기를 통해 디지털신호로 변환되어 IBM PC에 저장되어진다. 이때 5공 프로브의 압력 데이터의 오차를 줄이기 위해 각 압력공의 압력을 1000회 8번 측정하여 앙상블 평균값을 데이터로 사용하였다.

데이터를 저장한 후에 A/D변환기의 디지털 출력 포트에서 3차원 이송장치의 스텝핑 모터 제어부에 디지털 신호를 입력하여 다음 측정위치로 자동으로 이송할 수 있도록 온라인 시스템을 구성하였다.

2.2 가시화장치

Fig. 3은 2차 유동의 구조를 관찰하기 위한 가시화 장치도를 나타낸 것이다. 15 mW He-Ne 레이저에서 발진된 레이저광은 반사경(mirror)에 입사되어지고, 입사된 레이저광은 실린더형 렌즈(cylindrical lens)를 통과하면서 레이저 가시화 광

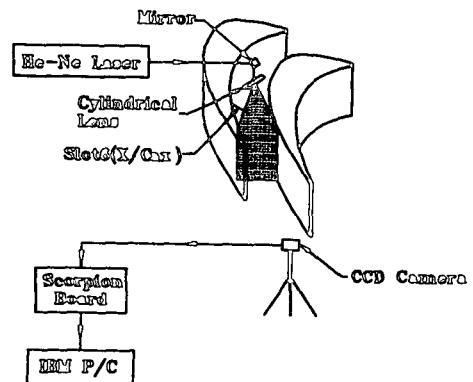


Fig. 3 Laser light sheet and image processing system

(laser light sheet)으로 케이스케이드 통로에 비춰지게 된다. 또한 3번 블레이드로부터 전방 300 mm, 그리고 끝벽으로부터 4 mm에 설치된 스모그 와이어(직경 0.2 mm)에서 발생된 스모그 입자(2 m/s)가 케이스케이드 통로로 유입되어 레이저 가시화 광을 통과하면서 반사된 스모그 입자의 유동 궤적을 CCD(Toshiba, IK-535)로 촬영하고, 촬영된 화상을 초당 30 프레임(frame)을 잡을 수 있는 scorpion(real time VGA frame grabber) 카드를 통해 IBM PC에서 저장하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실험조건

본 연구에서는 저압력 증기터빈의 제 1단의 버킷 모델을 채택하여 케이스케이드 통로내의 3차원 유동, 스모그가시화, 유막법을 이용해 유동장을 해석하였다. 각 측정단면에서의 압력 측정점은 Y방향으로 15개와 Z방향으로 11개의 측정점을 선택했고, Y방향은 각 측정단면에서 등간격으로 3차원 이송장치를 이송하였고, 그리고 Z방향은 끝벽으로부터 2 mm 떨어져 있는 측정점에서 시작하였으며, 그 이후의 4개의 측정점은 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm로 이송시켰고 나머지 6개의 측정점은 미드스팬까지 등간격으로 이송하였다. 이와 같이 총 165점에서 압력데이터를 획득하였고 3번 블레이드로부터 전방 300 mm의 지점에서 I형 경계층 프로브로 경계층두께와 자유유동속도를 측정하였다. 이 점에서의 경계층두께, 배제두께, 운동량두께, 형상계수 그리고 난류강도는 각각 14 mm, 1.65 mm, 1.27 mm, 1.30, 0.6%이다. 5공 프로브의 불확실성<sup>(13)</sup>에 대한 데이터는 Table 2에 나타내었고, 여기서,  $\delta P$ 는 전압과 정압의 차에 대한 불확실성을 의미한다.

#### 3.2 유막법 및 스모그가시화

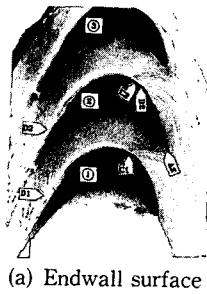
본 실험에 사용된 유막법은 파라핀, 흑연분말, 오레인산을 체적비(2 : 1 : 0.33)로 섞어서 사용하였고, 오레인산은 파라핀과 흑연분말의 응집을 방지하기 위해 이용되었다. 한계유선들을 가시화하기 위해 제도지(mylar draft film)를 끝벽에 부착하고 제도지 위에 붓으로 유막의 두께를 균일하게 도포하였고, 상류측 유동속도는 29 m/s로 유지하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 유막법을 이용하여 케이스케이드 통로내의 끝벽과 흡입면에서 발생하는 한계유선들을 가시화한 사진이다.

Fig. 4(a)는 끝벽의 한계유선들으로써, 케이스케이드의 상류로부터 유입되어지는 입구유동은 안장점(saddle point) A2를 기점으로 B2와 연결되는 곡선은 입구유동의 경계층이 나선형 형상으로 회전하면서 박리되어지는 박리선이고, 이 선을 경계로 앞전의 흡입면 와류(leading edge suction side vortex)가 발생하고, A2를 기점으로 C1과 연결되는 곡선의 박리선을 경계로 해서 앞전의 압력면 와류(leading edge pressure side vortex)가 발생되어진다.

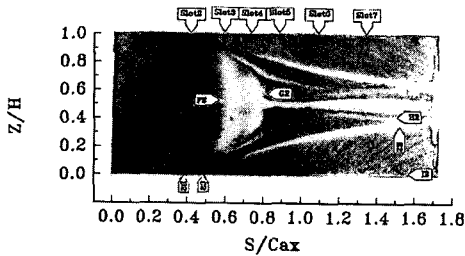
또한 2번 블레이드와 3번 블레이드사이에서도 역시 동일한 와류가 형성되고 있음을 알 수 있다. Moor 등<sup>(14)</sup>의 앞전의 췌기형 형상을 하고 있을 때의 연구 논문에 의하면, 이러한 앞전의 압력면 와류와 흡입면 와류의 형성조건은 블레이드의 앞전의 형상과 반경 그리고 블레이드 통로 내로 유입되는 유입유동각(inlet flow angle)에 의존한다고 하였다. C2와 D2, C1과 D1이 연결되는 곡선의 박리선은 흡입면과 끝벽이 마주치는 면을 경계로 해서 발생하는 흡입면 코너와류(suction side corner vortex)로 압력면에서 흡입면으로 향하는 횡단유동의 영향으로 발생된다. Hodson 등<sup>(15)</sup>은 이 코너

Table 2 The uncertainty of the 5-hole probe measurement with 20 to 1 odds

Range		Cone angle	Roll angle	$\delta P / \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 \times 100(\%)$
Cone angle	Roll angle	0.80°	1.38°	2.66
-30° ~ 30°	-90° ~ 90°			
Cone angle	Roll angle	1.01°	1.13°	2.82
-40° ~ -30°	-90° ~ 90°			
30° ~ 40°				



(a) Endwall surface



(b) Suction surface

Fig. 4 Oil visualization on the endwall and suction surface

와류가 B2점 바로 뒤에서 발생한다고 하였고, Sieverding 등<sup>(16)</sup>은 C2점 바로 뒤에서 발생한다고 하였다. 이와 같은 이유는 코너와류가 하나만 발생하는 것이 아니라 블레이드의 부하와 경계층 두께, 유입유동각 등의 영향<sup>(15)</sup>에 따라서 2개의 코너와류가 발생할 수 있기 때문에 발생하는 위치가 달라지는 것으로 여겨지며, 본 연구에서는 Sieverding 등의 결과와 같이 C2점에서 발생하는 것으로 생각되어진다. Fig. 4(b)는 블레이드의 흡입면에 제도지를 부착하여 그 위에 붓으로 유막을 도포하였고, (a)와는 달리 블레이드를 90°로 회전하여 설치하였다. 그 이유는 유막이 중력에 의해 끝벽으로 흘러내리는 것을 방지하기 위한 것이다. 그림에서 y축 좌표는 Z방향의 길이를 블레이드의 높이(H)로 무차원화하였고, x축 좌표는 흡입면의 표면길이 S를 X축 방향의 블레이드 코드길이(Cax)로 무차원화하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적인 형상은 상·하 대칭적으로 나타나 있다. 앞전에서  $S/Cax = 0.40$ 까지는 전형적인 2차원 유동을 보이고 있지만,  $S/Cax = 0.59$ 에서 뒷전까지는 케이스케이드 통로에서 발생하는 3차원 유동현상을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)의 끝벽 한계유선들에서 나타난 앞전의 흡입면 그리고 압력면의 말굽와류와 블레이드의 부하(blade loading)에 기인된 압력면에서 흡입면



Fig. 5 Smoke visualization of secondary flow

으로 발생하는 순압력 구배의 영향이 중첩되어서 발생하는 통로와류(passage vortex)는 C2점에서 흡입면을 향해 휘말려 올라가고, 통로 하류로 이동할수록 통로와류의 박리영역은 미드스팬쪽으로 확대되어지며 시계방향으로 회전하면서 뒷전을 향해 이동하고 있고, C2와 E2가 이루고 있는 곡선으로 박리되고 있다. 또한 앞전의 흡입면 와류는 흡입면과 마주치는 점 B2를 기점으로 해서 흡입면을 따라 휘말려 올라가면서 뒷전(H2)을 향해 박리되고 있고, 회전방향은 통로와류와 반대방향으로 회전한다. 통로와류가 발달되면서 유입유동의 경계층 내의 저에너지 영역이 통로와류로 권입(entrainment)되어 통로와류의 박리선(C2-E2)과 앞전의 흡입면 와류의 박리선(B2-H2)사이에 저에너지 유체 영역<sup>(15)</sup>이 존재하게 된다. 이와 같은 저에너지 유체 영역은 통로와류와 흡입면의 말굽와류의 회전방향이 반대 방향으로 회전하기 때문에 발생하는 것으로 여겨지고, 이는 피치방향의 질량평균 전압손실 계수(pitchwise mass-averaged total pressure loss coefficient)의 분포에서도 확인되었다.  $S/Cax = 0.59$ 의 F2에서 박리된 유체는 G2( $S/Cax = 0.80$ )에서 재부착되는 박리기포영역(separation bubble zone)이 발생한다. 그리고 재부착선 G2의 중간 지점에서 뒷전까지의 회전은 박리기포들이 응집되어 자중에 의해 흘러내린 것이고, 흡입면과 끝벽이 마주치는 면의 C2점을 경계로 해서 흡입면상에 코너와류의 박리선(I2)이 나타나고 코너와류의 회전방향은 통로와류와 반대 방향으로 회전한다.

Fig. 5는 측정단면  $X/Cax = 0.715$ 에서 레이저 가시화기법으로 통로와류를 가시화한 사진으로, 가시화되어질 단면을 CCD 카메라로 촬영할 경우 블레이드의 선회각 때문에 5공 프로브로 측정할 실제 측정단면(slot 6)과는 달리하여 가시화를 수행하였다(Fig. 3 참조). 흡입면쪽의 밝은 선은 레이저 가

시화광과 흡입면이 교차하는 면을 나타내고 있으며, 통로와류가 시계방향으로 나선형 형상으로 회전하고 있음을 명확하게 알 수 있다.

이 사진과 Fig. 6(k)의 속도벡터와 비교해 볼 때 가시화속도가 2 m/s인데도 통로와류의 크기는 거의 비슷한 크기를 이루고 있는 것으로 보아 통로와류의 크기는 상류측의 자유유동속도의 크기에 큰 영향을 받지 않는 것으로 생각된다.

### 3.3 2차 유동 및 전압손실분포

Fig. 6은 5공 프로브로 측정된 각 측정단면에서의 속도 및 전압손실분포이다.  $x$ 축은 케이스이드의 피치( $P$ )에 대한 측정단면의  $Y$ 방향 길이( $SI$ )로 무차원화하였고,  $y$ 축 좌표는  $z$ 방향의 측정점을 블레이드의 높이( $H$ )로 무차원화하였다. 그림(a)는 측정단면  $X/Cax=0.0$ 에서 측정된 2차 유동의 속도벡터로 압력면에서 흡입면으로의 압력구배로 인해 피치에 대한 측정단면의 길이 비( $SI/P$ )가 약 0.36을 경계로 횡단유동이 발생하고 있다. 케이스이드 통로하류로 갈수록, 즉 측정단면  $X/Cax=0.143$ (그림(c)),  $X/Cax=0.286$ (그림(e))에서는 압력면에서 흡입면으로 이동하는 횡단유동의 위치가  $SI/P=0.14$ ,  $SI/P=0.06$ 의 위치에서 앞전의 흡입면 와류의 존재를 확인할 수 있었다. 그러나 앞전의 압력면 와류의 존재는 확인할 수 없었지만 횡단유동의 이동위치는 앞전의 압력면 말굽와류의 이동경로로 여겨진다. 측정단면  $X/Cax=0.429$ (그림(g))에서부터 발달된 통로와류의 형상이 나타나며, 압력면에서 끝벽으로 하강유동이 발생하고, 끝벽에서 흡입면을 따라 상승유동이 발생한다. 끝벽의 한계유선에서 나타난  $C2$ 와  $D2$ 의 곡선의 박리선은 이와 같이 상승유동 때문에 발생되어지고, 이 박리선을 경계로 해서 코너와류가 발생한다. 케이스이드 통로를 따라 더 하류로 이동할수록, 측정단면  $X/Cax=0.572$ (그림(i))에서부터 측정단면  $X/Cax=1.0$ (그림(o))까지는 통로와류의 중심 위치가 점차 압력면쪽으로 이동하고 있으며 통로와류의 크기 도 증가하고 있음을 알 수 있다.

그리고 케이스이드 통로 내부에서의 전압손실계수는 다음과 같이 정의하였다.

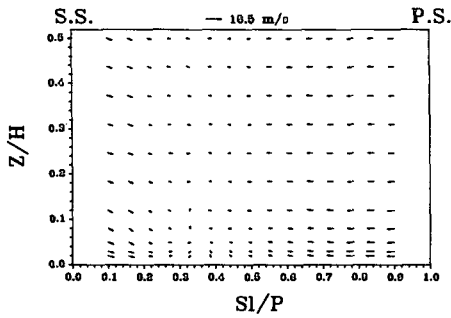
$$C_{pt} = \frac{P_{t0} - P_t}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

Fig. 6(b), (d), (f), (h), (j), (l), (n), (p)는 (1)과 같이

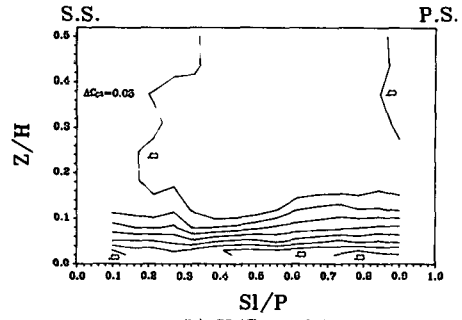
정의된 식을 이용하여, 0.05의 등간격으로 계산된 전압손실분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(b)는 측정단면  $X/Cax=0.0$ 에서의 전압손실분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전압손실은 입구유동의 경계층 내부에서만 발생하고 있고, 측정단면  $X/Cax=0.143$ 인 Fig. 6(d)에서는  $X/Cax=0.0$ 에 비해 전압손실계수의 분포가  $Z$ 축 방향으로 더 넓어지며,  $SI/P=0.16$  근방에서 0.4의 최대 손실값을 나타내었다. 이는 속도벡터의 그림에서 나타난 바와 같이 앞전의 흡입면 와류에 기인한 것이다. Fig. 6(f)는 측정단면  $X/Cax=0.286$ 에서의 전압손실계수로 압력면에서도 손실이 일어나기 시작하며,  $SI/P=0.045$  근방에서 최대값 0.55의 값을 나타내었고 이는 끝벽의 가시화 사진에서 나타난 코너와류의 존재를 의미한다. 측정단면  $X/Cax=0.429$ 를 나타내는 Fig. 6(h)에서는 전압손실계수가 압력면에서 더욱 증가하며 끝벽과 흡입면과 마주치는 모서리에서 코너와류가 존재하고 측정단면  $X/Cax=0.286$ 에 비해 약간 적은 값을 보였다. 또한 흡입면상에서 전압손실계수가 0.5의 값을 보이고 있는데 이는 흡입면의 가시화 사진에서 나타난 박리기포영역의 영향으로 생각되어진다.  $X/Cax=0.572$ 를 나타내는 Fig. 6(j)에서는 흡입면상의 전압손실계수가 더욱 증가해 0.8을 나타내었다. 이와 같은 이유는 흡입면의 가시화사진에서 알 수 있듯이 흡입면상의 통로와류의 박리선과 흡입면상의 앞전의 흡입면 와류의 박리선 사이의 저에너지 유체영역에 기인하고 또한 박리기포영역 이후에 발생하는 후류의 효과로 생각할 수 있다. 흡입면과 끝벽이 마주치는 모서리에서의 전압손실계수값은 상류의 측정단면에 비해 적은 값을 나타내는 것으로 보아 끝벽상에 새로운 경계층이 발생하고 있음을 알 수 있다. 케이스이드 통로하류로 이동할수록, 측정단면  $X/Cax=0.715$ ,  $X/Cax=0.857$ ,  $X/Cax=1.0$ 에서는 통로와류의 성장으로 인해 흡입면상의 전압손실계수의 최대값이 더욱 더 흡입면 위쪽으로 이동하고 있으며, 끝벽상의 새로운 경계층이 측정단면  $X/cax=0.572$ 에 비해 더욱더 흡입면쪽으로 확대되고 있음을 알 수 있다.

### 3.4 피치방향의 평균 전압손실분포와 유동편이각 분포

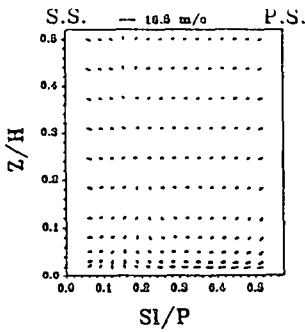
케이스이드 통로내의 각 측정단면에서의 피치방향의 질량평균 전압손실계수와 피치방향의 질량평



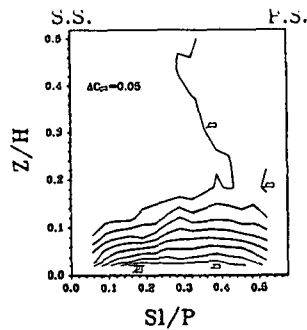
(a)  $X/Cax=0.0$



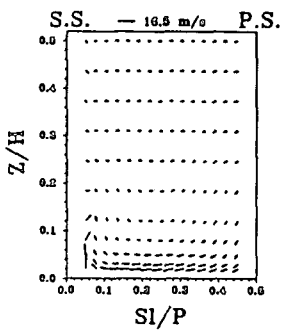
(b)  $X/Cax=0.0$



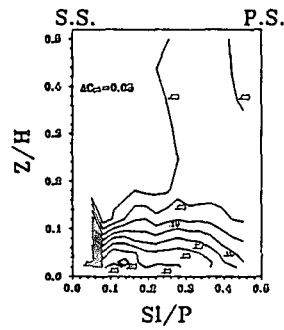
(c)  $X/Cax=0.143$



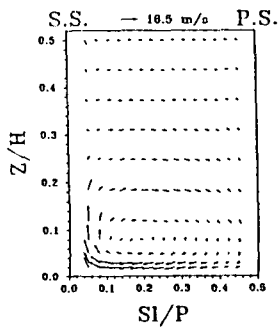
(d)  $X/Cax=0.143$



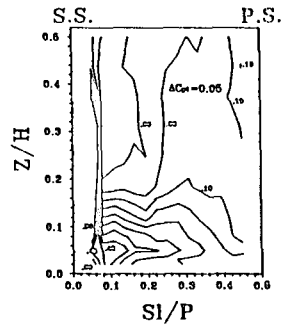
(e)  $X/Cax=0.286$



(f)  $X/Cax=0.286$



(g)  $X/Cax=0.429$



(h)  $X/Cax=0.429$

Fig. 6 Continued



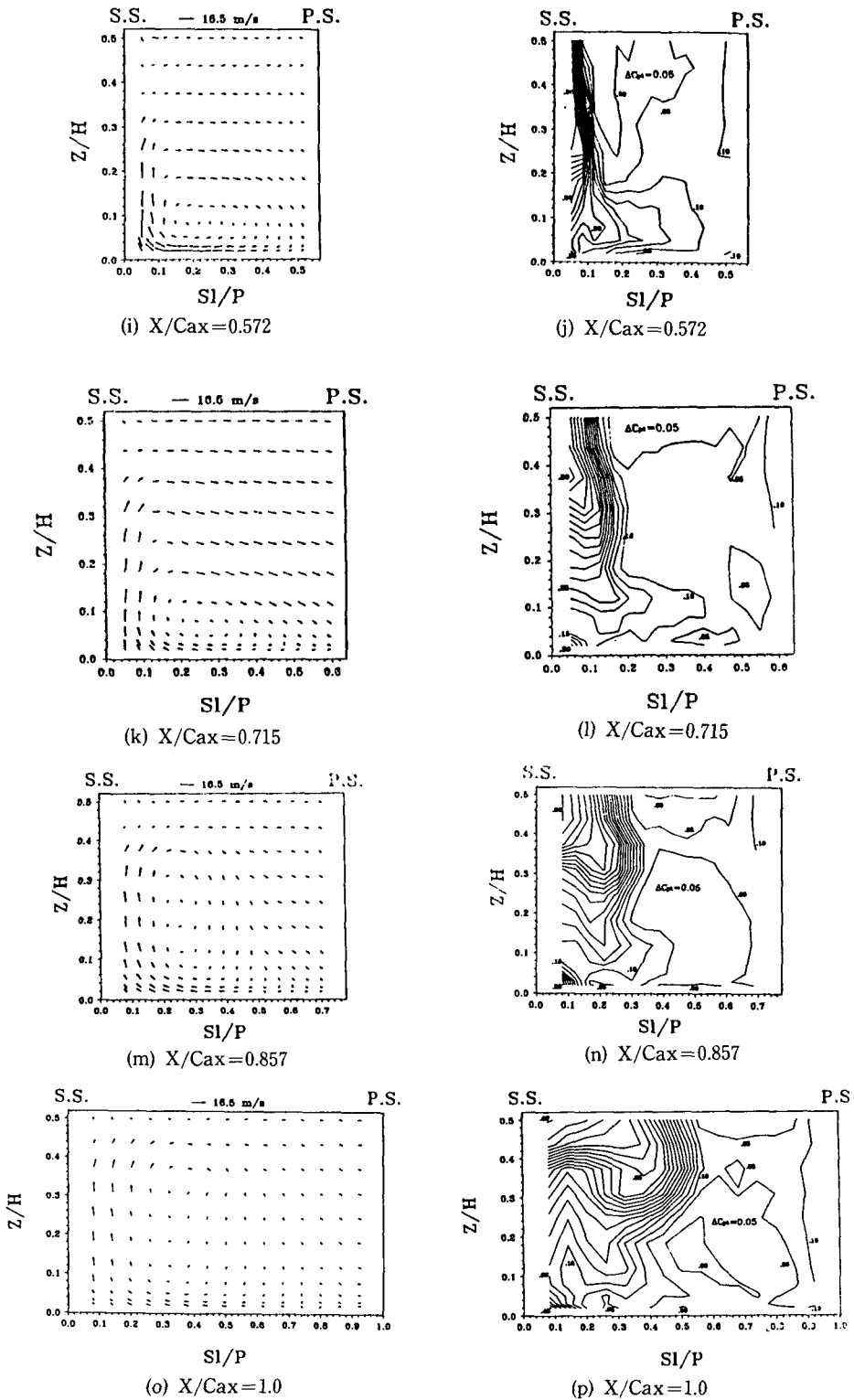


Fig. 6 Vector plot of secondary velocities and total pressure loss coefficient contours on the measurement planes

균 유동편이각(pitchwise mass-averaged flow deviation angle)은 다음과 같이 식(2)와 식(3)으로 정의되어진다.

$$\bar{C}_{pt}(j) = \frac{\sum_i C_{pt}(i, j) \rho U(i, j) \Delta Y_i \Delta Z_j}{\sum_i \rho U(i, j) \Delta Y_i \Delta Z_j} \quad (2)$$

$$\Delta\theta(j) = \bar{\theta}(ms) = \frac{\sum_i \arctan\left(\frac{V(i, j)}{U(i, j)}\right) \rho U(i, j) \Delta Y_i \Delta Z_j}{\sum_i \rho U(i, j) \Delta Y_i \Delta Z_j} \quad (3)$$

여기서,  $i$ 와  $j$ 는  $Y$ 방향과  $Z$ 방향의 측정점을 나타내고, 또한 상류측 유입속도가 적기때문에 측정점의 전 구간에 걸쳐 밀도는 일정한 것으로 가정하였다.  $C_{pt}(i, j)$ 는 각 측정점에서의 전압손실계수이고,  $U(i, j)$ 와  $V(i, j)$ 는 각 측정점에서  $X$ 방향과  $Y$ 방향의 속도성분을 나타내며,  $\Delta Y_i$ 와  $\Delta Z_j$ 는 각각  $Y$ 방향의  $i$ 번째 이송거리와  $i+1$ 번째의 이송거리의 1/2,  $Z$ 방향의  $j$ 번째 이송거리와  $j+1$ 번째의 이송거리의 1/2의 합을 의미한다. 그리고 임의의  $Z$ 방향에서의 피치방향의 질량평균 유동편이각은 미드스팬에서의 피치방향의 질량평균 유동편이각( $\bar{\theta}(ms)$ )에 대한 임의의  $Z$ 축에서의 피치방향의 질량평균 유동편이각의 차로써 표현하였다. Fig. 7은 각 측정단면에서의 피치방향의 질량평균 전압손실계수를 나타낸 그림이다.  $x$ 축 좌표는  $Z$ 방향의 측정점을 블레이드의 높이( $H$ )로 무차원한 값이고,  $y$ 축은 피치방향의 질량평균 손실계수를 나타낸다.

케이스케이드의 하류로 이동할수록, 즉 측정단면  $X/Cax=0.143$ 에서 측정단면  $X/Cax=1.0$ 까지는 끝벽 근처의 손실계수가 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 이는 유동장 해석에서처럼 케이스케이드의 통로하류로 갈수록 끝벽에서 생성되는 새로운 경계층이 압력면에서 흡입면쪽으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 측정단면  $X/Cax=0.572$ ,  $X/Cax=0.715$ 에서는 손실계수의 최대값이 두 곳에서 나타나고 있는데 첫번째의 최대값은 통로와류에 의해 발생되어지고 두번째의 최대값은 통로와류와 흡입면상에 존재하는 앞전의 흡입면 와류사이의 저에너지 유체영역에 기인하는 것으로 생각되어진다. 측정단면  $X/Cax=0.857$ 과  $X/Cax=1.0$ 에서도 끝벽 근처에서 최대값이 존재하지만 첫번째의 최대값이 측정단면  $X/Cax=0.572$ ,  $X/Cax=0.715$ 에 비해 적은 것으로 보아 압력면에서 흡입면쪽으로 순압력

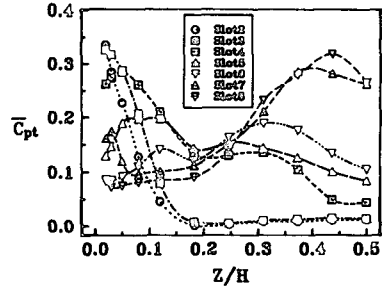


Fig. 7 Spanwise distributions of pitchwise mass-averaged total pressure loss coefficient on the measurement planes

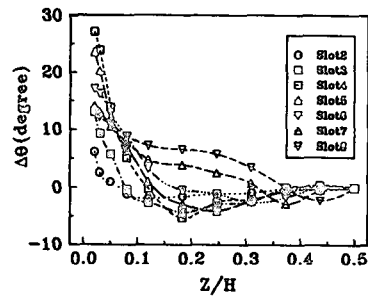


Fig. 8 Spanwise distributions of pitchwise mass-averaged flow deviation angle on the measurement planes

구배에 의해 새로운 경계층의 저에너지 유체가 흡입면쪽으로 이송됨으로써 발생하는 손실로 여겨지고, 또한 2차 유동의 속도벡터에서 나타났듯이 통로와류의 증가로 인해 최대손실값이 미드스팬 방향으로 더욱 더 이동하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 정의된 식(3)으로 나타낸 피치방향의 질량평균 유동편이각을 표현한 것으로  $x$ 축 좌표는  $Z$ 방향의 측정점을 블레이드의 높이( $H$ )로 무차원한 것이고,  $y$ 축은 피치방향의 질량평균 유동편이각을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 케이스케이드 통로내에서 발생하는 전형적인 오버터닝(overturning)과 언더터닝(underturning)이 나타나고, 끝벽 근처에서의 오버터닝값은 하류로 이동할수록, 즉 측정단면  $X/Cax=0.143$ ,  $X/Cax=0.286$ ,  $X/Cax=0.429$ 까지는 증가하였다가 측정단면  $X/Cax=0.429$  이후의 하류에서는 감소하는 경향을 보였고 측정단면  $X/Cax=0.429$ 에서 최대값의 오버터닝과 최대값의 언더터닝의 차가 다른 측정단면에 비해 큰 것으로 보아 통로와류의 강도가 가장 크며 하류로 이동할수록 강도가 약해지고 있음을 알 수 있고 언더터닝의

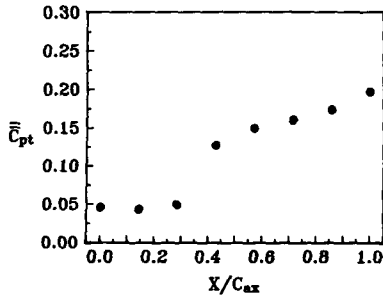


Fig. 9 Streamwise distributions of mass-averaged total pressure loss coefficient on the measurement planes

최대값은 하류로 이동할수록 미드스팬 방향으로 이동하고 있다.

또한 측정단면  $X/C_{ax}=0.572$ ,  $X/C_{ax}=0.715$ ,  $X/C_{ax}=0.857$ ,  $X/C_{ax}=1.0$ 의 최대 언더터닝값의 위치가 Fig.7의 피치방향의 전압손실계수의 두번째의 최대값과 동일한 위치에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 3.5 질량평균 전압손실계수

각 측정단면에서의 질량평균 전압손실계수(mass averaged total pressure loss coefficient)는 다음과 같이 정의되어진다.

$$\bar{C}_{pt} = \frac{\sum_j \sum_i C_{pt}(i, j) \rho U(i, j) \Delta Y_i \Delta Z_j}{\sum_j \sum_i \rho U(i, j) \Delta Y_i \Delta Z_j} \quad (4)$$

각 기호는 3.4에서 정의된 것과 동일하다.

Fig. 9는 각 측정단면에서의 질량평균 전압손실계수를 나타낸 것이다. 측정단면  $X/C_{ax}=0.0$ 에서 측정단면  $X/C_{ax}=0.286$ 까지는 전압손실분포에서 알 수 있었듯이 유입경계층의 전압손실이 주를 이루고 있기 때문에 측정단면  $X/C_{ax}=0.0$ ,  $X/C_{ax}=0.143$ ,  $X/C_{ax}=0.286$ 까지는 완만한 증가를 나타내고 있고, 또한 피치방향의 질량평균 유동편이 각에서 알 수 있었듯이 측정단면  $X/C_{ax}=0.429$ 를 기점으로 하류로 갈수록 통로와류의 강도가 약해지기 때문에 측정단면  $X/C_{ax}=0.429$ 에서 전압손실계수가 급격히 증가하였다가 하류로 갈수록 완만한 폭선으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

저압력 증기터빈의 제 1단 버킷 블레이드를 모델

로 케이스케이드 통로내의 끝벽과 흡입면상의 한계유선들을 가시화하고, 5공 프로브와 레이저 가시화기법을 이용하여 2차 유동의 속도벡터와 2차 유동의 형상을 가시화하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 안장점, 앞전의 압력면 와류와 앞전의 흡입면 와류의 박리선, 코너와류에 의한 박리선, 흡입면상에서 발생하는 통로와류의 박리선 그리고 박리기포영역이 유막법을 통해 관찰되었다.

(2) 각 측정단면의 전압손실계수와 질량평균 전압손실계수를 통해 케이스케이드 통로내의 유입유동의 경계층손실은 케이스케이드 통로내의 전체 손실에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

(3) 피치방향의 질량평균 전압손실계수와 각 측정단면의 전압손실계수를 통해 케이스케이드 하류로 이동할수록 압력면에서 흡입면으로의 순압력구배에 의해 끝벽상의 저에너지 유체가 압력면에서 흡입면으로 이동하고, 이로 인해 끝벽상의 새로운 경계층이 압력면에서 흡입면쪽으로 확대되어진다.

(4) 버킷 블레이드 통로내의 통로와류의 성장과정이 흡입면의 한계유선의 가시화와 유동장 측정으로 명확하게 관찰되었고, 피치방향의 질량평균 유동편이 각에 의해 측정단면  $X/C_{ax}=0.429$ 에서 통로와류의 강도가 가장 컸으며 하류로 이동할수록 강도가 약하게 나타났다.

(5) 레이저 가시화기법을 이용한 가시화사진과 2차 유동의 속도벡터에서 통로와류의 크기는 상류측 입구유동의 속도에 큰 영향을 받지 않았다.

## 후 기

본 연구는 1994년 (주)한국중공업의 연구지원비에 의해 이루어졌으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Jummer, W. J., Vogan, J. H. and Lindinger, R. J., 1985, "Reducing Solid Particle Erosion Damage in Large Steam Turbines," *Proceedings of the American Power Conference*, Vol. 47, pp. 196 ~212.
- (2) Langston, L. S., Nice, M. L., and Hopper, R. M., 1977, "Three-Dimensional Flow within a Turbine Cascade Passage," *ASME Journal of*

- Engineering for Power*, Vol. 99, pp. 21~28.
- (3) Marchal, P. and Sieverding, C. H., 1977, "Secondary Flows within Turbomachinery Bladings," *AGARD CP 214*, pp. 11-1~11-20.
- (4) Langston, L. S., 1980, "Crossflows in a Turbine Cascade Passage," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 102, pp. 866~874.
- (5) Gregory-Smith, D. G. and Graves, C. P., 1983, "Secondary Flows and Losses in a Turbine Cascade," *AGARD CP 351*, pp. 17-1~17-24.
- (6) Yamamoto, A., 1987, "Production and Development of Secondary Flows and Losses in Two Types of Straight Turbine Cascades: Part 1-A Stator Case," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 186~193.
- (7) Yamamoto, A., 1987, "Production and Development of Secondary Flows and Losses in Two Types of Straight Turbine Cascades: Part 2-A Rotor Case," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 194~200.
- (8) Goldstein, R. J. and Spores, R. A., 1988, "Turbulent Transport on the Endwall in Region Between Adjacent Turbine Blades," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 862~869.
- (9) Chung, J. T. and Simon, T. W., 1990, "Three-Dimensional Flow Near the Blade/Endwall Junction of a Gas Turbine: Visualization in a Large-Scale Cascade Simulator," *ASME Paper No. 90-WA/HT-A*, pp. 1~7.
- (10) Chung, J. T., Simon, T. W. and Buddhavarapu, T., 1991, "Three-Dimensional Flow Near the Blade/Endwall Junction of a Gas Turbine: Application of a Boundary Layer Fence," *ASME Paper No. 91-GT-45*, pp. 1~6.
- (11) Lee, H., 1983, "Computational and Experimental Study of Trailing Vortices," Ph. D. Dissertation, VPI & SU, pp. 120~129.
- (12) Joshi, Y. and Gebhart, B., 1983, "An Experimental Study of Plane Plumes in Cold Water," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 248~254.
- (13) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowedell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
- (14) Moore, J. and Ransmayr, A., 1984, "Flow in a Turbine Cascade: Part 1-Losses and Leading-edge Effects," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 400~408.
- (15) Hodson, H. P. and Doming, R. G., 1987, "Three-Dimensional Flow in a Low-Pressure Turbine Cascade at Its Design Condition," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 201~209.
- (16) Sieverding, C. H. and Van Den Bosche, P., 1983, "The Use of Coloured Smoke to Visualize Secondary Flows in a Turbine-Blade Cascade," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 134, pp. 85~89.