

## 5공과 7공 프로브를 이용한 터빈 캐스케이드의 이차유동 측정 결과 비교연구

노영철\* · 이용진\*\* · 박정신\* · 김학봉\*\*\* · 곽재수†

### Comparative Study on the Secondary Flow Measurement in a Turbine Cascade Using 5-hole and 7-hole Probes

Young Cheol Nho\*, Yong Jin Lee\*\*, Jung Shin Park\*,  
Hark-Bong Kim\*\*\*, Jae Su Kwak†

Key Words : 5-hole probe(5공 프로브), 7-hole probe(7공 프로브), Turbine cascade(터빈 캐스케이드), Secondary flow(이차유동)

#### ABSTRACT

Comparative study on the flow measurement by 5-hole and 7-hole probes was conducted in a linear cascade with tip clearances of 2.3%, 3.1%, and 4.4% of the blade span. Calibration range of the 5-hole and the 7-hole probes were  $\pm 25$  and  $\pm 50$  degrees, respectively. Results show that the secondary flow and total pressure loss measured by the 5-hole and 7-hole probes were similar at small tip clearance cases. However, at the tip clearance of 3.1% and 4.4% of the blade span cases, flow angles exceeding the calibration range of the 5-hole probe were observed. Because of the wider calibration range, larger flow angle by strong leakage vortex could be measured by the 7-hole probe.

#### 기호설명

$C$	블레이드 코드
$C_p$	압력계수
$H$	블레이드 스펜
$P$	압력
$S$	블레이드 피치
$T$	블레이드 끝단 간극
$U$	캐스케이드 입구에서의 주유동 속도
$V$	5공 또는 7공 프로브로 측정된 속도
$u, v, w$	$x, y, z$ -방향의 속도성분
$x, y, z$	직교좌표계에서의 좌표축

#### 아래첨자

0	주유동 조건
a	측코드 방향
n	프로브 홀 및 영역 번호
static	주유동의 정압
total	주유동의 전압

#### 그리스 문자

$\theta$	프로브의 피치각
$\rho$	공기밀도
$\psi$	프로브의 요각

#### 1. 서론

5공이나 7공 프로브 등의 멀티홀 프로브(multihole probe)는 압력 측정 결과를 이용하여 유동의 속도, 압력, 유동각 등을 계산할 수 있어 많은 유동장 측정 연구에 활용되어 왔다. 이러한 멀티홀 프로브를 이용한 유동장 측정에서 유동각 측정 범위와 측정 정확도 향상을 위해 많은 연구가 진행되었다. Treaster와 Yocum<sup>(1)</sup>은 5공 프로브의 non-nulling 기법에 대해 보정방법(calibration)을 소개하였고, 열선유속계와 5공 프로브를 이용해 타원형 물체 주위에 흐르는 공기의 경계층을 측정 비교 하였다. 이상우와 윤태진<sup>(2)</sup>은 요각 및 피치각의 보정범위( $\pm 40^\circ$ )에서 원추각과 압력공 방향 등이 5공

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 (국방기술품질원)

\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

프로브의 보정계수에 미치는 영향에 대해 연구를 하였으며 시험된 원추각 범위(45°~90°) 내에서는 원추각이 클수록 측정 결과를 더 정확하게 구할 수 있음을 보였다. Gerner 등<sup>(3)</sup>은 아음속 압축성 유동에서의 7공 프로브의 non-nulling 기법으로 측정된 데이터를 3차 다항식으로 곡선맞춤(curve fitting)을 이용하여 보정하였다. Zilliac<sup>(4)</sup>은 직접적인 보간법을 이용한 7공 프로브의 non-nulling 기법을 제시하였으며, 제작한 7공 프로브로 원통 주위를 흐르는 유동을 측정하여 후류영역에서의 와류를 상세히 측정할 수 있음을 보였다. Takahashi<sup>(5)</sup>는 Zilliac<sup>(4)</sup>의 방법에 준정상(quasi-steady) 이론을 적용하여 비정상 유동에서도 사용가능한 알고리즘을 제시하였다. Wenger 와 Devenport<sup>(6)</sup>는 7공 프로브의 보정과 측정 실험 사이에서 레이놀즈수의 차이에 따른 불확실도 분석을 하였고 난류 유동에서 속도구배와 난류강도가 정확도에 미치는 영향은 매우 적다는 것을 보였다. Sumner<sup>(7)</sup>는 비압축성 유동에서 Gerner 등<sup>(3)</sup>의 다항식 곡선맞춤(polynomial curve fitting) 방법과 Zilliac<sup>(4)</sup>의 직접적인 보간법을 이용한 방법을 비교하였으며 결과로 높은 각도(30°이상)에서는 프로브 팁에서 유동박리가 생겨 Zilliac<sup>(4)</sup>의 방법이 좋다는 것과 낮은 각도(30°이하)에서는 두 가지 방법의 차이가 거의 없음을 보였다. 양재훈과 장조원<sup>(8)</sup>은 7공 프로브를 제작하여 4차 다항식 최소 자승법을 이용한 보정을 하였으며, 이를 토대로 NACA 0012 에어포일 앞전 부근에의 유동흐름을 측정하였다. 또한 열선유속계로 측정된 데이터 값과 비교하여 7공 프로브가 열선유속계에 못지않게 신뢰할 수 있는 작은 오차를 갖는 유동측정센서로 적합하다는 것을 확인하였다.

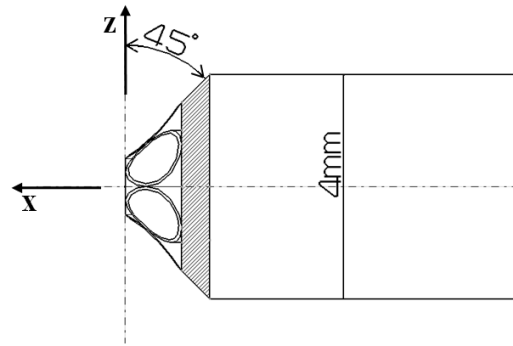
일반적으로 유동각이 ±30°내외인 경우에는 5공 프로브가 사용되어 왔었다. 하지만 물체의 후류나 터빈 캐스케이드 내와 같이 유동각이 큰 유동의 측정에는 측정 가능 범위가 최대 ±80°까지 가능한 7공 프로브가 사용되어야 한다.<sup>(3)</sup> 해외에서는 앞에서 설명한 바와 같이 7공 프로브의 보정과 활용에 대한 많은 연구가 진행되었지만, 국내에서 발표된 논문의 경우 측정결과를 열선유속계로 측정된 결과와 비교하였기 때문에 5공과 7공 프로브의 장단점 비교가 불가능 하였다.

따라서 본 연구에서는 터빈 캐스케이드 내에서 블레이드 끝단 간극에 따른 누설와류를 5공과 7공 프로브를 사용하여 측정하였고, 각 프로브로 측정된 결과를 비교하였다. 이를 통해 유동각이 큰 유동장 측정연구에서 5공과 7공 프로브의 장단점을 제시하였다.

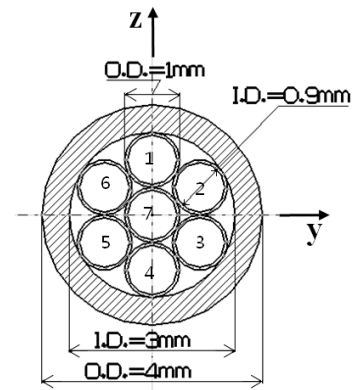
## 2. 5공 및 7공 프로브의 보정

### 2.1 7공 프로브의 제작

5공 프로브는 한 개의 관(tube) 주위로 4개의 관을 정확히 (+)배열로 배치하여야 하기 때문에 제작이 어렵고 제작 가능한 업체가 제한적이며 신뢰성 있는 측정 가능 유동각이 약



(a) 측면도



(b) 정면도

Fig. 1 Side and front views of 7-hole probe

±30°로 제한되는 단점이 있다. 반면에 7공 프로브는 직경이 같은 6개의 관이 같은 직경을 가지는 한 개의 관 주위를 둘러싸는 형태를 가지기 때문에 별도의 정렬작업이 없어도 제작할 수 있다는 장점이 있으며 측정 가능한 유동각이 최대 ±80°에 이른다.<sup>(3)</sup> 또한 Zeiger 등<sup>(9)</sup>에 따르면 프로브의 팁의 형상(원추형, 반구형, 면형)이 프로브의 성능에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 제작이 용이하다는 장점이 있다.

이번 연구에서 사용된 7공 프로브의 측면도와 정면도는 Fig. 1에 나타나 있다. 외경과 내경이 각각 1mm, 0.9mm인 스테인리스 튜브 7개를 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 배열한 후 내경이 3mm, 두께가 0.5mm인 스테인리스 튜브 안에 삽입하고 에폭시(epoxy)로 고정하였다. 프로브의 팁은 45°의 각도를 가지는 원추형 형상으로 제작되었다.

### 2.2 7공 프로브의 보정

본 연구에서 진행한 7공 프로브의 보정은 Zilliac<sup>(4)</sup>의 방법을 토대로 하였으며, 요각 및 피치각의 범위는 ±50°로 하였다. Sumner<sup>(7)</sup>에 따르면 보정간격은 10°이하로 하여야 높은 흐름각 영역에서 오차를 줄일 수 있다고 하였다. 따라서 보정오차를 최소화하기 위해서 본 연구에서는 요각, 피치

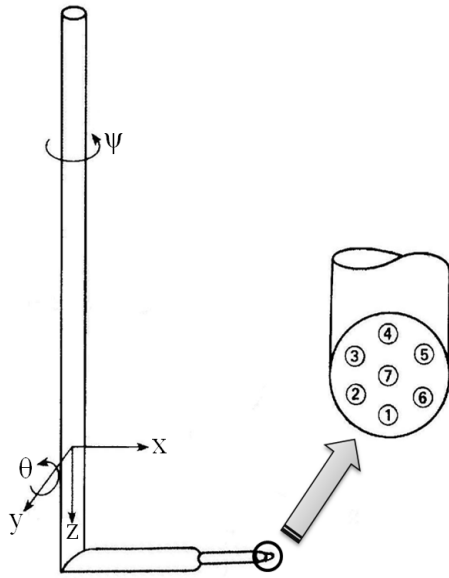


Fig. 2 7-hole probe and angle convention

각 모두 보정간격을 5°로 하였다. Fig. 2는 7공 프로브의 축과 각도의 정의를 나타낸 것이다. 보정절차는 다음과 같다.

- 1) 7공 프로브를 5°간격으로 회전 시키면서 프로브 각 홀의 압력 값과 별도의 피토관을 이용하여  $P_{total}$ ,  $P_{static}$  을 측정한다.
- 2) 각 위치에서 아래의 28(7×4)개의 보정압력상수를 계산한다.

for  $n=1, 2, \dots, 6$ ,

$$C_{P_{r,n}} = \frac{P_n - P_7}{P_n - \bar{P}_n}, \quad C_{P_{t,n}} = \frac{P_{n-1} - P_{n+1}}{P_n - \bar{P}_n},$$

$$C_{P_{skt,n}} = \frac{P_n - P_{total}}{P_n - \bar{P}_n}, \quad C_{P_{stc,n}} = \frac{\bar{P}_n - P_{static}}{P_n - \bar{P}_n},$$

이때,  $\bar{P}_n = \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}$  (1)

for  $n=7$ ,

$$C_{P_{a,7}} = \frac{2(P_4 - P_1) + (P_3 - P_6) - (P_2 - P_5)}{2(P_7 - \bar{P}_7)},$$

$$C_{P_{dn}} = \frac{(P_3 - P_6) + (P_2 - P_5)}{\sqrt{3}(P_7 - \bar{P}_7)},$$

$$C_{P_{skt,7}} = \frac{P_7 - P_{total}}{P_7 - \bar{P}_7}, \quad C_{P_{stc,7}} = \frac{\bar{P}_7 - P_{static}}{P_7 - \bar{P}_7},$$

이때,  $\bar{P}_7 = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 P_n$  (2)

3) 위의 28개의 계수를 이용해 각 홀별 곡선맞춤 그래프를 작성한다. 1번 홀과 7번 홀의 곡선맞춤 그래프를 Figs. 3과 4에 나타내었다.

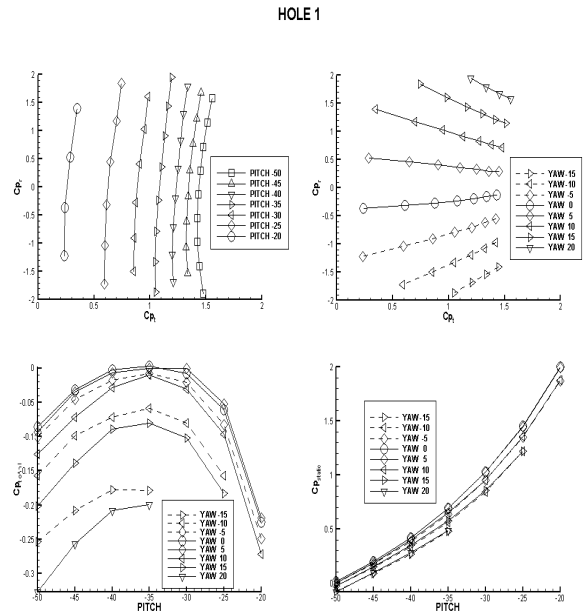


Fig. 3 Calibration coefficients for hole 1 (high flow angle)

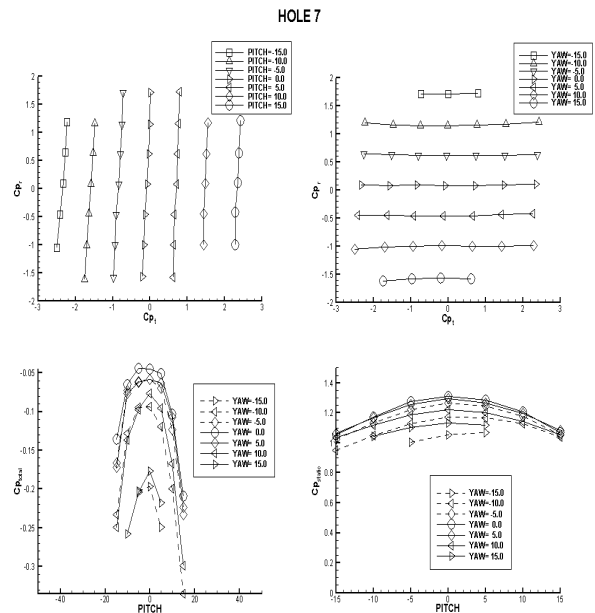


Fig. 4 Calibration coefficients for hole 7 (low flow angle)

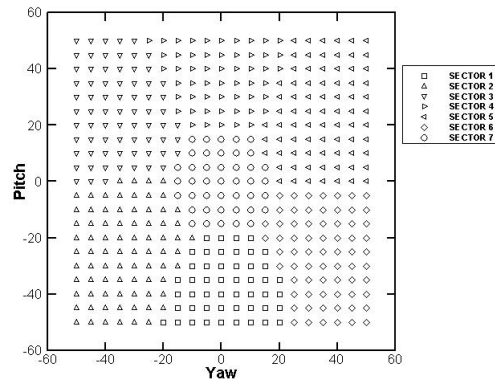


Fig. 5 7-hole probe sectors

4) 측정하고자 하는 유동장을 7공 프로브로 측정한 뒤 각 측정점마다 가장 큰 압력 값을 나타내는 영역(sector)을 선정한다. 요각(yaw), 피치각(pitch)에 따른 가장 큰 압력 값을 가지는 영역은 Fig. 5에 나타나 있다. 7개의 영역은 높은 흐름각 영역(sector 1~6)과 낮은 흐름각 영역(sector 7)으로 구별한다. 높은 흐름각 영역에서는 식 (1)을 사용하였고 낮은 흐름각 영역은 식 (2)를 사용하였다.

5) 정해진 영역의 압력 계수들을 구한다.

6) 절차 3)에서 구한 곡선 맞춤 그래프를 이용해  $\theta'$ ,  $\psi'$  값을 구한다.

7) 절차 6)에서 구한  $\theta'$ ,  $\psi'$  값을 이용하여  $C_{P_{tot}}'$ ,  $C_{P_{static}}'$  값을 구한다.

8) 절차 7)에서 구한  $C_{P_{tot}}'$ ,  $C_{P_{static}}'$  값을 절차 2)의  $C_{P_{tot}}$ ,  $C_{P_{static}}$  식에 대입해  $P_{total}'$ ,  $P_{static}'$  값을 구한다.

9) 속도의 크기( $|V|$ )와 성분은 식 (3)과 같다.

$$|V| = \sqrt{\frac{2(P_{total}' - P_{static}')}{\rho_0}}$$

$$u = |V| \cos\theta' \cos\psi'$$

$$v = |V| \sin\theta'$$

$$w = -|V| \cos\theta' \sin\psi' \quad (3)$$

### 2.3 5공 프로브의 보정

본 연구에서 진행한 5공 프로브의 보정은 Treaster와 Yocum<sup>(1)</sup>의 방법을 토대로 하였으며, 요각 및 피치각을  $\pm 25^\circ$ 의 범위에서  $5^\circ$ 간격씩 이동시키면서 진행되었다. 보정 절차와 유동각 및 속도 계산 방법은 이기선<sup>(10)</sup>에 나타나있다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 실험 장치

시험 장치는 크게 송풍기와 입구부, 시험부, 출구부, 측정 장비 등으로 구성되었다. 송풍기는 불어내기 방식으로 입구부를 거쳐 시험부로 일정한 유동을 공급한다. 시험부에는 5개의 블레이드로 구성된 선형 캐스케이드를 설치하였으며, 이차 유동 측정을 위한 5공 프로브 또는 7공 프로브의 측정 장비를 삽입하였다. 출구부에는 외곽 블레이드의 뒤쪽에 유동조절판을 설치하여 캐스케이드를 통과하는 유동의 주기성을 확보할 수 있도록 하였다. Fig. 6에는 시험부에 해당하는 캐스케이드의 개략도를 나타내었으며, 주요 사양은 Table 1과 같다.

피토관, 5공 프로브(또는 7공 프로브)의 압력들은 9개의 압력센서(정밀도= $\pm 0.15\%$ FS, 측정범위= $\pm 2,000$  Pa, SENSYS)를 이용하여 측정하였다. 측정된 압력 데이터의 처리 및 저장과 프로브 이송을 위한 2축 자동이송장치의 제어를 위해 National Instrument사의 LabVIEW를 기반으로 전용 프로

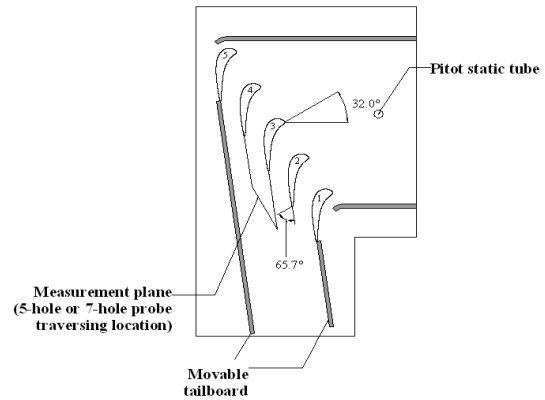


Fig. 6 Tested linear cascade

Table 1 Specification of the cascade

Blade chord	$C=126$ mm
Blade pitch	$S=102.7$ mm
Blade span	$H=160$ mm
Aspect ratio	$H/C=1.27$
Solidity	$C/S=1.23$
Number of blade	$m=5$
Cascade inlet angle	$\alpha_{in}=32^\circ$
Cascade exit angle	$\alpha_{out}=-65.7^\circ$
Cascade turning angle	$\Delta\alpha=97.7^\circ$

그램을 제작하여 운용하였다. 캐스케이드 입구유동 속도는 15 m/s, 출구유동 속도는 29.5 m/s이며, 블레이드 코드 길이와 출구유동 속도를 기준으로 한 레이놀즈수,  $Re_c$ 는  $2.48 \times 10^5$ 이다. 자세한 실험 장치에 대한 설명은 이기선 등<sup>(11)</sup>에 나타나있다.

측정 면은 블레이드 뒷면으로부터 코드길이 만큼 떨어진 하류의 3번 블레이드와 4번 블레이드 사이에 설치하였다. 측정영역은 피치방향으로 105 mm, 스패방향으로 미드스팬과 끝단 사이의 75 mm로 설정하고, 피치방향 및 스패방향으로 각각 3mm의 등간격으로 유동장을 측정하였다. 본 연구에서는 높은 유동각을 가지는 유동 흐름에서 5공과 7공 프로브의 성능을 비교하기 위해 끝단 간극을 블레이드 스패에 대해 각각 2.3%, 3.1%, 및 4.4%로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 결과의 95% 신뢰도의 오차범위(uncertainty interval)를 계산하였으며 Table 2에 나타내었다.<sup>(12)</sup>

Table 2 Uncertainty interval

	$P_{total}'$ [Pa]	$P_{static}'$ [Pa]	$V$ [m/s]	$\psi$ [°]	$\theta$ [°]	$C_{P_{tot}}$
5-hole	$\pm 2.91$	$\pm 3.73$	$\pm 0.58$	$\pm 1.24$	$\pm 0.94$	$\pm 0.05$
7-hole	$\pm 2.95$	$\pm 4.88$	$\pm 0.63$	$\pm 1.24$	$\pm 1.77$	$\pm 0.05$

\* based on 95% confidence level

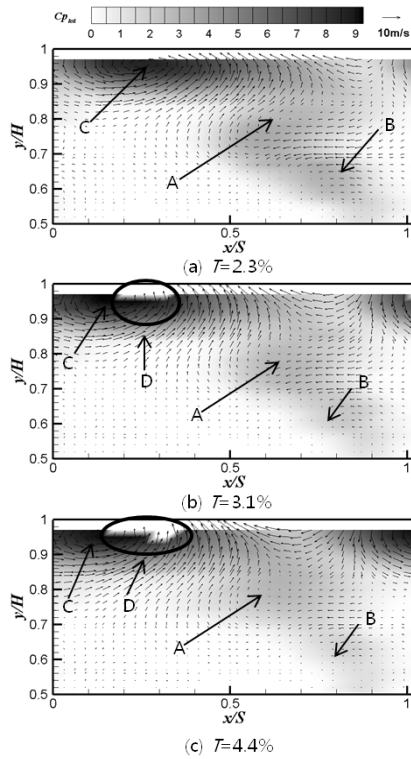


Fig. 7 Total pressure loss coefficient and secondary flow measured by 5-hole probe, (a)  $T=2.3\%$ , (b)  $T=3.1\%$  and (c)  $T=4.4\%$

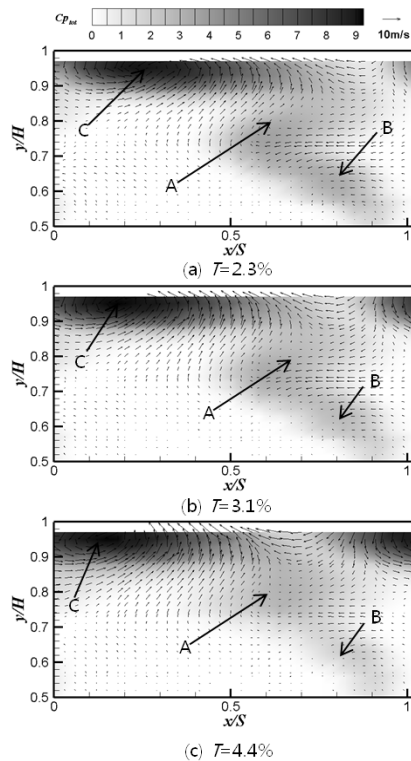


Fig. 8 Total pressure loss coefficient and secondary flow measured by 7-hole probe, (a)  $T=2.3\%$ , (b)  $T=3.1\%$  and (c)  $T=4.4\%$

### 3.2 실험 결과

Figs. 7과 8은 각각 평면 팁 블레이드 하류의 측정 면에서 5공 프로브와 7공 프로브로 측정된 전압손실계수와 2차 유동을 나타낸 것이다. 이때 전압손실계수,  $C_{p_{tot}}$ 는 식 (4)로 정의하였다.

$$C_{p_{tot}} = \frac{P_{total0} - P_{total}'}{0.5 \rho_0 U_0^2} \quad (4)$$

여기서  $P_{total0}$ 는 캐스케이드 입구에서 측정된 전압이고  $P_{total}'$ 은 7공 프로브로 측정된 전압이다.

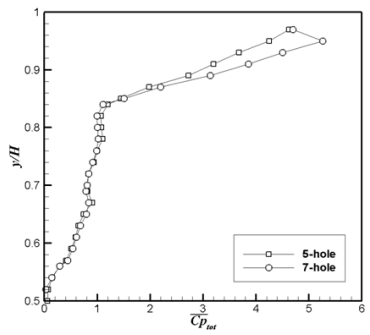
Figs. 7과 8에서 캐스케이드 통로의 곡률효과로 인해 시계방향의 통로와류(A)가 관찰되었다. 또한 스펜 방향으로 통로와류 아래쪽에는 블레이드 뒷전에서 통로와류의 박리로 인해 발생하는 반시계 방향의 뒷전박리와류(B)가 위치하였고, 끝단 부근의 중심부에 끝단 간극을 통과하는 누설유동으로 인한 누설와류(C)가 관찰되었다. 끝단 간극이 커짐에 따라((a)→(c)) 누설와류가 이웃한 블레이드의 압력면 부근까지 이동하면서 보다 강해지고, 통로와류는 상대적으로 그 강도가 약화되는 것을 볼 수 있다.

5공 프로브로 측정된 Fig. 7과 7공 프로브로 측정된 Fig. 8을 비교할 때, 전압손실계수와 이차유동의 분포는 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만 끝단 간극이 커짐에 따라 누설와류에 세기가 증가하게 되어 측정된 유동각이 5공 프로브의 보정 한계( $\pm 25^\circ$ )를 넘어선 부분(Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)의 D)이 나타난다. 이 부분에서도 5공 프로브의 보정곡선을 외삽(extrapolation)하여 유동각 계산이 가능하지만 유동각이 보정 영역을 벗어났기 때문에 결과의 정확도는 낮을 것으로 판단된다. 하지만 Fig. 8(b)과 Fig. 8(c)에서 볼 수 있듯이 끝단 간극이 큰 경우에도 7공 프로브는 유동각이 큰 누설와류의 속도와 압력의 측정이 가능하였다.

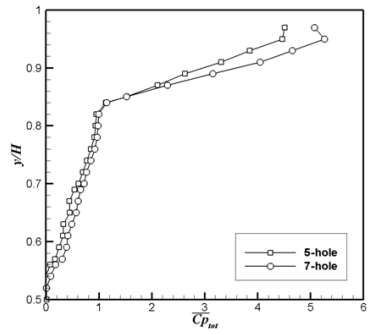
이상에서와 같은 5공 프로브와 7공 프로브의 측정 결과를 정량적으로 비교하기 위해 피치방향으로 질량 평균된 전압손실계수( $\overline{C_{p_{tot}}}$ )<sup>(13)</sup>를 식 (5)로 정의하였고 Fig. 9에 나타내었다.

$$\overline{C_{p_{tot}}} = \frac{\sum_j (\rho C_{p_{tot}} V_a dA)_j}{\sum_j (\rho V_a dA)_j} \quad (5)$$

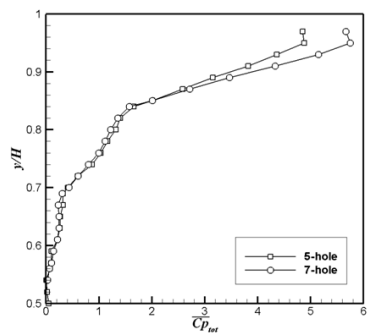
Fig. 9에서  $y/H$ 가 커짐에 따라  $\overline{C_{p_{tot}}}$ 도 증가하는 경향을 보이며 이는 두 개의 영역으로 나누어 해석이 가능하다. 이 두 개의 영역은 통로와류와 뒷전박리와류로 인하여 완만하게 증가하는 영역과 누설와류로 인해 급격하게 증가하는 영역이다. 끝단 간극이 작은 경우( $T=2.3\%$ ,  $3.1\%$ , Fig. 9 (a), (b))에서는  $y/H \leq 0.85$ 까지는 통로와류와 뒷전박리와류에 의해



(a)  $T=2.3\%$



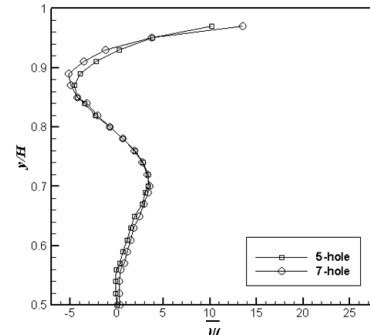
(b)  $T=3.1\%$



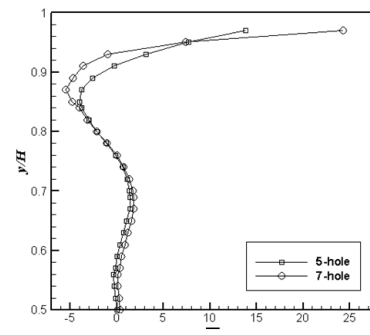
(c)  $T=4.4\%$

Fig. 9 Profiles of pitch-wise mass-averaged total pressure loss coefficient

$y/H$ 가 증가함에 따라  $\overline{Cp_{tot}}$ 도 증가하다가  $y/H > 0.85$  에서 누설와류에 의한 영향으로 인해  $y/H$ 가 증가함에 따라  $\overline{Cp_{tot}}$ 가 급격하게 증가하는 반면에 끝단 간극이 큰 경우( $T=4.4\%$ , Fig. 9 (c))에서는 두 영역의 구분이  $y/H=0.7$  부근에서 나누어지는 것을 볼 수 있다. 이는 끝단 간극이 증가함에 따라 누설와류의 크기가 커져 누설와류의 영향이  $y/H=0.7$ 인 영역까지 미치기 때문이며 이러한 경향은 Fig. 7 에서도 확인할 수 있다. 또한 팁 간극이 증가함에 따라 누설와류의 세기도 커지게 되어  $\overline{Cp_{tot}}$ 의 최댓값도 증가하였다. 5공 프로브와 7공 프로브로 측정된 결과를 비교하였을 때 높은 유동각을 가지는 누설와류 영역에서 5공 프로브와 7공 프로브로 측정된  $\overline{Cp_{tot}}$ 이 차이를 보였으며 상대적으로 5공 프로브로 측정된  $\overline{Cp_{tot}}$ 이 7공 프로브로 측정된  $\overline{Cp_{tot}}$ 보다 더 낮게 나타났다(7공 프

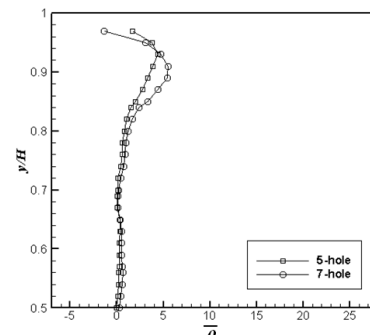


(a)  $T=2.3\%$

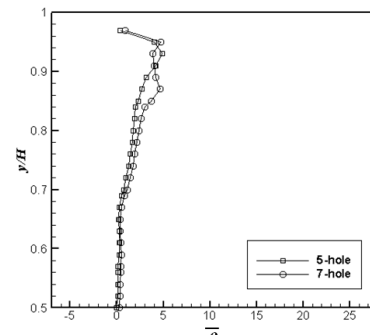


(b)  $T=4.4\%$

Fig. 10 Profiles of pitch-wise mass-averaged yaw angle



(a)  $T=2.3\%$



(b)  $T=4.4\%$

Fig. 11 Profiles of pitch-wise mass-averaged pitch angle

로브의 측정값을 기준으로 최대 19%의 차이).

5공과 7공 프로브 모두 계산과정에서 피치각과 요각을 구한 후 이 유동각을 통해서 압력을 구하기 때문에 높은 유동각 흐름에서 나타나는 5공과 7공 프로브의 측정값 차이는 유동의 유동각에서 비롯된다고 볼 수 있다. 따라서 각각의 프로브로 측정된 유동각 차이를 보이기 위해 피치방향으로 질량 평균된 요각( $\bar{\psi}$ )과 피치각( $\bar{\theta}$ )을 식 (6)과 (7)로 정의하였다.

$$\bar{\psi} = \frac{\sum_j (\psi V_a dA)_j}{\sum_j (V_a dA)_j} \quad (6)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_j (\theta V_a dA)_j}{\sum_j (V_a dA)_j} \quad (7)$$

Fig. 10과 11은 식 (6)과 (7)로 정의된  $\bar{\psi}$ 와  $\bar{\theta}$ 을 나타낸다. Fig. 10에서 누설와류의 영향으로  $y/H=1.0$  근처에서의  $\bar{\psi}$ 의 절댓값이 크게 나타난다. 또한 이 영역에서 5공 프로브로 측정된  $\bar{\psi}$ 와 7공 프로브로 측정된  $\bar{\psi}$ 이 차이를 보였으며 그 절댓값도 7공 프로브로 측정된 값이 더 크게 나타났다. 또한 팁 간극이 큰 경우( $T=4.4\%$ , Fig. 10 (b))에서 차이는 팁 간극이 작은 경우( $T=2.3\%$ , Fig. 10 (a))에 비해 더 크게 나타났다. Fig. 11에서도 누설와류의 영역인  $y/H=0.85$ 에서 5공과 7공 프로브로 측정된  $\bar{\theta}$ 의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 유동각의 차이로 인해 결국 Fig. 9의  $\overline{Q_{tot}}$ 의 차이가 나타나게 된다.

5공 프로브로 해석할 때 보정곡선의 큐빅 스플라인 보간법(cubic spline interpolation)을 사용하였다. 따라서 보정한계 근처( $20^\circ \sim 25^\circ$ )에서는 곡선보간이 아닌 직선보간으로 인한 오차와 보정영역을 벗어난 영역( $\pm 25^\circ$  이상)에서는 보정곡선의 외삽으로 인한 오차가 발생하며 이러한 이유로 Figs. 9~11에서 유동각이 큰 영역에서 5공 프로브와 7공 프로브의 측정값이 차이를 보이는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 터빈 캐스케이드에서 발생하는 누설와류 통로와류 등 이차유동 측정을 위해 5공 프로브와 7공 프로브를 사용하였다. 실험은 선형 캐스케이드에서 측정되었고 끝단 간극은 블레이드 스패의 2.3%, 3.1%, 4.4%로 변경하면서 진행되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 터빈 캐스케이드의 이차유동 및 전압손실 측정 결과 끝단 간극이 작은 경우 5공 프로브와 7공 프로브의 측정값이 서로 잘 일치하였다.
- 2) 끝단 간극이 큰 경우 누설와류의 유동각이 5공 프로브

의 보정영역을 벗어나는 영역이 발생하였으나 7공 프로브는 넓은 보정영역을 가지기 때문에 보정영역 내에서 해석이 가능하였다.

- 3) 피치방향으로 질량 평균된 전압손실계수에서 통로와류와 뒷전바리와류로 인한 전압손실 구간과 누설와류로 인한 전압손실 구간이 확인되었다. 미드스팬 근처에서는 5공 프로브와 7공 프로브로 측정된 결과가 유사하지만 팁 근처에서는 7공 프로브의 측정값이 최대 19% 크게 나타났다.
- 4) 피치방향으로 질량 평균된 요각에서 팁 근처 누설와류영역에서 5공 프로브에 비해 7공 프로브로 측정된 결과의 절댓값이 더 크게 나타났다.
- 5) 높은 유동각을 가지는 유동측정에 있어 5공 프로브는 큐빅 스플라인 보간법을 이용하여 해석을 하였기 때문에 보정한계 근처와 보정한계를 넘어선 영역에서 오차가 크게 나타났다. 반면에 넓은 보정영역을 가지는 7공 프로브는 보정영역 안에서 해석이 가능하기 때문에 보다 높은 유동각 측정에서 상대적으로 높은 신뢰성을 가지는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NO. 2009-0058609)을 받아 수행되었음.

#### 참고문헌

- (1) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-hole Probes," ISA Transaction, Vol. 18, No. 3, pp. 23~34.
- (2) 이상우, 윤택진, 1997, "5공프로브의 보정에 영향을 주는 유동변수들에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 (B), Vol. 21, No. 5, pp. 637~649.
- (3) Gerner, A. A., Maurer, C. L. and Gallington, R. W., 1984, "Non-nulling Seven-hole Probes for High Angle Flow Measurement," Experiments in Fluids, Vol. 2, No. 2, pp. 95~103.
- (4) Zilliac, G. G., 1993, "Modeling, Calibration, and Error Analysis of Seven-hole Pressure Probes," Experiments in Fluids, Vol. 14, No. 1-2, pp. 104~120.
- (5) Takahashi, T. T., 1997, "Measurement of Air Flow Characteristics Using Seven Hole Cone Probes," AIAA paper 97-0600.
- (6) Wenger, C. W. and Devenport, W. J., 1997, "A Seven Hole Pressure Probe Measurement System and Calibration Method Utilizing Error Tables," AIAA paper 98-0202.
- (7) Sumner, D., 2002, "A Comparison of Data-reduction

- Methods for a Seven-hole Probe,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 523~527.
- (8) 양재훈, 장조원, 2006, “7공 압력 프로브의 교정 및 개발,” *한국항공우항공학회*, Vol. 14, No. 1, pp. 43~48.
- (9) Zeiger, M. D., Chalmers, L. P. and Telionis, D. P., 1998, “Tip Geometry Effects on Calibration and Performance of Seven-hole Probes,” *AIAA paper 98-2810*.
- (10) 이기선, 2009, “팁 형상이 가스터빈 블레이드의 이차유동에 미치는 영향에 관한 연구,” *한국항공대학교 석사학위논문*.
- (11) 이기선, 박승덕, 노영철, 김학봉, 곽재수, 전용민, 2009, “블레이드 팁 형상이 터빈 캐스케이드 전압손실에 미치는 영향에 대한 연구,” *유체기계저널*, Vol. 12, No. 2, pp. 39~45.
- (12) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. Dowdell, R. B., 1985, “ASME Measurement Uncertainty,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, No. 2, pp. 161~165.
- (13) Lee, S. W. and Chae, B. J., 2008, “Effects of squealer rim height on aerodynamic losses downstream of a high-turning turbine rotor blade,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, No. 8, pp. 1440~1447.