

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.8.735

분사영역과 터빈익형 위치에 따른 표면압 변화에 관한 실험적 연구

최형준*, 박영하*, 김재실**, 조수용***

An Experimental Study of Surface Pressure on a Turbine Blade in Partial Admission

Hyoung-Jun Choi*, Young-Ha Park*, Chaesil Kim** and Soo-Yong Cho***

ABSTRACT

In this study, the distribution of surface pressure was measured in a steady state on a turbine blade which was moved the injected region and receded the stagnation region using a linear cascade apparatus. Axial-type blades were used and the blade chord was 200mm. The rectangular nozzle was applied and its size was 200mm x 200mm. The experiment was done at 3×10^5 of Reynolds number based on the chord. The surface pressures on the blade were measured at three different nozzle angles of 58° , 65° and 72° for off-design performance test. In addition, three different solidities of 1.25, 1.38 and 1.67 were applied. From the results, the low solidity caused the low pressure on the blade suction surface at entering region and the reverse rotating force was generated at the low nozzle angle. The positive incidence also made the pressure lower on the suction surface at entering region.

초 록

본 연구에서는 직선형 터빈 캐스케이드 장치를 이용하여 분사영역으로 진입하고 퇴각하는 익형의 허브, 평균반경, 팁에 형성되는 표면에서의 압력을 정상상태에서 측정하였다. 익형은 축류형으로 코드가 200mm이며, 분사 노즐은 단면은 사각형으로 그 크기는 200mm x 200mm이다. 실험은 코드 기준으로 레이놀즈수 3×10^5 에서 수행되었다. 탈설계 성능을 측정하기 위하여 노즐의 설치각을 58° , 65° 와 72° 로 변경하면서, 노즐의 설치각 변화에 대한 익형에서 표면압 변화의 특성을 파악하였다. 또한 현절비를 1.25, 1.38, 1.67로 변경하면서 현절비 변화에 대한 익형의 표면압 변화를 측정하였다. 실험의 결과에서 익형이 분사영역으로 진입할 때 현절비가 적을수록 흡입면에서는 표면압력의 감소가 발생되었고 낮은 노즐설치각인 경우에는 역회전방향의 힘이 형성되었다. 아울러 양의 입사각으로 익형이 분사영역으로 진입할 때 흡입면의 앞부분에 낮은 압력이 형성되었다.

Key Words : Turbine Surface Pressure(터빈표면압), Linear Cascade(직선형 캐스케이드), Partial Admission(부분분사), Axial Turbine(축류형터빈)

I. 서 론

터빈을 부분분사로 작동하는 것은 작동조건에 따라 전분사보다 유리한 경우가 있다. 예를 들어, 동일터빈에서 질량유량을 줄여서 작동하여야 하는 경우에 익형의 높이를 줄이지

† 2011년 01월 11일 접수 ~ 2011년 7월 15일 심사완료

* 정회원, 경상대학교 항공공학과 대학원

** 정회원, 창원대학교 기계공학과

*** 정회원, 경상대학교 항공기부품기술연구센터

교신저자, E-mail : sycho@gnu.kr

경남 진주시 가좌동 900

않고 부분분사를 하는 것이 익형의 높이를 줄여서 전분사를 하는 경우보다도 손실이 적어지는 장점이 있으며, 아울러 시스템의 변경에 대한 비용 감소뿐만 아니라 터빈에서의 평균 반경이 줄어들지 않아서 높은 토크를 얻을 수 있다. 또한 높은 압력에서 작동하는 터빈에서 감소된 출력을 얻고자 하는 경우에도 팽창비를 조절하는 것보다, 분사면적으로 조절하는 것이 효과적이다. 따라서 실제 많은 터빈들이 부분분사로 운전되고 있으며 외부로 부터의 부하변동에 대응하고 있다.

부분분사에 대한 많은 선행연구들이 있으나, 부분분사에 의하여 분사량의 변화를 주었을 때 발생하는 출력변화에 관한 연구[1-5]를 많이 수행하였으며, 또한 단단 터빈에서 단수의 변화에 따른 부분분사의 영향에 대한 연구들이 수행되었다[6-8]. 아울러 이러한 부분분사로 운전할 경우에 출력 변화에 관한 성능예측의 연구[9-12]도 많이 수행되었다. 이러한 연구들은 시스템에 관한 연구로서, 기존의 장치에서 부분분사로 운전하였을 경우에 얻어지는 출력의 측정과 예측에 관한 연구들이다. 하지만 부분분사의 조건이 설계점에서 크게 벗어난 경우에는 측정값과 예측값 사이에 상당한 차이가 발생하였다.

보다 향상된 예측모델의 개발을 위하여, 부분분사영역에서 작동하는 익형의 부하상태에 관한 연구가 필요하다. 이를 위하여 부분분사에서 작동하는 익형의 표면압과 익형의 자오면에서의 유동을 캐스케이드 실험장치를 이용하여 Yahya[13-14]가 측정하였으며, 퇴각영역에서 익형 흡입면에서의 급격한 압력의 증가는 유동의 박리에 의한 것으로 판단하였다. Boulbin et al.[15]은 분사노즐을 회전하고 동익을 정지하여 부분분사의 효과를 얻었으며, 익형은 부분분사가 시작되는 지점에서 회전력은 줄어들었다가 이 영역을 지나면서 회전력은 급격하게 증가함을 보였다. Cho et al.[16]은 캐스케이드 장치에서 부분분사 영역에서 익형의 위치에 따른 회전력을 측정하였으며, 부분분사가 끝나가는 지점에서 최고치의 회전력이 발생됨을 보여주었다. Skopek et al.[17]은 부분분사에서 측방향의 거리, 노즐의 위치 등에 대하여 실험을 수행하였으며, 노즐과 동익 간의 간격이 줄어들수록 효율은 증대하며 부분분사량이 감소할수록 효율과 속도비의 최적값이 감소하게 됨을 보였다.

회전하는 터빈에서 부분분사에 따른 비정상 상태에서 익형주위의 유동장에 관한 연구들

이 CFD를 활용하여 수행되었으며[18], 부분분사의 영역에 진입하는 경우와 퇴각하는 경우에 따라 익형표면에서의 압력이 다르게 형성됨을 보였다. 또한 이러한 유동이 단단터빈에서 연속되는 터빈로터 입구에서의 불균일한 유동장을 형성하게 되고, 부분분사에 따른 손실증가의 원인을 보여주었다.

본 연구에서는 터빈의 익형이 정체영역에서 부분분사 영역으로 진입하는 위치부터 퇴각하는 위치까지 변경하면서 분사영역과의 상대적인 위치 변화에 따라 익형의 흡입면과 압력면에서 형성되는 표면압을 캐스케이드 실험장치를 이용하여 측정하고자 한다. 아울러 터빈의 중요 설계변수인 현질비(solidity)와 노즐 설치각의 변화에 따라 익형에 형성되는 표면압의 차이를 측정하여 이들 설계변수가 부분분사에서 작동하는 익형의 작동력에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 또한 부분분사에서 작동하는 터빈의 성능향상과 성능예측과 관련된 중요한 변수들을 파악하고자 한다.

II. 실험장치

2.1 캐스케이드장치

본 연구에 적용된 직선형 캐스케이드의 개략적 형상을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 노즐은 사각형 노즐이 적용되었으며, 노즐단면의 크기는 200 mm x 200 mm이다. 분사공기의 공급은 30kW의 개방형 풍동이 적용되었으며, 익형을 지난 분사공기는 대기로 방출된다. 아울러 캐스케이드 실험장치는 부분분사 실험을 위한 장치이므로 익형이 노즐의 분사영역으로 진입하는 정체영역과 퇴각하는 정체영역의 좌우 구간도 개방되어 있다. 실험에서 익형에 의한 정체영역의 상태를 유지하기 위하여 익형을 다수 제작하여 분사영역을 벗어난 영역에도 각각 7개 정도가 배치되도록 하였다.

노즐설치각 변화의 특성을 파악하기 위하여 3개의 노즐이 제작되었으며, 현질비를 조정하

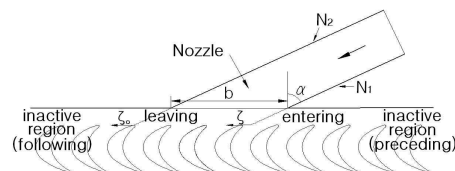


Fig. 1. Linear cascade for the experiment



Fig. 2. Picture of the linear cascade apparatus

기 위하여서는 익형의 피치를 변경하였다. 익형이 설치되는 아래 지지대에는 익형과 동일한 홈이 가공되어 있고, 피치가 서로 다른 지지대 3개를 제작하였으며, 실험에서는 익형을 이 홈에 삽입하여 설치한다. 따라서 피치 변경에 의한 정밀한 현절비의 조정이 이루어졌다. 설계점에서의 노즐 설치각(α)은 65° 이며 현절비(σ)는 1.38 이나, 실험에서는 탈설계 성능을 고려하여 노즐 설치각을 58° , 65° 와 72° 로 변경하여 실험을 수행하였으며, 현절비는 1.25, 1.38, 1.67 로 변화를 주어 현절비의 변화에 따른 특성을 측정하였다.

노즐입구에서는 열선유속계를 사용하여 유동장을 측정하였으며, 균일한 유동임을 확인하였다. 유동장은 노즐단면에서 $\pm 1\%$ 이하의 균일한 유동장이 얻어졌으며, 난류 강도는 0.3 ~ 0.4% 수준이었다. 노즐출구와 익형간의 축방향 간격은 코드의 35%로 설정하였으며, 팁간극은 익형스팬의 2.5%로 설정하여 실험을 수행하였다. Fig. 2는 실험장치의 전체 형상을 보여주고 있다.

2.2 익형의 압력홀

익형은 D사 터빈의 HP 단 동익 형상이 적용되었다. 실험에서는 익형의 코드를 200 mm로 제작하였으며, 스테거각은 10.52° 이다. Fig. 3은 익형의 압력면과 흡입면에 설치된 압력탭들의 위치를 보여주고 있으며, 앞전에서 뒷전까지 흡입면과 압력면의 표면을 따라 측정된 거리에 대하여 각각 10%의 거리에 위치하고 있다. Table 1에서의 압력탭 위치는 축방향(x)으로의 길이에 대하여 익형의 축방향 코드길이(Cx)로 무차원화한 값이다. 압력탭은 표면에 수직하게 가공되었으며, 홀의 지름은 0.8mm 이다. 팁, 평균반경, 허브의 각 세 위치에서 각각 18개씩 설치하였으나 뒷전부분이 아주 얇은 구조이기 때문에 압력면의 마지막 측정

Table 1. Axial locations of pressure taps normalized by the blade axial chord

Pressure taps	Suction (x/Cx)	Pressure (x/Cx)
S1, P1	0.046	0.106
S2, P2	0.125	0.201
S3, P3	0.232	0.320
S4, P4	0.383	0.433
S5, P5	0.558	0.555
S6, P6	0.705	0.672
S7, P7	0.810	0.771
S8, P8	0.891	0.856
S9, P9	0.954	0.927

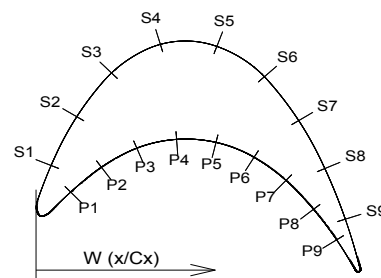


Fig. 3. Distribution of pressure taps on the tested turbine blade

홀(P9)은 압력스캐너에 연결되지 않았다. 또한 비교적 압력변화가 완만한 변화를 나타내는 압력면에서의 P3과 P5의 위치에도 측정하지 않았다.

압력의 측정은 정확도가 0.05% 이내의 오차를 가지는 다채널장치인 PSI의 9016 압력스캐너를 사용하였으므로 동시에 모든 압력값을 측정하였다. 실험은 작동조건과 상사가 되도록 익형코드 기준으로 레이놀즈수 3×10^5 에서 수행하였으며, 각각의 실험을 3번씩 수행한 후 평균하여 실험의 반복정확도를 향상하였다.

III. 결과 및 토의

3.1 설계점에서의 표면압

노즐의 분사설치각(α)을 65° 로 유지하고 현절비(σ)를 1.38로 설정하여 익형을 이동하면서 유동이 정상상태가 되었을 때 익형표면에서의 정압력계수를 측정하였다. 측정은 익형의 높

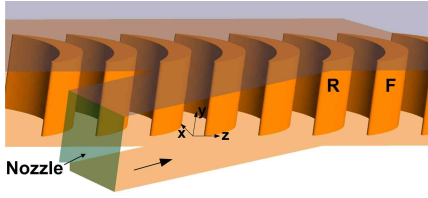
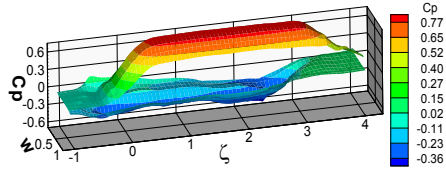
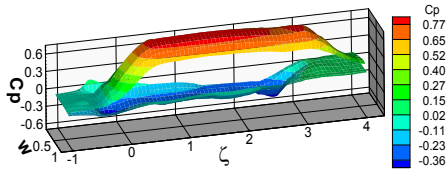


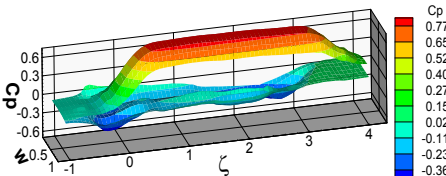
Fig. 4. Coordinate at the linear cascade apparatus



(a) hub



(b) midspan



(c) tip

Fig. 5. Variation of static pressure coefficient at $\alpha=65^\circ$ and $\sigma=1.38$

이(H) 대비 스패방향의 거리(y)에 따라 허브 ($y/H=8\%$), 평균반경($y/H=49\%$), 팁($y/H=90\%$)에서 동시에 측정하였다.

수평축에서의 ζ 는 z 방향의 거리를 피치(s)로 무차원화한 값이다. z 방향은 동익의 회전 방향으로 Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 익형의 이동방향이다. 아울러 x 방향은 축방향이며, y 방향은 스패방향이다. 축방향에서의 w는 익형표면에서 측정되는 압력탭의 x방향의 위치를 축방향 코드로 무차원화 한 변수이다. 좌표의 원점은 Fig. 4에서 좌표축의 위치이며, 이 위치는 Fig. 1에서 노즐 측면 N_1 의 연장선

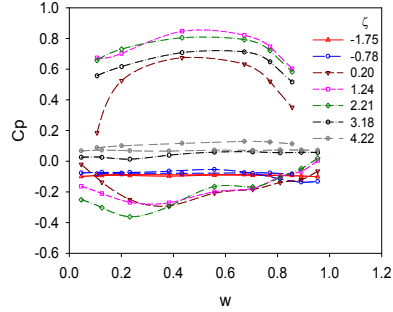


Fig. 6. Static pressure coefficient at the midspan ($\alpha=65^\circ$ and $\sigma=1.38$)

과 익형의 앞전이 z 방향으로 이동하는 가상선과 만나는 위치가 된다. 따라서 이 위치의 의미는 익형이 노즐의 분사영역에 진입하게 되는 위치를 나타내며, 반면에 노즐의 측면 N_2 의 연장선과 익형의 앞전이 z 방향으로 이동하는 가상선과 만나는 위치는 분사영역을 벗어나게 되는 위치를 의미한다. 따라서 분사영역의 폭은 $\zeta=0$ 에서 $\zeta=3.286$ 까지이다.

Fig. 5는 각 위치에서의 표면압 변화를 익형의 이동위치에 따라 보여주고 있다. Fig. 6은 평균반경에서의 익형 위치에 따른 정압력계수를 2차원으로 표현한 것이다. Fig. 5~6에서 윗부분과 아래부분은 각각 압력면과 흡입면에서의 정압력계수 분포를 나타내며, 정압력계수는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Cp = \frac{Ps_{local} - Ps_{in}}{Pt_{in} - Ps_{in}} \quad (1)$$

식 (1)에서의 Pt 와 Ps 는 각각 전압력과 정압력을 의미하며, 하첨자 in 과 $local$ 은 각각 노즐 입구와 측정되는 익형의 표면을 의미한다. 실험에서 캐스케이드 익형의 이동은 현절비가 1.38인 경우에 $\zeta=0.07$ 의 거리만큼씩 이동을 하고 유동이 안정화된 후에 측정을 하여 정상상태에서의 측정이 이루어졌다.

Fig. 5에서 익형의 높이에 따라 허브, 평균반경 및 팁에서 측정된 표면압력의 경우에는 큰 차이를 보이지 않으나, 익형이 분사영역으로 진입하는 경우에 허브에서 측정된 흡입면에서의 표면 정압계수의 변화가 평균반경과 팁에서 측정된 표면 정압계수 분포보다 다소 완만한 변화를 보여 주었다. 이는 익형 유로에서 허브측에서 형성되는 2차 유동의 흐름과 바닥면에서의 경계층으로 인하여 흡입면에서의 압력감소가 다소 완화된 것으로 판단된다.

팁의 경우에는 틱간극이 있으므로 말미암아 유동이 압력면에서 흡입면으로 흘러들어가서 유로에 영향을 주게 되므로, 이로 인하여 분사영역에 있는 $\zeta=0$ 이상의 영역에서는 흡입면에서의 표면 정압계수가 평균반경이나 허브에서 보다는 낮은 값을 보여주고 있다.

캐스케이드에서 익형 표면에서의 압력분포를 측정하기 위하여 사용되는 익형(Fig. 4에서 익형 R로 칭함)이 분사영역으로 진입하는 경우에 흡입면은 $\zeta = -1$ 의 위치에서부터 분사되는 유동의 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 이는 바로 옆에 있는 익형(이동방향으로 보았을 때 앞에 있는 익형이 됨; Fig. 4에서 익형 F로 칭함)이 분사 영역에 일부 진입되므로 노즐에서 분사되는 유동의 일부가 익형 F의 압력면으로 흐르게 되어 익형 F와 익형 R 사이의 유로로 유동장이 미약하게 형성된다. 따라서 이 유동으로 인하여 익형 R의 흡입면에 표면 정압계수가 미약하게 음의 값을 갖게 된다. 하지만 익형 R의 압력면으로는 전혀 유동장이 형성되지 않으므로 말미암아 익형 R의 압력면에서의 정압계수는 유동장이 없는 경우의 정압계수와 동일한 값을 나타낸다.

익형 R이 점차적으로 ζ 방향으로 이동하게 되는 경우에 익형 F와 익형 R 사이로 들어오는 노즐에서 분사되는 유동의 질량유량이 증가하게 되어 익형 R의 흡입면에서의 정압계수는 점차적으로 음의 값으로 증가하게 된다. 하지만 $\zeta = -0.5$ 의 영역에서는 노즐에서 분사되는 유동이 진입영역의 정체구역으로 팽창되어진다. 따라서 흡입면의 익형 앞부분으로 분사된 유동이 익형에서 정체되어 흡입면 앞부분 영역에서의 정압계수가 상승하게 된다. 이 압력은 익형의 진행방향과는 반대방향으로 힘을 가하는 역방향 힘을 생성한다. 그러므로 익형이 부분분사 영역으로 진입하는 경우에 발생하는 역 방향 힘은 노즐에서의 팽창에 따른 유동방향이 변화되어 형성되는 것으로 판단된다.

익형이 $\zeta = -0.4$ 이상으로 진행하게 되면 압력면에서의 정압계수 증가는 이동거리에 따라 비례적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 $\zeta = -0.4$ 에서부터 압력면으로의 유동이 형성되고 있음을 알 수 있다. 또한 이동에 따라 정압계수의 증가는 압력면을 따라 흐르는 질량유량이 비례적으로 증가하므로 발생한 현상이다. 익형이 $\zeta = 0.4$ 정도가 되면 압력면에서의 정압계수는 충분히 발달되어 완전히 분

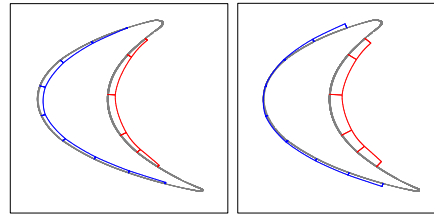


Fig. 7. Static pressure coefficient at the midspan ($\zeta=-0.01$, $\alpha=65^\circ$ and $\sigma=1.38$)

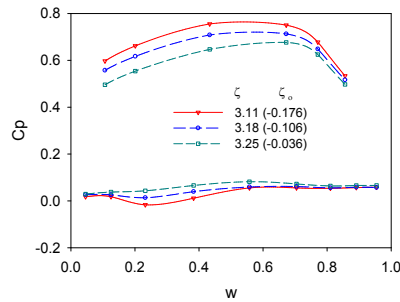


Fig. 8. Static pressure coefficient at the leaving region ($\alpha=65^\circ$ and $\sigma=1.38$)

사영역에 진입한 상태를 보여주고 있으나, 반면에 흡입면에서의 정압계수는 $\zeta = -0.2$ 의 영역에서 완전히 발달된 상태를 보여준다.

노즐에서 분사되는 유동은 분사영역의 측면에 있는 정체영역으로도 팽창함으로 말미암아 분사되는 일부유동은 노즐의 유동방향에서 각각의 측면으로 팽창하여 노즐의 유동방향보다 커지거나 적어진다. 즉 진입영역에서는 유동방향이 노즐의 유동방향보다는 적어지게 되고 퇴각영역에서는 노즐의 유동방향보다는 더 증가하게 된다. 따라서 노즐의 유동방향과 동일한 각도로 설정한 직선과 익형 전단부의 이동선과 일치하는 $\zeta=0$ 의 위치보다 음의 영역에도 노즐에서 분사된 유동이 존재한다. 따라서 이러한 유동이 $\zeta=0$ 보다 적은 음의 영역이라도 익형에서의 표면압을 형성한다. 또한 유동의 팽창에 따른 부분분사의 효과는 익형이 $\zeta = 0.4$ 이상으로 이동할 때까지 과도적인 상태를 형성하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 7은 $\zeta = -0.01$ 의 위치에서 표면정압계수의 분포를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 익형표면의 정압계수의 분포를 나타내고 Fig. 7(b)는 최저 표면정압계수를 기준점 0으로 하여 나타낸 정압계수의 분포이다.

Fig. 8은 익형이 분사영역에서 퇴각할 때의 평균반경에서 정압계수의 값들을 보여주고 있

다. 익형이 퇴각하는 경우에는 진입하는 경우와는 달리 흡입면에서의 정압계수가 압력면에서의 정압계수보다 빨리 정체상태의 영역으로 변화하게 된다. 노즐의 측면(N2)에서 직선적으로 캐스케이드익형의 전단이 움직이는 이동위치와 일치하는 위치가 $\zeta = 3.286$ 이나, 이 위치를 $\zeta_0 = 0$ 으로 하고 퇴각영역에서의 변화를 확인하였다. $\zeta_0 = -1.8$ 의 영역에서부터는 흡입면 표면 정압계수가 더욱 더 낮아지는 현상을 보여주고 있으며 $\zeta_0 = -1.2$ 의 영역에서는 가장 낮은 표면 정압계수를 나타낸다. 이는 노즐의 N2 벽면에서 정체영역으로 확대되는 확산각을 가지고 있기 때문에 노즐 출구에서 N2 벽면 근처에서 가장 높은 속도가 형성되어 익형의 유로를 흐르기 때문에 이 영역에 존재하는 익형의 흡입면에서 가장 낮은 표면 정압계수가 얻어지게 된 것이다. 하지만 이 익형이 조금 더 이동하게 되면 흡입면에서의 정압계수는 낮아지게 된다. 이 영역에서는 유동의 확산으로 인해 익형의 유로로 들어오는 질량유량이 줄어들게 되어 유로에서의 유속이 감소하게 되기 때문이다. $\zeta_0 = 0$ 의 영역에서는 흡입면 정압계수는 정체상태의 정압계수로 변화된다. 하지만 압력면은 $\zeta_0 = -0.1$ 이 될 때까지 분사영역 내에 존재하는 완전 발달된 표면 정압계수의 상태를 유지한다.

익형이 퇴각영역으로 계속 진행을 하면 익형의 유로로 들어오는 질량유량이 노즐에서의 확산으로 인하여 줄어들게 되어, 압력면에서의 표면 정압계수가 선형적으로 감소하게 되는 현상을 보여주고 있으며 $\zeta_0 = 0.7$ 이 될 때까지도 표면 정압계수의 값을 나타낸다. 따라서 $\zeta_0 = 0$ 이후 영역에서는 노즐의 확산으로 인하여 들어오는 일부의 질량유량은 유동의 각도로 인하여 대부분 압력면으로 유동이 형성되고 흡입면으로 유동이 없음을 의미한다. 이는 부분 분사의 영역을 벗어나는 익형에서는 노즐에서 분사되는 일부 유동이 익형의 유로로 들어와서 압력면에 힘을 가하고 있음을 알 수 있다.

3.2 현절비의 변화에 따른 특성

노즐의 분사각을 65° 로 하고 현절비를 변경하였을 때의 익형표면 정압력계수를 비교하였다. Fig. 9(a)의 경우는 현절비가 1.67 일 때의 결과를 보여주고 있는데, 진입영역에서 흡입면의 압력 증가가 발생되었다. 또한 흡입면

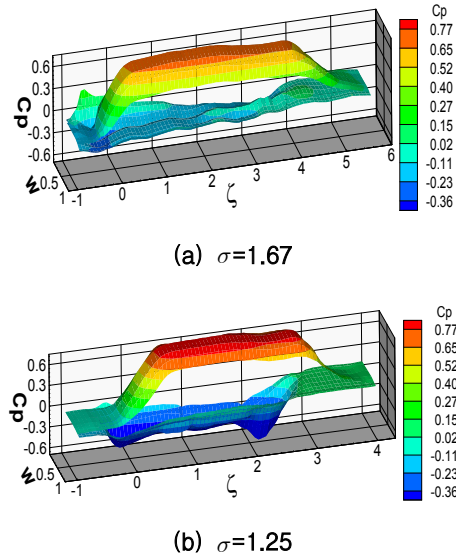
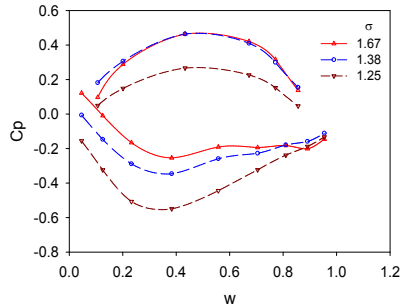


Fig. 9. Variation of static pressure coefficient with different solidities at $\alpha = 65^\circ$

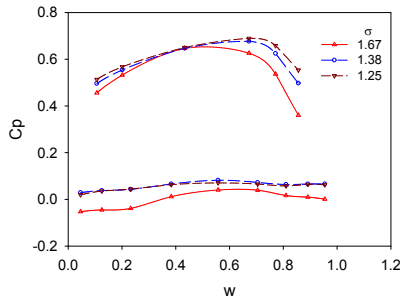
에 분포되는 압력은 전체적으로 다른 현절비의 경우에 비하여 높은 값을 보여주었다. 이러한 흡입면에서의 높은 압력이 회전방향 힘을 적게 하는 요인임을 알 수 있다. 현절비의 증가에 의하여 압력면에 작용하는 표면압력계수의 분포는 다소 저감되었다.

Fig. 9(b)는 현절비를 1.25로 변경하여 실험한 결과를 보여주고 있다. 앞서 현절비가 큰 경우에 비하여 흡입면에서의 압력분포는 가장 낮은 값이 얻어졌다. 하지만 압력면에서의 압력분포는 앞서의 큰 현절비에서 얻어진 값들에 비하여 미세하게 현절비의 감소에 따라 증가하였음을 보여주고 있다. 따라서 이러한 압력분포로 인하여 회전방향의 힘은 가장 큰 값을 얻게 되었다. 이러한 이유는 익형 유로를 통과하는 많은 질량유량의 유동방향을 변경하게 됨에 따라 발생하는 모멘텀에 대한 반발력의 증가로 발생한 것이다. 하지만 이러한 경우에는 익형의 개수가 적으므로 최상의 결과를 만든다고는 할 수 없으며 익형의 개수와 회전력을 고려하여 결정하여야 한다.

Fig. 10은 노즐의 분사각이 65° 인 경우에 익형이 노즐의 분사영역에 진입하는 경우와 퇴각하는 경우에 익형의 평균반경에서 발생된 표면정압계수의 값들을 보여주고 있다. 진입시에 현절비가 적은 경우에 흡입면에서의 표면정압계수는 상당한 차이를 보이고 있으며, 낮은 현절비에 낮은 정압계수가 얻어졌음을



(a) $\zeta = 0$ (entering)



(b) $\zeta_0 = 0$ (leaving)

Fig. 10. Variation of static pressure coefficient at the entering and leaving region ($\alpha=65^\circ$)

알 수 있다. 반면에 압력면은 노즐 분사가 정체영역으로 팽창됨으로 인하여 현절비가 작은 경우에는 이로 인한 팽창이 크게 되어 압력면에서의 압력 증가는 다소 늦게 이루어짐을 알 수 있다. 익형의 퇴각 시에서는 현절비가 큰 경우에 노즐분사영역에서 분사되는 유동이 정체영역으로 팽창되는데 피치가 적은 경우가 이를 방지하는데 효과적이므로 흡입면에서 낮은 압력을 얻게 되었음을 알 수 있다. 반면에 압력면은 노즐에서 정체영역으로의 팽창에 의한 영향은 미약하므로 피치가 큰 적은 현절비에서 높은 압력을 유지하고 있음을 보여주고 있다.

3.3 노즐 설치각의 변화에 따른 특성

익형의 현절비를 1.38 로 설정하고 노즐의 설치각을 72° 로 변경하여서 얻어진 평균반경에서의 정압력계수 분포를 Fig. 11에서 보여주고 있다. 노즐의 설치각이 65° 인 경우에 비하여 노즐의 분사폭(b)이 증대하여 퇴각영역의 위치가 변경되어 있다. 노즐의 설치각이 7° 증가하여 입사각이 증대한 경우와 설계점의 결

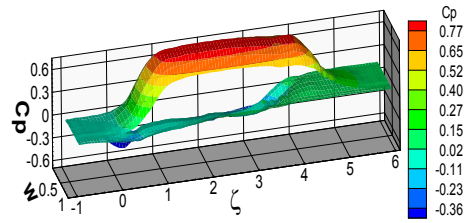


Fig. 11. Variation of static pressure coefficient at the midspan ($\alpha=65^\circ$ and $\sigma=1.38$)

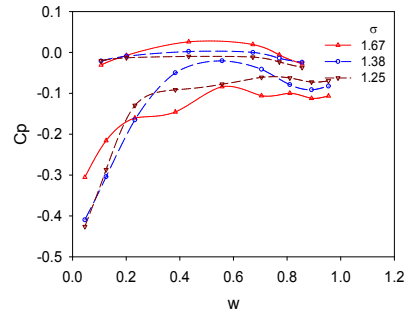


Fig. 12. Variation of static pressure coefficient at the entering region ($\alpha=72^\circ$)

과를 비교하면 압력면에서의 정압력계수의 분포는 비슷한 경향을 보이거나 입사각의 영향으로 진입시 흡입면의 앞부분에 높은 표면압력은 형성되지 않았다. 이는 유동각이 증대하여 진입영역에서 노즐의 유동이 정체영역으로 분사되어도 흡입면의 앞부분에 정체영역을 형성할 정도의 각도를 갖지 못하였기 때문이다. 또한 설계점에서는 퇴각영역 이전에 흡입면에서 낮은 정압력 분포를 흡입면에서 보였으나 노즐 설치각을 72° 로 설정하였을 때는 낮은 압력의 분포를 형성하지 못하였다. 이는 높은 속도가 형성되어도 흡입면과 노즐의 설치각과의 차이가 있으므로 낮은 압력을 형성하지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 노즐 설치각이 72° 인 경우에 익형이 분사영역으로 진입할 때 현절비가 다른 익형에서 얻어지는 표면정압계수의 분포를 보여주고 있다. 분사각이 65° 인 경우와는 상당히 다른 형태를 보여주고 있는데, 이는 분사각이 다르므로 정체영역으로 팽창되는 정도가 다르고 분사각에 따라 입사각이 다르게 형성되면서 익형에서의 압력분포가 달라졌기 때문이다. 특히 진입영역에서 익형의 입사각으로 인하여 흡입면의 앞부분에 낮은 압력의 형성은 큰 입사각으로 인하여 형성된 것이다. 이

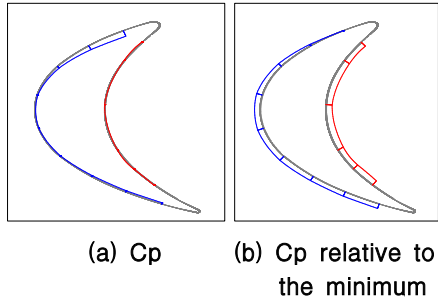


Fig. 13. Static pressure coefficient at the midspan ($\zeta=-0.03$, $\alpha=72^\circ$ and $\sigma=1.38$)

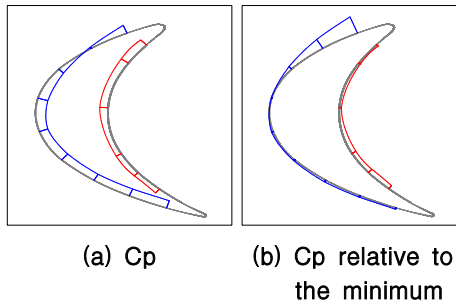


Fig. 14. Static pressure coefficient at the midspan ($\zeta=-0.56$, $\alpha=58^\circ$ and $\sigma=1.67$)

렇게 흡입면의 앞부분에 낮은 압력의 형성은 익형을 축방향과 반대로 작용하는 힘을 발생하게 되었다[15].

Fig. 13은 현절비의 변화에 따른 익형 표면에서의 정압계수분포(Fig. 12 참조)를 익형의 표면에 나타내어서 상기 현상을 보다 구체적으로 보여주고 있다. 피치가 작은 경우 노즐에서 분사되는 공기가 정체영역으로 팽창하는 영향이 적으므로 현절비가 큰 경우에 압력면에 다소 높은 압력을 형성하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 14는 노즐 설치각이 58° 인 경우에 익형이 분사영역으로 진입할 때 현절비가 1.67인 익형에서 얻어지는 표면정압계수의 분포를 보여주고 있다. 분사각이 65° 와 72° 인 경우와는 상당히 다른 형태를 보여주고 있는데, 이는 입사각이 음의 값을 갖게 되므로 전단부의 흡입면쪽에 정체영역이 형성되기 때문이다. 이러한 높은 압력의 형성으로 인하여 익형을 축방향으로 힘을 가하게 된다. 또한 압력면의 앞부분에는 음의 입사각으로 인하여 음의 표면정압계수가 형성되고 뒷부분에는 압력이 상승한다. 이로 인하여 다른 노즐 설치각에 비하여 캐스케이드 익형을 축방향으로 큰 힘을

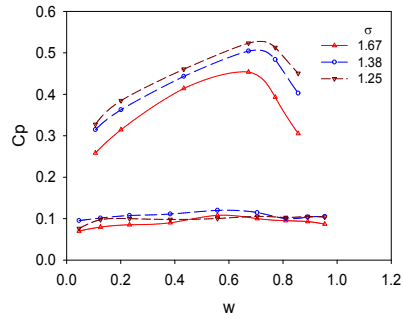


Fig. 15. Variation of static pressure coefficient at the leaving region ($\alpha=72^\circ$)

가하게 된다. 아울러 진입 시에 노즐에서 정체영역으로 팽창하는 영향으로 역회전 방향의 힘이 순간적으로 형성됨을 익형 표면에서의 정압계수분포로 알 수 있다.

Fig. 15는 노즐 설치각이 72° 인 경우에 익형이 분사영역에서 퇴각할 때 현절비가 다른 익형에서 얻어지는 표면정압계수의 분포를 보여주고 있다. 분사각이 65° 인 경우와 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 피치가 적은 경우에 퇴각영역에서 정체영역으로 팽창하는 영향이 적으므로 낮은 압력이 흡입면에 형성된다. 반면에 압력면은 정체영역으로의 팽창영향이 상대적으로 적으므로 많은 질량유량이 익형간의 통로를 통과하는 적은 현절비에서 압력이 증가하고 있음을 나타내고 있다. 하지만 퇴각영역에서 노즐의 설치각이 큰 경우에 정압계수의 값이 적은 이유는 노즐 출구에서 팽창되는 면적의 급격한 확대로 인하여 노즐유동이 충분히 팽창을 하지 못하여 유동속도가 감소되면서 발생된 것으로 판단된다.

IV. 결 론

직선형 캐스케이드에서 노즐의 설치각과 현절비를 변경하면서 부분분사되는 익형의 허브, 평균반경, 팁에서 표면압을 측정하였다. 허브에서 측정된 흡입면에서의 표면 정압계수의 변화가 2차 유동의 흐름과 바닥면에서의 경계층으로 평균반경과 팁에서 측정된 표면 정압계수 변화보다 다소 완만한 변화를 보여주었다. 진입영역에서 현절비의 변화에도 압력면에 작용하는 표면정압계수의 분포는 동일한 크기이나 반면에 흡입면에서는 현절비가 작을수록 표면압력의 감소가 발생되었다. 노

를 설치각이 72° 인 경우에 익형이 분사영역으로 진입할 때 익형의 입사각으로 인하여 흡입면의 앞부분에 낮은 압력이 형성되었다. 반면에 노즐설치각이 58° 인 경우에 익형이 분사영역으로 진입할 때 입사각이 음의 값을 갖게 되어 전단부의 흡입면쪽에 정체영역이 형성되어 캐스케이드 익형을 축방향으로 가장 큰 힘을 가하게 되었으며, 순간적으로 역회전 방향의 힘이 형성되었다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 지방기술혁신사업[RTI04-0103]에 의하여 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Robert, C. K., Howard, Z. H. and Warren, J. W., "Effects of Partial Admission on Performance of a Gas Turbine", NACA Technical Note No. 1807, 1949.
- 2) Musatkin, N. F. and Tikhonov, N. T., "Influence of Upper and Lower Overlap on Efficiency of Partial-Admission Axial Air Microturbine", Soviet Aeronautics, Vol. 22, 1979, pp. 95~97.
- 3) Verneau, A., "Supersonic Turbines for Organic Fluid Rankine Cycles from 3kW to 1300kW", VKI Lecture Series, 1987-09, 1987.
- 4) Bohn, D., Gier, J., and Ziemann, M., "Influence of the Cross-Over Channel Geometry on the Flow Equalization in Partial-Admission Turbines", VGB Power Tech, Vol. 2, 1998, pp. 49~54.
- 5) 조종재, 김귀순, 정은환, "노즐과 익렬의 상대위치에 따른 초음속 터빈의 유동특성에 대한 실험적 연구", 한국추진공학회지, 제14권, 제3호, 2010, pp. 30-38.
- 6) Sutton, R. F., Boynton, J. L. and Scheer, D., "Small Two-Stage Partial Admission Turbine", The JANNAF Propulsion Meeting, Vol. 1 N86-17380, 1985, pp. 55~62.
- 7) Rockwell International, "Design and Experimental Performance of a Two Stage Partial Admission Turbine Task B.1/B.4", NASA CR-179548, 1992.

- 8) 조종현, 조수용, 최상규, "다단 마이크로 터빈에서 단수변화에 따른 터빈의 성능에 관한 실험적연구", 한국항공우주학회지, 제33권 제12호, 2005, pp. 76~82.

- 9) Doyle, D. C., "Theories for Predicting Partial Admission Losses in Turbines", J. of the Aerospace Science, April 1962, pp. 489~490.

- 10) Yahya, S. M., "Partial Admission Turbines and Their Problems", Bull. Mech. Engineering Education, Vol. 9, 1970, pp. 263~273.

- 11) Korematsu, K. and Hirayama, N., "Performance Estimate of Partial Admission Turbines", ASME 79-GT-123, 1979.

- 12) Cho. S. Y., Cho, C. H. and Kim, C., "Performance Prediction on a Partially Admitted Small Axial-Type Turbine", JSME international J. Series B, Vol. 49, No. 4, 2006, pp. 1290~1297.

- 13) Yahya, S. M., "Some Tests on Partial Admission Turbine Cascades", Int. J. Mech. Sci. Vol. 11, 1969, pp. 853~866.

- 14) Yahya, S. M., "Partial Admission Losses in an Axial Flow Reaction Turbine, J. of Mechanical Engineering Division, Vol. 55, 1974, pp. 60~63.

- 15) Boulbin, F., Hetet, J. F. and Chesse, P., "Non-steady Flow in the Partial Admission," VDI Berichte NR, Vol. 1109, 1994, pp. 395~401.

- 16) 조종현, 최형준, 임용훈, 정대현, 조수용, "부분분사에 의한 터빈익형에서의 작동력 변화에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제38권 제9호, 2010, pp. 890~899.

- 17) Skopec, J., Vomela, L., Tajc, L. and Polansky, J., "Partial Steam Admission in an Axial Turbine Stage," IMechE Int. Conference on Third European Conference on Turbomachinery, C557/077/99, 1999, pp. 681~691.

- 18) He, L., "Computation of Unsteady Flow Through Steam Turbine Blade Row at Partial Admission," Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 211 Part A, 1997, pp. 197~205.