

축류압축기 슈라우드 캐비티내의 누수유동 경로에 대한 연구

손대웅* · 김동범** · 송성진***

Effects of the Leakage Tangential Velocity on the Leakage Flow Path in Shrouded Axial Compressor Cascades

Dae Woong Sohn*, Tongbeum Kim**, Seung Jin Song***

Key Words : Axial compressor(축류압축기), Flow kinematics(유동 운동학), Leakage tangential velocity(누수접선방향 속도), Shrouded cavity(슈라우드 캐비티)

ABSTRACT

Measurements of the leakage flow in the shrouded cavity were performed in axial compressor cascades at $Re=2.6 \times 10^5$. This paper describes the effects of the leakage flow tangential velocity on kinematics of the leakage flow in the shrouded cavity and consequent overall loss and exit flow turning at stator blade row downstream. Flow data and flow visualization images consistently indicate that leakage flow circumferentially migrates 2, 4 and 5 blade passages in the direction of rotation for $v_y/c=0.09, 0.35$ and 0.45 , respectively where v_y is the leakage tangential velocity and c is the mainstream velocity. The leakage flow contracts to a jet across the seal-tooth resulting in an increase in the leakage axial velocity-doubling the leakage axial velocity in upstream cavity compared to that in the downstream cavity. Consequently, two flow regions are distinguished before and after the seal-tooth. As increasing the leakage tangential velocity, the overall loss downstream of stator blade row decreases and the exit flow turning in the range of span. from the hub endwall to 15% increases while the decreases in the flow turning from 15% to 30% span is observed.

1. 서론

축류압축기에서 누수(leakage flow)는 회전부와 고정부 사이의 간극에 의해 발생하며 압축기의 공력성능을 저하시키는 원인이다. 이런 축류압축기에서 슈라우드는 정익 블레이드의 허브 끝을 이너밴드(inner-band)라 불리는 원형의 고리로 연결함으로써 기계적 안정성을 향상시키며 이너밴드와 슈라우드 캐비티(shrouded cavity) 바닥 면 사이에 하나 또는 여러 개의 실(seal-tooth)과 함께 누수의 양을 줄이는데

사용된다. 하지만 주 유동(mainstream)의 약 1%의 유량이 블레이드 스패(span)의 약 1%에 해당하는 실 간극(seal-clearance)을 통해 누설된다⁽¹⁾.

축류압축기에서 정익을 통과하는 주 유동의 일부는 유동방향에 대해 역압력 구배형성으로 블레이드 하류에서 슈라우드 캐비티로 누설되고 슈라우드 캐비티를 지나 다시 블레이드의 상류에서 주 유동으로 유입된다. Wisler⁽¹⁾와 Wisler등⁽²⁾의 연구에 따르면 다단축류압축기에서 블레이드 하류 캐비티로 유입된 누수는 상류로 재 유입되어 주 유동과의 상호작용에 의해 주 유동의 유동방해(blockage)와 이차유동(secondary flow)을 증가시켜 손실을 증가시킨다. Wellborn과 Okiishi^{(3),(4)}는 실 간극 증가에 따른 누수의 증가는 정

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 중국서안교통대학교 항공공학과

*** 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : dwson82@snu.ac.kr

익의 허브영역에 대한 성능저하와 정익 출구 유동변화의 원인이 됨을 규명하였다. 또한 실 간극이 블레이드 스페에 대해 1%씩 증가함에 따라 축류압축기의 전체효율도 1%씩 저하됨을 실험을 통해 보고하였다. Wellborn⁽⁵⁾은 축류압축기에서 상류와 하류 캐비티 트렌치(trench)에서 누수의 유동에 대해 연구하였다. 연구결과에 따르면 상류 캐비티 트렌치에서 방사(radial) 방향 속도성분의 피치방향(pitch-wise) 분포는 블레이드 전연의 영향을 받아 전 영역이 아닌 미드피치(mid-pitch) 영역에서 주 유동으로 재 유입됨을 고찰하였다.

Heidegger등⁽⁶⁾은 수치해석적 연구를 통해 정익 성능을 결정하는 파라미터로 누수의 양과 함께 누수접선방향속도를 제시하였다. 그러나 캐비티의 형상은 누수의 양과 누수접선방향속도에 영향을 거의 미치지 않음을 고찰했다. Demagne과 Longley^{(7),(8)}는 선형 캐스케이드(linear cascade)를 이용하여 정익의 공력성능에 누수접선방향속도가 중요함을 강조하였다. 그들은 누수접선방향속도가 증가하면 블레이드 하류에서 손실이 감소하며, 누수의 양이 증가하면 블레이드 하류에서 손실이 증가함을 실험하였다.

그러나 회전환경에서는 슈라우드 캐비티내에 대한 실험적인 접근이 어렵기 때문에 슈라우드 캐비티 내에서 누수의 유동특성에 대한 연구가 부족했다. 따라서 본 연구는 선형 캐스케이드를 이용하여 누수의 접선방향운동을 슈라우드 캐비티를 통해 인위적으로 가하여 누수접선방향속도에 따른 슈라우드 캐비티내의 누수유동에 대해 이해하고, 이에 따른 정익 하류에서

의 손실과 출구 유동각의 변화에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 실험장비 및 측정방법

2.1 실험장비 및 실험대상

본 연구에서는 슈라우드 캐비티 내에서 누수유동 연구를 위해 두 가지의 실험장비를 사용하였다. 첫 번째는 개방형 풍동을 사용하여 슈라우드 캐비티 내에서 누수의 속도 및 유동 각을 측정하였고 정익 하류에서 손실계수와 주 유동의 출구 유동 각을 측정하였다. Fig. 1(a)은 실험장비의 도식도이다. 캐스캐이드 캐비티 부분의 양끝은 루프(loop)로 연결되어 있으며 루프안에는 속도 조절이 가능한 팬이 설치되어 있다. 이는 Demargne과 Longley에 의해 보고된 방법으로 루프 안에 누수접선방향운동을 인위적으로 가하여 선형캐스케이드에서 회전환경을 모사하기위해 설치하였다. 두 번째 실험장비는 개방형 풍동과 같은 형태로 구성된 폐쇄형 워터터널(water-tunnel)을 사용하였다. 워터터널을 이용하여 누수의 유동경로에 대해 가시화된 이미지를 얻었다. 워터터널에 대한 상세한 구성은 참고문헌 (9),(10),(11)에서 볼 수 있다.

시험부는 6개의 정익 블레이드와 한 개의 실이 있는 슈라우드 캐비티로 구성되어 있다. 정익의 한쪽 면은 케이싱에 붙어있으며 반대쪽 허브 면은 이너밴드에 연결되어있다. 시험부의 도식도는 Fig. 1(b)에서 볼 수 있으며 블레이드와 슈라우드 캐비티의 제원은 Table 1과 같다.

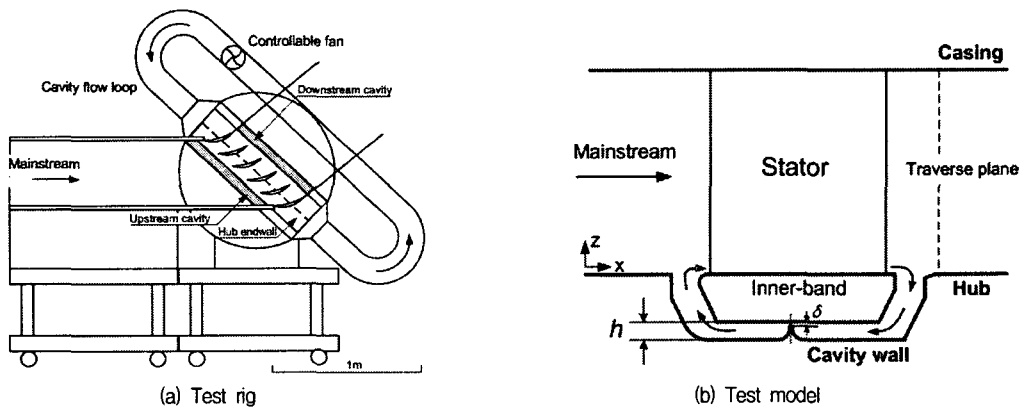


Fig. 1 Schematic diagram of the open-type wind-tunnel and shrouded stator cavity

Table 1 Parameters of the compressor stator cascade, shrouded cavity and operating condition (values were estimated by Eq.(1))

Parameter	Wind-tunnel
True chord (C)	200 mm
Span (H)	196 mm
Pitch (S)	126.6 mm
Inlet and exit flow angle (β_1, β_2)	47.6° and 21°
Solidity (σ)	1.58
Cavity depth (h)	17.03 mm
Seal-clearance/Cavity depth (δ/h)	0.11
Reynolds number based on the true blade chord	2.6×10^5
v_w/c	0.09 (2.3°)
(Estimated flow coefficient, ϕ)	0.35 (0.6°)
	0.45 (0.46°)

2 데이터 측정방법

본 연구에서 슈라우드 캐비티내의 누수유동의 속도와 유동 각을 측정하기 위해서 코브라타입의 3공 프로브를 이용하였다. 그리고 정익 블레이드의 후류에서 손실계수와 출구 유동 각을 측정하기 위하여 각각 Kiel 프로브와 5공 프로브를 이용하였다.

선형 캐스케이드에서 회전환경을 모사하기 위해서 인위적으로 루프를 통해 누수접선방향속도를 가하였으며 누수접선방향속도가 누수 경로와 손실계수 등에 미치는 영향을 알아보기 위해 주 유동의 9%, 35% 그리고 45%의 누수접선방향속도를 선택하였다. 누수접선방향속도는 고정부와 회전부사이의 상대운동과 주 유동 속도의 접선방향속도에 의해 결정된다. 즉, 압축기의 작동점(operation point)에 영향을 받는다. 그래서 모사된 누수접선방향속도의 결정을 위해서 누수접선방향속도(v_w)와 주 유동의 속도(c)사이의 비를 반 실험적으로 흐름계수(flow coefficient)에 대한 함수로 새롭게 정의 하면 다음과 같다.

$$\frac{v_w}{c} \approx 0.208(\phi)^{-1} \quad (1)$$

이 식의 자세한 상관 식은 참고문헌 (10)에서 볼 수 있다. 식(1)은 회전기계에서의 흐름계수를 선형 캐스케이드에서 적용할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 회

전환경에 의한 고정부와 회전부의 상대운동이 없는 원형 슈라우드 캐스케이드(annular cascade)의 경우를 기준으로 삼았으며 이 경우에는 슈라우드 캐비티 내에서 누수접선방향속도는 주 유동의 접선방향성분에 의해 정해지며 수치해석적 연구로부터 주 유동 속도의 약 9%임을 확인하였다⁽¹²⁾. 그러므로 $v_w/c=0.09$ 의 경우를 본 연구의 기준으로 선택하였다. 그리고 $v_w/c=0.35, 0.45$ 는 식(1)으로부터 각각 흐름계수 0.6, 0.46에 해당된다.

손실계수에 대한 정의는 다음과 같다.

$$Y_p = \frac{P_t - P}{\rho c^2 / 2} \quad (2)$$

P_t 와 P 는 각각 시험부의 상류에서의 전압과 블레이드 후연으로부터 30% 후류에서의 전압을 나타내며 손실계수의 불확실성은 3.2%이다.

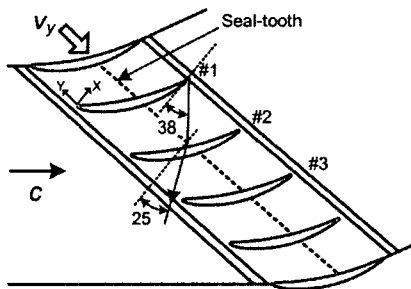
3. 실험결과 및 고찰

3.1 누수유동의 운동학

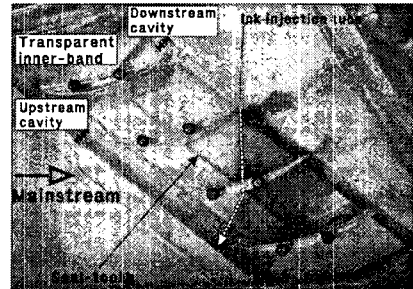
정의 블레이드의 허브근처의 주 유동은 역압력 구배로 인해 하류 캐비티로 유입된다(Fig. 1(b)). 이 누수는 슈라우드 캐비티 내에서 주 유동방향과 반대방향으로 이동하여 상류 캐비티 트랜치를 통해 주 유동으로 재 유입된다. 슈라우드 캐비티를 이동하는 동안 누수는 축방향성분과 함께 원주방향성분을 가지고 상류 슈라우드 캐비티로 이동한다.

Fig. 2(a)는 $Re=2.6 \times 10^5$ 에서 $v_w/c=0.09$ 의 경우에 슈라우드 캐비티 내에서 누수 유동 각을 측정하는 것이다. 다시 말하자면, 이 경우는 허브와 이너밴드사이에 회전운동이 없지만 주 유동의 접선방향성분의 속도에 의해 누수가 접선방향속도를 가지며 이는 원형 캐스케이드상태와 같은 경우이다.

전체적으로 하류 캐비티 트랜치를 통해 유입된 누수는 상류 캐비티 트랜치를 통해 유출되는데 까지 원주방향으로 두 개의 블레이드 구간(passage)을 이동한다. 예를 들어, 허브영역 근처의 주 유동의 일부는 #1 블레이드 $y/S=0$ 에서 캐비티로 유입되어 블레이드 #2와 #3사이 $y/S=(-)1.8$ 으로 유출되어지기까지 슈라우드 캐비티를 축 방향과 원주방향의 성분을 가지고 이동한다. 투명한 이너밴드를 통해 보여지는 슈라우드

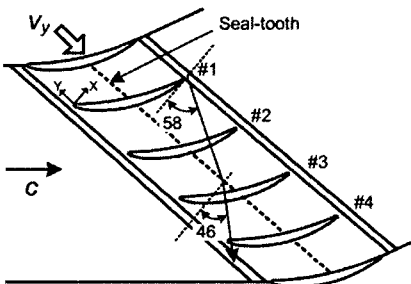


(a) from wind-tunnel flow measurement

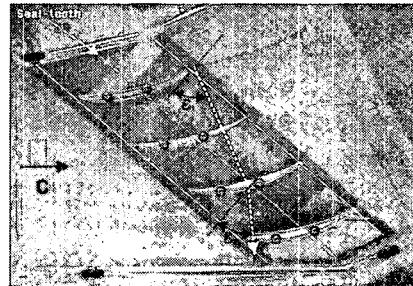


(b) from water-tunnel flow visualization image

Fig. 2 Measured leakage flow angles ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) within the shrouded cavity at $v_y/c=0.09$

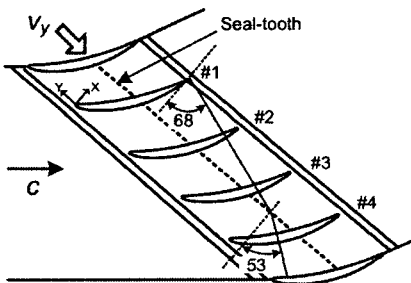


(a) from wind-tunnel flow measurement

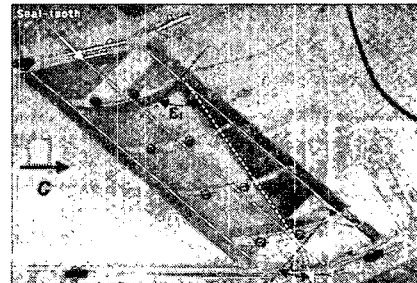


(b) from water-tunnel flow visualization image

Fig. 3 Measured leakage flow angles ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) within the shrouded cavity at $v_y/c=0.35$



(a) from wind-tunnel flow measurement



(b) from water-tunnel flow visualization image

Fig. 4 Measured leakage flow angles ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) within the shrouded cavity at $v_y/c=0.45$

Table 2 Summary of the measured flow angles of the leakage flow in the shrouded cavity obtained from both the wind and water-tunnels where ε_1 and ε_2 are the leakage flow angles measured respectively at downstream and upstream cavity regions with respect to the axial(x) axis.

v_y/c	0.09		0.35		0.45	
Leakage flow angle	ε_1	ε_2	ε_1	ε_2	ε_1	ε_2
wind-tunnel data	38	25	58	46	68	53
water-tunnel image	40	21	62	46	74	N/A

캐비티의 가시화된 누수 이미지(Fig. 2(b))는 풍동 실험을 통해 얻은 경로와 동일함을 보여준다.

또한 실 전, 후의 캐비티 영역에서 누수는 서로 다른 누수경로를 가지고 이동하는 것을 볼 수 있다. 하류 캐비티 트랜치를 통해 들어간 누수는 축 방향을 기준으로 유동 각 ε_1 을 가지고 선형으로 이동한다. 하지만 누수 유동 각은 실을 지나면서 갑자기 줄어든다 ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$). 이는 누수가 실을 지날 때 제트유동이 형성되어 누수축방향속도(leakage axial velocity)가 증가하기 때문이다. 실제로 하류 캐비티 영역보다 상류 캐비티 영역에서의 축방향속도가 약 두 배의 속도로 측정되었다. 또한 상류 캐비티 영역의 누수접선방향속도도 하류 캐비티 영역의 약 1.16배로 측정되었다. 참고로 기존의 Wellborn과 Okiishi⁽⁴⁾의 연구에서도 상, 하류 캐비티 영역에서의 누수접선방향속도의 비 (u_{yup}/u_{ydown})가 1.2라고 보고되었다.

이 두 캐비티 영역 사이에서 누수접선방향속도비와 함께 축방향속도의 증가는 하류 캐비티 영역과 상류 캐비티 영역에서의 누수 거동을 달리하는 원인이 된다. 또한 하류 캐비티 영역과 같이 상류 캐비티 영역에서도 주 유동으로 재유입까지 일정한 유동 각 ε_2 으로 선형으로 이동한다.

누수접선방향속도가 주 유동 속도의 35% ($\phi=0.6$)로 증가하는 경우, Fig. 3(a)과 3(b)에서 볼 수 있듯이 $u_w/c=0.09$ 와 비교하여 축 방향을 기준으로 누수 유동 각이 증가한다. 그 결과 누수가 슈라우드 캐비티를 이동하여 주 유동으로 재 유입되기까지 4개의 블레이드 구간을 이동하게 된다. 예를 들어 블레이드 #1의 $y/S=0$ 에서 유입된 누수는 블레이드 #4와 #5의 사이 약 $y/S=-4.3$ 에서 주 유동으로 재 유입된다. 하지만 실 전, 후에 누수 유동 각의 변화와 누수가 선형으로 이동하는 유동의 특징은 위의 경우와 비교하여 변하지 않는다. 또한 실을 지나면서 제트유동의 형성으로 누수축방향속도가 약 두 배 증가하였고 누수접선방향속도도 약 1.14배 증가하였다.

누수접선방향속도가 더 증가하여 주 유동 속도의 45% ($\phi=0.46$)의 경우에는 누수는 회전방향으로 5개의 블레이드 구간을 이동한다(Fig.(4)). 이 경우도 실을 지나면서 누수축방향속도가 약 두 배 증가하며 누수 접선방향속도도 약 1.13배 증가하는 것을 관찰하였다. 누수 유동 각도 위의 경우와 비교하여 축 방향을 기준으로 더 증가함을 관찰할 수 있다. 하지만 상류 캐비티

영역의 가시화된 누수 이미지는 시험부의 블레이드 제한으로 볼 수가 없었다. 누수접선방향속도의 변화에 따른 풍동의 결과와 워터터널의 결과는 Table 2에서 볼 수 있으며 서로 잘 일치함을 볼 수 있다.

누수접선방향속도 변화에 따른 누수의 유동경로에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다. 누수의 이동거리는 누수접선방향속도에 민감하게 반응하는 반면 실을 지나면서 누수의 유동 각이 변하는 현상과 유동 각에 대해서 선형으로 이동하는 현상은 누수접선방향속도에 영향을 받지 않는다. 또한 실을 지나면서 정체된 영역(dead flow region)의 발생으로 인해 유효면적이 절반으로 감소하여 누수는 제트유동을 형성하고 이로 인해 상류 캐비티 영역의 축방향속도가 두 배 증가한다. 제트유동의 형성으로 인해 실을 지나면서 누수 유동 각은 축 방향을 기준으로 감소하며 그 결과 실 전, 후의 누수 이동경로가 다르게 된다.

3.2 누수접선방향속도가 전체손실과 출구 유동 각에 미치는 영향

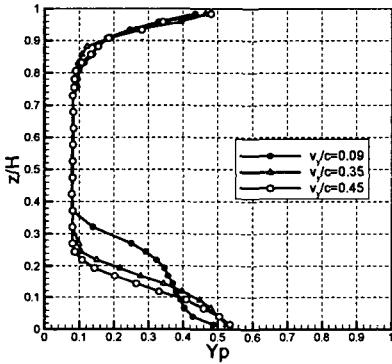
누수접선방향속도가 블레이드 후류에서 손실과 출구 유동 각에 미치는 영향을 살펴보기 위해 블레이드 후연에서부터 0.3코드(chord) 후류에서 전압과 유동 각을 측정하였다. 그 결과를 스펜방향으로 질량-평균(mass-averaged)한 손실계수분포와 유동 편향 각(deviation)을 나타내면 Fig.5와 같다.

손실계수의 결과를 보면 $z/H>0.4$ 의 영역에서의 손실계수는 누수접선방향속도 변화에 거의 영향을 받지 않지만 허브영역 근처($z/H<0.4$)에서는 누수접선방향속도 변화에 민감하게 반응한다(Fig.5(a)). 허브영역에서 누수접선방향속도가 증가함에 따라 이차유동의 영향을 받는 영역은 스펜방향(span-wise)으로 $z/H=0.35$ 에서 $z/H=0.20$ 으로 감소하며 손실계수의 값도 감소함을 볼 수 있다. 그 결과 기준이 되는 $u_w/c=0.09$ 의 경우보다 누수접선방향속도가 증가된 $u_w/c=0.35, 0.45$ 인 경우에 대해서는 각각 손실계수가 약 7.6%, 13% 감소한다.

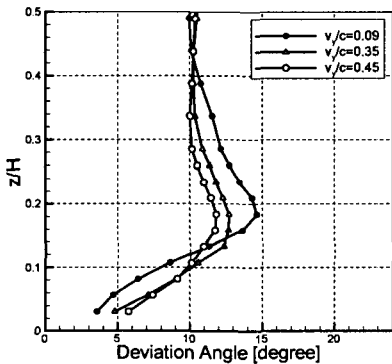
Fig 5(b)는 블레이드 후류에서 측정된 유동 각(flow angle)과 블레이드 후연의 각(metal angle)의 차이인 편향 각의 결과로 누수접선방향속도 변화가 스펜방향으로 유동 편향 각에 미치는 영향을 관찰할 수 있다. 블레이드 미드스팬(midspan)에서는 누수접선방향속도 변화에 상관없이 (+)10도의 편향 각을 갖는다. 하지만 허브영역에서의 편향 각은 스펜을 따라 다른 반응의 결과를 나타내고 있는데 스펜의 15%에서 30% 영역에

서는 누수접선방향속도가 증가함에 따라 편향 각은 감소하며 스펠의 0%에서 15%영역에서는 편향 각이 오히려 증가함을 볼 수 있다.

이 누수접선방향속도 변화에 따른 편향 각의 반응은 구간와류(passage vortex) 구조로 설명이 가능하다. 정의 후류에서 관찰했을 때 흡입면(suction surface) 허브영역에서 시계반대방향으로 회전하는 구간와류는 와류중심(vortex core)을 기준으로 서로 반대방향의 각속도를 가지며 이는 유동회전을 와류중심을 기준으로 반대로 일으킨다. 즉, 구간와류 중심에서 아래영역($0.02 < z/H < 0.15$)은 유동을 블레이드 흡입면쪽으로 이동시키며 반면, 구간와류 중심의 위 영역은 유동을 흡입면에서부터 멀어지도록 유도한다. 예를 들어, 낮은 u_w/c 의 값의 누수 유입에 의해 구간와류가 큰 각속도를 갖는 경우, 허브에서의 유동은 흡입면쪽으로 더 유도되며 그 결과 출구 편향 각의 값은 작아진다.



(a) Mass-averaged loss coefficient



(b) Area-averaged deviation angle

Fig. 5 Span-wise variations of the pitch-wise-averaged loss coefficient and deviation angle at $Re=2.6 \times 10^5$.

4. 결론

본 연구는 축류압축기 캐스케이드를 사용하여 누수 접선방향속도가 슈라우드 캐비티내의 누수유동 경로와 정의 블레이드 후류에서 손실계수와 출구 유동 각에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 본 연구를 통해 새롭게 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 슈라우드 캐비티 내에서 누수의 원주방향 이동 거리는 누수접선방향속도에 의해 결정되어진다. 즉, $u_w/c=0.09, 0.35$ 그리고 0.45 경우에 대하여 누수는 회전방향을 따라 각각 2, 4 그리고 5개의 블레이드 구간을 이동한다.
- (2) 누수는 실을 지나면서 체트유동이 형성되어 축방향속도가 증가하며, 그 결과 실 전, 후의 영역에서 누수의 경로가 달라진다.
- (3) 누수접선방향속도가 증가함에 따라 허브영역에서 손실은 감소되며 15%에서부터 30% 스펠영역에서는 유동 회전(flow turning)이 감소하며 반면, 15% 스펠영역 아래에서는 유동 회전이 증가한다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학기술재단 우수연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. (R11-2001-095-02002-0)

참고문헌

- (1) Wisler, D.C., 1985, "Loss reduction in axial-flow compressors through low-speed model testing," ASME J. Engineering for Gas Turbine and Power Vol. 107, pp.354-363
- (2) Wisler, D.C., Bauer, R.C., Okiishi, T.H., 1987, "Secondary flow, turbulent diffusion and mixing in axial-flow compressor," ASME J. Turbomachinery, Vol. 109, pp455-482
- (3) Wellborn, S.R., Okiishi, T.H., 1996, "Effects of shrouded stator cavity flows on multistage compressor aerodynamic performance," NASA Contract Report 198536

- (4) Wellborn, S.R., Okiishi, T.H., 1996, "The influence of shrouded stator cavity flows on multistage compressor performance," ASME J. Turbomachinery, Vol. 121, pp486-498
- (5) Wellborn, S.R., 2001, "Details of axial-compressor shrouded cavity flows," ASME paper 2001-GT-495
- (6) Heidegger, N.J., Hall, E.J., Delaney, R.A., 1996 "Parametric study of high-speed compressor seal cavity flow," AIAA paper 96-2807
- (7) Demargne, A.A.J., Longley, J.P., 2000, "Aerodynamic interaction of stator shrouded leakage and mainstream flows in compressors," ASME paper 2001-GT-570
- (8) Demargne, A.A.J., Longley, J.P., 2001, "Cavity and protrusion effects in a single-stage compressor," ASME paper 2001-GT-433
- (9) Kim, T., Lee, J.S., Kim, J.H., Song, S.J., 2005, "Observation of the leakage flow in the shrouded cavity and its effects on loss in axial compressor cascades," Asian Joint Conference on Propulsion and Power, AJCPP2005-2224
- (10) Kim, T., Sohn, D.W., Song, S.J., 2006, "Influence of leakage tangential velocity on leakage flow path and blade passage flow in shrouded axial compressor cascades," submitted to ISROMAC-11,
- (11) Sohn, D.W., Kim, T., Song, S.J., 2006, "Influence of the leakage tangential velocity on the loss generation in shrouded axial compressor cascades," ASME IGTI Turbo Expo, paper GT2006-90979 (submitted)
- (12) Kim, J.H., 2005, "Numerical study of the shrouded stator seal cavity flow in axial compressor cascade," M.S. Thesis, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, KOREA