

입구 경계층이 압축기 내부 유동에 미치는 영향

백제현* · 최민석**

1. 서론

터보 기계 내부에서 발생하는 손실에 대한 지금까지의 연구 결과에 의하면, 전압 손실의 원인은 블레이드 표면 및 끝벽과 경계층 내부에서 발생하는 전단 응력 및 마찰, 허브 코너 실속과 같은 유동 박리, 익단 누설 유동과 주유동의 교반, 충격파, 이차 유동, 블레이드 후류 유동 그리고 벽면에서의 열전달과 같은 비가역적인 유동 현상이다. 특히 익단 누설 유동과 허브 코너 실속은 터보 기계에서의 손실뿐만 아니라 안정적인 운전 영역을 결정하는 중요한 변수이므로 축류 압축기의 성능을 향상시키고 운전 영역을 넓히기 위해 이들에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 이런 연구의 대부분은 균일한 속도를 입구 조건으로 가정한 실험이나 수치해석을 통해서 수행되었다. 이전의 여러 연구들이 다단 축류 압축기에서 허브와 케이싱에서의 경계층 두께가 각 단을 지남에 따라 증가하는 것을 밝힌 이후에도 많은 연구자들이 입구 경계층에 대한 고려 없이 기존의 연구 결과를 다단 터보 기계에 적용해 왔다. 80년대 중반 UTRC (United Technologies Research Center)에서 수행된 연구(1)는 입구 경계층 두께가 허브 코너 실속과 익단 누설 유동에 큰 영향을 미침을 보였고, 이 현상을 블레이드 표면의 경계층 내부에서 발생하는 이차 유동을 통해서 설명하였다. 다단 압축기에서 실험을 통해서 정확한 유동장을 파악하거나, 수치해석을 통해서 모든 유로에서의 비정상 유동장을 파악하기는 비용과 시간이 많이 든다. 따라서 기존의 연구 결과들을 입구 경계층 두께를 고려하여 다단 터보 기계에 적용하는 것은 중요한 의미가 있다. 따라서 본 연구에서는 이전의 수치적 연구(2)~(4)를 통하여 밝혀진 단일 동익 압축기에서의 입구

경계층이 내부 유동장에 미치는 영향을 요약하였다.

2. 정상 유동장에 미치는 영향

UTRC에서 실험이 수행된 단일 동익 압축기의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 이 압축기는 정익 없이 축을 중심으로 510rpm으로 회전하므로, 입출구 압력비가 1.01로 매우 작다. 동익은 NACA65 익형을 기본형상으로 하고 원호 형태의 캠버선을 가지는 28개의 블레이드로 이루어져 있다. Fig. 2는 수치 해석에서 사용된 스펜에 따른 축방향 속도를 나타낸다. 입구 경계층이 두꺼운 경우와 얇은 경우 모두 실험값과 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었다.

입구 경계층의 두께에 따라 달라지는 허브 코너 실속 및 익단 누설 유동의 특성을 파악하기 위해서 동익 후류에서 예측된 회전 전압(rotary total pressure) 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 설계점(유량계수 $\phi=85\%$)에서는

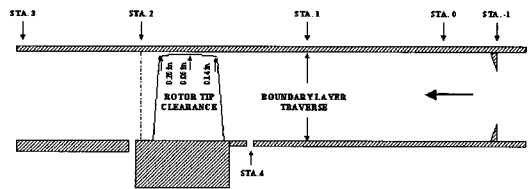
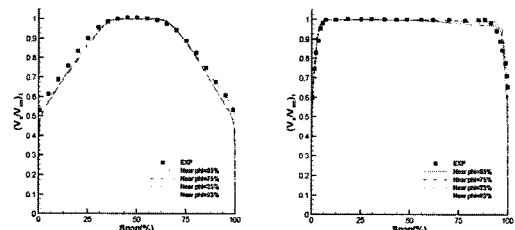


Fig.1 Schematic diagram of the rotor



(a) Thick BL (b) Thin BL

Fig.2 Inlet velocity profile

* 포항공과대학교 기계공학과

** 포항공과대학교 기계공학과 대학원

E-mail : jhbaek@postech.ac.kr

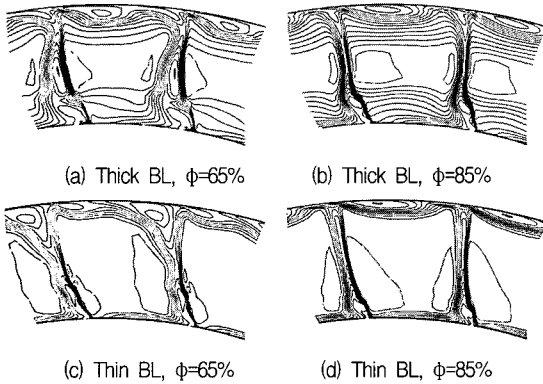


Fig. 3 Rotary total pressure distribution at the downstream of the rotor

허브 코너 실속의 위치와 크기는 입구 경계층의 두께에 관계없이 비슷하며 익단 누설 유동이 영향을 미치는 영역의 크기도 거의 같다. 그러나 블레이드에 부하가 증가 하면서 입구 경계층 두께의 영향으로 허브 코너 실속과 익단 누설 유동의 형태가 달라진다. 실속 근처의 유량(유량계수 $\phi=65\%$)에서 입구 경계층이 두꺼운 경우에는 허브 코너 실속이 허브에서 팁까지 크게 증가하였으나 입구 경계층이 얇은 경우에는 허브 코너 실속이 줄어들어 동이 후류와 구분이 되지 않는다. 그러나, 입구 경계층이 얇은 경우에는 케이싱과 흡입면 사이에서 커다란 박리가 발생하였음을 확인할 수 있다.

블레이드 표면에서 발생하는 박리 구조를 파악하기 위해서 흡입면에서의 한계 유선을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 설계점에서 박리점(separation focus)의 유무를 제외하고는 허브에서 발생한 박리의 크기 및 유선의 형태가 입구 경계층 두께에 관계없이 거의 일치한다. 전연(leading edge)로부터 중간 정도의 허브 표면에서 발생한 박리가 점점 발달하여 후연(trailing edge)에서는 약 40% 까지 영향을 미치고 있다. 실속 근처의 유량에서 입구 경계층이 두꺼운 경우에는 박리가 더욱 커져서 후연에서는 그 영역이 팁까지 넓어졌다. 그러나 입구 경계층이 얇은 경우에는 허브 코너 실속의 크기는 설계점과 비교하여 거의 같지만 50% 스팬 이상에서 커다란 박리 영역이 새로 발생하였다.

Fig. 5는 각각의 경우에 대해서 케이싱 근처에서의 정압 분포와 표준 헬리시티로 표현된 익단 누설 유동의 궤적을 나타내었다. 모든 경우에 익단 누설 유동의 중심은 압력이 상대적으로 낮은 골(trough)과 잘 일치하며 -1 근처의 헬리시티 값을 가진다. 설계점에서는 전연 부

근에서 익단 간극을 빠져 나온 누설 유동이 후류로 진행함에 따라 흡입면에서 부드럽게 멀어지며, 궤적과 압력 분포가 입구 경계층 두께에 관계없이 거의 일치한다. 실속 근처에서는 입구 경계층이 얇은 경우에는 익단 누설 유동의 궤적이 원주 방향으로 좀 더 기울어지지만 설계 점에서와 마찬가지로 부드러운 곡선을 그리며 하류로 빠

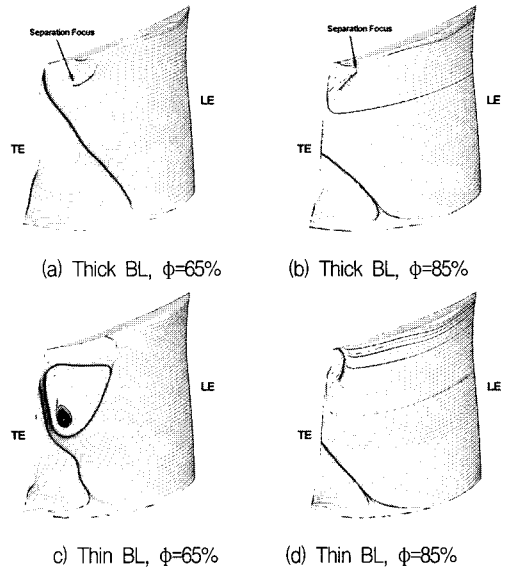


Fig. 4 Limiting streamlines on the suction surface

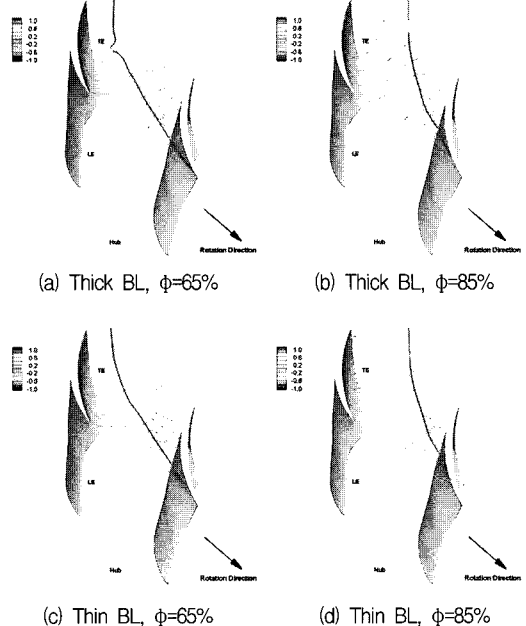


Fig. 5 Tip leakage vortex center colored by normalized helicity and static pressure distribution near the casing

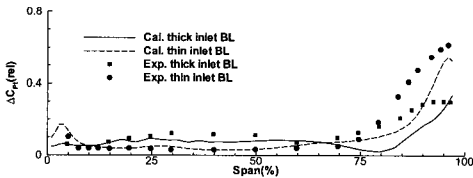
져나간다. 그러나 입구 경계층이 두꺼운 경우에는 흡입면에서 압력면으로 움직이던 익단 누설 유동이 갑자기 방향을 바꾸어 하류로 움직인다. 이 꺾이는 점에는 헬리시티가 -1 근처의 값을 가지지 않으며 압력의 골도 갑자기 평평해진다.

3. 손실에 미치는 영향

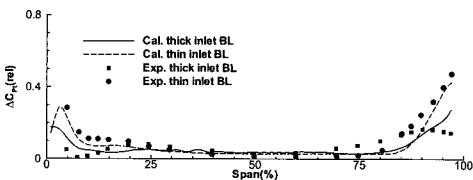
수치해석을 통해서 얻어진 유동장을 이용하여 전압 손실을 계산하였으며, 이 전압 손실을 Denton(5)에 의해서 제안된 손실 모델을 이용하여 형상 손실(profile loss), 누설 손실(tip leakage loss) 및 끝벽 손실(endwall loss)로 세부적으로 나누어 계산한 후에 입구 경계층이 손실에 미치는 영향을 분석하였다.

동익 후연으로부터 30% 코드 정도 떨어진 하류에서 계산된 전압 손실을 Fig. 6에 나타내었다. 예측된 전압 손실은 허브에서 약 75% 스패ん까지는 실험과 정량적으로 잘 일치하지만 그 이상에서는 정성적으로 잘 일치한다. 설계점에서 주유동 영역에서는 손실이 비슷하게 발생하지만, 팁과 허브 근처에서는 입구 경계층이 얇은 경우 더 많은 손실이 발생한다. 실속 근처에서 주유동 영역에서는 입구 경계층이 두꺼운 경우에 더 많은 손실이 발생하고 팁과 허브 영역에서는 설계점과 마찬가지로 입구 경계층이 얇은 경우에 더 많은 손실이 발생한다. 여기서 흥미로운 점은 입구 경계층이 두꺼운 경우에 허브에서 큰 박리가 발생함에도 불구하고 전압 손실은 입구 경계층이 얇은 경우보다 더 작다는 것이다.

형상 손실은 허브, 케이싱 및 익단 누설 유동의 영향을 제외한 영역에서 블레이드 자체의 의해서 발생하는

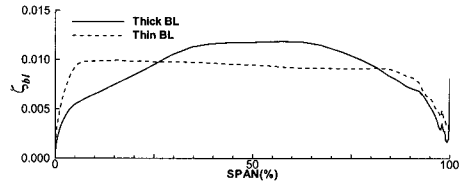


(a) $\phi=65\%$

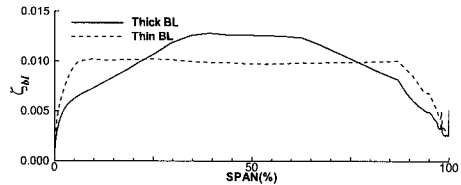


(b) $\phi=85\%$

Fig. 6 Total pressure loss distribution along the span

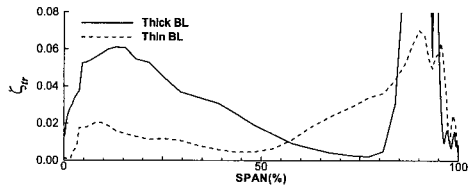


(a) $\phi=65\%$

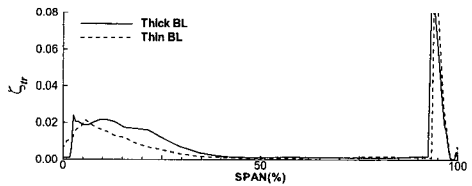


(b) $\phi=85\%$

Fig. 7 Boundary layer loss on the blade surface with span



(a) $\phi=65\%$



(b) $\phi=85\%$

Fig. 8 Trailing edge loss distribution with span

손실을 말하며 크게 블레이드 면의 경계층 내부에서 발생하는 손실과 후류에서 발생하는 손실로 나누어진다. 유동해석에 의해서 예측된 경계층 손실(boundary layer loss)과 후류 손실(trailing edge loss)을 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다. 경계층 내부에서 발생하는 손실은 블레이드 표면 속도의 세제곱에 비례하므로 스패ん에 따른 손실 분포는 입구 속도 분포와 비슷하다. 즉, 입구 경계층이 두꺼운 경우에는 주유동 영역에서, 그리고 입구 경계층이 얇은 경우에는 허브와 팁 영역에서 많은 손실이 발생한다. 유량이 감소해도 입구 속도 분포는 거의 일정하기 때문에 손실 분포도 거의 변하지 않는다. 후연 손실을 살펴보면, 설계점에서는 후류와 허브 코너 실속의 크기가 입구 경계층 두께에 관계없이 비슷하기 때문에 두 경우 모두 비슷한 손실 분포를 보이고 있다. 그러나, 실

속 근처에서 입구 경계층이 두꺼운 경우 허브 코너 실속이 설계 영역에 비해서 커지기 때문에 후연 손실도 커져서 허브로부터 약 15% 스펠에서 최고 손실을 유발하고 점점 줄어든다. 입구 경계층이 얇은 경우에는 허브 코너 실속의 크기가 감소하므로 약 50% 스펠까지 후연 손실이 감소하다가 그 이상에서는 케이싱 근처에서 발생한 박리에 의해서 증가하는 형태를 가진다. Fig. 8에서 90% 스펠 이상에서는 갑자기 후연 손실 값이 커지는데 이 영역은 익단 누설 유동의 영향이 강한 영역이므로 후연 손실은 의미 없는 값을 가진다.

블레이드 전연에서 후연까지 적분된 누설 손실을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 나타났듯이 누설 손실은 부하가 커질수록, 입구 경계층이 얇을수록 더 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 입구 경계층이 얇을수록 익단 간극을 지나는 유량이 증가하고, 케이싱 근처에서의 축방향 속도가 경계층이 두꺼운 경우에 비해서 커지기 때문이다.(3)

Fig. 10에는 허브 표면에서 적분된 끝벽 손실을 나타내었다. 케이싱에서의 끝벽 손실은 익단 누설 유동의 영향으로 누설 손실과 구분하기 어려우므로 허브에서의 손실만 나타내었다. 그러나 케이싱에서의 끝벽 손실은 허브에서의 결과를 참고하면 직관적으로 파악할 수 있다. 허브에서의 끝벽 손실은 부하가 커질수록 입구 경계층 두께가 얇을수록 값이 커진다. 입구 경계층이 얇은 경우에는 허브 표면에 상대적인 표면 속도가 커져서 손실이 증가하는 것이고, 유량 계수가 감소하면서 손실이 커지는 것은 허브에서의 표면 속도가 입구 속도에 비해서 상대적으로 더 커지기 때문이다.

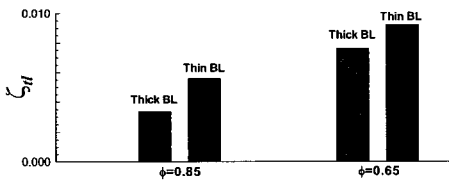


Fig. 9 Integrated tip leakage loss from leading edge to trailing edge

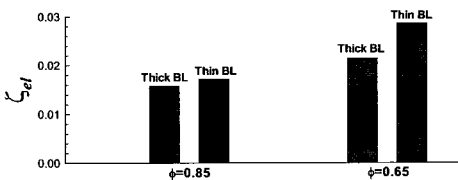


Fig. 10 Integrated endwall loss on the hub

Table 1 Relation between total loss and three loss categories (a) φ=65%

	Region near hub	Core flow region	Region near casing
Total losses	Thin BL>Thick BL	Thin BL<Thick BL	Thin BL>Thick BL
ζ_{bl}	Thin BL>Thick BL	Thin BL<Thick BL	-
ζ_{tr}	Thin BL<Thick BL	Thin BL<Thick BL	-
ζ_{tl}	-	-	Thin BL>Thick BL
ζ_{el}	Thin BL>Thick BL	-	-

(b) φ=85%

	Region near hub	Core flow region	Region near casing
Total losses	Thin BL>Thick BL	Thin BL~Thick BL	Thin BL>Thick BL
ζ_{bl}	Thin BL>Thick BL	Thin BL<Thick BL	-
ζ_{tr}	Thin BL<Thick BL	Thin BL~Thick BL	-
ζ_{tl}	-	-	Thin BL>Thick BL
ζ_{el}	Thin BL>Thick BL	-	-

이상으로 전압 손실을 세부 항목으로 나누어 살펴보고 각 손실의 경향을 Table 1에 정리하였다. 이 중에서 전압 손실과 같은 경향을 가지는 손실들만 정리하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 케이싱 근처에서는 전압 손실이 누설 손실과 같은 경향을 가지는데 이것은 이 영역에서는 익단 누설 유동이 손실 발생에 지배적인 영향을 주는 것을 의미한다. 주유동 영역에서는 후연 손실이 유량에 관계없이 전압 손실과 같은 경향을 가지는 반면에 경계층 손실은 설계점에서 전압 손실과 다른 경향을 가진다. 이것은 주유동 영역에서는 후연에서의 박리에 의한 손실이 블레이드 경계층 내부에서 발생하는 손실보다 훨씬 크다는 것을 의미한다. 허브 근처에서는 전압 손실의 경향이 경계층 내부 손실 및 끝벽 손실과는 일치하지만 후연 손실과는 다르다. 이는 허브 근처에서 발생하는 손실은 대부분 블레이드와 허브 표면에서의 경계층 내부에서 발생하는 손실이라는 것을 나타낸다.

4. 선회실속에 미치는 영향

선회실속은 압축기 블레이드에서 발생한 실속이 익렬을 따라서 원주 방향으로 진행되는 현상으로, 박리 영역이 유로를 막아 압축기의 성능을 떨어뜨리고, 회전하는 실속이 블레이드에 주기적인 압력 변화를 준다. 따라서, 선회 실속이 발생하는 경우에는 블레이드에 큰 응력

이 가해지고 압축기 전체 시스템을 불안정하게 한다. 이러한 압축기의 성능 감소와 불안정성 때문에 많은 연구자들이 선회실속의 특징을 파악하고 제어하기 위해서 많은 연구를 수행하고 있다. 여러 연구들을 통해서 얻어진 바에 의하면, 익단 누설 유동이 선회실속의 발달에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

한편, 실속 근처의 정상 유동장에서 입구 경계층이 얇은 경우에는 허브 코너 실속이 작아졌지만, 입구 경계층이 두꺼운 경우에는 실속 근처의 유량 조건에서 허브 코너 실속이 크게 자라서 허브에서 팁까지 영향을 미친다. 이 허브 코너 실속이 선회실속에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위해서 입구 경계층이 두꺼운 경우에 비정상 유동해석을 수행하였다.

유동해석 결과에서 얻어진 회전 전압 분포를 통해서 선회실속이 발생하는 과정을 Fig. 11에 나타내었다. 3.0 주기에서는 모든 유로에서 비슷한 분포를 가지지만 9.0 주기 근처에서는 익단 누설 유동에 교란이 발생하고 각 유로에서 회전 전압 분포에 차이가 발생한다. 이 교란은 블레이드 유로에 고정되어 있으며 동익과 같은 속도로 회전하고, 유량이 감소함에 따라서 크기가 점점 자라 Fig. 11(c)와 같이 고정 실속이 된다. 고정 실속이 임계 크기에 이르면 고정 실속의 막힘 효과에 의해서 국부적으로 익단 누설 유동이 블레이드의 전연을 돌아 인접한 유로로 유출되기 시작하며, Fig. 11(d)와 같이 짧은 파장을 가지는 선회실속으로 변하게 된다.

Fig. 12는 3.0 주기에서 동익 후류에서의 회전 전압 계수를 나타내었다. 3.0 주기에서 케이싱 근처에서의 회전 전압 계수에서는 국부적 교란이 관찰되지 않지만, 동익 후류의 단면에서는 허브 코너 실속에 먼저 교란이 발생하여 축대칭의 유동장이 붕괴된다. Day(6)의 실험에 의하면 허브 코너 실속은 실속 근처에서 운전되는 압축기에서 자주 관찰될 뿐만 아니라 주유동의 작은 변화에도 영향을 받아 진동하였다. 선회실속 계산에서 인위적인 교란을 부가하지 않았음에도 불구하고 수치적인 예러나 후류압의 증가에 따른 유동 변화가 허브 코너 실속에 교란을 발생 시킨 것으로 판단된다.

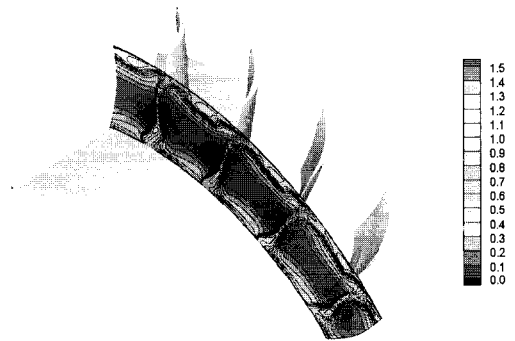


Fig. 12 Rotary total pressure coefficient distribution at the downstream of the rotor

5. 요약

이상의 내용을 요약하면 입구 경계층은 압축기의 안정적인 운전 영역에는 비교적 영향을 적게 미치지만, 유량이 감소하여 설계점을 벗어난 경우에는 내부 유동에 큰 영향을 미칠 수 있다. UTRC 단일 동익의 경우에는 허브 코너 실속의 크기에 큰 영향을 미쳐서 실속 근처에서 입구 경계층이 얇은 경우에는 허브 코너 실속의 크기가 감소하였지만 경계층이 두꺼운 경우에는 크기가 증가하였다. 입구 경계층에 따른 이러한 상이한 유동장은 전압 손실에도 큰 영향을 끼친다. 케이싱과 허브 근처에서는 입구 경계층이 얇은 경우에 손실이 크게 발생하지만 주유동 영역에서는 입구 경계층이 두꺼운 경우에 손실이 많이 발생한다. 특히, 입구 경계층이 두꺼운 경우에 발생하는 허브 코너 실속은 비정상 유동해석 초기에 교란을 발생시켜 선회실속을 발생시키는 역할도 수행

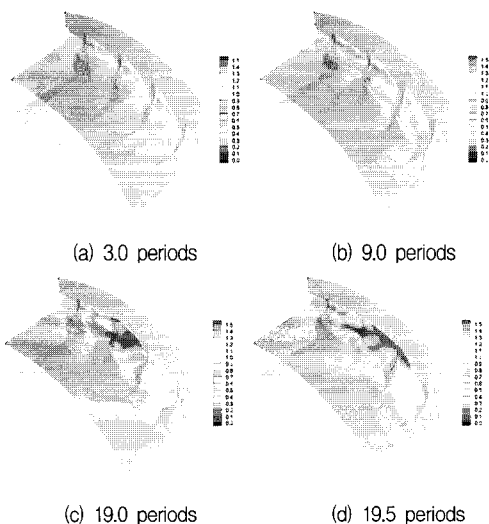


Fig. 11 Rotary total pressure coefficient distribution at the tip region in a process of stall inception

한다.

입구 경계층의 두께가 익렬을 지남에 따라서 증가하기 때문에 다단 터보기계에서 후단에서는 입구 경계층이 상당히 두꺼워지게 된다. 이러한 상황에서 후단은 허브 코너 실속 및 선회 실속에 취약점을 가지게 되고 설계된 성능을 발휘하지 못할 가능성이 크다. 다단 압축기의 성능과 안정성에 영향을 미치는 요소들은 수없이 많지만 허브와 케이싱에서 발달하는 경계층의 두께는 다른 요소에 비해서 벽면에서의 흡입(suction)이나 제트에 의해서 제어하기가 쉽다. 따라서 경계층 두께가 터보기계에서 미치는 영향을 정확히 파악하여 이를 제어하는 경우에는 기존의 터보기계의 성능 및 안정성의 향상이 기대된다.

참고문헌

- (1) Wagner, J. H., Dring, R. P. and Joslyn, H. D., 1983, "Axial Compressor Middle Stage Secondary Flow Study," NASA CR-3701
- (2) 최민석, 박준영, 백제현, 2005, "입구 경계층 두께가 축류 압축기 내부 유동에 미치는 영향(I) - 허브 코너 실속 및 익단 누설 유동", 대한기계학회논문집 (B), 제29권, 제8호, pp. 948-955
- (3) 최민석, 박준영, 백제현, 2005, "입구 경계층 두께가 축류 압축기 내부 유동에 미치는 영향(II) - 손실구조", 대한기계학회논문집(B), 제29권, 제8호, pp. 956-962
- (4) 최민석, 백제현, 오성환, 기덕중, 2007, "축류 압축기에서의 선회실속에 관한 3차원 수치해석," 대한기계학회논문집(B), 제31권, 제1호, pp. 68-75
- (5) Denton, J. D., 1993, "Loss Mechanisms in Turbomachines," Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 621-656
- (6) Day, I. J., 1993, "Stall Inception in Axial Flow Compressors," Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 1-9