

노즐과 로터가 장착된 초음속 총동형 터빈의 전산유동해석

박 편 구* · 이 은 석** · 정 은 환** · 김 진 한**

Numerical Flow Analysis of a Supersonic Impulse Turbine with Nozzles and Rotor blades

Pyun Goo Park*, Eun Seok Lee**, Eun Hwan Jeong **, Jinhan Kim**

Key Words : “Turbopump(터보펌프)” “Partial admission turbine(부분흡입형 터빈)” “Frozen rotor(프로즌로터)”
“CFD(전산유체역학)”

ABSTRACT

Four design candidates for a 1.4MW class partial admission turbine have been chosen from a preliminary design process. Their performance were estimated through the 3-D numerical analyses using a frozen rotor method. In order to select the optimum design, each flow analysis result was compared with others. Flow characteristics in the passages and some types of losses induced by shocks and wakes were found from calculation results. Based on these calculations, a new rotor blade was redesigned and compared with previous one through flow analysis.

1. 서론

터보펌프는 가스 발생기에서 생성된 고온 고압의 가스를 이용하여 구동되는 터빈을 구동원으로 펌프를 작동시켜 액체로켓의 엔진에 연료와 산화제를 공급하는 장치로 한국항공우주연구원에서는 30톤급 개방형 액체로켓엔진에 적용할 터보펌프의 연구 개발을 수행하고 있다. 연구개발 중인 터보펌프는 단일축상에 산화제펌프와 연료펌프 그리고 두 펌프를 구동시키기 위한 터빈이 결합된 구조이며 양 펌프사이에 연료와 산화제의 혼합을 막아주는 세퍼레이팅 유닛이 위치하고 있다. 터빈은 1.4MW급으로 설계되어있으며 공급되는 연소가스의 양이 적어 부분흡입형방식이 채택되었다.

부분흡입형 방식의 터빈에서는 노즐 출구의 형상으로 인하여 로터입구에 고속의 유동이 부분적으로 유입되며 로터와의 상대적인 운동으로 인하여 충격파와

함께 비정상특성이 강한 유동이 존재하는 특징이 있다.

이러한 유동현상에 대해 Griffin⁽¹⁾ 등이 유동해석을 수행한 바 있으며 특히 터빈 로터와 정지부 사이의 경계면 처리에 대해서 다양한 방법이 시도되어 왔다.^{(2)~(3)} 하지만 이러한 3차원 점성유동의 비정상해석은 많은 시간과 계산 자원을 필요로 하는 문제점이 있다. 이러한 제약을 극복하기 위해 정상상태로 가정하여 해석을 수행하게 되는데 일반적으로 적용되는 방법 중 혼합면 기법(Mixing plane method)은 경계면에서 피치방향의 거리가 같지 않아도 되므로 계산에 소요되는 자원과 시간을 줄일 수 있는 장점이 있으나 경계면에서 상류 유동장의 값이 회전방향으로 평균되어 하류에 전달되므로 피치방향의 변화가 심한 본 계산에는 적용이 어렵다. 또 다른 방법으로 사용되는 프로즌로터 기법(Frozen rotor method)은 로터와 정지부사이의 상대운동에 대한 고려 없이 로터에서는 원심력과 코리올리 힘이 고려된 상대좌표계에서 계산을 수행하고 정지부에는 절대좌표계에서 계산을 수행하는 기법이다. 이 방법은 경계면에서 두 계산 영역이 피치방향으로 같은

* 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹

** 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹

E-mail : pyun9@kari.re.kr

거리를 가져야만 하며 계산결과가 로터 블레이드와 정지부의 상대적 위치에 따라 달라지는 단점이 있으나 경계면에서 특별한 가정 없이 물리량이 전달되므로 실제 현상과 유사한 모사가 가능한 장점이 있다. 특히 본 연구에 적용된 터빈의 경우 정지부인 1개의 노즐에 대하여 다수의 로터 블레이드가 위치하게 되어 상대적으로 중요한 로터 날개 사이에서의 유동이 노즐과의 상대위치에 따라 변화가 작은 이점이 있다.

프로즌로터기법을 사용하는 경우에도 여전히 많은 계산 시간과 자원이 소요되므로 초기설계에서부터 3차원 유동해석을 적용하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 초기 설계에서는 많은 시간을 소요하지 않고 결과를 얻을 수 있는 방법을 사용하여 몇 가지 안을 선정하고 이 경우에 대한 3차원 유동해석을 수행하여 결과를 분석하는 것이 효율적인 방법일 것이다.

본 연구에서는 설계프로그램과 2차원 해석을 통하여 도출된 결과에 대한 3차원 유동해석을 수행하고 결과를 비교 분석하여 최적의 설계형상에 대한 결과를 도출 하였다.

2. 터빈의 제원 및 계산 조건

2.1. 터빈 제원

본 연구에 적용된 터빈은 20,000RPM의 회전속도에서 1.4MW의 출력을 내도록 설계되었으며 13개의 수축-확산 노즐과 97개의 로터 블레이드 그리고 31개의 출구 유도익(Exit Guide Vane)으로 이루어져 있다. 13개의 노즐 중 10개는 가스발생기용 노즐로 터빈의 정상 구동시에 사용되며 나머지 3개의 노즐은 화약 카트리지에서 발생하는 연소가스용 노즐로 터빈 시동시에 사용된다. 설계된 터빈의 압력비는 약 23이며 터빈의 입구 온도는 900°K 이다.

2.2 계산 격자

계산을 위하여 1개의 노즐에 각각 8개의 로터 블레이드와 3개의 출구 유도익이 위치하는 상태의 격자계를 구성하였다. 본 계산에서 상대운동이 이루어지는 경계면에 적용된 프로즌 로터의 특성상 두 경계면 사이에서의 피치방향의 길이가 같아야 하는 제약이 존재하여 8개의 로터를 기준으로 1개의 노즐과 3개의 출구 유도익이 위치하도록 노즐간 간격과 출구 유도익사이의 거리를 조정하였다. 특히 유속이 빠르고 비정상성이 큰 로터 입구에서는 로터와 노즐 사이에 격자 블

록을 삽입하고 이 블록과 로터 블록사이의 경계면에서 격자점의 위치가 일대일 대응이 되도록 격자를 구성하였다.

Fig. 1에는 구성된 격자계의 개략도를 도시하였으며 이렇게 구성된 격자계의 표면 격자를 Fig. 2 에 나타내었다.

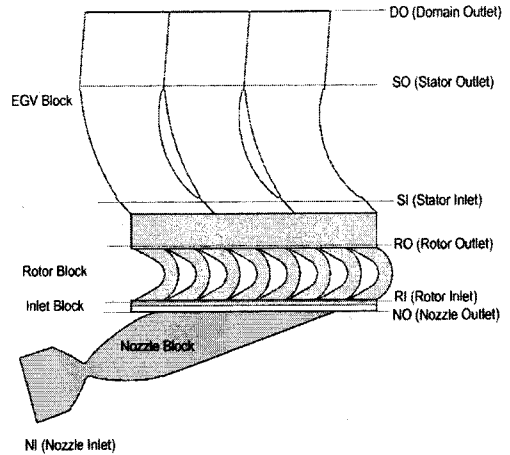


Fig. 1. Computational Domain of the Turbine

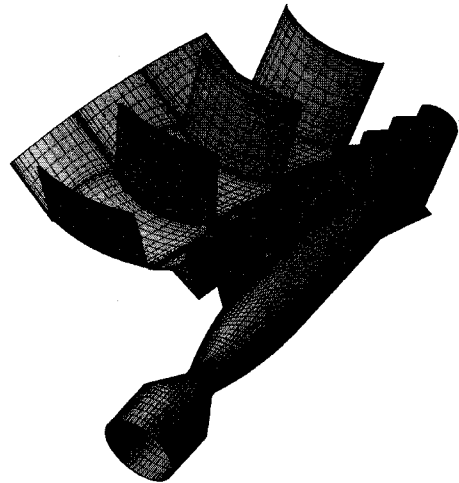


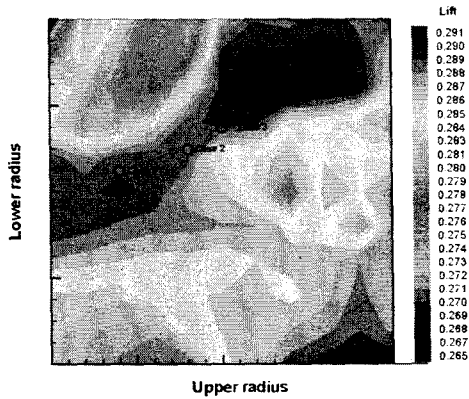
Fig. 2 3D View of the Computational Grid

전체 격자는 1,180,000개의 격자점을 갖고 총 17개의 블록으로 구성되었다. 또한 단면이 원형인 노즐에서는 격자의 직교성을 높이기 위하여 O-type의 격자계를 적용하였으며 로터 블레이드 팁 부분에도 격자블록을 삽입하여 팁 간극의 효과를 모사할 수 있도록 하였다.

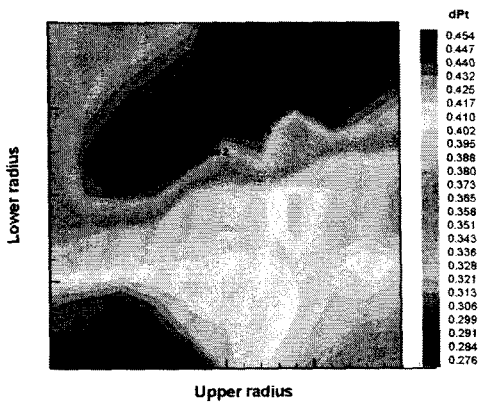
2.3 계산 조건

상용 유동해석 소프트웨어인 FINE™/Turbo를 이용하여 유동해석을 수행하였으며 공간 차분에는 중앙 차분법을, 시간 차분에는 4단계 Runge-Kutta법을 적용하였고 수렴의 가속화를 위해 3단계의 다중격자법을 적용하였다. 또한 난류계산을 위하여 표준 k-e를 사용하였으며 벽면에서는 벽함수를 적용하였다.

2.4 설계결과의 선정



(a) Lift coefficient contour



(b) Total pressure coefficient loss contour
Fig. 3 2D calculation of design conditions

Fig. 3은 설계프로그램을 통해 얻어진 결과로 로터 블레이드의 압력면과 흡입면에서의 곡률의 변화에 따른 양력계수와 전압력손실선도를 나타낸 결과이다. 본 결과와 실제 구현되는 형상을 고려하여 Fig. 3에 표시된 4지점에서의 설계점을 선정하여 3차원 유동해석을 수행하였다.

3. 결과

3.1. 전체성능 결과

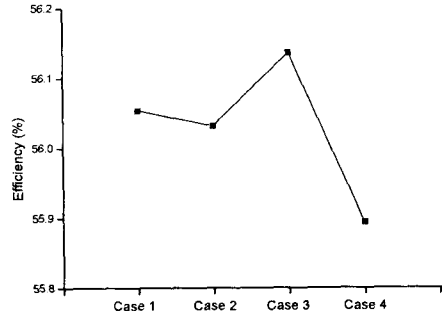


Fig. 4 Efficiency of each design case

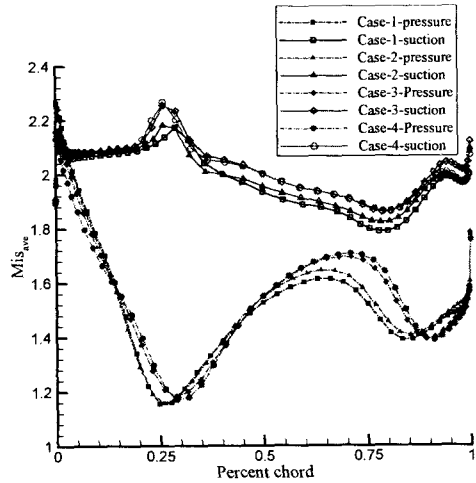
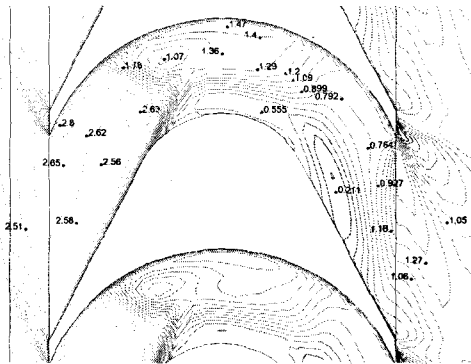


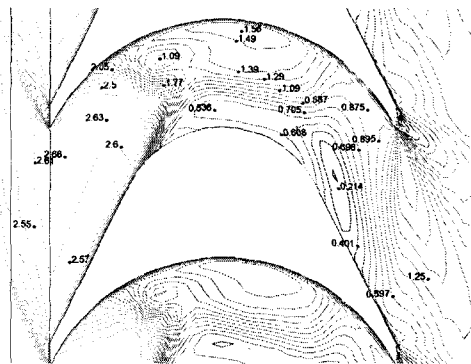
Fig. 5 Comparison of Insetropic blade surface Mach numbers distribution

각각의 설계점에 대한 3차원 유동해석을 통해서 얻어진 효율을 Fig. 4에 나타내었다. 계산결과 큰 차이는 보이지 않았으나 상대적으로 Case 3 이 가장 좋은 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 mid span상의 블레이드면 등엔트로피 마하수로 확인할 수 있는데, 1, 2번의 경우 압력면에서 좋은 결과를 보이는 반면, 3, 4번의 경우 흡입면에서 상대적으로 좋은 결과를 보이고 있다. 압력면에서의 이러한 현상은 곡률반경이 작을수록 속도의 감속이 커서 압력이 좀더 크게 상승하기 때문으로 해석될 수 있으며 흡입면에서는 곡률반경이 클

수속 유로의 변화가 작아 로터 날개면에서 박리에 의한 손실이 작아져 유속이 상대적으로 더 크기 때문에 해석할 수 있다.



(a) Mach contour of Case 1



(b) Mach contour of Case 3

Fig. 6 Comparison of Mach contour between Case 1 and Case 3

이러한 점은 Fig. 6에 도시된 Case 1과 Case 3의 유로에서의 마하수선에 잘 나타나 있는데 Case 1의 경우 곡률 반경이 Case 3에 비해 작아 압력면 근방에서는 로터의 중앙부 이후부터 같은 코드 길이에서의 마하수 값이 Case 3 보다 작은 값을 갖는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 Fig. 6의 흡입면에서의 마하수선도와 Fig. 5의 등엔트로피 마하수선도에 나타난 바와 같이 터빈로터의 유동은 단순히 이러한 곡률의 영향뿐만 아니라 노즐과 로터간의 간섭으로 인한 영향도 받게 되므로 유동특성의 이해를 위해서는 보다 세밀한 고찰이 요구된다.

3.2 유동 고찰

터빈의 전체 성능결과에서 가장 우수한 결과를 보인 3번 로터에 대한 유동해석 결과를 고찰 하였다.

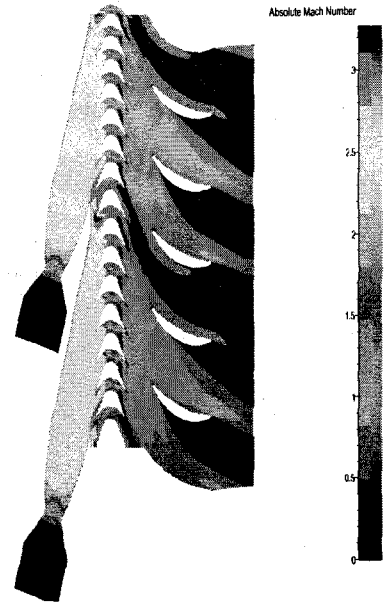


Fig. 7 Absolute Mach contour at mid-span of Case 3

부분 흡입형 노즐을 사용하는 경우 노즐 출구면의 불연속성으로 인하여 발생되는 후류와 팽창파로 인하여 유동의 손실이 발생하게 된다. 특히 노즐 출구사에서 발생된 후류는 Fig. 8의 엔트로피선도에서 볼 수 있는 바와 같이 인근 로터 블레이드 사이의 유로를 지나 후방 유도의익으로 빠져나가며 터빈의 유동손실을 가져온다.

노즐의 출구를 지나 로터로 유입되는 유동은 Fig 6과 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 로터 전면에서 경사충격파를 발생시키며 특히 압력면에서 생성된 경사 충격파는 Fig. 6에서 도시된 바와 같이 흡입면의 경계층과 충돌하게 되고 이러한 상호간섭으로 인하여 경계층의 박리가 발달되게 되어 로터의 중앙부분에 와류가 발달하게 된다. 이 박리 영역의 크기는 노즐과의 상대 위치에 따라 달라지는데 특히 2개의 노즐 사이에 로터 블레이드 유로가 위치하는 경우 가장 큰 박리영역을 보이는데 이것은 이 지역이 노즐 출구 사이에서 발생되는 후류의 영향을 가장 크게 받는 영역이기 때문이다.

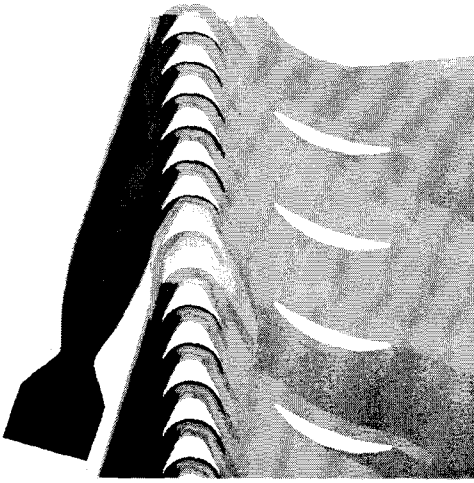
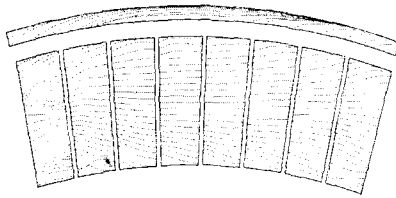
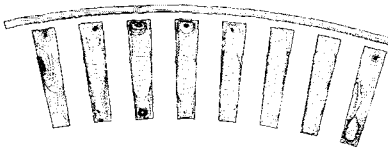


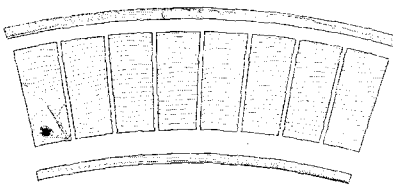
Fig. 8 Entropy contour at mid-span of Case 3



(a) Streamlines at front plane of rotor



(b) Streamlines at middle plane of rotor



(c) Streamlines at rear plane of rotor
 Fig.9 Streamlines at section planes of rotor

이러한 후류와 박리의 영향은 복합적으로 상호작용을 일으키는데 로터의 회전축에 수직인 평면에서의 유

선을 나타낸 Fig. 9의 결과에서 볼 수 있듯이 중앙부에서 발생한 강한 2차 유동이 대부분의 로터 유로에서는 출구에서 사라지는 결과를 보이나 노즐후류의 영향을 강하게 받는 유로에서는 2차 유동이 완전하게 사라지지 않는다. 또 허브와 슈라우드 근방에서는 2차 유동이 나타나며 이 근방의 블레이드면에서의 등엔트로피 마하수선도 값은 중앙에서의 값과 다른 값을 갖는다.

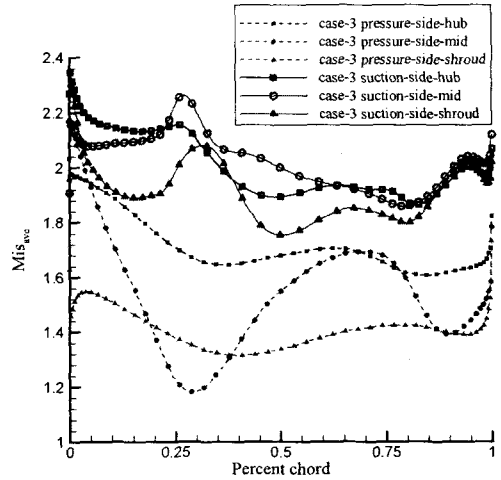


Fig. 10 Comparison of isentropic blade surface Mach numbers distribution from hub to shroud

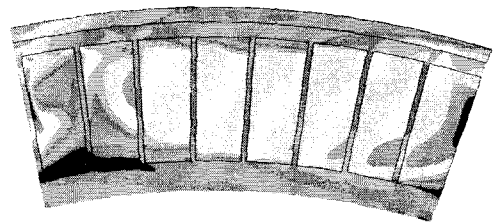


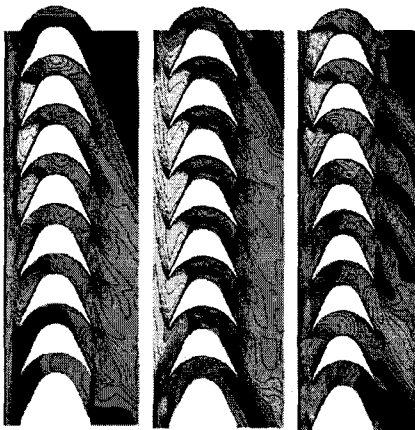
Fig. 11 Mach contour at the front of rotor

Fig. 10에 도시된 바와 같이 블레이드면에서의 등엔트로피 마하수는 허브에서 보다 슈라우드의 압력면에서 낮은 값을 보이는데 이것은 로터 블레이드는 회전축을 중심으로 원호방향으로 배열되어 있는 반면 노즐은 접선방향으로 배치되어 노즐의 양 끝단에 위치하는 로터 유로의 경우 허브쪽 보다 슈라우드쪽으로 유동이 집중되어 로터 블레이드면에서 상대적으로 높은 압력을 갖기 때문이다. 이 결과 슈라우드에서는 평균반지름에서와 비슷한 토크를 발생되는 반면 허브쪽에서는

낮은 토크가 발생되게 된다.

이러한 입구유동의 불균일성은 Fig. 11에 도시된 로터입구 전면에서의 마하수 분포에서도 알 수 있는데 로터와 노즐간의 간극에 의해서 실제 로터에 유입될 때는 유동이 약간 우측을 치우치는 모습을 관찰할 수 있으며 노즐 출구가 타원의 형상을 가지므로 허브와 슈라우드에서는 입구 유동이 각각의 유로에 균일하게 유입되지 않는다. 따라서 Fig. 12에 나타난 바와 같이 허브에서 입구의 주유동이 위쪽 유로로 치우쳐 유입되게 되며 유로간의 유동의 편차가 생기게 된다.

이러한 결과로부터 로터 블레이드의 설계에 있어서 평균반지름에서 뿐만 아니라 슈라우드 부근에서의 영향도 중요하게 고려해야함을 알 수 있으며 노즐 끝부분에서의 유동이 슈라우드쪽으로 치우치는 현상을 막기 위한 노즐 배치 변경도 고려될 수 있을 것이다.



(a) Hub (b) Mid (c) Shroud
Fig. 12 Mach contour at each section.

3.3 설계 변경안의 유동해석 결과

초기 설계에서는 4번 설계안이 상대적으로 가장 우수한 성능을 갖는 것으로 예측 됐으나 3차원 유동해석을 통한 결과에서는 3번 설계안이 가장 우수한 것으로 예측되었다. 이것은 초기 설계 결과는 2차원 계산에서도 출된 결과로 위에서 논의된 3차원 유동 현상들이 고려되어있지 않았기 때문이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 3번 설계안은 흡입면에서는 우수하나 압력면에서는 1번안이 더 좋은 결과를 보인다. 이 결과로부터 3번 설계안의 압력면과 1번안의 압력면을 조합한 로터에 대한 계산을 수행하였다.

본 계산을 통해서 얻어진 효율과 블레이드면에서의

등엔트로피 마하수를 Table 1 과 Fig. 13에 나타내었다.

Table 1 Efficiency of each design case

	Efficiency (%)
Case 1	56.054
Case 2	55.978
Case 3	56.136
Case 4	55.894
Case 5	56.108

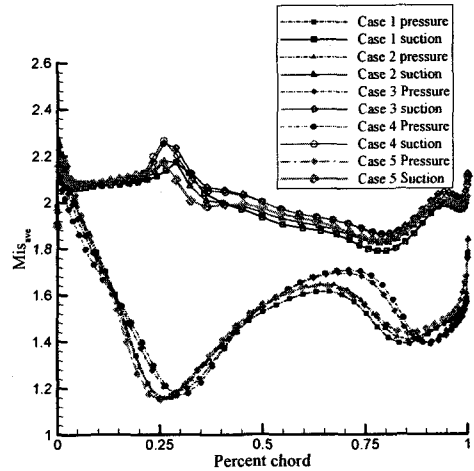
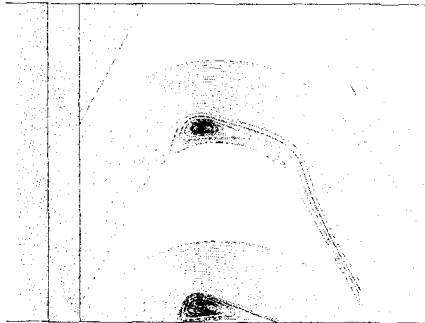


Fig. 13 Comparison of isentropic blade surface Mach numbers distribution

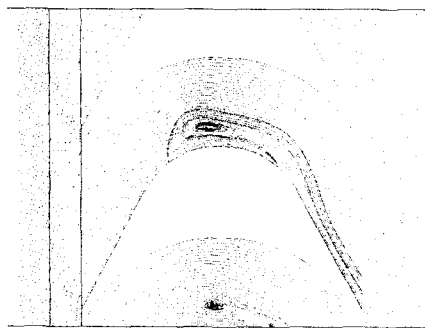
Table 1에 나타낸 효율에서 보는 바와 같이 새로운 설계안이 기존의 3번 설계안보다 약간 낮은 효율을 나타내는 결과를 보였다. Fig. 13의 결과를 통하여 새롭게 계산된 5번 설계안의 해석결과를 고찰해보면 압력면에서의 결과는 예상했던 바와 같이 곡률의 변화를 통해서 등엔트로피 마하수를 감소시킬 수 있었으나 흡입면에서는 의도한 결과를 얻을 수 없었다. 이러한 현상은 본 설계에 적용된 설계방식으로 구성되는 블레이드는 양면의 호가 편심 되어있어 호의 반지름이 변화하면 다른 구속조건에 의하여 블레이드의 두께가 바뀌게 되는데 기인하는 것으로 생각된다.

새롭게 적용된 5번 설계안은 흡입면에서는 3번 설계안과 같은 형상을 갖지만 블레이드의 두께가 약 7.8% 작다. 결국 확산되는 유로를 갖게 되어 Fig. 14의 결과와 같이 흡입면에서 박리를 촉진시키는 결과를 가

저와 흡입면에서의 등엔트로피 마하수를 감소시키게 된다. 따라서 로터의 설계에 있어서 양면에서의 곡률 뿐만 아니라 두 곡면이 이루는 유로의 면적도 고려되어야 함을 알 수 있다.



(a) Streamlines of Case 3



(b) Streamlines of Case 5

Fig. 14 Comparison of streamlines plots

4. 결론

초기 설계과정에서 선정된 4가지의 1.4 MW급 터빈 설계안에 대하여 프로즌로터 기법을 적용한 3차원 유동해석을 수행한 후 결과를 분석하였다. 이를 통하여 로터의 곡률에 따른 유동의 거동을 확인하였으며 이로 인하여 각 설계안의 전체성능에 차이가 발생함을 확인하였다.

한편 노즐 사이의 벽에서 생기는 후류가 로터에 미치는 영향과 노즐 벽면의 후류와 로터 블레이드 앞전

에서 발생하는 충격파에 의한 손실 이외에 로터내의 압력면에서 발생하는 충격파와 흡입면에서의 경계층간 상호간섭으로 유동박리와 함께 이차 유동이 발생되어 유동손실이 일어나는 현상을 확인하였으며 노즐 출구 형상으로 인한 입구유동의 불균일성으로 인해 허브영역보다 슈라우드영역이 전체 성능에 미치는 영향이 더 큼을 확인하였다. 초기 설계에 고려되지 못한 이러한 3차원 효과로 인하여 초기설계와는 다른 3번 설계안이 가장 우수한 형상으로 확인되었다.

이러한 분석을 바탕으로 새로운 설계안을 마련하고 새로운 설계안에 대한 유동해석을 수행하여 로터의 설계에 있어 곡면의 형상뿐만 아니라 유로 면적에 대한 고려가 함께 이루어져야 함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Griffin, L. W. and Dorney, D. J., 2000, Simulation of the Unsteady Flow Through the Fastrac Supersonic Turbine, Journal of Turbomachinery, Vol. 122, pp. 225~233
- (2) Erdos, J. I., Alzner, E. and McNally, W., 1977, Numerical Solution of Periodic Transonic Flow Through a Fan Stage, AIAA Journal, Vol. 15, No. 11, pp. 1559~1568.
- (3) Giles, M. B., 1990, Stator/Rotor Interaction in a Transonic Turbine, Journal of Propulsion, pp. 621~627.
- (4) Hodson, H. P., 1998, Blade Row Interference Effects in Axial Turbomachinery Stages, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1998-02.
- (5) 이은석, 노준구, 김진한, 조광래, 2004, 프로즌 로터 기법을 이용한 부분 흡입형 터빈 CFD 해석, Preceedngs of The Third National Congress on Fluids Engineering, August 26-28.
- (6) 박편구, 이은석, 정은환, 김진한, 2004, 1.4MW급 부분흡입형 터빈의 유동해석, 2004년 한국군사과학기술학회 종합학술대회논문집, Vol. II, pp. 590 ~ 593.