한국마린엔지니어링학회지 제33권 제3호, pp. 545~552, 2009. 5 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

선박용 중형디젤엔진 공기시동모터의 유동특성에 관한 수치해석

양수영* · 김태훈** · 이연원† · 도덕희***

(원고접수일 : 2009년 5월 7일, 원고수정일 : 2009년 5월 25일, 심사완료일 : 2009년 5월 28일)

Numerical Analysis on Flow Characteristics of Air Starting Motor for Marine Medium-Speed Diesel Engine

Su-Young Yang* · Tae-hun Kim** · Yeon-Won Lee† and Deog-hee Doh***

Abstract : The marine medium-speed diesel engines are operated by two methods; one is the electric motors, and the other air starting motors. Even though air starting motor is dependent of the engine types and sizes, it has been widely used in this area due to its simplicity, convenience and reliability. However most of them are currently imported from overseas due to the lack of the cutting-edge technology in terms of design and manufacturing. Therefore, from the point of this view, the air starting motor needs to be produced by our own techniques. The purpose of this paper is to give the designing parameters in order to make a proper "Air Starting Motor" using CFD. The aerodynamic approaches were given to understand the internal flow characteristics of the air starting motor. In addition, we have carried out the effects of tip clearance. In the calculations the tip clearance of air starting motor has been varied between 0% and 5.7% of blade span.

Key words : Air starting motor(공기시동모터), CFD(전산유체역학), Aerodynamic approaches (공기역학적 접근법), Tip clearance(팁간격)

1. 서 론

선박에 사용되는 중형디젤엔진(edium-speed diesel engine)의 기동방법을 분류하면 크게 전기모터에 의한 기동방식과 공기시동모터(Air starting motor)에 의한 기동방식으로 나눌 수 있다. 공기시동모터(Air starting motor)는 엔진의 종류와 크기에 따라 달라지나 구조가 단순하고 운동부분이 제한적이기 때문에 고장이 적고 관리가 편리하여 현재 중형디젤엔진 시동에는 대부분 공기시동모터를 사용하고 있다. 본 연구는 중형디젤엔진의 기동에 사용되는 공기시동모터 설계의 기초자료로 활용하기 위하여 CFD(전산유체역학) 기법을 이용하여 실제 적용모델에 대한 내부유동 특

† 교신저자(부경대학교 기계공학부, E-mail:ywlee@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6162)
* 한국조선기자재연구원(전 부경대학교 대학원)
** JATCO Korea
*** 한국해양대학교 기계정보공학부

성을 파악하고, 터빈의 성능에 직간접적인 영향을 주는 여러 가지 설계인자 들 중 tip clearance에 따른 성능평가에 그 목적이 있다.

공기시동모터는 압축된 고압의 공기가 1단 stator를 지나 1단 rotor로 유입되면서 원주방향으로 미는 힘에 의하여 그리고 rotor의 압력면과 흡입면 사이에 발생하는 압력차에 따라 축을 기준으로 회전을 하게 된다. 그리고 고압공기가 1단 rotor를 고속으로 통과하면서 팽창하여 발생하는 운동량의 변화로 엔진의 torque를 이겨내면 비로소 회전을 시작한다. 이때 팽창된 공기는 2단 stator를 거쳐 2단 rotor에 부딪쳐 운동량으로 변하고 모터의 출력 일부를 담당하게 된다[1].

이와 같은 터빈 내부의 유동은 블레이드 부하, 날개간의 근접성, 유동간섭과 높은 회전속도에 의해 유동자체의 원심력 효과, 휘어진 전연 볼텍스, 강한 팁 와류(Tip vortex), 틈새 유동(Clearance flow), 후연 볼텍스부의 형성, rotor와 stator 사이에서의 상대운동으로 인하여 복잡한 비정상 유동의 양상을 보인다[2],[3].

이처럼 복잡한 터빈내부의 유동에 관한 연구는 터빈의 rotor-stator 설계와 성능변화의 예측을 위하여 다양하게 시도되었다. 또한 터빈 내부의 복잡한 유동현상파악 및 설계데이터를 얻기 위해 실험적 연구와 더불어 수학적 모델링 통해 얻어진 비선형 지배방정식의 해를 구하는 수치해석적 연구가 수행된 바 있다[4]-[7]. 이에 본 연구에서는 CFD 기법을 통해 실제 적용모델에 대한 tip clearance 변화에 따른 성능평가를 실시하였다. 또한 CFD를 통하여 내부유동 특성을 파악하여 tip clearance 변화에 따른 내부 유동장 변화를 조사하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 수치해석 기법

터빈 내부의 유동을 지배하는 방정식은 중력항을 무시한 Navier-Stokes 방정식으로 연속체 유동 중 어느 한 점을 중심으로 질량보존 및 운동량을 표현하는 편미분형태의 지배방정식이다. 지배방정식에 대한 이산화 및 행렬에 대한 계산은 상용코드인 CFX-11.0을 사용하였으며, 계산에 사용된 난류모델은 $k-\epsilon$모델이다. 아래의 식은 지배방정식과 난류모델을 정리한 것이다.

연속 방정식

$$\rho\frac{\partial \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_i}} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\rho \mathrm{u_j}\frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}(\mathrm{u_i}) = -\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x_i}} + (\mu+\mu_\mathrm{t})\frac{\partial^2 \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_j}\partial \mathrm{x_i}} \tag{2}$$

난류운동에너지 k와 난류운동에너지 소산률 ϵ

$$\rho\frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \rho\epsilon \tag{3}$$

$$\rho\frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k\rho}(C_{\epsilon 1}P_k - C_{\epsilon 2}\epsilon) \tag{4}$$

난류 점성항

$$\mu_\mathrm{t} = \rho \mathrm{C}_\mu \frac{\mathrm{k}^2}{\epsilon} \tag{5}$$

난류운동에너지 생성항

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \tag{6}$$

난류운동에너지와 소산항에 사용된 계수

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92 \tag{7}$$

2.2 수치해석을 위한 모델

실제 공기시동모터는 기본적으로 3차원 유동이며, 형상은 중심축에 대하여 대칭이 아니다. 따라서 계산을 축대칭으로 단순화시키기 어렵기 때문에 정확한 계산을 위하여 전체유동장에 대한 해석을 수행해야 한다. 하지만 본 해석에서는 rotor와 stator 사이를 흐르는 유동이 tip-clearance에 따라서 어떠한 특성을 보이는 가에 초점을 맞추었으므로 2개의 공기유입 nozzle이 대칭이라는 가정

을 하여 유동장을 축대칭으로 단순화하고 정상상태 유동에 대한 계산을 수행하였다.

2.3 격자계와 경계조건

격자생성에 사용된 프로그램은 격자생성 전용프로그램인 ICEM-CFD 11.0이며, 계산에 사용된 격자의 종류는 tetrahedral(사면체)와 벽면주위에 프리즘(prism) 격자를 사용하였으며, 약 170만개 정도의 절점을 생성하여 해석에 사용하였다. 그리고 블레이드 벽면주위에서의 유동의 변화를 정확하게 예측하기 위하여 벽면주위 격자계를 조밀하게 구성하였다.

Fig. 1과 같이 3차원으로 구성된 유동장은 5개의 영역이 존재한다. 첫 번째 영역은 유체가 유입되는 입구와 1단 stator 부분이고 다음은 1단 rotor 영역이며 세 번째는 2단 stator 영역, 네 번째는 2단 rotor영역이며 마지막으로 다섯 번째는 출구영역이다.

각 영역에 대한 연결은 CFX가 제공하는 interface 조건을 설정하여 연결하였고, 입구에서의 경계조건은 목표치인 7MPa로 정하였고, 출구 경계조건은 대기압 조건을 부여하였다. 그리고 유동의 흐름에 의한 블레이드 회전을 나타내기 위하여 rotor와 연결되는 영역의 연결면은 회전효과를 부여하기 위하여 MFR(Multi Frame Reference) 조건을 적용하였다. Rotor의 회전속도는 20000rpm을 주었다. 그리고 벽면에 대한 조건은 점착조건(No-slip condition)을 사용하였다.

실제 공기 시동모터가 구동되는 메카니즘은 공기시동모터 입구와 출구의 압력차(0.7MPa)인하여 고속의 공기가 터빈으로 유입되고 유입된 공기로 인하여 터빈이 회전하는 과정을 거치고, 터빈의 회전으로 인하여 터빈과 연결된 엔진회전축이 회전하여 엔진이 시동되는 구조를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 메카니즘을 모두 구현하지는 못하고 고속의 공기가 유입되었을 때 터빈이 회전하는 상용회전수를 설정하여 터빈이 일정한 회전수로 회전한다고 가정하고 터빈 입출구의 압력을 설정하여 계산을 수행하였다.

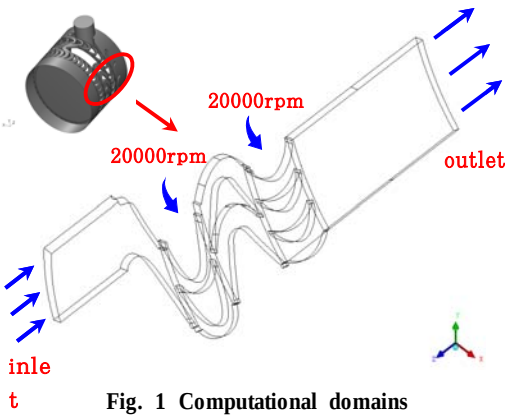


Fig. 1 Computational domains

3. 연구결과 및 고찰

3.1 유동특성

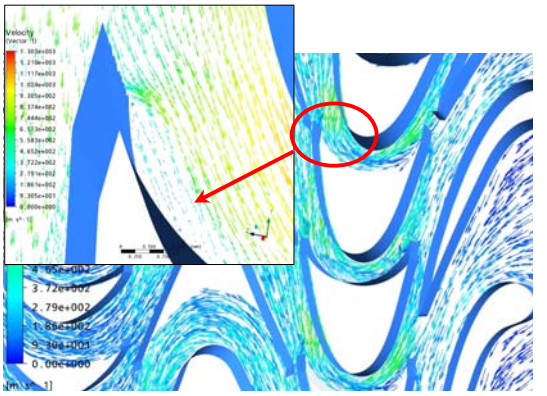
3.1.1 터빈주위 속도벡터

터빈이 회전하고 입 출구의 차압이 존재하는 경우에 발생하는 내부 유동장에 대한 속도벡터를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 고속으로 1단 stator를 지나 1단 rotor로 유입된 공기의 속도는 blade의 회전영향과 유동장의 축소로 인해 증가하는 양상을 보인다. 그러나 Fig. 2(a)와 (c)에서 blade 모서리의 영향으로 재순환 영역이 생성되어 유동을 방해하는 역할을 하게 됨으로, 전체적인 속도벡터 분포의 결과는 rotor와 stator 표면의 손실로 인하여 출구로 진행할 수록 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. Span에 따른 속도벡터의 결과 span 0.5에서 속도가 가장 빠르고 0.1에서 속도가 가장 느리게 나타나고 있으며 0.9에서는 중간정도의 속도를 보이고 있다.

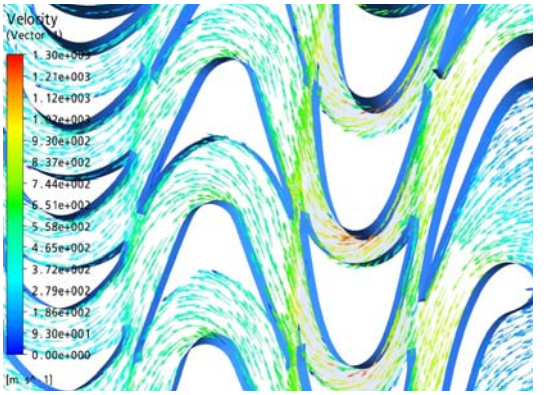
3.2.2 Pressure drop

Fig. 3은 주류방향에 대한 각 위치에 따른 전압(total pressure)과 정압(static pressure)을 나타낸 그래프이다. 그림에서 1단 stator와 1단 rotor를 지나면서 속도의 증가로 인해 대부분의 정압이 동압으로 바뀐다. 그리고 벽면에서의 마찰과 재순환영역으로 인하여 stator와 rotor를 지나면서 전압은 하강하는 것을 확인할 수 있다. Rotor를 지나면서 국소적으로 정압의 상승이 발생하는데

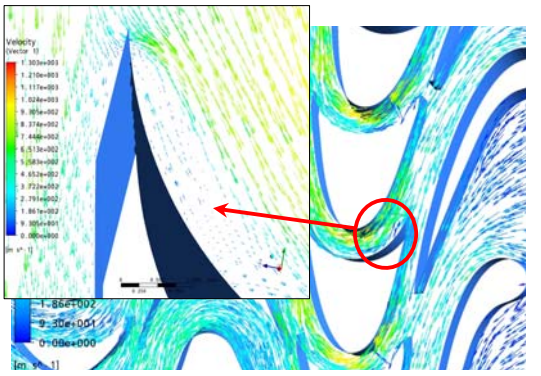
이는 rotor 회전으로 인해 국부적으로 압력이 상승한 것으로 생각할 수 있다.



(a) span = 0.1(Near to hub)



(b) span = 0.5(at midspan)



(c) span = 0.9(Near to shroud)

Fig. 2 Velocity vector fields(m/s)

3.2 Tip clearance effects

본 논문에서는 공기시동모터 설계 시에는 고려해야 할 여러 가지 변수들이 있겠지만 그 중 가장 큰 영향을 미친다고 알려진 tip clearance 간격에 따른 터빈내부의 유동특성과 공시시동모터의 성능평가를 실시하였다.

Tip clearance의 간격은 0mm(0%), 0.1mm (2.8%), 0.15mm(4.3%), 0.2mm(5.7%) 일 때의 4가지 경우에 대한 모델링을 하여 계산을 수행하였다. 여기서 %는 블레이드 span 길이에 대한 tip clearance의 비를 나타낸 것이다.

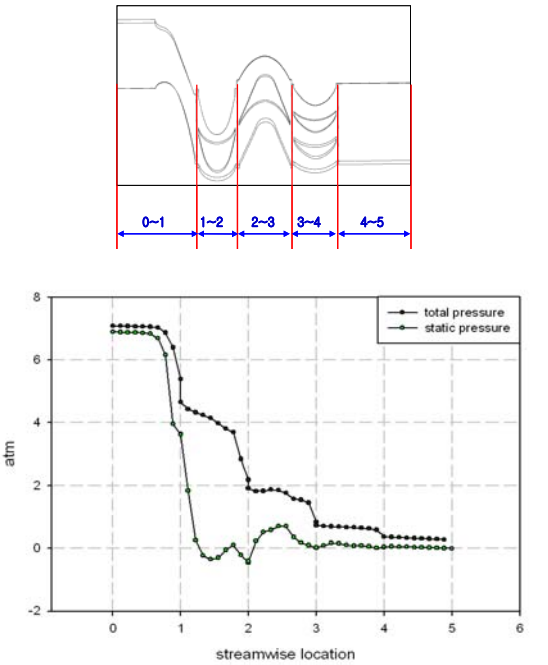


Fig. 3 Pressure drop(atm)

Fig. 4은 주류방향으로 case별 각 위치에서의 속도 값을 나타낸 그래프이다. Stator를 지나 rotor로 유입될 때의 속도 값을 보게 되면 약 575m/s, 512m/s, 500m/s, 420m/s로 tip clearance가 증가할수록 속도 값의 감소가 나타났다.

Tip clearance 증가에 따른 tip clearance가 커지게 되면 tip에서 발생하는 와류의 강도가 강해지고 유동의 손실이 커지기 때문이다. 그리고 tip

clearance가 0.2mm일 때의 속도 그래프를 보게 되면 rotor에서의 속도 그래프가 계단함수의 형태를 나타내는 비선형적인 분포를 보인다.

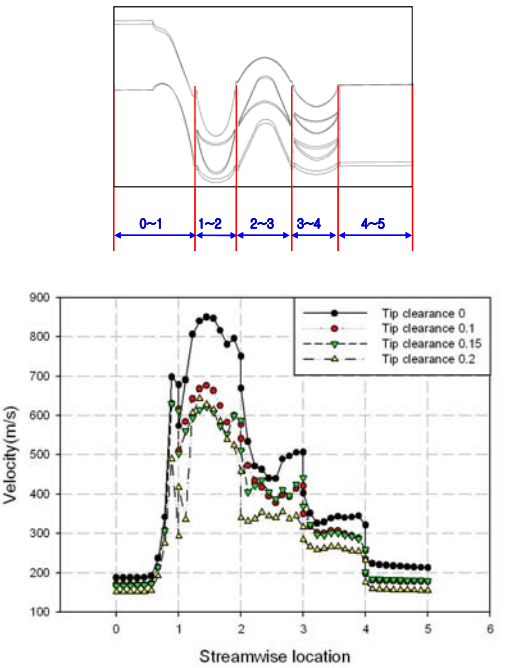


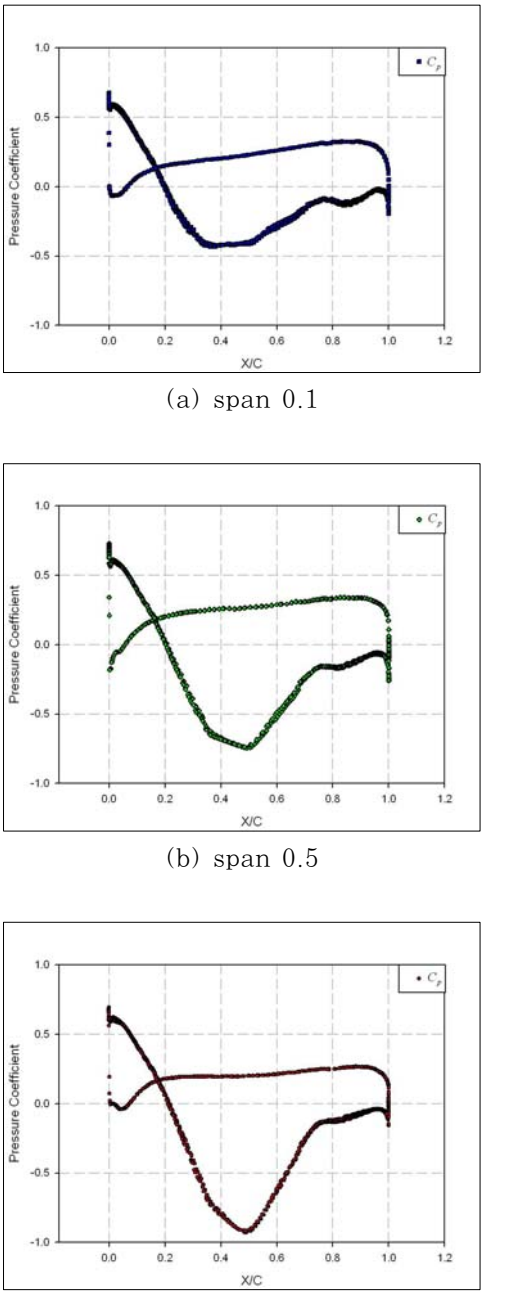
Fig. 4 Distribution of streamwise velocity along the blade

Fig. 5는 첫 번째 rotor의 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)에서의 압력계수분포를 나타낸 그래프이다. 압력계수는 다음과 같이 정의 한다.

$$C_p = (p - p_0)/(\rho U^2/2) \quad (8)$$

여기서, p_0는 기준압력이고 X/C는 chord 길이, 즉 원의 현을 나타낸다.

전체적인 압력계수를 보면 압력차이가 중앙부분에서는 크고 양 끝부분에서는 압력차이가 작게 나타난다. 그리고 hub근처에서 shroud쪽으로 갈수록 속도의 상승으로 인해 blade 중심에서의 압력계수 값은 낮아진다. Rotor의 좌측면에서의 C_p값을 보게 되면 pressure side에 비하여 suction side에서의 C_p값이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 rotor의 회전반향과 반대방향의 힘이 작용하여 rotor의 효율을 저하시켜 torque값의 감소를 초래한다.



(a) span 0.1

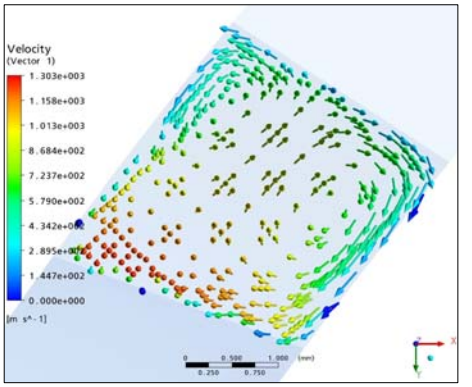
(b) span 0.5

(c) span 0.9

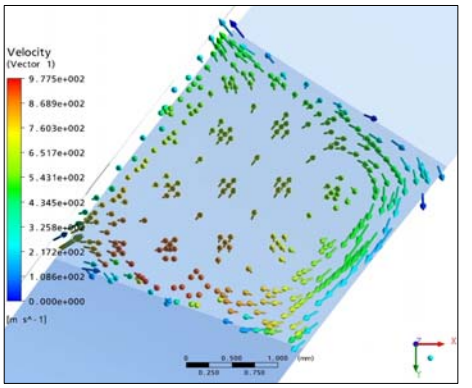
Fig. 5 Distribution of Pressure Coefficient at Rotor 1

Fig. 6은 각 Tip clearance 간격에 대하여

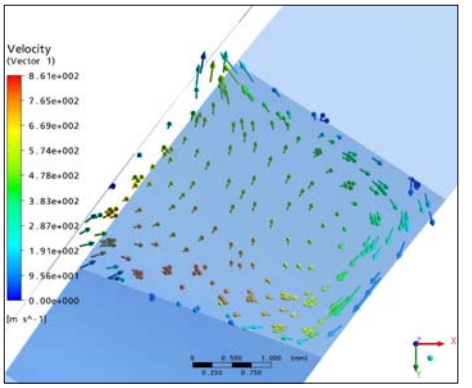
rotor사이를 지나는 축방향 속도벡터를 나타낸 그림이다. 최초 tip 간격이 없는 경우 span 방향으로 두 개의 와류가 생성됨을 확인할 수 있고 간격이 커질수록 1개의 와류를 형성하면서 그 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 즉 tip clearance가 커질수록 blade 하류방향에서 재순환영역이 폭넓게



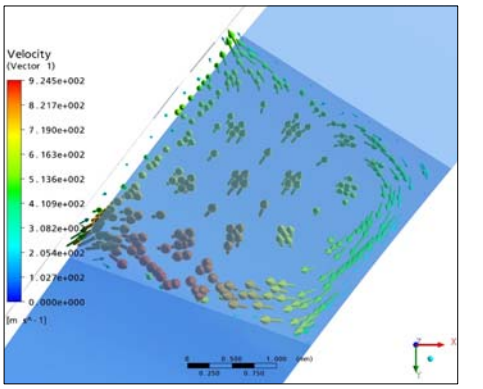
(a) 0



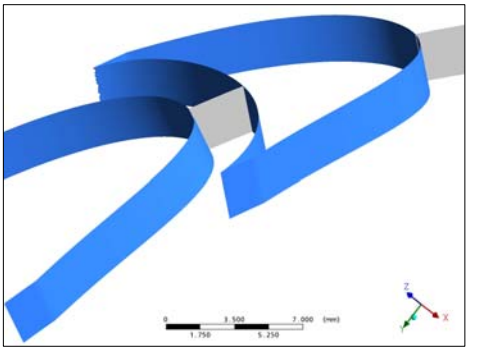
(b) 0.1mm(2.8%)



(c) 0.15mm(4.3%)



(d) 0.2mm(5.7%)



(e) plotting position (gray plane)

Fig. 6 Velocity vector fields with tip clearances(%)

Fig. 7은 각 tip clearance에 대한 torque값을 나타낸 그래프이다.

먼저 1단 rotor와 2단 rotor에서의 torque값을 각각 구하여 양쪽에 걸리는 힘을 비교하여 보았다. 전체적으로 2단 rotor에 비하여 1단 rotor에서 발생하는 torque값이 높게 나타났다. 이는 1단 rotor에서의 압력손실이 크게 발생하여 속도가 감소된 상태에서 2단 rotor로 유체가 유입되므로 2단에 비해 1단의 torque 값이 크게 나타나는 것이다. 그리고 tip clearance에 따른 torque값을 보게 되면 tip clearance가 없는 경우 1단 rotor에서는 17.44N · m의 값을 나타내지만 tip clearance가 0.1mm인 경우 약 26%가 감소한 12.85Nm의 값을 나타낸다. 그러나 tip clearance가 0.15mm, 0.2mm로 상승할 경우에는 직전 torque 값에 비해 2%, 1.3%의 낮은 torque값 감소율을 보인다. 전체적인 torque값의

경우 tip clearance가 0mm인 경우 25.2N·m의 값을 나타내며 tip clearance가 증가하면서 직전 값에 비해 19.27Nm(24% 감소), 18.48Nm(4% 감소), 17.93Nm(3% 감소)로 감소하였다.

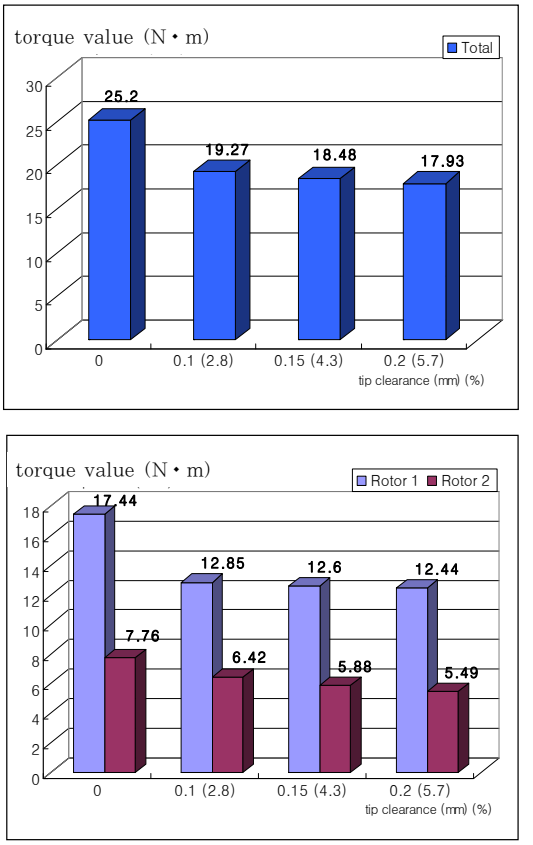


Fig. 7 Torque value along the case

4. 결 론

1) blade 전연의 기울기 영향으로 hub근처에서의 속도벡터와 shroud 근처에서의 속도벡터 차가 많이 발생하고, blade 끝단 형상의 영향에 의해 압력면에서 순환유동이 발생하였다.

2) 1단 rotor에서의 압력손실이 크게 발생하여 속도가 감소된 상태에서 2단 rotor로 유체가 유입되므로 2단에 비해 1단의 torque 값이 크게 나타난다.

3) Tip clearance에 따른 torque값을 비교하였을 때 0.1mm로 tip clearance가 증가하였을 때 약 24%의 torque값의 급격한 감소가 나타나다가 0.15mm, 0.2mm로 증가할 경우에는 급격한 감소는 보이지 않았다.

참고문헌

[1] 신흥정공(주), "중형디젤엔진용 공기시동모터개발", 중소기업기술혁신개발사업 최종보고서, pp. 1-3, 2007.

[2] 조장근, 박원규, "정익과 동익의 상호작용을 고려한 익렬의 공력 형상 최적 설계", 유체기계저널, Vol. 5, No. 3, pp. 40-45, 2002.

[3] 김경한, 정영래, 박원규, 이상욱, " 로터-스테이터 상호작용을 고려한 3차원 유동해석", 한국전산유체공학회, 2000년 춘계학술대회 논문집, pp. 78-83, 2000.

[4] V. I. Gnesin, L. V. Kolodyazhnaya, R. Rzadkowski, "A numerical modelling of stator-rotor interaction in a turbine stage with oscillating blades", Journal of Fluids and Structures, Vol. 19, pp. 1141-1153, 2004.

[5] Y. L. Lau, R. C. K. Leung, R. M. C. So, "Vortex-induced vibration effect on fatigue life estimate of turbine blades", Journal of Sound And Vibration, Vol. 30, pp. 698-719, 2007.

[6] M. Mingming, S. Yanping, W. Zhongqi, "Numerical investigation of the unsteady flow in a transonic compressor with curved rotors", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 21, pp. 97-104, 2008.

[7] H. Yang, H. C. Chen, J. C. Han, H. K. Moon, "Numerical study of film cooled rotor leading edge with tip clearance in 1-1/2 turbine stage", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp. 3066-3081, 2008.

저 자 소 개

이연원(李蓮源)

1958년 08월생, 1981년 경북대학교 기계공학과 학사, 1983년 동 대학원 기계공학과 석사, 1993년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 박사, 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 부경대학교 공학교육혁신센터장, Journal of Visualization Managing Editor, 한국마린엔지니어링학회 부회장, 한국가시화정보학회 편집이사. 한국유체기계공업학회 편집이사

양수영(梁洙寧)

1981년 12월생, 2007년 부경대학교 기계공학과 학사, 2009년 동 대학원 에너지시스템공학과 석사, 현재 한국조선기자재연구원 연구원

김태훈(金兌勳)

1975년 1월생, 2001년 부경대학교 기계설계학과 학사, 2003년 동 대학원 기계공학부 석사, 2007년 일본 사가대학교 대학원 기계공학과 박사, 2004년 2월~8월 KIST 인턴연구원, 2007년 11월~2월 부경대학교 산업과학기술연구소 전임연구원, 현재 자트코 코리아 엔지니어링 해석기술센터 담임연구원.

도덕희(都德熙)

1962년 10월생, 1985년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1989년 동 대학원 기관학과 석사, 1995년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 박사, 1995년 3월~9월 포항공대 첨단유체공학연구센터 위촉연구원, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수, Journal of Visualization Managing Editor, 한국마린엔지니어링학회 연구이사, 대한기계학회 유체공학부문 이사, 한국가시화정보학회 학술이사.