

주변 구조물을 포함하는 헬리콥터 로터 블레이드 공력 해석

강 희 정

한국항공우주연구원 회전익기술팀

A NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SURROUNDING BUILDINGS ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF A ROTOR SYSTEM ON THE WHIRL TOWER

Hee Jung Kang

Rotor Team, Korea Aerospace Research Institute

Numerical calculations were performed to investigate the influence in aerodynamic characteristics of a rotor system by surrounding structures and the ground effect for the rotor blade on a whirl tower is also investigated. Three dimensional Navier-Stokes simulations were carried out by using unstructured overset mesh technique and parallel computation. The calculated hover performance showed good agreement with the experimental result and showed that the structures around the whirl tower did not affect the aerodynamic characteristics of the blade. The ground effect was studied by comparing with the numerical result for the out of ground condition and the result of an analytic model.

Key Words : 로터 블레이드(Rotor Blade), 헬리콥터(Whirl Tower), 전산유체역학(CFD), 지면효과(Ground Effect)
비정렬 중첩격자(Unstructured Overset Mesh),

1. 서 론

로터 시스템 개발에 있어, 항공기에 장착하기 전, 로터 시스템의 적합성, 내구성 및 동안정성, 블레이드 공력 성능 등을 확인하는 수단으로 헬리콥터 시험(Whirl Tower Test)이 유일하며, 항공기 장착을 위한 로터 블레이드의 트랙킹 및 밸런싱 등 다양한 업무를 수행하게 되므로 중요도가 매우 높다. 한국항공우주연구원에서는 고흥 항공센터 내에 헬리콥터를 구축하고, 로터 구성품의 성능, 동안정성 시험, 내구성 시험 등의 업무를 수행하고 있으며, 최근 기상조건에 상관없이 로터 블레이드/허브 및 주요 부품 교환과 점검 업무를 원활하게 수행하기 위해 Fig. 1과 같이 헬리콥터 옆에 이동이 가능한 무빙셀터를 구축하여 활용하고 있다.

일반적으로 헬리콥터가 지면 가까이 정지 또는 전진비행 할 때, 로터 회전면을 통과하는 유동은 지면을 따라 급속히 확장되며, 이는 로터 블레이드에 의한 유도속도를 변화시키고, 로터의 추력, 파위에 영향을 미치게 된다. 헬리콥터에서도 실물크기의 로터 블레이드를 장착하여 시험하게 되므로, 헬리콥터의 제한된 높이로 인해 지면효과(Ground Effect)를 동반하게 되며, 그 영향성을 파악하여 시험결과를 보정하여야만 로터 블레이드의 정확한 성능을 확인할 수 있다. 또한, 헬리콥터 주변에 위치하고 있는 제어빌딩, 무빙셀터 같은 구조물과, 헬리콥터 자체에 대한 영향성도 확인되어야 할 요소이다. 이러한 요소들은 로터 블레이드 성능시험 시 직접적으로 성능 인자에 영향을 미치게 되므로 반드시 확인되어야만 한다.

본 연구에서는 비정렬 중첩격자 기반의 전산유체 수치기법을 사용하여 제어빌딩 및 무빙셀터 등 주변 구조물을 포함하는 헬리콥터에서 회전하는 로터 블레이드 공력 수치해석을 수행함으로써, 주변 구조물이 블레이드 공력 특성에 미치는 영향성 및 유동장에 대해 고찰하였으며, 수치해석 결과와 지면효과에 대한 기존의 모델식을 비교함으로써 지면효과 영향성을 파악하였다.

Received: April 18, 2012, Revised: May 31, 2012,

Accepted: June 1, 2012.

* Corresponding author, E-mail: hkang@kari.re.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2012.17.2.078>

© KSCFE 2012



Fig. 1 Whirl Tower Test Facility

2. 수치해석 기법

2.1 유동 해석 코드

주변 구조물을 포함하는 휠타워에서 회전하는 로터 블레이드 형상에 대한 유동해석을 수행하기 위해 비정렬 혼합격자 기반의 로터 해석용 유동코드[1]를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 로터 해석용 유동코드는 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하며, 격자점 중심의 유한 체적법을 적용하여 지배방정식을 차분화 하였다. 제어 체적은 메디안-듀얼(median-dual) 방법을 사용하여 구성한다.

비점성항의 대류항은 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting)을 이용하여 계산되며, 이차정확도 확보를 위해 최소자승법에 기초한 유동 변수 재구성기법을 사용하고, 비물리적인 수치진동을 억제하기 위해 Venkatakrishnan의 기울기 제한자[2]가 적용되었다. 점성 대류항은 중심차분법을 사용하여 계산하였으며, 유동변수의 1차 미분값은 Green-Gauss 방법을 이용하여 계산하였다. 난류모델은 Spalart-Allmaras의 1-equation 난류 모형을 사용하였다.

시간 적분은 이차 정확도 Euler 후방 차분에 근거한 내재적 기법을 사용하며, 선형시스템은 point Gauss-Seidel 방법을 사용하여 계산된다.

주변 구조물과 고정된 휠타워를 중심으로 회전하는 로터

블레이드의 상대운동을 모사하기 위해 중첩격자기법[3]을 사용하였으며, 계산시간의 절감과 메모리 한계를 극복하기 위해, 수치적 방법들은 영역 분할법을 사용하여 병렬화 하였다. 해석 격자의 영역분할은 MeTiS library를 사용하였고, 각 분할 영역간의 유동 변수에 대한 자료 교환은 MPI library를 사용하였다.

2.2 휠타워 및 주변 구조물 모델링

휠타워에서 회전하는 로터 블레이드의 공력특성에 대한 주변 구조물의 영향성 확인을 위해, 휠타워만 있는 경우를 기본으로, 제어빌딩과 무빙셸터 구조물을 추가하여 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 Fig.1의 휠타워 설비와 주변 구조물이 수치해석에 사용된 단순화 시킨 모델링 결과를 보여준다. 수치해석 시 블레이드 리프트와 작은 구조물은 단순화 시켰으며, 펜스 및 로터시스템의 허브/조종 구성품도 수치해석에는 포함시키지 않았다. 블레이드가 회전하는 회전면의 높이는 지면으로부터 9.65m로 블레이드 반경 대비 1.22R에 해당한다. 구조물인 제어빌딩은 휠타워의 회전축으로부터 2.7R에 위치하고 있으며, 무빙셸터는 2.3R 떨어진 곳에 위치하고 있다.

2.3 경계조건 및 계산 격자

수치해석에 적용된 경계조건으로는 블레이드 표면에는 점성 벽면조건을 부여하였고, 블레이드 반경 대비 5R에 위치하는 원방경계면에는 Riemann Invariant를 사용하는 특성치 경계조건을 부여하였다. 휠타워, 지면 및 제어빌딩에는 비점성 벽면조건을 부여하였는데, 이것은 구조물 및 지면이 가지고 있는 점성효과 보다는 이들에 의한 압력장 변화가 블레이드의 공력 특성 영향을 미치는 주요 요소로 작용하기 때문에, 비점성 벽면조건을 부여하여도 충분하다. 또한 점성격자를 생성하지 않아도 되므로 부가적으로 계산시간을 줄일 수 있는 이점이 있다.

로터시스템은 4개의 블레이드로 구성되어 있으므로, 수치해석에 사용된 중첩 격자계는 각 블레이드에 대한 서브 격자계 4개와 휠타워 및 지면, 제어빌딩을 포함하는 1개의 주 격자계로 구성된다. 계산에 사용된 격자계는 블레이드의 점성영

Table 1 Computational Meshes

		Whirl Tower	+ Control Building	+Moving Shelter
Total Nodes		4,616,304	4,618,716	4,660,181
Total Cells		14,508,332	14,517,980	14,639,659
Blade (4ea.)	Nodes	4,143,732		
	Cells	11,778,180 (Prism-6,234,400)		
	y1/c	1.09x10 ⁻⁵ (y+ ~ 1.5)		

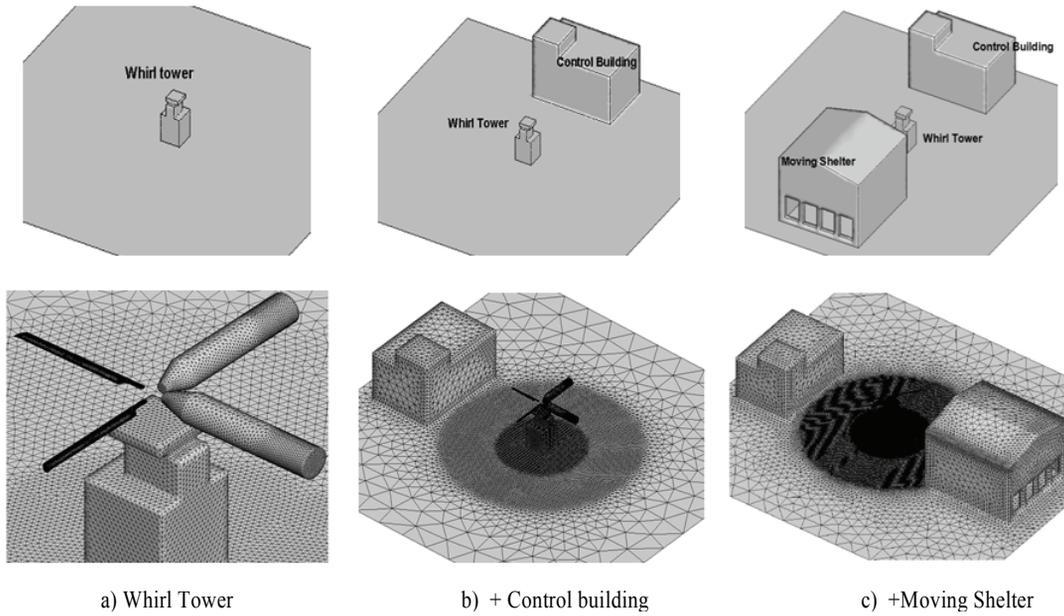


Fig. 2 Geometry Configuration and Surface Meshes

역 계산을 위한 약 623만개의 프리즘과 비점성영역의 828만개의 사면체로 구성된 총 1,451만개의 셀과 461만개의 격자점으로 구성된다. 수치해석에 사용된 격자계는 Table 1과 같다.

Fig. 2는 각 해석의 경우에 사용된 지면, 휘타워, 제어빌딩, 무빙셸터 및 블레이드에서의 표면 격자와 블레이드의 중첩격자계를 보여 준다. 블레이드로부터 생성된 후류의 포착을 위해 블레이드 끝단부근과 휘타워 주위에 격자를 조밀하게 배치하였다.

Fig. 3은 블레이드의 표면격자와 점성격자를 보여준다. 점성 계산을 위한 블레이드 표면에서 경계층의 프리즘 격자는 1.4의 증가 비를 가지고 15개의 격자층이 적용되도록 하였다. 초기 경계층의 격자점 높이는 끝단 마하수와 레이놀즈 수를 기준으로 설정하여 $y_1 \approx 1 \times 10^{-5}$ 정도의 값을 사용하였으며 계산에 의해 얻어진 값은 1.5 이하의 값을 가져 유동의 경계층 해석에 적절하다고 판단하였다.

3. 수치해석 결과

휘타워와 제어빌딩이 있는 경우 콜렉티브 피치각 전 영역인 -6.5 ~ 6.5도에 대해 2도 간격으로 계산을 수행하였으며, 추가적으로 무빙셸터의 영향성을 확인하기 위해 두 가지의 콜렉티브 피치각 0도와 4도 조건에 대해 계산을 수행하였다. 병렬계산에 사용된 CPU는 총 256개 이며, 계산시간은 무빙셸터가 있는 콜렉티브 피치각 0도의 경우 로터 11 회전에 대

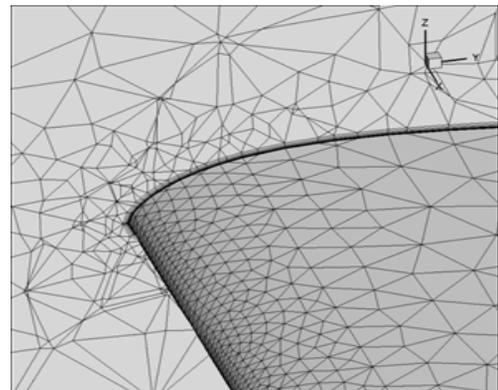


Fig. 3 Viscous Meshes on the blade surface

해 약 84시간 CPU TIME이 걸렸다.

블레이드 회전속도는 272RPM으로 끝단 마하수 0.661에 해당되며, 블레이드 코드길기와 끝단 마하수 기준으로 레이놀즈 수는 8.47×10^6 이다. 각 그림에서 추력 및 토크계수는 제어빌딩이 있는 경우의 콜렉티브 피치각 6.5도의 값에 대해 상대적인 값으로 나타났다.

3.1 주변 구조물의 영향성

Fig. 4는 콜렉티브 피치 4도에서 로터 블레이드 회전수에 따른 추력 계수의 수렴선도를 보여준다. 주변 구조물, 즉 제

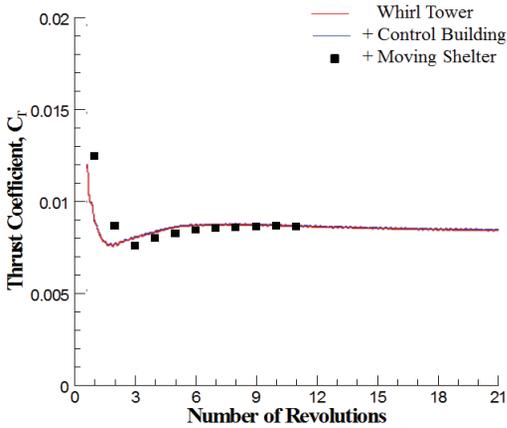


Fig. 4 Thrust convergence history in case of collective pitch angle 4 deg

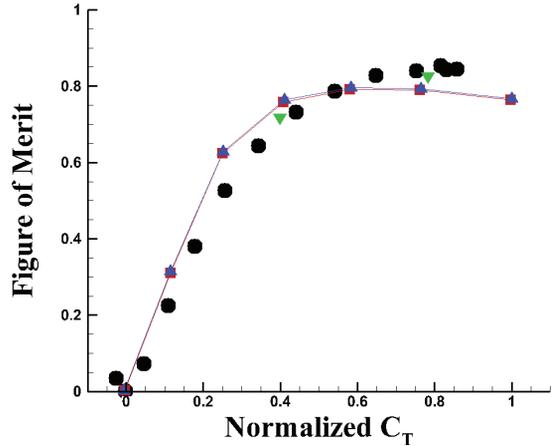


Fig. 6 Comparison of figure of merit

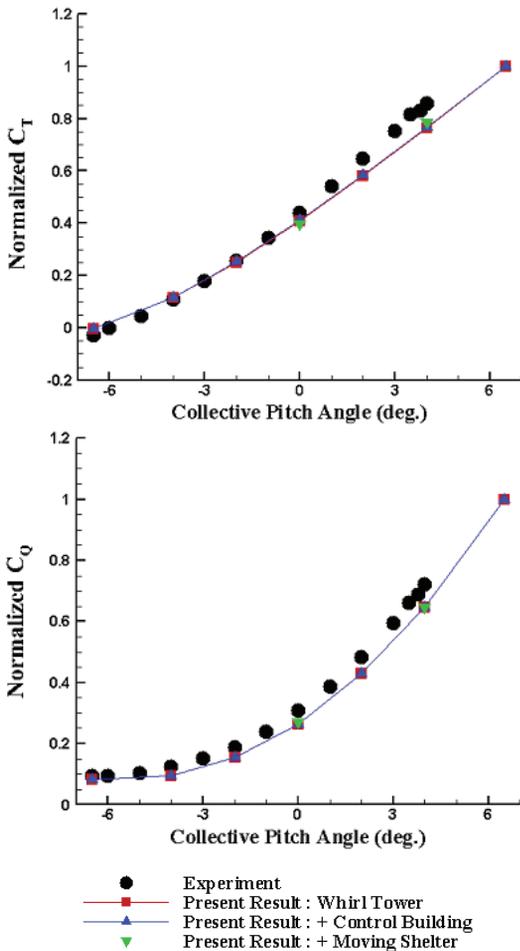


Fig. 5 Comparison of thrust and torque coefficients

어 빌딩, 무빙셸터의 유무에 상관없이 거의 동일한 수렴특성을 나타낸다. 계산 수행은 휠타워 및 제어빌딩이 있는 경우 21회전을 수행하였으며, 약 7회전 이후에는 준 정상상태로 수렴한 것으로 나타났다. 따라서 무빙셸터가 있는 경우에는 계산시간을 줄이기 위해 11회전 계산을 수행하였다.

Fig. 5, 6은 정지 비행 성능 계수 및 지표를 시험결과[4]와 비교하여 나타낸 것이다. 성능 계수들은 계산된 마지막 1회전의 평균값을 사용하였다. 토크 계수는 콜렉티브 피치각 전 영역에서 시험값 보다 약간 작게 예측하고, 추력계수의 경우 고 피치각에서 시험값과 차이를 보이고 있지만, 전반적으로 계산결과와 시험 결과가 일치함을 볼 수 있다. 이러한 성능계수 값의 차이는 성능지표인 Figure of Merit에 반영되어, 콜렉티브 피치각 0도를 기준으로 저 피치각에서는 계산결과가 시험결과보다 크게, 고 피치각에서는 작게 예측되었다. 이러한 차이는 Fig. 2에서도 볼 수 있듯이 계산 조건에서는 구조물을 단순화함으로써 무시되었지만, 실제 시험에서는 블레이드 가까이 존재하는 리프트, 휠타워 구조물의 위에 존재하는 펜스 등에 의한 영향과 블레이드 자체도 실체는 탄성 블레이드지만, 계산에서는 강체 블레이드로 모사된 점 등 실제 시험 환경과 해석 조건의 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

주변 구조물인 제어빌딩과 무빙셸터의 영향성은 거의 없는 것으로 나타나고 있는데, 회전축으로부터 블레이드 반경 대비 약 2.7R, 2.3R 만큼 떨어져 있어 블레이드의 공력 특성에는 큰 영향은 주지 못하기 때문이다.

Fig. 7은 콜렉티브 피치각 4도에서 지면, 휠타워, 제어빌딩, 무빙셸터에서의 마하수 분포를 나타낸 것이다. 로터 블레이드의 후류는 지면을 따라 로터 회전축을 중심으로 퍼져나가고 있으며, 제어 빌딩의 전면과, 무빙셸터의 입구에도 영향을 미치고 있다. 지면에서는 로터 회전축을 중심으로 로터 반경에

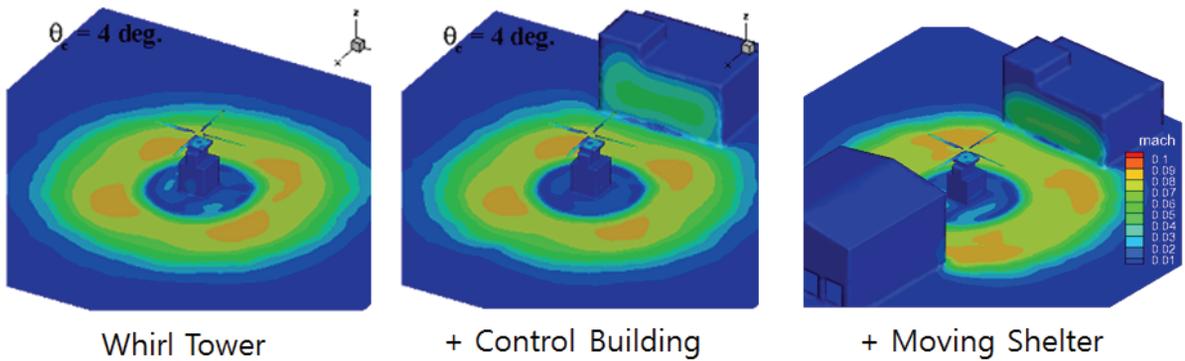


Fig. 7 Surface Mach Contours

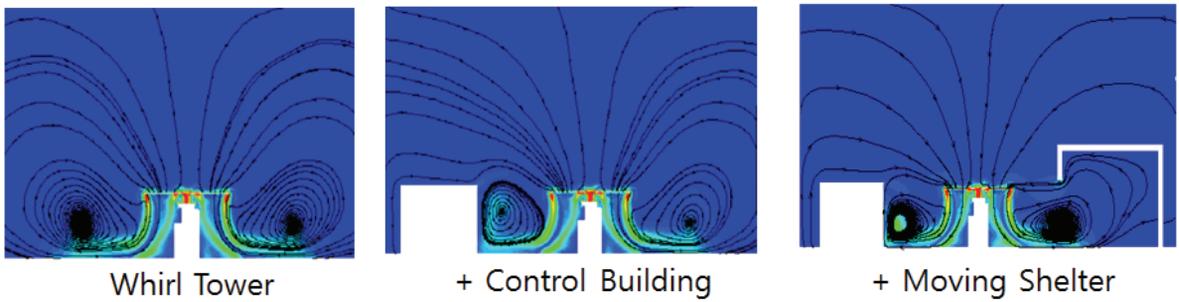


Fig. 8 Vorticity Contours and Streamlines at y=0 plane

해당하는 범위 이내에서는 속도분포가 매우 작음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 동일한 콜렉티브 피치각 4도에 대해 Y=0 평면에서 와도분포와 휠타워 주위의 유선(streamline)을 나타낸 것이다. 로터 후류는 아래방향으로 진행될수록 난경이 줄어드는 지면효과가 없는 정지 비행 상태와는 달리 아래방향으로 진행될수록 지면을 따라 옆으로 진행되고 있으며, 회전 중심부 위에서의 유동 흐름도 비슷한 형태를 띠고 있다. 로터 블레이드에서 생성된 와류는 내리흐름을 따라 진행되고 있으며, 상대적 약한 강도를 가지는 와도가 블레이드 루트부위의 안쪽에서도 존재함을 볼 수 있다. 로터 회전면을 통과한 유동은 지면을 따라 흐른 후 블레이드 쪽으로 재 유입되는 형태를 띠고 있다. 제어빌딩이 있는 경우 유동은 지면을 따라 흐르다 제어빌딩의 벽면의 존재로 인해 위로 흘러감을 확인할 수 있으며, 상대적으로 비대칭의 유선을 형성하고 있다. 이러한 현상은 무빙셸터가 존재하는 경우에도 동일하게 나타나고 있다.

3.2 지면 효과

Fig. 9는 추력 및 토크 계수에 대해 IGE (In Ground Effect)

조건과 OGE(Out of Ground Effect)조건을 비교한 것이다. OGE 조건의 해석결과는 참고문헌 [5]의 결과를 사용하였으며, 시험 결과는 무빙셸터가 없이 제어빌딩만 있는 상태에서 수행되었기 때문에 IGE 조건의 수치해석 결과는 Fig.5의 계산 결과 중 제어빌딩이 있는 경우의 해석결과를 사용하였다.

IGE 조건 해석 결과가 OGE 조건 대비 동일 콜렉티브 피치각에 대해 추력계수 및 토크계수가 증가하는 것으로 나타났다. 지면효과를 포함하고 있는 시험결과에 훨씬 더 근접하는 것을 알 수 있다. 동일 파워계수 즉 동일 토크계수 대비 추력계수는 증가하며, 반대로 동일 추력계수 대비 토크계수는 감소함을 확인할 수 있다.

동일 파워계수 대비 추력계수가 증가하는 지면효과는 로터 회전면을 통과하여 아래방향으로 향하는 유동을 변화시킴으로써, 로터 블레이드의 끝단 와류를 감소시킬 뿐만 아니라, 블레이드에 작용하는 유도속도를 감소시키는 역할을 하게 된다. 유도속도가 작아짐에 따라 유도항력이 감소되고 유효받음각이 증가하므로, 필요 양력은 상대적으로 작은 받음각에서도 가능하기 때문이다.

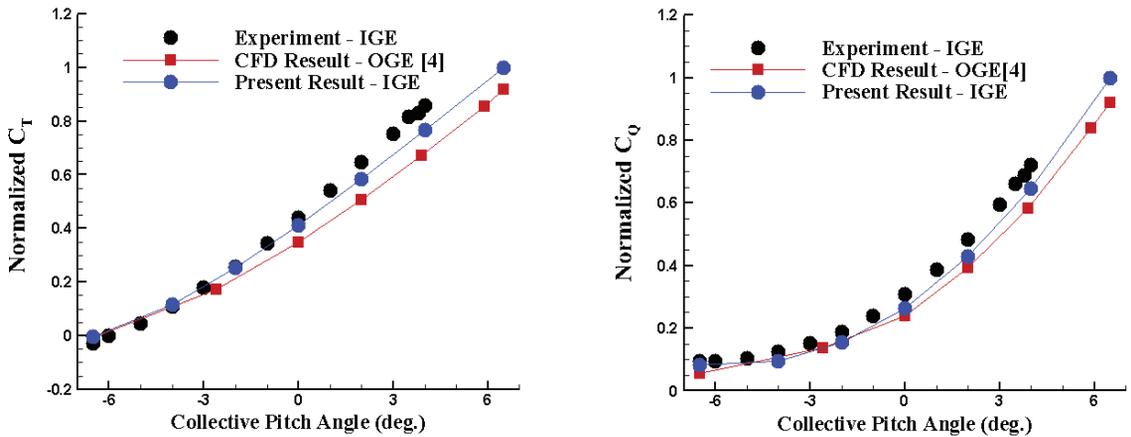


Fig. 9 Comparison of Thrust and Torque Coefficients for IGE and OGE Conditions

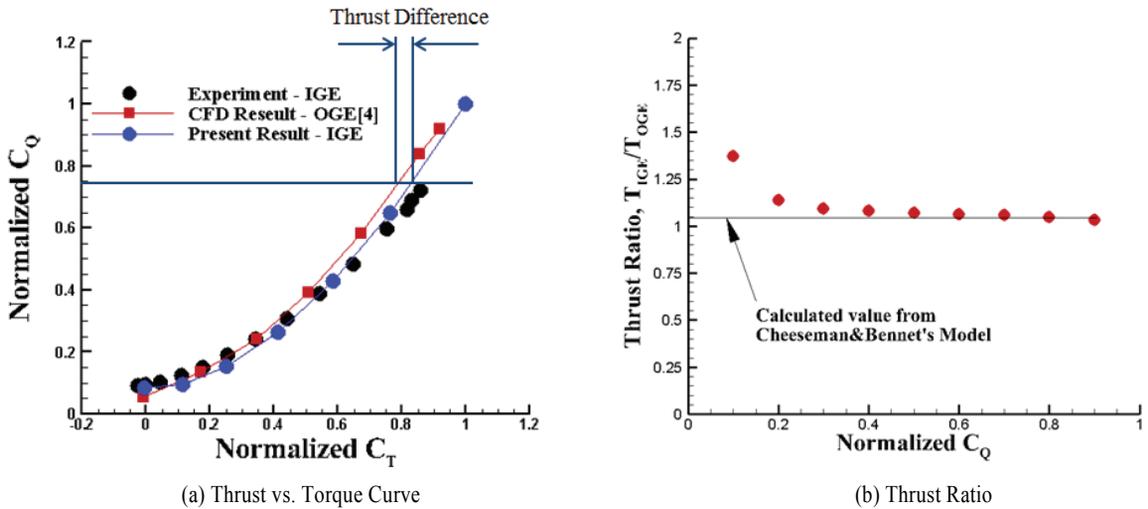


Fig. 10 Comparison of Thrust Ratio with Cheeseman & Bennet's Model Value

추력계수가 매우 작은 -4도 이하의 콜렉티브 피치각에 대해서는 이러한 지면효과는 거의 없는 것을 볼 수 있으며, 토크계수의 경우에는 조금 큰 -2도 이하의 콜렉티브 피치각 이하에서는 지면효과가 나타나지 않았다.

IGE 및 OGE 조건에서의 추력비는 지면으로 부터 높이에 대한 함수로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 Cheeseman & Bennett(1955)의 모델식[6]을 사용하여 비교하였다. Cheeseman & Bennett의 모델은 Images method에 근거한 것으로 블레이드 하중 효과를 무시하고, 정지 비행 조건을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{T_{IGE}}{T_{OGE}} \right]_{P=const.} = \frac{1}{1 - \frac{(R/4z)^2}{1 + (\mu/\lambda_i)^2}} = \frac{1}{1 - (R/4z)^2} \quad (1)$$

식 (1)은 로터 회전면 높이가 블레이드 반경 대비 0.5이상일 때 유효한 값이 가진다. 본 연구에서는 로터 블레이드의 회전면 높이가 9.65m, 즉 블레이드 반경 대비 1.22R에 해당하므로 동일 파워 조건하에서 OGE 조건 대비 IGE 조건에서의 추력비는 1.0437 값을 가진다.

Fig. 10-(b)는 위의 모델식으로부터 구한 추력비와 본 연구의 수치 해석을 통해 계산된 추력비를 비교한 것이다. Fig. 9의 콜렉티브 대비 추력 및 토크계수로 부터 Fig. 10-(a)와 같이 추력-토크 성능선도를 나타낼 수 있으며, 이 그래프로부터 동일 토크계수에 대해 OGE, IGE 조건에서의 추력비를 구하면 Fig. 10-(b)와 같다. 수치해석으로 부터 구한 추력비는 토크계수 최대값 30%이상의 영역에서 모델식으로부터 계산된 값과 일치함을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 앞 절에서도 언급하였듯이, 추력, 토크계수가 작은값을 가지는 $-4 \sim -2$ 도 이하의 콜렉티브 피치각 영역에서는 지면효과가 나타나지 않기 때문이다. 따라서 모델식을 적용하여 지면효과를 보정하는 경우 추력 또는 토크계수가 일정값 이상인 경우에만 유효하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

비정렬 중첩격자에 기반한 CFD 수치기법을 사용하여 주변 구조물을 포함하는 헬터워 주위의 유동장 수치해석을 수행함으로써, 주변 구조물이 로터 블레이드의 공력 특성에 미치는 영향성을 파악하였다. 블레이드 반경 대비 $2.3 \sim 2.7R$ 거리를 두고 있는 제어빌딩과 무빙헬터의 영향성은 거의 없는 것으로 나타났다. 지면으로부터 $1.22R$ 높이에 위치한 로터 회전면에서의 지면 효과 특성도 고찰되었으며, 추력, 토크계수가 작은값을 가질 때를 제외하고 기존 모델식으로 계산된 추력비와 일치함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 한국형 헬기 민군겸용구성품개발사

업(KARI주관) 및 한국항공우주연구원 주요사업 “친환경 저소음 로터기술 연구” 과제의 연구결과 중 일부임.

참고문헌

- [1] 2007, Jung, M. S, Kang, H. J. and Kwon O. J. "Assessment of Rotor Hover Performance Using a Node-based Flow solver," *Int'l J. of Aeronautical and Space Sciences*, Vol.8, pp.44-53.
- [2] 1995, V. Venkatakrishnan, "Convergence to Steady State Solutions of Euler Equations on Unstructured Grid with Limiters," *Journal of Computational Physics*, Vol.118, No.1, pp.120-130.
- [3] 2007, Jung, M. S. and Kwon, O. J. "A Parallel Unstructured Hybrid Overset Mesh Technique for Unsteady Viscous Flow Simulations," *the International conference on Parallel Computational Fluid Dynamics*, ParCFD 2007-024.
- [4] 2010, Kim, D. K., Yun, C. Y. and et al., "Performance Test of Helicopter Rotor system in Whirl Tower Test Facility," (in Korean) *Proceeding of 2010 KSAS Fall Conference*, pp.1422-1425.
- [5] 2008, Kang, H. J., Kim, S. H. and et al., "Aerodynamic Calculations in Hover of KUH Rotor Blade," (in Korean) *Proceeding of the 5th National Congress on Fluids Engineering*, pp.25-28.
- [6] 2006, J. Gordon Leishman, *Principles of Helicopter Aerodynamics*, 2nd edition, Cambridge University Press, pp.258-260.