

## 휠타워 로터 블레이드의 지면효과

강희정\*, 김승호\*\*

## Ground Effect of a Rotor Blade on a Whirl Tower

Hee Jung Kang\*, Seung Ho Kim\*\*

### Abstract

A numerical simulation is performed to study the ground effect of a rotating rotor blade on a whirl tower using unstructured overset mesh. The aerodynamic change of the rotor blade by the structure around the whirl tower is also considered. The calculated results showed good agreement with the experiment for the hover performance. The ground effect of the rotor blade is investigated by comparing with the calculated results for the out of ground condition and the results of an analytic model.

### 초 록

비정렬 중첩 격자에 기반한 수치기법을 사용하여 휠타워에서 회전하는 로터 블레이드 공력 수치해석을 수행함으로써, 지면 효과에 대해 고찰하였다. 휠타워 주위의 건물에 의한 블레이드 공력 특성 변화도 고려되었다. 계산 결과는 정지 비행 성능특성에 대해 훔시험 결과와 비교하여 일치함을 확인하였다. 또한 지면효과가 없는 조건의 해석결과 및 모델식 값과 비교함으로써 지면효과를 확인하였다.

키워드 : 휠타워(Whirl Tower), 로터 블레이드(Rotor Blade), 정지 비행(Hover), 비정렬 중첩격자 (Unstructured Overset Mesh), 지면효과(In Ground Effect)

### 1. 서 론

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, 파워에 영향을 미치게 된다. 이러한 지면효

과는 로터 블레이드의 성능 및 동안정성을 확인하는 훔시험(Whirl Test)에서도 동일하게 나타나는데, 훔시험에서는 실제 크기의 로터 블레이드를 휠타워(Whirl Tower)에 장착하여 시험하게 되므로, 휠타워의 높이 제한조건으로 인해 지면효과를 동반하게 된다. 공기역학적으로 지면효과는 그림 1과 같이 로터 회전면을 통과하여 아랫 방향으로 향하는 유동을 변화시킴으로써, 로터

접수일(2011년 9월 20일), 수정일(1차 : 2011년 10월 11일, 게재 확정일 : 2011년 11월 1일)

\* 회전익기술팀/hkang@kari.re.kr    \*\* 회전익기술팀 /kseungho@kari.re.kr

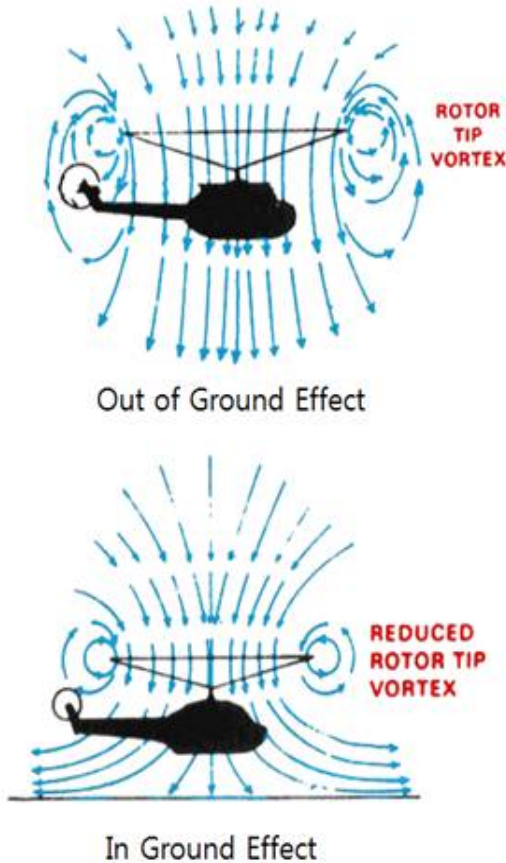


그림 1. In Ground Effect of the Hovering Rotor Blade

블레이드의 끝단 와류를 감소시킬 뿐만아니라, 블레이드에 작용하는 유도속도를 감소시키는 역할을 하게 된다. 유도속도가 작아짐에 따라 유도항력이 감소되고 유효받음각이 증가하므로, 결국 제자리 비행 상태를 유지하기 위한 필요 양력은 상대적으로 작은 받음각에서도 가능하게 된다.

본 연구에서는 이러한 지면효과를 확인하기 위해, 비정렬 중첩 격자 기반의 CFD 수치기법을 사용하여 헬타워에서 회전하는 로터 블레이드 공력 수치 해석을 수행하였다. 계산 결과는 헬타워에서 수행된 시험결과와 비교하였으며, 선행된 지면효과가 없는(OGE, Out of Ground Effect) 조건에서의 계산 연구결과와 비교함으로써 지면

효과를 고찰하였다. 또한 주변에 위치한 건물의 영향성도 고찰하였다.

## 2. 수치해석기법

상대운동이 있는 3차원 유동장을 해석하기 위해 비정상, 점성, 압축성 유동을 지배하는 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 격자점 중심의 유한 체적법을 적용하였으며, 제어 체적은 메디안-듀얼(median-dual)방법을 사용하여 구성하였다. 비점성항의 플럭스는 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting)을 이용하여 계산하였으며, 이차정확도 확보를 위해 최소자승법에 기초한 유동 변수 재구성기법을 사용하고, 비물리적인 수치진동을 억제하기 위해 Barth 및 Venkatarishan의 기울기 제한자가 적용되었다. 점성 플럭스는 중심차분법을 사용하여 계산하였으며, 유동 변수의 1차 미분값은 Green-Gauss 방법을 이용하여 계산하였다. 난류모델은 Spalart-Allmaras의 1-equation 난류 모델을 사용하였다. 시간전진은 point Gauss-Seidel 방법을 사용하여 내재적으로 계산하였다. 고정된 헬타워를 중심으로 회전하는 로터의 상대운동을 모사하기 위해 중첩격자기법을 사용하였으며, 계산시간의 절감과 메모리 한계를 극복하기 위해, 수치적 방법들은 영역 분할법을 사용하여 병렬화 하였다. 영역 분할은 MeTiS library를 사용하였고, 각 분할 영역간의 자료 교환은 MPI library를 사용하였다.[1]

### 2.1 헬타워 및 모델링

그림 2와 3은 헬시험이 수행된 헬타워와 수치해석에 사용된 단순화 시킨 모델링 결과를 보여 준다. 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. 건물인 제어빌딩은 헬타워의 회전축으로부터 2.7R에 위치하고 있다.



그림 2. Whirl Tower Test Facility

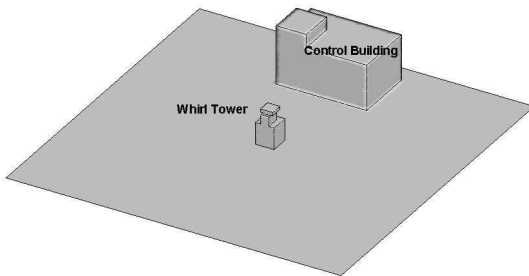


그림 3. Simplified Computational Domain

## 2.2 경계조건 및 계산격자

수치해석에 적용된 경계조건으로는 블레이드 표면에 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 잇점이 있다.

로터시스템은 4개의 블레이드로 구성되어 있으므로, 수치해석에 사용된 중첩 격자계는 각 블레이드에 대한 서브 격자계 4개와 휠타워 및 지

면, 제어빌딩을 포함하는 1개의 주 격자계로 구성된다. 계산에 사용된 격자계는 블레이드의 점성영역 계산을 위한 약 623만개의 프리즘과 비점성영역의 828만개의 사면체로 구성된 총 1,451만개의 셀과 461만개의 격자점으로 구성된다.

점성 계산을 위한 블레이드 표면에서 경계층의 프리즘 격자는 1.4의 증가비를 가지고 15개의 격자층이 적층되도록 하였다. 초기 경계층의 격자점 높이는 끝단 마하수와 레이놀즈 수를 기준으로 설정하여  $y_1 \approx 1 \times 10^{-5}$  정도의 값을 사용하였으며 계산에 의해 얻어진  $y^+$ 의 값은 1.5이하의 값을 가져 유동의 경계층 해석에 적절하다고 판단하였다. 수치해석에 사용된 격자계는 표 1과 같다.

표 1. Computational Meshes

		휠타워	휠타워+제어빌딩
Vertices		4,616,304	4,618,716
Cells	Prisms	6,234,400	6,234,400
	Tetrahedra	8,274,332	8,283,580
	Total	14,508,332	14,517,980
$y_1/c$		$1.09 \times 10^{-5}$	$9.09 \times 10^{-6}$

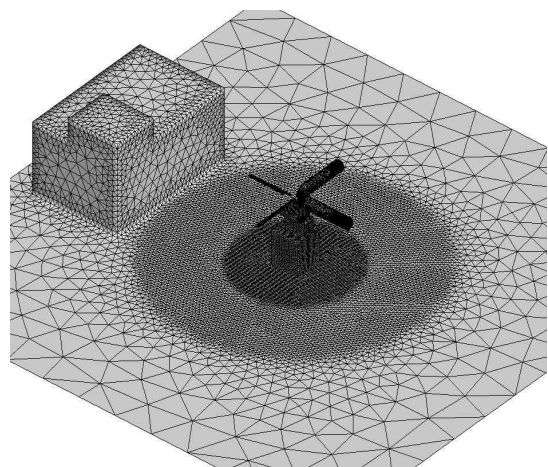


그림 4. Surface Meshes at the boundary surface

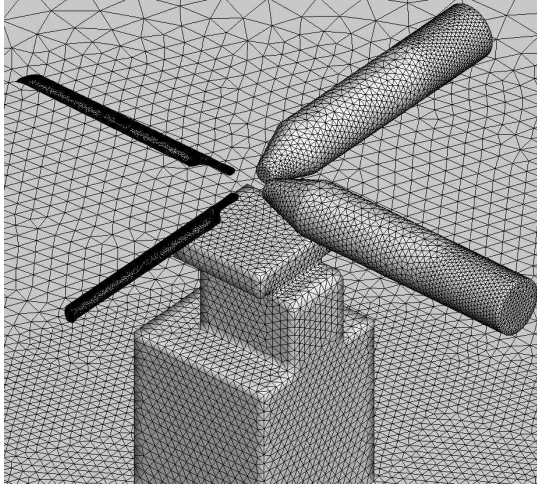


그림 5. Overset and Surface Meshes of the blade

그림 4와 5는 제어빌딩을 포함하는 경우 지면, 헬타워, 제어빌딩 및 블레이드의 중첩격자계를 보여 준다. 블레이드로부터 생성된 후류의 포착을 위해 헬타워 주위에 격자를 조밀하게 배치하였다. 그림 6은 블레이드 표면 격자와 프리즘으로 생성된 점성격자를 보여주며, 그림 7은 병렬 계산을 위한 격자계의 영역 분할된 모습을 보여 주고 있다. 수치해석은 356개의 CPU를 사용하여 수행되었다.

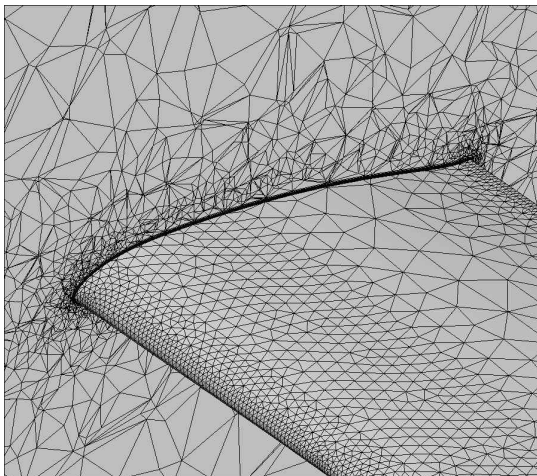


그림 6. Viscous Meshes on the blade surface

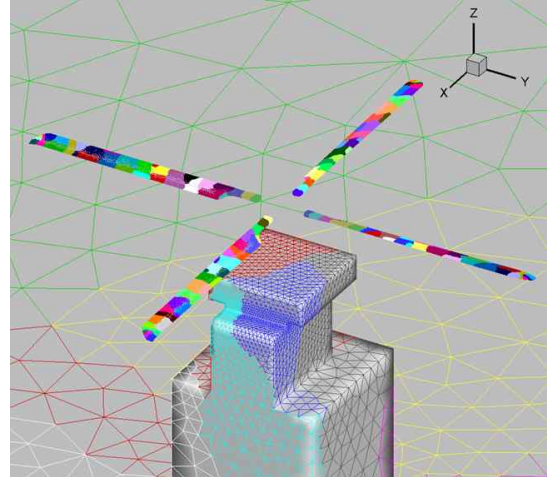


그림 7. Domain decomposition for the parallel computing

### 3. 수치해석 결과

해석조건은 4개의 강체 블레이드에 대해 헬타워 시험조건을 적용하였다. 블레이드 회전속도는 272RPM으로 끝단 마하수 0.661, 레이놀즈 수  $8.47 \times 10^6$ 에 해당한다. 컬렉티브 피치각  $-6.5 \sim 6.5$ 도에 대해 2도 간격으로 계산을 수행하였다. 계산 수행은 총 21회전을 수행하였으며, 약 7회전 이후에는 준 정상상태로 수렴한 것으로 나타났다. 그림 8은 컬렉티브 피치 4도에서 로터 블레이드 회전수에 따른 추력의 수렴을 보여준다. 제어 빌딩(C.B Control Building)의 유무에 상관없이 거의 동일한 수렴특성을 나타낸다.

#### 3.1. 제자리 비행 성능

그림 9는 제자리 비행의 성능 곡선을 나타낸다. 각 성능 계수는 계산된 총 21회전 중 마지막 1회전의 평균값을 사용하였다.

추력계수 및 토크계수는 컬렉티브 피치각 0도 이상에서 실험값에 비해 약간 작은 값을 나타내고 있으나, 전반적으로 시험결과와[2] 계산결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 각 성능 계수들은 제어 빌딩의 유무에 관계없이 거의 동일한 값을 나타내고 있는데, 제어빌딩이 회전축으로부터 블레이



드 반경 대비 약 2.7R 만큼 떨어져 있어 블레이드의 공력특성에는 큰 영향은 주지 못하기 때문이다.

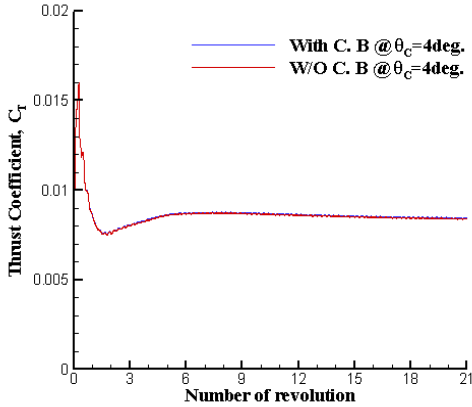


그림 8. Thrust convergence history

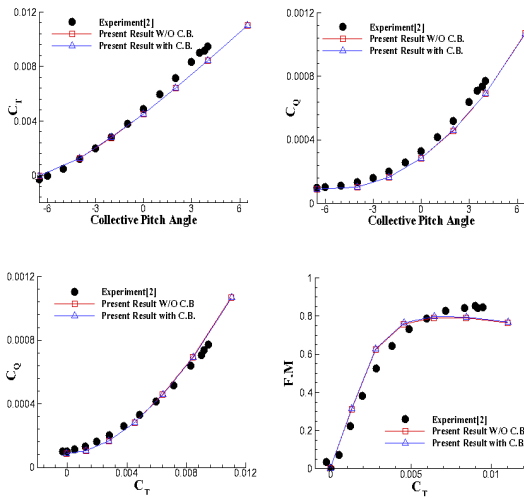


그림 9. Hover Performance

제자리 비행의 성능지표인 Figure of Merit의 최대값은 계산 결과가 실험값보다는 약간 작은 값을 예측하고 있다. 이것은 그림 2에서도 볼 수 있듯이 계산 조건에서는 구조물을 단순화함으로써 무시되었지만, 실제 시험에서는 블레이드가 가까이 존재하는 리프트, 휠타워 구조물의 위에

존재하는 팬스 등에 의한 영향과 블레이드 자체도 실제로는 탄성 블레이드지만, 계산에서는 강체 블레이드로 모사된 점 등 실제 시험 환경과 해석 조건의 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

### 3.2 지면효과

그림 10은 제자리 비행의 성능 곡선에 대해 IGE(In ground effect) 조건과 OGE(Out of ground effect) 조건의 해석결과를 비교한 것이다. OGE 조건 대비 동일 콜렉티브 피치각에 대해 추력계수 및 토크계수가 증가하였지만, 동일 파워계수 즉 동일 토크계수 대비 추력계수는 증가하며, 반대로 동일 추력계수 대비 토크계수는 감소함을 확인할 수 있다. 또한 추력계수가 매우 작은 -4도 이하의 콜렉티브 피치각에 대해서는 이러한 지면효과는 거의 없는 것을 볼 수 있다.

IGE 및 OGE 조건에서의 추력비는 지면으로부터 높이에 따라 함수로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 Cheeseman & Bennett(1955)의 모델식[4]을 사용하여 비교하였다. Cheeseman & Bennett의 모델은 Images method에 근거한 것으로 블레이드 로딩 효과를 무시하고, 정지 비행 조건을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

본 연구에서는 로터 블레이드의 회전면 높이가 9.65m, 즉 1.22R에 해당하므로 동일 파워 조건하에서 OGE 조건 대비 IGE 조건에서의 추력비는 1.0437 이다.

그림 11는 위의 모델식으로부터 구한 추력비, 파워비와 본 해석을 통해 그림 10로부터 계산된 추력비 및 파워비를 비교한 것이다. 토크계수나 추력계수가 작은 값을 가질 때를 제외하고 모델식으로부터 계산된 값과 비교적 일치함을 확인할 수 있다.

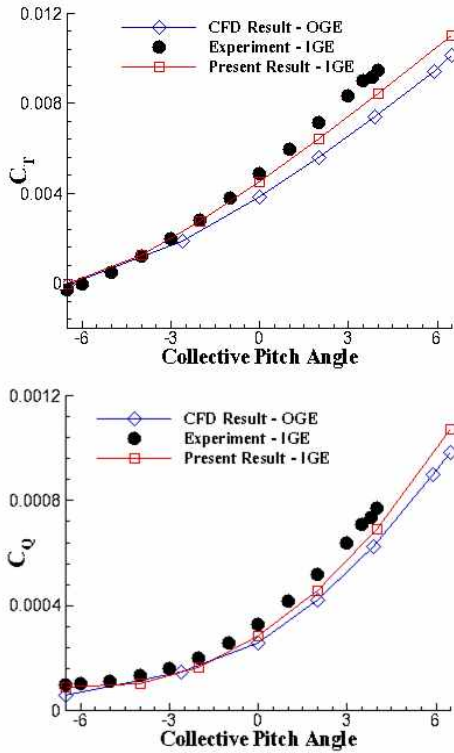


그림 10. In Ground Effect for the thrust and torque

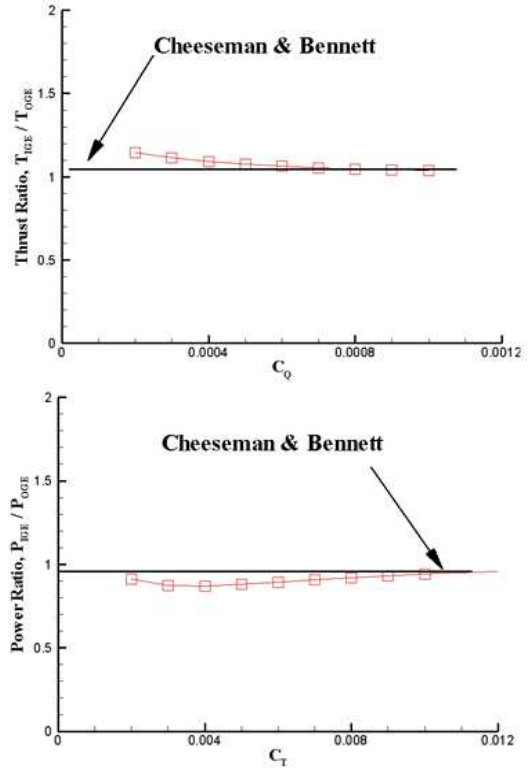


그림 11. Comparison of the Thrust and Torque Ratio

### 3.2.3 유동장

그림 12는 콜렉티브 피치각  $-6.5$ ,  $2$ ,  $6.5$ 도에서 지면, 헬타워, 제어빌딩에서의 마하수 분포를 나타낸 것이다. 콜렉티브 피치각이 클수록 후류의 세기도 커져 지면에서의 마하수가 크게 나타나고 있으며, 지면에서의 후류영향을 받는 범위도 크게 나타나고 있다. 제어빌딩을 포함하는 해석에서도 동일한 경향을 보이고 있으며, 제어빌딩 전면에서의 속도 분포도 크게 나타남을 확인할 수 있다. 콜렉티브 피치각  $-6.5$ 도에서는 반대 방향의 추력이 발생하게 되므로 로터 회전면 아랫방향으로의 후류는 거의 나타나지 않고 있다.

그림 13은  $Y=0$  평면에서 마하수 분포를 나타낸 것이다. 로터 후류는 아랫방향으로 진행될수록 반경이 줄어드는 자유비행 상태의 정지 비행 경우와 달리 아래 방향으로 진행될수록 지면을

따라 옆으로 진행되고 있으며, 회전 중심부위에서의 유동 흐름도 비슷한 형태를 띠고 있다. 지면에서는 로터 회전축을 중심으로 로터 반경에 해당하는 범위 이내에서는 속도분포가 매우 작음을 확인할 수 있다.

로터 후류의 영향이 미치는 범위를 확인하기 위하여 마하 수  $0.01$ 이 되는 지점을 측정하였으며, 그림 14에 나타내었다. 추력이 작은 콜렉티브 피치각  $0$ 도 이하에서는 제어빌딩의 유무에 상관없이 일정하게 나타났으며, 추력이 클수록 제어빌딩이 없는 경우가 로터 후류가 영향을 미치는 범위는 큰 것으로 나타났다. 콜렉티브 피치각  $6.5$ 도일 때 제어빌딩이 없는 경우 약  $4.12R$ , 제어빌딩이 있는 경우 약  $3.67R$  지점까지 로터 후류가 영향을 미치고 있다.

그림 15는 콜렉티브 피치각  $4$ 도에 대해  $Y=0$  평면에서 와도분포와 헬타워 주위의 streamline

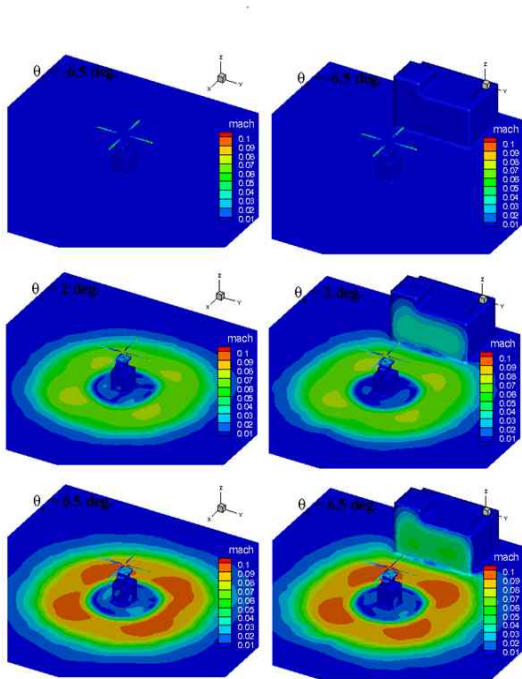


그림 12. Comparison of the Thrust and Torque Ratio

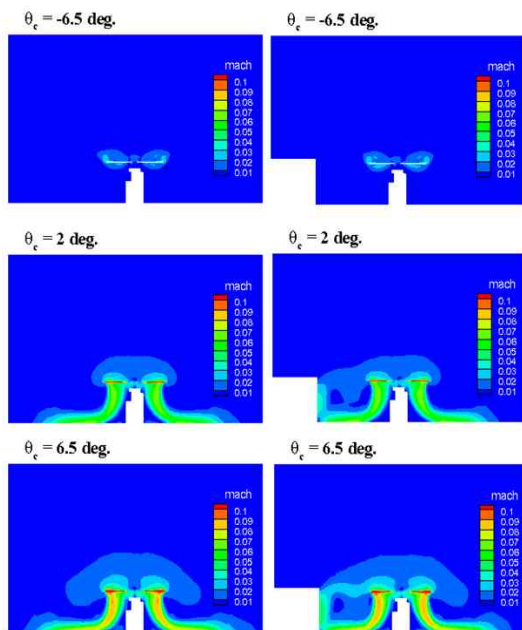


그림 13. Comparison of the Thrust and Torque Ratio

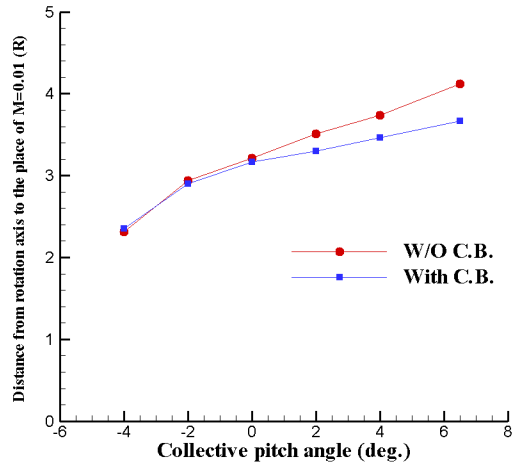


그림 14. The Distance Affected from the Wake

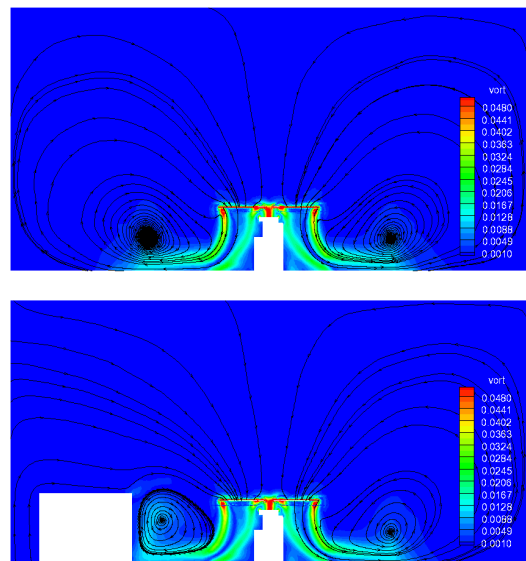


그림 15. Sectional Vorticity Contours and Streamlines at Y=0 Plane in Case of Collective Pitch 4 deg.

을 나타낸 것이다. 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 streamline을 형성하고 있다.

#### 4. 결 론

비정렬 중첩격자에 기반한 수치기법을 사용하여 헬타워에서 회전하는 로터 블레이드 공력 수치해석을 수행함으로써, 지면, 건물 및 헬타워 주위의 유동장에 대해 고찰하였다. 동일 파워조건에 대해 OGE 조건하의 추력보다 IGE 조건하에서 추력이 커지는 지면효과를 확인할 수 있었으며, 그 결과값은 모델식값과 비교하였다. 블레이드에 의해 생성된 유동은 헬타워를 중심으로 지면을 따라 바깥쪽으로 진행하다 블레이드 쪽으로 재 흡입되는 특성을 보여주고 있으며, 주변에 위치한 건물에 의해 유동이 recirculation 되는 현상도 볼 수 있다. 로터 블레이드의 후류의 영향이 미치는 범위는 추력이 작은 콜렉티브 피치각 0도 이하에서는 건물의 유무에 상관없이 일정하게 나타났으며, 추력이 클수록 건물이 없는 경우가 로터 후류가 영향을 미치는 범위는 큰 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업(KARI주관) 및 한국항공우주연구원 주요사업 “친환경 저소음 로터기술 연구” 과제의 연구결과 중 일부임.

#### 참 고 문 헌

1. Jung, M. S, Kang, H. J., and Kwon, O. J., "Assessment of an Unstructured Mesh Viscous Flow Solver for Rotor Performance Analysis," International Forum on Rotorcraft Multidisciplinary Technology, AHS Specialist's Conference, 2007.
2. 한국항공우주연구원, KUH 주로터 헬시험 보고서, 88PR6059, 2010
3. 강희정, 김승호, 정문승, 이희동, 권오준, "한국형 기동 헬기 블레이드의 제자리 비행 공력 해석", 제5회 한국유체공학학술대회, 2008, pp. 25-28
4. J. Gordon Leishman, Principles of Helicopter Aerodynamics, 2nd edition, Cambridge University Press, 2006, pp. 258-260