

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(6), 429-439(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.6.429>

## Actuator Disk Model 기반의 로터 해석자를 사용한 방풍 구조물 내부의 로터 성능 예측

김태우\*, 오세종\*\*, 강희정\*\*\*, 이관중\*\*

### The Performance Estimation of Rotor in Wind Fence by Rotor Analysis Solver based on Actuator Disk Model

Taewoo Kim\*, Sejong Oh\*\*, Hee Jung Kang\*\*\* and Kwanjung Yee\*\*

Department of Aerospace Engineering, Graduate School, Pusan National University\*,

Department of Aerospace Engineering, Pusan National University\*\*,

Rotor Team, Korea Aerospace Research Institute\*\*\*

#### ABSTRACT

The purpose of current study is to develop the rotor analysis solver and perform a rotor aerodynamic analysis in the wind fence. To this end, the rotor analysis solver based on actuator disk model was employed. To consider the asymmetric effect of the rotor in the wind fence, the flapping motion analysis was conducted with blade element theory for the effective angle of attack calculation. The validation cases which are the rotor with wall and ground were accomplished by developed solver. The decrease of rotor performance by wind fence was confirmed. The wind fence configuration was suggested which guarantees more than 95% rotor performance compared with the no fence case.

#### 초 록

본 연구에서는 로터 성능 해석을 위한 로터 성능 해석자를 개발하고 이를 사용하여 방풍 구조물 내부의 로터 성능 해석을 수행하였다. 로터 성능 해석자는 깃요소 이론 기반의 actuator disk model을 사용한 해석자를 사용하였다. 또한, 주변의 구조물로 인한 로터 하중의 비대칭성을 고려하기 위해 깃요소 이론에서 블레이드의 flapping 운동에 대한 해석을 수행하여 유효받음각 계산에 적용하였다. 개발된 해석자를 사용하여 바닥면과 벽면에 의한 로터 성능 변화에 관한 연구와 비교 검증을 수행하였다. 방풍 구조물 형상에 따른 로터 성능 해석을 통해 방풍 구조물에 의한 로터 성능 감소 현상을 확인하였다. 이를 통해 방풍 구조물이 없는 경우 대비 95% 이상의 로터 성능 비를 가지는 방풍 구조물의 유출입 덕트 면적을 제안하였다.

**Key Words** : Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Rotor Analysis(로터 해석), Actuator Disk Model(압력판 기법), Wind Fence(방풍 구조물), OpenFOAM(오픈폼)

† Received: February 11, 2013 Accepted: May 29, 2013

\*\* Corresponding author, E-mail : daedalus@pusan.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

## 1. 서론

현대의 운송 시스템에서 헬리콥터는 구조용, 의료용, 여객용, 군사용등의 목적을 가지고 주간 및 야간, 산악, 해상등의 다양한 환경에서 운용된다. 또한, 헬리콥터는 지상용 차량에 비해 고속의 전진 비행과 제자리 비행등이 가능하여 고정익 비행체가 수행하지 못하는 다양한 미션 수행에 적합하다. 그러므로 헬리콥터에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있으며 미래의 개인용 비행체로서 적용 가능성도 높아 헬리콥터에 대한 산업적, 군사적 가치가 높다고 할 수 있다. 이와 같이 다양한 임무와 환경하에서 운용되는 헬리콥터의 로터는 추력과 조종력을 발생시키는 핵심 구성품으로서 실제 기체와 결합하기 전에 휠타워 시험을 통해 성능 및 안정성 평가를 받게 된다.

대부분의 휠타워 시험 구조물은 외부 구조물에 의한 로터 성능 영향을 줄이기 위해 사방이 트인 개활지에 만들어진다. 개활지에서의 외부 풍환경은 계절과 시간대에 따라 다양하게 변화하는데 이와 같은 시험지의 외부 풍환경은 로터의 성능 및 안정성에 영향을 미치게 된다. 이와 같이 외란에 의한 로터 성능 변화를 최소화하기 위해서 풍환경에 의해 로터 시험 시간을 한정하거나 외부 풍환경의 제어를 위한 방안으로 셸터나 펜스를 사용하여 시험을 수행한다. 이때 방풍 구조물에 의해 내부의 로터 성능 변화에 대한 사전 연구가 필요하다. 현재 로터의 바닥면 효과에 대한 연구<sup>(1-4)</sup>와 근접 벽면이 존재할 경우의 로터 성능에 대한 연구<sup>(5,6)</sup>는 많이 수행되었으나 Fig. 1 과 같은 방풍 구조물의 유입 및 유출 덕트의 면적이나 구조물 높이가 로터 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구는 미비한 실정이다. 또한 실제 로터 시험 구조물에 방풍 구조물을 설치하여 상호 영향성을 평가하기에는 비용적, 시간적 한계가 존재하기 때문에 수치적 연구를 수행해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 지면과 벽면등과 같이 주변의 구조물 형상 변화에 따른 로터 성능 변화를 해석할 수 있는 적절한 수치적 로터 해석자를 개발하고 방풍 구조물이 없는 경우와 방풍 구조물이 존재하는 경우의 유출입 덕트 면적에 따른 로터의 성능 변화에 대한 연구를 수행하였다.

로터의 바닥면 효과에 대한 연구는 다양한 선행 연구가 수행되었다. 대표적으로 Cheeseman과 Bennett<sup>(1)</sup>은 지면효과가 발생하는 로터면과 바닥면까지의 높이를 고려하여 로터에서 발생하는 추력비를 구하는 식을 유도하였고 이를 실험을 통

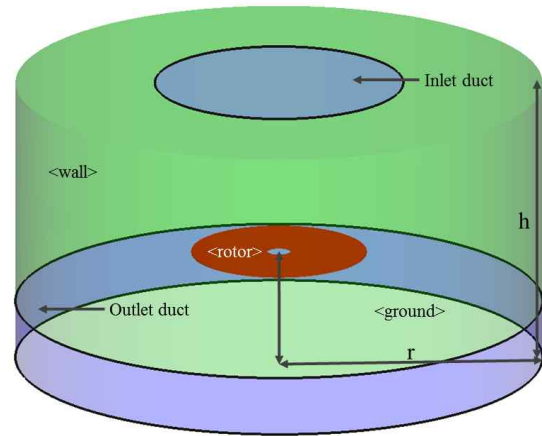


Fig. 1. Rotor Test System in the Wind Fence with Inlet and Outlet Duct

해 검증하였다. Hayden의 연구<sup>(2)</sup>에서는 다양한 기종의 헬리콥터 비행실험 결과를 토대로 제자리 비행 시 지면효과가 영향을 미칠 때 요구동력이 어떻게 변화하는가에 대한 연구를 수행하였다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 유동가시화를 통하여 지면효과가 로터 깃끝 와류에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행하였다. 서진우등의 연구<sup>(4)</sup>에서는 중첩용출 패널 기법과 자유 후류 기법을 사용하여 부분 바닥면 효과에 대한 파라미터 연구를 수행하여 그 특징을 관찰하였다. 협소 공간에서의 로터의 바닥면 효과에 대한 연구는 Itoga등이 실험적<sup>(5)</sup>, 수치적 연구<sup>(6)</sup>를 수행한 바 있다. 실험적 연구<sup>(5)</sup>에서는 로터 회전각 기준으로 180도 간격으로 양쪽에 같은 높이의 벽면이 존재할 경우, 양벽면 간의 거리와 바닥면에서 로터면까지의 거리에 따라 고정된 추력하에서의 동력 계수 및 피치각 변화에 대한 결과를 제시하였다. 수치적 연구<sup>(6)</sup>에서는 로터의 한쪽면에 고정된 높이의 벽면이 존재할 경우, 벽면과의 거리와 바닥면에서 로터면까지의 거리에 따라 고정된 블임각의 로터의 추력 계수 변화에 대한 결과를 제시하였다. 그러나 방풍 구조물과 같은 벽면과 바닥면이 로터를 감싸고 있는 조건에 대한 체계적 연구는 아직 수행된 바가 없다.

로터의 해석 방법으로는 깃요소 이론 기반의 낮은 정확도 해석 방법과 potential 유동 해석 기법을 사용한 중간 정확도 해석 방법, 로터 블레이드를 전산유체역학적 방법으로 해석하는 높은 정확도의 해석 방법이 있다. 낮은 정확도 방법은 로터의 성능을 대략적으로 빠른 시간내에 계산할 수 있는 장점이 있으나 벽면이나 바닥면등의 외부 환경의 변화가 있는 경우 그 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. 전산유체역학 해석을 사용

하는 경우에는 외부 환경의 고려유무에 상관없이 높은 정확도의 결과를 획득할 수 있으나 해석에 계산 자원이 많이 요구된다. 특히 깃요소 이론을 사용하는 경우 비교적 짧은 시간에 적절한 결과를 도출할 수 있으나 깃끝 와류에 의한 내리흐름 유동을 고려하기 위해서 별도의 수치적 모델의 사용이 필요하다<sup>(7)</sup>. 이런 수치적 모델은 회전에 의해 생기는 와류를 묘사하거나(prescribed wake model) 직접 유입류를 모델링(uniform or dynamic inflow model)하는 방식으로 고려되고 있다. 그러나 이와 같은 수치적 모델들은 깃끝 와류와 주변 구조물간의 상호작용에 대한 효과 고려가 어려워 바닥면이나 벽면 효과를 고려할 경우에는 사용이 제한적이다.

주변 구조물과 로터의 상호 작용에 대한 연구를 수행하기 위해서는 전산유체역학을 통한 해석을 수행하거나 주변 환경의 변화를 묘사할 수 있는 유입류 및 끝단 와류 모델을 적용하는 방법을 사용해야 한다. 깃요소 이론에서 사용되는 유입류 모델은 기본적인 선형 유입류 모델과 비선형 유입류 모델이 있으며 전진 비행을 하는 로터의 경우에는 동적 유입류 모델<sup>(8,9)</sup>을 사용한다. 바닥면을 고려한 유입류 모델에 대한 연구는 Peters 등<sup>(8)</sup>이 수행한바 있으나 특정한 조건일 경우에만 사용이 가능하다. 이에 반해 전산유체역학 코드를 사용하여 협소공간에서의 바닥면 효과 해석은 정확한 결과를 도출할 수 있으나 유동 변화가 크게 일어나기 때문에 블레이드 및 바닥면의 격자 생성이나 해석 조건 설정에 상당한 노하우가 필요하며, 대용량의 계산 자원이 요구된다. 본 연구에서는 앞선 두가지 방법의 장점을 활용하고 단점을 극복하기 위해 김태우등의 연구<sup>(10)</sup>에서 개발된 깃요소 이론을 사용한 actuator disk model 기반의 전산유체역학 해석 방법을 채택하였다. 주변 구조물에 의한 로터면의 비균일한 하중을 고려하기 위해 기존의 개발된 코드를 플레핑 해석이 가능하도록 수정하였다.

개발된 해석자의 방풍 구조물 내부에서의 로터 성능 해석 가능 여부를 판단하기 위해서 전 바닥면과 벽면의 상호작용에 의한 로터 성능 변화를 연구한 Itoga의 연구<sup>(6)</sup> 결과와 개발된 해석자로 해석한 결과를 비교하였다. 방풍 구조물에 의한 로터 성능 변화 예측 연구를 위해서는 원통형의 방풍 구조물을 기준으로 방풍 구조물 유무와 방풍 구조물의 유출입 덕트 면적 변화에 따른 로터 내부 유동장의 변화를 설명하고 방풍 구조물이 없는 경우를 기준으로 로터 성능 변화를 비교하여 일정 이상의 로터 성능이 예측되는 방풍 구조물의 형상을 제시하고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1 로터 해석을 위한 수치해석 모델

본 연구에서 수치해석 모델은 김태우등의 연구<sup>(10)</sup>에서 개발된 해석자를 기본으로 사용하였다. 기본 해석자에 로터에 균일한 하중이 걸리지 않는 경우 발생하는 블레이드의 플레핑 효과에 대한 고려를 위해 깃요소 이론내에 플레핑 해석 모듈을 추가하였다. 2.1.1에서는 기존의 개발된 해석자에 플레핑 해석 모듈이 포함되도록 수정한 수치해석 알고리즘에 대하여 설명하였다. 2.1.2절에서는 로터 디스크상에서의 비대칭성 하중에 의해 발생하는 플레핑 효과를 해석하는 방안에 대해 설명하였다.

#### 2.1.1 수치해석 알고리즘

Actuator disk model을 적용한 로터 해석자 개발 알고리즘은 Fig. 2와 같다. 로터 해석자 프로그램은 SIMPLE 알고리즘의 기본적인 형태를 취하고 있으며 운동량 해석시 별도의 프로세스를 거쳐서 로터의 영향을 해석하게 된다.

깃요소 이론에서는 로터 각 셀에서의 속도값을 기준으로 국소공력계수값을 획득하게 되는데, 본 연구에서는 해당하는 셀 중심에서의 전산유체

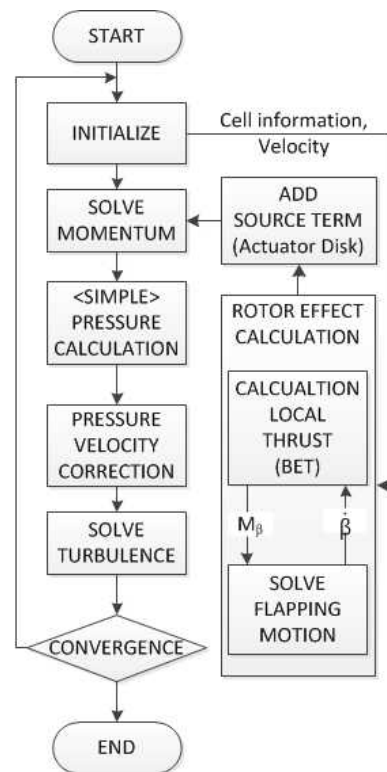


Fig. 2. Rotor Analysis Algorithm Based on the Actuator Disk Model

역학 해석을 통해 구한 속도값을 사용하였다. 디스크 위에서 속도 성분을 수직, 수평 방향으로 분해하기 위해 로터 반경, 로터 회전 속도 등의 로터 정보를 입력받아 로터 허브에서 해당 셀과의 위치 벡터 계산을 수행한다. 여기서 획득한 위치 벡터와 셀 중심에서 주어지는 속도 벡터 사이의 벡터 연산을 통해 해당 셀에서의 수직, 수평 방향의 속도 성분을 분해하여 유도 유입류에 의한 유도받음각을 획득하게 된다. 구해진 유도받음각을 통하여 디스크위의 계산 체적에서의 유도받음각과 국소공력계수값을 획득하고 이를 사용하여 계산 체적의 부분추력값을 획득한다.

로터의 영향을 운동량 방정식에 추가하기 위해서 일반적인 RANS의 운동량 방정식을 식(1)과 같이 수정하였다. 이때, 추가되는 소스항  $\vec{s}$ 는 로터 디스크에 해당하는 계산 체적의 경우에는 앞서 계산된 추력값을 기반으로 부여되고 그 외의 계산 체적에는 0 값을 부여하게 된다. 이렇게 부여된 소스항은 물리적으로는 계산 체적을 거치는 동안 유동의 압력 변화를 유발하게 된다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{UU}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \overline{U}) = \vec{s} - \nabla p \quad (1)$$

로터 해석자는 정상상태의 운동량 방정식의 해석을 수행하기 때문에 앞서 언급했듯이 추가되는 소스항은 가속도 단위로 입력된다. 이를 위해 깃요소 이론과 actuator disk 모델에서 구한 추력값을 식(2)를 통하여 단위 부피당 가속도 단위로 변환하여 운동량 방정식에 추가한다.  $\rho$ 는 입력된 밀도값이며  $dV$ 는 해당 셀의 부피이다.

$$\vec{s} = dT / (\rho dV) \quad (2)$$

### 2.1.2 Flapping Motion Analysis

전진 비행하거나 외부 유동의 변화에 의해 유발되는 로터 디스크 표면의 추력 불균형으로 인해 블레이드는 회전각에 따라 플래핑 운동을 한다. 유발된 플래핑 운동은 유도받음각에 영향을 주어 국소 추력값에 변화를 주게 된다. 따라서 정확한 해석 결과를 보기 위해서는 추력 불균형에 의한 블레이드의 플래핑 운동을 고려해야 한다.

디스크 형태의 로터에서 회전각에 따라 플래핑 운동을 해석하기 위해, Fig. 3과 같이 디스크 면을 특정한 회전각 변량( $\Delta\Psi_\beta$ )에 따라 분할한다. 분할된 디스크 면에서의 모멘트 값을 구해서 운동 방정식을 수립하고 이를 회전각에 따라 해석한다.

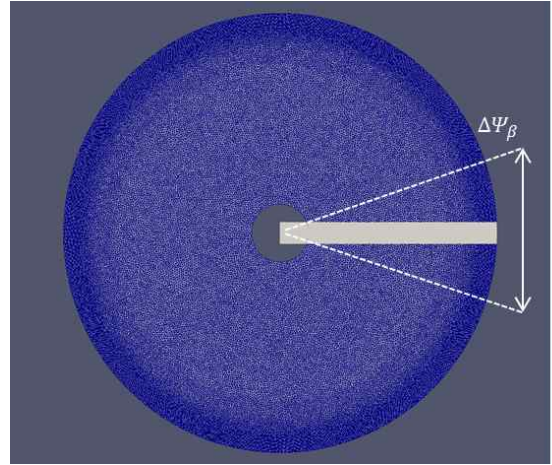


Fig. 3. Discretization of Rotor Disk for the Flapping Analysis

비정열 격자계의 분할된 회전각에서 블레이드에 의해 발생하는 추력값과 수직방향 힘 값은 다음 식들에 의해 계산된다. 여기서,  $N$ 은 블레이드 개수,  $dA$ 는 계산 셀의 디스크 영역에 해당되는 면적,  $c$ 는 코드 길이,  $V$ 는 계산셀의 속도,  $c_r$ 과  $c_d$ 는 각 셀에서 BET 기법을 통해 계산된 공력 계수이다.  $\Delta\Psi_\beta$ 는 Fig. 3에서 나타낸 플래핑 각 계산을 위해 임의로 선정한 회전각 변량이며  $\alpha_i$ 는 계산셀에서의 유도 받음각이다.

$$dT = \frac{NdAc}{4\pi r} \rho V^2 (c_r \cos \alpha_i - c_d \sin \alpha_i) \quad (3)$$

$$dF_{\Delta\Psi_\beta} = \frac{dT}{\left(\frac{N}{2\pi}\right) \Delta\Psi_\beta} \quad (4)$$

플래핑 운동하는 블레이드의 운동 방정식은 다음과 같다. 여기서,  $\beta$ 는 플래핑 각이며  $\ddot{\beta}$ 는 플래핑 각 가속도,  $\gamma$ 는 블레이드 lock number,  $I_b$ 는 블레이드의 관성 모멘트이다.

$$\ddot{\beta} + \beta = \gamma M_\beta \quad (5)$$

$$M_\beta = \frac{1}{\rho c_l c R^4 \Omega^2} \int_0^R y dF_{\Delta\Psi_\beta}, \gamma = \frac{\rho c_l c R^4}{I_b}$$

구해진 운동 방정식을 회전각에 따라 4차 정확도의 Runge-kutta 방식으로 해석을 수행하여 분할된 디스크 면에서의 플래핑 값을 구한다.

## III. 결 과

개발된 로터 해석자는 방풍 구조물내에서 로

터 성능 예측이 가능해야 한다. 이를 위해서 벽면과 바닥면의 영향을 받는 로터의 해석 성능 검증 실시하였다. 이를 위해 Itoga의 연구<sup>(6)</sup>를 선정하여 한쪽에 벽면이 위치하는 경우에 개발된 로터 해석자를 사용하여 해석한 결과의 정확도를 검증하였다. 방풍 구조물에 의한 로터 성능 평가를 위해 반경이 3R과 4R이고 높이가 3.25R 및 2.25R의 원통형 계산 도메인 구성하여 벽면과 윗면의 벽면 경계조건과 유입 유출 경계 조건을 조절하는 방식으로 유출입 덕트 면적 변화를 묘사하였다. 계산을 수행한 모든 경우에는 k- $\omega$  난류모델을 사용하였으며, 벽면의 경우 wall function을 적용하였다. 난류 모델과 관련된 k와  $\omega$ 의 계산 도메인 외곽 경계 조건은 임의의 k와  $\omega$  값으로 계산을 수행하여 경계에서의 평균 속도값을 기준으로 k와  $\omega$ 를 재설정하여 계산을 수행하였다.

### 3.1 바닥면과 벽면 효과 검증

개발된 해석자를 통한 로터 주변의 바닥면과 벽면의 영향성 해석의 타당성을 검증하기 위해 Itoga<sup>(6)</sup>의 연구 결과와 해석 결과를 비교하였다. Table 1은 검증 해석을 위한 로터 운용 조건들을 정리한 표이다. 본 연구에서는 Table 1에 정리된 파라미터를 사용하여 flapping 계산을 포함하여 해석을 수행하였으며 해석된 추력 계수 결과를 기존의 연구 결과와 비교하였다. Fig. 4는 본 연구에서 해석을 수행하기 위해 구성한 계산 도메인이다. 벽면과 로터 중심까지의 거리에 따른 로터 성능 변화를 확인하기 위해서 로터 중심에서 벽면까지의 거리(w/R)를 1.25R에서 2.5R까지 변화시켜 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 2가지의 방식으로 플래핑 값을 고려하여 해석을 수행하였다. 첫번째 방식은 해석된 로터 디스크상의 하중을 바탕으로 앞서 설명한 방식으로 직접 플래핑 식의 계산을 통해 회전 방위각에 따른 플래핑 값을 계산하는 방식이며 다른 방식은 고정된 플래핑 값( $|\beta_1| = 0.6^\circ$ ,

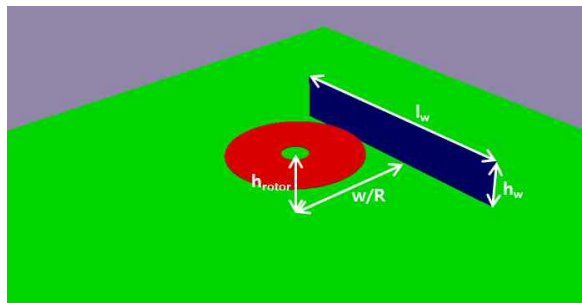


Fig. 4. Computation Domain with the Ground, Wall, and Rotor Disk

Table 1. Analysis Condition for Verification with the Ground and Wall

Blade planform	Rectangular
No. of Blade	2
Radius(m), 1R	0.569
Root cut	0.2R
Solidity	0.0671
Collective Pitch angle at 0.75R (°)	8
Linear twist (°)	0
Airfoil	NACA0012
Rotor height (h <sub>rotor</sub> )	0.8R
M <sub>tip</sub>	0.65
Wall height (h <sub>w</sub> )	0.75R
Wall width (l <sub>w</sub> )	4R

$1.0^\circ$ ,  $|\beta_1| = \sqrt{\beta_{1c}^2 + \beta_{1s}^2}$ )을 강제로 이식하는 방식이다. 계산 결과 비교를 위해서 벽면이 존재하는 경우에 계산된 추력을 벽면이 존재하지 않았을 경우의 추력에 대한 비율( $C_T/C_{TNW}$ )로 나타내었다.  $C_T/C_{TNW}$ 가 1인 경우는 벽면에 의해 로터의 성능 변화가 거의 나타나지 않고 있음을 나타내는 것이다.

Figure 5는 선행 연구의 결과와 본 연구의 결과를 비교한 그림이다. 계산된 플래핑 값을 사용한 해석 결과를 보면, w/R이 1.375R까지는 선행 연구의 결과와 동일하게 로터와 벽면 사이의 거리가 가까워질수록 추력이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 하지만 w/R이 1.375R보다 작은 경우에는 선행 연구의 결과와 다르게 w/R이 작아질수록 추력값이 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 블레이드를 실제로 모델링하여 회전시

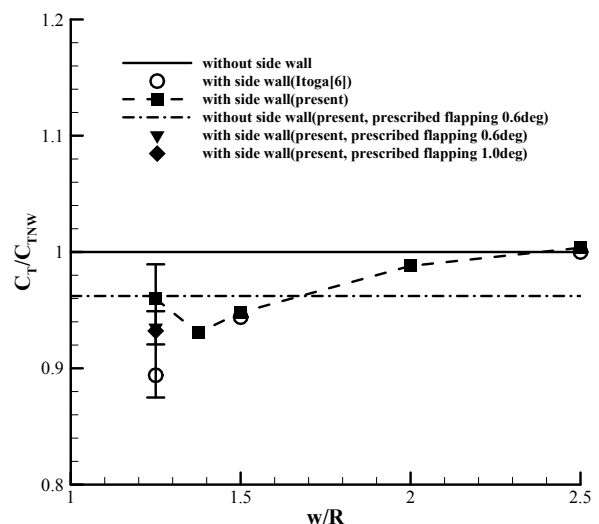


Fig. 5. Rotor Thrust by Distance from Rotor Center to Wall

키는 비정상상태 해석을 수행한 선행 연구와 디스크 상에 시간 평균화된 압력차를 부여하여 계산하는 본 연구의 방식차이로 인해 방위각에 따른 플래핑값의 차이가 발생하여 나타난 것으로 판단된다. 이를 판단하기 위해 플래핑 값을 강제로 고정하여 특정 케이스의 해석을 수행하였다.

플래핑 값을  $0.6^\circ$ 로 부여하여 벽면이 없는 경우의 해석을 수행한 경우의 추력값이 플래핑 값을 계산하여 해석을 수행한 경우의 추력값에 비해 다소 낮게 나타나고 있음을 확인하였다. 이를 통해 플래핑 값이 크게 되면 유효받음각이 감소하여 로터의 추력값이 낮게 되는 것을 확인할 수 있었다.  $w/R$ 이 1.25R인 경우,  $0.6^\circ$ 와  $1.0^\circ$ 의 플래핑 값을 강제로 고정하였을 경우, 압력차의 변화와 플래핑 값의 상호 작용이 이루어지지 않아 추력값의 진동이 나타나고 있다. 이 경우의 계산된 추력값의 평균값은 계산된 플래핑 값을 사용한 경우의 추력값에 대비하여 낮게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 앞서 가정한  $w/R$ 이 1.375R 이하인 경우에 선행 연구와 본 연구의 추력값 차이가 플래핑 값 차이로 인해 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

플래핑 값을  $0.6^\circ$ 로 부여하여 벽면이 없는 경우의 해석을 수행한 경우의 추력값이 플래핑 값을 계산하여 해석을 수행한 경우의 추력값에 비해 다소 낮게 나타나고 있음을 확인하였다. 이를 통해 플래핑 값이 크게 되면 유효받음각이 감소하여 로터의 추력값이 낮게 되는 것을 확인할 수 있었다.  $w/R$ 이 1.25R인 경우,  $0.6^\circ$ 와  $1.0^\circ$ 의 플래핑 값을 강제로 고정하였을 경우, 압력차의 변화와 플래핑 값의 상호 작용이 이루어지지 않아 추력값의 진동이 나타나고 있다. 이 경우의 계산된 추력값의 평균값은 계산된 플래핑 값을 사용한 경우의 추력값에 대비하여 낮게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 앞서 가정한  $w/R$ 이 1.375R 이하인 경우에 선행 연구와 본 연구의 추력값 차이가 플래핑 값 차이로 인해 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

바닥면과 벽면이 존재하는 경우의 해석을 통해 로터가 벽면에 매우 근접했을 경우( $w/R$ 이 1.375이하)에는 본 연구에서 사용한 actuator disk 모델 기반의 해석자가 실제 블레이드를 모델링하는 방식에 비해 성능 예측에서 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구에서 수행하고자 하는 방풍 구조물안의 로터 해석에서 로터와 방풍구조물간의 거리는 시험시의 사고 가능성을 고려하여 최소한  $w/R$ 이 1.5R 이상이 되어야 한다.  $w/R$ 이 1.5R이상인 경우에는

본 연구에서 개발된 해석자의 성능 예측이 실제 블레이드를 모델링하여 성능을 예측하는 방식과 비교하여 거의 차이가 나타나지 않고 있다. 그러므로 개발된 해석자를 방풍 구조물내의 로터 공력 성능 해석에 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

### 3.2 방풍 구조물내의 로터 공력 성능 해석

방풍 구조물 내의 로터 성능 평가를 위해서 사용된 계산 조건은 Table 2와 같고 계산 도메인은 Fig. 6과 같이 구성하였다. Fig. 6과 같이 방풍 구조물은 원통형의 구조물로 가정하였고 유입 덕트는 구조물 윗쪽에 유출 덕트는 구조물의 옆면에서 바닥면으로부터 경계 조건을 주어 구성하였다. 로터의 회전시에 주변의 구조물로 인한 불안정성을 줄이기 위해 방풍 구조물의 최소 반경은 3R로 가정했으며, 반경의 영향을 보기 위해 방풍 구조물의 반경이 4R인 경우를 추가로 해석하였다. 방풍 구조물의 높이는 기본적으로 로터 디스크 면에서 2R만큼 떨어져있다고 가정하였고 높이에 대한 영향을 확인하기 위해 반경 3R 케이스에서 디스크 면에서 1R만큼 떨어져있는 경우도 해석하였다. 유입, 유출 덕트의 넓이는 로터 디스크 면적을 기준으로 Table 4에 나타나있는 경우를 해석하였다.  $A_i$ 로 나타낸 값은 유입 덕트의 면적을 디스크 면적으로 나눈 비를 나타내고 있으며  $A_o$ 로 나타낸 값은 유출 덕트의 면적을 디스크 면적으로 나눈 비를 나타낸 것이다. 면적비가 16  $A_{disk}$ 인 유입 덕트와 면적비가 9  $A_{disk}$ 인 유출 덕트는 반경이 4R인 케이스에서만 해석을 수행하였다. 로터의 추력 계수의 차이에 따른 영

Table 2. Condition for Rotor Analysis inside the Small Surrounded Space

Blade planform	Rectangular
No. of Blade	4
Radius(m), 1R	1
Root cut	0.133R
RPM	955
Solidity	0.08
Collective Pitch angle at 0.75R ( $^\circ$ )	9.8 or 11
Linear twist ( $^\circ$ )	-11
Airfoil	NACA0012
Rotor height ( $h_{rotor}$ )	1.25R
Size of fence (rxh)	3R x 3.25R or 2.25R 4R x 3.25R
Inlet duct area ( $A_i$ )	1, 2, 4, 6, 9, (16 for 4R) $A_{disk}$
Outlet duct area ( $A_o$ )	1, 2, 4, 6, (9 for 4R) $A_{disk}$



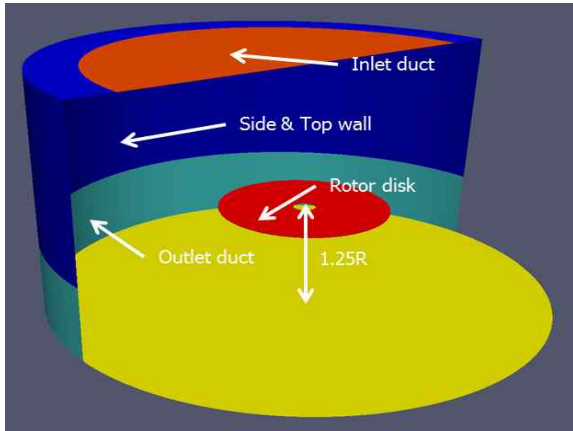


Fig. 6. Computation Domain inside the Small Surrounded Space

향을 보기 위해  $A_i$ 이  $6 A_{disk}$ 이며  $A_o$ 이  $4 A_{disk}$ 인 경우에 고정 피치각을  $11^\circ$ 로 증가시켜서 해석을 수행하였다.

해석을 위한 경계 조건은 Fig. 5에 나타내었다. 계산 도메인 경계 부분에서 벽면으로 지정되는 영역에 의해 유입과 유출 덕트의 면적이 결정되었으며 이때 유출입부의 경계 조건은 속도의 경우는 pressure Inlet Outlet, 압력의 경우 total Pressure 조건을 부여하였다. 방풍 구조물이 없는 경우의 해석을 위해서는 계산 도메인의 경계 조건을 모두 유출입 조건으로 부여하였다.

Figure 7은 방풍 구조물이 없는 경우 해석된 로터의 추력 계수 대비 유입, 유출 덕트 면적에 따른 반경이  $3R$ 인 방풍 구조물 내부에서의 로터의 추력 계수를 나타낸 것이다.  $C_T$ 비가 1이면 방풍 구조물이 없는 경우의 로터의 추력계수와 동일한 계수값을 가지며 1보다 작은 경우에는 낮은 값을 가진다. Fig. 7의 추력 계수비에서 확인할 수 있듯이 로터 성능에 영향을 미치는 중요한 변수는 유입 덕트인 것으로 판단된다. 유입 덕트의 면적이 넓어질수록 로터 추력 계수비가 증가하였으며  $9 A_{disk}$ 인 경우 거의 0.95의 추력 계수 비를 보여주고 있다. 유출 덕트의 경우에는 유입 덕트 면적인  $4 A_{disk}$  이상인 경우에 유출 덕트  $6 A_{disk}$  이상이 되면 추력 계수 비가 변화하지 않는 효과를 보여주고 있었다. 이를 통해 유입 덕트의 경우 유동장의 변화와 로터 성능에 영향을 미치며 유출 덕트는 로터의 성능보다는 유동장 변화에 대한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 하지만 유입 덕트 면적이 1, 2  $A_{disk}$ 인 경우와 유출 덕트 면적인 1  $A_{disk}$ 인 경우를 추력 계수 비만으로 다른 경우와 구분하기가 어렵기 때문에 추력 계수 비외에 운동량 비를 계산하였다.

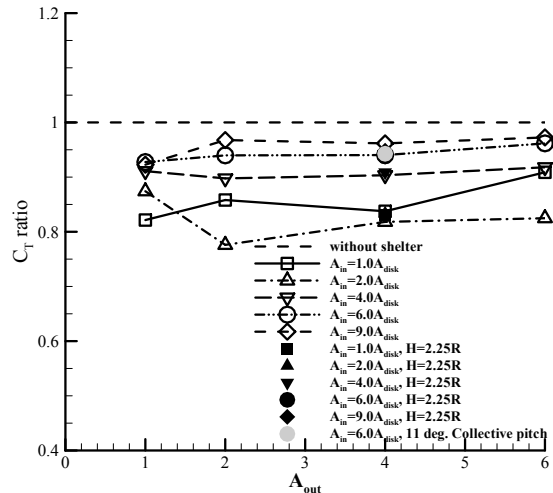


Fig. 7.  $C_T$  Ratio by Inlet and Outlet Duct Areas (Space Radius =  $3R$ )

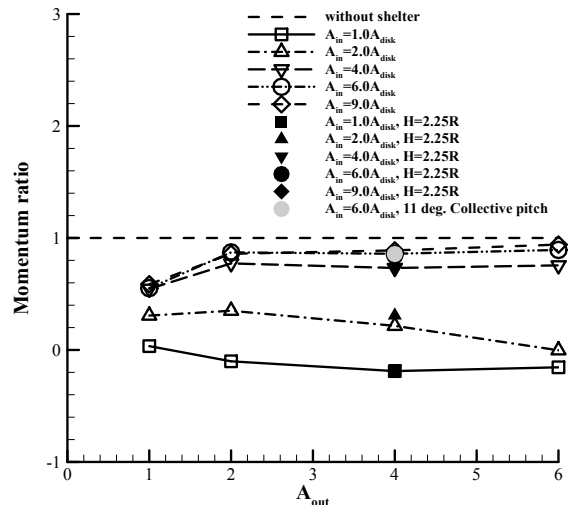


Fig. 8. Momentum Ratio by Inlet and Outlet Duct Areas (Space Radius =  $3R$ )

Figure 8은 식(6)과 같이 방풍 구조물이 없는 경우에 해석된 계산 도메인 경계에서 총 유출 운동량 대비 방풍 구조물의 유출입 덕트를 통해 발생하는 총 유출 운동량의 비를 유출입 덕트 면적에 따라 나타낸 것이다.

$$\text{momentum ratio} = \frac{\left( \iint_{\text{domain boundary}} (\rho \vec{V} \cdot d\vec{s}) \cdot \vec{V} \right)_{\text{with fence}}}{\left( \iint_{\text{domain boundary}} (\rho \vec{V} \cdot d\vec{s}) \cdot \vec{V} \right)_{\text{without fence}}} \quad (6)$$

운동량 비가 음의 값을 가지는 경우는 유입되는 운동량이 유출되는 운동량보다 큰 경우로 내부에서 운동량의 소산이 일어나는 경우이다. 이때의 소산을 일으키는 원인으로서는 내부의 와흐름

이 발생하는 경우와 유출 덕트에서 유입 유동이 발생하여 유출 속도가 감소하는 영향등이 있다. 운동량 비가 양의 값을 가지는 경우는 유입유동이 로터에 의해 운동량이 증가되어 유출 덕트로 빠져나가는 경우이며 이때의 운동량 비는 방풍 구조물 형상에 의해 결정된다. 운동량 비가 일정한 값을 유지하는 경우에는 유출입 덕트의 면적 변화에 의한 유동장 변화가 없다는 것을 뜻하며 1에 가까운 값을 가질수록 방풍 구조물이 없는 경우와 유사한 유동 현상을 보여준다.

Figure 7과 8의 결과를 하나의 성능맵으로 표시하여 Fig. 9과 같이 나타내었다. 선 등고는 추력비를 표시하고 있으며 색 등고는 운동량비를 나타낸다. 그림의  $A_{in}$  ratio와  $A_{out}$  ratio는 다음의 식을 통해 구하였다.

$$A_{in} \text{ ratio} = 1 - \frac{\text{Radius of } A_{disk}}{\text{Radius of } A_{in}} \quad (7)$$

$$A_{out} \text{ ratio} = \frac{\text{Height of } A_{out}}{\text{Height of Rotor}} \quad (8)$$

Figure 9에서 추력비가 0.95이상이며 운동량 비가 0.9이상인 부분을 사각형으로 표시하였다. 이때, 추력비와 운동량비가 선형적으로 변화하는 경향이 나타남으로 사각형안에서 계산을 수행하지 않은 영역에서의 결과도 같은 경향을 보여줄 것으로 판단하였다. 사각형으로 표시된 영역에서는 방풍 구조물로 인한 로터 성능 및 유동의 변화가 다른 영역에 비해 적다는 것을 나타내며 이를 유효 영역이라고 지정하였다. 이때의 유입 덕트의 반지름의 최소값은  $2.4R$  ( $A_i=5.7A_{disk}$ ), 유출 덕트의 높이의 최소값은  $0.375R$  ( $A_o=2.25A_{disk}$ )이다.

유효 영역과 비 유효 영역에서의 특징을 설명

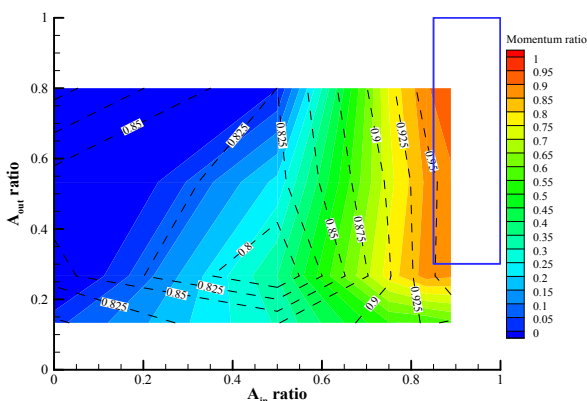


Fig. 9. Performance Map of the Thrust Coefficient Ratio and the Momentum Ratio (Space Radius = 3R)

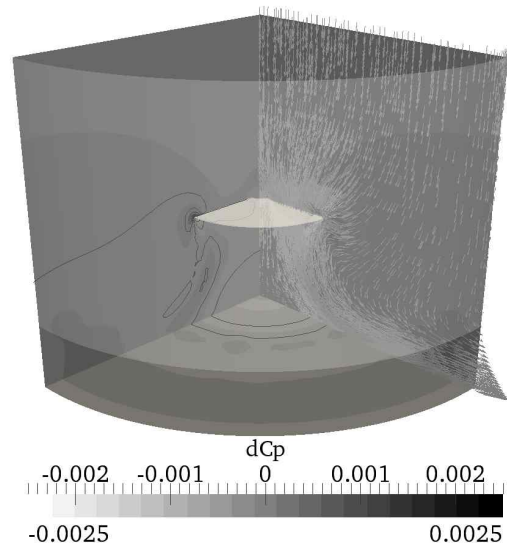


Fig. 10.  $C_p$  Difference in the Effective Region :  $A_i = 9 A_{disk}$ ,  $A_o = 4 A_{disk}$

하기 위해 영역마다 대표되는 케이스의 유동장의  $C_p$  값을 방풍 구조물이 없는 경우의 유동  $C_p$  값과 제하는 방식으로  $C_p$  차를 구하여 유동장 결과를 후처리 하였다.  $C_p$  값을 구하기 위해서 로터 팁에서의 속도를 사용하였다.  $C_p$  차 그림의 경우, 값이 작을수록  $C_p$ 가 기준 케이스보다 낮은 경우이며 값이 커질수록  $C_p$ 가 기준 케이스보다 높은 경우이다. 방풍 구조물은 계산 경계에 반투명한 면으로 표시하였으며, 디스크면은 그림 가운데에 표시하였다.

Figure 10은 유효 영역에서의 유동을 보여주고 있으며 이때의  $A_{in}$  ratio는 0.89,  $A_{out}$  ratio는 0.47이다. 이 경우에는 전체 계산 도메인에서 유동장의 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 이는 유입된 유동이 방풍 구조물이 없는 경우와 유사한 유동 경로를 가지고 유출 덕트쪽으로 빠져나가고 있다는 뜻이며, 이때 유입 덕트의 면적에 따라 로터 상방의 압력이 결정되어 추력 계수 비의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 속도 벡터장에서도 확인 할 수 있듯이 유입 덕트에서 유입된 유동이 디스크 면을 통과하거나 후류에 의해 유도되어 유출 덕트를 통해 유출되고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 11은 비유효 영역에서의 유동을 보여주고 있으며 이때의  $A_{in}$  ratio는 0.5,  $A_{out}$  ratio는 0.47이다. 이 케이스에서는 유입부가 유효 영역보다 상대적으로 좁아 유출 면적에서 유입되는 유동이 발생하게 되며 이로 인해 전체적인 유출 운동량이 줄어들고 있는 것으로 판단된다. 속도 벡



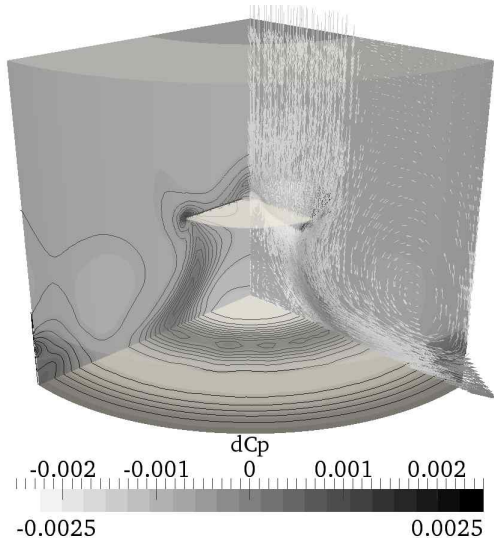


Fig. 11.  $C_p$  Difference in the Ineffective Region :  $A_i = 2 A_{disk}$ ,  $A_o = 4 A_{disk}$

터장을 통해 확인 할 수 있듯이 유출부의 유입 유동으로 인해 유출 덕트 근방에서 약한 순환흐름이 발생하게 되어 이로 인한 운동량 감소 효과도 나타나는 것으로 판단된다. 유출부에서의 유입 유동으로 인해 로터 상방의 압력이 다소 증가하게 되고 이로 인해 추력 계수비도 다소 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

방풍 구조물의 높이가 2.25R인 경우의 해석 결과는 높이가 3.25R인 경우와 큰 차이가 존재하지 않음이 확인된다. 또한, 고정 피치각을 상승시켜 추력을 증가시킨 경우에도 추력 계수 비와 운동량 비에서 기존의 결과와 유사한 값을 나타내고 있음이 확인되었다. 이를 바탕으로 본 해석 케이스에서는 방풍 구조물의 높이에 대한 영향과 추력의 강도에 대한 영향이 적다고 판단된다.

방풍 구조물의 반경을 4R로 증가하여 해석한 추력 계수 비와 운동량 비는 Fig. 12와 13에 나타내었으며 성능맵은 Fig. 14에 나타내었다. 그림 14의 선 등고와 색 등고는 각각 추력비와 운동량 비이다. 추력 계수 비의 경향은 방풍 구조물의 반경 3R인 경우와 같이  $A_i$ 가 증가할수록 추력 계수비가 증가하고 추력계수비가 0.95 이상인 경우도 동일한 것을 확인하였다.  $A_o$ 에 의한 추력 계수 비 기울기 감소도  $6 A_{disk}$  이상인 경우 추력 계수 비가 동일하게 나타나는 것을 확인하였다. 운동량 비의 경우에도 앞선 반경 3R의 경우와 동일하게 카테고리 구분을 구분할 수 있었다. 이를 통해 로터 성능 및 내부 유동장 변화는 구조물 반경과 상관없이 유입 및 유출 덕트의 면적에 따라

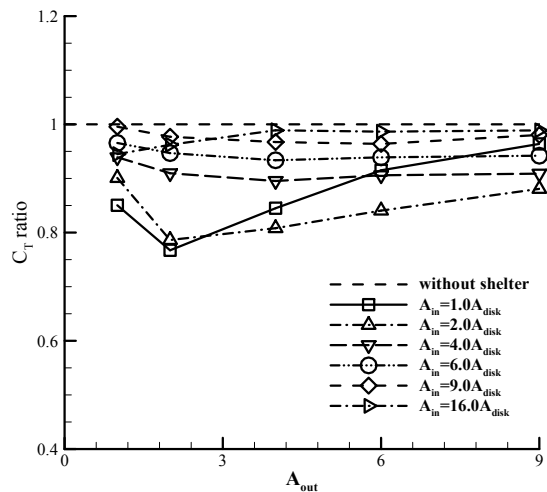


Fig. 12.  $C_T$  Ratio by Inlet and Outlet Duct Areas (Space Radius = 4R)

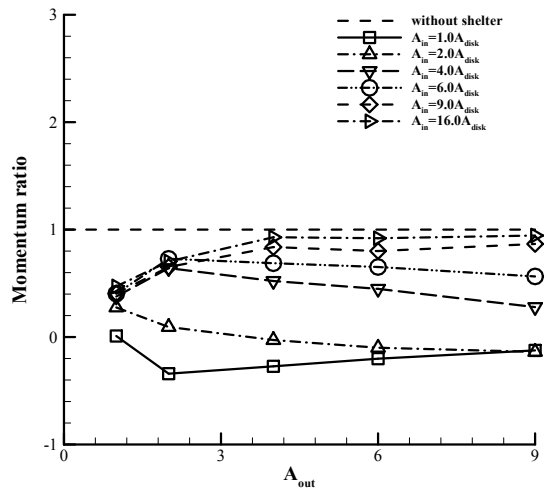


Fig. 13. Momentum Ratio by Inlet and Outlet Duct Areas (Space Radius = 4R)

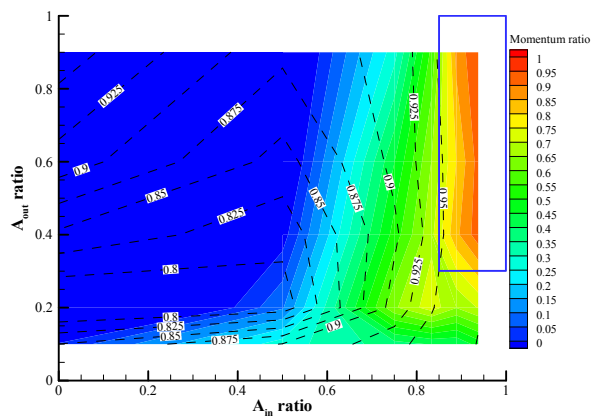


Fig. 14. Performance Map of the Thrust Coefficient Ratio and the Momentum Ratio (Space Radius = 3R)

유사한 경향을 보여주고 있는 것으로 판단된다.

방풍 구조물 내부의 로터 성능 해석을 통해 방풍 구조물의 유출입 덕트 면적이 로터의 성능 및 내부 유동장에 미치는 영향을 확인하였다. 해석한 모든 방풍 구조물 반경 조건에서 로터 성능을 95% 이상 유지하기 위한 유입 덕트의 반지름의 최소값은  $2.4R(A_i=5.7A_{\text{disk}})$ , 유출 덕트의 높이의 최소값은  $0.375R(A_o=2.25A_{\text{disk}})$ 이었다. 유입 및 유출 덕트가 이보다 작을 경우에는 내부 유동장에서 발생하는 순환흐름으로 인해 로터 성능이 감소하는 현상을 확인하였다. 또한, 구조물의 높이와 추력의 강약에 따른 효과는 거의 존재하지 않고 있음을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 협소공간에서의 로터 해석을 위한 로터 해석자를 개발하여 이를 부분벽면이 존재하는 로터 성능 해석에 적용하여 검증하고, 협소공간내의 로터 성능 해석에 사용하였다. 이를 위해 로터 해석자는 깃요소 이론 기반의 actuator disk 모델과 오픈 소스 기반의 전산유체역학 코드를 결합하였으며 플래핑 효과에 대한 해석을 포함하여 로터상의 비균일한 하중에 의해 발생하는 로터 성능 변화의 예측이 가능하도록 하였다. 방풍 구조물이 존재하는 경우의 로터 성능 해석을 통해서 방풍 구조물에 의해 로터 주변의 유동장과 성능이 변화하는 현상을 확인하였다.

바닥면과 벽면이 존재하는 경우의 해석을 통해 로터가 벽면에 매우 근접했을 경우 본 연구에서 사용한 actuator disk 기반의 해석자가 실제 블레이드를 모델링하는 방식에 비해 성능 예측에서 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 로터와 벽면의 거리가 로터 반지름의 1.375 배 정도 떨어진 경우에는 본 연구에서 개발된 해석자의 성능 예측이 실제 블레이드를 모델링하여 성능을 예측하는 방식과 비교한 경우와 동일한 결과를 나타내고 있음을 확인하였다. 이 결과를 통해 개발된 actuator disk 기반의 해석자를 방풍 구조물내의 로터 공력 성능 해석에 사용하는 것이 적절하다고 판단하였다.

방풍 구조물 내부의 로터 성능 해석을 통해 방풍 구조물의 유출입 덕트 면적이 로터의 성능 및 내부 유동장에 미치는 영향을 확인하였다. 해석한 모든 방풍 구조물 반경 조건에서 로터 성능을 95% 이상 유지하기 위한 유입 덕트의 반지름의 최소값은  $2.4R(A_i=5.7A_{\text{disk}})$ , 유출 덕트의 높이

의 최소값은  $0.375R(A_o=2.25A_{\text{disk}})$ 이었다. 유입 및 유출 덕트가 이보다 작을 경우에는 내부 유동장에서 발생하는 와흐름으로 인해 로터 성능이 감소하는 현상을 확인하였다. 또한, 구조물의 높이와 추력의 강약에 따른 효과는 거의 존재하지 않고 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해 블레이드에서의 깃끝 와류의 거동이나 BVI등과 같이 비정상 유동이 중요한 로터 문제를 제외하고는 현재의 actuator disk model을 사용한 해석이 시간 및 계산 자원의 이득을 취하면서 비교적 의미 있는 결과를 획득할 수 있음을 확인하였다. 또한 로터 시험을 위한 방풍 구조물 형상에 대한 기초적인 연구를 수행하여 실제 적용 가능한 방풍 구조물의 형상을 제안하였다. 추후, 제안된 방풍 구조물에 풍환경을 묘사할 수 있는 풍속, 풍향등을 부여하여 해석을 수행하고 방풍 효율에 대한 연구를 수행할 예정이다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- 1) Cheeseman, I. C., and Bennett, W. E., "The Effect of the Ground on a Helicopter Rotor in Forward Flight," *ARC R&M*,(3021), 1955. 9.
- 2) Hayden, J. S., "The Effect of the Ground on Helicopter Hovering Power Required," *American Helicopter Society 32nd Annual Forum*, Washington, DC, 1976. 5.
- 3) Lee, T. E., Leishman, J. G., and Ramasamy, M., "Fluid Dynamics of Interacting Blade Tip Vortices with a Ground Plate," *American Helicopter Society 64th Annual Forum*, Montreal, Canada, 2008. 5.
- 4) Seo, J. W., "Experimental and Numerical Study on the Small-Scale Rotor Hover Performance in Partial Ground Conditions," M.E. Thesis, Pusan National University, Busan, Korea, 2010.
- 5) Iboshi, N., Itoga, N., Prasad, J.V.R., and L. M., Sankar, "Ground Effect of a Rotor Hovering above a Confined Area," *American*

*Helicopter Society 64th Annual Forum*, Montreal, Canada, 2008. 5.

6) Itoga, N., Iboshi, N., Horimoto, M., Saito, S., and Tanabe, Y., "Numerical Analysis of Helicopter Rotor Hovering in Close Proximity to the Ground with a Wall," *J. of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 58, No. 680, 2010, pp. 269-276.

7) Leishmann, J. G., *Principles of Helicopter Aerodynamics*, 2nd Edition, Cambridge University Press, USA, 2006.

8) Xin, H., Prasad, J. V. R., and Peters, D. A., "Dynamic Inflow Modeling for Simulation of a Helicopter Operating in Ground Effect,"

*AIAA Modeling and Simulation Technology Conference*, Portland, Oregon, August 9-11, 1999, AIAA-99-4114.

9) He, C. J., "Development and Application of a Generalized Dynamic Wake Theory for Lifting Rotors," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1989.

10) Kim, T., Oh, S., and Yee, K., "The Extension and Validation of OpenFOAM Algorithm for Rotor Inflow Analysis using Actuator Disk Model," *J. of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 39, No. 12, 2010, pp.1087-1096.