論文 DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.12.1087

Actuator Disk 모델 기반의 로터 유입류 해석을 위한 OpenFOAM 알고리즘 확장

김태우*, 오세종**, 이관중**

The Extension and Validation of OpenFOAM Algorithm for Rotor Inflow Analysis using Actuator Disk Model

Taewoo Kim*, Sejong Oh** and Kwanjung Yee**

ABSTRACT

The purpose of current study is to develop and verify the newly developed solver for analyzing rotor flow using the open-source code. The algorithm of standard solver, OpenFOAM, is improved to analyze the rotor inflow with and without fuselage. For the calculation of the rotor thrust, the virtual blade method based on the blade element method is employed. The inflow velocities on the rotor disk used to specify the effective angle of attack, have been included in the solver. The results of the current rotor inflow analysis are verified by comparing with other experimental and numerical results. It was confirmed that the modified solver provides satisfactory results for rotor-fuselage interaction problem.

초 록

본 연구의 목적은 오픈 소스 코드에서 제공하는 해석자의 알고리즘을 수정하여 로터의 유동 해석에 적합하도록 해석자를 확장하고, 이를 검증하는 것이다. 우선 로터의 추력에 의해 발생하는 후류에 의한 유동 흐름의 해석이 가능하도록 오픈 소스 코드인 OpenFOAM의 표준 해석자의 알고리즘을 개선하였다. 또한, 로터의 추력 예측을 위해서 깃요소 이론을 기반으로 한 가상 블레이드 기법을 적용하였다. 깃요소 이론에서의 유효받음각을 구하기 위한 로터 디스크 상의 속도 성분은 해석자 내에서 반복계산시마다 수렴되는 속도를 사용하였다. 개발된 로터 해석자를 사용하여 로터 유입류 해석을 수행하고 그 결과를 실험 결과 및 타 수치해석 코드의 결과와 비교하여 신뢰도를 검증하였다. 로터-동체 상호작용 해석을 통해 헬리콥터 시스템 전체에 대한 로터 해석자의 적용가능성을 확인하였다.

Key Words : Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Open Source CFD(오픈 소스 CFD), Rotor Analysis(로터 해석), Actuator Disk(압력판 기법), Virtual Blade Method(가상 블레이드 기법), OpenFOAM(오픈폼)

† 2011년 10월 6일 접수 ~ 2011년 11월 22일 심사완료
* 정회원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원
** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과
교신저자, E-mail : daedalus@pusan.ac.kr
부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Ⅰ. 서 론

전산유체역학을 통한 유동 해석은 자동차, 항공기부터 풍력 터빈에 이르기까지 다양한 연구 영역에서 이루어지고 있다. 전산유체역학 해석을

수행하기 위해서는 별도로 in-house 코드를 개발하여 사용하거나 상용 전산유체역학 해석 프로그램을 사용하는 방식이 기존의 방법이다. 그러나 최근에는 오픈 소스 코드를 통한 해석 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

오픈 소스 기반의 전산유체역학 코드는 소스 코드를 공유하여 전산유체역학 코드 개발에 경험이 있는 연구자들이 참여하게 함으로써 코드가 빠른 시간내에 진보할 수 있도록 하는 장점을 취하면서 비용이 들지 않는 공개 프로그램을 지향함으로써 라이선스 비용이 필요한 상용 전산유체역학 해석 코드의 단점을 보완한다. 이와 같은 오픈 소스 전산유체역학 프로그램은 오픈 소스 프로그램 커뮤니티등에 공개되어 있는데 그 중 대표적인 프로그램이 바로 OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)이다[1].

OpenFOAM을 활용한 연구는 워크샵과 학회 등의 다양한 경로를 통해 활발하게 진행되고 있으며 국내에서도 초기 연구 단계에서 관심이 고조되고 있다. 대표적인 국외 연구로는 앞뒤로 배열된 실린더의 유동과 소음에 관한 Doolan의 연구[2], MHD 해석 모듈을 OpenFOAM과 결합하여 해석을 수행한 Xisto의 연구[3], 최적 설계 방법중의 하나인 adjoint 기법을 OpenFOAM과 결합하여 최적 설계를 수행한 연구[4,5], 차량의 외부 유동에 관한 해석적 연구를 OpenFOAM을 활용하여 수행한 Islam의 연구[6]가 있다. 국내에서는 OpenFOAM에 관한 개략적인 내용을 리뷰 형태로 수행한 박준권의 연구[7]와 외부 유동 현상 해석에 OpenFOAM을 적용하여 검증을 수행한 김태우등의 연구[8]가 있다. 이와 같은 오픈 소스 코드는 개발된 유동 해석자에 연구자가 필요한 수정을 쉽게 추가할 수 있다. 이는 상용코드의 단점을 보완하고 in-house 코드의 장점을 활용할 수 있는 오픈 소스의 가장 중요한 장점이다. 이를 통해 사용자의 필요에 따라 오픈 소스 코드를 수정하여 적용함으로써 오픈 소스 코드의 사용 영역을 확장할 수 있다. 본 연구에서는 오픈 소스 코드의 기본 해석자를 기반으로 가상 블레이드 기법 알고리즘을 적용한 회전하는 로터 주변의 유동장의 해석이 가능한 해석자를 개발하였고 로터 유입류 해석 실험 및 로터-동체 상호작용 실험등의 결과와 비교 검증하였다.

로터 주변의 유동장 해석 연구는 로터 디스크로 가정하여 블레이드를 2차원 요소들이 연결된 형상으로 가정하여 간단히 해석하는 깃요소 이론과 로터 유동 해석은 로터 블레이드를 모델링하여 3차원 회전 전산유체역학 해석을 수행하는 방식까지 다양한 수치해석적 연구가 진행되고 있다. 깃요소 이론의 경우 빠른 시간안에 결과를 확인할 수 있으나 주변 유동장에 대한 고려가 어렵고, 로터 모델링 전산유체역학 해석의 경우 비교적 실제 현상에 유사한 결과를 획득할 수 있으나 회전하는 로터의 격자 생성이나 정확한 해석 기법 적용, 많은 계산 자원의 요구등으로 인해 연구에 어려움이 존재한다. 위와 같은 이유로 로터 영역은 깃요소 이론을 통해 해석을 수행하고 주변의 유동장은 전산유체역학 해석을 수행하는 가상 블레이드 기법(Actuator Disk) 기법이 로터 해석에 사용되고 있다. 가상 블레이드 기법은 박리가 심하지 않은 경우에는 신뢰할만한 결과를 도출하며 로터-동체의 상호작용 현상의 관찰에 유리하다.

가상 블레이드 기법은 깃요소 이론에서 구해지는 시간 평균화된 로터의 유동 효과를 전산유체역학 계산 도메인 내에서 로터로 정의된 영역에 부여할 수 있는 방법이다. 이종국등의 연구[9]에서는 비정렬 격자계에서 로터 디스크 표면에 시간평균화된 부분추력값을 구하는 등의 비정렬 격자계에서 가상 블레이드 기법의 적용에 대한 연구를 수행하였다. 계산 도메인 내에 로터의 효과를 부여하는 방식으로는 계산 도메인 내에서 디스크 경계 조건을 설정하여 양면에서 압력값을 계산하여 모멘텀 식에 로터 효과를 부여하는 방식[9]과 계산 도메인 내의 디스크 영역에 해당하는 셀에 로터 효과에 해당하는 소스항을 부여하는 방식[10]등이 있으며 O'Brien 등의 연구[11]에서 2가지 방식에 대한 비교 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 깃요소 방식으로 계산한 로터에서의 추력값을 디스크 영역 셀에 시간평균화하여 부여하는 방식으로 가상 블레이드 기법을 개발하였으며, 로터 면에서의 inflow 값을 실험 결과와 비교하였으며 로터-동체 상호 간섭 문제에 적용하여 동체 표면에서의 압력값을 실험 결과와 비교하였다. 이를 통해, 수정된 오픈 소스 코드의 정확도를 확인할 수 있었다.

II. 본 론

2.1 깃요소 이론

깃요소이론은 각 방위각, 반지름방향으로 성분을 나누어 공력하중분포를 계산하는 방법으로서, 계산시간이 빠르기 때문에 가상 블레이드 기법에 적용하기에 적합한 기법 중 하나이다. 다만, 자체적으로 동적실속과 같은 비정상 특성이 고려되지

않으므로 여기에 대해서는 별도의 모델링 기법이 필요하며 본 연구에서는 플래핑하는 블레이드의 운동 특성을 고려할 수 있는 모델을 적용하였다.

그림. 1은 로터의 깃요소에 작용하는 공기력의 환경을 보여준다. 여기서 ϕ는 유입각이다. 그림. 1에서 보여지듯이, 각 계산 셀에 작용하는 속도 성분은 식(1)에 의해 표현된다[12]. 여기서 μ는 전진비(advance ratio)이고, λ는 로터 유입비이다. β는 플래핑각(flapping angle)이고, $\dot{\beta}$은 플래핑각의 시간에 대한 변화율이다.

식(1)을 이용하여 각 셀에서의 국소 유효 받음각(Local Effective Angle of Attack, α_e)을 구하여 이때의 공력계수(c_l, c_d, c_m)을 획득하였다. 공력계수값은 2가지 방식으로 획득할 수 있는데, 첫 번째 방식은 해석하는 로터에서 사용된 블레이드의 에어포일의 공력계수값을 받음각에 대한 다항식으로 표현하고 국소유효받음각을 입력하여 해당하는 공력계수값을 구하는 방식이고 두 번째 방식은 에어포일의 공력성능테이블에서 (Table Look-up) 내삽하여 해당하는 셀의 공력계수값을 구하는 방식이다.

$$\frac{U_T}{\Omega R}=r+\mu\sin\psi$$
$$\frac{U_P}{\Omega R}=\lambda+\frac{r\dot{\beta}}{\Omega}+\mu\beta\cos\psi$$
$$\frac{U_R}{\Omega R}=\mu\cos\psi \qquad (1)$$

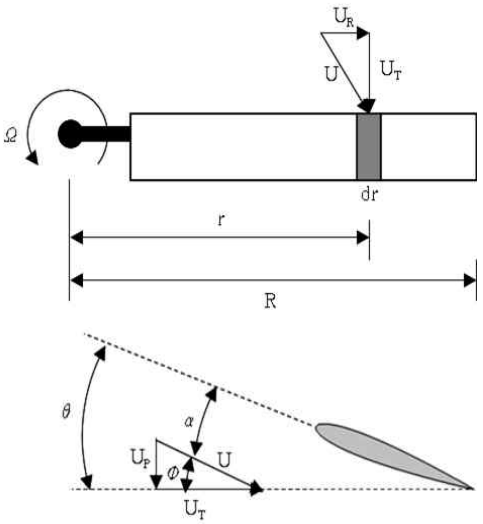

그림 1. 깃요소에 작용하는 공기력환경[12]

2.2 가상 블레이드 기법

전산유체역학에서 유동장 내에서 로터의 영향을 보다 정확하게 고려하기 위해서는 로터의 형상을 모델링하여 계산 도메인내에서 회전시켜 추력을 구하여야 한다. 그러나 이런 전산유체역학 계산은 로터의 모델링을 위한 격자의 수가 상당하며 로터의 회전을 고려해야 하기 때문에 긴 계산 시간 및 많은 계산 자원을 요구한다. 이와 같은 어려움을 해결하기 위해 로터 형상을 모델링하기보다는 유동장 내에서 로터의 영향을 깃요소 이론등과 같은 방식으로 계산하는 로터 해석 코드를 사용하여 해석하고 여기서 구해낸 로터의 영향을 전산유체역학 계산에 추가하여 계산을 수행하는 방식이 가상 블레이드 기법이다.

본 연구에서는 깃요소 이론으로 구한 국소공력계수값을 통하여 디스크 셀에서 시간평균화된 추력값을 구한 후, 이를 소스항으로 운동량 방정식 계산에 추가함으로써 로터의 효과를 고려하였다. 그림 2는 경계조건방식과 소스항 추가 방식을 간단하게 도식화한 그림이다. 경계 조건에 압력값을 추가하는 경우에는 각 셀이 만나는 면에서 압력값을 추가하게 되며, 소스항 추가 방식의 경우 디스크 영역에서 지정된 셀에 소스항을 추가하게 된다.

가상 디스크 셀에 로터에서 발생하는 힘을 부여하기 위해서는 깃요소 이론에서 구한 국소공력계수값을 통해 각 셀에서의 추력값을 구해야 한다. 전진 비행하는 로터의 경우 로터 허브에서의 회전력의 수평을 유지하기 위해서 회전각에 따른 피치각 변화가 필요하며 이를 고려한 각 셀에서의 유효받음각은 식(2)과 같이 나타난다.

$$\theta=A_0+\alpha_t\frac{r}{R}-A_1\cos\psi-B_1\sin\psi \qquad (2)$$

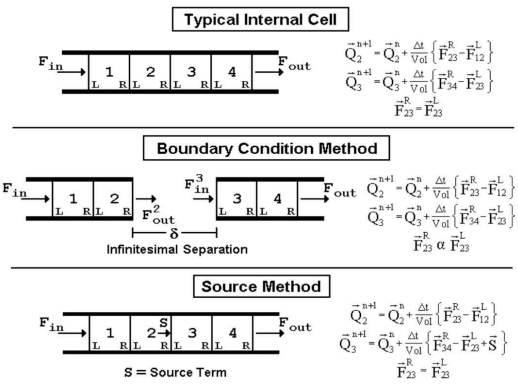

그림 2. 가상 블레이드 기법에서 로터 효과 고려 방식 비교[11]

이때, Θ는 셀에서의 pitch각이며 A_0는 로터 허브에서의 collective pitch각, α_t는 블레이드 트위스트 각, A_1과 B_1은 cyclic pitch각이다. 식(2)에서 구해진 pitch각에서 식(1)에서 구한 유도 성분으로 유도되는 유도받음각을 고려하여 국소받음각을 식(3)과 같이 구한다.

$$\alpha_e = \theta - \tan^{-1}\frac{U_P}{U_T} \tag{3}$$

위의 방법을 통해 구한 각 셀에서의 유효받음각을 통하여 국소공력계수값을 구하고, 다음의 식을 통해 부분 양력 및 항력 값을 구한다. 이때, c는 블레이드의 코드 길이이다.

$$dL = \frac{1}{2}\rho V^2 c_l c dr$$
$$dD = \frac{1}{2}\rho V^2 c_d c dr \tag{4}$$

부분 양력, 항력값을 통하여 각 셀에서의 부분 추력값을 구하는데, 이종국등의 연구[9]에서 비정렬격자계 내에서 깃요소 이론을 통한 부분 추력값을 추정하는 방식을 식(5)와 같이 제안하였다. 이때, dA는 디스크 면적에서 각 셀이 차지하는 부분의 면적이며, 소스항 추가 방식의 경우, 각 셀의 부피에서 디스크 두께 길이를 나누어서 구할 수 있다.

$$dT = \frac{NdAc}{4\pi r}\rho V^2\left(c_l\cos\alpha_i - c_d\sin\alpha_i\right) \tag{5}$$

위에서 구한 부분추력값을 개발하는 코드의 운동량 방정식의 알맞은 형태로 추가하면 된다. 만약 일반적인 운동량 방정식에 소스항을 추가하는 경우에는 셀 부피당 힘의 단위 형태로 삽입하게 되고 정상 상태로 수정된 운동량의 경우에는 가속도의 형태로 추가하게 된다.

2.3 오픈 소스 코드 수정

오픈 소스 코드에 가상 블레이드 기법을 삽입하기 위해서 Erik이 수행한 OpenFOAM 소스 수정에 대한 연구[13]를 참고하였다. 본 연구에서 수행하는 로터 해석은 디스크 영역에서 시간평균화된 추력값을 계산하기 때문에 비압축성 정상상태 해석자인 simpleFom을 기반으로 가상 블레이드 기법을 적용한 로터 해석자를 개발하였다.

2.3.1 로터 해석자 알고리즘 개발

가상 블레이드 기법을 적용한 로터 해석자 개발 알고리즘은 그림 3과 같다. 로터 해석자 프로그램은 SIMPLE 알고리즘의 기본적인 형태를 취하고 있으며 운동량 해석시 별도의 프로세스를 거쳐서 로터의 영향을 해석하게 된다.

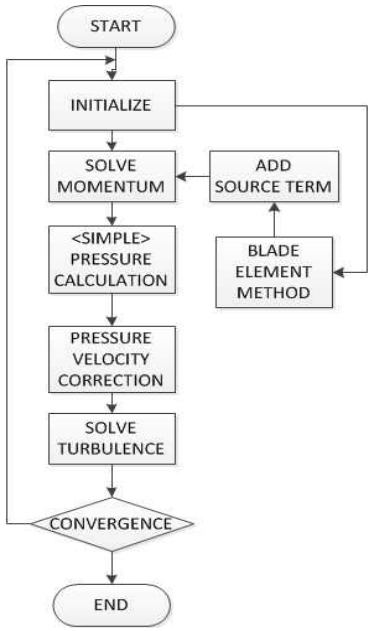

그림 3. 로터 해석자 알고리즘

깃요소 이론에서는 로터 각 셀에서의 속도값을 기준으로 국소공력계수값을 획득하게 되는데, 본 연구에서는 해당하는 셀 중심에서의 전산유체역학 해석을 통해 구한 속도값을 사용하였다. 디스크 위에서 속도 성분을 수직, 수평 방향으로 분해하기 위해 로터 반경, 로터 회전 속도등의 로터 정보를 입력받아 로터 허브에서 해당 셀과의 위치 벡터 계산을 수행한다. 여기서 획득한 위치 벡터와 셀 중심에서 주어지는 속도 벡터사이의 벡터 연산을 통해 해당 셀에서의 수직, 수평 방향의 속도 성분를 분해하여 유도 유입류에 의한 유도받음각을 획득하게 된다. 구해진 유도받음각을 통하여 해당 셀에서의 유효받음각과 국소공력계수값을 획득하고 이를 사용하여 가상 블레이드 기법으로 해당 셀의 부분추력값을 획득한다.

로터 해석자는 정상상태의 운동량 방정식의 해석을 수행하기 때문에 앞서 언급했듯이 추가되는 소스항은 가속도 단위로 입력된다. 이를 위해 깃요소 이론과 가상 블레이드 기법에서 구한 추력값을 식(6)을 통하여 단위 부피당 가속도 단위로 변환하여 운동량 방정식에 추가한다. 여기서, $\vec{s}$는 운동량 방정식에 추가되는 소스항이며 ρ는 입력된 밀도값이며 dV는 해당 셀의 부피이다.

$$\vec{s} = dT/(\rho dV) \tag{6}$$

2.3.2 알고리즘 삽입

OpenFOAM은 김태우등의 연구[8]에서 나타난 것 같이 객체지향방식의 C++ 언어로 개발되었으므로 로터 해석자 개발을 위해서 기존 해석자인 simpleFoam 코드 내부에 가상 블레이드 기법에 해당하는 프로시저를 C++에서의 클래스 형태로 구성하였다.

가상 블레이드 클래스는 셀의 위치, 속도 등의 정보를 변수 형태로 전달받고 내부에서 계산된 소스항을 주 계산 영역으로 반환한다. 가상 블레이드 클래스 생성시에는 OpenFOAM 입력파일인 fvSolution 내에 지정된 가상 블레이드 관련 파라메터들을 로드하여 깃요소 이론을 통한 추력값 계산에 사용한다. 표 1은 가상 블레이드 클래스의 헤더 파일이며 표 2는 로터 해석자 내에서의 클래스 선언 부분이다. 가상 블레이드 클래스는 외부에서 실행 가능한 함수 영역과 내부에서만 실행하는 함수 영역으로 구분되어 있으며 이는 계산 도중에 사용되는 함수를 구분하여 개발자의 임의적인 계산 수정을 줄여주는 장점이 있는 프로그래밍 방법이다.

로터 해석자에서 운동량 방정식 계산은 기존의 OpenFOAM의 simpleFoam 알고리즘에서 가상 블레이드 기법에서 구한 소스항을 추가하는 부분에 대한 수정을 추가하여 수행한다. 수정된 운동량 방정식 계산 코드는 표 3과 같다. 이때, 소스항은 UEqn 매트릭스를 구성할 때 추가하였다. 이는 SIMPLE 알고리즘을 통한 압력 계산시 UEqn 매트릭스를 사용하여 속도 값을 예측하는 부분에서 소스항의 영향을 고려하여 보다 정확한 계산을 수행하기 위해서이다.

표 1. 가상 블레이드 클래스 헤더 파일

```
class actuatorDiskExplicitForce {

public:

    //- Runtime type information
    TypeName("actuatorDiskExplicitForce");

    actuatorDiskExplicitForce();
    ~actuatorDiskExplicitForce();

    void ReadGeometry(const fvMesh &iMesh);
    void CalcActuatorDiskVolForce(const fvMesh &iMesh, vol
VectorField &iU, volVectorField &ioVolumeForce, volScalarField &i
oAlphaEff, volScalarField &ioAlphaInd, scalarField &ioInflow, bool
oReset);
    void WriteVTK();
    void CalcInitTrim();
    void CalcTrim(const fvMesh &iMesh, const volVectorField
&iU, vectorField &ioVolumeForce, volVectorField &ioMomentHub);
    void CalcInflow(const fvMesh &iMesh, const volVectorFiel
d &iU, const vectorField &ioVolumeForce, volScalarField &oInflo
w, volVectorField &ioMomentHub);
    void clearData();

private:

    bool PointIsInDisk(const vector &iPointStartCenterLine, con
st vector &iPointEndCenterLine, const vector &iPoint, scalar &oDis
t2, vector &oLineTangent, vector &oCircumferentialDirection, vecto
r &oVecLineToPoint, scalar &oAziAngle, scalar &oLineTangentLen
gth);
    bool PointIsInHub(const vector &iPointStartCenterLine, con
st vector &iPointEndCenterLine, const vector &iPoint);
    scalar CalcAxialForce(const scalar &iRadialDist, const scalar
&oAziAngle, vector &iU, const vector &oLineTangent, const vector
&oCircumferentialDirection, const vector &oVecLineToPoint, const
scalar &iRho, const scalar &oCellSfmag, scalar &oAlphaEff, scalar
&oAlphaInd, scalar &oInflow, scalar &oTangentForce);
    scalar CalcCircForce(const scalar &iRadialDist, const scalar
&iRho);
    scalar CalcDiskThickness() {return mag(mPointEndCenterLi
ne - mPointStartCenterLine);};
    void tablLookup(const scalar &iMach, const scalar &iAlph
aEff, scalar &iCL, scalar &iCD);

};
```

로터 해석자를 검증하기 위해 2가지 전진비행 케이스를 선정하여 해석을 수행하였다. 첫 번째 케이스는 Elliott의 연구[14]인 전진비와 로터 블레이드 형상에 따른 유입류 변화에 대한 연구이며, 두 번째 케이스는 로터-동체의 상호작용에 대한 연구[15]이다. 모든 해석과정에서의

2.4 로터 해석자 검증

표 2. 주 프로그램 내에서 가상 블레이드 클래스 선언

```
//가상 블레이드 클래스 생성
actuatorDiskExplicitForce actuatorDisk;
//가상 블레이드 클래스에 셀 정보 입력
actuatorDisk.ReadGeometry(mesh);
//가상 블레이드 클래스의 초기화
actuatorDisk.CalcInitTrim();
```

표 3. 운동량 방정식 코드

```
//Calculate volume force from VBM
actuatorDisk.CalcActuatorDiskVolForce(mesh, U, VolumeForce,
AlphaEff, AlphaInd, Inflow, rotor_reset);

// Momentum predictor

tmp<fvVectorMatrix> UEqn
(
  fvm::div(phi, U)
  + turbulence->divDevReff(U)
  - VolumeForce
);

UEqn().relax();

solve(UEqn() == -fvc::grad(p));
```

난류 모델은 Spalart-Allmaras 난류 모델을 적용하였다. 국소공력계수 획득 방법은 Elliott 실험의 검증의 경우에는 공력성능테이블에서 (Table Look-up) 내삽하는 방식을 적용하였고, 로터-동체의 상호 작용 검증의 경우에는 다항식을 사용하여 획득하는 방식을 적용하였다.

2.4.1 로터 유입류 검증

로터면에서의 유입류는 유효받음각에 영향을 미쳐 로터의 성능을 결정하는 중요한 요인이다. Elliott등의 연구[14]에서 사각 블레이드와 테이퍼가 있는 블레이드를 사용하여 전진비에 따른 로터 유입류를 실험적으로 구하였다. He등의 연구[16]와 이준배등의 연구[12]에서는 로터 유입류 수치적 예측 모델을 개발하여 실험치와 검증하였다. 본 연구에서는 개발된 로터 해석자를 통하여 구한 유입류를 실험치 및 타 유입류 예측 모델들과 비교 검증하여 개발된 로터 해석자의 정확도를 확인하고자 하였다.

전진 비행 해석을 위해서는 회전각에 의한 cyclic pitch 각을 예측하여야 하는데 이는 추력 및 로터 허브에서의 모멘트에 의한 트림 해석을 통하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 계산된 추력값이 입력 추력값의 1%이내에, 롤링 및 피칭 모멘트 계수 값이 1e-5 이내로 계산될 경우를 기준으로 수렴성을 판단하였다.

본 연구에서 해석한 케이스는 표 4와 같고 로터 익형은 NACA0012 익형을 사용한 결과이다. 이와 같은 입력값들은 개발된 로터 해석자는 로터 해석을 위한 입력값으로 요구되며, 입력된 파라미터는 내부에서 깃요소 이론을 통한 추력 계산 및 트림 계산등에 사용된다. 전진비 0.15 케이스의 경우에는 ROBIN 동체와 같이 격자를 생성하여 동체에 의한 유입류 변화에 대한 비교 결과를 획득하였다. 그림 4는 전진비 0.15일 때, 동체와 함께 디스크 형상을 모델링한 결과이다.

표 5는 해석을 수행한 케이스에 따른 트림 해석 결과이다. Rectangular 블레이드의 경우 collective pitch각의 값의 차이가 다소 크게 나타나는 경향을 제외하고는 거의 실험값과 유사한 결과를 보여주고 있다. 사각형 블레이드의 경우에는 본 연구에서 개발한 로터 해석자가 강한 블레이드 팁효과를 정확하게 묘사하지 못하여 생긴 원인으로 판단된다. 그림 5는 로터 해석자를 통해 로터 유입류를 해석한 결과이다. 블레이드 타입이나 전진비에 따른 유입류 결과는 대체로 실험치나 다른 유입류 예측 모델의 결과와 유사한 결과를 획득할 수 있었다. 특히 회전각 90도 및

표 4. 로터 유입류 해석 케이스

Blade Type	Rectangular	Rectangular	Taper	Taper
Advanced Ratio (μ)	0.15	0.23	0.15	0.23
Radius (m)	0.8605	0.8605	0.8255	0.8255
회전수 RPM	2100	2100	2200	2200
C_T	0.0063	0.0064	0.0064	0.0065
Twist Angle	-8°	-8°	-13°	-13°
동체 포함	O	X	O	X

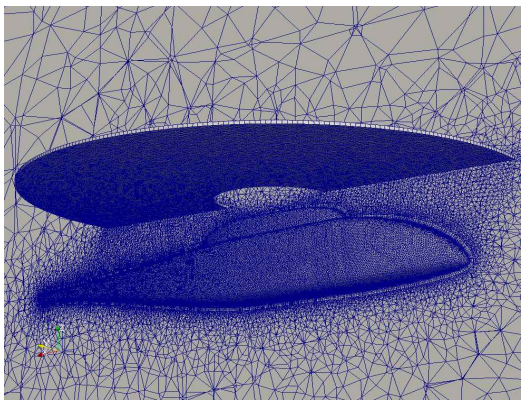

그림 4. 로터 유입류 해석을 위한 격자

표 5. 로터 유입류 트림 해석 결과

		A_0 (°)	A_1 (°)	B_1 (°)	C_T
Taper μ=0.15	실험결과	6.26	-2.08	1.96	0.0064
	해석결과	6.706	-1.989	2.555	0.00636
Taper μ=0.15 (with fuselage)	실험결과	6.26	-2.08	1.96	0.0064
	해석결과	6.888	-2.267	2.692	0.00636
Taper μ=0.23	실험결과	7.2	-0.4	5.1	0.0065
	해석결과	6.683	-1.5	3.666	0.00644
Rect. μ=0.15	실험결과	9.37	-1.11	3.23	0.0063
	해석결과	6.81	-1.519	2.34	0.006273
Rect. μ=0.15 (with fuselage)	실험결과	9.37	-1.11	3.23	0.0063
	해석결과	7.02	-1.815	2.473	0.00636
Rect. μ=0.23	실험결과	8.16	-1.52	4.13	0.0064
	해석결과	6.905	-1.203	3.525	0.00636

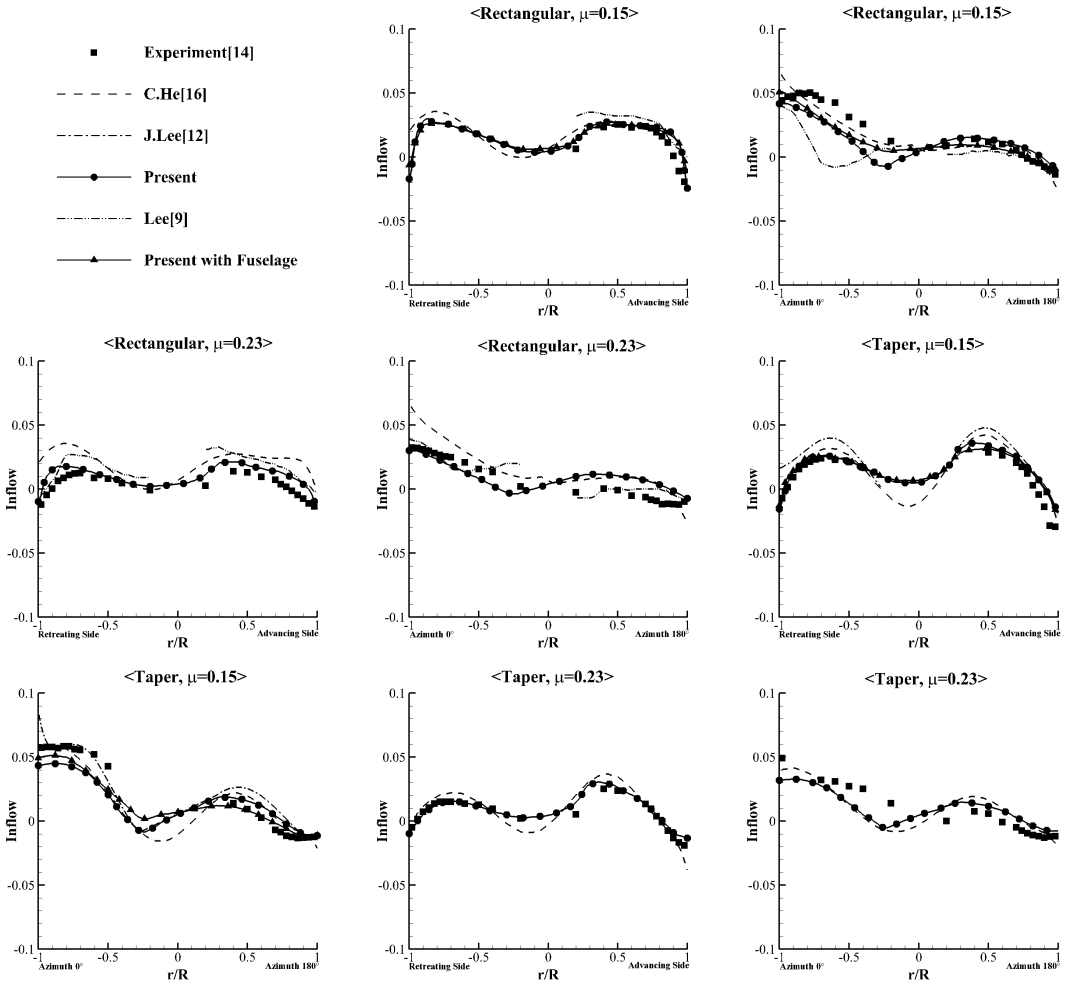

그림 5. 로터 해석자 유입류 해석 결과

270도의 경우에는 블레이드 타입과 전진비 정도에 상관없이 비교적 정확한 유입류 정도를 나타내고 있다. 이는 전진 비행하는 로터의 횡방향의 유입류 해석의 경우에는, 로터 허브의 영향이 종방향보다 비교적 적으며 로터를 원판으로 가정한 가상 블레이드 기법에서 예측되는 종방향 팁의 후류가 실제 현상에서의 로터 블레이드에 의해 생기는 종방향의 후류와 유사하기 때문에 비교적 정확한 결과가 나왔다고 판단된다. 그에 비해 회전각 0도 및 180도의 경우에는 실험결과와 약간의 오차를 보여주고 있으며 특히 회전각 0도의 경우에는 실험치와 비교적 큰 차이를 보여주고 있다. 그러나 이 경우에도 타 유입류 예측 모델과 비교했을 경우에는 어느 정도 일치하는 결과를 보여주고 있다. 동체를 포함한 해석의 경우에도 결과에 큰 차이가 나타나지 않고 있다. 종방향 해석 결과의 차이는 그림 4에서 확인 할 수 있듯이 본 연구에서는 로터 허브의 경우 다른 모델링을 하지 않았으나 실제 실험의 경우에는 로터 허브 구조물이 존재하며 허브 구조물에 의해 허브 구조 이후의 로터 하부의 유동과 로터 중심에서 생기는 유동이 본 연구의 해석 모델링을 통해 정확하게 묘사되지 않아서 생긴 차이로 예상된다.

2.4.2 로터-동체 상호작용 검증

개발된 로터 해석자를 사용한 로터-동체 상호작용 현상 연구에서는 로터에서 발생하는 강한 유동 흐름에 의해 동체의 표면에서의 압력값의 변화를 실험치 및 타 해석코드의 결과와 비교하였다. 이를 위해 GIT 형상에 대한 형상 및 입력 파라미터를 Ruffin등의 연구[15]를 참고하여 확정

하였다.

그림 6은 조사한 GIT 형상을 기반으로 생성한 격자의 모양이다. GIT 모델에서 사용한 블레이드 에어포일은 NACA0015이기 때문에, 이 케이스의 해석을 위해서 깃요소 이론에서의 공력 계수값 획득 방식은 다항식에 의한 공력계수값 획득 방식을 사용하였다. GIT 실험 조건은 전진비 0.1, C_T는 0.009045, Re는 $9.196x10^5$이며 로터 반경은 0.45m, chord 길이는 0.086m, 회전수는 2100 RPM이다. 10도의 고정된 collective pitch 각을 사용하였으며, Teetering 구조의 허브를 사용하여 정확한 cyclic pitch각을 확인할 수 없었다. 이런 허브의 구조로 인해 GIT 형상의 경우 허브의 구조로 인해 깃요소 이론에서 플래핑 효과를 고려해야한다. GIT 형상에서의 플래핑 식은 식 (7)과 같다.

$$\beta = -2.02^\circ \sin\psi - 1.94^\circ \cos\psi \qquad (7)$$

그림 7은 개발된 로터 해석자를 통해 GIT 형상을 해석한 결과와 실험치 및 타 해석 코드와의 결과를 비교한 것이다. 동체의 윗면에서의 압력계수값은 로터의 후류의 영향이 강하게 나타나기 때문에 자유류에 의해 예측되는 동압력차이보다 큰 값을 나타내고 있다. 개발된 로터 해석자를 통해 해석한 결과에서 트림 계산을 수행한 경우와 수행하지 않은 경우의 동체 윗면에서의 압력 분포값의 차이를 확인할 수 있었다. 트림 계산을 수행하지 않은 경우에는 동체 앞쪽에서 높은 압력계수값을 확인할 수 있고 트림 계산을 수행한 경우에는 로터의 뒷면이 위치한 동체 윗면에서 높은 압력계수값이 나타났다. 동체의 다른 표면에서의 압력계수값을 비교했을 때, 대부분 트림

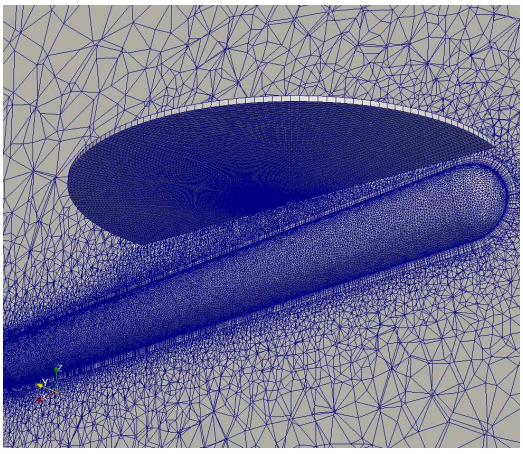

그림 6. GIT 형상 해석을 위한 격자

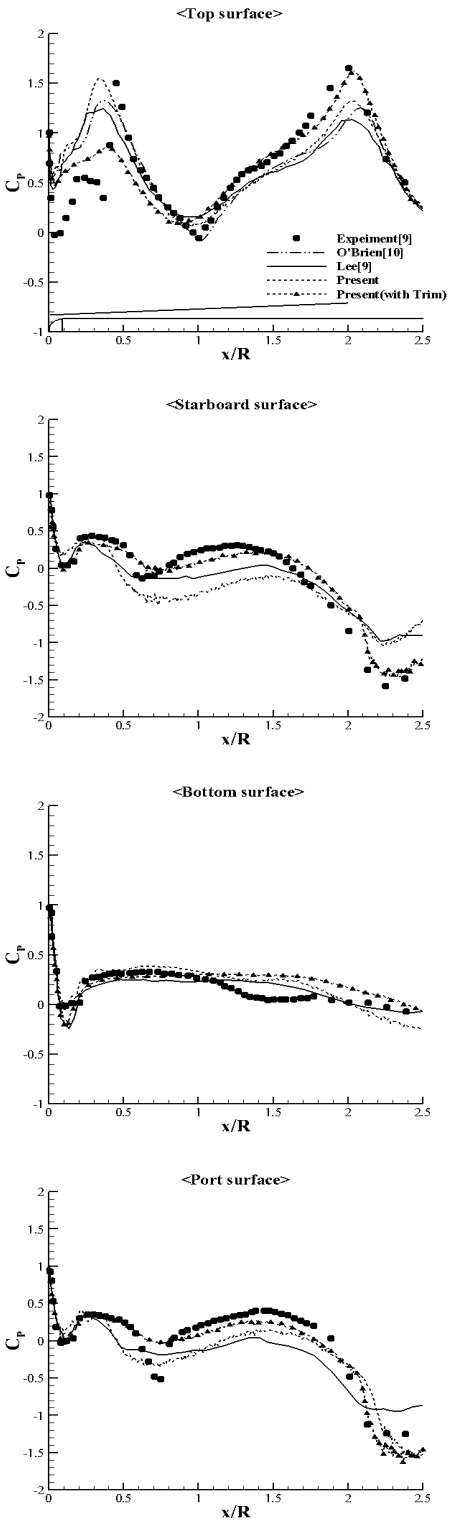

그림 7. 로터 해석자 GIT 형상 해석 결과

해석을 수행한 결과가 실험치와 유사하게 예측이 되고 있음을 알 수 있고 다른 수치해석결과를 포함한 비교에서도 비교적 정확한 동체에서의 압력계수값을 예측하고 있다.

Ⅲ. 결 론

본 연구에서는 오픈 소스 기반의 전산유체역학 해석 프로그램인 OpenFOAM에 깃요소 이론 기반의 actuator disk 기법을 적용한 로터 해석자 개발에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통해 로터 유입류 해석과 로터-동체 상호작용에 대한 검증 해석을 수행하여 개발된 해석자의 정확도를 확인하였다. 로터 유입류 해석을 통해 로터 해석자에 적용한 actuator disk 기법의 타당성을 검증하였으며, 로터-동체 상호작용 문제의 해석을 통해 동체가 존재하는 로터 해석 문제에 대한 수정된 알고리즘 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

로터 해석자를 개발하기 위해 사용한 오픈 소스 코드인 OpenFOAM은 본 연구에서 수행한 로터 해석자 개발 과정에서 확인할 수 있듯이 비교적 사용자의 의한 해석자 수정이 용이한 구조로 개발되어 있었다. 어느 정도의 프로그래밍 지식을 보유한 사용자가 코드의 개발자가 되어 실제 연구 영역에 필요한 해석자로의 코드 수정이 편리하다. 그리고 알고리즘을 수정한 해석자를 통한 검증에서도 in-house 코드로 개발된 타 수치해석 코드와 비교했을 때, 신뢰할만한 결과를 획득할 수 있었다. 그러므로 실험실 수준의 연구에서도 in-house 코드를 개발하는 방법 외에 필요한 수정을 거쳐 오픈 소스 코드를 사용하여 신뢰할만한 수치해석 결과를 획득할 수 있을 것이다. 그러나 비정렬격자의 특성상 고차의 공간차분법 적용이 어려워 몇몇 해석 케이스에서 정확한 결과를 획득하기 어렵고 계산 항들의 해석이 각각 이루어져 비교적 낮은 Courant 수에서 해석을 진행해야 하는 단점이 존재한다. 추후 adaptive refine mesh 기법의 적용 가능성에 대한 연구나 모든 해석 항을 커플링하여 내재적(implicit) 방식으로 해석하는 방법에 대한 연구등을 통해 오픈 소스 코드의 해석 정확도 및 방법 개선에 대한 연구를 진행할 예정이다. 또한 회전 운동이 고려되는 로터 해석자 개발등 다양한 외부 유동 영역의 해석자 개발을 통해 오픈 소스 코드를 적용할 수 있는 연구 영역을 확장할 예정이다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2011-0016608)

참고문헌

1) OpenWiki Web Site, "http://openfoamwiki.net/index.php/Main_Page"

2) Doolan, Con J., "Flow and Noise Simulation of the NASA Tandem Cylinder Experiment using OpenFOAM", *15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA, Miami, Florida, U.S.A., 2009. 5.

3) Xisto, C. M., Jose C. Pascoa, J. C., Paulo J. Oliveira, P. J., and Nicolini, D. A., "Implementation of A 3D Compressible MHD Solver Able to Model Transonic Flows", *V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 2010. 6.

4) Othmer, C., and Villiers, E., "Implementation of a Continuous Adjoint for Topology Optimization of Ducted Flows", 1*8th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, AIAA, Miami, Florida, U.S.A., 2007. 6.

5) Petropoulou, S., "Industrial Optimisation Solutions Based on OpenFOAM Technology", *V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 2010. 6.

6) Islam, AG M., Decker, F., Villiers, E., Jackson, A., Gines, J., Grahs, T., Gitt-Gehrke A., and Comas i Font, J., "Application of Detached‐Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development", *SAE World Congress & Exhibition*, SAE, Detroit, MI, U.S.A. 2009. 4.

7) 박준권, 강관형, "Source 공개 코드 OpenFOAM에 대한 리뷰", *한국전산유체공학회지*, 15권, 3호, 2010. 9., pp.46-53

8) 김태우, 오세종, 이관중, "외부 유동 해석에 대한 오픈 소스 코드, OpenFOAM의 검증", *한국항공우주학회지*, 39권 8호, 2011. 8., pp.702-710

9) Lee, J. K., and Kwon, O. J., "Predicting Aerodynamic Rotor-Fuselage Interactions by

Using Unstructured Meshes", *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol. 44, No. 146, 2002, pp. 208-216

10) Kim, Y. H., and Park, S. O., "Navier-Stokes Simulation of Unsteady Rotor-Airframe Interaction with Momentum Source Method", *Int'l J. of Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 10, No. 2, 2009.11, pp. 125-133

11) O'Brien, David M. Jr, and Smith, Marilyn J., "Analysis of Rotor-Fuselage Interactions Using Various Rotor Models", *AIAA 43nd Aerospace Sciences Meeting AIAA*, Reno, NV January 10-13, 2005

12) 이준배, 이재원, 이관중, 오세종, 김덕관, "회전익기 통합해석프로그램을 위한 공력해석코드 개발", *한국항공우주학회지*, 37권 3호, 2009. 3., pp.215-331

13) Svenning, E., "Implementation of an actuator disk in OpenFOAM", *CFD with OpenSource software 2010*, Chalmers University of Technology, October 30, 2010

14) Elliot, J. W., Althoff, S. L., and Sailey, R. H., "Inflow Measurement Made with a Laser Velocimeter on a Helicopter Model in Forward Flight-μ=0.23", NASA TM 100542, 1988.

15) Ruffin, S. M., and Lee, J. D., "Rotorcraft Flowfield Prediction Accuracy and Efficiency using a Cartesian Grid Framework" *Int' J. of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Vol. 3, Issue 3, 2009

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