

特輯論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(3), 202-211(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.3.202

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용한 KARI-11-180 익형의 천이 유동해석

사정환*, 김기로**, 조금원***, 박수형**

Numerical simulation study on transitional flow over the
KARI-11-180 airfoil using $\gamma-Re_\theta$ transition model

Jeong Hwan Sa*, Kiro Kim**, Kum Won Cho*** and Soo Hyung Park**

Department of Computational Science & Engineering,

Korea Institute of Science and Technology Information(KISTI)*

Aerospace Information Engineering, Konkuk University**

Supercomputing R & D Center, Korea Institute of Science and Technology Information(KISTI)***

ABSTRACT

In this study, numerical simulations were performed using the $\gamma-Re_\theta$ transition model of KFLOW for the transitional flow over the KARI-11-180 airfoil. Numerical results of KFLOW were compared with experimental data and two other numerical results of Xfoil and MSES. Fully turbulence model was predicted high skin friction drag than transition model because fully turbulence model could not solve the transitional flow. Numerical predictions using the $\gamma-Re_\theta$ model of KFLOW show a good agreement with experimental data and other numerical results. Present numerical results were confirmed the state of drag bucket due to dramatic changing of the transition location on the airfoil surface.

초 록

본 연구에서는 KFLOW에서 사용하고 있는 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용하여 KARI-11-180 익형의 공력특성을 수치적으로 예측하고 그 결과를 실험 결과 및 XFOIL과 MSES의 결과와 비교하였다. 완전 난류모델은 천이모델에 비해 마찰항력을 크게 예측하기 때문에 전체적으로 높은 항력을 예측하는 등 천이모델과 완전 난류모델간의 차이를 확인하였다. KFLOW의 $\gamma-Re_\theta$ 모델을 사용한 결과는 실험을 통해 확인된 천이 유동 실험 결과의 특성을 잘 예측하고 있었으며 XFOIL이나 MSES의 결과와도 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 drag-bucket현상이 익형 표면의 천이점의 급격한 변화로 인해 발생함을 확인하였다.

Key Words : Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Transitional Flow(천이 유동), Airfoil Flow(익형 유동), Transition Model(천이 모델), KARI-11-180 Airfoil(KARI-11-180 익형)

† Received : November 2, 2016 Revised : December 15, 2016 Accepted : December 20, 2016

* Corresponding author, E-mail : sa_c@kisti.re.kr

I. 서론

천이(transition) 현상은 층류(laminar) 유동 내부의 내우 작은 교란이 유동 특성과 표면조건 등으로 인해 급격하게 증폭되면서 난류(turbulence) 유동으로 변하는 과정을 의미한다. 유동의 특성을 결정짓는 중요한 인자 중 하나인 레이놀즈수가 10^6 이하인 영역에서 자유류는 대부분 층류로 이루어져 있지만 익형 주위의 유동은 층류에서 천이를 거쳐 난류 유동으로 변하게 된다. 익형의 앞부분에서 층류 흐름은 정체점에서 시작한 강한 순압력구배로 인해 가속되다가 흡입압력(suction pressure)의 최대 점을 지난 후 급격히 감소하기 시작한다. 이때 익형 주위의 유동은 강한 역압력 구배로 인해 불안정해지게 되고 박리가 시작하며 층류에서 난류로의 천이가 일어나게 된다.

유동의 층류-난류 천이 현상을 수치적으로 예측하기 위해서 오래전부터 다양한 방법이 개발되어 사용되어 왔다. 경험적 방법[1,2], e^N 방법[3,4], 근사(approximate) e^N 방법[5,6], PSE(parabolized stability equation) 방법[7,8] 등이 그 예이다. 특히 Drela[5,6]의 근사 e^N 방법은 XFOIL이나 MSES에 사용되어 익형주의 유동의 천이 현상 예측에 좋은 성능을 보여주고 있음을 확인하였다. 하지만 근사 e^N 방법과 같은 전통적인 천이 예측 방법은 층류 유동-난류유동의 반복계산을 요구하기 때문에 층류박리거품이나 재층류화 과정 등의 모사가 어렵고, 유선방향을 따라 경계층의 적분변수(integral parameter)를 요구하기 때문에, 3차원 문제에 적용하기 어렵다는 단점이 있다.

Langtry와 Menter[9-11]는 실험과 난류경계층에 대한 경험적 상관관계를 이용하여 천이 현상을 국부변수(local variable)로 정의하는 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 개발하였다. $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 이론적으로 정립된 intermittency와 난류운동량 레이놀즈수 Re_θ 의 전달 방정식을 기반으로 그들의 생성과 소멸에 관한 경험적 상관관계식을 국부변수를 이용해 기술함으로써 천이모델의 인위적 문제설정이나 기하학적 제약을 해소하였다. 또한, intermittency의 생성과 소멸을 모델링함으로써 천이의 전달현상과 재층류화 현상을 자연스럽게 모델에 내포할 수 있으며, 선형안정성 해석을 이용할 때 발생할 수 있는 다중해(multiple solution)가 존재하지 않는다. $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 국부변수만으로 기술되었기 때문에 좌표계와 무관하며 3차원 경계층문제에 이론적 문제없이

적용할 수 있다는 장점이 있다.

KARI-11-180익형은 풍력 터빈용 블레이드로 설계된 익형으로 높은 양항비를 위해 천이 발생 지점을 최대한 익형의 뒷전에서 발생하도록 설계된 익형이다[12]. 천이 발생 지점을 뒷전에 위치할수록 익형 주위 유동의 층류 영역이 넓어지게 되고, 이로 인해 익형의 공력 성능이 향상되게 된다. KARI- 11-180익형은 유동의 천이 현상을 고려하여 설계되었기 때문에 이 익형의 공력특성을 수치적으로 확인하기 위해서 천이 현상을 고려할 수 있는 방법을 사용하여 유동해석을 수행해야 한다.

본 연구에서는 Langtry와 Menter[9-11]가 제안한 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 적용하여 개발한 in-house 코드인 KFLOW[13-15]를 사용하여 KARI-11-180 익형의 천이 유동 조건($Re=1.0\sim 3.0\times 10^6$)에 대한 유동해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 완전 난류 모델과 천이 모델간의 차이를 확인하고 실험 결과에서 확인 가능한 천이 현상을 얼마나 예측하고 있는지 확인하였다. 유동해석 결과는 한국항공우주연구원 중형아음속 풍동의 실험[16]결과 뿐만 아니라 근사 e^N 천이 모델이 사용된 XFOIL[17]과 MSES[18]의 결과와 비교하여 천이 모델 간의 차이도 비교하였다.

II. 본론

2.1 수치해석 기법

2.1.1 지배 방정식 및 수치 기법

KARI-11-180익형에 대한 실험은 $Re=1.0\sim 3.0\times 10^6$ 에서 이루어졌기 때문에 예조건화된 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 하여 유동해석을 수행하였다[14]. 유동해석에 사용한 국소 예조건화기법이 적용된 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다. Weiss와 Smith의 예조건화 행렬 Γ 는 자코비안(Jacobian) $M=\partial W/\partial Q$ 에 변환 행렬을 곱한 후 예조건화 효과를 줄 수 있는 매개변수 Θ 를 사용한다.

$$\Gamma \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial (F_j - F_{vj})}{\partial x_j} = 0, \quad j = 1, 2.$$

여기서 Q 는 원시 유동변수벡터(primitive variable vector), W 는 보존형의 유동변수벡터(conservative variable vector)이다. F_j 와 F_{vj} 는 x_j 방향으로의 비점성 유속벡터(invscid flux vector)와 점성 유속벡터(viscous flux vector)를 의미한다. 보존 유동 변수 벡터와 비점성, 점성 유속 벡터

는 압축성 Navier-Stokes 방정식과 동일하며 원시 유동변수벡터 Q 와 보존형 유동변수벡터 W , 비점성/점성 유속 벡터 F_j 와 F_{vj} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= [p, u_i, T]^T \\ W &= [p, u_i, T]^T \\ F_j &= [\rho u_j, \rho u_j u_i + p \delta_{ij}, \rho u_j H]^T \\ F_{vj} &= [0, (\tau_{ij} + \tau_{ij}^*), u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^*) - q_j]^T \end{aligned}$$

Γ 는 예조건화된 속도 스케일을 도입함으로써 음과 속도를 스케일링하여 압축성 효과와 저 마하수 및 저 레이놀즈수에서 나타나는 경직성문제를 감소시키는데 사용된다. 지배방정식에서 사용된 ρ, u_j, p, T, E, H 는 각각 밀도, x_j 방향으로 속도 성분, 압력, 온도, 총에너지 및 총 엔탈피를 의미하며, τ_{ij} 과 τ_{ij}^* 는 각각 층류와 난류에 의한 점성 응력텐서(stress tensor)를 의미한다. q_j 는 j 방향의 열유속을 의미하며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} p &= \rho(\gamma - 1) \left[E - \frac{u_i u_i}{2} - k \right], \quad H = E + \frac{p}{\rho} \\ \tau_{ij} &= 2\mu_l \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) \\ \tau_{ij}^* &= 2\mu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \\ q_j &= -\frac{\gamma R}{\gamma - 1} \left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{p}{\rho} \right) \end{aligned}$$

여기서 γ, R 은 비열비와 기체상수이고, Pr_l, Pr_t 는 층류와 난류 Prandtl수이다. 층류 점성계수 μ_l 은 이상기체(perfect gas) 유동의 경우 온도만의 함수로 표현되는 Sutherland 법칙을 사용하여 결정할 수 있다.

지배방정식을 공간이산화하기 위해 격자중심 유한체적법을 사용하였다. Roe의 FDS(Flux Difference Splitting) 기법과 3차 정확도 MUSCL 기법을 사용하여 격자 경계면에서의 비 점성 유속(inviscid flux)을 계산하였으며 점성유속의 경우에는 중심차분을 사용하였다. 정상해를 구하기 위하여 대각화된 ADI 기법(Diagonalized ADI)을 사용하였다. 완전난류와 천이유동 해석에 사용되는 기본 난류 모델로 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다. 난류방정식과 천이방정식은 유동방정식과 분리하여 풀되, 동일한 공간차분법과 시간적분법을 이용하여 정상해를 구하였다.

2.1.2 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델

KARI-11-180의형에 대한 천이 유동해석을 위해

실험과 난류경계층에 대한 경험적 상관관계를 이용하여 모든 천이 현상을 국부변수(local variable)로 기술할 수 있는 방법으로서 Langtry and Menter[9-11]에 의해 정식화된 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용하였다. $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 $k-\omega$ SST 난류 모델에 이론적으로 정립된 intermittency γ 와 난류운동량 레이놀즈수 Re_θ 의 전달 방정식이 추가된 형식을 하고 있다. $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 γ 와 Re_θ 의 생성과 소멸에 관한 경험적 상관관계식을 국부변수를 이용해 기술함으로써 천이모델의 인위적 문제설정이나 기하학적 제약을 해소하고, intermittency γ 의 생성과 소멸을 모델링함으로써 천이의 전달현상과 재층류(relaminarization) 현상을 자연스럽게 모델에 내포할 수 있으며, 선형안정성 해석을 이용할 때 발생할 수 있는 다중해(multiple solution)가 존재하지 않는 특징이 있다.

국부변수로 표현 가능한 vorticity Ω 로 정의되는 vorticity Reynolds number Re_v 와 이를 사용하는 momentum thickness Reynolds number Re_θ 는 각각 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} Re_v &= \frac{\rho y^2}{\mu} \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\rho y^2}{\mu} |\Omega| \\ Re_\theta &= \frac{\max(Re_v)}{2.193} \end{aligned}$$

본 연구를 위해 사용한 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= \tilde{P}_k - \tilde{D}_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= P_\omega - D_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \gamma)}{\partial x_j} &= P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \overline{Re}_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \overline{Re}_{\theta t})}{\partial x_j} &= P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{Re}_{\theta t}}{\partial x_j} \right] \end{aligned}$$

여기서 P_k 와 P_ω 는 k 와 ω 의 생성율(production rate)을, D_k 와 D_ω 는 소멸율(destruction rate)을 나타낸다. Intermittency γ 의 전달 방정식에서 P_γ 는 경계층 내에서 intermittency 방정식을 조절하는 역할을 하고, E_γ 는 소멸(destruction)과 재층류(relaminarization)와 연관이 있는 항이다. $P_{\theta t}$ 는 경계층 외부 영역에서 전달된 스칼라 $\overline{Re}_{\theta t}$ 와 해당 지점의 값인 $Re_{\theta t}$ 를 위한 실험적 correlation이다. $k-\omega$ SST 난류 모델과의 결합을

위해 난류 운동에너지 k 의 생성항과 소멸항 P_k 와 D_k 는 다음과 같이 수정된 형식을 따르며 천이 모델 및 변수에 관한 자세한 설명은 참고문헌 [9-11]에 자세히 기술되어 있다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_k &= \gamma_{eff} P_k \\ \bar{D}_k &= \min(\max(\gamma_{eff}, 0.1), 1.0) D_k \end{aligned}$$

2.2 격자 형상 및 유동해석 조건

KARI-11-180익형에 대한 유동해석은 $Re=1.0\sim 3.0\times 10^6$, 받음각(angle of attack, α) $-10\sim 15$ 도 영역에서 수행하였다. 해석을 위해 사용한 익형 격자는 C타입으로 원방까지의 거리는 코드길이의 100배인 100c를 사용하였다. 격자 크기에 따른 유동해석 결과 변화를 확인하기 위해 조밀도를 5 레벨로 구분하여 격자를 생성하였다. 격자 형상과 각각의 격자에 대한 정보는 Fig. 1과 Table 1과 같다. 천이 해석을 위해 익형 표면격자의 첫 번째 격자 간격인 y^+ (non-dimensional distance)가 충분히 작아야 한다[11]. 본 해석에서 사용한 y^+ 의 크기는 16/9에서 9/16까지 격자의 조밀도에 따라 다르게 구성하여 격자 수렴 테스트를 수행하였다. 익형 표면에서의 격자점 또한 격자의 조밀도에 따라 다르게 하였는데 L1의 경우 129개의 격자점을 갖으며, L5의 경우 193개의 격자점을 갖는다. XFOIL과 MSES를 사용하여 천이 유동해석을 하는 과정에서는 각각 100, 141개의 패널과 격자점을 갖도록 하였다.

아음속 유동영역에서는 물체의 경계에서 파생된 음향파의 전파 특성이 강하기 때문에, 원방

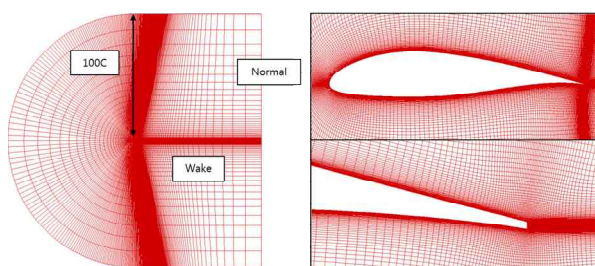


Fig. 1. KARI-11-180 airfoil grid

Table 1. Grid information of KARI-11-180 airfoil grids

Grid Level		y^+_{1st}	Grid cells
L1	Tiny	16/9	46,080
L2	Coarse	4/3	61,824
L3	Medium	1	79,872
L4	Fine	3/4	100,224
L5	Extra Fine	9/16	122,880

경계에서 자유류 속도 성분 에 대한 순환 보정(circulation correction)이 필요하다. 본 연구에서는 1차 순환 보정[19]을 적용한 원방경계조건을 사용하였으며 익형 벽면에서는 no-slip조건을 사용하였다. $\gamma-Re_\theta$ 모델을 위한 γ 와 $\bar{Re}_{\theta t}$ 경계조건으로 벽에서는 변수의 수직구배가 0이 되도록 설정하였으며, 원방에서는 1.0과 자유류 모멘텀 두께 레이놀즈수로 지정된 값을 각각 사용하였다 [11].

2.3 유동해석 결과

2.3.1 격자 조밀도에 따른 유동해석 결과

격자 수렴성을 확인하기 위해 $Re=3.0\times 10^6$, $\alpha =5$ 도 에서 유동해석을 수행하여 살펴보았다. Fig. 2는 표면 압력 분포 결과이고 Fig. 3은 마찰 항력 계수를 비교한 결과이다. 표면 압력 분포 비교의 경우 자세한 확인을 위해 차이가 발

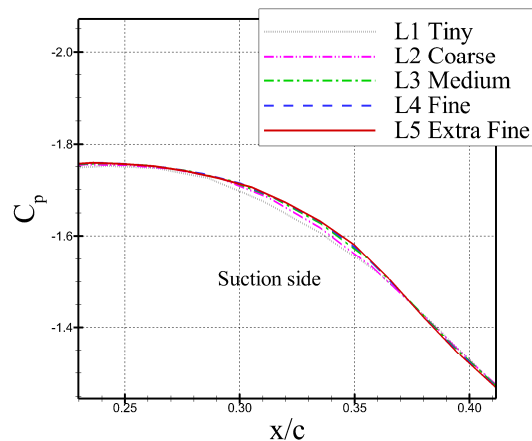


Fig. 2. Grid convergence test result (C_p)

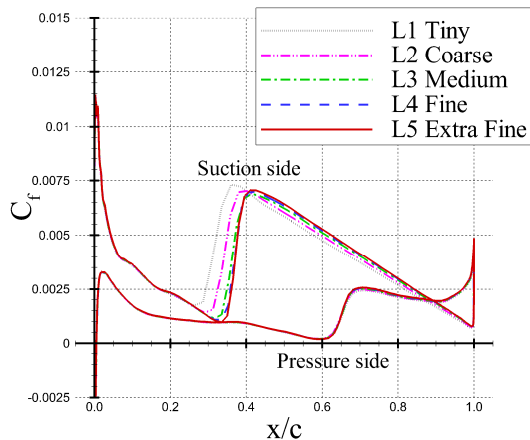


Fig. 3. Grid convergence test result (C_f)

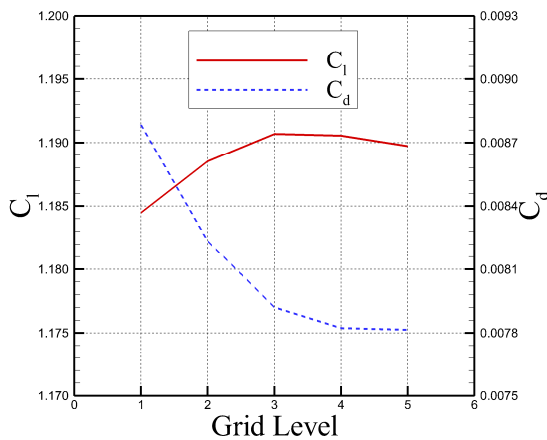


Fig. 4. Grid convergence test result (C_l, C_d)

생하는 부분을 확대하여 도시하였다. 압력의 차이는 크지는 않았지만 L1와 L2격자는 다른 격자에 비해 $x/c=0.3\sim 0.35$ 구간에서 압력을 작게 예측하였다. 마찰 항력 계수의 경우 격자간의 차이가 더 심했는데 L1과 L5의 경우 마찰 항력이 상승하는 위치의 오차가 익형 코드 길이의 5% 이상인 것으로 확인되었다. 압력 계수와 마찰 항력 예측의 차이는 결과적으로 공력 계수 예측에 영향을 미쳤으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. 양력의 경우 L3이후 격자 간의 차이가 많이 감소하는 경향을 보여주었고, 항력의 경우 L4이후 차이가 감소하였다. 익형 표면의 압력과 마찰 항력 예측의 차이가 공력계수에 직접적으로 영향을 미치기 때문이다. 이 결과를 바탕으로 이후 결과들은 모두 L4 격자를 사용하여 유동해석을 수행하였다. L4에서 표면격자의 y^+ 는 3/4로 1이하이고 격자 점의 수는 100,224개 이다.

2.3.2 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용한 유동해석 결과

$\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용한 KARI-11-180익형의 유동해석 정확성 확인을 위해 실험 결과와 비교 하였다. 완전 난류 모델과의 차이를 확인하기 위해 $k-\omega$ SST 난류 모델을 사용한 유동해석 결과를 사용하였으며, 근사 e^N 천이 해석 기법을 사용한 XFOIL과 MSES의 결과도 비교에 포함 시켰다.

Figure 5~8은 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용하는 KFLOW의 유동해석 결과를 타 유동해석 프로그램(XFOIL, MSES) 및 실험 결과와 비교한 결과이다. 양력 결과(Fig. 5) 중 실험 결과를 살펴보면 난류 유동으로 가정한 실험 결과의 경우 천이 유동 실험 결과에 비해 받음각이 증가 할수록 낮음을 확인할 수 있다. 그리고 난류 유동의 경우 천이 유동에 비해 실속(stall)이 낮은 받음각에서부터 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 완전 난류 모델을 사용한 수치해석 결과와 천이 모델을 사용한 수치해석 결과의 비교에서도 나타나고 있음을 확인하였다. 하지만 유동해석의 결과는 실험 결과에 비해 양력을 높게 예측하고 있었다. 결과적으로 완전 난류 모델을 사용한 결과가 천이 유동 실험 결과와 더 유사함을 확인할 수 있었는데 그렇다고 하더라도 천이 유동에 관한 해석에서 완전 난류 모델을 사용하는 것이 더 바람직하다고 결론을 내릴 수 없다. 이에 대한 설명은 다른 결과들의 분석을 통해 알 수 있다. 천이 모델을 사용한 KFLOW의 결과가 실험 결과에 비해 더 높은 양력을 예측하고 있지만, 익형 유동해석에서 좋은 결과를 예측하는 XFOIL과 MSES의 결과와 비교를 해보면 거의 일치하는 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 실속 부근을 제외하고 전 영역에서 KFLOW의 결과는 XFOIL과 MSES의 결과와 잘 일치하고 있었다.

Figure 6은 항력 예측 결과를 비교한 결과를 도시한 그림이다. 천이 모델과 완전 난류 모델의 차이는 항력 예측 결과에서 확실히 확인할 수 있다. 완전 난류 모델의 경우 익형 주위의 경계층에 층류 및 천이 영역이 존재하지 않기 때문에 상대적으로 높은 마찰항력을 갖게 되며 이러한 원인으로 인해 익형의 항력을 높게 예측하게 된다. $Re=3.0 \times 10^6$ 조건에서 KFLOW의 난류 모델을 사용한 결과와 천이 모델을 사용한 결과를 살펴보면 확인할 수 있다. 이러한 차이는 실험에서도 확인이 가능하다. 0도 부근에서 완전 난류 모델을 사용한 경우 천이 모델을 사용한 결과에 비해

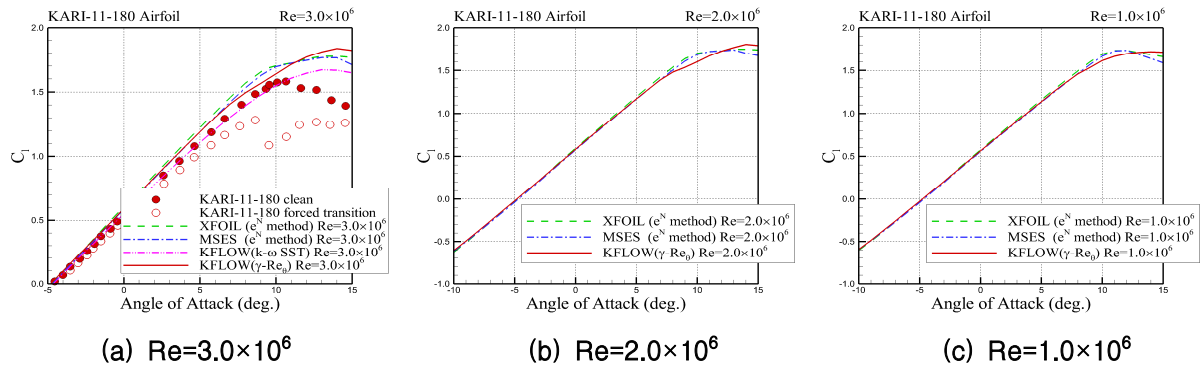


Fig. 5. Comparison of the lift coefficient results

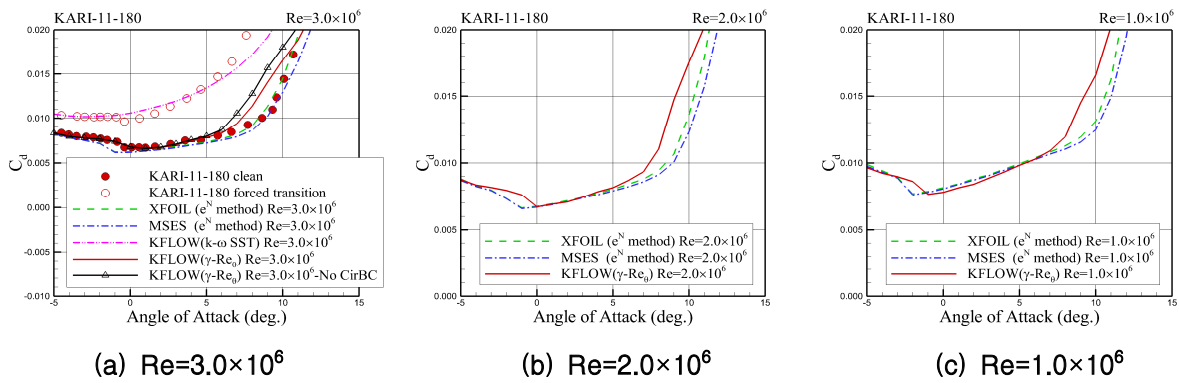


Fig. 6. Comparison of the drag coefficient results

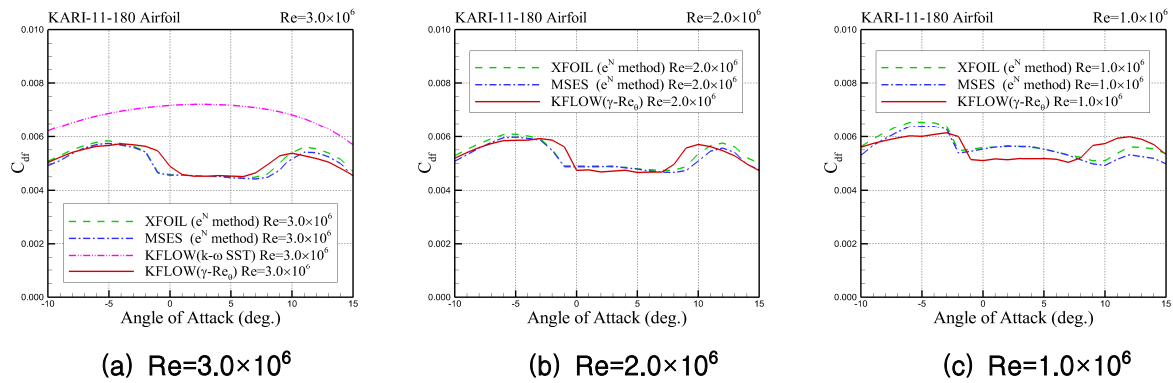


Fig. 7. Comparison of the skin friction drag coefficient results

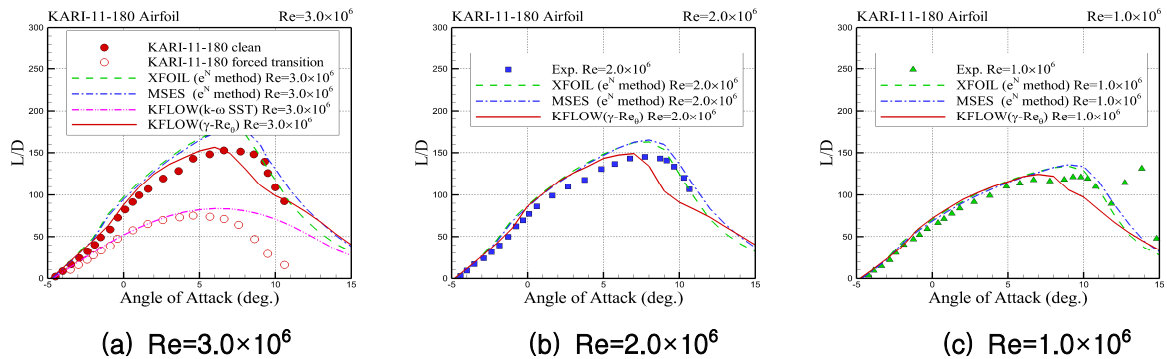


Fig. 8. Comparison of the lift-to-drag ratio results

40% 이상 높은 항력을 예측하고 있다. 천이 유동 조건의 익형을 완전 난류 모델을 사용해서는 정확한 결과를 예측할 수 없음을 확인할 수 있다. KFLOW의 결과를 XFoil, MSES의 결과와 비교해보면 받음각 7도 이상의 영역에서 차이가 많이 나고 있음을 확인할 수 있다. KFLOW의 경우 실험이나 XFoil, MSES에 비해 항력이 빠르게 증가하고 있다. 현재 KFLOW의 유동해석에서 고 받음각 영역의 유동해석을 위해 1차 순환 보정 경계조건을 사용하였는데, KARI-11-180익형의 유동해석을 위한 보정이 필요해 보인다. 원방 경계에서 순환 보정 방법을 사용하지 않은 경우 고 받음각 영역에서 순환 보정 방법을 사용한 결과에 비해 항력을 다소 크게 예측하였다. 받음각 8도에서는 약 20%정도 항력을 높게 예측하였다. 반면, XFoil과 MSES의 경우 순환 보정을 사용한 결과 KFLOW의 결과보다 약 30% 낮은 항력을 예측하였다. XFoil, MSES는 2차 순환 보정 방법을 사용하였다. 0도 부근에서는 항력이 갑자기 낮아지는 구간이 발생하는데 이러한 현상을 항력 버킷(drag bucket)이라고 한다. 천이 모델을 사용한 세 종류의 유동해석 프로그램 모두 이러한 항력 버킷 현상을 잘 예측하고 있었다. 다만, XFoil과 MSES의 경우 실험이나 KFLOW에 비해 낮은 받음각에서부터 항력 버킷 현상을 예측하였다. 완전 난류 모델의 경우 항력 버킷을 예측할 수가 없었다. 난류로 가정한 실험의 경우 천이 유동 실험과 유사하게 작은 항력 버킷이 존재하는 것을 확인 하였는데, 난류 실험의 경우 유동 조건은 동일하게 설정하고 익형 코드길이의 5%지점에 탭(tap)을 설치하여 5%이후 구간부터 난류가 발생하도록 하였기 때문에 일정 부분 층류 영역이 존재할 가능성이 있기 때문에 이러한 현상이 일어난 것으로 추측된다. 항력 버킷 현상은 마찰 항력 계수의 결과(Fig. 7)로 확인하면 더 확실하

게 확인할 수 있다. 실험에서 사용한 모든 레이놀즈수 영역에서 이러한 현상을 확인할 수 있다. XFoil과 MSES의 경우 KFLOW에 비해 항력 버킷 영역을 크게 예측하고 있다.

양항비 예측 결과의 비교는 Fig. 8에 도시하였다. 난류로 가정한 실험 및 수치해석 결과는 천이 유동 조건에 비해 낮은 양항비를 예측하고 있었는데 이는 난류로 가정한 경우 항력을 높게 예측하기 때문이다. KFLOW, XFoil, MSES의 결과는 저 받음각에서 유사하다가 5도 이후 차이가 있음을 확인할 수 있다. KFLOW가 다른 두 결과에 비해 이른 받음각에서부터 항력이 빠르게 상승하는 것으로 예측했기 때문이다. 대체적으로 XFoil과 MSES는 실험에 비해 높은 양항비를 예측하였다. KFLOW의 경우 이른 받음각에서 양항비가 감소하기는 하지만 그 이전의 구간에서는 실험 결과와 더 유사함을 확인하였다.

Figure 9는 각각의 레이놀즈수 영역에서 받음각 변화에 따른 천이점의 위치를 보여주는 결과이다. 천이점 비교는 KFLOW, XFoil, MSES의 결과만 사용하였다. 받음각이 증가할수록 익형 윗면의 천이점은 익형의 뒷전에서 앞전쪽으로 이동하고 아랫면의 경우 앞전에서 뒷전으로 이동하는 경향을 보여준다. 받음각 변화에 따른 천이점의 위치 변화는 익형의 형상에 따라 다르다. KARI-11-180익형의 경우 $Re=3.0 \times 10^6$ 인 조건에서 받음각 -2도 이후 익형 아랫면의 천이점이 뒷전으로 빠르게 이동하고 있다. 윗면의 경우 받음각 6도 이후 익형 앞전으로 천이점이 빠르게 이동하였다(Fig. 9(a)). 이렇게 천이점이 빠르게 이동하는 구간에서는 층류 영역의 변화가 상대적으로 크게 일어나게 되고 항력이 갑자기 감소하거나 증가하게 된다. 이런 천이점의 급격한 변화는 항력 버킷 현상을 발생시키는 원인이 된다. KFLOW의 천이점 예측 결과는 XFoil, MSES의 결과와 비슷

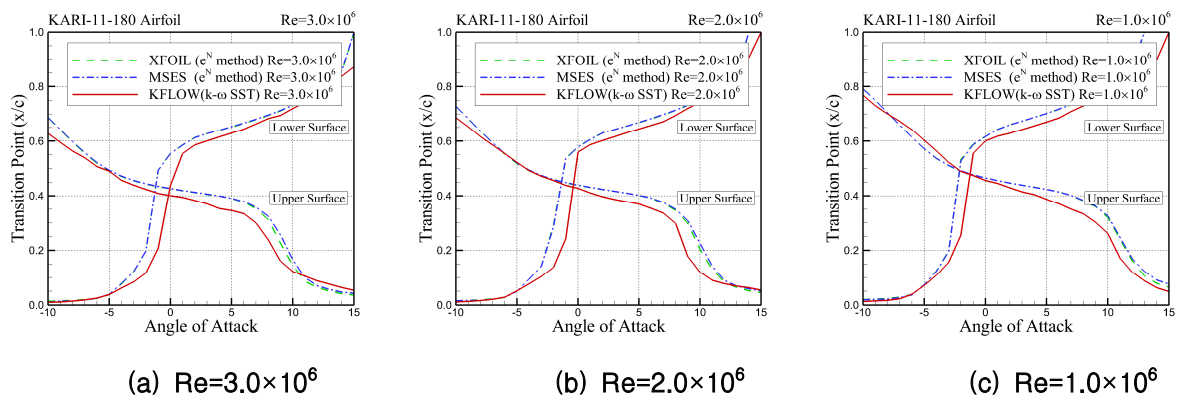


Fig. 9. Transition location on the KARI-11-180 airfoil

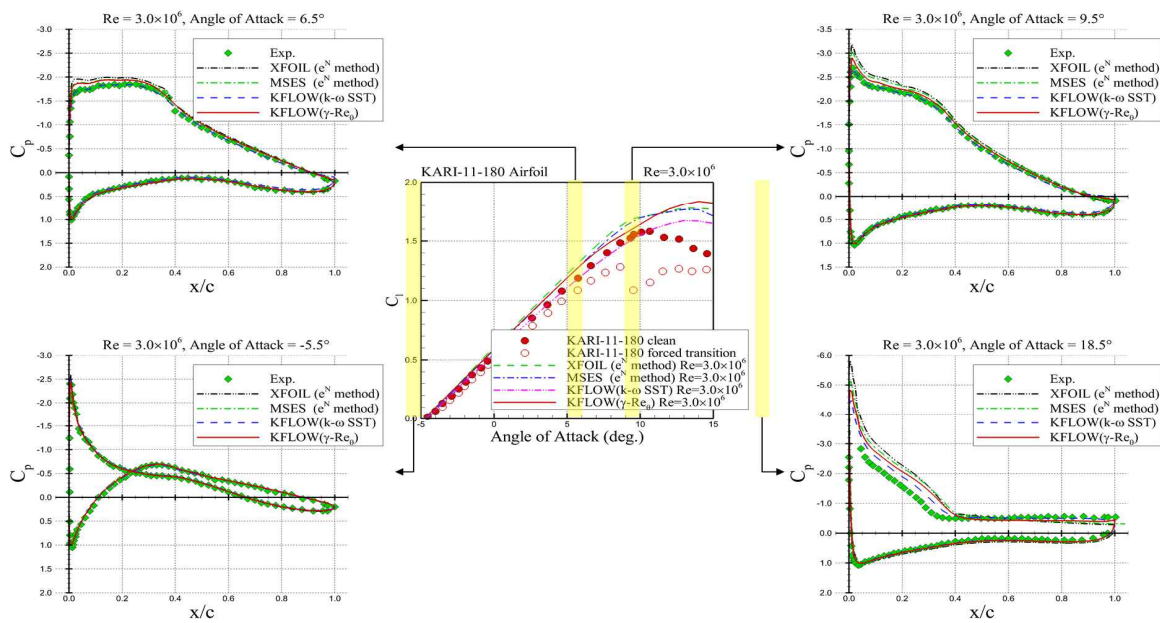


Fig. 10. Pressure coefficient distribution around KARI-11-180 airfoil at $Re=3.0 \times 10^6$

한 경향을 보여주고 있음을 확인하였다. 하지만 XFOIL과 MSES에 비해 아랫면의 천이점은 다소 높은 받음각에서, 윗면의 천이점은 다소 낮은 받음각에서 급격하게 변하고 있다. 항력 버킷의 구간이 다른 이유가 이러한 천이점 변화의 차이에 있음을 확인할 수 있다. 레이놀즈수가 낮아질수록 층류의 영역이 갑자기 증가하는 구간의 영역이 증가하여 항력 버킷의 구간이 넓어짐을 확인하였다.

받음각 변화에 따른 익형 표면 압력 분포는 Fig. 10을 통해 확인하였다. 받음각 -5.5° 에서 모든 수치 결과와 실험 결과간의 오차는 거의 없었다. 하지만 받음각이 증가할수록 수치 해석의 결과가 실험에 비해 다소 크게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이러한 압력 예측의 차이가 양력에 영향을 주어 실험에 비해 큰 양력을 예측하였다. 반면 완전 난류 모델을 사용한 KFLOW의 경우 다른 수치 결과에 비해 다소 작게 예측하여 실험 결과 더 유사한 것으로 나왔다. 하지만 양력의 결과 만으로 천이 유동에 대한 완전 난류 모델을 사용한 유동해석이 정당하다고 말할 순 없다. 천이 영역에 층류박리거품이 존재하는 경우 천이 모델을 사용한 해석과 완전 난류 모델을 사용한 결과의 압력 분포에서도 차이를 확인할 수 있지만 KARI-11-180익형의 경우 현재 큰 층류박리거품이 존재하지 않기 때문에 압력 분포에서 큰 차이를 확인할 수 없었다.

III. 결 론

KFLOW의 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용하여 KARI-11-180익형의 천이 유동해석을 수행하였다. KFLOW의 천이 해석 정확도 확인을 위해 항공 우주연구원에서 수행한 실험결과 및 타 유동해석 프로그램(XFoil, MSES)의 결과와 비교하였다. 현재 사용한 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 완전 난류 모델이 예측하지 못했던 천이 유동의 특성들을 잘 예측하고 있었다. 완전 난류 모델은 층류 및 유동의 천이 영역을 예측하지 못하기 때문에 천이 모델을 사용한 결과에 비해 높은 항력을 예측한다. $Re=3.0 \times 10^6$, 받음각 5° 에서 완전 난류 모델의 결과는 천이 모델의 결과에 비해 약 70% 높은 항력을 예측하였고, 이로 인해 약 45% 낮은 양항비를 예측하였다. 천이 영역이 존재하는 환경에서 사용하는 익형의 유동해석에서 천이 모델의 사용이 필수적이라 할 수 있다. 현재 천이 모델을 사용한 유동해석 결과는 비교에 사용한 실험 결과 및 수치해석 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. KARI-11-180익형은 현재 해석 구간인 $Re=1.0 \sim 3.0 \times 10^6$ 조건의 저 받음각 영역에서 항력이 갑자기 감소하는 항력 버킷 현상은 존재하는데 이러한 현상도 잘 예측하고 있었다. 받음각 변화에 따른 천이점 변화도 XFoil과 MSES의 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

하지만 모든 수치해석 결과(KFLOW, XFoil, MSES)는 양력을 실험에 비해 다소 크게 예측하

고 있었다. 이러한 양력의 차이는 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용한 LRN1015의형의 유동해석 결과에서도 발견되었다[20]. LRN1015의형과 KARI-11-180의형은 형상 차원에서 유사점이 존재한다. KARI-11-180의형 형상(Fig. 1)을 살펴보면 앞전이 두껍고 윗면과 아랫면의 비대칭성이 큰 것을 알 수 있다. 반면 이러한 특징이 없는 NACA0012나 NACA747A315의형의 경우 실험과 수치해석의 양력의 차이가 거의 없었다[20]. 이러한 현상은 XFoil과 MSES에서도 발견되었다. $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델만의 문제는 아닌 것으로 보여 진다.

KFLOW의 항력 예측 결과를 살펴보면 항력버킷 현상도 잘 예측하고 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 다만 받음각이 증가하면서 다른 결과들에 비해 항력이 낮은 받음각에서부터 증가하고 있었다. 반면, XFoil과 MSES는 실험과 비슷한 항력 증가를 예측하였다. 현재 KFLOW는 1차 순환 보정이 적용된 원방 경계를 사용하는데 KARI-11-180의형의 유동해석을 위해서 수정이 필요해 보인다.

익형은 받음각이 일정영역 이상이 되면 실속에 빠지게 된다. 실속 영역에서 익형 주위의 유동은 비정상 특성이 증가하게 되고, 익형 뒷전에서부터 생기는 와류가 떨어져 나가면서 정상 상태의 해를 구하기 힘들게 된다. KFLOW, XFoil, MSES 모두 이러한 현상을 예측할 수 없어서 실험과 많은 오차를 보이고 있다. 실속 영역에서의 수치 정확도를 위해 비정상 유동해석이 필요해 보인다. 특히 비정상 박리 유동해석의 정확도를 보장할 수 있는 기법의 적용이 필요해 보인다.

현재 사용한 KFLOW의 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 천이 현상을 잘 예측하고 있었다. 하지만 더 높은 정확도를 확보하기 위해 추가 연구의 필요성을 확인하였다. 추후 두꺼운 익형을 위한 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델과 원방 순환 보정 기법의 개선과 실속 이후 영역의 유동해석을 위해 비정상 박리 유동해석이 가능한 기법을 적용하여 KARI-11-180의형과 같은 층류 익형(laminar airfoil)의 해석 정확도를 향상시킬 예정이다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업(과제 No.2011-0020576) 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) Granville, P. S., "The Calculation of the Viscous Drag of Bodies of Revolution," AGARD Rep. 849, David W. Taylor Model Basin, 1953.
- 2) Arnal, D., "Boundary Layer Transition: Prediction, Application to Drag Reduction," AGARD-R-786, 1992.
- 3) Smith, A. M. O., and Gamberoni, N., "Transition, Pressure Gradient and Stability Theory," Douglas Aircraft Co., Report. ES 26 388, 1956.
- 4) van Ingen, J., "A Suggested Semi-Empirical Method for the Calculation of the Boundary-Layer Region," Tech. rep., Delft, Holland, Rept. No. VTH71, VTH74, 1956.
- 5) Drela, M., and Giles, M. B., "Viscous-Inviscid Analysis of Transonic and Low Reynolds Number Airfoils," AIAA, Vol. 25, No. 10, 1986, pp. 1347-1355.
- 6) Drela, M., "XFOIL: An Analysis and Design for Low Reynolds Number Airfoils," Low Reynolds Number Aerodynamics, Springer-Verlag, 1989.
- 7) HerBERT, T., "Boundary-Layer Transition-Analysis and Prediction Revisited," AIAA 91-0734, 1991.
- 8) Bertolotti, F. P., "Linear and Nonlinear Stability of Boundary Layer with Streamwise Varying Properties," Ph.D Thesis, Ohio State University, 1991.
- 9) Menter, F. R., Langtry, R. B., and Volker, S., "Transition Modeling for General Purpose CFD Codes," Flow Turbulence Combust, Vol. 77, 2006, pp. 277-303.
- 10) Langtry, R. B., "A Correlation-Based Transition Model using Local Variables for Unstructured Parallelized CFD codes," Ph.D. Thesis, Univ. of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2006.
- 11) Langtry, R. B., and Menter, F. R., "Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes," AIAA Journal, Vol. 47, No. 12, 2009, pp. 2894-2096.
- 12) Lee, Y. K., Kim, C. W., "Prediction of aerodynamic characteristics for wind turbine airfoil with CFD," Journal of wind energy, Vol. 2, No. 2, 2011, pp. 43-47

13) Park, S. H., and Kwon, J. H., "Implementation of $k-\omega$ Turbulence Models in an Implicit Multigrid Method," AIAA Journal, Vol. 42, No. 7, 2004, pp. 1348-1357.

14) Park, S. H., Lee, J. E., and Kwon, J. H., "Preconditioned HLLE Method for Flows at All Mach Numbers," AIAA Journal, Vol. 44, No. 11, 2006, pp.2645-2653.

15) Sa, J. H., Park, S. H., Kim, C. J., and Park, J. K., "Low-Reynolds number flow computation for eppler 387 wing using hybrid DES/transition model," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 29, No. 5, 2015, pp. 1837-1847.

16) Kim, C. W., Cho, T. H., "Wind tunnel test of the 2D airfoil turbine for the MW size wind turbine," Journal of wind energy, Vol. 2, No. 2, 2011, pp. 38-42

17) Drela, M., "XFOIL 6.94 User Guide," MIT Department of Aeronautics and Astronautics, 2001.

18) Drela, M., "A User's Guide to MSES 3.05," MIT Department of Aeronautics and Astronautics, 2007.

19) Pulliam, T. H., "Solution Methods In Computational Fluid Dynamics," Technical report, NASA Ames Research Center, 1992.

20) Sa, J. H., Jeon, S. E., Park, S. H., "A Comparative study on prediction capability of airfoil flows using a transition transport model," Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 19, No. 2, 2014, pp.8-16.