

유동 천이현상과 비정상 박리 유동현상 해석을 위한 난류모델 개발에 관한 연구

사정환* · 박수형** · 조금원***

I. 서론

전산유체역학에서 난류 해석 기법은 유동장 내의 콜모고로프(Kolmogorov) 스케일까지 별도의 모델링 없이 직접 모사가 가능한 Direct Numerical Simulation(DNS), 일정 크기 이상의 와류까지 계산이 가능한 Large Eddy Simulation(LES), 모든 스케일을 모델을 통해 모사하는 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 기법 등으로 나눌 수 있다. DNS 기법은 가장 정확한 해를 제공하지만 레이놀즈수에 따라 요구되는 격자점의 수가 급격하게 증가하기 때문에 낮은 레이놀즈수 영역의 유동장에서만 제한적으로 사용이 가능하다. LES 기법의 경우 DNS에 비해 요구되는 격자의 수가 적기는 하지만, 벽면 근처에서 많은 수의 격자점이 요구되기 때문에 DNS와 마찬가지로 높은 레이놀즈수 영역의 공학적 문제에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. RANS 기법은 DNS 기법과 LES 기법에 비해 요구되는 격자점의 수가 작고 두 기법에 비해 빠른 시간 내에 해를 구할 수 있다는 장점으로 인해 다양한 난류해석 모델의 개발을 바탕으로 레이놀즈수가 큰 공학적인 문제에도 활발히 적용되어 왔다. RANS 기법에 사용되는 난류 모델은 해석하고자하는 형상이나 유동조건에 따라 다양한 방법으로 개발되어오긴 했지만, 시간 평균된(time-averaged) 지배방정식에 기초하고 있기 때문에 큰 박리(separation)를 포함하는 비정상(unsteady) 유동의 해석에는 DNS 기법이나 LES 기법에 비해 부정확한 해를 제공하는 단점이 있다.

DNS 기법이나 LES 기법은 유동해석에 필요한 격자점의 수와 많은 계산 시간이 필요하기 때문에 높은 레이놀즈수 영역의 공학적 문제에 사용하기에는 현재의 전산기기의 수준에서도 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 대부분의 높은 레이놀즈수 영역의 공학적 문제의 유동해석은 RANS 기법을 사용하고 있다. Spalart(2000)는 연구를 통해 항공기나 자동차와 같은 공학적 문제에 LES 기법이나 DNS 기법의 적용은 2070년 이후에 가능하리라 예상하고 있다. 수치 기법이나 전산기기의 발달 수준에 따라 사용 시기가 달라질 수도 있지만, 현재 DNS 기법이나 LES 기법을 사용하여 높은 레이놀즈수 영역의 공학적 문제의 유동해석을 수행하고자하는 것이 무리가 있다는 것은 분명하다. NASA Langley Research Center에서는 CFD Vision 2030 Study(Slotnick et al, 2013)를 통해 향후 CFD의 발전 방향을 연구하였다. Spalart와 다소 차이가 있지만, 이 연구에서도 LES 기법이나 DNS 기법의 적용이 현재 수준에서는 무리가 있다고 보고 있다. NASA에서는 2030년 이후가 되어야 수치 모델과 전산기기의 발달로 인해 LES 기법의 적용이 양호해질 것이라 예측하고 있다. 그리고 LES 기법의 적용이 용이해지는 시기 이전에는 hybrid RANS/LES 기법이 LES 기법의 대안이라고 예상하고 있다. Hybrid RANS/LES 기법은 RANS 기법과 LES 기법이 혼합(blending)된 난류 해석 기법으로 RANS 수준의 격자점을 사용하여 LES 기법 수준의 비정상 와류 포착이 가능하다는 장점이 있다. Hybrid RANS/LES 기법은 현재의 전산 성능 및 해의 정확도를 고려할 때 다른 난류 해석 기법에 적용 가능성이 높다고 할 수 있다.

* 사정환, 한국과학기술정보연구원 박사후연구원, 010-7709-3221, sa_c@kisti.re.kr

** 박수형, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 부교수, 02-450-4177, pish@konkuk.ac.kr

*** 조금원, 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅융합연구센터장, 042-869-0550, ckw@kisti.re.kr

하지만 현재의 hybrid RANS/LES 기법이 모든 유동장에서 LES 기법과 동일한 수준의 해를 제공하지는 못하고 있다. 유동의 층류-난류 천이(laminar-turbulence transition) 현상의 예측이 그 대표적인 예라 할 수 있다. 일반적으로 hybrid RANS/LES 기법은 유동이 완전 난류라고 가정된 RANS 기법의 난류 모델을 사용하기 때문에 유동 천이 현상을 예측하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 NASA에서도 hybrid RANS/LES 기법뿐만 아니라 RANS 기법에서도 유동 천이 현상의 예측이 가능한 모델의 개발이 필요하다고 보고 있다.

II. 본문

1. 천이해석 모델과 비정상 박리유동해석을 위한 난류모델 개발 현황

1) 층류-난류 유동 천이 예측 기법

Langtry와 Menter(2009)는 실험과 난류경계층에 대한 경험적 상관관계를 이용하여 천이 현상을 국부변수(local variable)로 기술할 수 있는 방법으로서 천이방정식을 사용하는 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 개발하였다. $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 이론적으로 정립된 intermittency와 난류 모멘텀 레이놀즈수의 전달 방정식을 기반으로 생성과 소멸에 관한 경험적 상관관계식을 국부변수를 이용해 모델링함으로써 천이 모델의 인위적 문제설정이나 기하학적 제약을 해소하였다. 또한, 국부변수의 사용으로 인해 3차원 천이 유동해석에도 적용가능하다. 하지만 기존의 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 3차원 crossflow 효과에 대한 고려가 모델링에 적용되지 않아 crossflow 효과가 발생하는 3차원 천이 유동해석에는 한계가 존재한다. 원래의 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 CF 교란에 의한 층류-난류 유동 천이 현상을 정확하게 예측할 수 없기 때문에, 3차원 천이예측 정확도를 높이기 위한 연구가 필요하다. 이러한 이유로 Watanabe(2009), Medida(2013), Grabe(2013) 등은 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델의 3차원 천이 유동해석 성능 향상을 위해 다양한 방법을 사용하여 연구를 진행 하였다. Watanabe는 Görtler instability와 CF instability로 이루어진 Kohama parameter, C_K 를 사용하여 3차원 천이 유동을 수행하였다. 하지만 형상에 따라 다른 C_K 값을 적용해야한다는 문제가 있었으며, 일반적인 형상에 대한 충분한 검증이 부족했다. Medida는 Modified Crossflow Reynolds Number (Re_{MCF})와 벽면에 평행한 비점성 유선 반경(R)을 사용하여 $\gamma-Re_\theta-SA$ 천이 모델에 CF 효과를 적용하였다. Grabe는 C1-criterion과 FSC 방정식을 사용하여 CF 효과를 적용하는 연구를 수행하였다. 하지만 이러한 방법은 추가의 방정식을 계산해야하고 해석 형상의 후퇴각이 정의되어야한다는 단점이 있다.

2) 비정상 박리 유동해석을 위한 hybrid RANS/LES 기법

일반적으로 hybrid RANS/LES 기법은 적은 격자점을 사용하여 LES 수준의 비정상와류 현상을 예측할 수 있다는 장점이 있지만, 유동 층류-난류 천이 현상을 예측할 수 없다는 단점이 있다. LES 기법과의 혼합에 사용된 RANS 기법이 완전 난류 모델을 기반으로 되어있기 때문이다. 따라서 유동 천이와 비정상와류가 동시에 존재하는 복잡한 유동해석에서는 정확한 해를 제시할 수 없다. 이러한 hybrid RANS/LES 모델의 단점을 보완하기 위해 Sørensen(2011)은 천이 해석이 가능한 RANS 기법($\gamma-Re_\theta$ 천이 모델)과 LES 기법을 혼합하여 유동 천이 현상의 해석이 가능한 hybrid RANS/LES 기법을 개발하고 circular cylinder와 thick airfoil 형상을 사용하여 성능을 검증하였다. Sørensen이 제안한 모델은 기존의 hybrid RANS/LES 기법이 예측하지

못하는 천이 현상을 예측할 수 있었지만 난류 강도가 강할 경우 천이가 발생하는 지점에서 RANS 영역과 LES 영역을 정확하게 분리하지 못한다는 문제가 있었다. 이러한 문제점을 해결하고자 You(2013)는 천이 모델과 hybrid RANS/LES 모델간의 혼합과정에서 새로운 혼합 함수(blending function)을 사용하여 천이가 발생하는 지점에서 RANS와 LES 기법의 혼합 과정에서 발생하는 문제를 해결하는 연구를 수행하였다. 하지만 You가 제안한 혼합 함수는 circular cylinder의 특정 실험 결과를 바탕으로 결정된 함수이기 때문에 일반성(generality)을 보장하기 어렵다는 단점이 있었다. 따라서 형상에 구애받지 않는 혼합 함수를 사용하는 새로운 모델 개발에 관한 연구가 필요한 상황이다.

2. 천이 해석 모델과 비정상 박리 유동해석을 위한 난류모델 개발

1) 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서는 In-house CFD solver인 KFLOW(Park and Kwon, 2004; Sa et al, 2015)를 사용하였으며 실험 결과와의 비교를 통해 개발된 천이해석 모델과 비정상 박리 유동해석을 위한 난류모델의 예측성능을 확인하였다. 유동해석을 위해 국소 예조건화 기법이 적용된 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 지배방정식을 공간 이산화하기 위해 격자중심 유한 체적법을 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. 비정상 유동해석을 위해 이중 시간 적분법을 사용하였다.

2) 3차원 천이 유동해석 모델

Correlation 기반의 $\gamma - Re_\theta$ 천이 모델은 이차원 Blasius 속도 분포를 기반으로 correlation을 유도하였기 때문에 Tollmien-Schlichting 불안정성에 의한 천이 현상은 잘 모사하는 반면, 후퇴각이 존재하는 날개형상이나 고 받음각의 장축 타원체 형상 주변의 유동과 같이 crossflow 불안정성에 의해 삼차원 천이 현상이 간하게 나타나는 경우에는 천이 위치를 실제보다 후류 방향으로 예측하는 등의 한계가 존재한다. 따라서 기존의 $\gamma - Re_\theta$ 천이 모델의 한계를 보완하여 crossflow 효과를 고려할 수 있는 새로운 천이 모델의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 추가의 방정식이나 형상에 대한 swept angle을 사용하지 않는 방법으로 $\gamma - Re_\theta$ 천이 모델이 crossflow 효과를 고려할수 있도록 모델링을 수정하여 새로운 천이 모델인 $\gamma - Re_{\theta - CF}$ 천이 모델을 개발하고자 한다.

Correlation 기반의 천이 모델을 사용할 때 중요한 점은 천이 모델에서 사용하는 임계 레이놀즈수를 결정하는 것이다. Menter와 Langtry는 Re_{θ_c} 를 계산할 때 $\gamma - Re_\theta$ 모델의 두 번째 변수인 Re_{θ_t} 를 이용한 correlation으로 이를 계산하였다. Crossflow효과를 고려하기 위해 본 연구에서는 Arnal의 C1-criterion을 이용하여 Re_{δ_2} 의 값을 사용하였다. 그리고 crossflow의 효과를 고려하기 위해 유동의 vorticity값을 사용하여 천이 발생 여부를 판단하였다.

$$Re_{\delta_2 T} = c_{CF} Re_{vx} , Re_{vx} = \frac{\rho y^2}{\mu} \Omega_x , c_{CF} \cdot Re_{vx} > Re_{\delta_2 T} ; Transition \quad \text{식(1)}$$

Crossflow에 의한 천이 판별을 위해 사용되는 $F_{crossflow}$ 과 새로 정의된 F_{onset1} 는 다음과 같이 정의 되며 새로운 F_{onset1} 는 $\gamma - Re_\theta$ 천이 모델에서 F_{onset2} 를 계산하는과정에 사용하게 된다.

$$F_{crossflow} = c_{CF} \cdot Re_{vx} - Re_{\delta 2T}, F_{onset1} = \max(1.05, \chi \cdot F_{onset1}), F_{crossflow} > 0 \quad \text{식(2)}$$

$\gamma - Re_{\theta - CF}$ 모델에 사용된 c_{CF} , χ 등은 경험 상수로 NLF(2)-0145 Wing 형상을 사용하여 정해진 값을 사용하였다. c_{CF} 의 값에 따라 crossflow에 의한 천이현상을 조절할 수 있으며 형상의 swept angle을 사용하지 않기 때문에 복잡한 형상에 대해서도 자유롭게 사용할 수 있다.

3) DDES-Transition 모델

층류-난류 천이 RANS유동해석 기법과 hybrid RANS/LES 기법을 결합하기 위해 $\gamma - Re_{\theta}$ 천이 모델과 DDES-SST모델을 사용하였다. DDES-SST모델은 hybrid RANS/LES 기법 중 한 가지 방법으로 $k - \omega$ SST 모델을 기반으로 하고 있다. $\gamma - Re_{\theta}$ 천이 모델과 DDES-SST모델은 $k - \omega$ SST 모델을 바탕으로 모델링이 되어있기 때문에 두 모델간의 혼합이 용이하다. 두 모델간의 혼합을 위해 기존의 $\gamma - Re_{\theta}$ 천이 모델에서 사용되는 D_k 를 DDES-SST모델에서 사용되는 $D_{k, DDES}$ 로 수정하는 과정이 필요하다. 하지만 단순한 혼합을 통해서 RANS 영역과 LES 영역을 정확하게 분리하지 못한다는 문제가 발생한다(Sørensen, 2011). 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 길이 척도 함수 \tilde{l} 을 천이 모델을 고려한 $\tilde{l}_{DDES-Trans}$ 으로의 수정이 필요하다. You(2013)는 F_{blend} 라는 blending function을 사용하여 RANS 영역과 LES 영역을 수정하였다. 하지만 You가 사용한 F_{blend} 는 circular cylinder와 같이 특정 형상의 실험 결과를 바탕으로 하고 있기 때문에 일반성을 보장할 수 없다는 단점이 있다. Eppler 387 익형의 유동해석에 적용하면 RANS 영역을 과도하게 예측하고 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 천이 모델과 DES모델을 혼합하기 위해 새로운 혼합함수 f_{Tran} 을 사용하였다. 현재 사용된 수정된 길이 척도 함수와 새로운 혼합함수는 다음과 같다.

$$\tilde{l}_{DDES-Trans} = l_{k-\omega} - f_d \cdot f_{Tran} \max(0, l_{k-\omega} - C_{DES}\Delta), f_{Tran} = (1 - F_{\theta t}^{DDES-Trans}) \quad \text{식(3)}$$

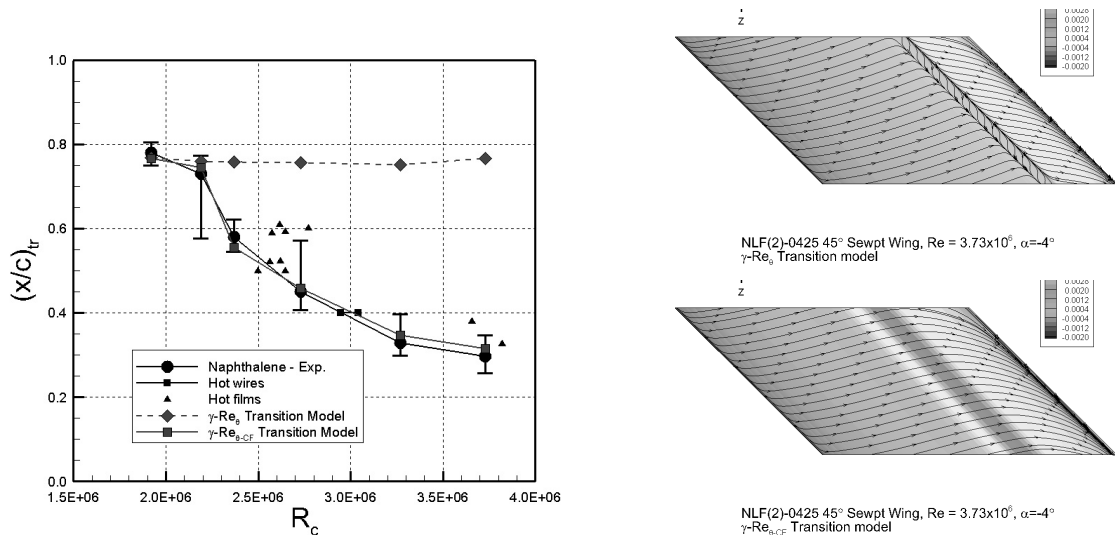
여기서 사용된 $F_{\theta t}^{DDES-Trans}$ 는 $\gamma - Re_{\theta}$ 천이 모델에서 경계층을 의미하는 함수 $F_{\theta t}$ 를 변형하여 사용하였으며, $F_{\theta t}$ 는 자유류에서 0이 되고, 경계층 안에서는 1이 된다. 본 연구에서는 $\gamma - Re_{\theta}$ 천이 모델에서 이미 정의된 $F_{\theta t}$ 을 사용하여 DDES-Transition 모델의 blending function으로 사용하였다. 현재 사용한 $F_{\theta t}^{DDES-Trans}$ 는 다음과 같다.

$$F_{\theta t}^{DDES-Trans} = \left(\frac{(\min(\max(F_{\theta t}, 0.8), 1.0) - 0.8)}{(1 - 0.8)} \right)^2 \quad \text{식(4)}$$

새로운 혼합함수 f_{Tran} 를 사용하면 혼합함수를 사용하지 않으면 발생할 수 있는 RANS 영역과 LES 영역의 부적절한 분리를 방지할 수 있었다. 또한 F_{blend} 를 사용한 결과와는 달리 과도한 RANS 영역을 예측하지 않음을 확인하였다.

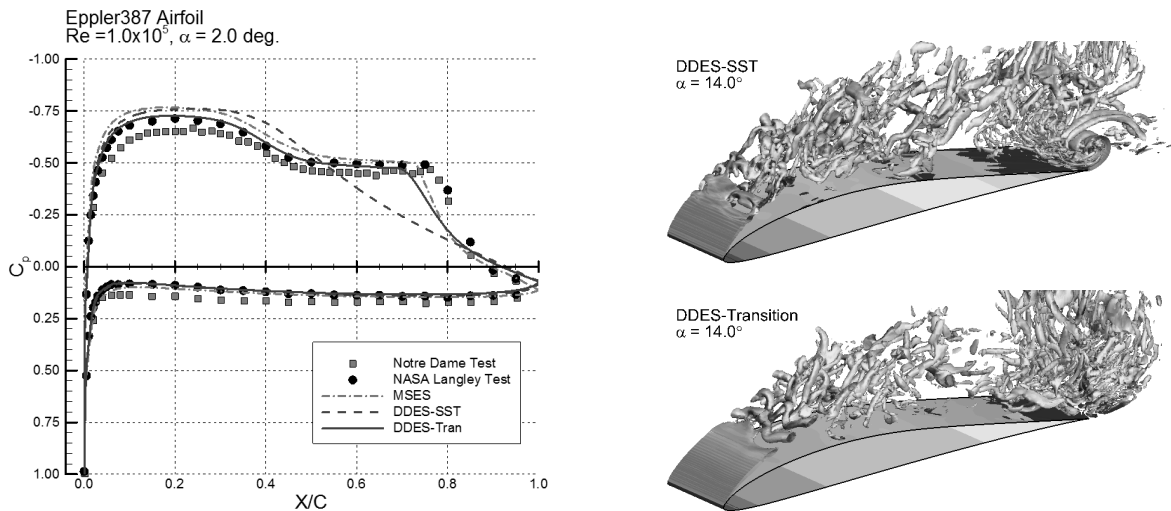
III. 결과

NLF(2)-0415 Swept Wing을 사용하여 Crossflow 효과를 고려한 3차원 천이 유동 실험결과(Dagenhart and Saric, 1999)를 천이 유동해석 결과와 비교하였다. 3차원 천이 유동해석을 위해 crossflow 효과를 고려한 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용하였다. 유동해석 결과의 성능을 확인하기 위해 천이점과 표면 마찰항력 계수, 날개 표면의 유선 분포의 결과를 사용하였다. NLF(2)-0145 Swept Wing형상의 천이점 결과 비교는 <그림 1>과 같다. 실험 결과를 살펴보면 레이놀즈수가 증가함에 따라 천이점이 날개의 앞쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 기존의 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용한 경우 레이놀즈수의 변화에 따른 천이점의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 crossflow 효과가 증가하여 천이점이 날개의 앞쪽으로 이동해야 하지만 기존의 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델은 crossflow 효과를 고려하지 않기 때문이다. 반면 crossflow 효과를 적용한 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델은 유동의 레이놀즈수가 증가함에 따라 천이점이 날개의 앞쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었으며 실험결과와 매우 일치하는 결과를 예측하였다.



<그림 1> NLF(2)-0415 Swept Wing 형상에서 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 모델의 천이 예측 성능 비교

개발된 hybrid RANS(Transition)/LES 모델(DDES-Transition)을 사용하여 Eppler387형상의 유동해석을 수행하였다. 천이 현상 및 박리 예측 가능 여부를 확인하기 위해 2, 8, 11, 14도의 받음각에 대해 유동해석을 수행하였다. 실험 결과(McGhee et al, 1988)에 따르면 받음각 2도의 경우 익형 윗면에 크기가 큰 층류박리거품이 존재하며 받음각이 증가할수록 층류 박리 거품의 크기가 줄어들며 천이 발생 지점이 익형의 앞쪽으로 이동한다. 그리고 받음각 8도 이후부터 유동 박리가 시작되며 14도의 경우 완전 박리 현상이 일어난다. 본 연구를 통해 개발된 DDES-Transition 모델은 저 받음각에서 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델과 비슷한 수준의 천이 예측 성능을, 고 받음각에서는 hybrid RANS/LES 모델(DDES-SST)과 비슷한 수준의 비정상 박리 유동해석 예측 성능을 보여줌을 확인하였다(그림 2).



<그림 2> Eppler387 3차원 익형 형상에서 Hybrid RANS(Transition)/LES 모델의 예측 성능 결과

IV. 결론

현재의 전산기기의 성능이 높은 레이놀즈수 영역의 공학적 문제를 LES 기법이나 DNS 기법을 사용하기에는 무리가 있기 때문에 hybrid RANS/LES 기법의 유동해석 정확도를 높이는 연구는 지속 적으로 수행되어야 한다. 이러한 연구의 필요성을 바탕으로 본 연구에서는 3차원 천이 해석이 가능한 $\gamma - Re_{\theta} - C_F$ 천이 모델과 천이 해석과 비정상 와류 유동해석이 가능한 DDES-Transition 모델을 개발하고 그 성능을 확인하였다. 개발된 $\gamma - Re_{\theta} - C_F$ 천이 모델은 높은 정확도의 3차원 천이 유동 해석이 가능하게 되었으며, 천이해석이 가능한 RANS 모델과 LES 모델간의 혼합도 성공적으로 이루어져 천이 유동해석과 비정상 와류 유동현상에 대한 해석이 가능함을 확인하였다. 유동해석 검증을 통해 현재 개발된 유동해석 모델의 미흡한 부분을 지속적으로 개선해 나간다면 LES나 DNS 기법의 대안으로 충분한 역할을 할 수 있을 것이라 기대된다.

참고문헌

- Spalart, P. R. (2000), "Strategies for Turbulence Modelling and Simulations," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(3), 252-263.
- Slotnick, J., Khodadoust, A., Alonso, J., Darmofal, D., Gropp, W., Lurie, E., and Mavriplis, D., (2013), "CFD Vision 2030 Study: a Path to Revolutionary Computational Aerosciences," NASA Langley Research Center.
- Langtry, R.B., and Menter, F.R., (2009), "Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes," *AIAA Journal*, 47(12), pp. 2894-2096.
- Watanabe, Y., Misaka, T., Obayashi, S., Arima, T., and Yamaguchi, Y., (2009), "Application of Crossflow Transition Criteria to Local Correlation-Based Transition Model," *47th AIAA Aerospace Sciences*

Meeting, Orlando, FL.

- Medida, S., and Baeder, J., (2013), "A New Crossflow Transition Onset Criterion for RANS Turbulence Models," *21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*.
- Grabe, C., and Krumbein, A., (2013), "Correlation-Based Transition Transport Modeling for Three-Dimensional Aerodynamic Configurations," *Journal of Aircraft*, 50(5), pp. 1533-1539.
- Sørensen, N. N., Bechmann, A., and Zahle, F., (2011), "3D CFD Computations of Transitional Flows using DES and a Correlation based Transition Model," *Wind Energy*, 14(1), pp. 77-90
- You, J. Y., and Kwon, O. J., (2013), "Blending of SAS and Correlation-based Transition Models for Flow Simulation at Supercritical Reynolds Numbers," *Computers & Fluids*, 80, pp. 63-70.
- Park, S. H., and Kwon, J. H., (2004), "Implementation of $k-\omega$ Turbulence Models in an Implicit Multigrid Method," *AIAA Journal*, 42(7), pp. 1348-1357.
- Sa, J. H., Park, S. H., Kim, C. J., and Park, J. K., (2015), "Low-Reynolds number flow computation for eppler 387 wing using hybrid DES/transition model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(5), pp. 1837-1847.
- Dagenhart, J.R., and Saric, W.S., (1999), "Crossflow Stability and Transition Experiments in Swept-Wing Flow," *NASA/TP-1999-209344*.
- McGhee, R. J., Walker, B. S., and Millard, B. F., (1988), "Experimental Results for the Eppler 387 Airfoil at Low Reynolds Numbers in the Langley Low-Turbulence Pressure Tunnel," *NASA Technical Memorandum No.4062*, USA.