

Dynamic Stall에 천이 현상이 미치는 영향 분석

Numerical Analysis of Effect of Transition Phenomenon on Dynamic Stall

김영우^{1*}, 김주혁¹, 이지훈¹, 박수형¹
건국대학교¹

초 록

NACA0012형상을 사용하여 천이현상을 고려한 유동해석이 Dynamic Stall에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 천이 현상을 고려한 진동하는 익형의 공력 계수 변화를 비교하기 위해 완전 난류로 가정한 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. NACA0012익형을 사용하였으며 두께 변화에 따른 해석 결과를 비교하기 위해 NACA0009익형도 사용하였다. 정상유동해석의 천이 발생 지점과 비정상 유동해석의 천이 발생 지점을 비교하였으며, 익형주위의 유동결과를 비교하여 천이해석과 완전 난류해석 결과의 차이를 분석하였다.

Key Words : 동적실속(Dynamic Stall), 천이유동(Transition Flow)

1. 서 론

동적실속(Dynamic Stall)은 익형이나 날개형상의 비행체가 비정상적인 운동을 하면 발생하는 현상이다. 이러한 현상은 흔히 전진하는 회전익항공기의 블레이드 혹은 고정익 항공기의 날개가 진동을 하거나 빠른 기동을 하는 경우, 곤충의 날개가 움직이는 경우와 같이 날개가 비정상 운동을 하는 경우 등에서 발생할 수 있다. 동적실속은 급격한 공력계수의 변화를 발생시키며, 정적 공력계수에 비해 실속이 늦게 발생하는 경우가 생기기도 한다. 동적 실속은 형상이 움직이며 주위의 유동장이 비정상적인 거동을 보이기 때문에 정확한 예측이 매우 어렵다. 동적실속 예측을 위해 전산유체역학을 통한 연구는 오래전부터 진행되어 왔으며, 동적실속 유동해석에 있어서 난류모델이나 천이현상이 매우 중요한 영향을 미친다고 알려졌다^(1,2). 본 연구에서는 천이해석이 동적 실속에 미치는 영향을 살펴보기 위해 진동하는 익형의 유동해석이 가능한 KFLOW_EDISON_6을 사용하여 연구를 수행하였다. NACA0012를 사용하여 천이 현상이 동적 실속에 미치는 영향을 살펴보았으며, 익형의 두께 변화에 따른 동적실속 해석 결과의 차이를 확인하기 위해 추가로 NACA0009를 사용하여 연구를 수행하였다.

2. 본 론

EDISON_CFD를 활용하여 진동하는 익형주위의 유동해석에 천이해석이 미치는 영향을 살펴보았다. 진동하는 익형의 유동해석을 위해 진동하는 익형의 동적거동 해석 SW(KFLOW_EDISON_6)를 활용하였으며 정상상태해석과 비교하기 위해 2차원 저레이놀즈수 천이유동 해석 SW((KFLOW_EDISON_3) 또한 활용하였다. 진동하는 익형의 유동해석 결과를 실험 결과와 비교하기 위해 실험에서 사용한 유동 조건을 사용하였다. 완전 난류 해석 결과와 비교하기 위해 완전 난류 유동해석도 수행하였다. 완전 난류 해석에 사용한 난류 모델은 $k-\omega$ SST모델이며, 천이 현상을 모사하기 위해 Langtry와 Menter⁽³⁾가 제안한 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델을 사용하였다. 해석에 사용한 익형 형상은 NACA0012와 NACA0009를 사용하였다. 익형의 격자는 KFLOW_EDISON에서 제공되는 C타입의 격자를 사용하였다. 현재 제공되는 익형격자의 격

자수는 353×81이고 벽면에서의 첫 번째 격자의 간격은 5×10^{-6} 이 사용되었다.

2. 결 과

천이해석이 진동하는 익형의 공력 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 완전 난류 모델인 $k-\omega$ SST 모델과 천이 유동해석이 가능한 $\gamma-Re_\theta$ 천이 모델을 사용하여 유동해석을 수행하였다. 해석에 사용한 익형 형상은 NACA0012 익형이고 해석에 사용한 유동 조건은 해석 결과를 비교할 수 있는 실험데이터의 실험 조건을 사용하였다⁽⁴⁾. 사용한 유동 조건은 다음과 같다.

Mach number 0.283

Reynolds number 3.45×10^6

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(\omega t), \omega = 0.302$$

진동하는 익형의 비정상 유동해석을 위해 익형이 4번 진동하는 시간동안 비정상 유동해석을 수행하였으며 해석결과는 3번 째 진동이후의 값을 사용하였다. 1번 진동할 때 2000번 계산하도록 가상시간 간격을 설정하였으며, 각각의 시간에 500번의 반복계산을 하도록 설정하였다. 비정상 상태의 천이 예측 지점과 정상상태 유동해석의 천이 발생 지점의 위치를 비교하기 위해 정상상태 유동해석도 함께 수행하였다. 또한 익형의 두께의 변화에 따른 익형의 공력특성을 비교하기 위해 동일한 조건에서 NACA0009를 사용한 정상/비정상 유동해석을 수행하였다.

일반적으로 익형의 천이 발생 지점은 받음각이 증가함에 따라 익형의 아랫면의 천이 점은 익형의 뒷전으로, 익형의 윗면의 천이 점은 익형의 앞쪽으로 이동하는 경향이 있다. Fig.1 NACA0012의 천이 발생 지점을 정상/비정상 유동해석 결과와 실험 결과를 함께 도시하여 비교한 그림이다. 받음각의 변화에 따른 익형의 윗면과 아랫면에서의 천이 발생 지점이 실험 결과와 유사한 경향을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다. 진동하는 익형의 천이 발생 위치와 정상상태 해석 결과는 다소 차이를 보이고 있는데, 익형이 피치(pitch)운동을 하는 경우 익형 윗면에서는 다소 뒤쪽으로, 아랫면에서는 다소 앞쪽으로 천이 발생 지점이 이동한 것을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 차이는 익형의 아랫면에서 더 크게 발생하였다.

진동하는 NACA0012익형의 공력계수 결과는 Fig.2~4와 같다. 실험 결과와 비교했을 때, 두 결과 모두 진동하는 익형의 공력 계수 변화를 유사하게 예측하고 있음을 확인하였다. 받음각이 상승하는 경우 완전 난류 해석과 천이 해석 결과간의 차이는 크지 않았다. 반면, 받음각이 하강하는 경우는 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상과 동일한 받음각임에도 불구하고 받음각이 상승하는 경우와 하강하는 경우 공력계수가 차이가 나는 원인을 확인하기 위해 받음각이 18°(up/down stroke), 23°(down stroke)인 경우의 해석 결과를 살펴보았다(Fig.5). 18°(up stroke)의 경우 완전난류/천이 해석 모두 익형의 앞전에서 유동의 속도가 Mach number 1을 넘어가는 구간이 발생하는 것을 확인하였다. 진동하는 익형의 유동영역에서 이러한 현상이 발생하게 되면 Shock Induced Separation Bubble이 발생하게 되고, 이는 익형 뒤쪽에 생성되는 와류(vortex)에 영향을 주게 된다. 18°(down stroke)의 경우 up stroke의 경우와 달리 익형 위쪽에 존재하는 강한 와류로 인해 공력계수의 차이가 발생하게 된다. 또한 이 경우 완전난류와 천이 해석 결과를 비교해보면 완전 난류의 경우 익형의 앞전에서 발생하는 와류형상이 천이해석 결과에 비해 앞쪽에 존재하는 것을 확인할 수 있고, 와류의 분포 방향이 위쪽을 향하고 있음을 확인하였다. 이러한 현상은 23°(down stroke)영역에서도 확인되었다. 천이를 고려한 유동해석은 익형 윗면에서 발생하는 와류의 크기와 위치를 완전 난류해석 결과와 다르게 예측하기 때문에 공력계수를 다르게 예측하고 있었다.

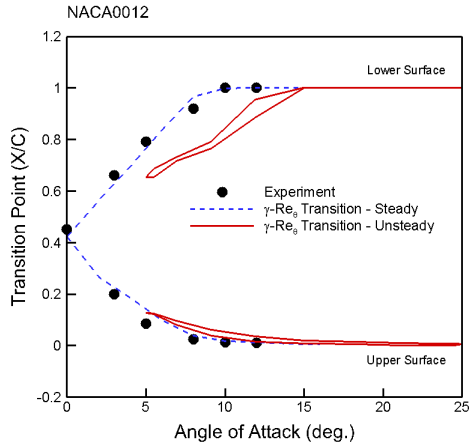


Fig. 1 천이 예측 지점 비교

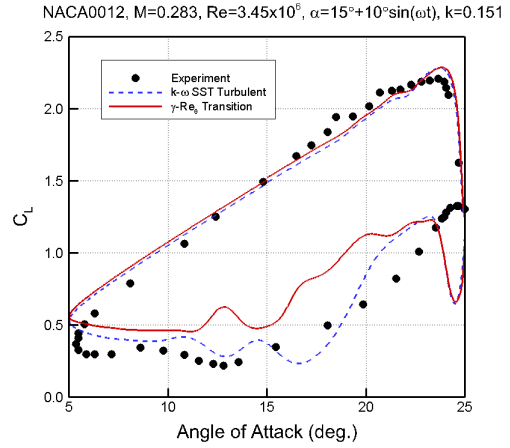


Fig. 2 받음각 변화에 따른 양력계수 변화

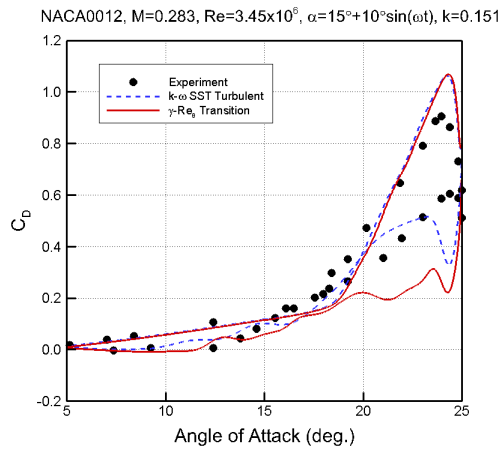


Fig. 3 받음각 변화에 따른 항력계수 변화

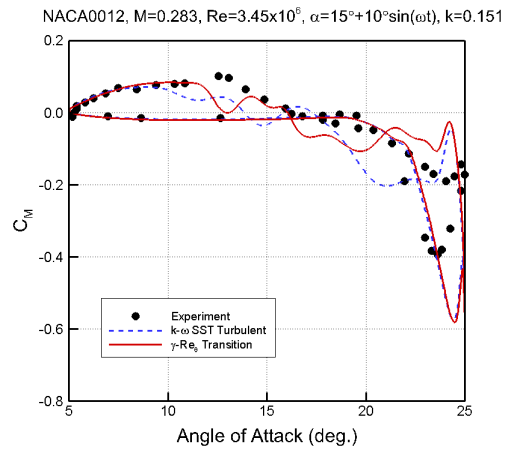


Fig. 4 받음각 변화에 따른 모멘트계수 변화

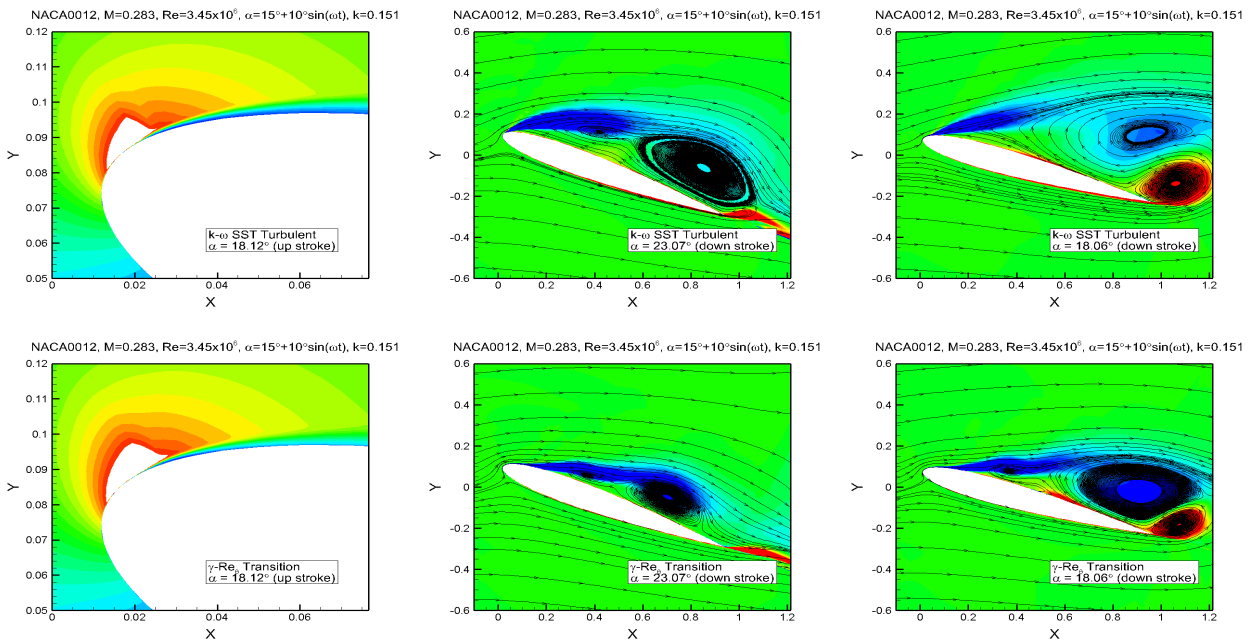


Fig. 5 받음각 변화에 유동장 비교

받음각이 증가하는 경우에는 익형의 윗면에 공력계수에 영향을 미칠만한 강력한 와류가 존재하지 않기 때문에 차이가 거의 없었다.

익형의 두께의 차이에 따른 진동하는 익형의 비정상 유동특성을 확인하기 위해 NACA0009익형을 사용하여 동일한 조건에서 유동해석을 하였다. NACA0012익형의 천이점과 비교한 결과는 Fig.6과 같다. 익형의 두께변화로 인해 익형 윗면에서는 천이 발생 지점을 빨리 예측하고, 아랫면에서는 느리게 예측하고 있음을 확인하였다. 또한 NACA0012 결과와 마찬가지로 익형이 진동을 하면 익형 아랫면의 천이 발생 지점을 빠르게 예측하고 있음을 확인하였다. 공력계수 결과(Fig.7~9) 또한 NACA0012결과와 유사하게 받음각이 증가하는 경우 차이가 거의 없다가 받음각이 감소하는 과정에서 차이가 발생하였다. 하지만 NACA0012결과와 달리 받음각이 최대가 된 후 감소하는 과정에서 양력계수가 급격하게 증가했다가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상을 확인하기 위해 24°(up/down stroke), 25°인 경우의 결과를 살펴보았다(Fig.10). 24°(up stroke)에서 NACA0009 결과를 살펴보면 익형의 뒷전에서 Trailing Edge Separation Bubble이 발달하고 있는 현상을 확인할 수 있었다. 하지만 NACA0012의 경우 익형 뒷전의 와류가 충분히 발달하지 못한 것을 확인할 수 있다. 25°에서는 NACA0009 형상 뒤의 와류는 형상에서 떨어져 나가고 있으며, NACA0012 형상에서는 익형을 따라 익형 중간 부분까지 발달하고 있음을 확인할 수 있었다. 24°(up stroke)에서는 서로 다른 와류 구조를 예측하고 있음을 확인할 수 있었고 이러한 차이로 인해 NACA0009의 양력계수가 최대 받음각 이후 받음각이 감소하는 과정에서 양력이 상승하게 되었다. Fig.11 은 15°(up stroke)의 결과를 비교한 그림이다.

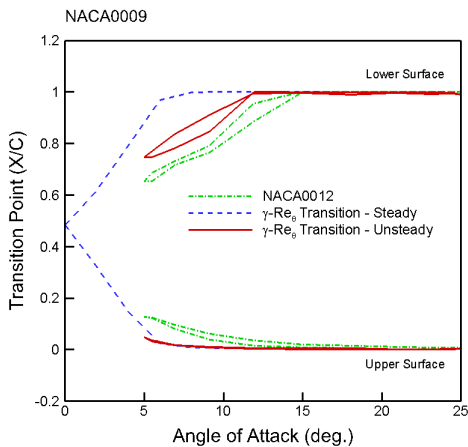


Fig. 6 천이 예측 지점 비교

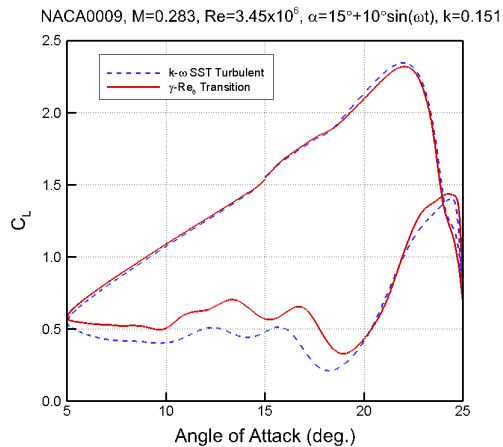


Fig. 7 받음각 변화에 따른 양력계수 변화

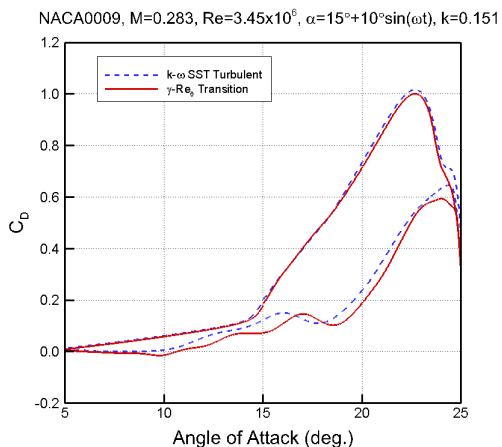


Fig. 8 받음각 변화에 따른 항력계수 변화

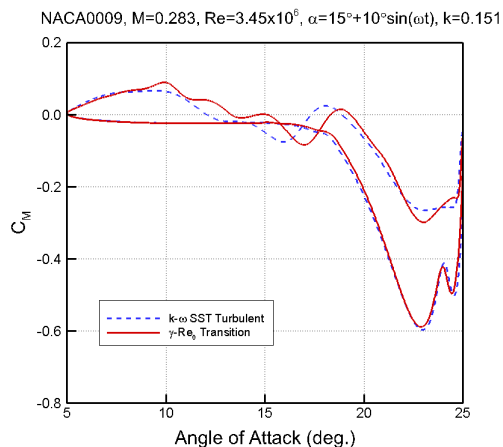


Fig. 9 받음각 변화에 따른 모멘트계수 변화

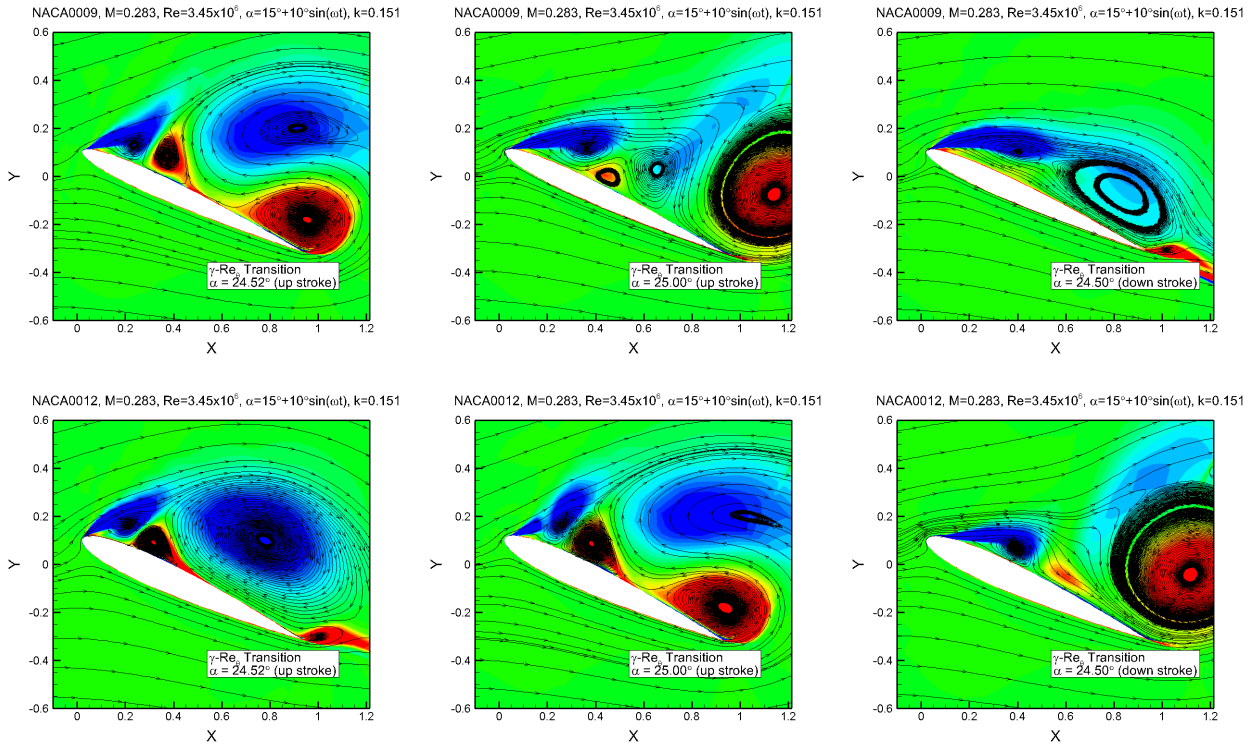


Fig. 10 받음각 변화에 유동장 비교

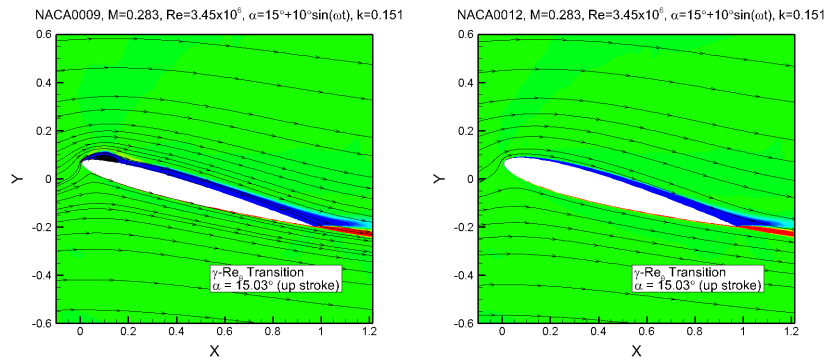


Fig. 11 받음각 15°에서 NACA0009 와 NACA0012 주위 유동장 비교

NACA0012의 경우 18° 부근에서 Shock Induced Separation Bubble이 발생하는 반면 NACA0009의 경우는 15° 보다 작은 영역에서 Shock Induced Separation Bubble이 발생하여 NACA0012 주위의 유동특성과는 다른 유동특성을 갖는 것을 확인하였다.

3. 결론

동적실속 유동해석에 천이현상이 미치는 영향을 확인하기 위하여 $\gamma-Re_\theta$ 천이모델을 활용하여 진동하는 익형의 동적 거동에 대해 살펴보았다. 진동하는 익형의 천이 발생 위치는 정상상태 해석에 비해 익형의 윗면은 뒤쪽에서 발생하고 익형의 아랫면은 앞쪽에서 발생하는 것으로 예측하였다. 이러한 차이는 익형의 아랫면에서 증가하였다. 완전 난류해석 결과와 천이해석 결과를 비교해보면 받음각이 증가하는

영역에서는 공력계수의 차이가 크지 않았다. 하지만 받음각이 감소하는 영역에서는 공력계수의 차이가 크게 나타남을 확인하였다. 이러한 현상의 원인은 익형주위 와류구조와 강도 등과 같은 유동장의 차이로 인해 발생하였다. 천이 해석의 경우 받음각이 감소하는 구간에서 익형 앞쪽에서 발생하는 와류의 생성위치가 익형 표면과 가까워지고 이러한 와류 구조의 차이가 공력계수의 차이를 만들었다. 익형의 두께가 얇은 경우(NACA0009) NACA0012에 비해 저 받음각에서 Shock Induced Separation Bubble이 생성되어 동적실속이 다소 일찍 발생되고 있으며, 받음각이 감소를 시작하는 구간에서 NACA0012의 결과와 달리 양력이 증가하는 결과를 보여주었다. 이는 동일한 유동해석 조건이라도 형상에 의해 동적실속의 특성이 달라짐을 의미한다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 지원 사업인 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ekaterinaris, J. A. and Platzer, M. F., 1997, "Computational Prediction of Airfoil Dynamic Stall," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 33, pp. 759-846
- (2) Geissler, W., and Haselmeyer, H., 2006, "Investigation of dynamic stall onset," *Aerospace Science and Technology*, Vol.10, pp.590-600.
- (3) Langtry, R. B., and Menter, F. R., 2009, "Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes," *AIAA Journal*. Vol. 47, No. 12, pp. 2894-2096.
- (4) Wu, J. C. and Sankar, N. L., 1989, "Evaluation of three turbulence models for the prediction of steady and unsteady airloads," *AIAA Paper*. 89-0609.