



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년03월16일
 (11) 등록번호 10-1716819
 (24) 등록일자 2017년03월09일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 17/50 (2006.01) *G06F 17/11* (2006.01)

(52) CPC특허분류
G06F 17/5009 (2013.01)
G06F 17/11 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2016-0078886

(22) 출원일자 2016년06월23일
 심사청구일자 2016년06월23일

(56) 선행기술조사문헌
 “Transition Transport Modeling for the Prediction of Crossflow Transition”, 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference(pp. 1-27), 13-17 June 2016*
 “Correlation-based Transition Transport Modeling for Three-dimensional Aerodynamic Configurations”, 50th AIAA Aerospace Science Meeting(pp. 1-12), 09-12 January 2012
 “Enhancement of a Correlation-Based Transition Turbulence Model for Simulating Crossflow Instability”, 52nd Aerospace Science Meeting(pp. 1-16), 13-17 January 2014
 US20140136159 A1
 *는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
 한국과학기술정보연구원
 대전광역시 유성구 대학로 245 (어은동)

(72) 발명자
 사정환
 대전광역시 유성구 대학로 245 (어은동)
 신정훈
 대전광역시 유성구 대학로 245 (어은동)
 (뒷면에 계속)

(74) 대리인
 특허법인(유)화우

전체 청구항 수 : 총 9 항

심사관 : 박승철

(54) 발명의 명칭 **크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법 및 그 모델**

(57) 요약

본 발명은 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법 및 그 모델에 관한 것으로서, 유동의 와류 강도를 이용하여 천이 발생 여부를 판단하고, 레이놀즈 수 변화에 따라 변하는 크로스플로우에 의한 천이점 이동을 예측하는 것을 특징으로 하는 3차원 유동 층류-난류 천이 모델이 제공된다.

(72) 발명자

이종숙

대전광역시 유성구 대학로 245 (어은동)

조금원

대전광역시 유성구 대학로 245 (어은동)

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

- (a) 레이놀즈수를 결정하는 방정식을 수립하는 단계;
- (b) 상기 레이놀즈수와 유동의 와류 강도를 이용하여 크로스플로우(crossflow)에 의한 천이 발생 여부를 판단하는 방정식을 수립하는 단계; 및
- (c) 상기 레이놀즈수를 결정하는 방정식과 상기 천이 발생 여부를 판단하는 방정식을 이용하여 크로스플로우에 의한 천이점 판별 함수를 수립하는 단계;를 포함하고,

상기 레이놀즈수를 결정하는 방정식은 형상팩터(H)를 이용한 수학적식이며,

상기 형상팩터(H)는 하기 수학적식을 이용하여 구하는 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법

[수학적식]

$$H = \chi \cdot \frac{Re_v}{2.193Re_{\theta c}}$$

상기 χ 는 Crossflow 효과에 의한 경험상수, Re_v 는 와류 레이놀즈 수, $Re_{\theta c}$ 는 운동량 두께 레이놀즈 수임.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 레이놀즈 수($Re_{\delta 2T}$)를 결정하는 방정식은 하기 수학적식인 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법

[수학적식]

$$Re_{\delta 2T} = \frac{300}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{0.106}{(H - 2.3)^{2.052}} \right)$$

상기 H는 형상 팩터(shape factor)임.

청구항 3

삭제

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 크로스플로우에 의한 천이 발생 여부를 판단하는 방정식은 하기 수학적식인 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법

[수학적식]

$$c_{CF} \cdot Re_{vx} > Re_{\delta 2T}$$

C_{CF} 는 경험상수, Re_{vx} 는 x 크로스플로우 방향의 와류 레이놀즈 수임.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 크로스플로우 방향의 와류 레이놀즈 수(Re_{vx})는 하기 수학식을 이용하여 구하는 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법

[수학식]

$$Re_{vx} = \frac{\rho y^2}{\mu} \Omega_x$$

상기 ρ 는 밀도(density), y 는 가장 가까운 벽으로부터의 거리, Ω_x 는 와류 크기, μ 는 동적 점성 계수임.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 천이점 판별 함수($F_{crossflow}$)는 하기 수학식인 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법

[수학식]

$$F_{crossflow} = c_{CF} \cdot Re_{vx} - Re_{\delta T}$$

청구항 7

삭제

청구항 8

유동의 와류 강도를 이용하여 천이 발생 여부를 판단하고, 레이놀즈 수 변화에 따라 변하는 크로스플로우에 의한 천이점 이동을 예측하되,

상기 크로스플로우에 의한 천이점은 레이놀즈수를 결정하는 방정식과 천이 발생 여부를 판단하는 방정식을 이용한 천이점 판별 함수를 이용하여 예측하고,

상기 레이놀즈수를 결정하는 방정식은 형상팩터(H)를 이용한 수학식이며,

상기 형상팩터(H)는 하기 수학식을 이용하여 구하는 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 방법

[수학식]

$$H = \chi \cdot \frac{Re_v}{2.193 Re_{\theta c}}$$

상기 χ 는 Crossflow 효과에 의한 경험상수, Re_v 는 와류 레이놀즈 수, $Re_{\theta c}$ 는 운동량 두께 레이놀즈 수임.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 천이 발생 여부를 판단하는 방정식은 하기 수학적식인 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 방법

[수학적식]

$$c_{CF} \cdot Re_{vx} > Re_{\delta T}$$

c_{CF} 는 경험상수, Re_{vx} 는 x 크로스플로우 방향의 와류 레이놀즈 수임.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 크로스플로우 방향의 와류 레이놀즈 수(Re_{vx})는 하기 수학적식을 이용하여 구하는 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 방법

[수학적식]

$$Re_{vx} = \frac{\rho y^2}{\mu} \Omega_x$$

상기 ρ 는 밀도(density), y 는 가장 가까운 벽으로부터의 거리, Ω_x 는 와류 크기, μ 는 동적 점성 계수임.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 크로스플로우에 의한 천이점은 천이점 판별 함수($F_{crossflow}$)인 하기 수학적식을 이용하여 예측하는 것을 특징으로 하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 방법

[수학적식]

$$F_{crossflow} = c_{CF} \cdot Re_{vx} - Re_{\delta T}$$

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법 및 그 모델에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 3차원 천이 예측에 필수적인 crossflow 효과에 대한 적용을 유동의 와류 강도로 모델링하여 crossflow 효과를 정의하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법 및 그 모델에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] Navier-Stokes 방정식은 단상 유동의 유체 역학적인 문제의 지배방정식으로, 가장 어려운 방정식 중 하나로 평가되고 있다. 현재까지도 Navier-Stokes 방정식의 해석적인 해는 구할 수 없지만, 공간 및 시간에 대한 이산화(discretization)와 수치 해석적인 기법을 통해 근사적인 수치적 해를 구하는 것은 가능하다. 전산유체역학

(computational fluid dynamics -CFD)은 유체의 복잡한 물리적 현상을 수학적으로 모델링된 편미분 방정식으로 표현하고, 적절한 계산 영역에서 이산화를 통해 종속변수(dependent variables)를 수치적으로 구하는 학문이다. 지난 수십 년간 전산유체역학은 효율적인 알고리즘의 개발과 전산기기의 발달로 인해 비약적으로 발전해왔으며 현재도 지속적으로 발전하고 있다. 점성 유동해석이 대부분인 공학적 유동(engineering flow)의 해석 시 해석 결과의 정확성을 향상시키고 보다 물리적인 해를 제공하기 위한 난류(turbulence) 해석 기법의 다양한 연구 또한 활발히 진행되어 왔다.

[0003] 한편, 실제의 유동 경계층은 층류와 난류로 구분되며 층류에서 난류로 변하는 천이현상이 존재한다. 각각의 영역은 서로 다른 공력 특성을 갖기 때문에 모든 현상을 고려하지 않으면 정확한 해석을 할 수 없다. 게다가 유동의 3차원 층류-난류 천이현상을 예측하기 위해서는 형상 표면에서 횡으로 흐르는 crossflow 효과를 고려해야한다. 현재 crossflow 효과를 고려할 수 있는 천이 모델은 형상의 후퇴각이 포함된 함수로 crossflow의 강도를 정의하여 3차원 천이현상의 생성을 예측한다. 전체 형상이 한 가지의 후퇴각으로 이루어진 간단한 형상에 대한 3차원 천이 유동해석은 가능하지만 일반적인 3차원 형상은 단일한 후퇴각으로 이루어져 있지 않기 때문에 crossflow의 강도를 예측하는 과정에서 정확한 형상의 후퇴각을 사용할 수 없기 때문에 복잡한 3차원 형상에 적용이 힘들다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 선행기술1: 한국공개특허 제2009-0035059호(2009.04.09. 공개)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명의 목적은 3차원 천이 예측에 필수적인 crossflow 효과에 대한 적용을 형상의 후퇴각의 함수가 아닌, 유동의 와류 강도로 모델링하여 crossflow 효과를 정의하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법 및 그 모델을 제공하는 것이다.

[0006] 한편, 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 이상에서 언급한 기술적 과제로 제한되지 않으며, 이하에서 설명할 내용으로부터 통상의 기술자에게 자명한 범위 내에서 다양한 기술적 과제가 포함될 수 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 일 측면에 따르면, (a) 레이놀즈수를 결정하는 방정식을 수립하는 단계, (b) 상기 레이놀즈수와 유동의 와류 강도를 이용하여 크로스플로우(crossflow)에 의한 천이 발생 여부를 판단하는 방정식을 수립하는 단계, (c) 상기 방정식을 이용하여 크로스플로우에 의한 천이점 판별 함수를 수립하는 단계를 포함하는 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법이 제공된다.

$$Re_{\delta 2T} = \frac{300}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{0.106}{(H-2.3)^{2.052}} \right)$$

[0008] 상기 레이놀즈 수($Re_{\delta 2T}$)를 결정하는 방정식은 일 수 있고, 상기 H는 형상 팩터(shape factor)일 수 있다.

$$H = \chi \cdot \frac{Re_v}{2.193 Re_{\theta c}}$$

[0009] 상기 형상팩터(H)는 을 이용하여 구할 수 있고, 상기 χ 는 Crossflow 효과에 의한 경험상수, Re_v 는 와류 레이놀즈 수, $Re_{\theta c}$ 는 운동량 두께 레이놀즈 수일 수 있다.

$$C_{CF} \cdot Re_{vx} > Re_{\delta 2T}$$

[0010] 상기 크로스플로우에 의한 천이 발생 여부를 판단하는 방정식은 일 수 있고, C_{CF} 는 경험상수, Re_{vx} 는 x 크로스플로우 방향의 와류 레이놀즈 수일 수 있다.

$$Re_{vx} = \frac{\rho y^2}{\mu} \Omega_x$$

[0011] 상기 크로스플로우 방향의 와류 레이놀즈 수(Re_{vx})는 을 이용하여 구할 수 있고, 상기 ρ 는 밀도(density), y 는 가장 가까운 벽으로부터의 거리, Ω_x 는 와류 크기, μ 는 동적 점성 계수일 수 있다.

[0012] 상기 천이점 판별 함수($F_{crossflow}$)는 $F_{crossflow} = c_{CF} \cdot Re_{vx} - Re_{\delta T}$ 일 수 있다.

[0013] 본 발명의 다른 측면에 따르면, 유동의 와류 강도를 이용하여 천이 발생 여부를 판단하고, 레이놀즈 수 변화에 따라 변하는 크로스플로우에 의한 천이점 이동을 예측하는 것을 특징으로 하는 3차원 유동 층류-난류 천이 모델이 제공된다.

[0014] 한편, 이상에 살핀 상기 '크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법'은, 프로그램의 형태로 구현된 뒤에 전자 장치에서 판독 가능한 기록 매체에 기록되거나, 프로그램 다운로드 관리 장치(서버 등)를 통해 배포될 수 있다.

발명의 효과

[0015] 본 발명에 따르면, 3차원 천이 예측에 필수적인 crossflow효과에 대한 적용을 형상의 후퇴각의 함수가 아닌 유동의 와류 강도로 모델링함으로써, 복잡한 형상에 대한 정확한 유동 천이현상을 예측할 수 있다.

[0016] 한편, 본 발명의 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 이하에서 설명할 내용으로부터 통상의 기술자에게 자명한 범위 내에서 다양한 효과들이 포함될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 본 발명에 따른 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델을 사용한 결과를 나타낸 도면이다.

도 2 내지 도 4는 동일한 레이놀즈수 영역에서 k-w SST 모델, $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 마찰항력 계수를 비교한 결과를 나타낸 그래프이다.

도 5는 레이놀즈수 변화에 따른 천이점 변화를 나타낸 그래프이다.

도 6은 타 3차원 천이 모델들의 천이 예측 지점을 비교한 그래프이다.

도 7은 받음각 변화에 따른 날개의 중앙 단면에서 천이점의 이동을 나타낸 그래프이다.

도 8은 ONERA M6 Wing 아랫면의 층류-난류 영역의 수치 결과를 보여주는 도면이다.

도 9 및 도 10은 받음각 5도와 10도에서 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델과 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 표면 마찰항력 계수의 분포를 비교한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 '크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델 구축 방법 및 그 모델'을 상세하게 설명한다. 설명하는 실시 예들은 본 발명의 기술 사상을 당업자가 용이하게 이해할 수 있도록 제공되는 것으로 이에 의해 본 발명이 한정되지 않는다. 또한, 첨부된 도면에 표현된 사항들은 본 발명의 실시 예들을 쉽게 설명하기 위해 도식화된 도면으로 실제로 구현되는 형태와 상이할 수 있다.

[0019] 본 발명은 3차원 천이 예측에 필수적인 crossflow효과에 대한 적용을 형상의 후퇴각 함수가 아닌 유동의 와류 강도로 모델링하여 복잡한 형상에 대해서도 적용 가능한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델에 관한 것이다.

[0020] 3차원 유동 층류-난류 천이 모델은 유동의 와류 강도를 이용하여 천이 발생 여부를 판단하고, 레이놀즈 수 변화에 따라 변하는 크로스플로우에 의한 천이점 이동을 예측한다.

[0021] 이러한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델은, 레이놀즈수를 결정하는 방정식을 수립하는 단계, 상기 레이놀즈수와 유동의 와류 강도를 이용하여 크로스플로우(crossflow)에 의한 천이 발생 여부를 판단하는 방정식을 수립하는

단계, 상기 방정식을 이용하여 크로스플로우에 의한 천이점 판별 함수를 수립하는 단계를 거쳐 구축될 수 있다.

[0022] 이러한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델은 컴퓨터 등의 연산이 가능한 장치에 의해 구축될 수 있다.

[0023] 이하, 크로스플로우 효과를 고려한 3차원 유동 층류-난류 천이 모델을 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델로 칭하여 설명하기로 한다.

[0024] 먼저, Correlation 기반의 천이 모델을 사용할 때 중요한 점은 천이 모델에서 사용하는 임계 레이놀즈수를 결정하는 것이다.

[0025] Crossflow 효과를 고려하기 위해, 수학식 1을 이용하여 임계 레이놀즈 수($Re_{\delta 2T}$)를 결정한다.

수학식 1

[0026]
$$Re_{\delta 2T} = \frac{300}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{0.106}{(H-2.3)^{2.052}} \right)$$

[0027] 여기서, H는 shape factor일 수 있다.

[0028] 그리고, crossflow의 효과를 고려하기 위해 유동의 와도(vorticity)값을 사용하여 천이 발생 여부를 판단한다.

[0029] 층류 경계층 이론에서 경계층 두께(boundary layer thickness, δ_{BL}), 운동량 두께(momentum thickness, θ_{BL}), 배제 두께(displacement thickness, δ_{BL}^*)는 수학식 2와 수학식 3과 같은 관계를 갖는다.

수학식 2

[0030]
$$\delta_{BL} = \frac{15}{2} \theta_{BL}$$

수학식 3

[0031]
$$\delta_{BL}^* = \frac{1}{3} \delta_{BL} = \frac{5}{2} \theta_{BL}$$

[0032] 이러한 상관관계를 이용하여 $Re_{\delta 2T} = 5/2 Re_{\theta}$ 와 같은 형태로 변환이 가능하다. 그러나, crossflow 방향의 와류(vorticity)로 정의된 Re_{vx} 를 사용하기 위해 C_{CF} 를 사용하여 수학식 4, 5, 6과 같이 crossflow에 의한 천이 여부를 판단한다.

수학식 4

[0033]
$$Re_{\delta 2T} = C_{CF} Re_{vx}$$

수학식 5

$$Re_{vx} = \frac{\rho y^2}{\mu} \Omega_x$$

[0034]

[0035] 여기서, Re_{vx} 는 x crossflow 방향의 와류 레이놀즈 수(vorticity Reynolds number), ρ 는 밀도(density), y 는 가장 가까운 벽으로부터의 거리, Ω_x 는 와류 크기, μ 는 동적 점성 계수일 수 있다.

수학식 6

$$c_{CF} \cdot Re_{vx} > Re_{\delta T} \quad ; \text{Transition}$$

[0036]

[0037] 여기서, c_{CF} 는 상수일 수 있다.

[0038] 수학식 6은 레이놀즈수와 유동의 와류 강도를 이용하여 크로스플로우(crossflow)에 의한 천이 발생 여부를 판단하는 방정식일 수 있다.

[0039] 그리고 $Re_{\delta T}$ 를 계산하기 위한 shape factor H는 형상의 sweep angle을 사용하지 않기 위해 수학식 7을 적용한다.

수학식 7

$$H = \chi \cdot \frac{Re_v}{2.193 Re_{\theta c}}$$

[0040]

[0041] 여기서, χ 는 Crossflow 효과에 의한 경험 상수(empirical constant for crossflow effect), Re_v 는 와류 레이놀즈 수, $Re_{\theta c}$ 는 운동량 두께 레이놀즈 수(momentum thickness Reynolds number)일 수 있다. Re_v 는 천이점의 지정을 유도하는 역할을 하고, $Re_{\theta c}$ 는 경계층 내에서 intermittency가 처음으로 증가하는 임계 레이놀즈수를 뜻한다.

[0042] 이러한 방식을 통해 $\gamma - Re_{\theta - CF}$ 는 형상의 sweep angle을 사용하지 않고, crossflow 교란에 의한 천이 현상의 예측이 가능하다. $\gamma - Re_{\theta}$ 천이 모델의 F_{onset} 을 사용하면, $Re_{\delta T}$ 는 수학식 8과 같이 변환된다.

수학식 8

$$Re_{\delta T} = \frac{300}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{0.106}{(\chi \cdot F_{onset} - 2.3)^{2.052}} \right)$$

[0043]

[0044] 여기서, χ 는 Crossflow 효과에 의한 경험 상수(empirical constant for crossflow effect), F_{onset} 는 천이점의 위치 조절 함수일 수 있다.

[0045] Crossflow에 의한 천이 판별을 위해 사용되는 천이점 판별 함수 $F_{crossflow}$ 는 수학식 9과 같이 정의되고, 새로 정

의된 F_{onset1} 는 수학적식 10과 같이 정의되며, 새로운 F_{onset1} 는 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델에서 F_{onset2} 를 계산하는 과정에 사용하게 된다.

수학적식 9

[0046]
$$F_{crossflow} = c_{CF} \cdot Re_{vx} - Re_{\delta 2T}$$

수학적식 10

[0047]
$$F_{onset1} = \max(1.05, \chi \cdot F_{onset1}), F_{crossflow} > 0$$

[0048] $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 모델에 사용된 c_{CF} , χ 등은 경험 상수로 NLF(2)-0145 Wing 형상을 사용하여 정해진 값을 사용한다. c_{CF} 의 값에 따라 crossflow에 의한 천이현상을 조절할 수 있다.

[0049] 이하, 도면을 참조하여 상기와 같이 구축된 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델을 사용한 결과에 대해 설명하기로 한다.

[0050] 도 1은 본 발명에 따른 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델을 사용한 결과를 나타낸 도면이다.

[0051] 도 1을 참조하면, $\gamma-Re_{\theta}$ 천이모델의 경우 레이놀즈수가 달라져도 표면 마찰항력 계수나 표면 근처의 유동의 흐름이 거의 변화가 없지만, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 경우 레이놀즈수의 변화에 따라 마찰 항력과 표면 근처의 유동 흐름이 변하는 것을 확인할 수 있다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 유동 천이가 발생하는 위치가 날개의 앞쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 낮은 레이놀즈수에 존재하고 있던 천이 발생 지점 부근의 강한 측 방향 유동의 흐름이 사라지는 것을 확인할 수 있다. 2차원과는 달리 3차원 천이 유동 해석은 마찰 항력뿐만 아니라 형상 표면 근처의 유동의 흐름에도 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 유동 흐름 변화는 천이가 발생하는 지점에 의한 영향도 있음을 확인할 수 있다.

[0052] 도 2 내지 도 4는 동일한 레이놀즈수 영역에서 k-w SST 모델, $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 마찰항력 계수를 비교한 결과를 나타낸 그래프이다.

[0053] k-w SST 모델은 천이 현상을 예측할 수 없기 때문에 날개 앞쪽에서부터 높은 마찰항력 계수를 예측하고 있다.

[0054] $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델과 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델은 유동 천이가 발생하기 전까지 낮은 마찰항력을 예측하고, 레이놀즈수가 증가하면 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델과 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델간의 차이를 확인할 수 있다. Crossflow 효과를 고려하지 않은 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델은 레이놀즈수가 달라져도 해석 결과가 거의 변하지 않는다. 반면, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델은 레이놀즈수가 증가할수록 천이 발생지점이 날개 앞쪽으로 이동하는 현상을 예측할 수 있다.

[0055] 도 5는 레이놀즈수 변화에 따른 천이점 변화를 나타낸 그래프이다.

[0056] 도 5를 참조하면, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 해석 결과와 실험 결과의 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 하지만 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델은 레이놀즈수 변화에 따른 천이점의 이동을 전혀 예측하지 못하였다.

[0057] 도 6은 타 3차원 천이 모델들의 천이 예측 지점을 비교한 그래프이다.

[0058] 도 6을 참조하면, 모든 3차원 천이 모델들이 레이놀즈수가 증가하면서 변하는 crossflow의 영향을 예측하여 천이점이 이동하는 것을 예측하고 있다. Grabe의 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델은 $Re = 2.19 \times 10^6$ 인 지점에서 실험 결

과 및 현재 개발된 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델과 다소 차이가 있다. 레이놀즈수가 1.92×10^6 에서 $Re = 2.19 \times 10^6$ 로 변하는 경우 천이 발생지점은 크게 변하지 않고, 레이놀즈수가 2.37×10^6 로 변하는 과정에서 천이점이 급격하게 변하는데, 이러한 이유는 천이점 부근의 측 방향 유동흐름과 관계가 있다. 레이놀즈수가 낮은 영역에서 천이가 발생하는 지점 부근에 강한 측 방향 유동흐름이 존재한다. 이러한 흐름은 레이놀즈수가 증가하고 천이점이 날개 앞쪽으로 이동함에 따라 약해지고 흐름 방향이 달라지는데 실험 결과나 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델을 사용한 경우에는 $Re = 2.19 \times 10^6$ 인 영역에서도 이러한 현상이 존재하여 천이점의 변화가 크지 않았다. Grabe의 e^N 기법을 사용한 결과는 비슷한 결과를 보여주고 있다. 하지만 레이놀즈수가 낮은 영역에서 실험에 비해 유동 천이가 날개 앞쪽에서 발생한다고 예측하였다. Medida의 결과는 $Re = 2.19 \times 10^6$ 의 결과가 존재하지 않아서 비교할 수 없었다. Medida의 3차원 천이 모델도 crossflow에 의한 천이 발생 지점의 변화를 예측하고 있다. 하지만 레이놀즈수가 낮은 영역에서는 Grabe의 e^N 기법의 결과와 비슷하게 유동 천이가 이른 시점에 발생하는 것으로 예측하였다. 현재의 계산 결과와 타 연구자들의 천이점 예측 결과는 표 1과 같다.

표 1

$Re \times 10^6$	Exp. [92]	$\gamma-Re_{\theta}$	$\gamma-Re_{\theta-CF}$	Medida [62]	Grabe [63]
1.92	0.7799	0.7676	0.7661	0.68	0.7634
2.19	0.7297	0.7600	0.7449	-	0.6289
2.37	0.5789	0.7585	0.5554	0.52	0.5657
2.73	0.4497	0.7555	0.4584	0.43	0.4411
3.27	0.3277	0.7509	0.3463	0.35	0.3314
3.73	0.2966	0.7661	0.3145	0.32	0.3126

[0059]

[0060] 이처럼, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델이 crossflow 효과를 천이 예측에 반영하고 있음을 확인하였고 실험 결과와의 오차도 크지 않음을 확인하였다.

[0061] 한편, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 유동해석 결과 성능 향상은 ONERA M6 wing에서도 확인 되었다. NLF(2)-0415 swept wing 형상은 레이놀즈수의 변화에 따른 crossflow의 변화에 의해 천이 발생 지점이 변하는 것을 보여주는 반면, ONERA M6 wing은 받음각 변화에 의한 crossflow의 변화가 천이점의 위치에 미치는 영향을 확인할 수 있다. ONERA M6 wing의 경우 받음각이 증가함에 따라 날개 표면의 천이 지점의 위치가 앞전으로 이동하게 되는데, 받음각이 10도가 되면 이러한 현상을 나타낸다. 기존 천이 모델의 경우 15도가 되어야 천이 지점이 앞전으로 이동하는 결과를 보여주었는데, $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 경우 받음각 10도에서부터 날개 표면의 천이 지점이 앞전 쪽으로 이동하는 결과를 보여주고 있다. 그리고 $\gamma-Re_{\theta}$ 은 정확한 천이점의 위치를 예측할 수 없었다.

[0062] 도 7은 받음각 변화에 따른 날개의 중앙 단면에서 천이점의 이동을 나타낸 그래프이다.

[0063] 도 7을 참조하면, 후퇴각이 있는 3차원 날개 형상 아랫면의 천이점은 2차원 익형과 달리 받음각이 증가해도 날개의 뒷전으로 이동하지 않는다. 받음각 변화에 의해 생성되는 crossflow의 영향으로 유동 천이가 발생하는 지점이 달라지기 때문이다. ONERA M6 Wing의 경우 날개 아랫면 중앙에서의 천이점은 코드길이의 50%를 넘지 않는다. Crossflow 효과를 고려하지 않는 천이 모델을 사용하는 경우 이러한 현상을 예측할 수 없다. 그러나, 본 발명의 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델은 crossflow의 영향을 포함하고 있기 때문에, 후퇴각이 있는 3차원 날개 형상의 천이점 변화의 특성을 잘 예측할 수 있고, 실험 결과와 유사한 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. Grabe의 경우 3차원 천이 모델을 사용하여 계산하지 않고, 난류 강도를 강제적으로 키워 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델을 사용하여 유동 해석을 수행한다. 받음각 5도에서 천이점을 코드길이의 60%근처로 예측하지만 이후 받음각에서 천이점이 날개

앞쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 crossflow 효과를 고려한 것이 아니기 때문에 3차원 천이 유동해석을 위한 해결 방법이라고 하기에는 무리가 있다.

[0064] 도 8은 ONERA M6 Wing 아랫면의 층류-난류 영역의 수치 결과를 보여주는 도면이다.

[0065] 도 8을 참조하면, 받음각의 변화에 따른 변화를 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델과 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델을 사용한 것이다. Crossflow를 고려하지 않는 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델의 경우 받음각이 증가할수록 층류로 예측하는 범위가 증가하고 있다. 반면 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델은 crossflow효과를 고려하기 때문에 받음각 5도 이후 층류로 예측하는 범위가 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 현재 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델로 예측한 층류-난류 영역의 결과가 실험 결과와 정확하게 일치하지는 않지만, 후퇴각이 있는 3차원 날개 형상의 유동 천이 현상의 특성은 잘 예측하고 있었다.

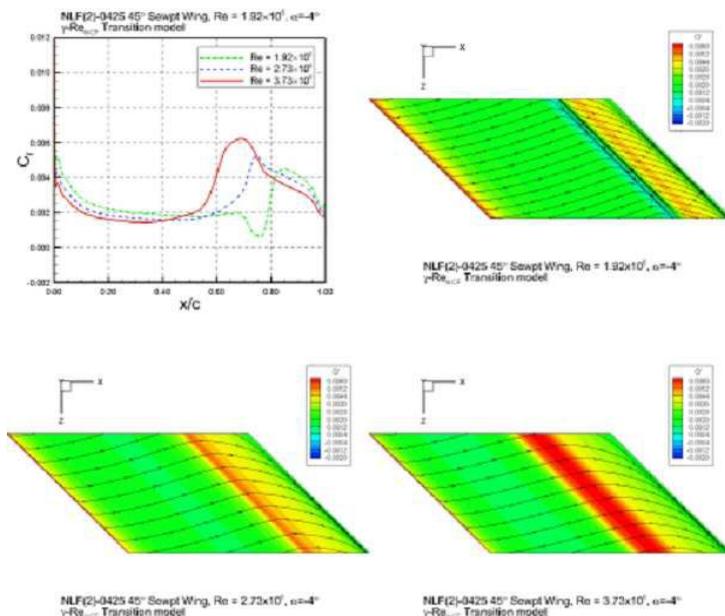
[0066] 도 9 및 도 10은 받음각 5도와 10도에서 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델과 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 표면 마찰항력 계수의 분포를 비교한 도면이다.

[0067] 도 9를 참조하면, 도면상으로는 확실히 차이가 있는 것을 확인하기 힘들지만, 형상 후반부의 윗면에서 높은 마찰항력의 범위가 다소 증가한 곳을 확인할 수 있다. 자세한 비교를 위해 평면으로 변환하여 표시한 결과는 도 10과 같다. e^N 기법을 사용한 Krimmelbein[39]의 천이 예측 지점과 현재 사용한 천이모델의 천이점도 함께 도시하였다. $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델과 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델 모두 형상 뒤쪽의 높은 회전각 영역에서 천이 현상을 e^N 기법과 다르게 천이 영역을 다소 늦게 예측하고 있다. 이 영역은 형상 표면을 타고 흐르는 유동이 충돌하면서 복잡한 와류가 생성되는 영역으로 이러한 복잡한 와류 유동영역에서는 $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델이 유동 천이 현상을 정확하게 해석하기에 무리가 있어서 발생하는 문제일 수 있다. $\gamma-Re_{\theta}$ 천이 모델과 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 차이는 근소하지만 $\gamma-Re_{\theta-CF}$ 천이 모델의 결과가 천이 영역을 더 넓게 예측하고 있다는 것이다.

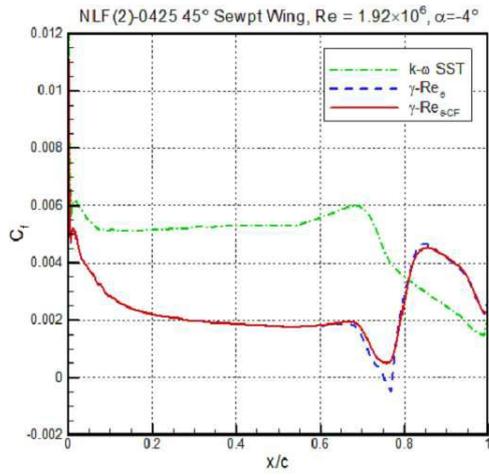
[0068] 이와 같이, 본 발명이 속하는 기술분야의 당업자는 본 발명이 그 기술적 사상이나 필수적 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적인 것이 아닌 것으로서 이해해야만 한다. 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 등가개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

도면

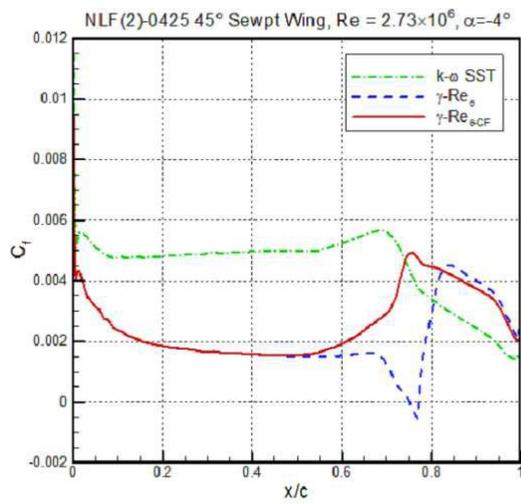
도면1



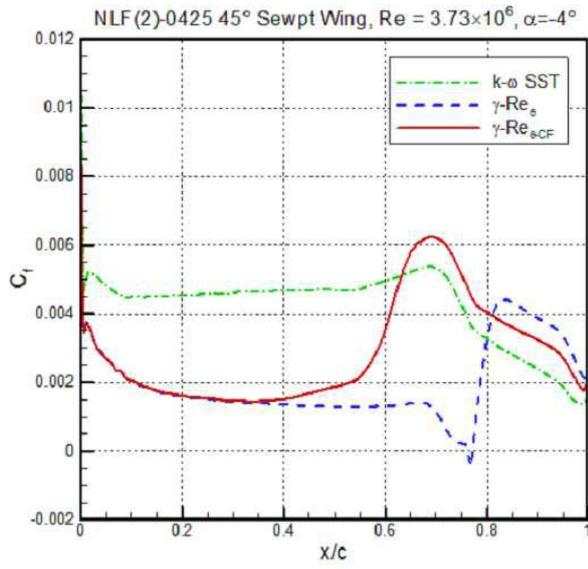
도면2



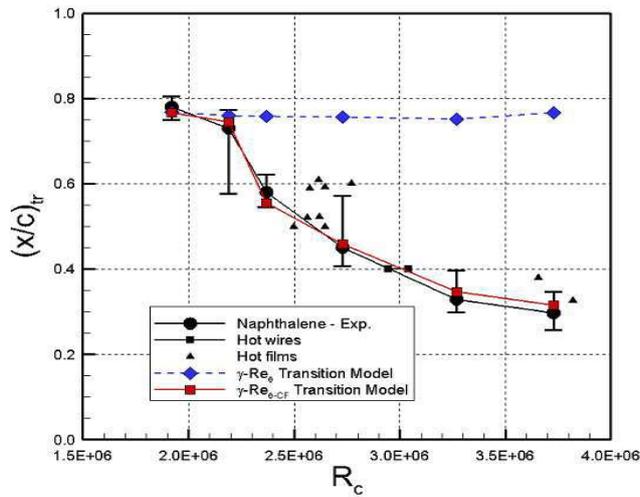
도면3



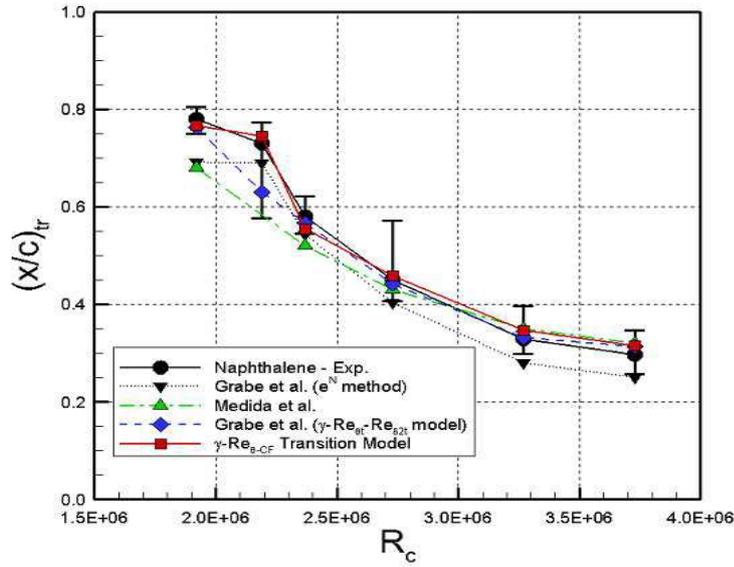
도면4



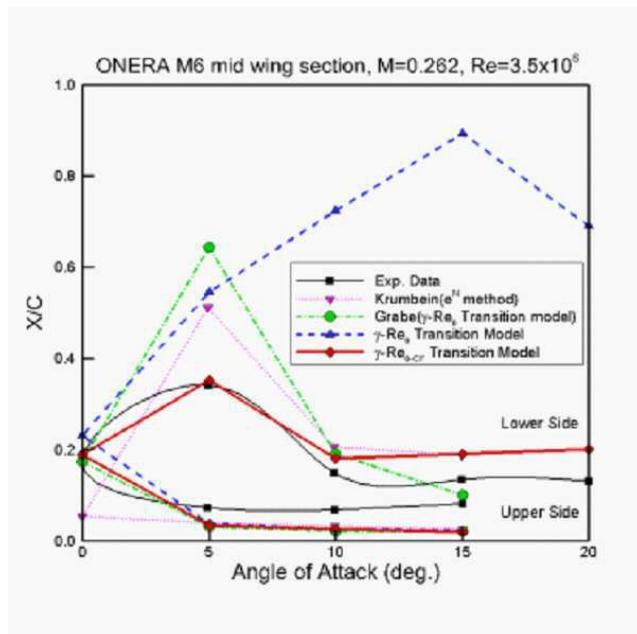
도면5



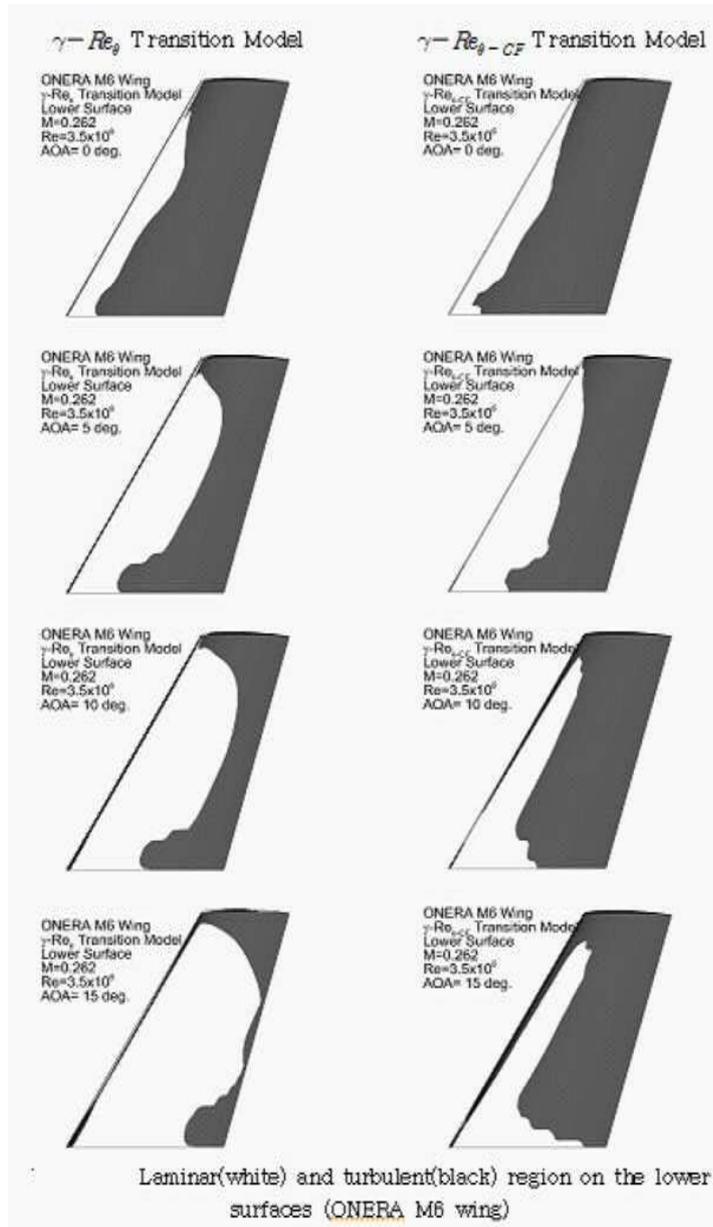
도면6



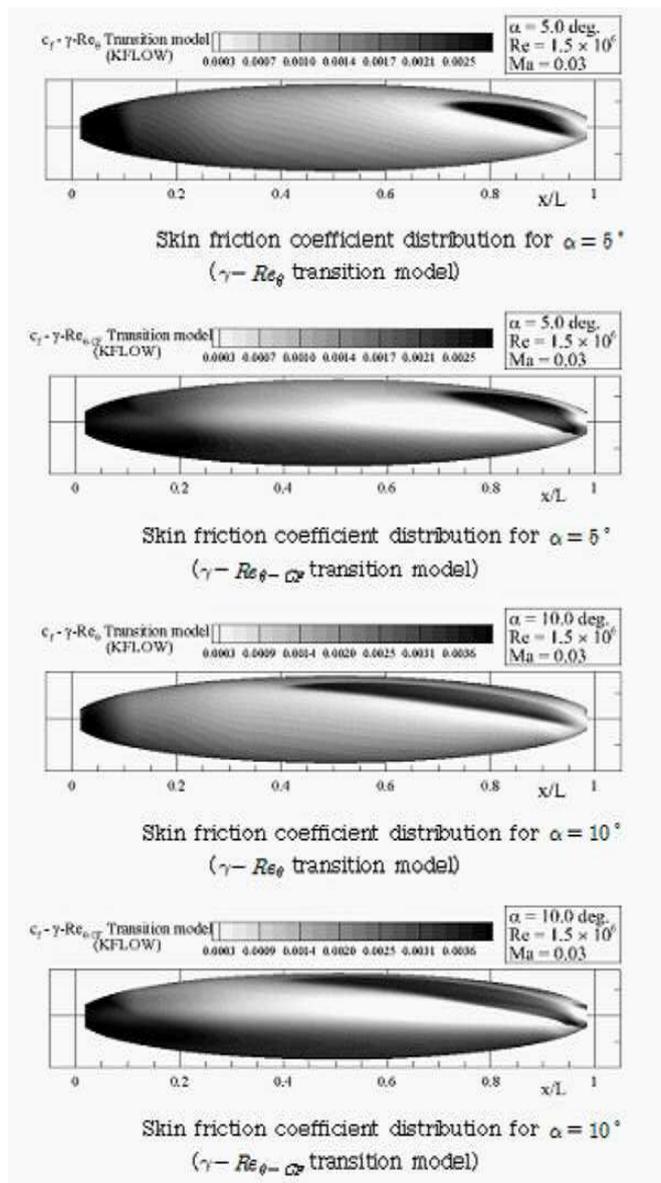
도면7



도면8



도면9



도면10

