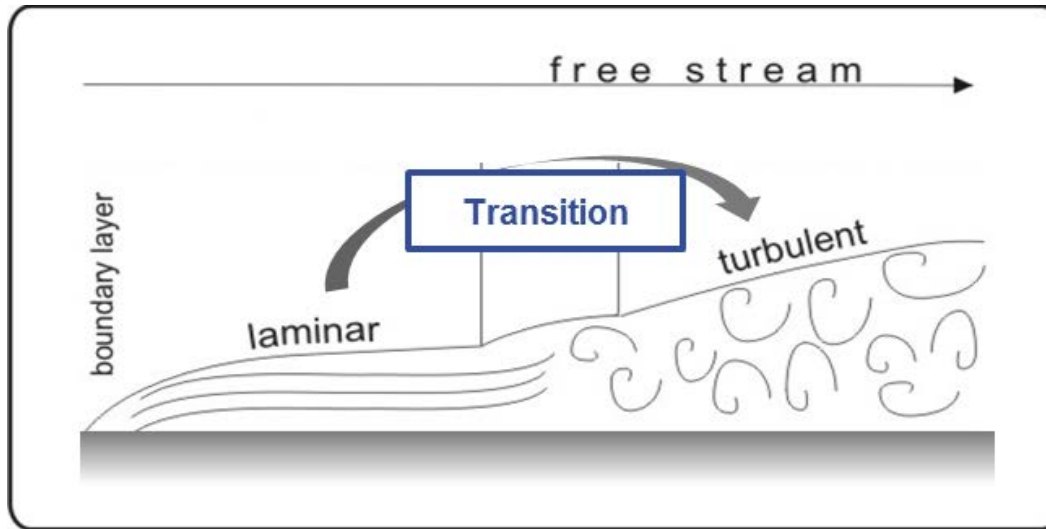


공력 경계층 천이 및 안정성 연구의 개념 소개

2019년 9월 27일

부산대학교 항공우주공학과
박 동 훈

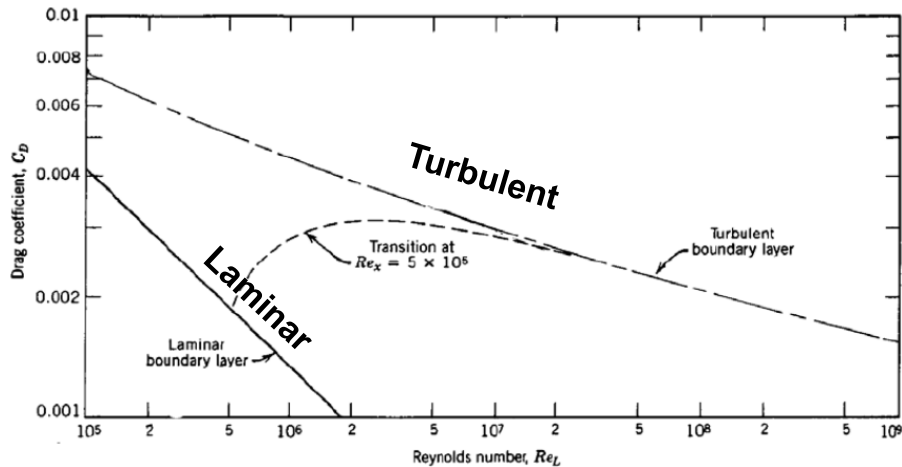
경계층 천이 (Boundary Layer Transition)



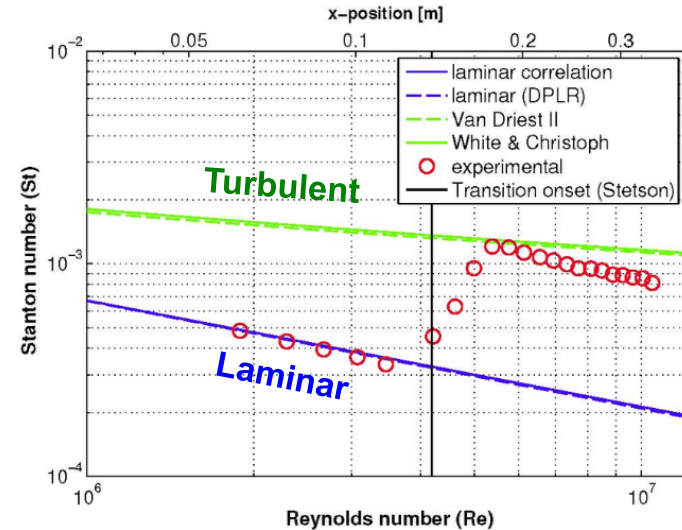
- 층류에서 난류 경계층으로의 전환
- 천이 이후 난류 경계층의 표면 마찰 / 열전달 증가
- 공력 경계층 천이 – 비행체 열공력 성능 및 설계에 직접 영향

경계층 천이 (Boundary Layer Transition)

마찰항력 특성



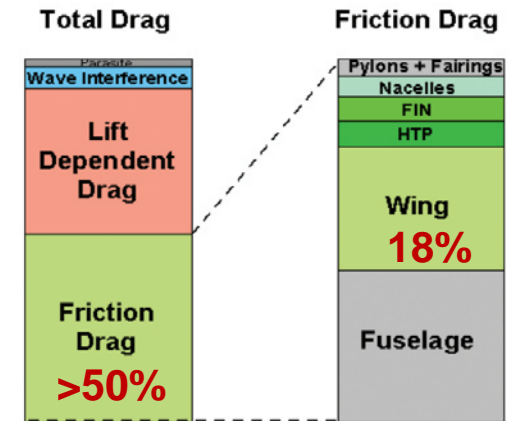
열전달 특성



- 층류에서 난류 경계층으로의 전환
- 천이 이후 난류 경계층의 표면 마찰 / 열전달 증가
- 공력 경계층 천이 - 비행체 열공력 성능 및 설계에 직접 영향

비행체 개발과 경계층 천이

❖ 전통적인 비행체 개발

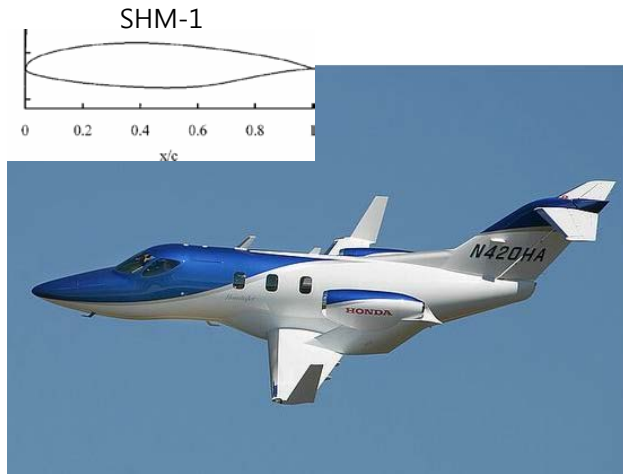
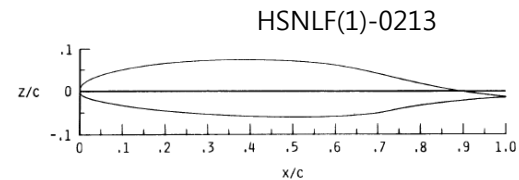
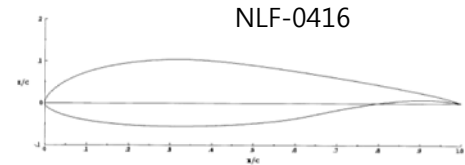


- 경계층 천이는 성능 측면에서 critical 인자로 관여하지 않아 비교적 중요한 문제로 고려되지 않았음
- 아음속 항공기의 경우, 경계층을 층류 상태로 유지하면 마찰 항력 및 연료 소모를 크게 절감 가능

비행체 개발과 경계층 천이

❖ 자연 층류(Natural Laminar Flow, NLF) 익형 기술

- 층류 경계층 유지를 통한 항력 저감 목적
- NLF 익형의 설계와 적용
- 항공기 저항력 날개 개념 설계 연구

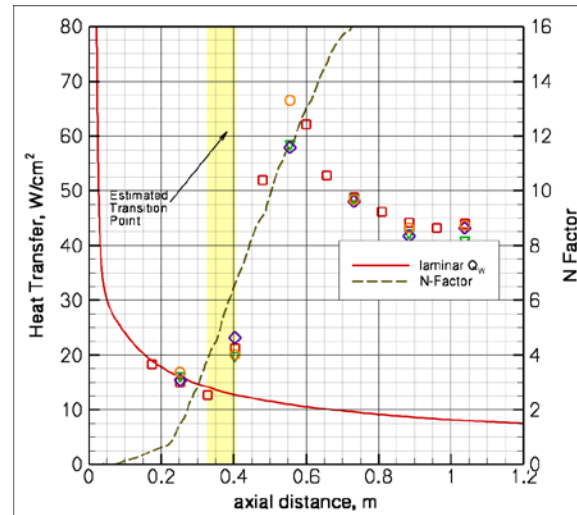
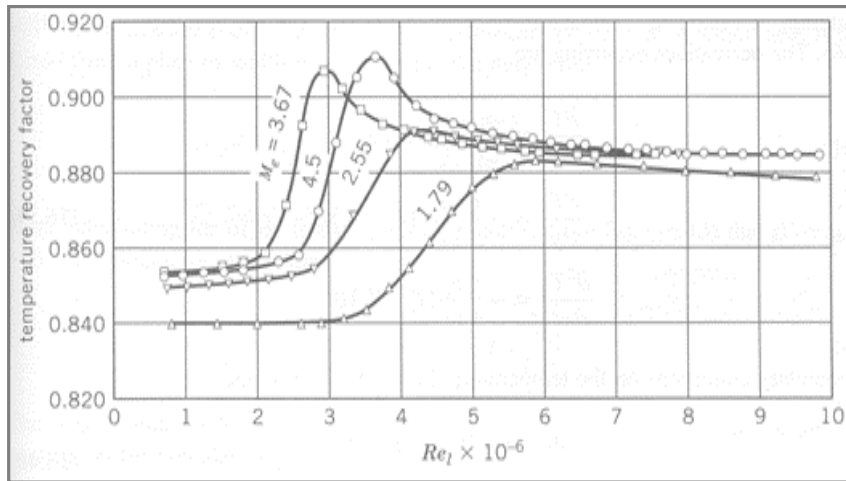


층류 익형 기술이 적용된 Honda Jet

비행체 개발과 경계층 천이

❖ 고속 비행체 - 외부 유동

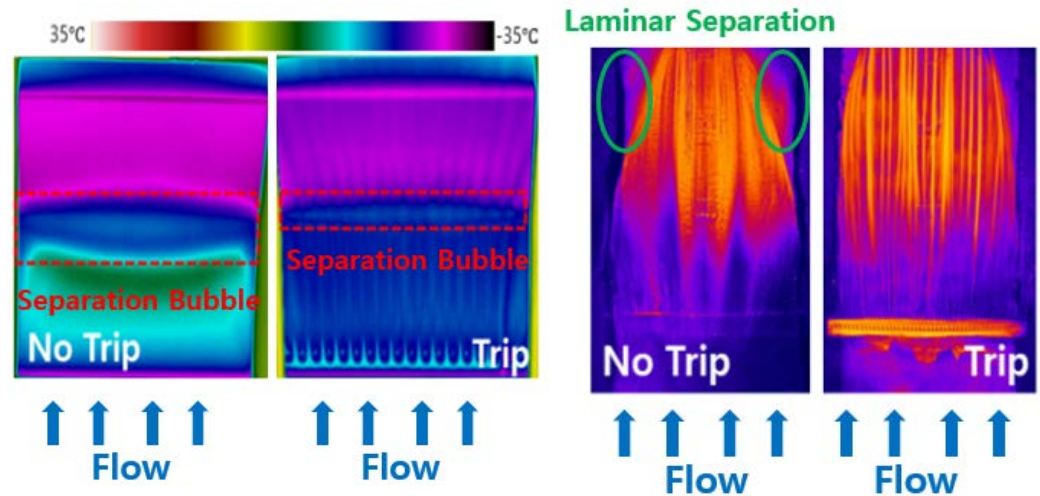
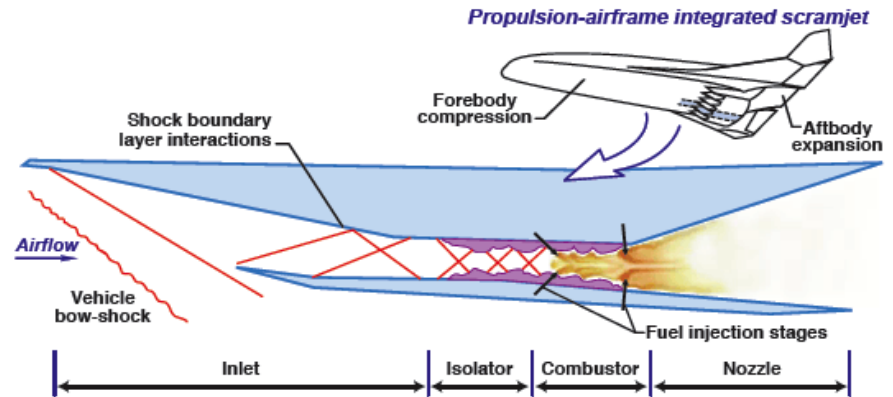
- 고속 경계층: 천이 지점 근방에서 가장 높은 공력 가열 발생
- 고속비행체 열공력 성능에 직접적인 영향을 주는 인자
- 열차폐 설계 / 열공력성능 예측에 천이 지점 예측 능력 필요



비행체 개발과 경계층 천이

❖ 고속 비행체 - 공기 흡입구 유동

- 고속 비행체 공기 흡입구 성능에 영향
- Example : DCR (RAM/SCRAM Jet)



비행체 개발과 경계층 천이

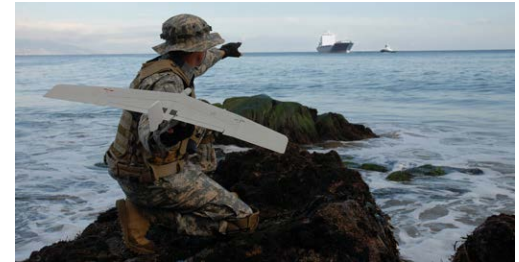
❖ 고속 유도무기

- 층류/난류 경계층의 투과 파장 특성이 다름 (AeroOptics)
- 유도무기: seeker window 위치에서의 경계층 상태 예측 필요

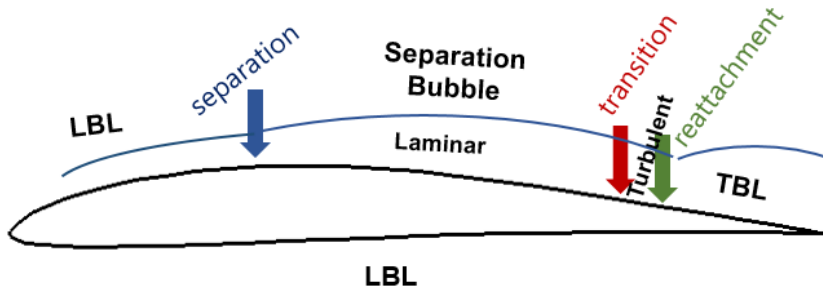


비행체 개발과 경계층 천이

❖ 무인기, 드론, 소형 항공기

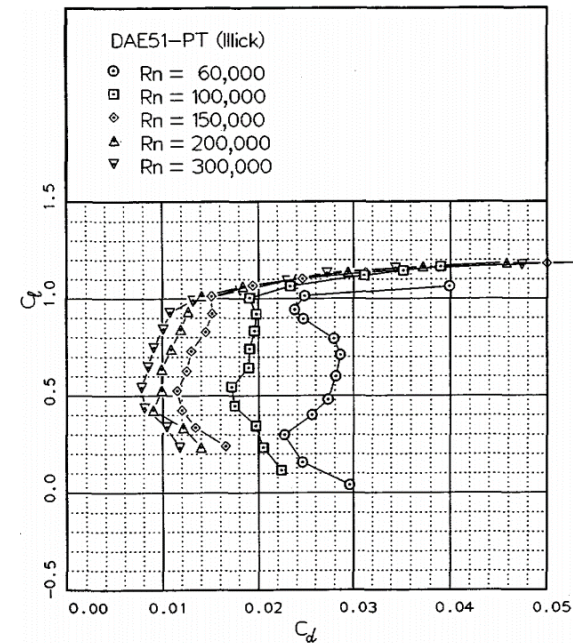


- 낮은 레이놀즈수 영역 진입 - 공력성능 저하



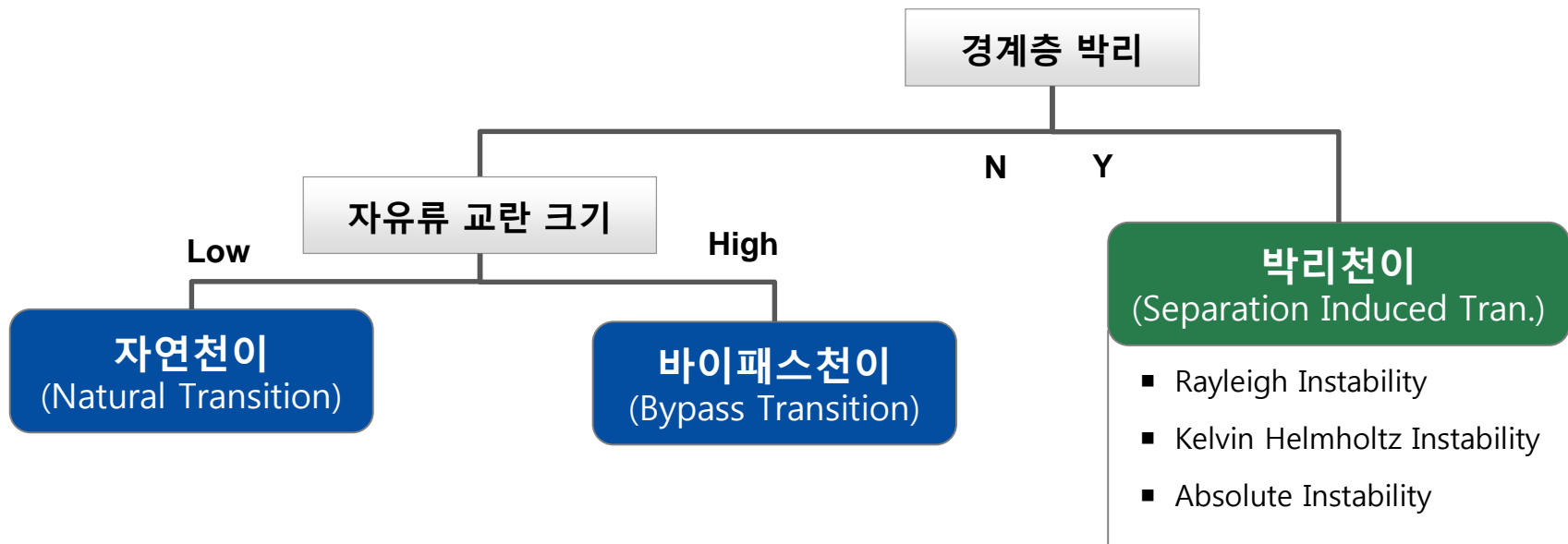
- 박리, 천이, 재부착 지점에 의한 공력 성능 민감도 증가

→ 천이 예측 신뢰성 확보, 설계 반영 필요

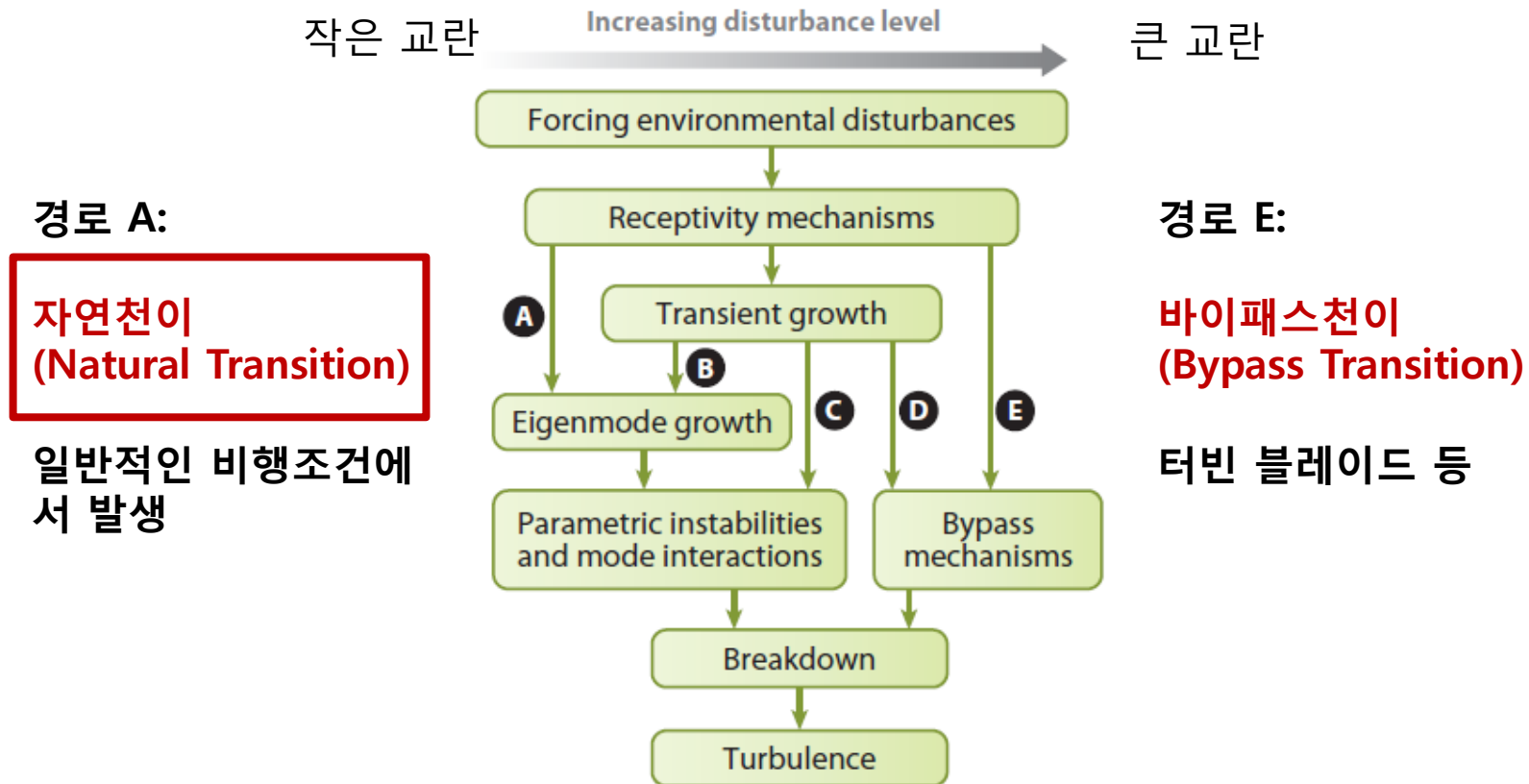


경계층 천이 발생 개념과 유형

경계층 천이 유형



경계층 주요 천이 유형 및 경로

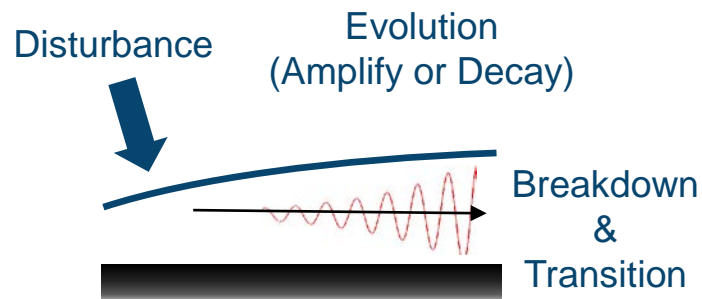
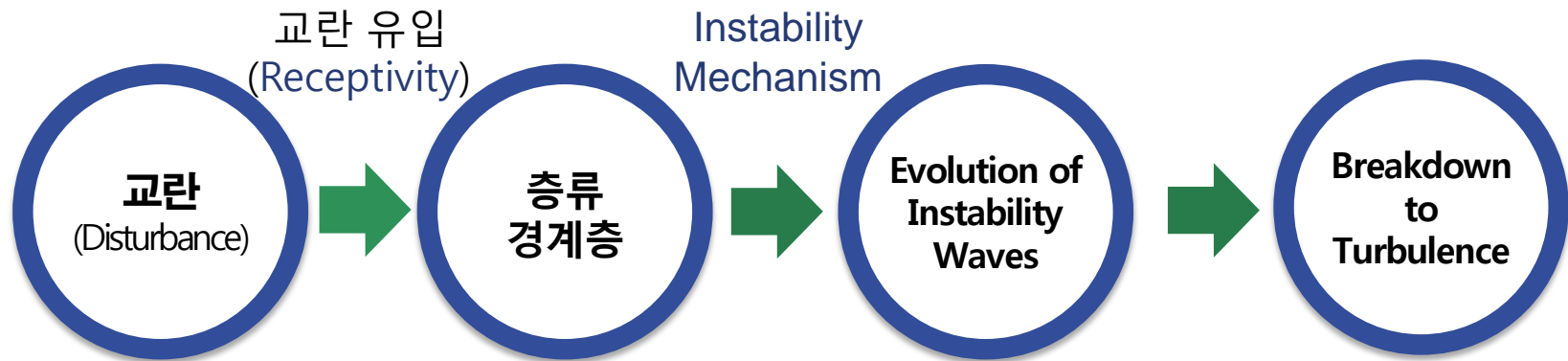


자연천이의 원인과 발생 개념

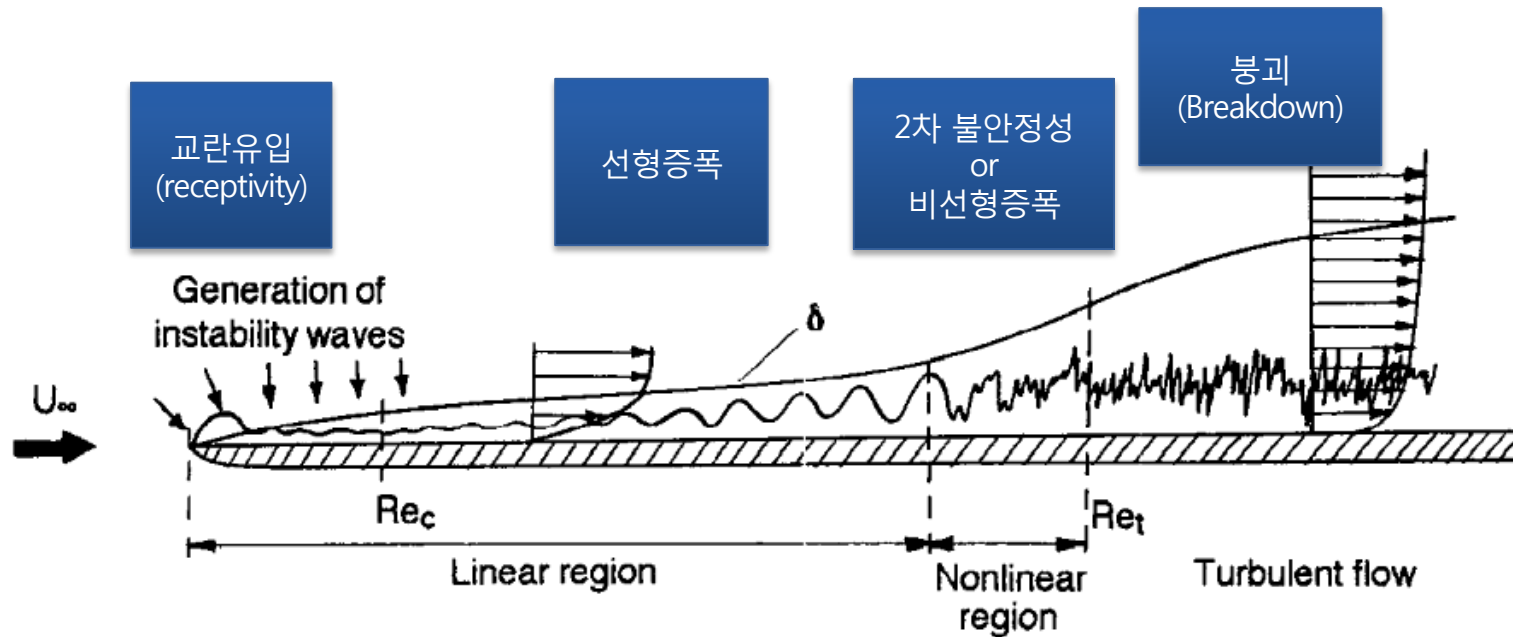
경계층 천이의 원인

Instability Waves & Instability Mechanisms

경계층 자연천이 발생 개념

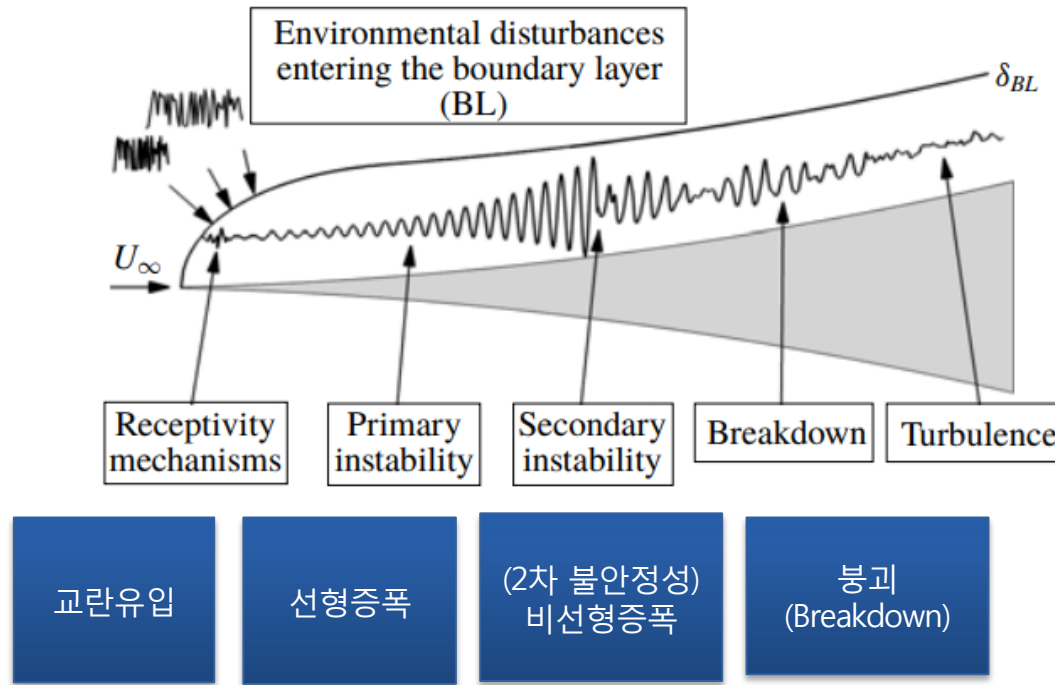


자연천이의 전형적인 발생 과정



- 자연천이는 불안정 메커니즘에 따라 다양한 유형으로 분류
- 천이 유형의 최종 결정 – 여러 메커니즘의 경쟁

자연천이의 전형적인 발생 과정



- 자연천이는 불안정 메커니즘에 따라 다양한 유형으로 분류
- 천이 유형의 최종 결정 – 여러 메커니즘의 경쟁

경계층 자연천이의 특징

1 다양한 영향 인자

교란 특성

- 교란 유형
- 주파수 / 파수
- 진폭 / 위상
- Wave Angle
- Receptivity

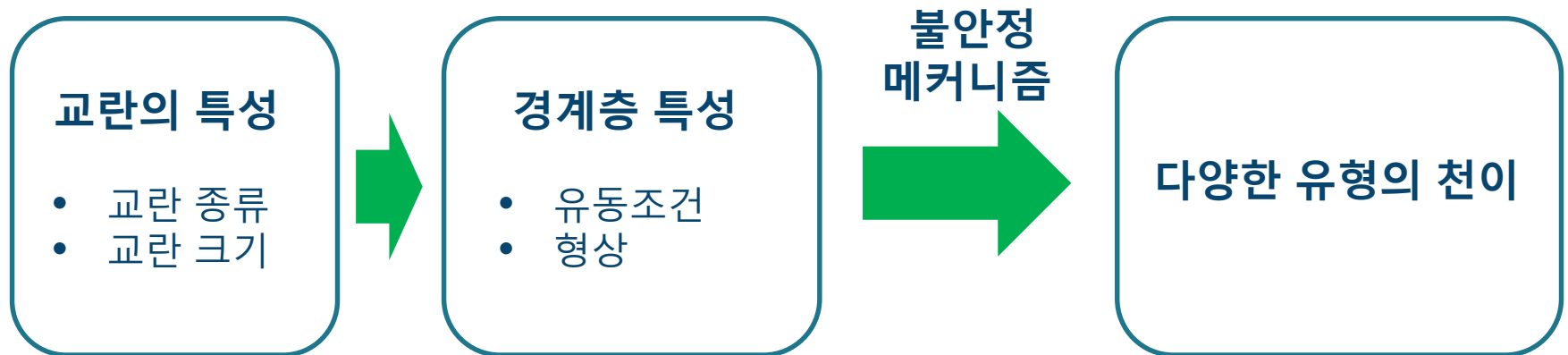
경계층 특성

- 유동 조건 (마하수, 레이놀즈수)
- 형상 및 곡률
- 압력구배
- 벽면 가열/냉각
- Suction & Blowing

2 다양한 불안정 메커니즘

천이 유형과 경로의 다양성

- ‘천이’ 는 포괄적인 상위 개념
- **다양한 발생 경로와 유형 존재**
- **경로 및 유형을 결정하는 인자는 매우 다양함**



자연천이의 주요 불안정성 메커니즘

2차원 아음속 – T-S Wave & T-S Instability

1 Tollmien-Schlichting Wave

- 아음속 경계층의 대표적인 Instability Wave
 - Tollmien (1929) & Schlichting (1933) / Schubauer & Skramstad (1947)
- 2차원 아음속 경계층 자연천이의 주 원인

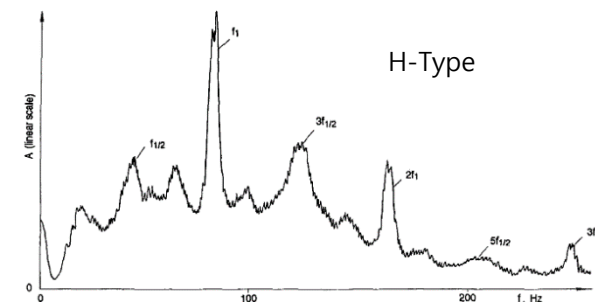
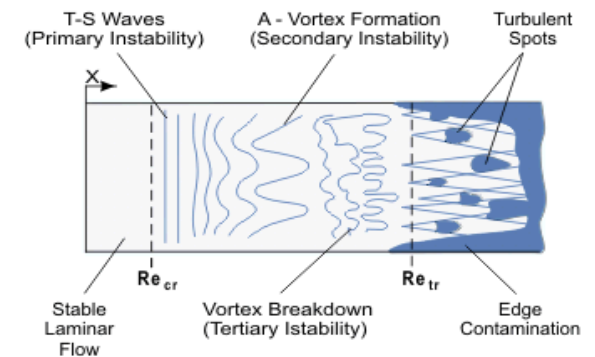
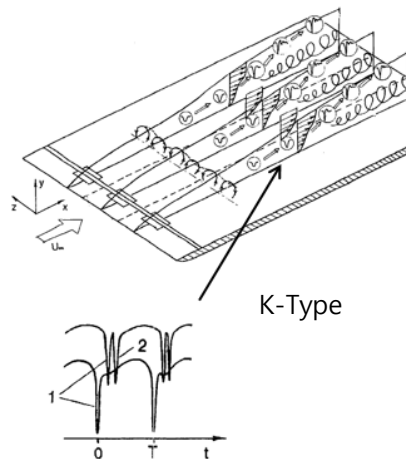
2 T-S 파 유발 천이

- 증폭된 T-S 파가 3차원적 구조로 발달 (2차불안정성/비선형)
- 인자에 따라 여러 형태의 최종 단계로 발현

T-S 파 천이

Fundamental Breakdown
(K-Type)

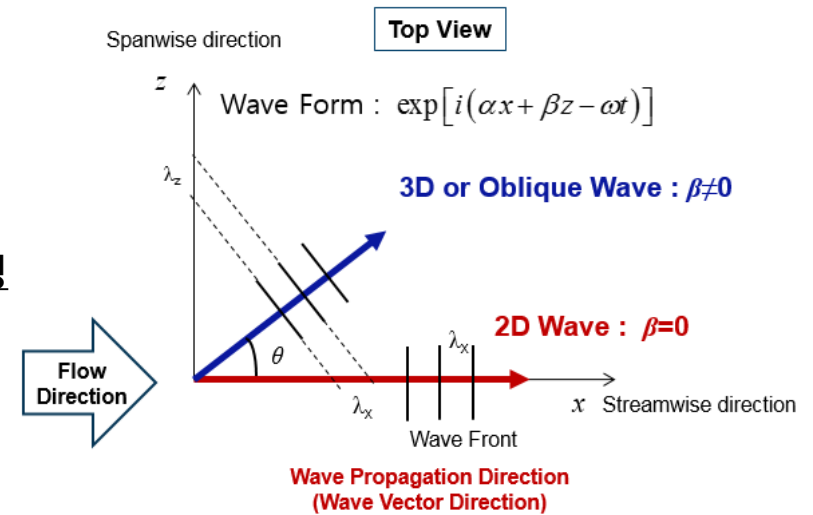
Subharmonic Breakdown
(H-Type or N-Type)



2차원 초음속 – Oblique Wave & Oblique Breakdown

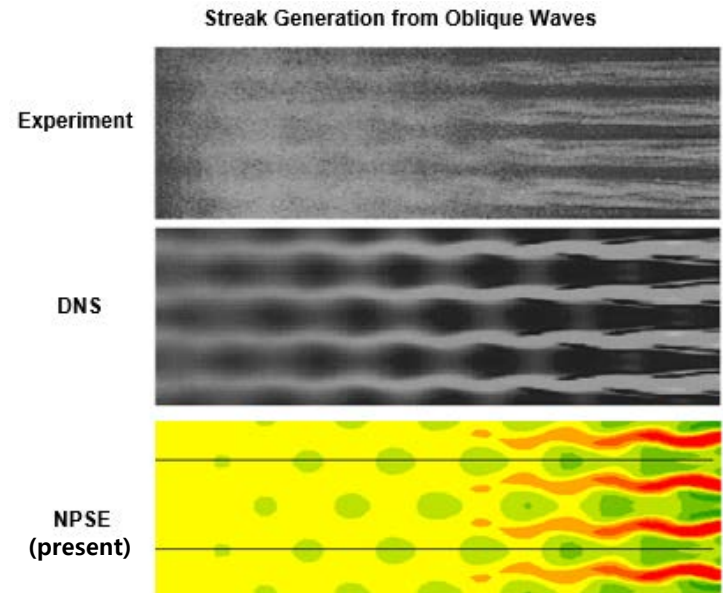
1 Oblique Wave

- 유동 방향에 대해 비스듬하게 진행하는 불안정 파
- 마하수 3~4 이하 초음속 경계층에서 가장 높은 불안정성



2 Oblique Mode Breakdown

- 2차원 초음속 경계층 자연천이의 주 원인
 - 선형 증폭된 한 쌍의 경사파가 비선형 상호작용
 - 주유동 방향 와류(streaks) 생성 : 2차 불안정성 및 붕괴



2차원 극초음속 – Mack's 2nd Mode Instability

1 Mack's 2nd Mode

- 2차원 및 축 대칭 초고속 경계층에서 가장 불안정한 모드
 - 경계층 내 pressure wave 형태 (acoustic nature)
 - 안정성 이론(LST) 및 실험적 연구로 규명

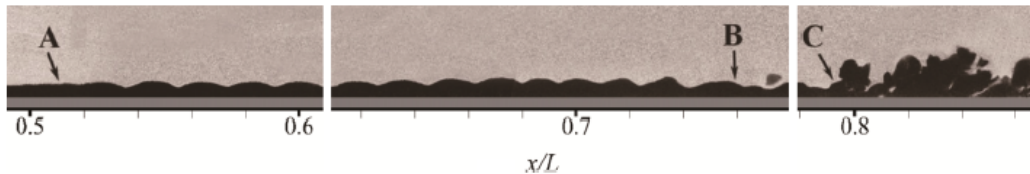
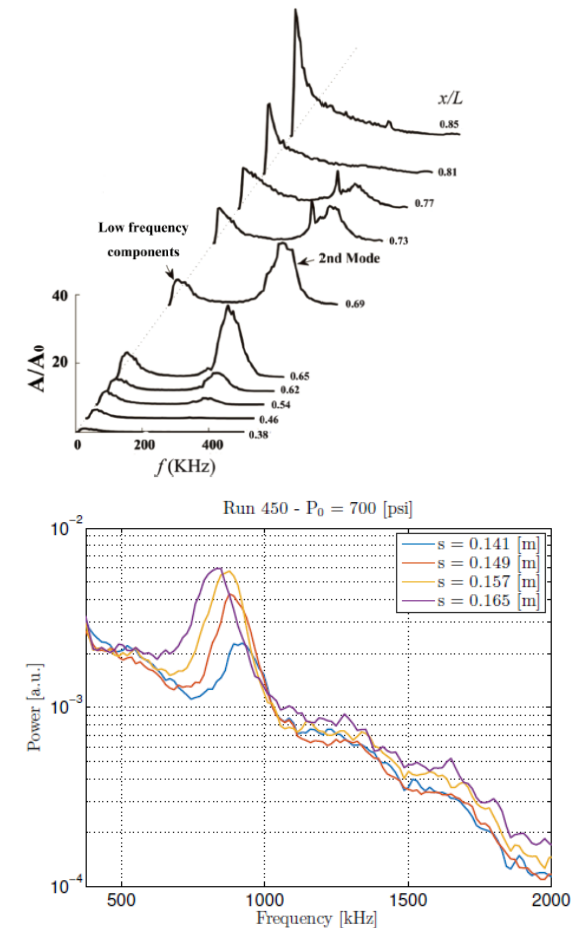


FIG. 2. Rayleigh-scattering visualization of transition stages. Independent measurements over three successive sections are spliced together. The flow is from left to right. Arrow A: appearance of second mode; B: second mode decays to almost zero; and C: onset of turbulence. The vertical gaps indicate where a splice occurs. $Re_{unit} = 9.7 \times 10^6$ per meter.



Figure 7. Run 450 ($P_0 = 706.3$ psi) enhanced schlieren detail displaying (left to right) laminar flow with rope-like second mode instability features, an apparently quiescent region, and a turbulent region. The boundary layer in this image, and in Figure 8 is 6 pixels or ~ 0.50 mm thick, and the viewing area is $s = 0.1525\text{--}0.2024$ m.

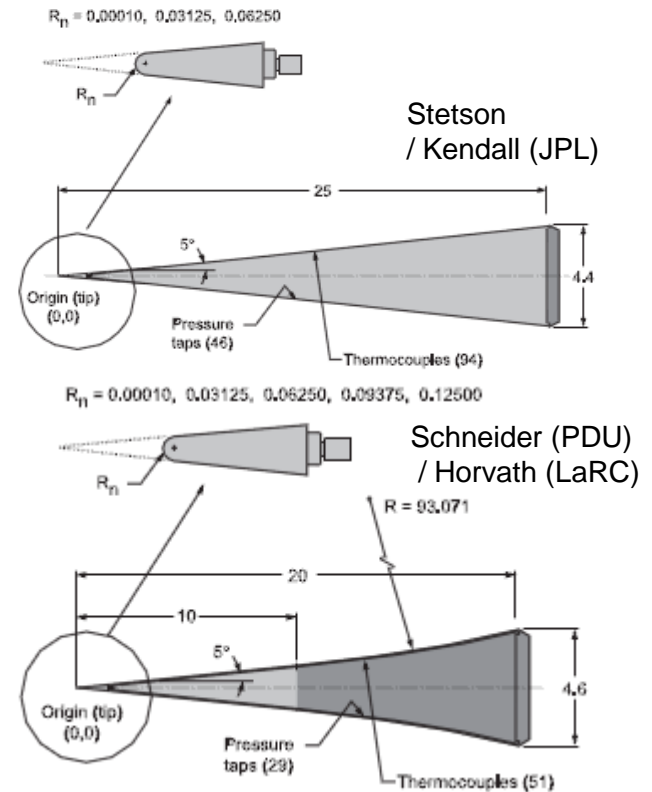
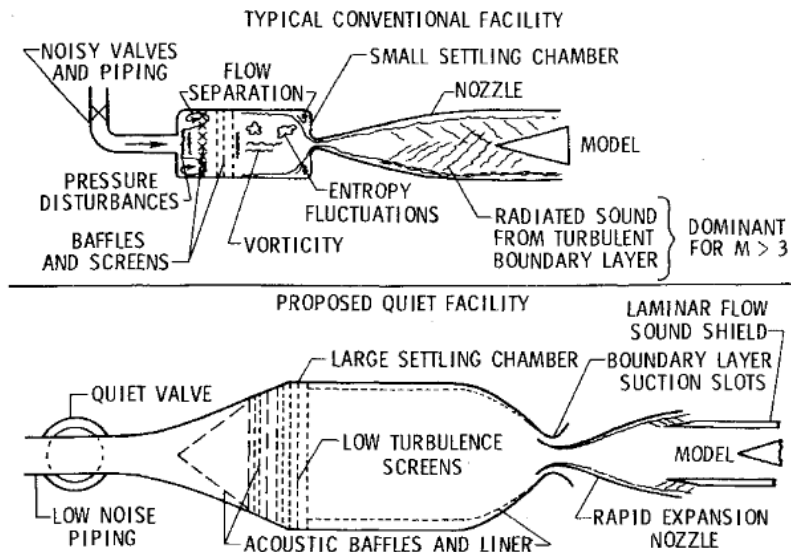
- 자유류 소음 수준이 천이에 직접적인 영향
 - 관련 풍동시험 시 소음 관리 매우 중요



2차원 극초음속 – Mack's 2nd Mode Instability

- 자유류 소음 수준이 천이에 직접적인 영향

- 관련 풍동시험 시 소음 관리 매우 중요



3차원 유동 – Crossflow Instability

1 Crossflow Instability (CFI)

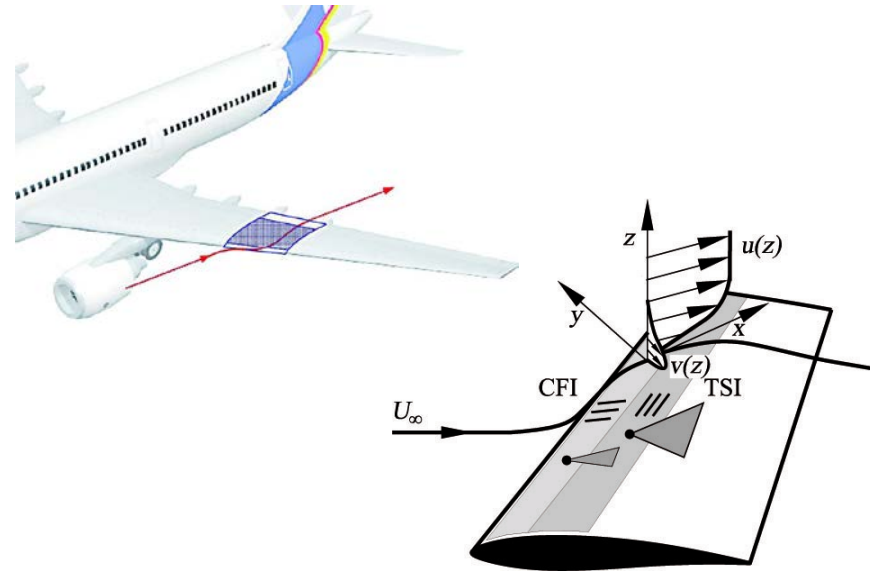
- 후퇴날개 등 3차원 경계층 내에 횡단속도 성분 존재
- Inflectional instability에 의한 불안정성 발생

횡단유동 불안정성

Traveling Wave

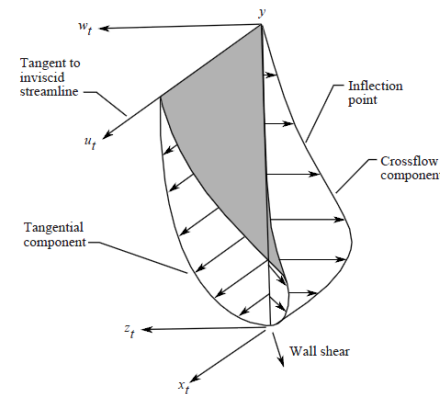
Stationary Wave

Crossflow Vortices

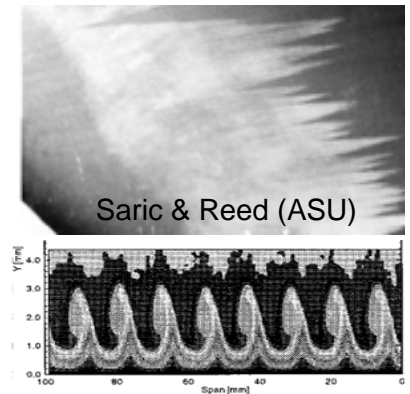


2 Crossflow Transition

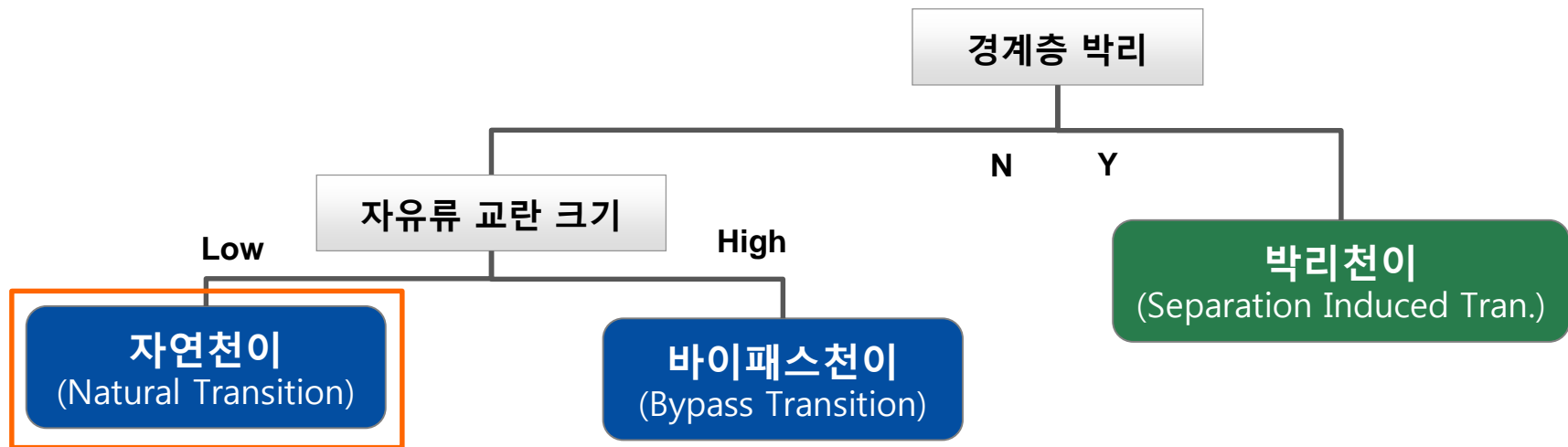
- 3차원 경계층의 주요 천이 원인 중 하나
 - 횡단유동 강도 증가 시 빠른 천이 유발



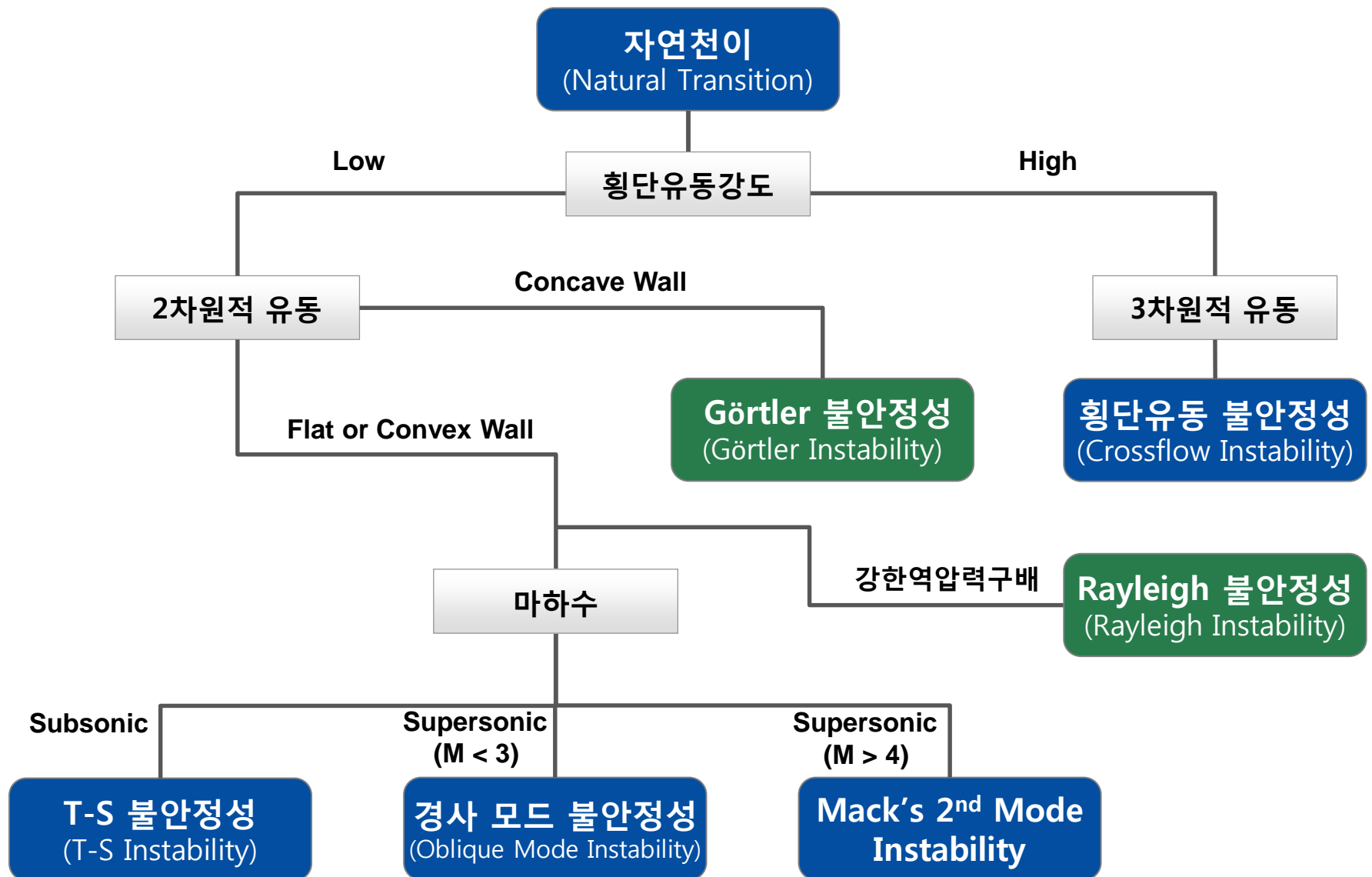
Crossflow vortices



경계층 천이 유형



자연천이의 불안정성 유형



천이 경로의 결정과 발생



- 주어진 경계층, 유동조건, 교란에 대해 가장 높은 불안정성으로 결정
- 인자가 메커니즘 별로 각기 다른 효과로 작용 가능
- 물리 특성과 인자의 영향 파악이 필요

경계층 천이 연구의 필요성

- 항력저감/공력성능 향상



- 열차폐 설계



- 열공력/흡입성능 향상



- 임무장비 성능 향상



경계층 천이 연구의 필요성

- 비전통적 비행체 개발에서 경계층 천이의 중요성 및 영향 증가
- 열공력 성능 및 임무성능에 대한 비중 증가 (Major Factor)

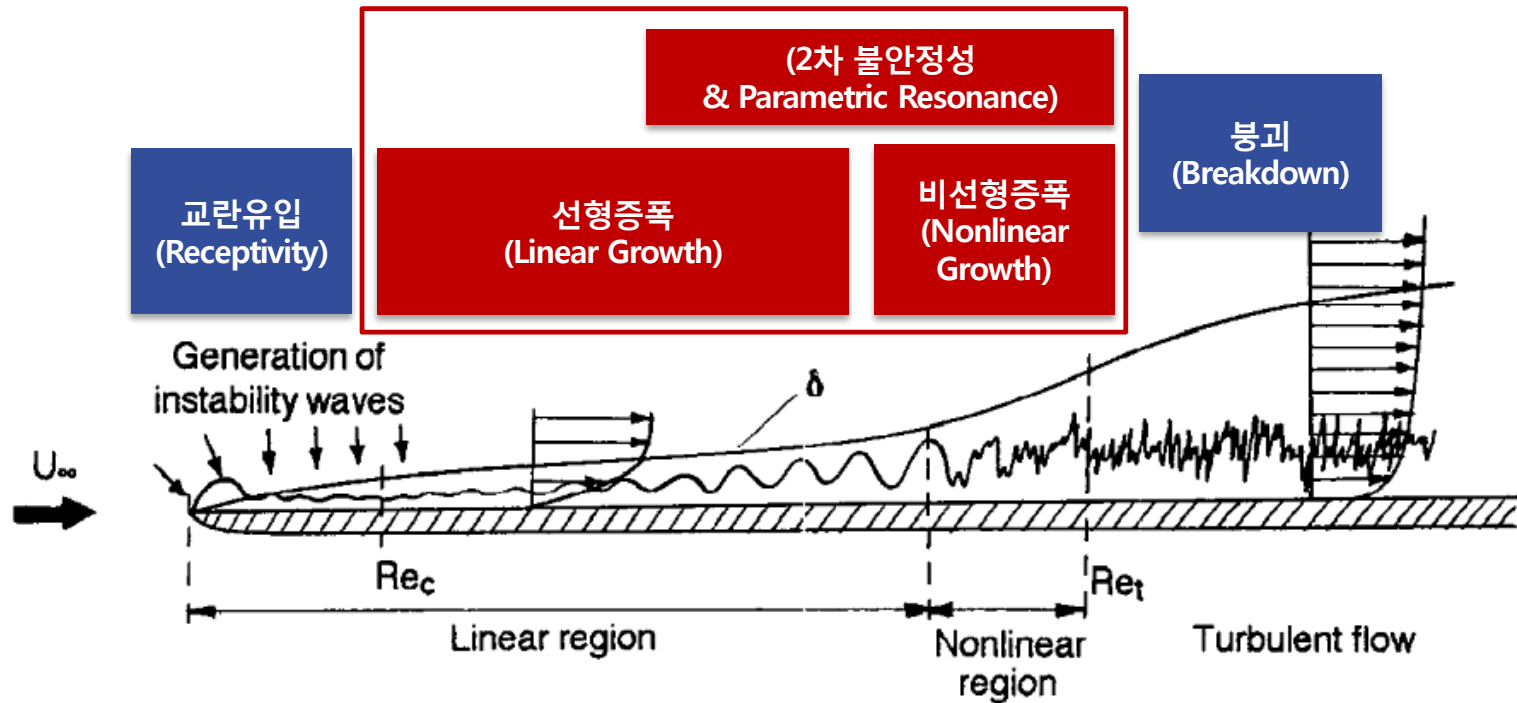
- 천이 예측 기법 또는 예측 모델(CFD)이 요구됨
- 신뢰도 높은 기법 / 모델 개발을 위해서는

천이현상의 물리적 이해와 특성 분석, 원인 규명 필요

안정성 해석의 기본 개념

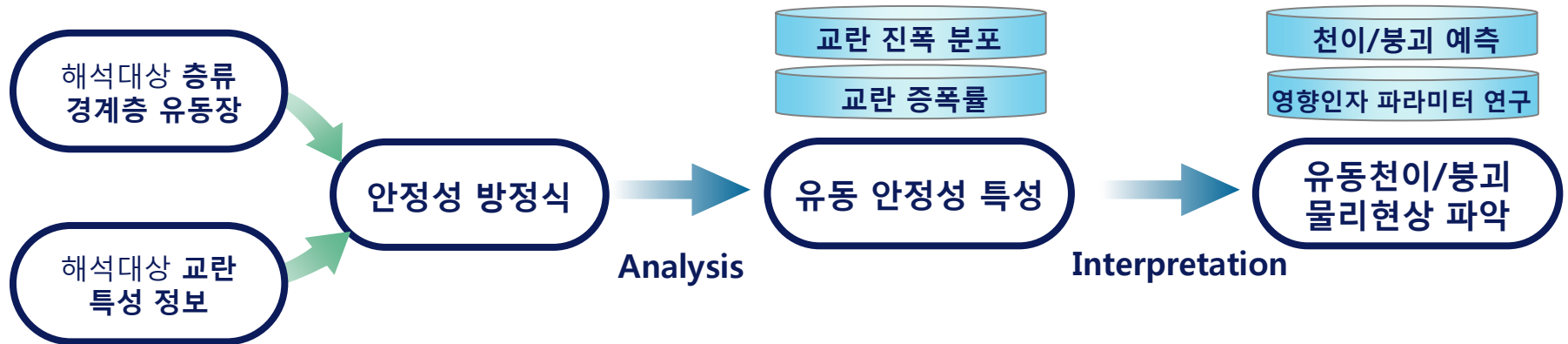
안정성 연구의 개념

- 교란이 얼마나 증폭될 것인지(경계층이 얼마나 불안정한지) 해석 (분석)
- 교란주파수, 위치마다 특성(경계층의 response)이 다름



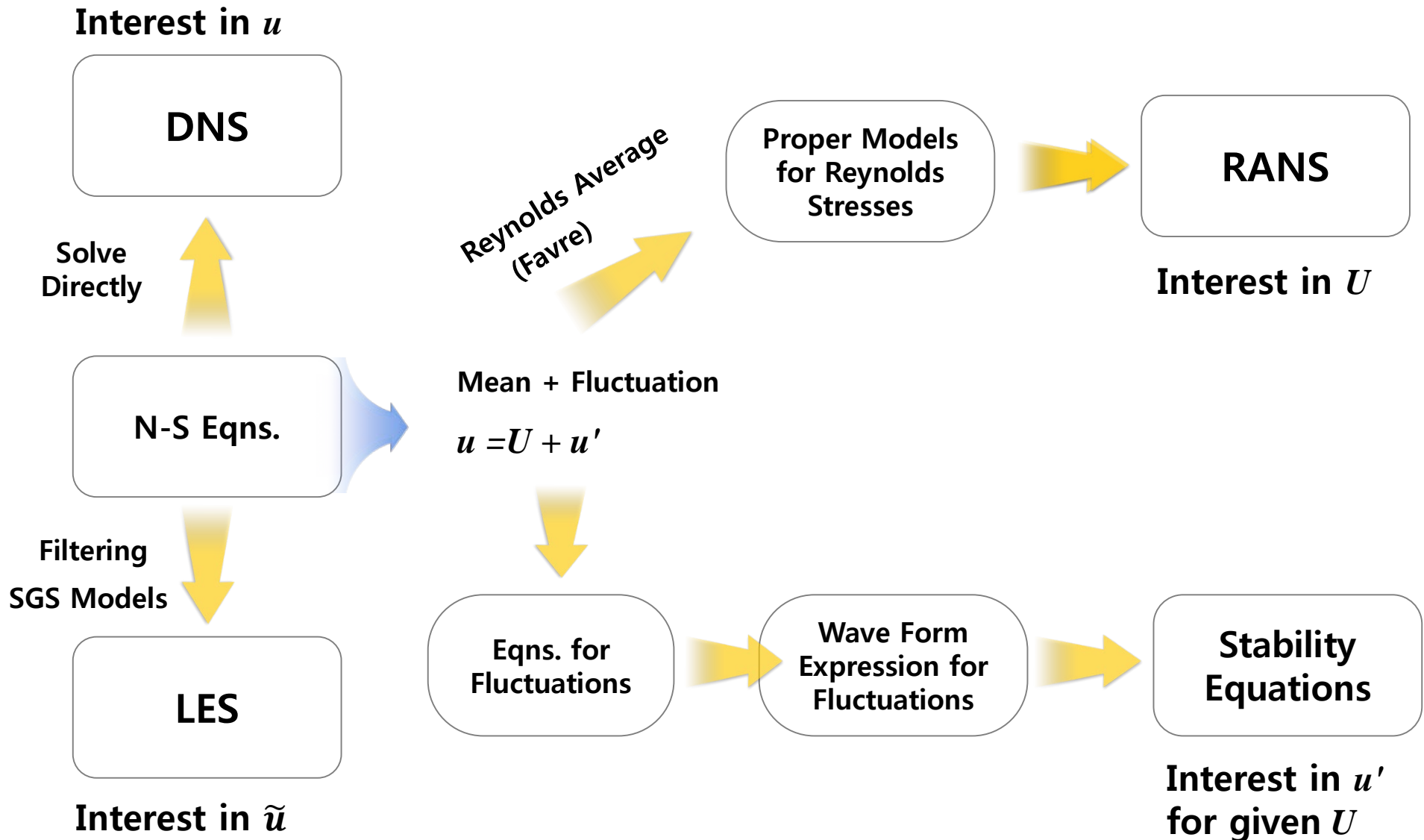
안정성 해석

- 천이 현상의 물리적 특성 규명을 위한 이론 연구분야
- 불안정성 특성 규명 / 주요인자 식별, 영향 분석, 민감도 파악

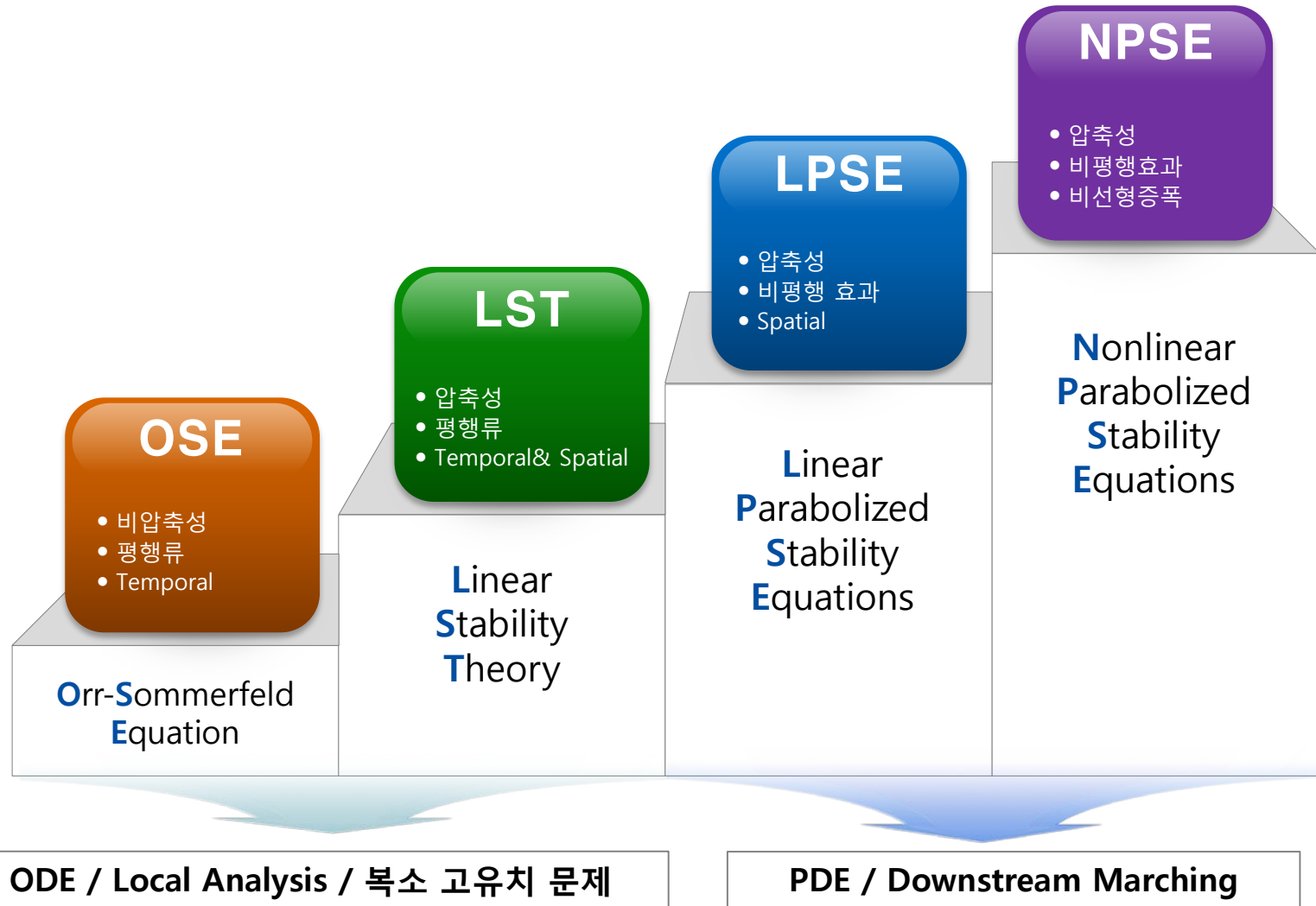


- 해석 대상인 층류 유동장 데이터를 우선적으로 획득 필요

안정성 방정식



안정성 방정식의 종류



안정성 해석 코드 개발 및 검증

❖ 자체 개발 통합 안정성 해석 코드

- 3차원 일반좌표계 기반 Formulation
- 아음속/초음속/극초음속, 선형/비선형 안정성 해석 가능
- NASA Langley 개발 LASTRAC (코드 비공개)와 동일 해석능력 검증
- Comparable Code

LASTRAC (NASA)

PSE-Chem (Univ. Minnesota)

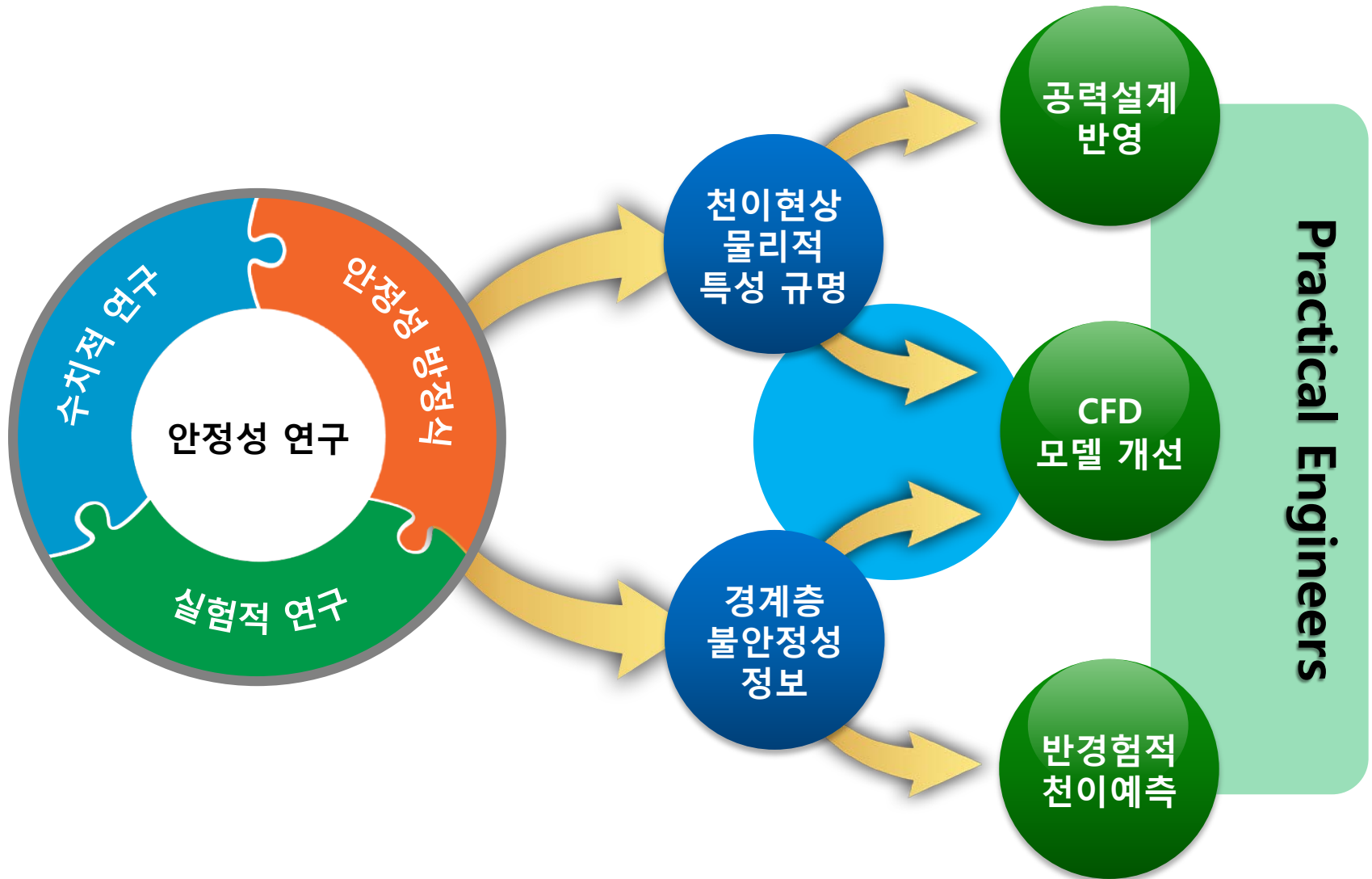
EPIC (Univ. Texas A&M)

JoHKeR (Univ. Delaware)

DEKAF (VKI)



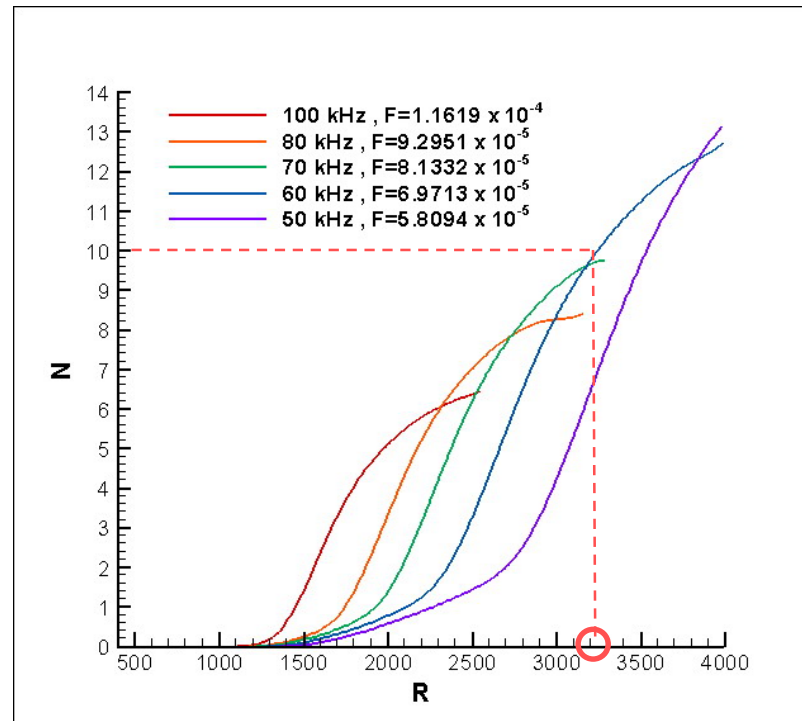
안정성 해석의 역할



안정성 해석의 활용 예 : 반경험적 천이지점 예측

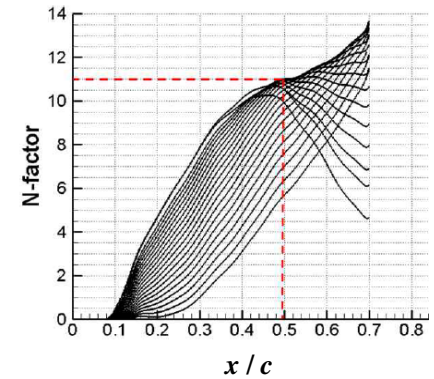
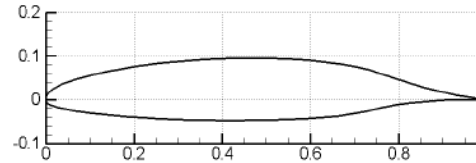
e^N-method

- Practical Engineering Prediction Method
- N-Factor 값이 특정 값에 도달하면 천이가 발생한다는 가정으로 천이지점 예측
- 천이발생 N 값은 시험 데이터와의 correlation으로 결정 → **반경험적 예측 방법**
(자유류 유질 (시험 설비 또는 비행조건) 및 불안정성 메커니즘에 따라 다름)

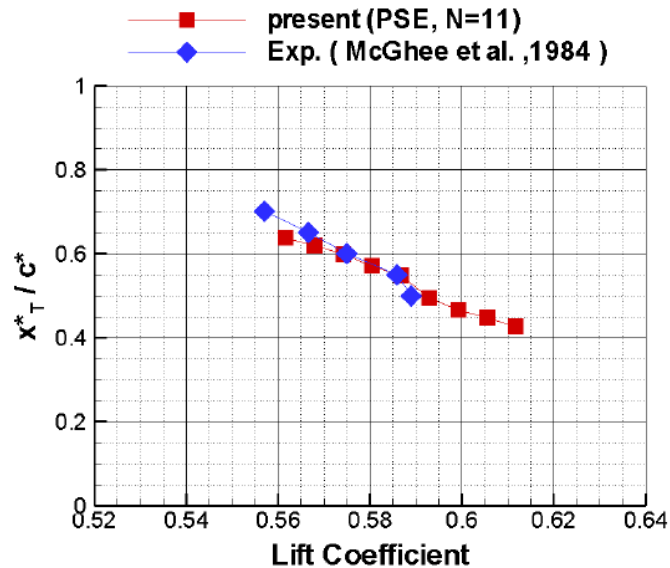


익형 경계층

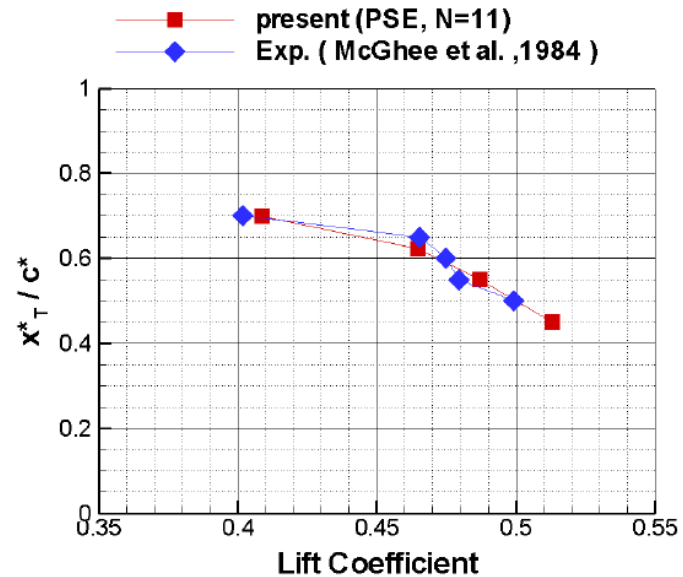
❖ Example: NLF(1)-0414F



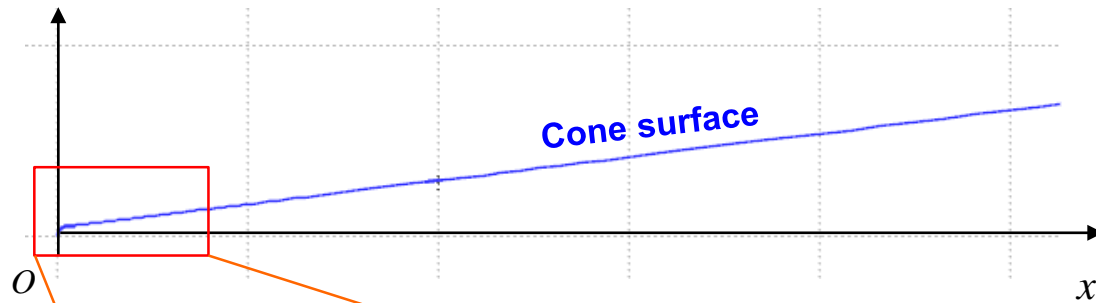
[$Re_c = 6 \times 10^6$]



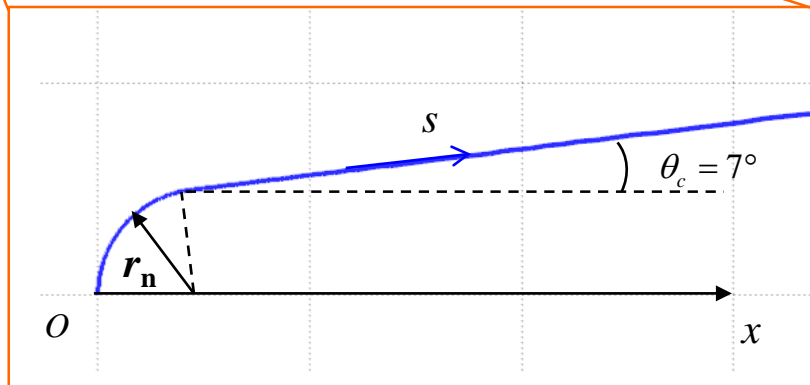
[$Re_c = 10 \times 10^6$]



축대칭 고속 경계층 – Blunt Cone



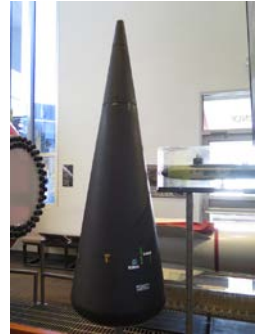
Enlarged view around nose tip



r_n : nose radius

θ_c : cone half-angle

s : distance along the cone surface



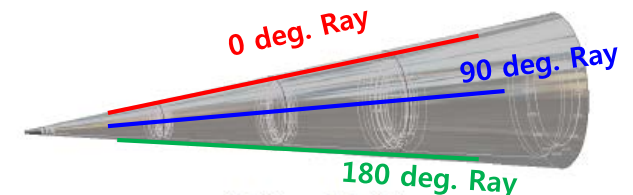
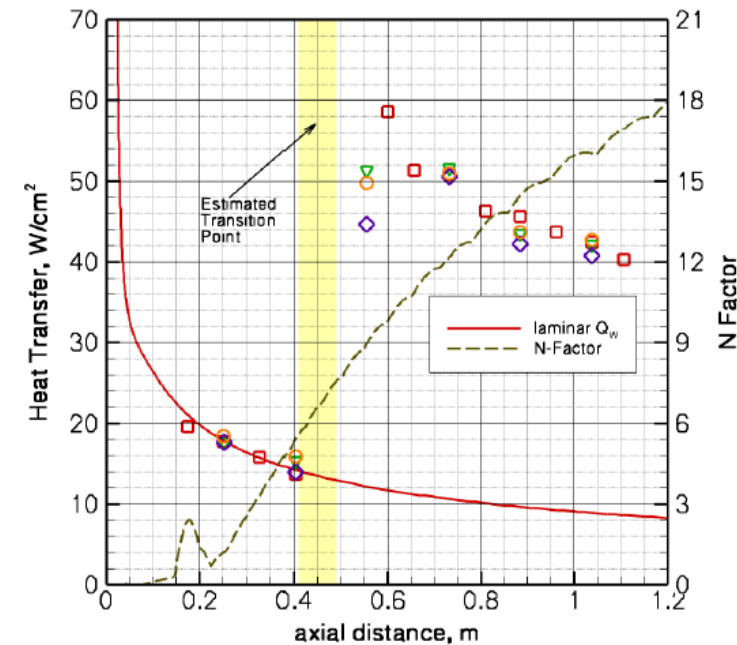
축대칭 고속 경계층 – Blunt Cone

❖ Test Conditions for HIFiRE-1 at CUBRC LENS-I

Table 1 Test conditions for the Mach 7 HIFiRE/FRESH experiment simulations

Test conditions	Units	Run 4	Run 5	Run 7	Run 8
H_0	MJ/kg	2.08	2.62	2.62	2.09
M_∞	—	6.58	7.14	7.15	6.58
T_∞	K	213.0	231.8	231.1	214.0
ρ_∞	kg/m ³	0.12504	0.06957	0.07060	0.12568
Re_∞	1/m	1.66e + 7	9.76e + 6	9.92e + 6	1.67e + 7
u_∞	m/s	1928	2184	2185	1933
T_{wall}	K	300.1	299.3	301.0	301.3
Nose radius	mm	2.5	2.5	5.0	5.0

Example Results for Run 5

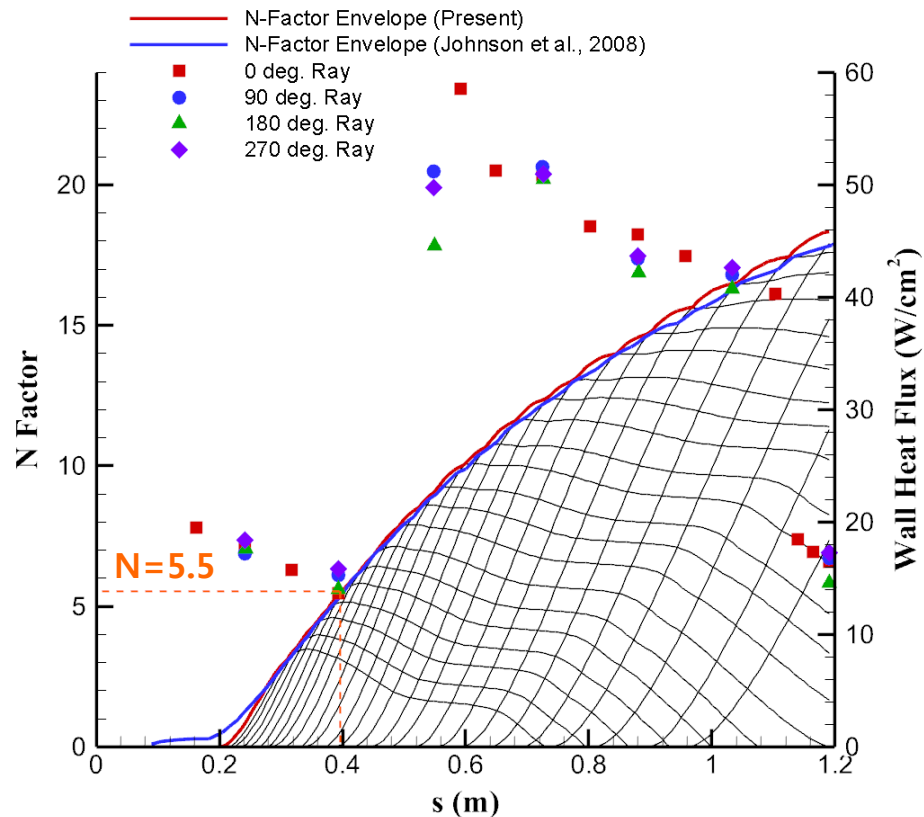


축대칭 고속 경계층 – Blunt Cone

❖ Run 5 : $r_n = 2.5 \text{ mm}$, $M_\infty = 7.14$, $Re_\infty = 9.76 \times 10^6/\text{m}$, $T_{\text{wall}} = 299.3\text{K}$

- Mack's 2nd Mode N-Factor Curves

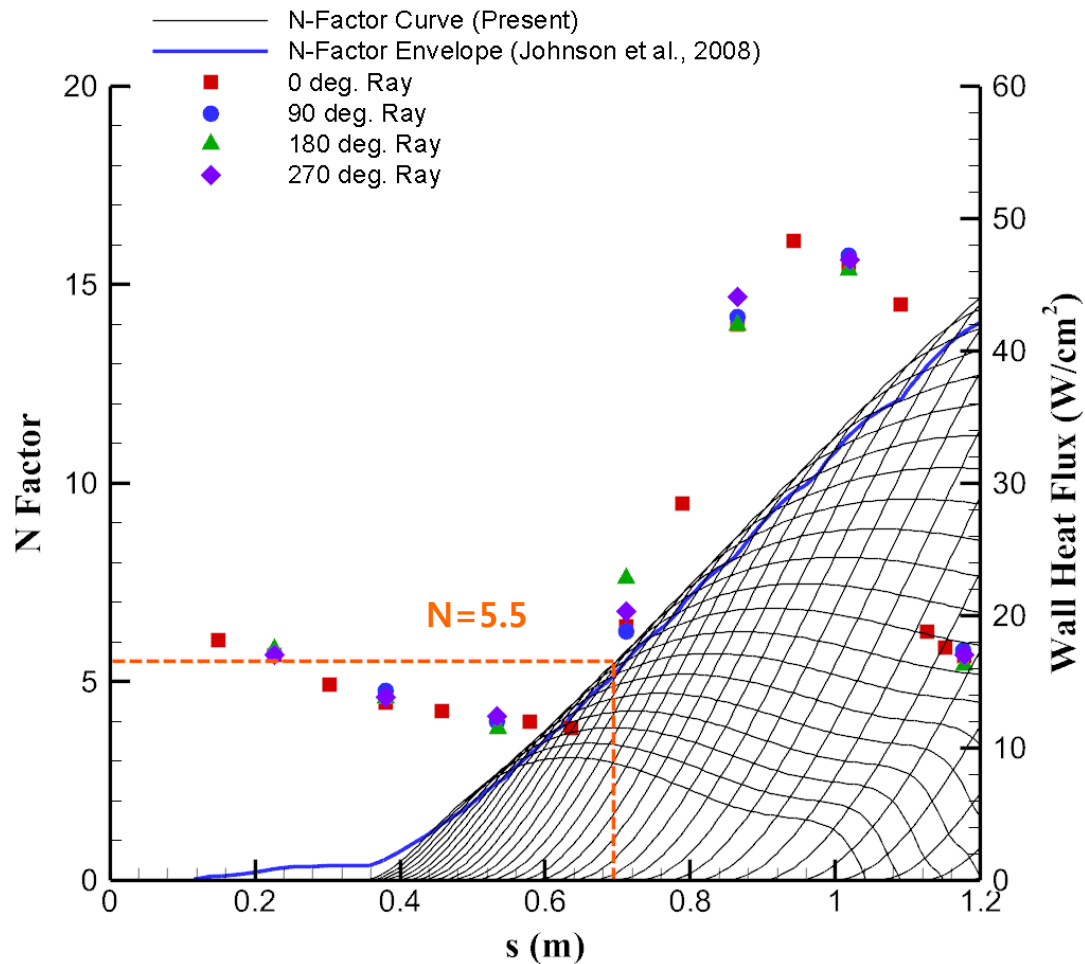
: 주파수 $F = 240 - 120$ (interval of 5)



축대칭 고속 경계층 – Blunt Cone

❖ Run 7 : $r_n = 5.0 \text{ mm}$, $M_\infty = 7.15$, $Re_\infty = 9.92 \times 10^6 / \text{m}$, $T_{\text{wall}} = 301.0 \text{ K}$

: 주파수 $F = 180 - 100$ (interval of 2.5)

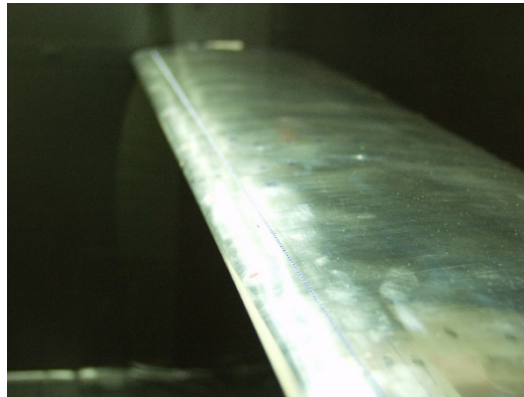
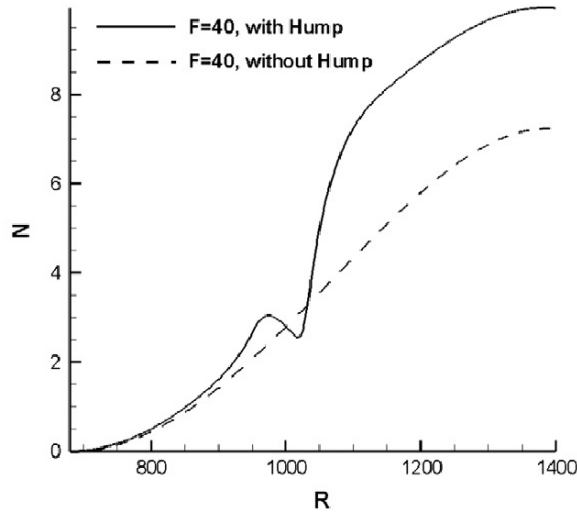
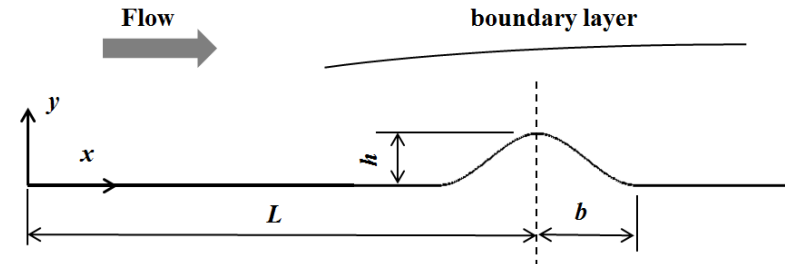


안정성 해석의 활용 예 : Roughness Element 영향 연구

Effect of Roughness Element

1 일반적인 Roughness 효과

- 아음속과 초음속 경계층 불안정성을 증가시킴
→ 천이를 앞당김
- 다수의 안정성 해석, 시험으로부터 확인
→ 풍동시험의 trip dot/tape 부착



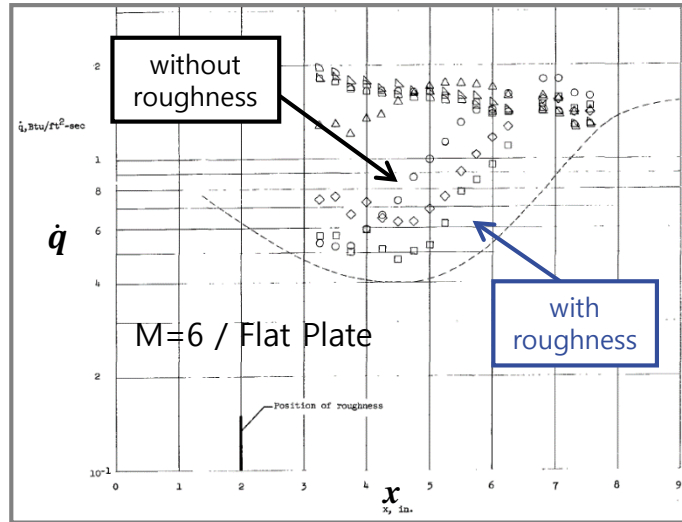
D. Park and S.O. Park. "Linear and non-linear stability analysis of incompressible boundary layer over a two-dimensional hump," Computers and Fluids Vol. 73 pp.80-96, 2013.

D. Park and S.O. Park. "Influence of two-dimensional smooth humps on linear and non-linear instability of a supersonic boundary layer," Computers and Fluids Vol. 79 pp.140-149, 2013.

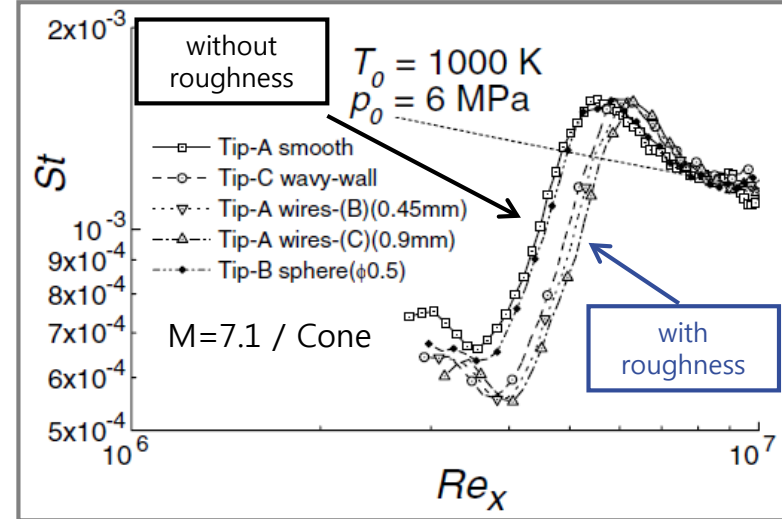
Effect of Roughness Element

2 Roughness에 의한 천이 지연 현상

- 마하수 5이상의 고속 경계층 실험에서 roughness에 의한 천이 지연 현상 관찰



from Holloway & Sterrett (1964)



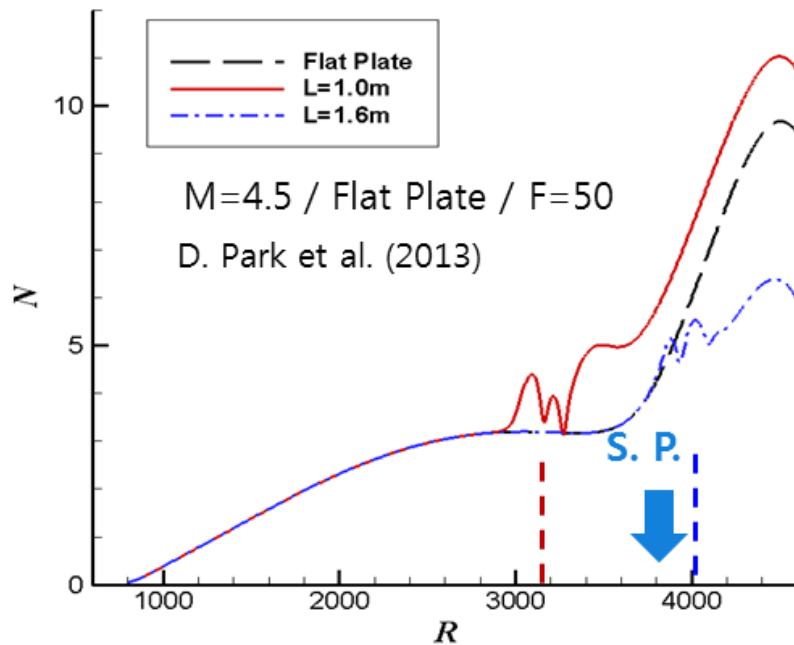
from Fujii (2006)

- 특정 조건에서 발생

Effect of Roughness Element

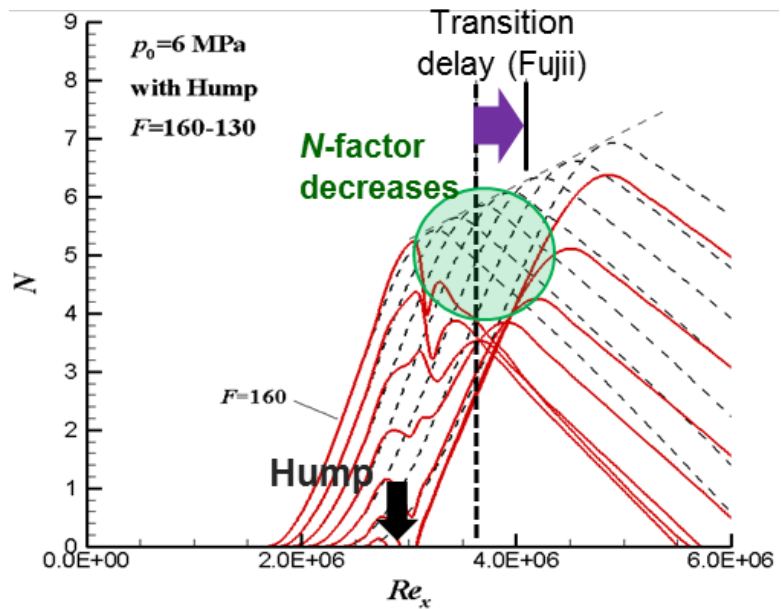
3 Mode S의 안정화

- Roughness가 Synchronization Point 하류에 위치할 경우 mode S가 안정화 됨을 확인
- 극초음속 경계층은 roughness 부착에 의해 천이 지연현상 발생 가능



$M=7.1$ / Sharp Cone

D. Park et al. (2013)



D. Park and S.O Park "Study on Stabilization and Destabilization Effect of a Smooth Hump in Hypersonic Boundary Layer by PSE," AIAA 2013-2742, 2013.

D. Park and S.O Park "Study of effect of a smooth hump on hypersonic boundary layer instability," Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Vol. 30, pp. 543-563, 2016.

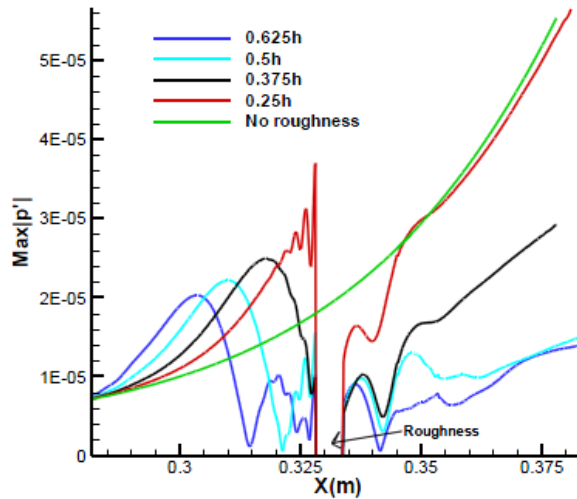
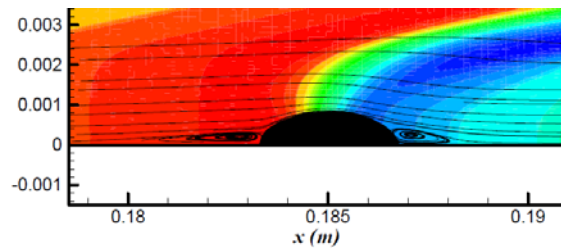


PUSAN
NATIONAL UNIVERSITY

Effect of Roughness Element

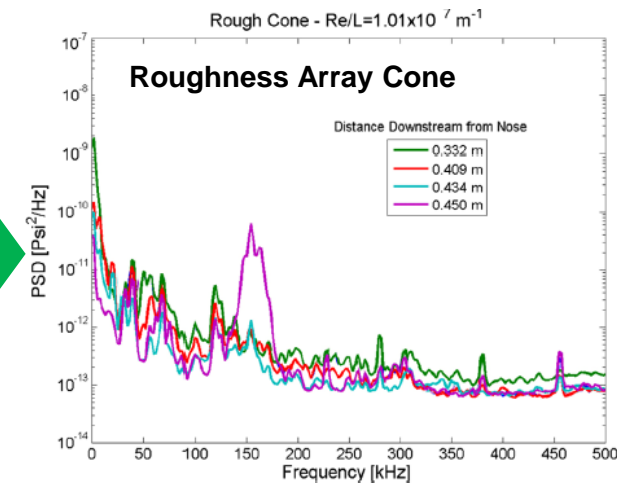
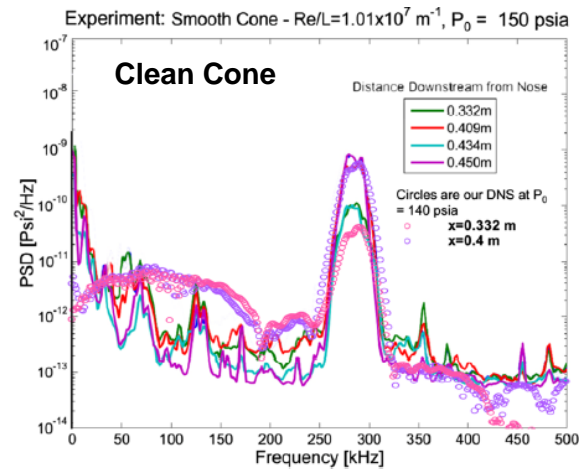
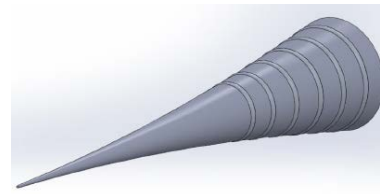
- UCLA: DNS로 안정화 효과 확인

Zhong et al. (2015)

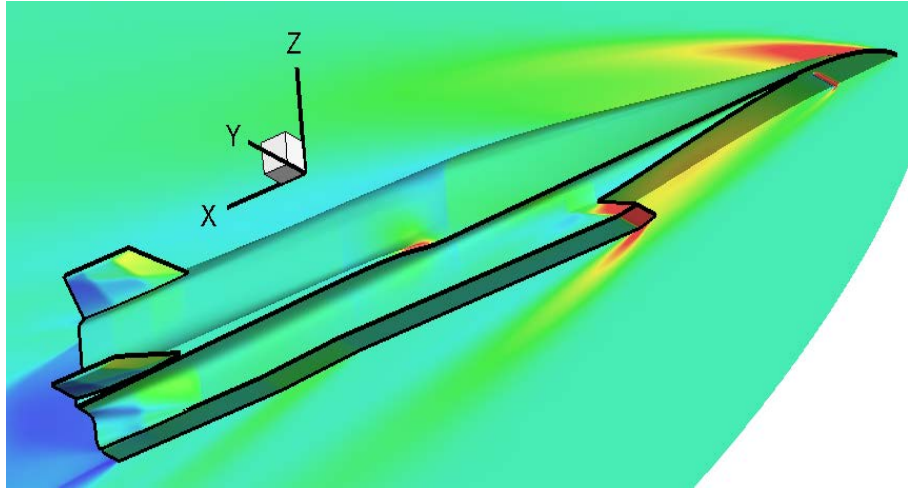


- Purdue Univ. : M=6 flared cone 실험으로 확인

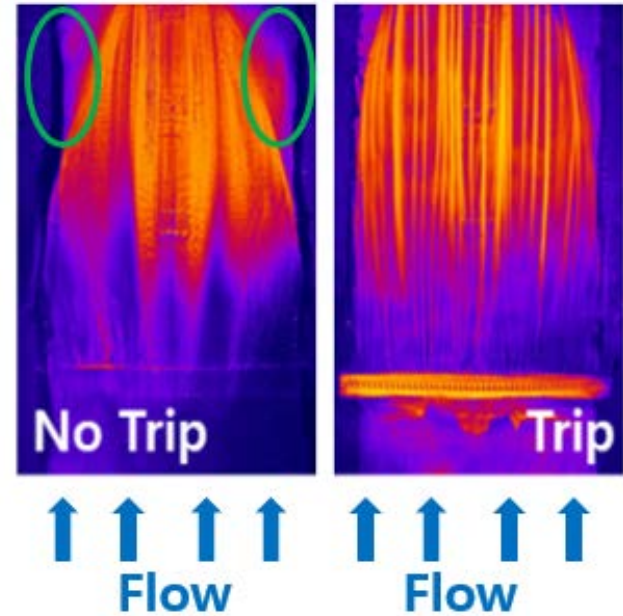
Fong et al. (2015)



Effect of Roughness Element



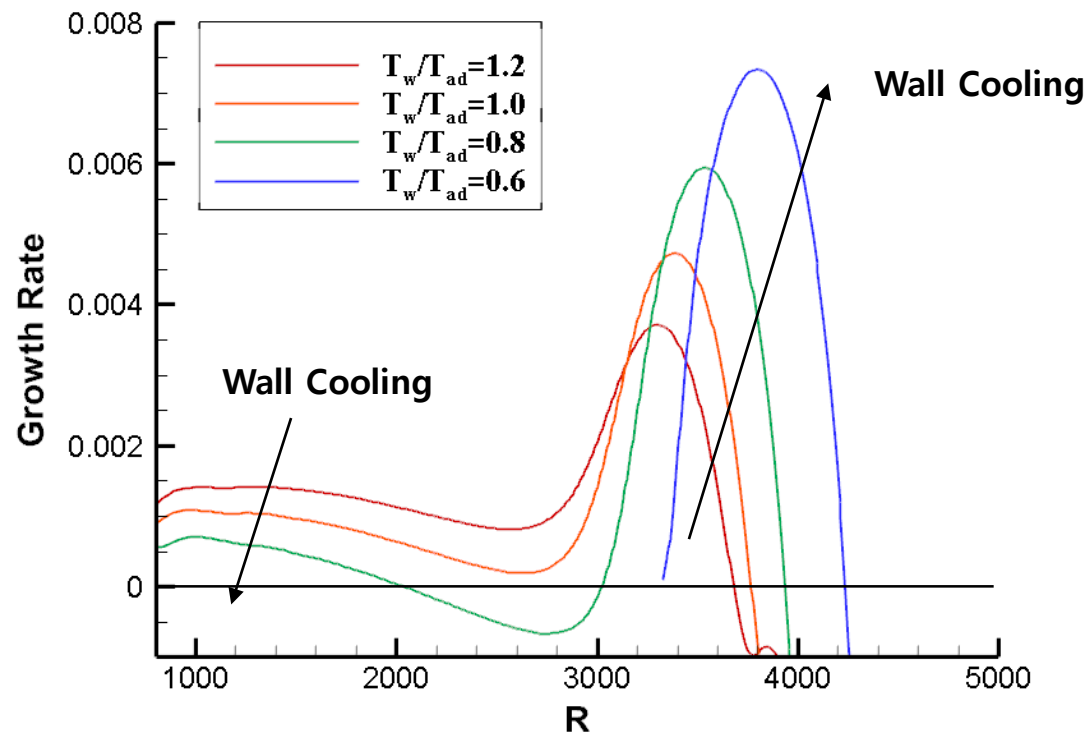
Laminar Separation



안정성 해석의 활용 예 : 경계층 불안정성 파라미터 연구

표면 온도 조건에 따른 불안정성 변화

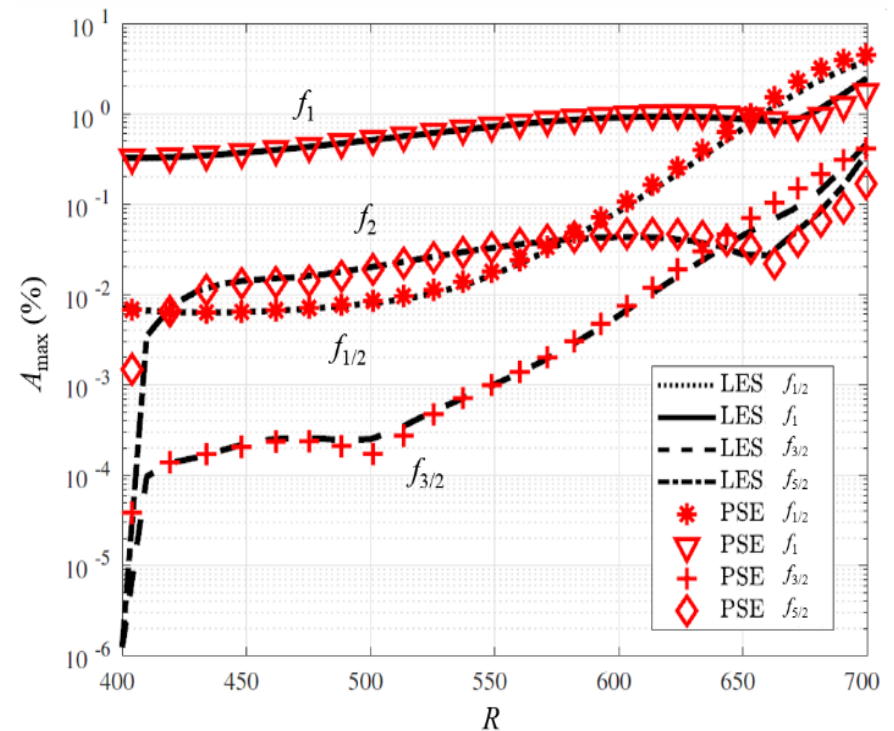
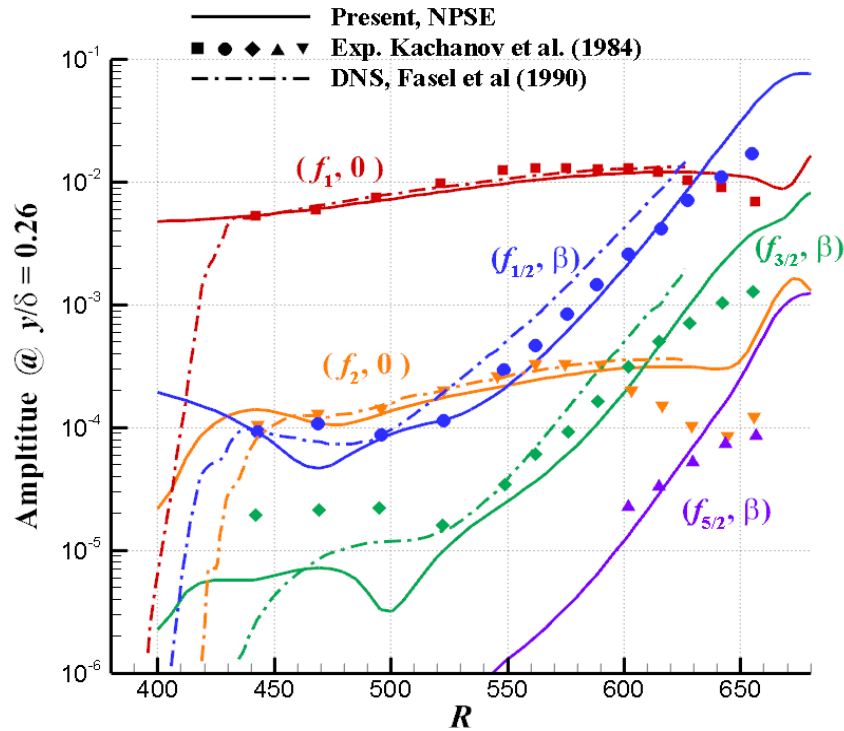
❖ $M=4.5 / F=60$ 교란 증폭률 비교



- First Mode: 벽면 냉각에 의해 불안정성 감소 (증폭률 감소) / $T_w/T_{ad}=0.6$ 냉각 조건에서 안정화
- Mack's 2nd Mode: 벽면 냉각 조건일수록 불안정성 증가(증폭률 증가), 불안정 영역 하류 이동

교란의 비선형 증폭 특성 연구

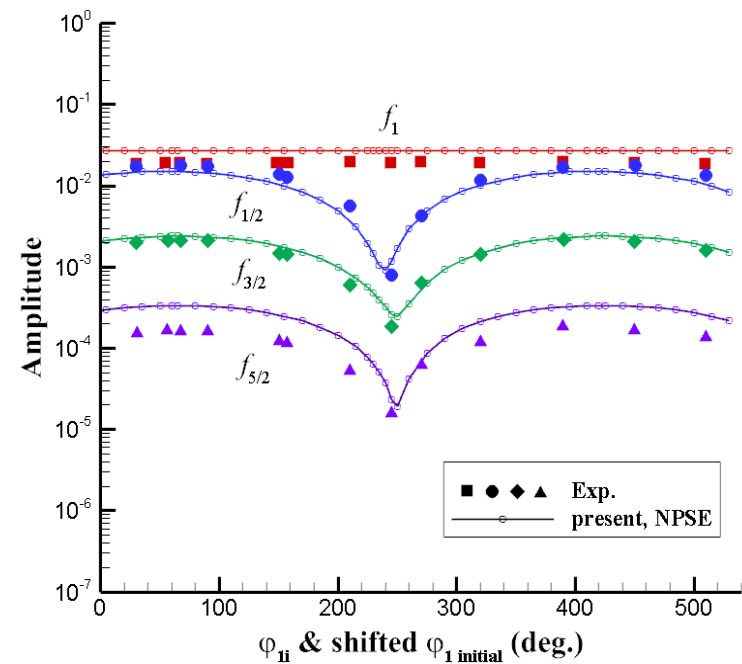
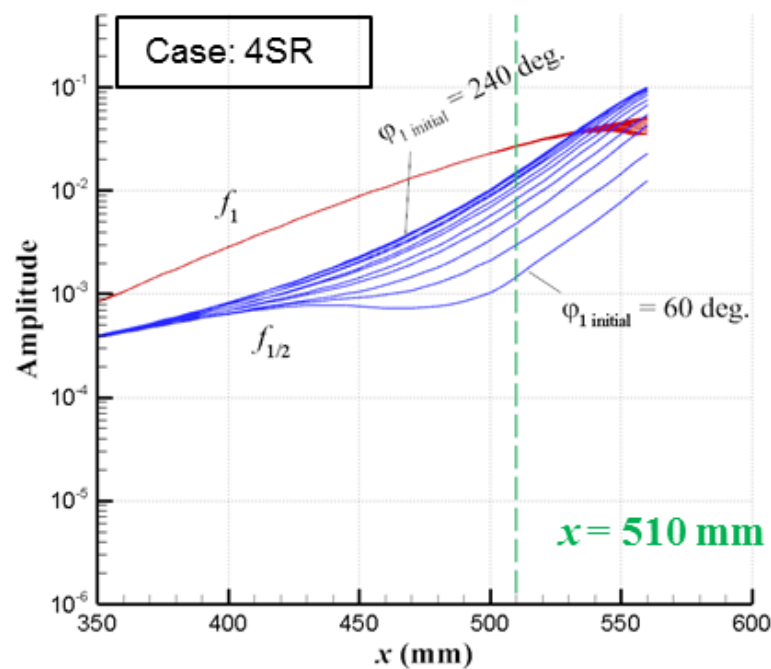
❖ Subharmonic Resonance and Breakdown



교란의 비선형 증폭 특성 연구

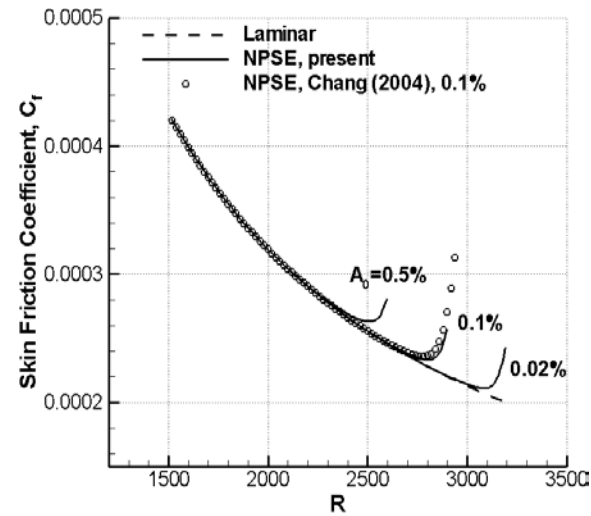
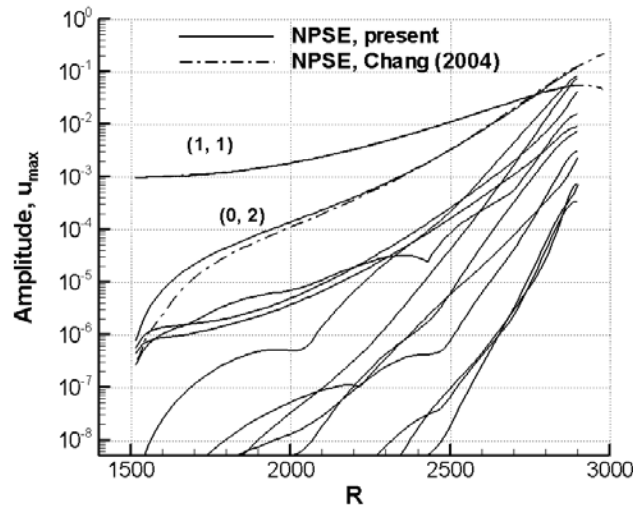
❖ Subharmonic Resonance and Breakdown

- 교란의 초기 위상이 Subharmonic Resonant Interaction에 미치는 영향 확인
- Phase dependency / Phase synchronization

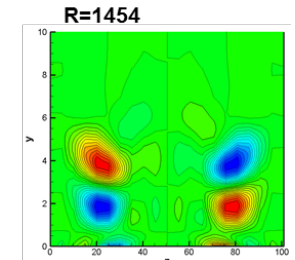
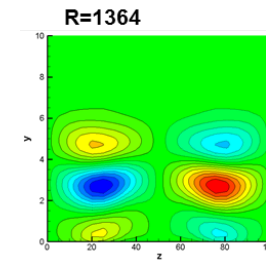
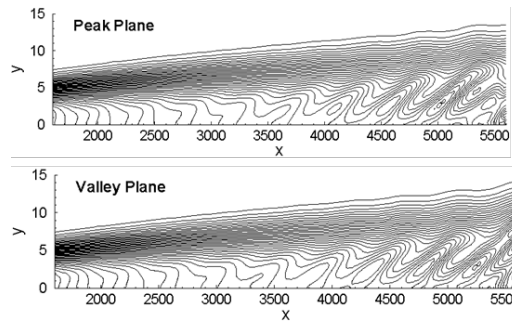
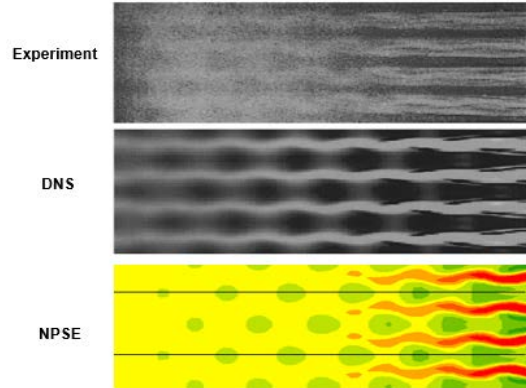


교란의 비선형 증폭 특성 연구

❖ Oblique Breakdown



Streak Generation from Oblique Waves



안정성 해석 활용 예: Tonal Noise 주파수 예측

❖ Tonal Noise or Whistle Noise

Flow Around an Airfoil



Under specific velocity and angle of incidence condition

NACA0012 / $\alpha=3^\circ$ / 23.16m/s

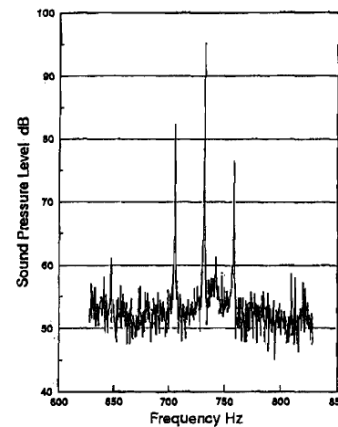


Fig. 7a of Lowson et al. (1994) [1]

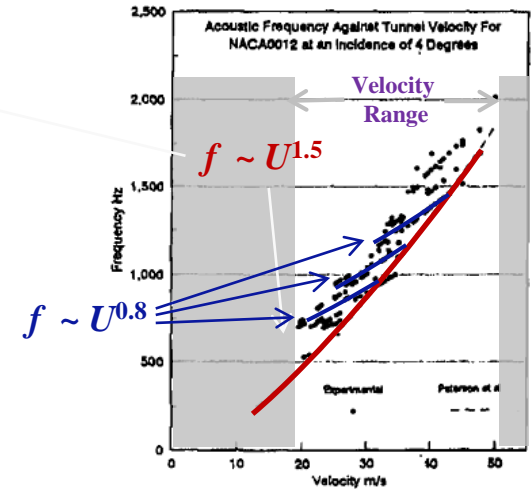
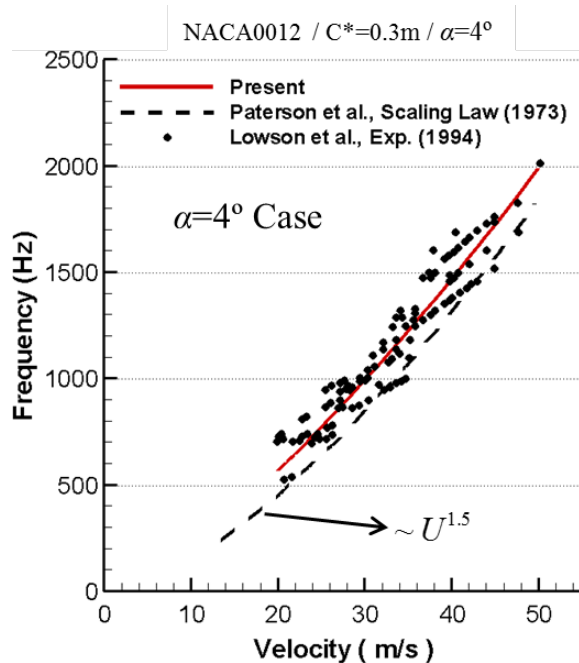
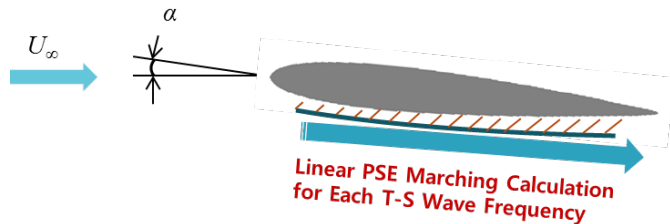


Fig. 8a of Lowson et al. (1994) [2]

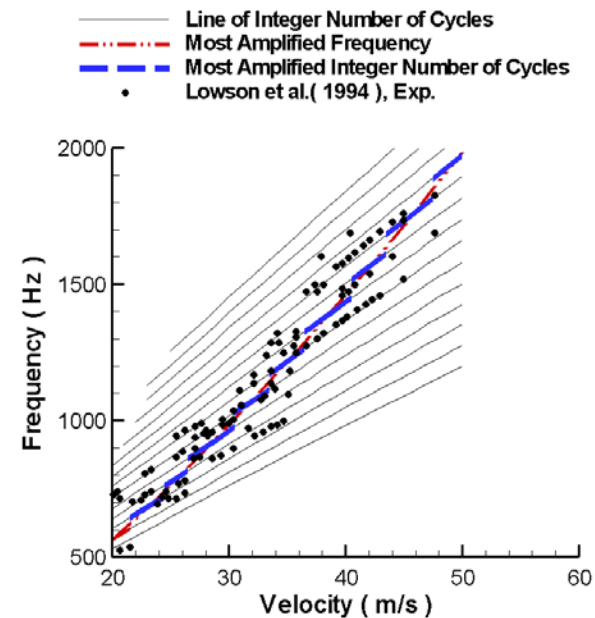
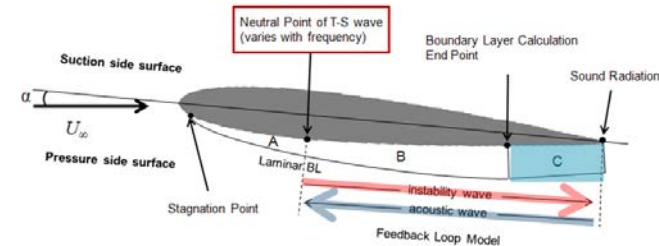
- Sharp T.E. Airfoil에서 특정 속도/받음각 조건에서 강한 discrete tone 소음 발생
- 주원인: 익형 압력면 경계층 내에서 불안정성에 의한 특정 주파수 T-S 파 증폭

안정성 해석 활용 예: Tonal Noise 주파수 예측

- Most amplified T-S wave frequency



- Feedback loop model



- 익형 압력면에서의 T-S 파 증폭과 feedback loop 메커니즘에 의해 tonal noise 발생

안정성 해석 기법 개발 및 파라미터 연구

❖ Vortex Instability

: 축대칭 1D line analysis / 2D plane analysis / Plane marching PSE 기법 개발

❖ Crossflow Instability

: Effect of integration path

❖ High-Speed Boundary Layer Instability

: Transition location 데이터 베이스 구축

: Effect of wall temperature, blowing/suction, roughness element

감사합니다.

Questions?

parkdh@pusan.ac.kr

