

평판 경계층 조건에 따른 근접후류의 레이놀즈응력 분포

Reynolds Stress Distributions in the Near-Wake on Boundary Layer Conditions of a Flat Plate

김동하*, 장조원(한국항공대학교)

1. 서 론

물체를 지난 유동에서 발생하는 총돌(eruption)과 교란(disturbance)은 물체 가까운 후류 지역에서는 뒷전에서 분리된 점성유동(viscous flow) 상호간의 교란으로 구성되며, 하류로 갈수록 비점성 유동인(inviscid flow) 외부 유동의 유입(entrainment)으로 인하여 복잡한 구조를 가지게 된다. 특히, 에어포일의 후류는 에어포일의 공기역학적 특성을 예측하는데 중요한 변수로써 작용하지만, 앞전이나 뒷전에서 고양력 장치(high lift system)의 사용으로 인하여 더욱 형상이 복잡해지며, 더불어 후류 구조 또한 복잡해진다. 또한, 비행중의 에어포일의 진동과 순간 받음각의 변화와 같은 비정상 유동의 발생은 후류 구조의 매커니즘의 해석을 더욱 어렵게 하는 결과를 초래한다.

이러한 혼합층(mixing layer)에 대한 연구는 Chevray와 Kovaszny[1]가 얇은 평판에서 대칭성 후류의 평균속도와 유동방향의 난류성분을 측정하여 먼 후류의 평형상태(equilibrium state)에 대해 근거할 만한 데이터와 상사성(similarity)을 제시하였다. 후류의 운동량 두께를 이용해서 후류를 조사한 Ramaprian & Patel[2]은 후류를 내부 후류(inner-wake), 근접 후류(near-wake), 중간 후류(intermediate-wake), 먼 후류(far-wake)로 구분하여 각각의 구역에 대해 특성을 설명하였다. Ramaprian et al.[3]와 Andreopoulos & Bradshaw[4]는 대칭, 비대칭 후류의 구조에 대해 조사하였으며, 비대칭 후류를 조사하기 위하여 트리핑 와이어(tripping wire) 및 조건부 추출기법(conditional sampling technique)을 사용하였다. 그들에 따르면 비대칭 후류에서 근접 후류와 내부 후류에서의 교란은 상류 경계층의 내부 흐름의 길이 크기(length scale)와 속도크

기(velocity scale)에 비례하다고 주장하였다.

본 연구에서는 앞전에서 분리를 갖지 않는 평판에서 상류 흐름(upstream)의 변화에 따른 근접 후류에서의 변화를 실험적으로 조사하였으며, 레이놀즈 응력을 측정하고 상사성에 대하여 조사하였다. 이러한 연구는 상류 흐름의 유동조건에 크게 영향을 받는 근접 후류의 해석적인 모델에서 초기조건(initial condition)의 중요성에 대해 근거할 만한 데이터를 제공하고, 3차원 비정상 유동에서 후류 발달에 기초적인 데이터를 제공하기 위한 것이다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 한국항공대학교 아음속 풍동의 시험단면적은 500mm×500mm×1400mm이고 최대 유속은 50.0m/sec이며, 사용된 평판은 풍동에서의 제한된 레이놀즈수를 고려하여 다양한 유동현상을 발생시킬 수 있도록 설계하였다. 재료는 두랄루민으로 제작하였으며, 길이는 700mm이며, 두께는 15mm이다.

평판의 선단은 매우 중요하며 선단에서 국부적인 분리(separation)를 방지하고자 선단의 모양을 Super-Elliptic 형태로써 가로세로비가 6.0으로 정밀한 가공을 하였다. 평판의 2차원 유동은 평판의 윗면과 아랫면의 앞전에서부터 같은 거리에 위치한 정압공으로 확인하였다.

Fig. 1은 본 실험을 위해 장착한 평판 및 이송장치를 나타낸 개략도이다. 시험부의 옆면의 슬롯을 통하여 평판 표면에 수직하게 Probe의 이송이 가능하도록 장치를 설치하였다. 이송장치의 정확도는 0.01mm이다.

후류의 측정 장비는 DANTEC社의 2차원 열선속계를 이용하였으며, 측정위치는 평판 뒷전에서부터 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75mm, 8위

치에서 측정하였다. 실험속도는 6.0m/s이며, 난류강도는 시험 속도에서 0.4%이내이다. 평판의 길이를 기준으로 레이놀즈수는 2.8×10^5 이다. 실험이 진행되는 동안 온도 변화는 $\pm 0.7^\circ\text{C}$ 미만이며, 속도변화량은 $\pm 0.2\%$ 미만이다.

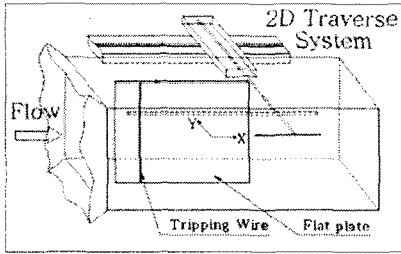


Fig. 1 Schematic of test section

3. 결과 및 검토

3.1 뒷전에서의 경계층 조건

뒷전 부근의 0.98C에서의 각 경우에 대한 유동 특성은 참고문헌[5]와 동일한 유동조건을 뒷전에서 갖는다. Fig. 2는 각각의 경우에 뒷전에서 사유흐름 방향의 난류강도와 마찰속도로 무차원화 된 평균속도를 나타내었다. Fig. 2a에서 Case 1은 다른 경우와 난류강도에서 많은 차이를 나타내는 반면에 Case 2와 Case 3은 비슷한 값을 나타내고 있다. 그러나 실제로 열선풍속계(hot-wire)를 통하여 나타나는 신호를 일정한 위치에서 관찰한 결과, Case 2에서는 간헐적인 신호(intermittency)를, Case 3의 경우에는 전형적인 난류유동에서 나타나는 신호를 확인할 수 있었다. 또한 Case 2와 Case 3은 각각 $y^+ = 14$, $y^+ = 16$ 에서 벽면 가까운 경계층에서 지나침(overshoot)이 발생하고 있고, 경계층에서 난류성분이 증가함에 따라 경계층의 완충 영역(buffer region)이 점점 벽면 가까이에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 천이경계층에서 길어지기는 난류경계층의 길이보다 크기 때문에 열선풍속계의 공간분할 면에서 측정된 데이터는 Case 2의 경우에 더 정확도를 가짐을 알 수 있다. Case 3경우 트리핑 와이어 이후에 새로운 평형상태로 발달하는 비 평형 상태임을 Fig. 2b를 통해 예측할 수 있다. 결론적으로 Case 3에서 가장 난류에 가깝고, Case 1은 층

a) Turbulence intensity b) Normalized velocity

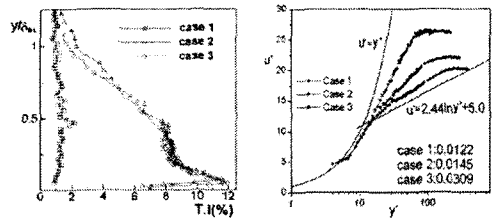


Fig. 2 Turbulence intensity and normalized velocity of boundary layer(0.98C)

류에 가까운 유동조건을 가진다. 측정된 운동량 두께에 의한 레이놀즈수는 각각 Case 1이 259, Case 2가 303 그리고 Case 3에서 331의 값을 가지며, 평판의 뒷전의 두께에 의한 레이놀즈수는 6.0×10^3 이다.

3.2 근접 후류에서 난류강도분포

Fig. 3에서는 각각의 경우에 대한 후류에서의 유동방향과 유동의 수직방향에서의 평균난류강도를 국부적인 최대결손속도로 무차원화 하여 나타내었다. x축은 유동방향의 수직방향을, 비대칭적으로 발달하는 후류 반폭(δ_i)으로 무차원화 하였다. 오른쪽 상단의 표기는 뒷전에서부터 유동방향의 측정거리를 각각의 국부적인 후류의 운동량 두께로 무차원화 하여 나타내었다. Case 2, Case 3의 경우에 초기조건이 되는 뒷전에서의 유동특성의 운동량이 커짐에 따라 후류의 운동량은 증가하게 되고, 국부적인 무차원값(x/θ)은 작아짐으로써 난류경계층의 경우에 정의된[2] 근접 후류의 구간을 만족하고 있다.

Fig. 3a, 3b, 3c는 유동방향의 수직방향 난류강도($\overline{u'u'}$)를 국부적인 최대결손속도로 무차원화 하여 나타내고 있는데, 대칭 후류인 Case 1에서는 쌍봉(double peak)을 나타내면서 대칭적인 분포를 나타내고 있다. 다소 비대칭적인 분포는 프로브 홀더에 의한 점유율 효과(blockage effect)로 간주된다. 또한, 뒷전에서 초기조건이 난류경계층으로 변화되면서(Case 3) 발생하는 난류강도는 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 난류경계층이 초기조건으로 작용한 양(+)의 방향보다 층류경계층이 존재하는 음(-)의 방향에서 상대적으로 큰 난류강도를 나타내고 있다. 이것은 층류경계층의 경우에 점층저층영역(viscous

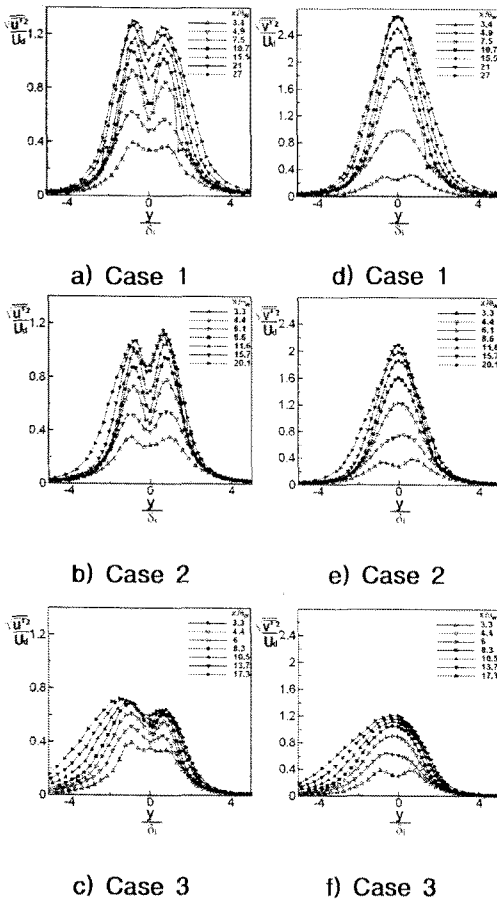


Fig. 3 Turbulence intensity distribution in near-wake region

sub-layer)에 의해 영향을 받기 때문이다.

Fig. 3d, 3e, 3f는 $\overline{\rho v \sigma} / U_o$ 의 분포를 나타내고 있으며 최대치를 중심에서 갖는 단봉(single peak)의 형태를 나타내고 있다. 또한, 각각의 경우에 뒷전에서 평판의 형상이 유한한 두께를 가지면서 외부 유동의 유입의 증가로 $\overline{\rho v \sigma}$ 값이 $\overline{\rho v \sigma}$ 보다 2배정도의 큰 값을 나타내고 있으며, 난류강도가 층류경계층보다 난류경계층에서 최대결속속도에 의해 무차원화 될 때, 상사정도가 증가하는 것을 Fig. 3c, 3f에서 볼 수 있다.

3.3 레이놀즈 응력 분포

Fig. 4는 각각의 경우에 레이놀즈 응력을 나

타내었다. x축은 국부적인 반폭으로 측정위치를 무차원화 하였으며 y축은 레이놀즈 응력을 각각의 측정위치에서 $k = \frac{3}{4} (\overline{\rho v \sigma} + \overline{\rho v \sigma})$ 로 가정한 국부적인 난류에너지(k)로 무차원화 하여 나타내었다. 일반적으로 유동의 상사성이 성립하기 위해서 레이놀즈 응력은(Reynolds shear stress) 최대결속속도의 제곱과 반폭에 의해 상사된다고 알려져 있으나 본 실험에서 제시된 데이터는 기존의 상사변수에 의해 상사하지 않았다. 따라서 국부적인 난류에너지를 이용하여 무차원화 하였는데 이것은 Rodi가 레이놀즈 응력을 모델링하기 위하여 제안되었다[6]. Rodi는 비등방성 유동방향의 레이놀즈 응력의 변화가 난류에너지 값을 이용하여 근사화(approximation) 될 수 있음을 제시하였고, Thomas & Xiaofeng [7]은 이 모델을 이용하여 같은 초기조건에서 압력구배에 의해 영향 받는 후류의 일정구간에서 레이놀즈 응력($-\overline{u'v'}$)이 0.3k에서 0.4k정도의 값을 나타내면서 상사하는 것을 보였다.

Fig. 4a는 대칭 후류의 경우(Case 1)를 나타내고 있는데 $-\overline{u'v'}$ 값이 뒷전에서 매우 가까운 부근에서($x/\theta \approx 5$) 0.3k에서 0.4k의 사이에서 최대치를 갖고, 하류로 갈수록 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 소산율은 x/θ 가 3.4에서 4.9 사이에 가장 큰 소산율을 나타내고 있다. 이것은 Case 2와 Case 3에서도 나타나며 와류형성영역(vortex formation region)과 밀접한 관련이 있다. 뒷전 가까운 부근에서 경계층의 불안정성과 유동이 뒷전에서 분리된 이후에 층류 전단력의 상실로 인해 발생된 재분포화 된 전단응력은 와류가 완전히 형성되면서 결합성 구조(coherent structure)에 지배받게 되면서 새로운 평형상태로 도달하게 된다.

Fig. 4b의 경우에는 한 쪽이 천이경계층의 상태로써 비대칭 분포가 나타난다. 특히 천이유동(transitional flow)은 경계층에서 증가된 길이크기(length scale) 보다 속도크기(velocity scale)에 의해 크게 영향을 받음으로써 양의 방향에서 전단응력은 증가되어 와류가 형성되기 직전에 0.6k(k:난류에너지)에 도달하게 되고 마지막 측정위치에서는 층류경계층 쪽의 전단응력 부호가 바뀐다. 그러나 Fig. 4c의 난류경계층이

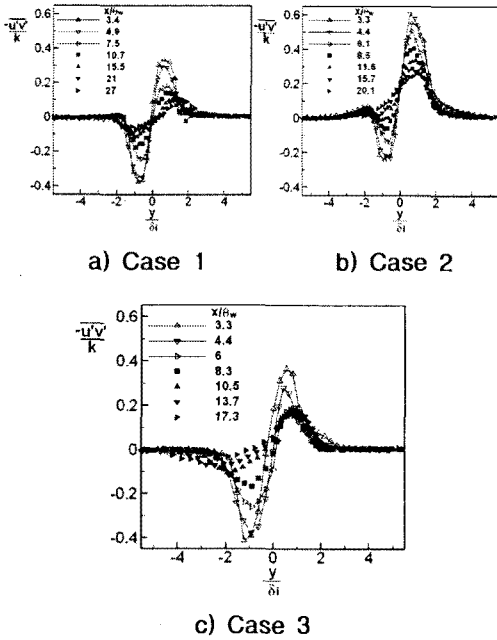


Fig. 4 Reynolds stress distribution

초기조건으로 작용한 후류의 전단응력은 양의 방향에서 대칭인 후류와 비슷한 값(0.3k~0.4k)을 나타내며, 난류에너지에 의해 무차원화 될 때, 하류로 갈수록 소산율이 감소하고 상사성이 성립한다. 또한 층류경계층의 면에서는 전단응력의 생성은 크다. 이것은 비대칭 후류인 Fig. 4b에서 나타난 바와 같이 층류경계층의 점층저층영역의 존재로 인해 유동이 뒷전을 벗어나면서 층류 전단응력의 손실 때문이다. 그리고 각각의 경우에 층류경계층이 초기조건으로 작용한 쪽에서 크게 나타난 전단응력은 하류로 갈수록 소산을 또한 크다.

4.결 론

본 연구에서의 비대칭 후류는(평판 한 쪽에 층류경계층, 다른 쪽에 난류경계층이 초기조건으로 작용하는 경우) 하류로 가면서 기존의 상사변수로는 상사성이 성립하지 않는다. 그러나 후류는 난류경계층 경우에 난류에너지(k)를 변수로 상사하고, 층류경계층의 경우에는 뒷전 가까운 부근에서 상대적으로 큰 값을 가지며, 하

류로 갈수록 급격한 전단응력의 소산을 보인다. 천이경계층이 초기조건으로 작용한 경우 후류는 앞전의 교란자로 인해 발생한 간헐적인 난류분포보다 보다 속도크기에 의해 크게 영향을 받으며, 다른 경우의 후류보다 상대적으로 큰 전단응력이 발생되고 하류로 갈수록 빠르게 소산된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제 지원 연구비(R01-2002-000-00442-0)에 의해 수행된 연구의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사를 포함합니다.

참고문헌

- 1) Chevray, R., and Kovaszny, L., "Turbulent Measurements in the Wake of a Thin Flat Plate," *AIAA Journal*, Vol. 7, 1969, pp. 1641-1643.
- 2) Ramaprian, B. R., Patel, V. C., and Sastry, M. S., "Turbulent Wake Development Behind Streamlined Bodies," Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, IHR Rept. 231, 1981.
- 3) Ramaprian, B. R., and Patel, V. C., "The Symmetric Turbulent Wake of a Flat Plate," *AIAA Journal*, Vol. 20, 1982, pp. 1228-1235.
- 4) Andreopoulos, J., and Bradshaw, P., "Measurement of Interacting Turbulent Shear Layers in the Near-Wake of a Flat Plate," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, 1980, pp. 639-668.
- 5) 김동하, 장조원, "평판 경계층과 후류와의 상호관계에 관한 연구; 평균속도장," *항공우주학회지*, 32권, 10호, 2004.
- 6) Pope, S. B., *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, 2000.
- 7) Thomas, F. O., and Xiaofeng, L., "An Experimental Investigation of Symmetric and Asymmetric Turbulent Wake Development in Pressure Gradient," *Physics of Fluids*, Vol. 16, 2004, pp. 1725-1745.