

평판 경계층 조건에 따른 근접후류의 평균속도 분포

Mean Velocity Distributions in the Near-Wake on Boundary Layer Conditions of a Flat Plate

김동하*, 장조원(한국항공대학교)

1. 서론

서로 다른 두 개의 표면에서 불연속적인 전단력으로 인해 분리된 흐름은 서로 충돌하고 교란된다. 이러한 충돌과 교란은 물체 가까운 후류 지역에서는 뒷전에서 분리된 점성유동(viscous flow) 상호간의 교란으로 구성되며 하류로 갈수록 비점성 유동인(inviscid flow) 외부유동의 유입으로 인하여 복잡한 구조를 가지게 된다. 특히, 후류는 에어포일의 앞전이나 뒷전에서 고양력 장치(high lift system)의 사용으로 인하여 더욱 복잡해지며, 비행중의 에어포일의 진동으로 인한 순간 받음각의 변화에 따라 구조적으로 복잡한 특성을 나타낸다.

후류의 운동량 두께를 이용해서 후류를 조사한 Ramaprian & Patel[1]은 후류를 근접 후류(near-wake), 중간 후류(intermediate-wake), 먼 후류(far-wake)로 구분하여 각각의 구역에 대해 특성을 설명하고, 중간 후류와 먼 후류는 후류의 평균속도와 반폭에 대해 상사성이 성립하는 반면에, 근접 후류는 에어포일 뒷전의 형상이나 상류 흐름 조건(upstream condition)에 따라 다양하게 변화한다고 하였다. 또한, Ramaprian et al.[2]와 Andreopoulos & Bradshaw[3]는 대칭, 비대칭 후류의 구조에 대해 조사하였으며, 비대칭 후류를 조사하기 위하여 트리핑 와이어(tripping wire) 및 조건부 추출기법(conditional sampling technique)을 사용했다. 그들은 레이놀즈 응력(Reynolds stress)을 비롯한 난류 변수(turbulent parameters)와 평균속도분포를 측정하여 비대칭 후류의 구조에 대해 설명하였다. 그들에 따르면 비대칭 후류에서 근접 후류에서의 교란은 상류 경계층의 내부 흐름의 길이 크기(length scale)와 속도크기(velocity scale)에 비례하다고 주장하였다.

본 연구에서는 앞전에서 분리를 갖지 않고 뒷전에서 고정된 분리점을 가지는 평판에서 상류 흐름(upstream)의 변화에 따른 근접 후류에서의 변화를 실험적으로 조사하였으며, 평균속도에 대해 상사성 또한 조사하였다. 이러한 연구는 상류 흐름의 history에 크게 영향을 받는 근접 후류의 해석적인 모델에서 초기조건(initial condition)의 중요성에 대해 근거할 만한 데이터를 제공하고, 3차원 비정상유동에서 후류 발달에 기초적인 데이터를 제공하기 위한 것이다.

2. 실험장치 및 방법

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

평판의 제작시 선단은 매우 중요하며 선단에서 국부적인 분리를 방지하고자 선단의 모양을 Super-Elliptic 형태로써 가로세로비가 6.0으로 정밀한 가공을 하였다.

평판의 윗면과 아랫면의 앞전에서부터 같은 거리에 위치한 정압공을 이용하여 평판이 2차원 유동임을 확인하였으며, Fig. 1은 본 실험을 위해 장착한 평판 및 이송장치를 나타낸 개략도이다. 시험부의 옆면의 슬롯을 통하여 평판표면에 수직하게 Probe의 이송이 가능하도록 장치를 설치하였다. 이송장치의 정확도는 0.01mm이다.

경계층 및 후류의 계측에는 1차원 열선 프로브(DANTEC社, 55P14) 및 2차원 열선 프로브(55P61)를 이용하였다. 측정위치는 평판 뒷전에서부터 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75mm, 8위치에서 측정하였다. 실험속도는 6.0m/s이며, 난류강

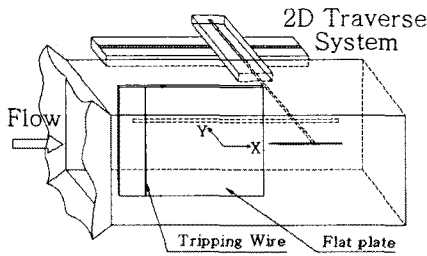


Fig. 1 Schematic of test section

도는 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, 속도 변화량은 $\pm 0.2\%$ 미만이다.

3. 결과 및 검토

3.1 뒷전에서의 경계층 조건

Table 1에서는 뒷전부근의 0.98C(C: chord length)에서의 각 경우에 대한 유동 특성을 나타내고 있으며, 이러한 특성은 후류 발달에서 있어서 초기 조건으로 작용한다. Case 1에 경우는 평판의 윗면, 아랫면 모두 층류유동(laminar flow)이 뒷전부근에 존재하게 된다. 열선(hot-wire)의 신호를 통한 조사를 통하여 약간의 교란이 포함된 신호를 볼 수 있으며, 천이유동(transitional flow)이 시작하기 직전의 유동상태임을 형상인자가 1.306으로서 층류유동에 매우 가까운 유동임을 확인 할 수 있다. Case 2에서는 평판의 한 쪽 면은 천이유동이 존재하고 있으며 간헐적인 신호를 열선으로부터 확인하였다. Case 3에서는 트리핑 와이어에 의해 교란된 면에서 형상인자가 1.59로써 난류유동임을 알 수 있으며, 또한 경계층 두께는 Case 1에서 4.5mm인 반면에 Case 2에서는 8.5mm, Case 3의 경우엔 12mm로써, Case 3의 경계층 두께는 Case 1에 비해 3배가량이 두터워진 것을 볼 수 있다.

Fig. 2는 각각의 경우에 뒷전에서 경계층의 속도분포를 자유흐름으로 무차원화 하여 나타냈다. Case 3에서 가장 난류경계층에 가깝고, Case 1은 층류경계층에 가까운 유동조건을 가진다. 측정된 운동량 두께는 Case 1이 0.64, Case 2가 0.75 그리고 Case 3에서 0.82의 값을 가지며 Case 3에서 Case 1 보다 약 30% 증가된 운동량 두께를 가진다.

Table 1 Properties of boundary layer

(Unit: mm)	Case 1	Case 2	Case 3
경계층 두께	4.5	8.5	12
운동량 두께	0.64	0.75	0.82
레이놀즈수	259	303	331
배제두께	1.299	1.278	1.304
형상계수	2.03	1.704	1.59
마찰속도	0.2368	0.2840	0.3088

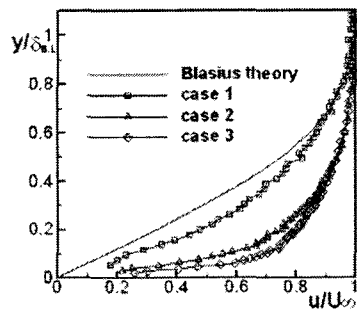


Fig. 2 Velocity profiles of boundary layer(0.98C)

3.2 근접 후류에서 평균속도분포

Fig. 3에서는 각각의 경우에 대한 후류에서의 평균속도분포(mean velocity distribution)를 나타내고 있다. 왼쪽 상단의 표기는 뒷전에서부터 유동의 흐름방향의 측정거리 x 를 각각의 국부적인 후류의 운동량 두께로 무차원화 하여 나타낸 값이다. Fig. 3a는 Case 1의 경우에 평균속도를 보이고 있으며 대칭분포(symmetric)를 보이고 있다. 뒷전에서 가장 가까운 측정거리 $2.1(x/\theta)$ 에서는 과잉속도(excess velocity)성분이 윗면, 아랫면에서 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 갑작스러운 층류 전단력(laminar shear stress)의 사라짐으로 인해 압력구배의 영향이 커지게 되는 과정에서 나타나게 된다. Case 2, Case 3의 경우에 후류 발달의 초기조건으로 작용한 뒷전에서의 유동에서 운동량이 커짐에 따라 후류의 운동량은 증가하게 되고 국부적인 무차원 값 (x/θ) 은 작아짐으로써 난류경계층이 초기조건으로 작용한 경우에 정의된 근접 후류 구간은 층류경계층의 경우보다 짧아지게 된다.

Fig. 3b와 3c의 비대칭 후류의 경우에서도 물

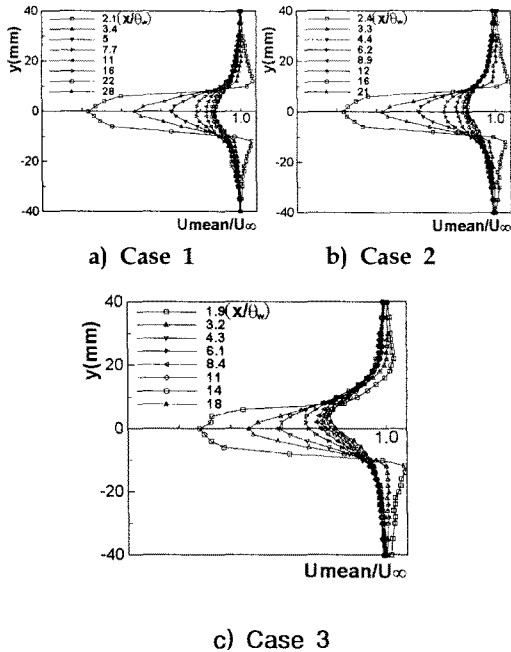


Fig. 3 Mean velocity distribution in near-wake region

체 가까운 부분에는 과잉속도분포가 나타나고 있다. 그러나 Case 3에서는 그 정도가 난류경계층이 초기조건으로 작용하는 면에서는 크지 않을 것을 볼 수 있다. 이것은 뒷전을 벗어난 유동이 층류 전단력(laminar shear stress)의 사라짐에 의해 압력장에 의해 크게 영향을 받는 층류경계층보다는 난류경계층이 영향을 받지 않는다는 것을 나타낸다. Fig 3b, 3c는 비대칭(asymmetric) 후류의 속도분포를 보이면서 하류로 갈수록 속도가 빠른 쪽으로 최대결손속도 위치가 이동된다. 실제 측정된 공간의 마지막 위치에서 Case 2에서는 2mm, Case 3에서는 6mm가량이 후류 중심에서부터 벗어나 있다. 이는 후류가 초기의 비대칭적인 초기조건으로 인하여 물체 가까이에서는 비대칭적인 속도분포에서 하류로 감에 따라 대칭적, 점근적인 후류(asymptotic wake)상태로 발달 되어가는 것을 보여준다.

3.3 평균속도분포의 상사성

Fig. 4는 각각의 경우에 대한 속도분포의 상사성(similarity)에 대해 조사한 것이다. Fig. 4a

는 대칭 후류를 나타내고 있으며, 본 실험의 데이터는 대칭 후류인 경우에 상사성이 후류의 중심부근에서 잘 성립함을 볼 수 있다. 그러나 후류와 외부 유동의 경계부근에서는 중심만큼 상사하지 않는다. 또한 물체 가까운 부근에서(측정위치 5mm, 15mm)는 경계부근 및 중심부근에서 속도분포는 본 실험의 데이터에서 나타나는 상사분포에 대해 평판의 뒷전 형상 및 뒷전에서의 유동특성, 초기조건에 의해 인하여 상사성이 성립하지 않는다. 특히 뒷전 형상이 유한한 두께를 갖게 되면서 뒷전에서 매우 가까운 부근의 속도분포의 후류의 중심부근 및 경계부근에서 속도구배는 그림 Fig. 3에서 보는 바와 같이 후류의 폭에 비해 작게 나타난다. 그러나 후류의 폭은 초기에 뒷전 형상이 두께를 가지면서 뒷전이 뾰족한 평판에서의 후류보다 크다.

일반적으로 평면 후류(planar wake)의 발달은 초기조건에 의해 크게 영향을 받음이 Wygnanski et al.[4]에 의해 확인되었으며, 그는 다양한 후류발생기를 통하여 후류를 조사한 결과 각각의 고유한 후류가 발생됨을 보였다. 또한 이론적인 접근을 통하여 후류의 평균속도분포에 대해 해를 제시하여 평균속도분포가 일치하는 상사곡선을 제시하였고 Rogers[5]도 비슷한 해를 제시하였다.

본 연구의 데이터는 Fig. 4a에서 보는 바와 같이 대칭인 경우에 기존의 상사성 곡선(Rogers's equation)과는 후류 중심부근에서는 일치하지만, 경계부근에서는 상당한 차이를 나타낸다. 또한 비대칭성이 증가하는 Case 3 (Fig. 4c)에서는 후류의 중심에서도, 그리고 경계부근에서도 Rogers[5]의 곡선(similarity profile)과 일치하지 않지만, 본 연구의 데이터 자체로 상사성이 성립하는 것을 볼 수 있다. Rogers[5]에 따르면 후류의 속도분포는 대부분이 가우시안(Gaussian)분포를 따른다고 보고 하였으나, 본 연구의 데이터에서 초기조건의 비대칭성이 증가하면서 상사성 곡선의 중심축은 속도가 빠른 쪽으로 치우치는 것을 볼 수 있다. 이때 독립변수 값(y/δ_0)이 약 0.1가게 되고 이때 종속변수 값이($(U_\infty - U_{mean})/U_d$) 1.0의 값을 갖게 된다. 이는 본 실험에서 측정된 공간의 각 측정위치에서 후류의 최대결손속도 위치가 국부적인 반폭의 크기에 10% 위치에서 지속적으로,

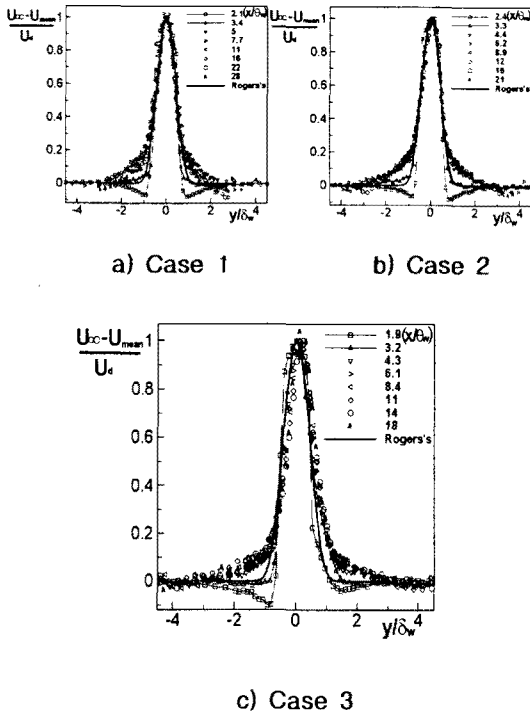


Fig. 4 Similarity of mean velocity distribution in near-wake region

일정하게 유지되면서 하류로 발달해 감을 알 수 있다. 본 연구에서의 비대칭 후류의 상사성 곡선을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{U_{\infty} - U_{mean}}{U_d} = \exp[-3.063(y/\pm - 0.1)^2 - 1.039(y/\pm - 0.1)^4 - 0.126(y/\pm - 0.1)^6] \quad (1)$$

식 (1)은 중심축이 한 쪽으로 치우쳐 있고, 후류의 경계부근에서 기존의 상사곡선과 많은 차이를 나타낸다. Wygnanski et al.[4]에 따르면 지수함수의 고차항은 기존의 상사분포가 후류 경계부근의 평균속도를 크게 나타내어 이를 감소시키고자 하는 목적으로 첨가되었다. 하지만 본 실험의 데이터는 Wygnanski et al.[4]나 Rogers[5]의 데이터보다 경계부근에서 더 빠른 평균속도분포를 갖게 되고, 따라서 4차항 이외에 6차항을 첨가 하였다.

이같은 후류 경계 부근에서의 결손속도 증가는 후류는 하류로 가면서 외부 유동의 유입(entrainment)과 와류회림(vortex shedding)으로 인하여 후류 중심에서 결손속도는 커지고 또 다

른 상태의 유동상태로 발달해 가기 때문이다.

4.결론

본 연구에서의 비대칭 후류는 하류로 가면서 최대결손속도 위치는 속도가 빠른 쪽으로 이동하면서 점근적인 후류로 발달해간다. 또한 비대칭 후류는 후류 중심 및 경계부근에서 기존의 상사곡선과 일치하지 않으며, 본 실험 데이터에서 비대칭경우에 독립변수 값(y/δ_i)이 0.1정도를 가질 때 종속변수 값($(U_{\infty} - U_{mean})/U_d$)은 1.0을 갖게 된다. 이것은 최대결손속도 위치가 본 실험의 측정 공간 내($5 \leq x \leq 75$)에서 반쪽에 비해 10%위치에 일정하게 유지되면서 하류로 발달되어가는 것을 나타낸다.

후기

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

참고문헌

- 1) Ramaprian, B. R., and Patel, V. C., "The Symmetric Turbulent Wake of a Flat Plate," *AIAA Journal*, Vol. 20, 1982, pp. 1228-1235.
- 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, IIHR Rept. 231, 1981.
- 3) 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.
- 4) Wygnanski, I., Champagne, F., and Marasli, B., "On the Large-Scale Structure in Two-Dimensional, Small-Deficit, Turbulent Wakes," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 168, 1986, pp. 31-71.
- 5) Rogers, M. M., "The Evolution of Strained Turbulent Plane Wakes," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 463, 2002, pp. 53-120.