

주기적 통과 후류가 익형위 박리 유동에 미치는 영향

이희강* · 박태춘** · 전우평*** · 강신형†

Effect of periodic wakes on separated flows over a NACA0012 airfoil

Hui-Kang Lee, Tae-Choon Park, Woo-Pyung Jeon and Shin-Hyoung Kang

Key Words: Separation(박리), Reattachment(재부착), Pressure Plateau(압력 고원), Periodic wake (주기적 후류), Airfoil(익형)

Abstract

Experimental study of separated flow over a NACA0012 airfoil is conducted at $Re=2 \times 10^5$ when periodic wakes pass over the airfoil. The wakes are periodically generated by circular cylinders upstream of the airfoil. The measurement of surface pressure and surface visualization at various angles of attack are carried out without and with passing wakes. Without passing wakes, a separation bubble at the leading edge of the suction surface is formed at an angle of attack, found from a local plateau in the streamwise pressure distribution and two distinct lines in the surface flow visualization. With passing wakes, however, the bubble disappears. Owing to passing wakes, the lift increases at high angle of attack and the angle of stall also increases.

기호설명

- C_p : 압력계수
 f : 통과 후류의 발생 주파수
 Re : 레이놀즈수 ($= U_\infty C/\nu$)
 St : 스트로울수 ($= fC/U_\infty$)
 U_∞ : 주유동방향 입구 속도
 α : 주유동방향에 대한 익형의 영각

1. 서론

익형 위에서 발생하는 경계층 천이(boundary-layer transition)와 박리(separation) 현상은 각종 터보기계의 내부유동이나 비행체 익형의 공력학적

성능에 큰 영향을 미치기 때문에 유체공학적으로 중요한 과제로 연구되고 있다. 실제 터보기계의 내부 유동을 살펴보면, 입구유동 조건, 압력구배, 표면조도, 압축성 효과 등 여러 가지 원인에 의해 경계층 천이와 박리, 재부착 등의 복잡한 유동 현상이 발생하는데, 특히 상류 익형에서 발생하는 비정상 후류의 영향이 중요하게 강조되고 있다. 그러나 복잡한 형상과 공간적 제약에 의한 계측상의 어려움으로 벽근처의 유동 특성을 정확하게 분석하기 어렵다. 따라서 보다 정확하고 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해 실제 터보기계의 날개 위 비정상 천이경계층 유동에 근접하도록 후류유도 장치를 모사한 풍동 실험이 최근 활발히 진행되고 있다.

먼저 주기적 후류가 경계층 천이에 미치는 영향은 Park⁽¹⁾과 Jeon 등⁽²⁾의 연구를 통해 선행되었고, 이와 더불어 박리 현상에 관한 연구를 수행하고자 하였다.

Tani⁽³⁾는 박리 기포(separation bubble)를 속도와 압력 분포의 특징에 따라 단기포(short bubble)와 장기포(long bubble)로 구분하여 그 성질을 설명하

† 책임저자, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : kangsh@snu.ac.kr

TEL : (02) 880-7113

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 마이크로열시스템연구센터

*** 서울대학교 창의적 연구진흥사업 난류제어연구단

였고, Gaster⁽⁴⁾와 Horton⁽⁵⁾은 박리 기포의 파열(bursting)에 대한 기준과 이에 미치는 중요한 인자를 명확히 제시하였다. 한편 Roberts⁽⁶⁾는 경험식을 통해 층류 상태의 박리 기포의 발달과 파열이 고(高)영각에서의 갑작스런 실속(stall)과 관련된 항력의 증가와 양력의 감소 및 피칭 모멘트의 변화에 크게 영향을 준다는 사실을 확인하였다. 최근에 Malkiel and Mayle⁽⁷⁾는 박리 기포의 난류 발달 과정은 박리 전단층(separated shear layer)에서 진행되는 천이임을 실험적으로 조사하였고, 그 지역에서의 간헐도는 반점 생성률이 높을 때의 난류 반점 이론(turbulent spot theory)과 상당히 유사하다고 서술하였다.

관련 연구⁽⁵⁻⁸⁾를 살펴보면 박리 기포의 천이 과정을 Fig. 1과 같이 도시할 수 있는데, 상류 층류 경계층이 강한 역압력구배로 인해 박리(S)가 발생하면 그 하류는 크게 두 구역으로 나뉘어진다. 분할 유선(S-T-R)과 익형면(S-T-R) 사이 지역은 상대적으로 느린 재순환 유동이 존재하고, 분할 유선과 경계층 외연(S"-T"-R") 내부 지역은 박리 전단층을 구성한다. 이러한 박리 전단층은 그림의 T 지역에서 불안정한 층류경계층 내 교란의 증폭에 의해 천이가 진행되고, 결국 난류 믹싱에 의한 운동량 전달로 역류가 사라지고 R 지역에서 재부착이 된다. 재부착된 경계층 유동은 하류에서 난류경계층으로 발달한다.

본 연구는 실제 터보기계 내부 유동에서 지배적인 주기적 후류가 이러한 층류 박리 현상에 미치는 영향을 조사하기 위해 NACA0012 익형의 상류에 주기적 후류를 발생시키고, 주유동방향에 대하여 영각(angle of attack)에 따른 익형 위 정압 분포와 유동 가시화의 결과를 비교·분석하였다. 계측한 압력계수의 분포를 통해 버블의 존재를 예측하고, 익형 위 표면 가시화를 통해 박리 기포의 생성, 성장 및 소멸 등을 검증하여 그 특성을 파악함으로써 터보기계의 내부유동 설계에 있어서 보다 많은 도움이 되리라 기대된다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구는 균일 입구유동에서 자유유동 난류강도와 주기적 후류의 진행 방향이 익형 위 압력 분포에 미치는 영향을 고찰하고, 영각에 따른 박

리 기포의 존재와 그 특성을 확인하기 위해 표면 가시화를 수행하였다. 실험 장치는 풍동 내 NACA0012 익형, 영각 설정용 스텝 모터, 후류 발생기로 구성된 시험부와 정밀 계측기, A/D 변환기 및 컴퓨터로 구성된 측정부, 그리고 가시화용 염료와 오일, 조명 및 촬영 장비로 구성된 광학기기부 등으로 이루어져있다. 시험부와 측정부의 제원과 규격은 Park 등⁽¹⁾과 Jeon 등⁽²⁾에 자세히 제시되어있고, Fig. 2는 주유동 난류강도와 영각에 따른 시험부의 단면과 유동 조건, 좌표계를 나타낸 것이다. 익형을 중심으로 후류 발생기를 시계방향으로 회전시키면, 그림에서 도시한 바와 같이, 후류는 익형 흡입면(suction side)으로 접근하고, 반시계방향으로 회전시키면 흡입면으로부터 멀어진다.

실험은 입구유동속도 10m/s에서 수행되었고, 이 때 익형의 코드길이($C=300\text{mm}$)를 기준으로 한 레이놀즈수는 2×10^5 이며, 난류 그리드가 없을 때의 난류강도는 약 0.5%이다. 압력 측정을 위해 익형 양면에 지름 1mm의 정압탭을 불규칙 간격으로 39개를 뚫었고, 익형의 영각을 변화시키기 위해 시험부 상단에 스텝 모터를 장착하였다. 한

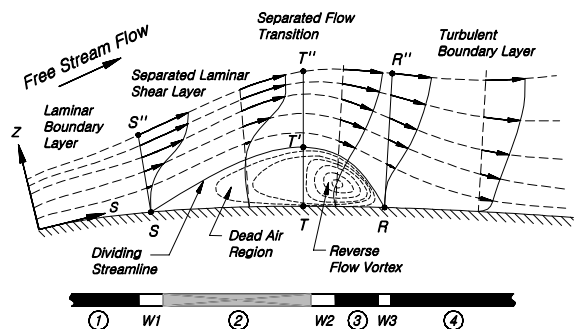


Fig. 1 Schematic view of laminar separation bubble (from Horton⁽⁵⁾)

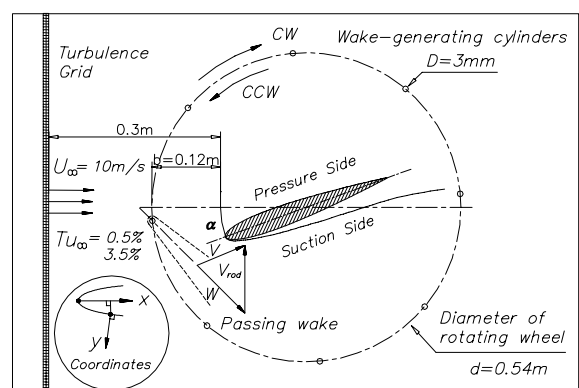


Fig. 2 Overview of test section

편 경계층의 표면 가시화⁹⁾를 위해 유화용 색소(황색)와 파라핀 오일을 혼합하여 사용하였다. 표면 가시화를 수행시에는 두랄루민으로 제작된 익형 표면에 흑색 전폭(whole span) 테이프를 부착하여 반사를 방지하였고, 디지털 카메라(Sony DSC-V1)와 외부 조명을 이용하여 촬영하였다.

2.2 실험방법

Table 1은 각 실험의 경우에 대하여 원형 실린더의 개수에 따른 후류 발생 주파수(f)와 입구유동 난류강도, 익형 코드 길이를 기준으로 한 스트롤수 등을 정리하였다. 그리드 유동(grid flow)은 Fig. 2에서처럼 기본 유동(base flow)에 대하여 난류 그리드를 입구 상류에 장착하여 입구 난류강도가 3.5%까지 증가한 경우이다.

압력 측정에 앞서 주유동방향에 대한 익형의 영각을 0°로 맞추기 위해 익형 양면의 압력을 비교하여 서로 동일한 압력 분포를 가지도록 익형을 정렬하였고, 이후 스텝 모터를 구동하여 한 펄스당 1.44°씩 증가시키면서 익형 영각을 0°에서부터 23.04°까지 측정하였다.

또한 익형의 표면 가시화 연구 수행시 수직으로 세워진 익형 표면에서 염료가 박리 유동에 민감하게 반응하면서도 아래로 흘러내리지 않도록 파라핀 오일과 황색 유화 물감의 농도를 조절한 후 익형 표면에 얇게 도포하여 실험하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 자유유동 난류강도의 효과

균일 입구유동에서 자유유동 난류강도가 익형 위 압력 분포에 미치는 영향을 고찰하기 위해 주기적 후류는 존재하지 않고 입구 난류강도가 각각 0.5%와 3.5%일 때 영각에 따른 정압 분포를 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였는데, 주요 관심의 대상이 흡입면임을 고려하여 압력 부호의 방향을 바꾸어 나타내었다.

Table 1 Experimental cases of incident wake

Case	base flow (N00)	N08	grid flow (G00)	G08
Tu_{∞}	0.5 %		3.5 %	
N	0	8	0	8
f (Hz)	0	47.2	0	47.2
St_c	0	1.4	0	1.4

먼저 입구유동 난류강도가 상대적으로 낮은 0.5%일 때의 압력계수 분포를 살펴보면, 날개 영각이 7.20° 이상일 때 선단 부근($x/C < 0.1$)에서 일정한 정압 분포를 가지는 압력 고원(pressure plateau)이 나타난다. 이러한 고원은 Fig. 1에서 박리 기포 위 천이점(T')을 기준으로 박리 전단층을 층류 상태와 난류 상태로 구분할 때 층류 지역에서 나타나는 현상이라고 알려져 있고, 또한 고원 이후 곧이어 나타나는 급격한 압력구배 변화는 천이점 이후 활발한 난류의 발달을 거치면서 재부착되는 과정에서 나타난다고 밝혀져 있다⁶⁻⁸⁾. 한편 영각이 계속 증가할수록 압력면의 압력은 계속 상승하지만 흡입면의 압력계수는 점차 감소하다가 $\alpha = 11.52^\circ$ 에서 실속(stall)이 발생하여 압력이 급상승하는 것을 볼 수 있다.

자유유동 난류강도가 3.5%인 G00의 경우, N00의 경우와 달리 $\alpha = 11.52^\circ$ 에서 실속이 발생하지 않는다. 또한 기본 유동에서 영각이 7.20° 이상일 때 존재하던 압력 고원을 확인하기 힘들고 $\alpha = 11.52^\circ$ 일 때 상당히 좁은 지역($0.02 < x/C < 0.04$)에서만 존재함을 확인하였다. 이는 높은 자유유동 난류량에 의해 층류경계층이 난류경계층으로 발달하고 그 운동량이 역압력구배를 극복하여 박리를 억제하기 때문이다.

특히 각 유동조건에 대한 실속이 발생하기 이전의 영각에서 압력 고원 및 박리 기포의 크기를 Fig. 3과 4를 통해 살펴보면, 박리점(S)은 $x/C \approx 0.02$ 로 동일하지만, 천이점(T)은 기본 유동의 경우 $x/C \approx 0.05$ 에서 그리드 유동의 경우 $x/C \approx 0.03$ 으로, 재부착점(R)은 $x/C \approx 0.08$ 에서 $x/C \approx 0.05$ 로 기본 유동에 비해 상류로 이동한다.

3.2 주기적 후류의 진행 방향의 효과

균일 입구유동에서 주기적 후류가 익형 위 압력 분포에 미치는 효과를 조사하기 위해 Fig. 2에서의 후류 발생기를 구동하였다. 익형을 중심으로 시계방향으로 회전시키면 계측면(흡입면)으로 다가오는 접근 후류(approaching wake, AW)가 발생하고, 반시계방향으로 회전시키면 계측면으로부터 멀어지는 후퇴 후류(receding wake, RW)가 발생한다.

Park 등¹⁾과 Jeon 등²⁾의 선행 연구를 통해 영각 0°에서 접근 후류 및 후퇴 후류의 성질을 자세히 고찰한 바 있는데, Fig. 2에 도시한 접근 후류

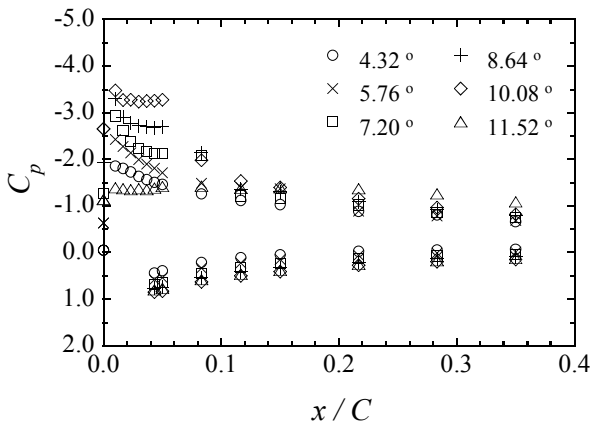


Fig. 3 Distribution of pressure coefficients on the airfoil with angle of attack for the case of N00

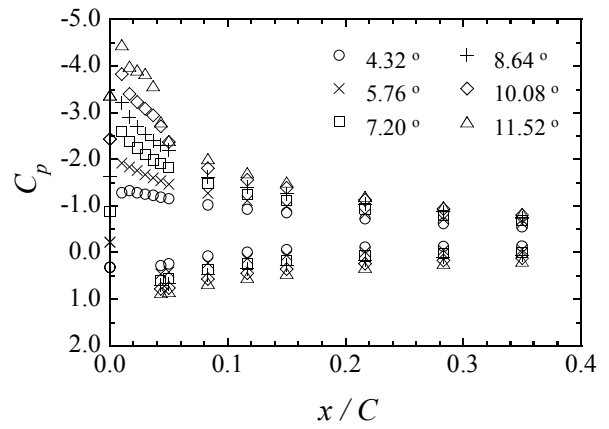


Fig. 4 Distribution of pressure coefficients on the airfoil with angle of attack for the case of G00

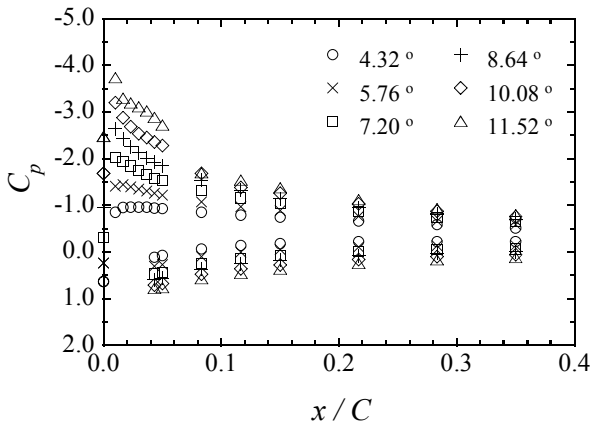


Fig. 5 Distribution of pressure coefficients on the airfoil with angle of attack for the case of N08AW

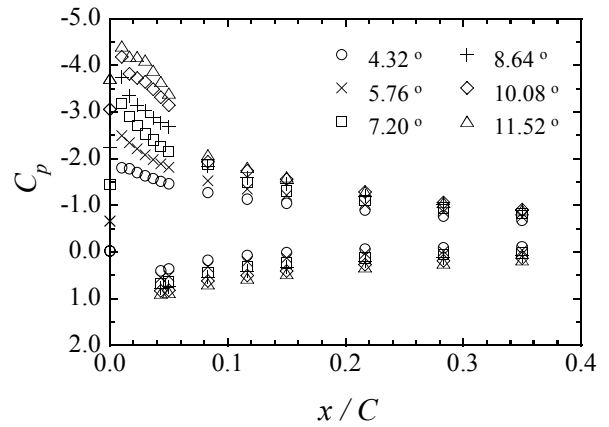


Fig. 6 Distribution of pressure coefficients on the airfoil with angle of attack for the case of N08RW

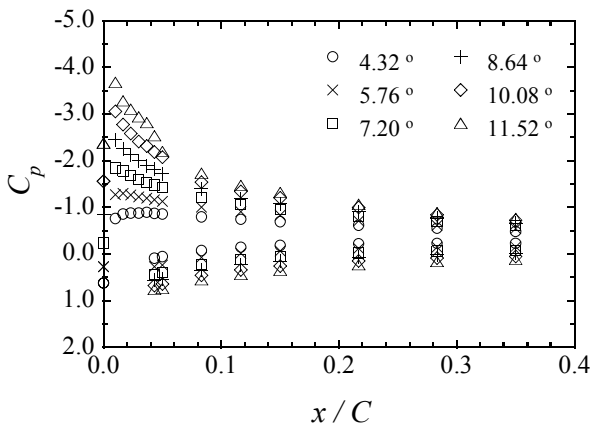


Fig. 7 Distribution of pressure coefficients on the airfoil with angle of attack for the case of G08AW

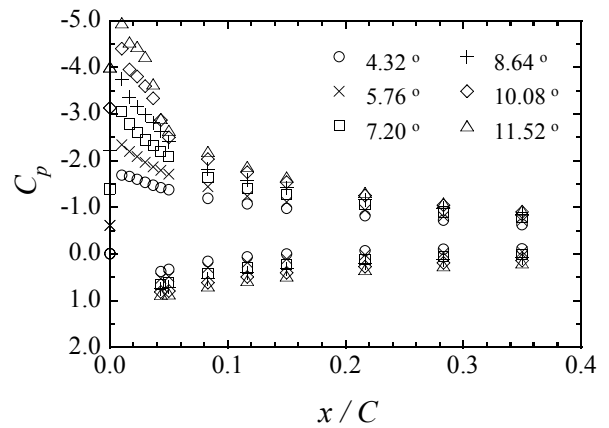


Fig. 8 Distribution of pressure coefficients on the airfoil with angle of attack for the case of G08RW

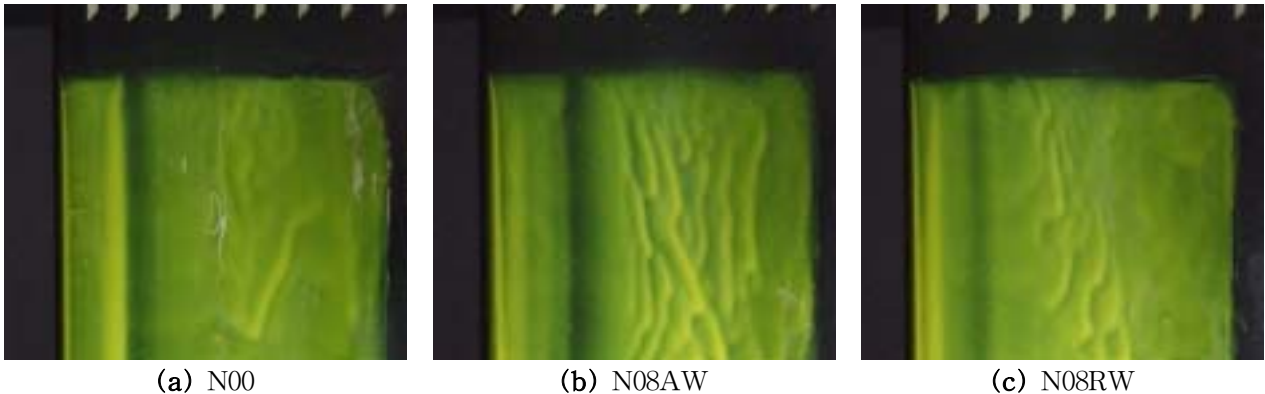


Fig. 9 Surface visualization on the airfoil for the cases of N00 and N08 at $\alpha = 10.08^\circ$

(AW)의 경우, 후류 절대속도(V)의 익형면 수직속도 성분이 익형 선단에 높은 압력의 정체점을 형성시키고 따라서 기존의 익형 위 압력 분포에 후류에 의한 순압력구배의 효과가 더해진다. 그 결과 선단 부근의 순압력구배 영역이 더욱 넓어지고 전체적으로 압력구배는 완만해진다. 이와 반대로 후퇴 후류(RW)의 경우, 절대속도 V 의 수직속도 성분은 흡입면에서 멀어지므로 선단의 압력은 작아져 전체 압력 분포에 역압력구배 효과가 더해진다. 그 결과 선단의 순압력구배 영역이 더욱 좁아지고 하류에서의 역압력구배가 커진다.

이러한 주기적 후류의 성질은 영각이 증가했을 때에도 마찬가지로 적용되어, AW의 경우(Fig. 5) 선단 부근의 압력이 RW의 경우(Fig. 6)보다 상대적으로 높고 압력구배는 작다. 영각 10.08° 일 때 $x/C < 0.1$ 에서 주기적 후류의 효과를 살펴보면, AW의 경우에 비해 RW의 경우 압력계수가 더 낮고 $0.02 < x/C < 0.04$ 에서 비록 좁은 영역이지만 압력 고원과 유사한 현상이 관찰되며 $\alpha = 11.52^\circ$ 에서는 명확히 나타난다. 이러한 압력 분포로부터 박리 기포의 존재와 그 크기를 유추할 수 있다. 실속 부근의 영각에서 발생하는 박리 기포는 미소한 영각의 변화에도 민감할 뿐만 아니라 불안정한 상태를 나타낸다.

3.3 자유유동 난류강도와 후류의 동시효과

자유유동 난류강도가 3.5%의 높은 값을 가지면서 주기적 후류의 영향 또한 존재할 때의 영각에 따른 압력계수 분포를 Fig. 7과 Fig. 8에서 고찰하였다. 접근 후류(AW)의 경우 자유유동 난류강도는 낮은 영각 범위에서 압력 분포에 큰 영향을 미치지 않는다. 그럼에는 도시하지 않았지만 N08AW의 경우 실속이 발생하는 영각(α) 이

17.28° 이고 G08AW의 경우 18.72° 인데, 이는 실속 부근의 큰 영각에서는 높은 백그라운드 난류량으로 인해 실속이 억제됨을 알 수 있다. 마찬가지로 후퇴 후류(RW)의 경우에도 낮은 범위의 영각에서는 자유유동 난류강도의 영향이 적지만, 실속 부근 영각에서는 높은 난류강도로 인해 압력계수가 더 작아지고 실속이 억제된다. 참고로 N08RW 경우의 실속 영각은 14.40° , G08RW의 경우 $\alpha_s = 15.84^\circ$ 이다.

압력구배의 변화와 실속 영각의 지연은 특히 후퇴 후류의 경우에 잘 나타나는데, 후퇴 후류는 익형 위 역압력구배를 강화시키고 주기적 교란으로 난류 패치(wake-induced turbulent patch)가 생성되어 난류경계층으로의 천이가 활발해지기 때문이다. 난류 그리드에 의한 백그라운드 난류량의 증가는 이러한 경계층 천이를 촉진시킨다.

3.4 표면 가시화

앞서 계측한 압력 분포와 그로부터 유추한 박리 기포의 거동을 검증하기 위해 표면 가시화를 수행하였다.

Fig. 9는 주기적 후류의 교란이 박리 현상에 미치는 영향을 관찰하기 위해 전연(leading edge) 부근($x/C < 0.3$)을 가시화하여 나타낸 것이다. 사진 위 흰 눈금은 전연에서 10mm 간격으로 표시한 거리이고, 영각 10.08° 는 기본 유동의 압력 분포(Fig. 3)에서 압력 고원이 가장 명확히 나타난 각을 선정한 것이다. 가시화한 사진을 분석하기 위해 Fig. 1의 개략도를 참고하면, 유동의 가속화로 인해 전연으로부터 밀려난 오일이 역압력구배가 지배적인 박리점(S)에 접촉하여 백색띠(W1)가 형성된다. 압력 고원이 존재하는 박리 기포 내 층류 지역은 유동이 적어 오일의 변화가 거의 없지만, 박리 천이점의 표면(T)에는 기포 내 강한 역

류로 인해 백색띠(W2)가 형성된다. 한편 재부착점(R) 인근의 좁은 지역에도 유동이 존재하지 않으므로 백색띠(W3)가 형성되는데, 아주 불안정한 지역이라 외부의 교란이 존재할 때 백색띠는 사라진다.

Fig. 9a는 $x \approx 3\text{mm}$ 에서 백색띠(W1)가 보이고, $5 < x < 15\text{mm}$ 에는 오일의 변화가 없으며, $20 < x < 25\text{mm}$ 에서 흑색띠가 형성된 부분이 재부착 부근이라 유추할 수 있으며, 앞서 살펴본 압력분포와 잘 일치하였다.

Fig. 9b는 접근 후류가 존재하는 경우로서, 재부착점은 기본 유동에 비해 하류로 이동하였고 박리 기포 내부는 역류에 의해 백색띠 W2가 상당히 상류로 이동하지만 오일이 여러 띠를 형성하는 것으로 보아 매우 민감하면서도 불규칙하다고 볼 수 있다.

Fig. 9c는 후퇴 후류가 존재하는 경우로서, 재부착점은 기본 유동에 비해 상류로 이동하였고, 재부착점에서 역류로 인해 상당히 상류로 이동한 백색 오일띠를 뚜렷이 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 6에서도 보았듯이 후퇴 후류의 교란에 의한 압력분포의 감소와 박리 기포 내의 압력구배 때문이다.

결론

본 연구는 자유유동 난류강도와 주기적 후류의 교란이 존재할 때 익형 표면의 유동특성을 관찰하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자유유동 난류강도가 높을 때, 기본 유동에서 존재하던 압력 플래트가 사라지고, 실속이 발생하는 영각은 기본 유동에 비해 더 커진다.
- (2) 주기적 후류의 교란이 존재할 때, 후퇴 후류의 경우 전연 부근의 순압력구배 영역이 좁아지고 강화된 역압력구배로 인해 박리가 상류에서 발생한다.
- (3) 동일한 영각에서는 기본 유동에 비해 후퇴 후류가 존재할 때, 박리기포 영역에서 더 강한 역류 현상을 보였다.

후기

이 연구는 2003년도 두뇌한국21사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Park, T.-C. Jeon, W.-P. and Kang, S.-H. 2001, "Experimental Study of Boundary Layer Transition on an Airfoil Induced by Periodically Passing Wake I & II," *Transaction of KSME (B)*, Vol. 25, No. 6, pp. 776-798.
- (2) Jeon, W.-P. Park, T.-C. and Kang, S.-H. 2002, "Experimental study of boundary-layer transition on an airfoil induced by periodically passing wake," *Experiments in Fluids*, Vol. 32, pp. 229-241.
- (3) I. Tani, 1964, "Low speed flows involving bubble separations," *Progress in Aeronautical Sciences*, Pergamon Press, Vol. 5, pp. 70-103.
- (4) M. Gaster, 1967, "The structure and behaviour of separation bubbles," *ARC R&M* 3595.
- (5) H. P. Horton, 1967, "An semi-empirical theory for the growth and bursting of laminar separation bubbles," *ARC CP* 1073.
- (6) W. B. Roberts, 1980, "Calculation of laminar separation bubbles and their effect on airfoil performance," *AIAA J.*, Vol. 18, No. 1, pp. 25-31.
- (7) E. Malkiel and R. E. Mayle, 1996, "Transition in a separation bubble," *J. Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 752-759.
- (8) M. M. O'Meara and T. J. Mueller, 1987, "Laminar separation bubble characteristics on an airfoil at low Reynolds numbers," *AIAA J.*, Vol. 25, No. 8, pp. 1033-1041.
- (9) S. A. Hippensteele, L. M. Russell and F. J. Torres, 1985, "Local heat-transfer measurements on a large scale-model turbine blade airfoil using a composite of a heater element and liquid crystals," *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 953-960.