

자유유동 난류 하의 주기적 통과 후류의 영향을 받는 익형 위 경계층 천이

박태춘*·전우평**·강신형***

Multimode Boundary-Layer Transition on an Airfoil Influenced by Periodically Passing Wake under the Free-stream Turbulence

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

Key Words : Multimode Boundary-Layer Transition(다중 모드 경계층 천이), Passing Wake(통과 후류), Pressure Gradient(압력구배), Free-Stream Turbulence(자유유동 난류강도), Wall Skin-Friction Coefficient(벽마찰계수)

Abstract

Multimode boundary-layer transition on a NACA0012 airfoil is experimentally investigated under periodically passing wakes and the moderate level of free-stream turbulence. The periodic wakes are generated by rotating circular cylinders clockwise or counterclockwise around the airfoil. The free-stream turbulence is produced by a grid upstream of the rotating cylinder, and its intensity(Tu) at the leading edge of the airfoil is 0.5 or 3.5 %. The Reynolds number (Re_c) based on chord length (C) of the airfoil is 2.0×10^5 , and Strouhal number (St_c) of the passing wake is about 0.7. Time- and phase-averaged streamwise mean velocities and turbulence fluctuations are measured with a single hot-wire probe, and especially, the corresponding wall skin friction is evaluated using a computational Preston tube method.

The wake-passing orientation changes pressure distribution on the airfoil in a different manner irrespective of the free-stream turbulence. Regardless of free-stream turbulence level, turbulent patches for the receding wakes propagate more rapidly than those for the approaching wake because adverse pressure gradient becomes larger. The patch under the high free-stream turbulence ($Tu=3.5\%$) grows more greatly in laminar-like regions compared with that under the low background turbulence ($Tu=0.5\%$) in laminar regions. The former, however, does not greatly change the original turbulence level in the very near-wall region while the latter does it. At further downstream, the former interacts vigorously with high environmental turbulence inside the pre-existing transitional boundary layer and gradually lose his identification, whereas the latter keep growing in the laminar boundary layer.

The calmed region is more clearly observed under the lower free-stream turbulence level and for the receding wakes. The calmed region delays the breakdown further downstream and stabilizes more the boundary layer.

1. 서론

다단 축류 터보기계 내의 유동은 상하류에 위치한 익형의 상대 운동에 의해 비정상 상태이다. 상류의 익형에서 주기적으로 발생하는 후류는 하류의 익형 위 경계층 발달, 특히 천이 과정에 큰 영향을 미치는데, 이는 후류유도 천이로 잘 알려져 있다. 이러한 주기적 후류유도 천이 과정은 그동안의 많은 연구를 통해 통과 후류의 특성뿐만 아니라 압력구배, 자유유동 난류강도, 유동 박리, 압축성 등이 많은 영향을 미친다고 조사된 바 있다. 그러나 아직도 후류유도 천이에 대한 정확한 이해와 예측이 이루어지지 않았고, 따라서 고효율의 터보기계 날개를 설계하기 위해서는 그 천이 과정에 미치는 각각의 영향 인자에 대하여 좀 더 세밀히 연구할 필요가 있다.

이러한 제어 요소에 관한 연구와 함께 최근에는 후류유도 천

이 과정의 천이 모드에 관한 이해가 새로운 연구 과제로 제시되었다. Mayle[1]와 Walker[2]에 따르면, 일반적으로 천이 과정은 자연 천이, 바이패스 천이, 박리 유동 천이 등의 모드로 분류되는데, 후류유도 천이는 단일 모드가 아닌 다중 모드로 진행된다. 통과 후류에 의해 순간적으로 생성된 난류 반점이 하류에서 난류 패치로 성장하는 동안 그러한 난류 패치들 사이로 다른 모드의 천이가 가능하기 때문이다. 이러한 후류유도 천이의 천이 모드 특성을 정확히 이해하기 위해서는 교란 지역을, Halstead 등 [3]이 체계적으로 제시한 $t-s$ 선도에서와 같이, 후류의 직접적인 교란으로 난류 패치가 생성되는 지역과 이러한 후류유도 난류 패치들 사이에 끼어있는 지역으로 나누어 관찰하면 편리하다. 현재까지 대부분의 수치해석 기법은 이러한 후류유도 천이 과정을 바이패스 천이로 고려하여 해석하였지만, Hughes 등[4]은 압축기 정익 위 벽마찰력의 wavelet 해석법을 통해 난류 패치 사이 지역에서 Tollmien-Schlichting(T-S)파와 일치하는 파형을 관찰함으로써 그 지역에서는 자연 천이가 지배적이라는 사실을 증명하였다. 또한, Walker 등[5]은 입구 교란과 날개의 부하 정도를 각각 변화시킴으로써 주기적 천이에 미치는 입구각과 IGV의 클로

* 서울대학교 대학원, origel0@snu.ac.kr

** 서울대학교 난류제어연구단, wpjeon@plaza.snu.ac.kr

*** 서울대학교 기계항공공학부, kangsh@snu.ac.kr

킹(locking) 효과를 부연하였다.

최근 Jeon 등[6]은 낮은 자유유동 난류강도에서 통과 후류의 방향에 따른 익형 위 후류유도 난류 패치의 특성을 실험적으로 고찰하였는데, 본 연구는 Jeon 등[6]의 연구를 바탕으로 자유유동 난류강도가 후류유도 천이에 미치는 효과를 조사하기 위해 추가적으로 진행되었다. 기본적으로 자유유동 난류 강도는 이웃한 상류 익렬의 후류에 의한 주기적인 교란(periodic disturbance) 뿐만 아니라 먼 상류의 익렬에 의한 임의의 교란(random disturbance)에 주로 영향을 받는다.

2. 실험 장치 및 방법

풍동 내 시험 날개 NACA0012와 후류 발생 장치, 열선 및 이송장치의 전체적인 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 코드 길이(C) 0.3m와 주유동 속도(U_∞) 10m/s를 특성치로 한 레이놀즈수(Re_c)는 2×10^5 이다. 시험 날개와 후류 발생기의 상류에 난류 발생 매쉬를 장착함으로써 자유유동 난류강도(Tu_∞)를 0.5%에서 3.5%로 증가시키고, 익형을 중심으로 주유동 속도와 동일하게 원봉을 회전시킴으로써 시계 방향(CW) 및 반시계 방향(CCW)의 후류를 발생시켰다. 주기적으로 발생하는 2차원 통과 후류는 하류의 익형 위 유동에 많은 영향을 미치는데, 특히 경계층 내의 I형 열선으로 주유동 방향 순간 속도를 측정하여 그 영향을 고찰하였다.

한편 본 연구의 실험 조건을 Table 1에 나타내었고, 통과 후류의 존재 여부와 자유유동 난류강도에 따라 구분하였다. 통과 후류의 발생 주파수(f), 그리고 원봉과 익형의 최단거리(b)와 익형의 코드길이(C)를 특성치로 하는 스트로울수(St)를 제시하였다.

모든 속도 데이터는 앙상블 평균법으로 처리하여 위상에 따른 유동장의 주기적 변화를 고찰하였고, 특히 벽근처 평균 속도에 수치 프레스턴 방법(Computational Preston tube Method, CPM)의 원리를 적용시켜 시간평균 및 위상평균 벽마찰계수를 예측하였다. 실험 장치 및 방법에 대한 세부적인 설명은 Jeon 등[6]에서 제시하였다.

Table 1 Experimental cases with free-stream conditions

Case	N00	N08	G00	G08
f (Hz)	0	47.2	0	47.2
St_c	0	1.42	0	1.42
St_b	0	0.57	0	0.57
Tu_∞ (%)	0.5	0.5	3.5	3.5

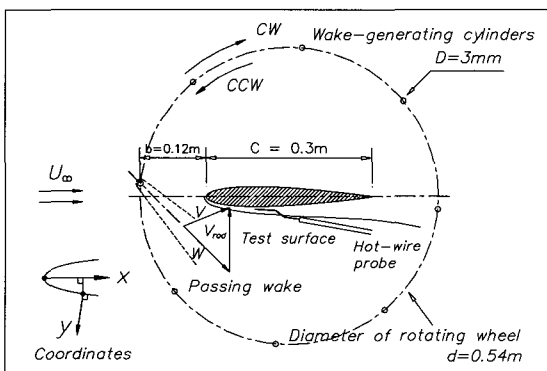


Fig. 1 Schematic of the test airfoil and wake-generating system (overview).

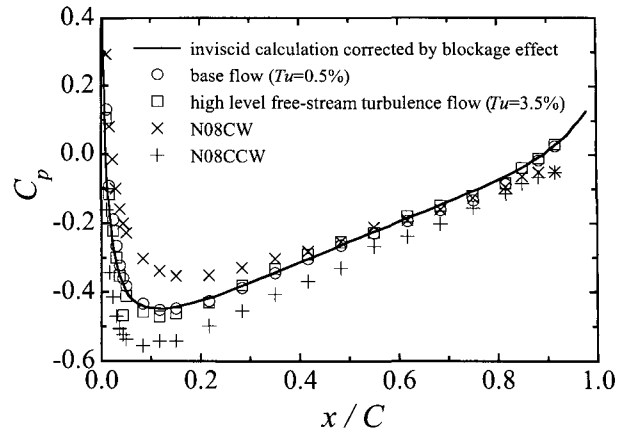


Fig. 2 Variations of static pressure coefficients on the airfoil with passing wakes and free-stream turbulence level.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 익형 위 압력 분포

통과 후류의 존재 여부와 자유유동 난류강도에 따른 익형 표면 위 주유동 방향 시간평균 압력의 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 기본 유동의 경우(N00), 시험부 벽면의 차폐 효과를 고려한 비점성 수치해와 잘 일치한다. 그리고, 자유유동 난류강도(Tu_∞)가 0.5%인 N00 경우와 3.5%인 G00 경우를 비교해 보면, 자유유동 난류강도가 압력 분포에 미치는 영향은 그다지 심하지 않다는 것을 알 수 있다. 이 경우 압력 분포는 전연 부근에서 큰 순압력구배가, $x/C=0.15$ 이후 후연까지는 역압력구배가 지배적이다.

통과 후류가 존재할 때에는 익형 위 정압 분포가 크게 변화하며, 특히 통과 후류의 방향에 따라 상당한 차이를 보인다. Jeon 등[6]에 따르면, 이러한 압력 분포의 변화는 Hodson[7]이 언급한 negative jet의 개념으로 설명할 수 있다. CCW 회전의 경우 익형의 시험면으로부터 멀어지는 후류에 의해 통과 후류가 없는 경우보다 압력이 감소하고 그 구배는 심화된다. 즉, 최소 압력계수가 20%까지 줄고 최소 압력점의 x 위치가 상류로 이동한다. 이와 반대로 CW 회전의 경우 통과 후류는 시험면으로 접근하고 압력이 증가하며 압력 구배는 감소한다.

3.2 난류 패치의 거동

Fig. 3은 익형 위 위상평균 난류강도의 y - t 평면 컨투어 선도를 자유유동 난류강도와 통과 후류의 방향에 대하여 주유동 방향의 다섯 위치에서 4% 레벨로부터 2% 간격으로 나타낸 것이다. 그림에서 통과 후류는 y 방향으로 길게 연결된 기둥 형상과 일치하고, $t=0$ 은 회전 원봉이 익형의 전연과 일직선상에 위치할 때의 순간을 의미한다. 각 그림에서 t 축과 평행한 한 쌍의 직선은 시간평균 경계층 두께($\bar{\delta}$)를 나타내는데, 위 것은 각 경우에 해당하는 경계층 두께이고, 아래 것은 통과 후류가 없을 때, 즉 N00 경우와 G00 경우의 것이다. 이는 통과 후류가 없는 유동과 각 경우의 시간평균 경계층 두께를 비교함으로써 경계층 발달의 정도를 알아보고자 도시하였다.

통과 후류에 의해 전연 부근에서부터 난류 패치가 주기적으로 발생하는데, 그 패치는 하류로 이동하면서 x 방향 및 y 방향으로 점차 성장하고 마침내 서로 합체하게 된다. 통과 후류의 방향이 후류유도 천이에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 3(a)와 3(b)를 비교하면, CCW 회전의 경우 난류 패치의 크기와 경계층 두께가 더 빨리 증가함을 알 수 있다. Jeon 등[6]과 Funazaki 등[8]에 따르면, 난류 패치의 선단 속도는 통과 후류와

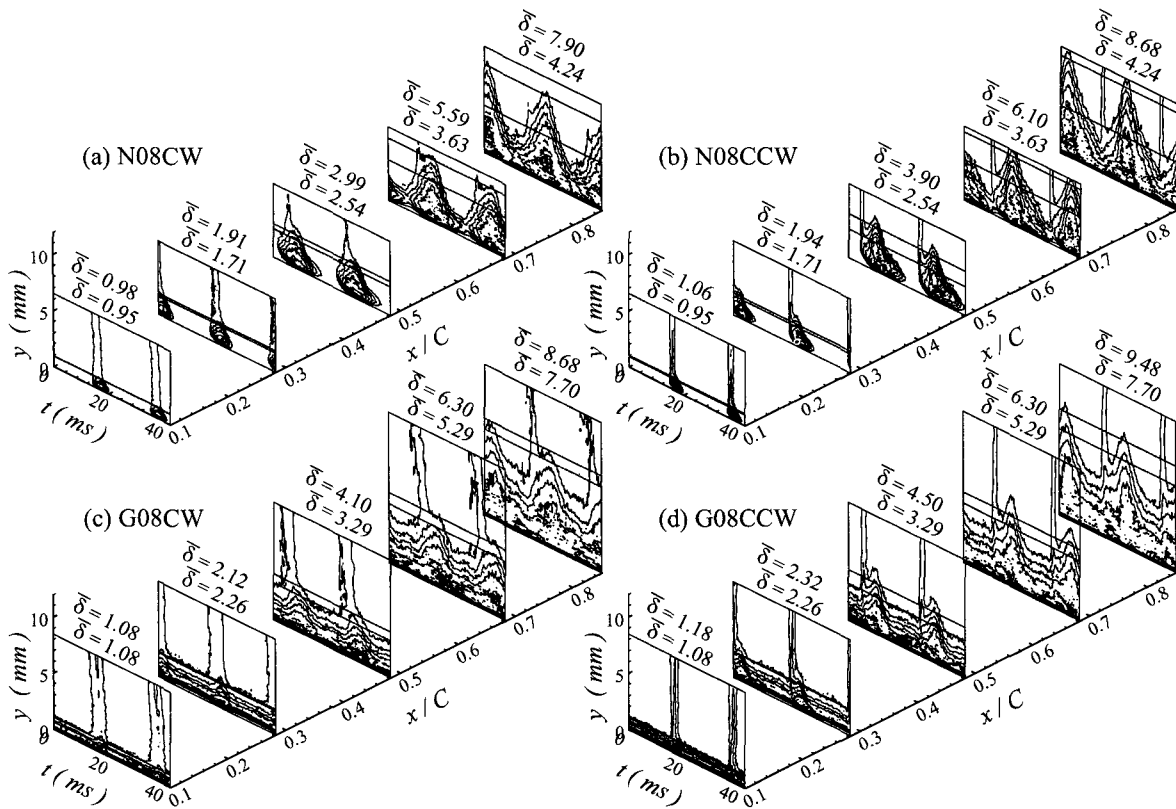


Fig. 3 Contours of phase-averaged turbulence intensity $\langle Tu \rangle$ (%) in y - t plane at five streamwise locations with passing wake and free-stream turbulence.

유사한 반면, 후단 속도는 역압력구배가 강할수록 진행 속도가 느려지기 때문이라고 설명하였다. 따라서, Fig. 2에서 언급하였듯이, CCW 회전에 의해 더 강화된 역압력 구배가 난류 패치의 성장을 촉진시키기 때문이다.

날개와 후류 발생기의 상류에 난류 발생 매쉬를 장착하여 자유유동 난류 강도를 3.5%까지 증가시켰을 때도 후류유동 난류 패치에 미치는 통과 후류의 방향의 영향을 명확히 관찰할 수 있었다. CW 회전의 경우보다 CCW 회전의 경우에 통과 후류의 폭은 더 좁고 난류 강도는 더 높다. CCW의 경우 후류유동 난류 패치와 선행하는 통과 후류와의 위상차가 더 커지고 결국 $x/C=0.48$ 이후에서 서로 분리된다. 하지만, 자유유동 난류강도가 서로 다른 경우의 두드러진 차이점도 존재한다. 먼저 벽근처에서의 난류 강도를 보면, $Tu_\infty=0.5\%$ 의 경우 통과 후류가 지나가는 순간에만 4% 이상으로 증가하지만, $Tu_\infty=3.5\%$ 의 경우 그 순간뿐만 아니라 항상 4% 이상으로 유지된다. 그리고, $Tu_\infty=0.5\%$ 의 경우보다 난류 패치의 크기와 경계층 두께가 약간 더 크다. 이는 난류 경계층으로의 천이가 더 활발하다는 것을 의미한다.

더구나, Fig. 3(c)-(d)를 Fig. 3(a)-(b)와 비교하면, $Tu_\infty=3.5\%$ 의 경우 경계층 내 최대 난류강도 지역이 넓게 퍼져있고, $x/C=0.48$ 이후에서 위상이 서로 일치하지 않음을 관찰할 수 있다. 자유유동 난류 강도가 높은 경우 난류 패치가 서로 합체된 후의 유동은 상당히 복잡하다. 경계층 내 최대 난류 강도는 후연 부근에서 감소한다. 이는 실제 천이 과정동안 난류 강도는 최대치에 이르고 이후 난류경계층에서 그 값이 감소하기 때문이다. 통과 후류와 자유유동 난류 강도와 상호작용에 대한 정확한 이해를 위해서는 더 깊은 연구가 필요하리라 생각된다.

3.3 벽마찰계수의 분포

천이경계층의 특성을 고찰할 때 대표적인 유체역학적 변수로

서 시간평균 벽마찰계수를 CPM 원리로 예측하여 Fig. 4에 도시하였다. 기본 유동(N00)의 경우 3.1절에서 설명한 압력구배 때문에 Blasius 프로파일과 일치하지는 않지만, 익형 전 범위에서 층류경계층임을 확인할 수 있다. 통과 후류에 의해 갑자기 증가하는 벽마찰계수를 통해 천이의 시작을 알 수 있다. 최소 벽마찰계수가 존재하는 주유동 방향 위치를 천이 시작점이라고 가정하면, $Tu_\infty=0.5\%$ 일 때 통과 후류가 존재하는 경우(N08) $Re_x=1.0 \times 10^5$ 이후에서 천이가 시작된다고 할 수 있다. 그러나 $Tu_\infty=3.5\%$ 일 때는 통과 후류가 존재하지 않더라도(G00) 천이가 발생한다. 통과 후류가 있을 때는 천이 시작점이 더 상류로 이동하고 천이 과정도 더 활발히 진행되어 난류 유동의 값에 근사하고 있다. 이는 후연 부근에서 난류경계층으로의 천이가 완전히 종결되었음을 의미한다.

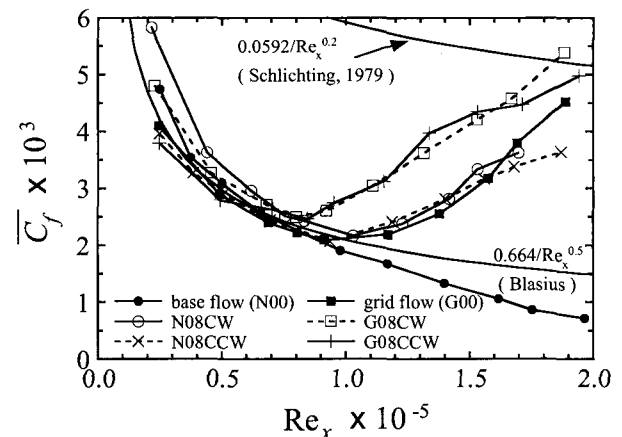


Fig. 4 Time-averaged skin-friction coefficients on the airfoil with passing wake and free-stream turbulence.

4. 결론

자유유동 난류 하에서 주기적 통과 후류의 영향을 받는 익형 위 다중 모드 경계층 천이에 관하여 실험적으로 고찰하였다. 이러한 천이 과정을 조사하기 위해 시간평균 및 위상평균 속도와 난류강도, 그리고 벽마찰 계수 등을 이용하였고, 결론은 다음과 같다.

- (1) 통과 후류의 방향과는 달리 자유유동 난류 강도는 익형 위 시간평균 압력 분포에 커다란 영향을 미치지 않는다. 이는 경계층 법칙에 따라 경계층 내 압력은 경계층 바깥의 압력과 동일하고 이것은 유속에 의존하기 때문이다.
- (2) 자유유동 난류 강도가 높고, 또 CCW 회전의 경우 후류유도 난류 패치는 더 빨리 성장하고 좀더 상류에서 서로 합체한다. 즉, 난류로의 천이가 훨씬 활발하다.

후 기

본 연구는 2001년도 두뇌한국21사업과 과학기술부의 창의적 연구진흥사업에 의하여 지원되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Mayle, R. E., "The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines," J. Turbomachinery, Vol.113 (1991), pp.509-537.

[2] Walker, G. J., "The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines: A Discussion," J. Turbomachinery, Vol.115 (1993), pp.207-217.

[3] Halstead, D. E., Wisler, D. C., Okiishi, T. H., Walker, G. J., Hodson, H. P., and Shin, H.-W., "Boundary Layer Development in Axial Compressor and Turbines: Part 1 of 4 - Composite Picture," J. Turbomachinery Vol.119 (1997), pp.114-127

[4] Hughes, J. D., Walker, G. J., and Gostelow, J. P., "Identification of Instability Phenomena in Periodic Transitional Flows on Turbomachine Blades," Proc. 14th Int'l Symposium on Air Breathing Engines, Florence, (1999).

[5] Walker, G. J., Hughes, J. D., and Solomon, W. J., "Periodic Transition on an Axial Compressor Stator: Incidence and Clocking Effects: Part I-Experimental Data," J. Turbomachinery, Vol.121 (1999), pp.398-407.

[6] Jeon, W.-P., Park, T.-C., and Kang, S.-H., Experimental Study of Boundary-Layer Transition on an Airfoil Induced by Periodically Passing Wake," Exps. Fluids, Vol.32 (2002), pp.229-241.

[7] Hodson, H. P., "Measurements of Wake-Generated Unsteadiness in the Rotor Passages of Axial Flow Turbines," J. Eng. Gas Turbines and Power, Vol.107 (1985), pp.467-476.

[8] Funazaki, K. and Koyabu, E., "Effects of periodic wake passing upon flat-plate boundary layers experiencing favorable and adverse pressure gradients," J. Turbomachinery, Vol.121 (1999), pp.333-340.