

NACA 0015 익형에 대한 Gurney 플랩의 영향

Effect of the Gurney Flap on NACA 0015 Airfoil

유 능 수* 이 장 호**

Yoo, Neung-Soo Lee, Jang-Ho

Abstract

A numerical investigation was performed to determine the effect of the Gurney flap on NACA 0015 airfoil. A Navier-Stokes code, FLUENT, was used to calculate the flow field about the airfoil. The fully-turbulent results were obtained using the standard $k-\epsilon$ two-equation turbulence model. The numerical solutions showed the Gurney flap increased both lift and drag. These results suggested that the Gurney flap served to increase the effective camber of the airfoil. Gurney flap provided a significant increase in lift-to-drag ratio relatively at low angle of attack and for high lift coefficient. It turned out that 0.75% chord size of flap was best. The numerical results exhibited detailed flow structures at the trailing edge and provided a possible explanation for the increased aerodynamic performance.

키워드 : 익형, Gurney 플랩, 플랩크기, 양항비, 공격각

Keywords : airfoil, Gurney flap, flap height, lift-to-drag ratio, angle of attack

1. 서론

오늘날 새로운 비행기의 설계와 제작은 엄청난 제작비를 요구한다. 이런 관점에서 비행기 제작자들은 새로운 비행기의 제작을 하기보다는 기존의 비행기를 수정, 보완하여 사용함으로써 소비자들의 항공기에 대한 공기역학적 성능 측면의 향상에 대한 요구에 부응해 왔다. 이런 면에서 새로운 날개의 설계 또한 많은 비용과 시간을 요구한다. 이런 비용적 시간적 문제를 해결할 수 있는 해답이 바로 Gurney Flap이다. 이 Gurney Flap은 보편적으로 1~2% 코드길이의 높이를 갖는다. Fig. 1은 익형(airfoil) 후연(trailing edge)의 아래면에 수직으로 위치하는 Gurney Flap을 도식적으로 표현한 것

이다. [1] Gurney 플랩의 목적은 양력증가에 상응하는 항력의 증가 없이 양력을 증가시켜서 익형의 성능을 향상시키는 것이다. [1] Gurney 플랩은 제작비용과 유지비용이 적게 들어서 비행기의 가치를 향상시키는 기계적으로 매우 간단한 고양력 장치이다. 다양한 실험 결과에 따르면, Gurney 플랩의 높이는 일반적으로 코드길이의 2%이내이다.

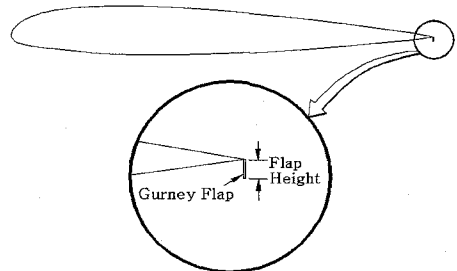


Fig. 1 Gurney flap

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과, 석사과정

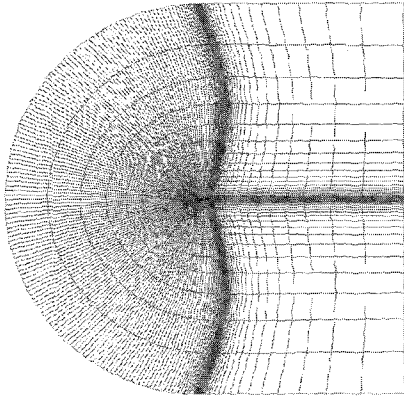


Fig. 2a C-Grid used in computations

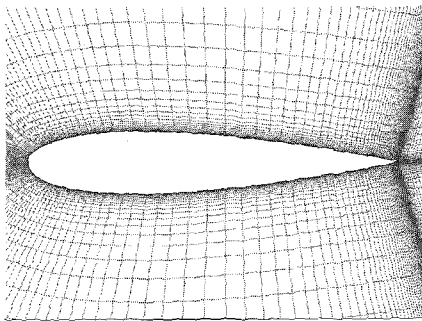


Fig. 2b Closeup of grid

[2][3][4][5][6][7] 그리고, 2% 코드길이 이상의 높이는 익형 항력의 현저한 증가를 일으키고 그로 인하여 익형성능의 지표인 양항비(lift-to-drag ratio)를 나쁘게 한다. [1] 그래서 본 연구에서는 최초의 Gurney 플랩의 높이는 0.5~2.0% 코드 범위를 택하였다. Gurney 플랩의 수치계산 결과는 발산후연(divergent trailing edge, DTE)사용 시 생기는 압력, 양력, 항력변화와 매우 유사하다. Henne는 DTE가 고속 익형에서의 Gurney 플랩과 유사한 역할을 한다고 언급했다.[8][9]

본 연구의 목적은 NACA 0015 익형을 사용하여 익형에 대한 Gurney 플랩의 영향에 관한 질적, 양적인 계산 데이터를 제공하는 것이다. 기본익형(baseline)인 NACA 4412와 Gurney 플랩이 있는 NACA 4412에 대한 수치계산 결과는 Wadcock에 의해 얻어진 실험 결과와 비교되었다. [1] 이 비교는 현 Navier-Stokes 계산의 정확도를 측정하기 위한 것이다.

2. 이론적 배경

Navier-Stokes CFD 해석 프로그램으로 유한 체적법(finite volume method)을 채택하고, 정렬/비정렬 격자를 모두 사용할 수 있는 Fluent사의 Fluent code를 사용하였다. 본 연구에서는 익형 주위의 유동을 완전난류 유동이라 가정하고, Jones, Launder 그리고 Spalding에 의해 제안된 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다.

본 난류 모델은 요즘 널리 사용되며, 견실하고 경제적이고, 매우 정확한 방법으로 알려져 있다. 본 해석 코드에서는 정상상태에 대한 coupled implicit time marching method가 적용되었다.

최초의 수치해석은 0.5% 코드 간격을 두고 0.5~2.0% 코드길이의 높이를 갖는 Gurney 플랩을 장착한 NACA 0015 익형에 대해 수행되었고, 이후 최적 높이를 찾기 위해 양항비 상위 2개 플랩 높이의 사이 높이를 택하였다.

격자는 Gambit preprocessor를 사용하여 형성하였다. 모든 수치해석은 Fig. 2에서 보여지는 190 X 100의 C형 격자로 행해졌다. 뒷면과 아랫면의 far-field 경계는 코드길이의 20배로 정하였다. 익형 상류와 하류의 경계 또한 코드길이의 20배로 정하였다. 이 값의 타당성은 far-field의 위치를 변화시키며 행하여진 Navier-Stoke 수치해석을 통해 입증되었다. [9] 격자점들은 Gurney 플랩 주위에서의 유동과 경계층을 정확히 계산하기 위하여 후연부근과 익형의 표면부근에 집중시키었다. 익형표면으로 부터 첫 번째 격자점까지의 수직거리는 코드 길이에 0.0001c로 하였다. 이같은 격자의 형태는 모든 크기의 Gurney 플랩의 수치해석에 적용되었다.

3. 결과 및 토의

우선 code 증명을 위해서, NACA4412 기본익형과 1.25% 코드길이의 Gurney 플랩을 장착한 NACA 4412 익형에 대해 행하여진 Wadcock의 실험 조건과 일치시키기 위해 마하수(Mach number)는 0.085로 그리고 레이놀드수(Reynolds number)는 1.64×10^6 로 취하였다. Table 1은 공격각(angle of attack)이 0°와 8°일 때의 양항비(L/D), 항력(C_d), 그리고 양력(C_l)의 값에 대한 계산 값과 실험 값의 비교를 보여준다. 이 비교를 통하여 수치해석 값이 실험값과 잘 부합된다는 것을 알 수 있다.

NACA 4412 익형에서 측정된 압력분포와 계산된 압력분포의 비교는 Fig. 3, 4에 제시되었다. Fig. 3은 NACA 4412 익형에 대하여 공격각이 8°

Table 1. NACA 4412, $Re = 1.64 \times 10^6$

(exp ; experimental result,
comp ; computational result)

		$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 8^\circ$		
		C_l	C_d	L/D	C_l	C_d	L/D
clean	exp	0.410	0.012	34.17	1.16	0.022	52.73
	com	0.436	0.012	36.33	1.228	0.024	52.28
flap 1.25%c	exp	0.75	0.015	50.00			
	com	0.70	0.016	44.02			

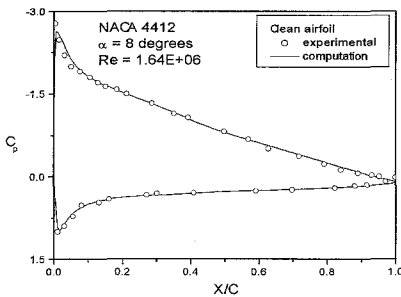


Fig. 3 Pressure distributions comparison I

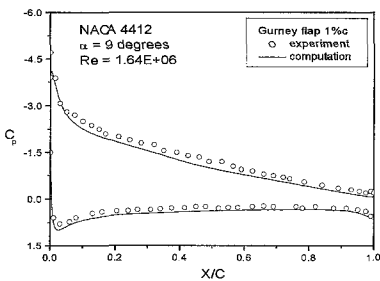


Fig. 4 Pressure distributions comparison II

에서의 기본익형에 대한 비교이며, Fig. 4는 공격각이 9°일때 1.0% 코드길이의 플랩을 장착한 경우에 대한 비교이다. 이 비교들로부터 본 연구의 Navier-Stokes 계산결과가 실험 값 과 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서 사용된 수치해석법이 매우 만족스럽다는 결론을 내릴 수 있었다. 그래서 NACA 0015 익형에 대한 수치해석을 진행할 수 있었다. 본 수치계산에서는 Wadcock의 실험 조건과 일치시키기 위해 마하수는 0.085를 레이놀즈수는 3.0×10^6 을 취하였다. 공격각이 8°에서의 기본익형 과 Gurney 플랩에 높이를 변화시킨 익형들에 대한 압력분포의 비교는 Fig. 5에 나

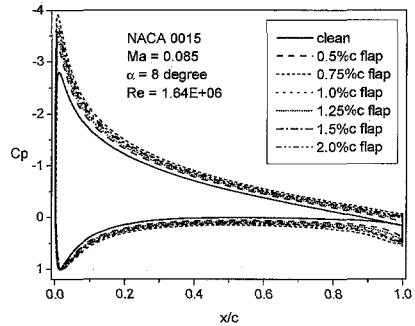


Fig. 5 Pressure distributions for various Gurney flap heights

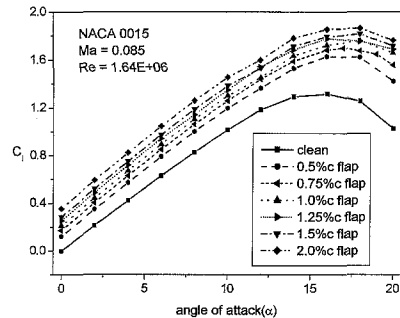


Fig. 6 Lift coefficients versus angle of attack for various Gurney flap heights

타내었다. 이로부터 주어진 공격각에 대하여 Gurney 플랩의 크기가 증가하면 윗면의 압력은 감소하고, 아랫면의 압력은 증가하기 때문에 익형의 윗면과 아래면 사이의 압력 차가 플랩 높이가 증가 됨에 따라 커진다는 것을 알 수 있다. 특히 Gurney 플랩의 존재는 익형의 Peak 와 후연하중을 상당히 증가시킨다. 이것은 양력을 증가시키고 또한 nose-down pitching moment를 증가시킨다.

Fig. 6은 0°에서 20°사이의 공격각에 대한 Gurney 플랩의 크기 변화에 따라 양력이 어떻게 변하는지를 보여준다. Gurney 플랩에 의해, 수치해석은, 선형적은 아니더라도, 플랩 크기가 증가함에 따라 양력이 현저히 증가하는 것을 예견한다. 이 양력증가는 유효캠버(effective camber)의 변화에 의해 얻어진 것이다. 기본 익형에서 부터 0.5% 코드길이의 플랩에서 얻은 양력증가는 1.5%에서 2.0% 코드 플랩 크기를 증가시키었을 때의 양력

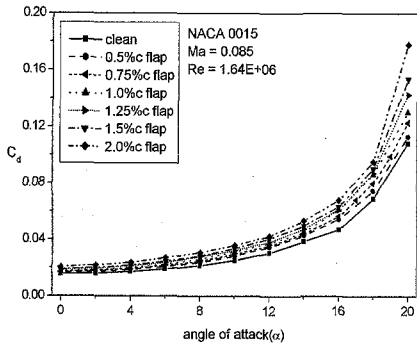


Fig. 9 Drag coefficients versus angle of attack for various Gurney flap heights

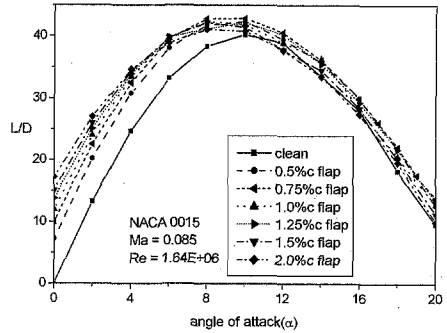


Fig. 11 Lift-to-drag ratio versus angle of attack for various Gurney flap heights

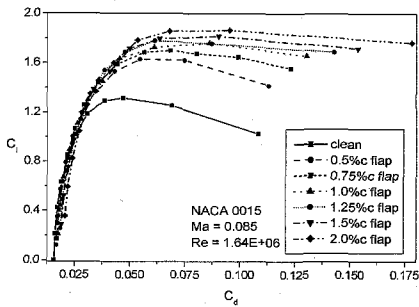


Fig. 10 Drag polars for various Gurney flap heights

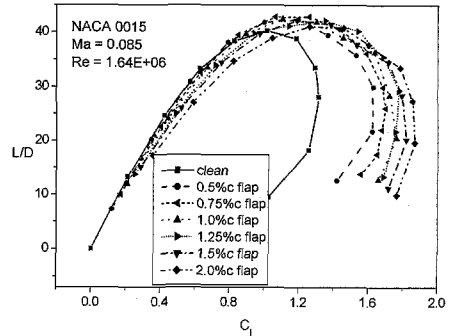


Fig. 12 Lift-to-drag ratio versus lift coefficient for various Gurney flap heights

의 증가보다 크다. Gurney 플랩의 영향은 실질적으로 최대양력(maximum lift coefficient)을 증가시키는 것이다. 기본익형과 비교하여 보면, 최대양력은 Gurney 플랩의 높이가 0.5%코드 길이일 때와 2.0% 코드 길이일 때, 각각 23%와 42%씩 증가한다. 2.0% 코드길이의 Gurney 플랩이 사용된 경우, 주어진 양력계수 $C_l=1.0$ 을 얻기 위한 공격각이 기본익형에 비하여 4.2° 감소됨을 알 수 있다. 이 그림은 무양력 공격각(zero-lift angle of attack)이 Gurney 플랩의 크기가 증가됨에 따라 더 큰 음의 값이 되는 반면 실속(stall)각은 감소되는 것을 보여준다. 정리하면 Gurney 플랩으로 인하여 양력 곡선은 좌측과 위쪽으로 이동하였고, 양력선 기울기는 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Gurney 플랩의 영향이 익형의 유효 캠버를 증가시키는 것임을 다시 한번 보여주는 것이다. Gurney 플랩의 크기에 따른 항력의 변화는 Fig. 9에서 보여준다. 항력계수는 플랩 높이의 증가에 따라 증가하는데, 특히 높은 공격각에서는 증가율

이 더 크다. Fig. 10에서 보여지는 항력 Polar는 플랩의 장착이 낮거나 보통양력($C_l \leq 1.1$)에서는 원형익형에 비해 C_d 를 증가시킴을 보여주며, C_l 값이 1.2 이상일 때는 Gurney 플랩을 장착한 익형이 기본익형보다 낮은 항력을 갖는다는 것을 보여준다. 이것은 Gurney 플랩의 확실한 장점이다. 그러나 Gurney 플랩을 사용한 NACA 0015의 모든 경우에 대하여 항력의 감소를 얻지는 못하였다. 이것은 NACA 4412에 대한 Storm과 Jang의 결과와 동일하다. [1] 낮은 양력계수와 보통 양력계수에서는 플랩의 높이를 증가시킴에 따라 Gurney 플랩과 관계된 항력의 증가가 나타난다. 그러나 높은 양력에서는 항력은 상당히 감소한다. Fig. 11은 공격각에 대한 양항비를 보여준다. 이로부터, 0.75% 코드길이의 Gurney 플랩이 최고의 양항비를 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 양력계수에 대한 양항비를

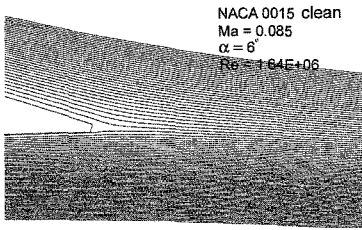


Fig. 13 Streamline pattern of clean airfoil

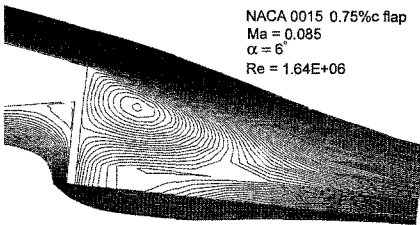


Fig. 14 Streamline pattern around 0.75%c height Gurney flap

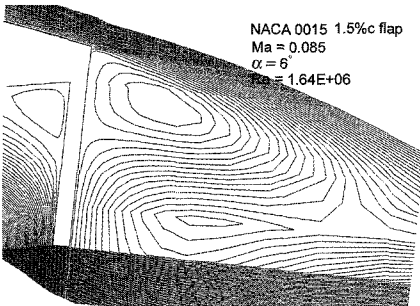


Fig. 15 Streamline pattern around 1.5%c height Gurney flap

보여준다. 이로부터 최고 양항비에 대한 플랩의 영향은 작다는 것을 알 수 있다. 그러나 주어진 양항비에 대한 양력계수는 현저하게 증가하였다. Fig. 13, 14, 15는 공격각이 6°일 때 기본익형과 0.75%c와 1.5%c의 Gurney 플랩을 장착한 익형의 후연 부근에서의 유선의 형태를 보여준다. Gurney 플랩의 존재로 인하여 후연 근처의 익형 아랫면에 강한 역압력구배가 형성되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 역압력구배 지역은 플랩의 앞에 나타난다는 것을 알 수 있다. Liebeck은 플랩의 뒤에 생기는 재순환 와류(recirculating vortex)는 아랫면에서의 플랩 상류의 역압력 구배와 관계된다고 하였다.

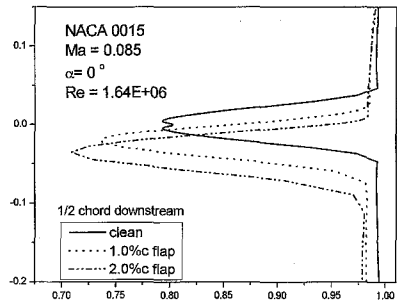


Fig. 16 Wake velocity profile, 1/2 chord downstream of T.E.

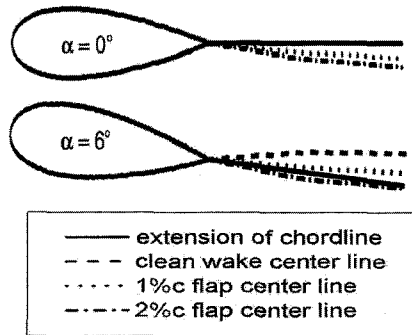


Fig. 17 Wake behavior

이 그림들은 플랩으로 인한 플랩 전면에서의 박리 기포(separation bubble)와 플랩의 뒷면에서 회전 방향이 다른 두 개의 와류들로 구성된 재순환 영역을 보여준다. 플랩의 뒷면 재순환 영역의 위쪽은 시계 방향 그리고 그 아래쪽은 반시계 방향의 와류로 구성되어있으며, 재순환 영역은 플랩이 커짐에 따라 증가 되며 와류의 길이는 대략 플랩 길이의 1.5배임을 알 수 있다. 이것은 water tunnel에서의 유동 가시화 결과와 일치한다.[6] Fig. 16는 공격각 0°에서 익형 1/2 chord 후류에서의 속도 분포를 표현한 것이다. 이 그림은 플랩의 장착으로 후류 운동량 손실이 기본익형 보다 Gurney 플랩을 장착한 익형이 크고, 광범위하다는 것을 보여준다. 이것은 Gurney 플랩을 장착한 경우에 발생하는 항력의 증가를 뒷받침 해 준다. Fig 17는 공격각이 0°일때와 6°일때의 익형 후류의 이동을 도식적으로 표현하였다. 여기서 Gurney 플랩이 있는 경우 후류가 아래 방향으로 이동한 것을 알 수 있다. 즉 후류 위치가 chord 연장선 아래에 위치하고 있다. 이와 같은 후류의 수직이동은 익형의 순환의 증가

와 관계가 있을 것으로 여겨지며, 캠버를 갖는 익형에서 보여지는 특징으로써 Gurney 플랩의 장착이 익형의 캠버를 발생시킴을 뒷받침해준다. 또한 이러한 제순환 영역의 출현은 양력의 증가와 직접적으로 연관된다.

4. 결론

본 수치해석은 NACA 0015 익형을 사용하여 익형에 대한 Gurney 플랩의 영향을 연구하기 위한 것이다. 이 2차원 흐름은 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 채택하여 FLUENT code를 사용하여 계산하였다. Benchmark 수치해석에서 얻어진 결과는 Wadcock의 실험결과와 잘 부합되는 것을 알 수 있었다. 이번 수치해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Gurney 플랩의 사용은 익형의 전체범위에서 하중을 증가시키는데, 특히 suction peak와 후연 근처에서 많이 증가시킨다.

2) 기본익형과 비교하여 보면 Gurney 플랩을 사용했을 경우, 양력은 상당히 증가한다. 반면에 항력은 높은 양력계수에서만 감소한다. 즉 항력상의 이득은 높은 양력계수 경우에만 얻어진다. 또한 nose-down pitching moment도 증가한다.

3) 후류의 아랫방향으로의 흐름이동을 통해 Gurney flap의 장착은 익형의 유효 캠버를 증가시킴을 알수있다.

4) 실제로 높은 양력계수에서 항력계수는 기본 익형보다 작다. 즉 양항비가 기본익형보다 높다.

5) NACA 0015 익형의 경우 최적의 Gurney 플랩의 높이는 대략 0.75% 코드길이로 예상된다.

참고문헌

[1] Storms B.L., Jang C.S., "Lift Enhancement of an Airfoil using a Gurney Flap and Vortex Generators", *Journal of Aircraft*, Vol.31, No.3, pp.542-547, 1994

[2] Myose R., Heron I., and Papadakis M., "Effect of Gurney Flaps on a NACA 0011 Airfoil", *AIAA Conference Paper*, pp.1-9, 1996

[5] Kentfield J.A.C., Clavelle E. J., "The Flow Physics of Gurney Flaps, Devices for Improving Turbine Blade Performance", *Wind Engineering*, Vol.17, No.1, pp.24-34, 1993

[4] Kentfield J.A.C., "Theoretically and

Experimentally obtained Performances of Gurney-Flap equipped Wind Turbines", *Wind Engineering*, Vol.18, No.2, pp.63-74, 1994

[5] Philippe G., Guy D. and Jean L., "Gurney Flap Scaling for Optimum Lift-to Drag Ratio," *AIAA J.*, Vol.35, No.12, pp.1888-1890, 1997

[6] Neuhart D.H., Pendergraft Jr. O.C., 1998 "A Water Tunnel Study of Gurney Flap", *NASA TM 4071*, pp.1-19

[7] Bloy A.W., Durrant M.T., "Aerodynamic Characteristics of an Aerofoil with Small Trailing Edge Flaps", *Wind Engineering*, Vol.19, No.3, pp.167-172, 1995

[8] Henne P.A., Gregg R.D., "New Airfoil Design Concept," *Journal of Aircraft*, Vol.28, No.5, pp.300-311, 1991

[9] Jang C. S., "Computational Evaluation of an Airfoil with a Gurney Flap", *AIAA-92-2708-CP*, pp.801-809, 1992