

NACA 00XX 익형에 대한 Gurney 플랩의 영향

The Effect of the Gurney Flap on NACA 00XX Airfoil

유 능 수*
Yoo, Neung-Soo

Abstract

The objective of this study is to provide the quantitative and qualitative computational data about the aerodynamic performance of Gurney flap on NACA 00XX airfoils and to show the optimum Gurney flap height for each airfoil. The test was performed on 7 different airfoils from NACA 0006 to NACA0024, which have a 3% chord(c) thickness interval. For every NACA 00XX airfoil, Gurney flap heights were changed by 0.5% or 0.25% chord interval from 0 to 2.0% c to study their effects. The aerodynamic characteristics of clean and Gurney flap airfoil were compared, and the influences of Gurney flap on each airfoil were compared. As a CFD (Computational Fluid Dynamics) solver, FLUENT, based on Navier-Stokes code, was used to calculate the flow field around the airfoil. The fully-turbulent results were obtained using the standard $k-\epsilon$ two-equation turbulence model. The test results showed that Gurney flap increased the lift coefficient much more than the drag coefficient over a certain range of the lift coefficient, so the lift-to-drag ratio, which is the important index of airfoil performance, was increased. Based on the test results, the relationship between the airfoil thickness and the optimum Gurney flap heights was suggested.

키워드 : 익형, 거네이플랩, 익형두께, 플랩높이, 양항비, 공격각

Keywords : Airfoil, Gurney Flap, Airfoil Thickness, Flap Height, Lift-to-Drag Ratio, Angle of Attack

1. 서론

고양력 시스템(high-lift system)들은 일반적으로 매우 복잡하여 높은 유지비용과 추가하중이 요구된다. 그러므로 성능은 비슷하면서 제작비용과 유지비용이 적게 드는 기계적으로 좀더 간단한 고양력 시스템을 추구하게 되었는데 그 중 하나가 작은판으로 구성된 Gurney 플랩이다. Gurney 플랩의 크기는 보통 익형 코드길이(c)의 1-2%의 범위이며, Fig. 1 에서 보여지는 것처럼 익형(airfoil) 후연(trailing edge)의 아랫면(pressure side)에 수직으로 위치한다.[1]-[7] 2% 코드길이 이상의 높이는

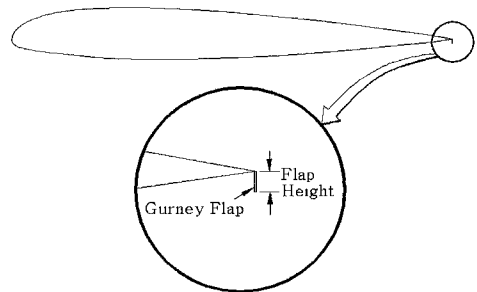


Fig. 1 Gurney flap

익형 항력의 현저한 증가를 일으키고 그로 인하여

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수

익형성능의 지표인 양항비(lift-to-drag ratio)를 나쁘게 한다.[1] 그러므로 본 연구에서는 Gurney 플랩의 크기를 0.5-2.0% 코드 범위에서 취했다. Gurney 플랩의 목적은 양력증가에 상응하는 항력의 증가 없이 양력을 증가시켜 익형의 성능을 향상시키는 것이다.[1]

본 연구의 목적은 일련의 NACA 00XX 익형들을 사용하여 익형의 두께가 Gurney 플랩의 최적크기에 미치는 영향에 관한 연구를 하는 것이다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 Navier-Stokes CFD 해석 프로그램으로 유한 체적법(finite volume method)을 채택하고, 정렬/ 비정렬 격자를 모두 사용할 수 있는 Fluent code를 사용하였다. 본 연구에서는 익형 주위의 유동을 완전난류 유동이라 가정하고, Jones, Launder 그리고 Spalding에 의해 제안된 표준 k-ε 난류모델을 사용하였다. 본 난류 모델은 현재 널리 사용되며, 견실하고 경제적이고, 매우 정확한 방법으로 알려져 있다. 본 해석 코드에서는 정상상태에 대한 explicit time marching method가 적용되었다.

Gurney 플랩의 크기는 기본익형에서부터 최대 2% 코드길이로 한다. 이들 사이는 0.25 또는 0.50% 코드길이의 간격으로 높이를 분류한다. 본 수치해석은 이 같은 크기(또는 높이)의 Gurney 플랩을 3% 코드의 두께차를 갖는 7개의 NACA 00XX 대칭익형들, 즉 NACA 0006, 0009, 0012, 0015, 0018, 0021, 0024에, 달아서 수행되었다.

격자는 Gambit 선처리 프로그램(preprocessor)를 사용하여 형성하였다. 모든 수치해석은 Fig. 2에서 보여지는 190 X 100의 C형 격자로 행해졌다. 윗면과 아랫면의 먼영역(far-field) 경계는 코드길이의 20배로 정하였다. 익형 상류와 하류의 경계 또한 코드길이의 20배로 정하였다. 이 값의 타당성은 먼영역의 위치를 변화시키며 행하여진 Navier-Stoke 수치해석을 통해 입증되었다.[7] 격자점들은 Gurney 플랩 주위에서의 유동과 경계층을 정확히 계산하기 위하여 후연부근과 익형의 표면부근에 집중시켰다. 익형표면 으로부터 첫 번째 격자점까지의 수직거리는 0.0002 c로 하였는데 이는 $y^+ = 15$ 에 해당한다. 이 같은 격자의 형태는 모든 크기의 Gurney 플랩의 수치해석에 적용되었다.

3. 결과 및 토의

Code와 수치기법의 증명을 위한 벤치마크(benchmark) 계산의 대상으로 Wadcock의 실험을 택하였다. 그러므로 NACA 4412 기본익형과

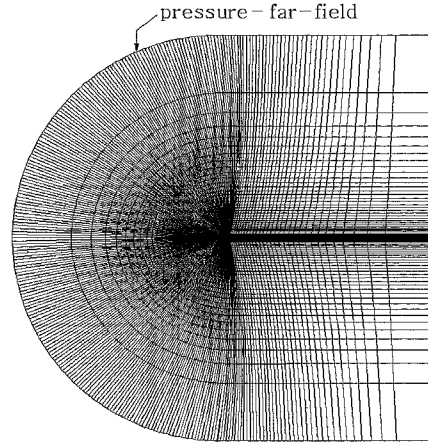


Fig. 2a C-Grid used in computations

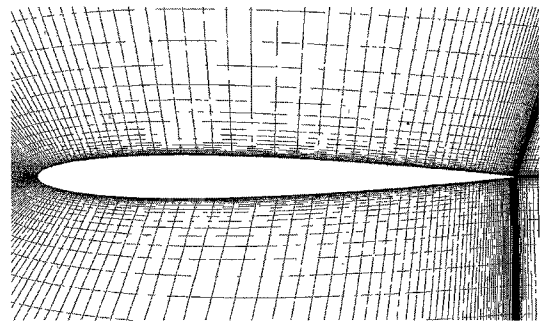


Fig. 2b Closeup of grid

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
	comp	0.436	0.012	36.33	1.228	0.024	52.28
flap 1.25% c	exp	0.75	0.015	50.00			
	comp	0.70	0.016	44.02			

1.25% c 크기의 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), 항력계수 (C_d), 그리고 양력계수 (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 압력 분포와 계산된 압력분포의 비교는 Fig. 3 및 4에 제시되었다. Fig. 3 은 공격각이 16° 에서의 기본 익형에 대한 비교이며, Fig. 4는 공격각이 9° 일 때 1.0% 코드길이의 플랩을 장착한 경우이다. 이 그림들로부터 Navier-Stokes 계산결과와 실험값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 비교로부터 본 연구에서 사용된 수치해석법이 매우 만족스럽다는 결론을 내릴 수 있었다. NACA 00XX 익형들에 대한 계산을 위하여 마하수는 0.1로 레이놀즈수는 3.0×10^6 을 취하였다. 계산 결과들은 다음과 같이 제시하였다.

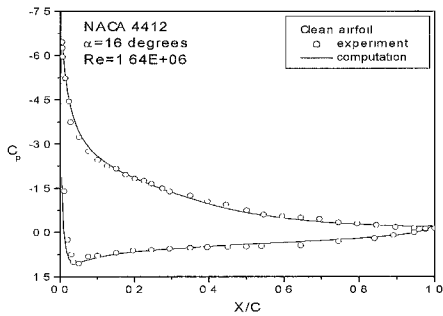


Fig. 3 Pressure distributions comparison I

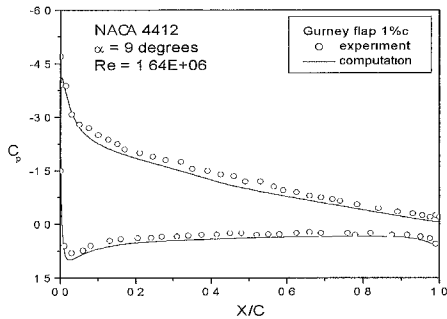


Fig 4 Pressure distributions comparison II
Fig. 5는 공격각이 8° 일 때 NACA 0018에 대한 압력계수분포도 이다. 이로부터 Gurney 플랩은 양력을 증가시키며 플랩이 클수록 양력이 커질 수 있다. 이 같은 양력의 증가는 주로 전연(leading

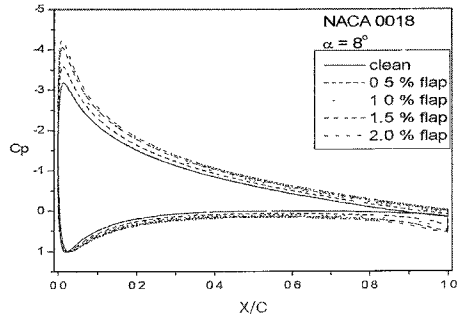


Fig 5 Pressure distributions for various Gurney flap heights

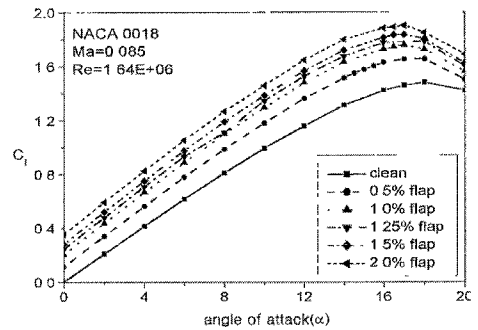


Fig. 6 C_l for NACA 0018

edge)의 최고부압 (suction peak) 부분과 플랩근처에서 발생함을 알 수 있다. 플랩은 결국 익형의 유효캠버(effective camber)를 증가시키는 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

Gurney 플랩의 존재로 인하여 후연근처의 익형 아랫면에 강한 역압력구배가 형성되는 것에 주목하여야 한다. Liebeck은 플랩의 뒤에 생기는 재순환 와류(recirculating vortex)는 아랫면에서의 플랩 상류의 역압력 구배와 관계된다고 하였다.[1]

수치해석 결과로부터 다음의 사실들이 도출되었다. Fig. 6으로부터 Gurney 플랩에 의해 양력이 선형적은 아니더라도 플랩 크기에 따라 현저히 증가하는 것과 최대양력(maximum lift coefficient)을 증가시키는 것을 알 수 있다.며, 또한 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. 그러나 양력선 기울기는 변하지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 항력계수는 플랩 높이의 증가에 따라 증가하며, 특히 높은 공격각에서는 증가율이 더 크다는 것을 알 수 있다 그러나 Fig. 8의 결과는 C_l 값이 클 경우에는 Gurney 플랩을 장착한 익형

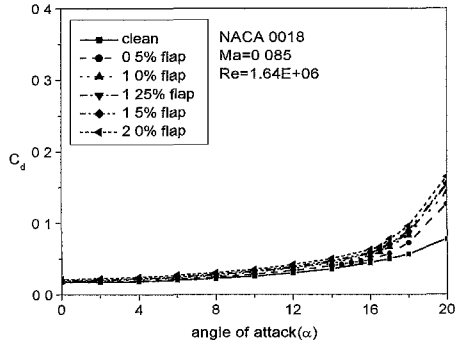


Fig. 7 C_d for NACA 0018

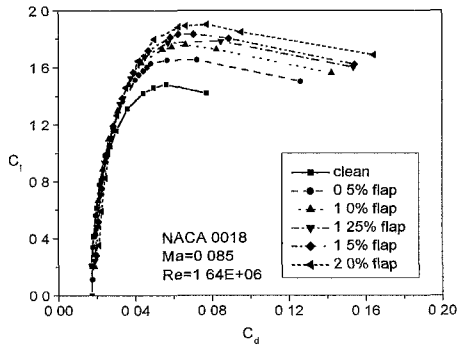


Fig. 8 Drag polar for NACA 0018

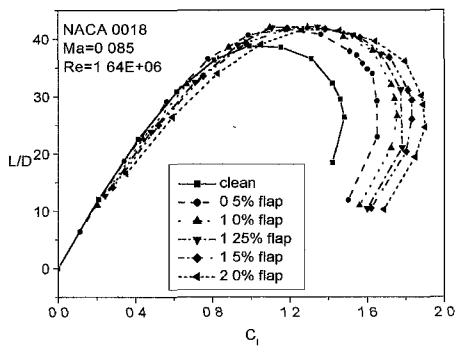


Fig. 9 $L/D - C_l$

이 기본익형보다 낮은 항력을 갖는다는 것을 보여 준다. 이것은 Gurney 플랩의 확실한 장점이다. 그러나 Fig. 9로부터 주어진 양항비에 대한 양력계수는 현저하게 증가함을 알 수 있다. 하지만 최고 양항비에 대한 플랩의 영향은 작다는 것을 알 수 있

었다.

Gurney 플랩을 사용한 NACA 00XX의 모든 경우에 대하여 항력의 감소를 인지 못하였다. 이것은 NACA 4412에 대한 Storm과 Jang의 결과와 동일한 것이다.[8] 이러한 계산결과는 Table 2에 요약되어 있다. Table 2에서 $(L/D)_{max}$ 의 순서는 $(L/D)_{max}$ 값이 큰 순서로 플랩크기를 적은 것이다. 그리고 $(C_l)_{L/D}$ 는 플랩을 단 경우가 플랩이 없는 경우보다 L/D 가 커지기 시작하는 C_l 값을 나타낸다.

Table 2 Summary

(clean: clean airfoil / flap : airfoil with Gurney flap)

airfoil I	$(C_l)_{max}$		$(L/D)_{max}$ order	$(C_l)_{L/D}$
	clean	flap		
0006	0.958	1.23	$(C_l)_{max}$ 0.25-0.5-1.0-clean-1.5-2.0	0.8
0009	1.22	1.59	0.5-0.25-1.0-clean-1.5-2.0	0.95
0012	1.29	1.73	0.75-0.5-1.0-1.5-2.0-clean	1.1
0015	1.45	1.86	1.0-0.75-0.5-1.25-1.5-2.0-clean	1.15
0018	1.48	1.88	1.25-1.0-1.5-0.5-2.0-clean	1.0
0021	1.41	1.86	1.5-1.25-1.75-2.0-1.0-0.5-clean	0.9
0024	1.28	1.83	2.5-2.0-1.75-1.5-1.0-0.5-clean	0.75

Fig. 10은 익형의 종류 즉 익형의 두께에 따른 $(L/D)_{max}$ 의 관계를 기본익형(clean)을 포함한 플랩의 크기의 함수로 나타내었다. Fig. 10에서의 플랩의 크기와 익형의 두께의 역할을 바꾸어 도식한 것이 Fig. 11이다. Fig. 12와 Fig. 13은 Fig. 10과 11의 $(L/D)_{max}$ 을 $(C_l)_{max}$ 로 대치한 것이다. Fig. 10으로부터 각각의 익형두께에 대한 최적의 Gurney 플랩의 크기를 알 수 있고, 또한 익형두께의 변화에 따른 각 크기의 플랩의 성능변화도 알 수 있다. 그리고, 익형이 두꺼워지면 최적 플랩두께도 증가함을 알 수 있다. Fig. 11은 플랩의 크기에 따른 최적 익형두께를 나타내고 있다. Fig. 12는 익형두께에 따른 $(C_l)_{max}$ 의 변화를 플랩크기에 대하여 나타내고 있다. 그리고, Fig. 13은 플랩크기에 따른 $(C_l)_{max}$ 의 변화를 익형의 두께에 대하여 나타내고 있다.

Fig. 14의 (a), (b), (c), (d)는 NACA 0015익형의 Gurney flap 크기에 따른 재순환 영역을 보여주고 있다. 플랩 크기의 증가에 따라 재순환 영역이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 15와 16은 NACA 0012 익형의 1c와 2c 만큼의 거리에 있는 후류에

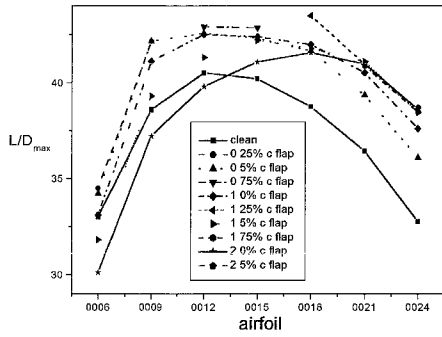


Fig. 10 Relationship between airfoil thickness and $(L/D)_{\max}$

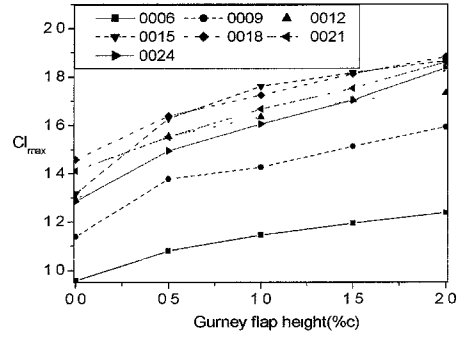


Fig. 13 Relationship between Gurney flap height and $(C_l)_{\max}$

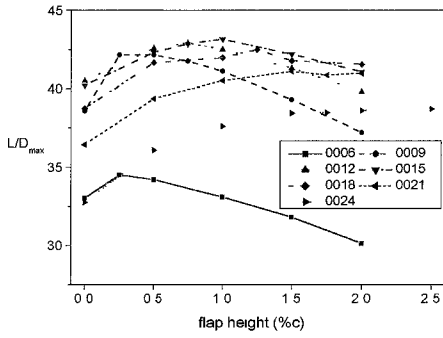
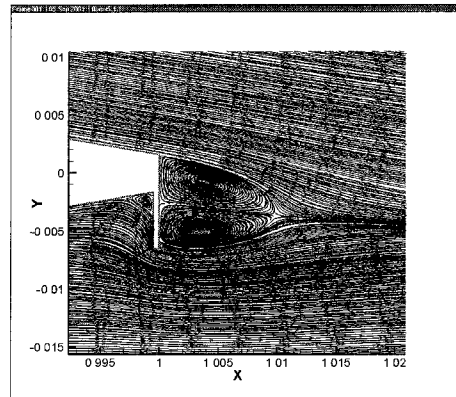


Fig. 11 Relationship between Gurney flap height and $(L/D)_{\max}$



(a) 0.5% c Gurney flap

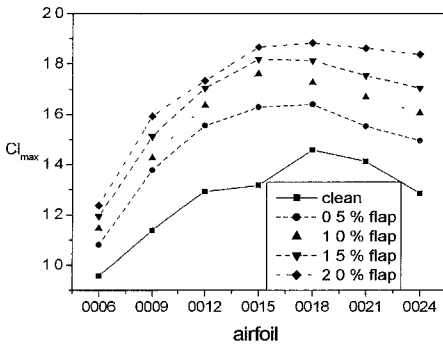
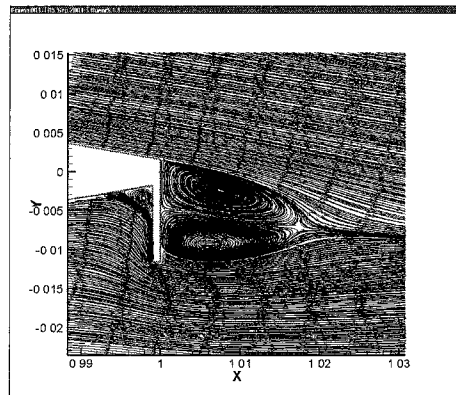
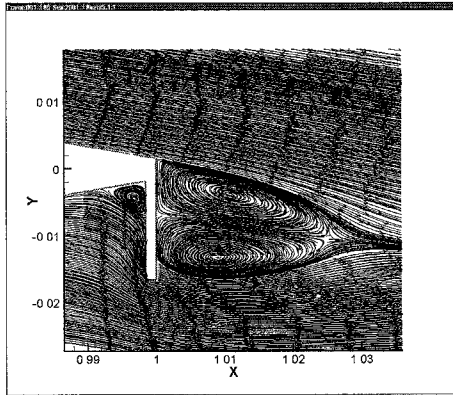


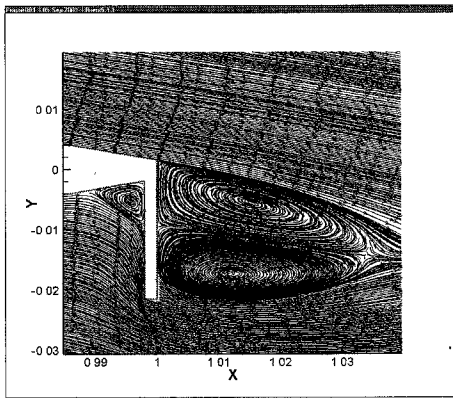
Fig. 12 Relationship between airfoil thickness and $(C_l)_{\max}$



(b) 1.0% c Gurney flap



(c) 1.5%c Gurney flap



(d) 2.0%c Gurney flap

Fig. 14 Recirculation region behind Gurney flap for NACA 0015

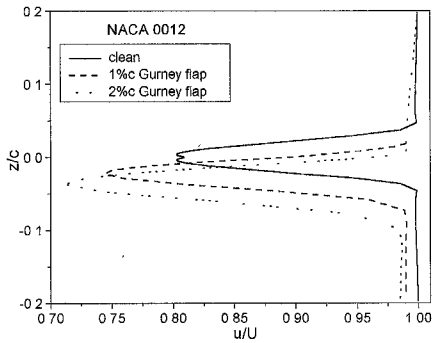


Fig. 15 Velocity distribution behind 1 chord from flap for NACA 0012

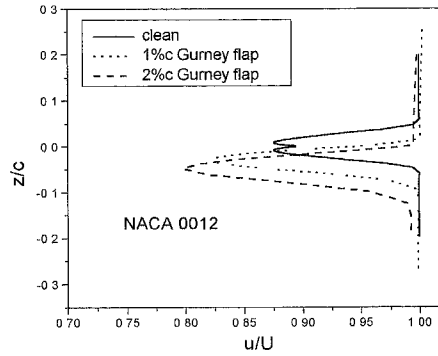


Fig. 16 Velocity distribution behind 2 chord apart from flap for NACA 0012

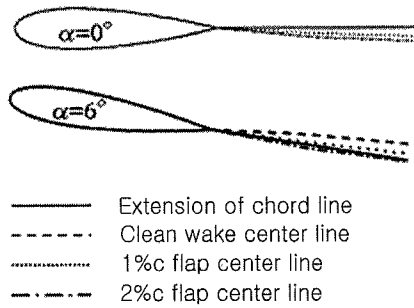


Fig. 17 Downward deflection of flow direction behind trailing edge

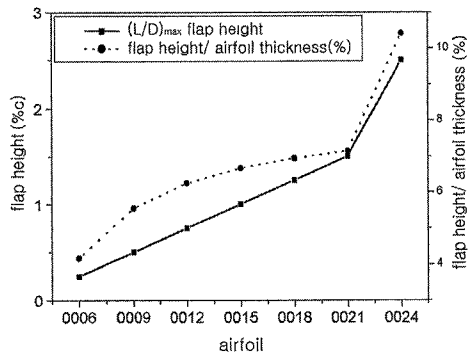


Fig. 18 Relationship between airfoil thickness and optimum Gurney flap height

서의 속도분포를 보여주고 있다. 이로부터 플랩으로 인한 흐름의 처짐과 속도의 결손을 알 수 있다. 그러므로 양력의 증가와 항력의 증가의 이유를 알 수 있는 것이다. Fig. 17로부터 흐름이 아랫 방향으로 처지는 것을 볼 수 있다. 이는 유효캠버의 증가를 의미하는 것이다. 마지막으로 Fig. 18은 익형 두께와 플랩의 높이의 관계를 보여주고 있다. 이로부터 익형의 두께가 증가함에 따라 최적 플랩높이를 익형두께로 나눈 무차원 플랩의 높이가 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 수치 실험은 7개의 NACA 00XX 익형을 사용하여 익형의 두께가 최적의 Gurney 플랩 크기에 미치는 영향을 연구하기 위한 것이다. 본 수치실험은 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 채택하여 Fluent 코드를 사용하여 계산하였다. 벤치마크 수치해석에서 얻어진 결과는 Wadcock의 실험결과와 잘 부합되는 것을 알 수 있었다.

일련의 NACA 00XX에 대한 계산결과 Gurney 플랩의 공기역학적 특성은 다음과 같음을 알 수 있다.

(1) Gurney 플랩의 사용은 익형의 전체 범위에서 하중을 증가시키는데, 특히 최대부압 (suction peak)과 후연 근처에서 그러하다.

(2) Gurney 플랩의 사용은 기본 익형과 비교하여 양력과 항력 모두의 증가를 야기한다. 그러나, 높은 양력 계수에서는 항력의 상대적 감소를 얻을 수 있다. 즉, 양항력상의 이득은 높은 양력계수의 경우에만 얻어진다.

(3) 후류에서 흐름이 아랫방향으로 처지는 것은 Gurney 플랩의 장착이 익형의 유효 캠버를 증가시킨 결과로 해석 할 수 있다.

(4) Gurney 플랩의 사용은 익형 후연의 재순환 영역(Recirculation Regm)을 증가 시킨다

(5) Gurney 플랩의 앞과 뒤의 압력 변화를 통하여 플랩의 높이가 증가함에 따라 익형의 항력이 증가함을 알 수 있다.

(6) 익형의 두께가 증가함에 따라 최적 익형의 높이는 증가한다. 어쩌면 이는 당연한 결과일 것이다. 그러나 익형의 두께가 증가함에 따라 최적 플랩높이를 익형 두께로 나눈 무차원 플랩의 높이가 증가한다는 것은 매우 주목할 일이다. 이에 대한 원인 규명은 차후의 과제가 될 것이다.

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 001

Airfoil," AIAA Conference Paper, pp.1-9, 1996
 [3] 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., "A Water Tunnel Study of Gurney Flap," NASA TM 4071, pp.1-19, 1998
 [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] Jang C. S., "Computational Evaluation of an Airfoil with a Gurney Flap," AIAA-92-2708 -CP, pp.801-809, 1992