

PARSEC 함수를 이용한 에어포일의 공력 형상 설계 연구

이재훈¹, 정경진¹, 권장혁^{*2}, 안중기³

A STUDY ON THE AERODYNAMIC SHAPE DESIGN WITH THE PARSEC FUNCTION

Jaehun Lee¹, Kyungjin Jung¹, JangHyuk Kwon^{*2} and Joongki Ahn³

In the shape design optimization of an airfoil, the shape function has been used to find the optimal airfoil shape for given conditions. The parameters determining the airfoil shape are used in the shape design optimization as design variables. However, they usually don't have physical meaning. The PARSEC (Parametric Shapes) function is a recently proposed shape function and its parameters have the physical meaning. In this study the usefulness of the PARSEC is tested for the RAE2822 airfoil in the transonic flow region to reduce the shock strength and the result is compared with Hicks-Henne function. The optimized airfoils reduce the shock strength and they show similar result.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 오일러방정식(Euler Equations), 형상함수(Shape Function), PARSEC

1. 서 론

공력 형상 최적 설계에서는 에어포일의 형상을 함수를 사용해 근사해왔다. 이를 보통 형상함수라고 부르며 이들은 형상을 정의하기 위해 인자들을 필요로 한다. 공력 형상 최적 설계는 최적화 기법을 사용해 원하는 공력 성능을 주는 형상 제어 인자를 찾는 것이다. 형상함수 중에서 Hicks-Henne과 NURBS가 많이 사용되어져왔다[1,2]. 최근에 Sobieczky에 의해 제안된 PARSEC은 공력 형상 최적 설계에서 주목을 받기 시작했다[3,4,5,6].

2. 형상함수

2.1 Hicks-Henne 함수

이 형상함수는 많은 연구자들이 에어포일의 형상 최적 설계에 사용해 왔으며 적은 설계변수로 좋은 성능을 보여준다고 알려져 있다. 식 (1)-(4)는 Hicks-Henne 함수를 정의해 준다.

$$Z = Z_0 + \sum_{i=1}^n d_i f_i \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{X^{1/2}(1-X)}{e^{15X}} \quad (2)$$

$$f_k = \sin(\pi X^{c_k})^3, k = 2, \dots, n \quad (3)$$

$$c_k = \frac{\log(0.5)}{\log\left(\frac{k-1}{n}\right)} \quad (4)$$

식 (1)에서 Z는 새로운 에어포일의 수직 방향 좌표를, X는 시위 방향에 대한 좌표를 나타내고 d는 Hicks-Henne 함수들에 가중치를 말한다. d는 Hicks-Henne 함수의 형상을 결정하는 인자에 해당한다. Fig. 1은 5개의 Hicks-Henne 함수를 보여주고 있다. 그림을 통해 앞전과 뒷전에 점들이 밀집되어있는 것을 알 수 있다. Hicks-Henne함수의 효율성과 성능은 뛰어나지만 형상 인자의 d에 대한 물리적 이해는 힘든 면이 있다. d는 단지 초기 에어포일의 형상에 대한 변형의 크기를 조절할 뿐이

1 학생회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

2 정회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

3 정회원, 국방과학연구소

* Corresponding author, E-mail: jhkwon@kaist.ac.kr

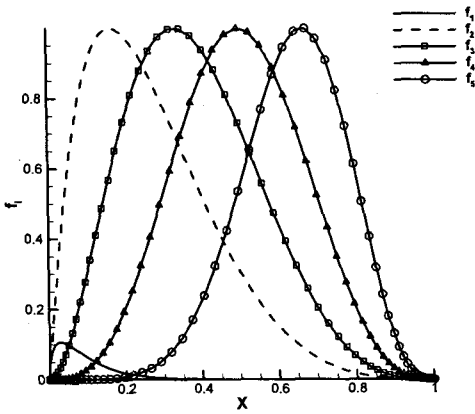


Fig. 1 Hicks-Henne function

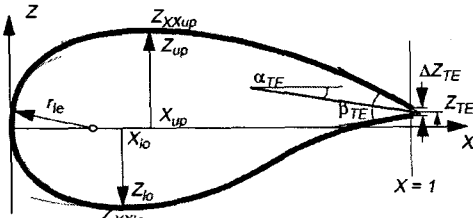


Fig. 2 Definition of parameters of PARSEC[3]

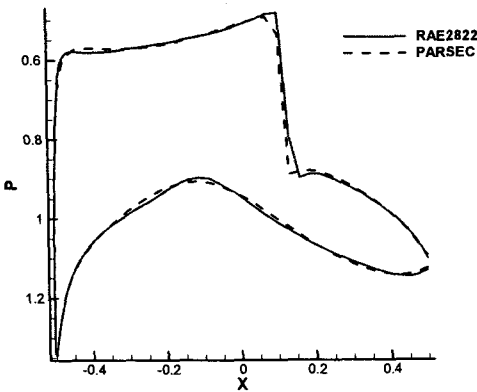


Fig. 3 Pressure distribution of RAE2822 and PARSEC

다. Hicks-Henne 함수는 초기 형상에 변형을 더하기 때문에 설계 초기에 실제 형상과 오차가 발생하지 않는다.

2.2 PARSEC 함수

Hicks-Henne 함수와 달리 PARSEC의 형상 조절 인자들은 에어포일의 형상과 밀접하게 연관되어있다. 식 (5)는 PARSEC의 정의식을 나타낸다.

$$Z = \sum_{n=1}^6 a_n(p) X^{n-1/2} \quad (5)$$

식 (5)에서 p 는 PARSEC의 형상 인자를 의미하고 총 11개의 인자가 에어포일의 윗면과 아랫면에 정의된다. Fig. 2는 이들 인자를 보여준다.

Fig. 2에 표시된 인자에 대한 설명은 다음과 같다.

- ▶ r_{lc} : 앞전 반경
- ▶ X_{up}, Z_{up} : 윗면 최대점 좌표
- ▶ $Z_{X_{up}}$: 윗면 최대점의 곡률
- ▶ TE: 뒷전 방향
- ▶ TE: 뒷전 사이각
- ▶ X_{TE}, Z_{TE} : 뒷전 좌표
- ▶ ΔZ_{TE} : 뒷전 오프셋
- ▶ X_{lo}, Z_{lo} : 아랫면 최저점 좌표
- ▶ $Z_{XX_{lo}}$: 아랫면 최저점 곡률

3. 공력 형상 최적설계

PARSEC 함수의 성능을 알아보기 위해 천음속 에어포일 윗면의 충격과 강도를 줄이는 최적화에 적용해 보았다. 최적화 결과는 기존에 많이 사용되던 Hicks-Henne 함수와 비교하였다.

3.1 공력 해석

공력 해석을 위해 2차원 오일러 방정식 해석자가 사용되었다[8]. 공간 차분을 위해 유한 체적법이 사용되었고 수치 Roe의 FDS와 TVD가 사용되었다. 수렴 가속을 위해서 다중격자 기법이 적용되었다. 해석에 사용된 에어포일은 RAE2822며 격자 크기는 129x33으로 O타입의 형태이다. 마하수는 0.73, 받음각은 2.78도로 설정하였다. 형상 최적 설계에 앞서 PARSEC의 형상 표현 능력을 알아보기 위해 RAE2822 에어포일의 형상을 근사화했다. Fig. 3는 RAE2822와 PARSEC으로 근사화한 에어포일의 해석 결과를 보여주고 있다. 앞전과 충격파 부근에서 미세한 차이를 보이지만 초기 형상인 RAE2822의 압력 분포와 잘 일치한다.

3.2 공력 형상 최적설계

최적 설계를 위한 목적함수로는 천음속 영역에서 발생하는 충격파에 의한 항력을 감소시키는 것으로 설정하였다. 제한조건은 초기 양력을 유지하는 것으로 하였다. 최적화 기법은 SQP(Sequential Quadratic Programming)을 사용하였다. SQP는 적은 함수 계산을 요하기 때문에 함수 계산 시간이 오래 걸

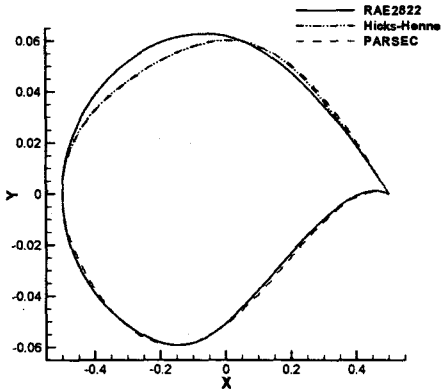


Fig. 4 Comparison of airfoil shape

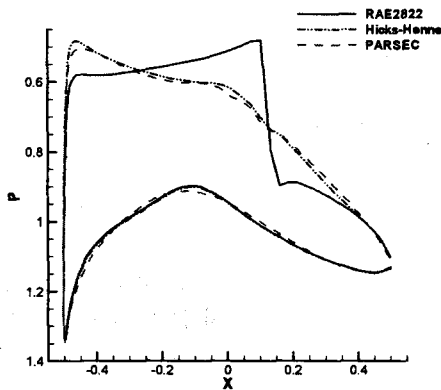


Fig. 5 Comparison of pressure distribution

리는 문제에 적합하다고 알려져 있다. 형상함수는 Hicks-Henne과 PARSEC을 사용했으며 이들의 성능을 비교해 보았다. Hicks-Henne의 경우 5개의 함수를 사용했고 PARSEC은 윗면 최대점 좌표(X_{up} , Z_{up}), 윗면 최대점의 곡률(ZXX_{up}), 앞전 반경(r_{ie}), 뒷전 사이각(β_{TE}) 등의 5개를 형상 인자로 설정하였다.

3.3 결과

Fig. 4-5는 최적화된 결과를 보여주고 있다. Fig. 4에서 두 형상함수의 최적화된 에어포일은 비슷한 형상을 하고 있으며,

Table 1 Comparison of PARSEC variables

	Initial	Optimized
X_{up}	0.42896	0.504313
Z_{up}	6.3005E-02	5.9723E-02
ZXX_{up}	-0.42818	-0.43055
r_{ie}	8.1872E-03	5.8330E-03
β_{TE}	-8.829	-8.830

앞전 반경의 크기가 줄어들고 윗면 최대점의 위치가 후방으로 이동하는 경향을 보인다. Fig. 5는 압력분포를 보여주고 있는데 최적화에 의해 충격파의 강도가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 두 형상함수 모두 목적함수인 항력은 40% 정도 감소했으며 제한조건인 양력 변화는 0.04% 정도로 제한조건을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 1은 설계 전후의 PARSEC 변수의 값을 보여주고 있다. Fig. 4의 에어포일 형상의 변화와 PARSEC 변수의 변화가 잘 일치하고 있다. 즉 윗면의 최대점 x좌표가 후방으로 이동하였으며 최대 높이도 낮아졌다. 더불어 앞전 반경도 작아졌다. 최적화된 형상에서 충격파의 강도가 약해지는 원인은, 윗면의 최대점 위치가 $0.5c$ 부근으로 이동함에 따라 약한 compression wave가 생성되어 강한 충격파의 생성을 방지하기 때문이다. 이와 같이 PARSEC의 설계 변수는 에어포일의 형상을 직접적으로 표현해주기 때문에 형상 최적설계에서 중요한 인자를 파악하기가 더 용이하다. 현재 문제에서는 충격파의 강도를 줄이기 위해서는 윗면의 최대점 위치 및 앞전 반경의 크기가 중요한 요소가 됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 PARSEC을 이용한 공력 형상 최적 설계를 수행하였으며 설계 결과를 Hicks-Henne 함수와 비교하였다. 최적 설계 결과는 두 함수 모두 비슷했으며 충격파의 세기를 약화시키는 데 성공하였다. PARSEC의 성능이 기존의 형상함수와 동등할 수 있음을 본 연구를 통해 확인할 수 있었으며 향후 연구에는 실제적인 문제에 적용해 PARSEC의 유용성을 알아보고자 한다.

참고문헌

- [1] 1978, Hicks, R.M. and Henne, P.A., "Wing Design By Numerical Optimization," *Journal of Aircraft*, Vol.15, No.7, pp.407-412.
- [2] 1995, Piegl L. and Tiller, W., "The NURBS Book," *Springer-Verlag*.
- [3] 1988, Sobieczky, H., "Parametric Airfoils and Wings," *Notes on Numerical Fluid Mechanics*, Vol.68, pp.71-88.
- [4] 2003, Wu, H.-Y., Yang, S., Liu, F. and Tsai, H.-M., "Comparison of Three Geometric Representations of Airfoils for Aerodynamic Optimization," *AIAA 2003 - 4095*.
- [5] 2001, Holst T.L., and Pulliam, T.H., "Aerodynamic Shape Optimization Using a Real-Number-Encoded Genetic Algorithm," *AIAA 2001-2473*.



- [6] 2004, Ray T., and Tsai, H.M., "Swarm Algorithm for Single- and Multiobjective Airfoil Design Optimization," *AIAA JOURNAL*, Vol.42, No.2, pp.366-373.
- [7] 1996, Ladson, C.L., Brooks, C.W., Hill, A.S., Sproles, D.W., "Computer Program to Obtain Ordinates for NACA Airfoils," *NASA TM 4741*.
- [8] 1998, 박수형, 성춘호, 권장혁, "Upwind TVD 기법을 이용한 효율적인 다중격자 DADI기법," *항공우주학회 추계학술대회발표 논문집*, pp.71-74.