

CMM을 이용한 Airfoil의 Edge부위 측정오차 최소화를 위한 Fitting방법

강 진우*, 변 재현

경상대학교 산업시스템공학부, 항공기부품기술연구센터

Abstract

본 연구는 turbine compressor airfoil의 측정 및 검사 업무에서 edge(leading edge/trailing edge) 부위에서 자주 발생하는 프로브 slip현상으로 인한 측정 오차를 최소화하기 위하여 터빈 압축기의 airfoil 형상 규격에 대하여 살펴보고, 균일 샘플링방법을 이용하여 최소제곱법으로 보상하여 최적의 형상을 구하는 방법을 제시하고자 한다. 국내 기업에서는 airfoil형상의 edge부위를 검사할 때 leading edge부위의 타원 형상과 trailing edge부위의 원 형상을 AutoCAD상에서 임의로 그려서 규격을 검사하고 있다. 따라서 본 연구에서는 edge부위에서 발생하는 측정오차를 최소화하기 위하여 보다 정확하고 체계적인 fitting 방법을 도입함으로써, airfoil의 형상치수에 관한 규격검사 업무의 신뢰성과 효율을 향상시키고자 한다.

1. 서론

최근의 제트 엔진부품의 추세는 높은 추진력과 낮은 중량비를 요구하므로 엔진 부품 설계시 엔진 부품의 소형화 및 경량화와 함께 높은 성능과 안전성을 필요로 한다. 이러한 요구 조건을 충족시키기 위해서는 고도의 정밀가공과 정밀측정이 수반되어야 한다. 제트 엔진부품 중 연소기, 터빈 압축기, 팬, 터빈 블레이드와 같은 높은 정밀도를 요구하는 제품들은 공차가 매우 엄격하다. 따라서, 이와 같은 제품들은 정밀가공을 요구할 뿐만 아니라 측정/검사시에도 매우 정밀한 측정을 요구한다. 특히, 본 논문의 연구대상인 터보 고압 압축기 airfoil형상의 edge부위의 형상은 반경이 0.018inch로서 높은 가공정밀도와 측정정밀도를 필요로 한다.

airfoil형상의 leading edge부위와 trailing edge부위의 측정점 수는 약 60개로서 airfoil형상 측정점의 약 50%를 점유한다. 이는 곡률이 큰 edge부위의 형상 측정오차를 줄이기 위한 것이다. edge부위의 형상오차를 줄이기 위하여 CAD 프로그래밍 측정방법을 도입하여 법선벡터 방향으로 측정을 진행하도록 하고 있다.

그러나 가공오차, 랜덤오차, 모델링 오차, NC 데이터 오차로 인하여 설계형상과 실제 가공한 형상은 서로 다르다. 그러므로 가공한 형상에 대하여 설계 시 계획된 법선 방향으로 항상 진행하는 것은 불가능하다.[1] 따라서 3차원 측정기를 이용하여 곡률이 매우 큰 기하학적인 가공형상을 측정할 때에는 측정오차를 유념해야 한다.

이러한 이유로 공정가공시 이상적으로 가공

되어 규격 내에 들어온 제품일지라도 측정오차로 인하여 제품검사시 불합격이 될 소지가 있고, 반면에 실질적으로 규격을 벗어난 제품이지만 합격으로 판정할 오류도 있다.[4] 따라서 고정밀도를 요하는 제품을 측정할 때에는 가능한 한 측정오차를 최소한으로 유지하여야만 제품의 품질을 높이고 검사 업무를 효율적으로 수행할 수 있다.

2. 블레이드 airfoil의 형상과 규격

본 연구에서는 제트 엔진 부품인 터빈 압축기 블레이드의 airfoil의 형상의 측정된 데이터를 이용하여 최적의 형상을 구하는 방법을 제시한다. 측정샘플은 고압 압축 단계 중 13단계 압축기 블레이드의 중간제품이며, 재질은 Inconel 718계열의 니켈기 초합금으로, 그 구성요소들은 니켈(50~55%), 크롬(17~21%), 몰리브덴(2.8~3.3%), 그 외 코발트, 탄소, 마그네슘, 티타늄, 철, 등으로 구성되며, 고온상태에서 높은 응력, 높은 극한 인장강도, 높은 항복강도, 내부식성을 가진다.

가공공정은 소재절단에서부터 단조, 전해가공(Electrochemical Machining), 연마의 공정을 거치고, 가공이 완료되면 진위치도/거리/각도/형상 검사, 피로도 시험, 전기 전도도 시험, 공기 저항도 시험, 경도 시험을 수행한다.

그림 1은 S사의 airfoil 형상규격의 검사 도면이다. 현재 S사에서 edge부위 규격 검사시 leading edge부위는 타원형상의 V 규격값, trailing edge부위는 원형상의 R값을 기준으로 한다.

블레이드 설계시 요구되는 균일한 공기 압축력과 공기 저항을 최소화하기 위해서 leading edge부위는 타원 형상, trailing edge부위는 원 형상을 가지게 되는데, leading edge부위는 높은 응력이 요구되고 trailing edge부위는 공기저항이 최소가 되도록 설계되어 있다. trailing edge는 그 부위에서 발생하는 공기저항(twist 공기저항)을 감소시키기 위해 곡률이 일정한 원의 형상을 가지며 높은 가공정밀도를 요구한다.

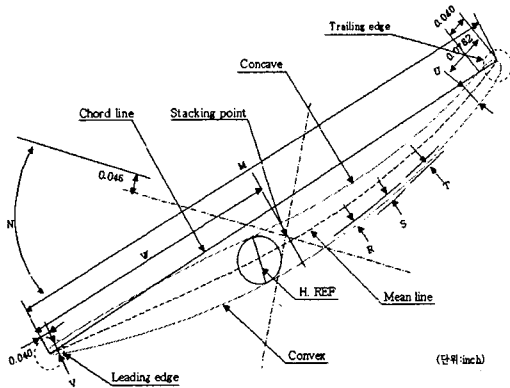


그림 1. airfoil형상의 세부 도면 요소

3차원 측정기를 이용하여 airfoil 형상 측정시 edge부위는 측정 프로브가 법선벡터 방향으로 정확하게 진행하지 못하기 때문에 프로브 slip 오차가 발생한다. 이로 인하여 edge 부위는 concave와 convex 부위보다 측정오차가 크게 발생하므로 edge부위의 형상은 측정오차를 고려하여 원과 타원의 형상으로 fitting을 해야 한다. 다음 3절과 4절에서 edge부위의 probe slip 측정오차를 최소화하기 위한 효과적인 fitting방법이 제시된다.

3. Leading Edge부위의 Fitting

Leading edge부위의 측정오차를 최소화하는 타원의 형상을 찾기 위해서, uniform sampling 방법으로 시뮬레이션을 이용하여 측정데이터들간의 오차를 최소로 하는 수학적인 함수식을 추정한다.

아래의 그림 2에서 점 P와 Q를 지나가는 가상의 직선과 점 T와 O를 지나가는 가상의 직선을 타원 형상의 중심 축으로 두고, 선분 OT의 거리를 장축(a), 선분 OP의 거리를 단축(b)으로 하고, 타원의 중심점은 O(α, β)로 두면 타원의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{(x - \alpha)^2}{a^2} + \frac{(y - \beta)^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

Leading edge부위의 n개 측정점들을 각각 $G(x_i, y_i)$, 타원의 중심점과 초점간의 거리를 f라 두면, 초점의 좌표는 각각 $L(\alpha - f, \beta)$ 와 $R(\alpha + f, \beta)$ 이 되고 타원의 정의에 의하여 아래의 식 (2)가 성립한다(단, $i=1,2,\dots,n$).

$$\overline{GL} + \overline{GR} = 2a \quad (2)$$

$$\sqrt{(x_i - \alpha + f)^2 + (y_i - \beta)^2} + \sqrt{(x_i - \alpha - f)^2 + (y_i - \beta)^2} = d_i \quad (3)$$

여기서 식 (3)과 같이 n개의 측정점들과 두 초점과의 거리의 합을 d_i 라 두자. 그림 2에서 임의의 영역 A에서 균일 분포 $U(0,1)$ 을 따르는 샘플링 데이터 α_j, β_j 를 추출하고, 임의의 영역 B에서 균일 분포 $U(0,1)$ 을 따르는 샘플링 데이터 γ_j 를 추출하였을 때, $|\alpha_j - \gamma_j|$ 를 f_j 라 두자. (단, $j=1,2,\dots,m$)

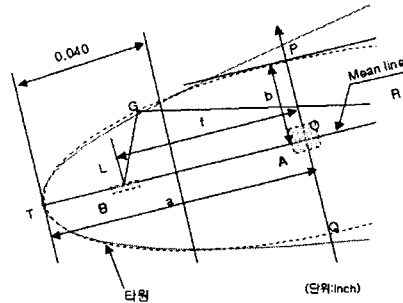


그림 2. Leading edge부위의 타원 형상

각각의 조건 α_j, β_j, f_j 에 대하여 n개의 측정점들로부터 계산된 d_1, d_2, \dots, d_n 의 표준편차를 구하고 이러한 표준편차가 최소가 되게 하는 조건을 α_k, β_k, f_k 라 하면, 이러한 조건으로부터 측정데이터들간의 측정오차를 최소화하는 최적의 타원 형상을 구하게 된다.

4. Trailing Edge부위의 Fitting

Leading edge부위와 유사하게 uniform sampling 방법으로 시뮬레이션을 이용하여 측정데이터들간의 오차를 최소로 하는 수학적인 함수식을 추정한다.

아래의 그림 3에서 임의의 원의 중심점 O(α, β)와 반경 R, 그리고 n개의 측정점 데이터들을 (x_i, y_i) 라 두면 원의 방정식은 다음과 같다.(단, $i=1,2,\dots,n$)

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = R^2 \quad (4)$$

$$\sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2} = d_i \quad (5)$$

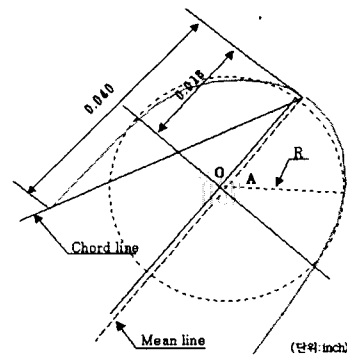


그림 3. Trailing edge부위의 원 형상

여기서 식 (5)와 같이 n개의 측정점들을 좌변 항에 대입한 값들을 각각 d_i 라 두자. 그리고 그림 7에서 영역 A에서 균일 분포 $U(0,1)$ 을 따르는 샘플링 데이터 α_i, β_i 를 추출한다.(단, $i=1,2,\dots,m$)

위의 식(5)에서 나타나 있듯이 i번째 측정점이 원의 중심점으로부터 떨어진 거리를 d_i 라 두자. 그리고 d_1, d_2, \dots, d_n 의 표준편차를 최소화하는 원의 중심점 (α_k, β_k) 을 구하면 측정오차를 최소화하는 최적의 원 형상을 구하게 된다.

5. 형상 Fitting 예제

현재 보유하고 있는 3차원 측정기를 이용하여 측정한 airfoil형상과 edge부위 측정점들을 그림 4와 표 1에서 보여주고 있다.

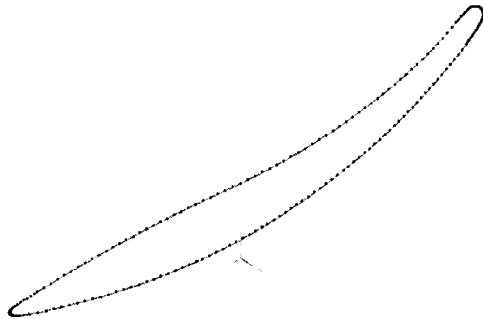


그림 4. 3차원 측정기를 이용한 airfoil 측정형상

표 1. Edge부위 측정 데이터 (단위:inch)

NO.	Leading edge		Trailing edge	
	X좌표	Y좌표	X좌표	Y좌표
1	0.55545	0.05762	-0.55158	0.03304
2	0.56440	0.05535	-0.55417	0.03003
3	0.57166	0.05293	-0.55652	0.02683
4	0.57513	0.05144	-0.5579	0.02456
5	0.57796	0.05000	-0.55911	0.02154
6	0.57996	0.04870	-0.55994	0.01905
7	0.58131	0.04737	-0.56017	0.0174
8	0.58266	0.04594	-0.56029	0.01549
9	0.58329	0.04485	-0.56011	0.01376
10	0.58390	0.04338	-0.5596	0.01246
11	0.58403	0.04299	-0.55888	0.01072
12	0.58408	0.04168	-0.55786	0.00928
13	0.58398	0.04011	-0.55662	0.00789
14	0.58365	0.03881	-0.55494	0.00657
15	0.58325	0.03801	-0.55305	0.00552
16	0.58206	0.03634	-0.55138	0.00483
17	0.58105	0.03530	-0.54965	0.00454
18	0.57895	0.03359	-0.54761	0.00441
19	0.57619	0.03190	-0.54409	0.00483
20	0.57226	0.03012	-0.53965	0.00575
21	0.56708	0.02819	-0.53429	0.00719
22	0.56077	0.02621		
23	0.55348	0.02405		
24	0.54593	0.02186		

표 1의 leading edge부위의 데이터들을 이용하여 그림 2의 영역 A와 B에서 균일 분포 $U(0,1)$ 를 따르는 α_i, β_i, f_i 를 추출하여 표준 편차를 최소가 되게 하는 α_k, β_k, f_k 를 찾기 위해 $50*50*50$ 개의 샘플링 데이터를 가지고 시뮬레이션을 실시하였다($i=1,2,\dots,50$). 영역 A와 영역 B는 AutoCAD상에서 가상의 타원 형상을 그려서 정하였으며, fitting을 수행한 결과는 표 2와 같다.

표 2. Leading edge 부위 결과값과 규격치 (단위:inch)

	결과값	비교(규격치)
α_k	0.4988	X 중심점 좌표
β_k	0.0414	Y 중심점 좌표
f_k	0.0824	초점길이
a	0.085412	장축길이
b	0.0207	단축길이
V		0.040 ± 0.005

Leading edge부위의 타원형상을 fitting한 함수식은 아래의 식(6)과 같으며, 그림 9에서 fitting한 타원의 V의 값이 표 2의 규격치 내에 존재함을 알수 있다.

$$\frac{(x - 0.4988)^2}{0.085412^2} + \frac{(y - 0.0414)^2}{0.0207^2} = 1 \quad (6)$$

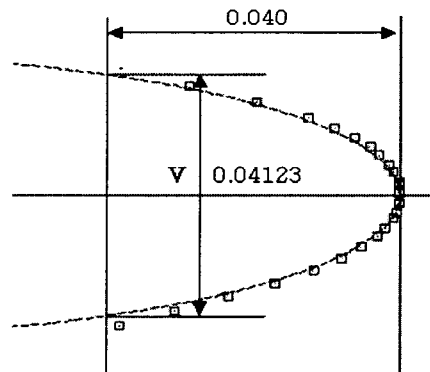


그림 5. Leading edge부위 fitting 형상

마찬가지로 표 1의 trailing edge부위의 데이터들을 이용하여 그림 6의 영역 A에서 균일 분포 $U(0,1)$ 를 따르는 α_j, β_j 를 추출하여 표준 편차가 최소가 되는 α_k, β_k 를 찾기 위해 $100*100$ 개의 샘플링데이터를 가지고 시뮬레이션을 실시하였다($j=1,2,\dots,100$). 영역 A는 AutoCAD상에서 가상의 원 형상을 그려서 정하였으며, fitting을 수행한 결과는 표 3과 같다.

표 3. Trailing edge부위 결과값과 규격치 (단위:inch)

	결과값	비교(규격치)
α_k	-0.5456	X 중심점 좌표
β_k	0.0183	Y 중심점 좌표
R	0.018 ± 0.0025	

Trailing edge부위의 타원형상을 fitting한 함수식은 아래의 식(7)과 같으며, 그림 10에서 fitting한 원의 반경 R값이 표 3의 규격치를 벗어남을 알수 있다.

$$(x + 0.5456)^2 + (y - 0.0183)^2 = 0.01467^2 \quad (7)$$

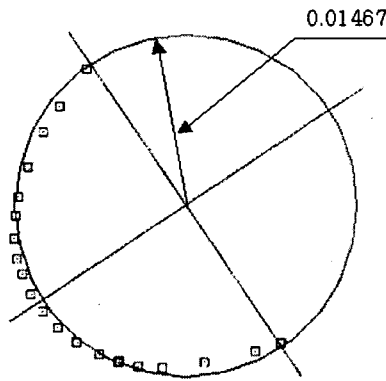


그림 6. Trailing edge부위 fitting 형상

6. 결 론

본 연구에서는 현재 S사의 blade QC part의 측정/검사 업무에서 3차원 측정기를 이용한 터빈 압축기의 airfoil 형상 측정시 edge(leading edge/trailing edge)부위에서 자주 발생하는 프로브 slip현상으로 인한 측정 오차를 최소화하기 위해 uniform sampling방법[2, 3]으로 최소 제곱법으로 보상하는 최적의 형상을 구하는 방법을 제시하였다.

3차원 측정기를 이용하여 airfoil형상의 edge부위를 측정시 가공오차, 랜덤오차, 모델링 오차, NC 데이터 오차로 인하여 설계형상과 실제 가공한 형상은 서로 다르므로, 가공한 형상에 대하여 법선 방향으로 항상 진행하지 못한다.[1] 따라서 3차원 측정기를 이용하여 edge부위의 형상을 측정시 발생하는 프로브 slip오차를 최소화시키고, leading edge와 trailing edge부위의 수학적인 함수식을 추정하기 위하여 측정오차를 최소화시키는 fitting방법을 적용하였다.

Edge부위 측정오차로 인하여 공정가공시 이상적으로 가공되어 규격 내에 들어온 제품일지라도 측정오차로 인하여 제품검사시 불합격이 될 소지가 있으며, 반면에 실질적으로 규격을 벗어난 제품이지만 합격으로 판정할 오류를 범하기 쉽다.[4] 따라서 고정밀도를 요하는 제품을 측정시에는 가능한 한 측정오차를 감소시켜야만 제품의 품질을 높이고 검사 업무의 효율화를 꾀

할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 측정오차가 최소가 되는 최적 형상을 찾기 위해 균일 샘플링방법을 이용하여 형상 fitting을 수행하였다. 기존의 AutoCAD 상에서 edge부위의 형상규격을 임의로 검사하는 방식과 비교하여 edge부위의 측정오차를 감소시키고 보다 검사업무를 효과적이고 효율적으로 수행하는 데 기여할 것으로 본다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1]. Dowling, M. M., Griffin, P. M., Tsui, K. L., and Zhou, C., 1997, "Statistical Issues in Geometric Feature Inspection Using Coordinate Measuring Machine", *Technometrics*, Vol.39, NO.1, 3-24
- [2]. Kalagnamam, J. R., and Diwekar, U. M., 1997, "An Efficient Sampling Technique for Off-line Quality Control", *Technometrics*, Vol.39, NO.3, 308-319
- [3]. Woo, T. C., and Liang, Ren., 1993, "Optimal Sampling for Coordinate Measurement: Its Definition and Algorithm", *Quality through Engineering Design*(Kuo, W. ed.), 333-346
- [4]. Gaddam, A., and Kaldor, S., 1998, "Interlinking Dimensional Tolerance with Geometric Accuracy and Surface in the Process Design and Manufacture of Precision Machined Components" *IIE*, 905-912