

3차원 측정기를 이용한 Airfoil Edge 형상의 Fitting 방법에 관한 연구†

강진우 · 변재현

경상대학교 산업시스템공학부, 항공기부품기술연구센터

A Study on Fitting the Edge Profile of Airfoil with Coordinate Measuring Machines

Jinu Khang · Jai-Hyun Byun

In manufacturing processes, manufacturing features always deviate somewhat from their nominal design specifications due to several types of errors. This study suggests a fitting algorithm of the geometric profile parameters of leading and trailing edges for turbine compressor airfoils. In reality, industry personnels inspect the airfoil profile by trial-and-error method to determine the geometric feature parameters. In this study we propose an exploration approach based on factorial design with center point to minimize the effect of measurement errors caused by probe slip. By adopting the fitting method developed in this paper, one can enhance the precision and efficiency of fitting the airfoil edge profile.

1. 서론

최근 제트 엔진부품의 개발은 높은 추진력과 낮은 중량비를 목표로 한다. 이러한 시대적 요구에 부응하기 위해서는 엔진 부품이 높은 성능과 안전성을 확보하면서도 소형화 및 경량화를 동시에 갖추어야 하며, 이러한 요구 조건을 충족하기 위해서는 고도의 정밀가공과 정밀측정이 수반되어야 한다. 특히, 제트 엔진부품들 중에서도 연소기, 터빈 압축기, 팬, 터빈 블레이드와 같은 부품들은 매우 엄격한 공차를 만족해야 하므로 정밀 가공이 필요할 뿐만 아니라 형상 검사시 매우 정밀한 측정이 필요하다(Lee *et al.*, 2000). 본 연구에서 측정샘플로 사용된 터보 고압 압축기 airfoil profile의 edge 부위의 형상 반경이 0.018 inch로서 높은 가공정밀도와 측정정밀도를 필요로 한다.

본 연구에서 고려하는 터빈 압축기에 조립되는 airfoil의 한 단면의 형상 검사를 위하여 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM)를 이용하여 일반적으로 124개의 점을 측정하는데, 이 중 leading edge 부위와 trailing edge 부위에서의 측정점 수는 최대 60개로서 한 단면의 airfoil 형상 측정점의 약 50%를 점

유한다. 이는 곡률이 큰 edge 부위의 형상 측정시 가능한 한 측정오차를 줄이기 위한 것이다. 또한 edge 부위의 형상오차를 줄이기 위하여 CAD 프로그래밍 측정방법을 도입하여 측정이 법선 벡터 방향으로 진행하도록 하고 있다.

하지만, edge 부위에서 가공오차, 랜덤오차, 모델링 오차, NC 데이터 오차로 인하여 설계형상과 실제 가공한 형상은 서로 다르므로, 가공한 형상에 대하여 법선 방향으로 항상 진행하는 것은 불가능하다(Dowling *et al.*, 1997). 따라서, 3차원 측정기를 이용하여 곡률이 매우 큰 기하학적인 가공형상을 측정할 때에는 프로브 slip 현상으로 인한 측정오차에 유념하여 치수 품질보증 활동을 해야 한다. 공정가공시 이상적으로 가공되어 규격 내에 들어온 제품일지라도 측정오차로 인하여 제품검사시 불합격이 될 소지가 있으며, 반면에 실질적으로 규격을 벗어난 제품이지만 합격으로 판정될 오류도 있다(Geddam and Kaldor, 1998). 그러므로 고정밀도를 요하는 제품을 측정할 때에는 가능한 한 측정오차를 감소시키고 어쩔 수 없이 존재하는 측정오차가 치수품질보증 활동에 미치는 영향을 최소화해야만 제품의 품질을 높이고 검사 업무의 효율화를 꾀할 수 있다. 일반적으로 프로브 slip 오차의 패턴은 이론적으로 예측할

† 본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의해 연구되었음.

수가 없으므로 실험을 통하여 곡률이 큰 edge 부위의 형상을 fitting하여야 한다.

본 연구는 터빈 압축기에 조립되는 airfoil의 형상 측정 및 검사업무에서 leading edge와 trailing edge 부위에서 자주 발생하는 프로브 slip 현상으로 인한 측정 오차가 존재하는 경우에, 실험 계획의 방법 중 하나인 중앙점을 포함한 요인배치법(factorial design)을 이용하여 최적의 형상을 fitting하기 위한 탐색방법을 제시하고자 한다.

2. Airfoil 형상과 프로브 Slip 오차

본 연구에서 사용된 측정 샘플은 제트 엔진 부품인 터보 압축기 블레이드의 airfoil 형상이다. 측정샘플은 고압 압축 단계 중 13단계 압축기 블레이드의 중간제품이다. 재질은 Inconel 718 계열의 니켈기 초합금으로 니켈(50~55%), 크롬(17~21%), 몰리브덴(2.8~3.3%), 코발트, 탄소, 마그네슘, 티타늄, 철 등으로 구성되며, 고온상태에서 고도의 응력, 극한 인장강도, 항복강도, 내부식성을 가진다. 소재절단에서부터 단조, 전해가공(Electrochemical Machining), 연마의 가공공정을 거치고, 검사단계로서는 진위치도/거리/각도/형상 검사, 피로도 시험, 전기 전도도 시험, 공기 저항도 시험, 경도 시험을 수행한다. 본 연구는 이러한 여러 가지의 검사 중 CMM을 이용한 형상 검사에 관한 것이다. 본 연구에서 사용한 CMM은 동우 IMS에서 만든 Impact I 모델인데, 측정범위는 500×600×450 (mm)이며, 측정정밀도는 2.5 μm이다.

Airfoil의 leading edge 부위는 높은 응력이 가도록 타원형상으로, trailing edge 부위는 공기저항을 최소화하기 위하여 곡률이 일정한 원의 형상을 가지도록 설계되어 있다. <그림 1>은 airfoil 형상규격의 검사 도면이다. 현재 국내 기업에서는 edge 부위 형상규격을 검사하기 위하여 leading edge 부위는 타원형상의 V 규격값, trailing edge 부위는 원형상의 반지름 R값을 기준으로 한다.

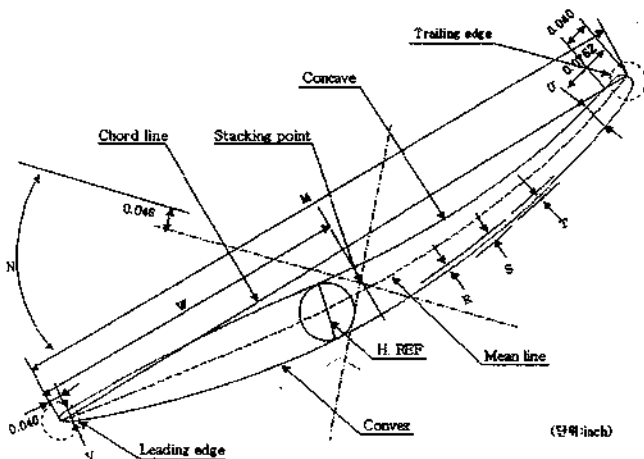


그림 1. Airfoil 형상의 세부 도면 요소

Airfoil의 edge 부위 형상은 곡률이 크기 때문에 측정시 CAD 프로그램으로 프로브(probe)가 법선 벡터 방향으로 진행하도록 되어 있다고 하더라도, 공정가공시 나타나는 가공오차, 모델링 오차 등으로 인하여 도면상의 이상적인 형상과 가공형상이 서로 일치하지 않기 때문에 법선벡터 방향으로 진행하지 못한다. 따라서 <그림 2>에서 보는 바와 같이 지정된 측정압력을 받을 때까지 프로브가 u 벡터 방향으로 진행하다가 어떤 위치에서 미끄러지게 되는데, 이 때 미끄러짐으로 인하여 발생하는 오차를 프로브 slip 오차라 한다. 프로브 slip 오차는 프로브가 진행되는 벡터 방향이 측정 대상물과 직각을 이루지 못하는 시점에서 프로브가 대상물에 닿을 때 측정압력에 의해서 발생하게 된다. Renishaw사의 TP2 5way의 경우 strain gage의 압력은 7~13 gram으로 모든 측정 방향에서 동일한 압력을 가진다.

프로브 strain gage의 압력이 낮으면 sensor의 민감도가 높아져 프로브 slip 오차는 적게 발생하고, strain gage의 압력이 높으면 민감도가 떨어져 프로브 slip 오차는 크게 발생한다. 따라서 곡률이 크고 고정밀도를 요하는 대상물의 형상을 측정할 때에는 strain gage의 압력을 낮추면 <그림 3>과 같이 v 벡터 방향으로 진행하게 될 가능성을 높여 주기 때문에 프로브 slip 현상을 어느 정도 낮출 수 있다. 하지만 sensor의 민감도는 CMM의 진동의 영향을 많이 받으므로 우선 진동이 작은 측정환경을 조성하여야 한다.

strain gage의 압력을 낮추어 프로브 slip 현상을 어느 정도 개선한다고 하더라도 edge 부위에서는 프로브가 법선 벡터 방향으로 정확하게 진행하지 못하기 때문에 불가피하게 프로브 slip 오차가 발생한다. 그러므로 edge 부위는 airfoil의 다른 부위보다 slip 오차로 인한 측정오차가 비교적 크게 발생하므로 측

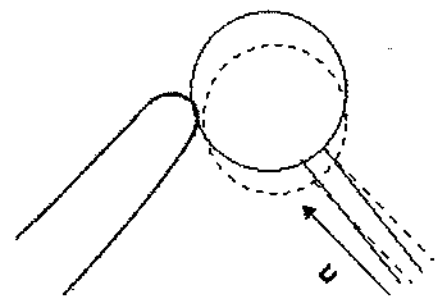


그림 2. 프로브 slip 현상.

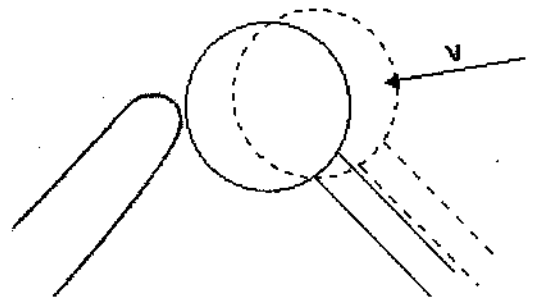


그림 3. 프로브 slip 제거.

정오차를 감안하여 보다 정밀하게 원과 타원의 형상으로 fitting을 해야 한다.

3. edge 부위의 Fitting 방법

Trailing edge 부위의 원 형상과 leading edge 부위의 타원 형상을 fitting하기 위하여 측정 데이터의 오차로 인한 형상 추정 오류를 최소화하기 위하여 함수 식을 이용한 추정을 한다. 먼저 trailing edge 부위는 원 형상으로 fitting하는데, 원의 최적 중심점을 효율적으로 구하기 위해 요인배치법을 이용한 탐색 방법을 제시한다(Myers and Montgomery, 1995). <그림 4>에서 임의의 원의 중심점 (α, β) 로부터 측정점 $P_i = (x_i, y_i)$ 까지의 거리를 d_i 라고 하면($i=1, 2, \dots, n$),

$$d_i = \sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2} \quad (1)$$

이다. <그림 4>에서 '최적 중심점'으로 표기된 점은 그 점으로부터 n 개의 측정점까지의 거리 d_1, d_2, \dots, d_n 의 분산이 최소가 되는 원의 중심점이다. 그리고 중심점으로부터 n 개의 측정점까지의 거리 d_i 들의 평균이 원의 반지름 R 이 된다.

요인배치법을 이용하여 중심점으로부터 n 개의 측정점까지의 거리의 분산을 최소로 하는 원의 중심점을 찾기 위한 탐색은 다음과 같이 한다. 우선 임의의 원의 중심점 (α, β) 를 기준으로 하여 이 중심점과 측정점들간의 거리의 분산을 구한다. 그런 다음, <그림 5>와 같이 중심점을 중심으로 x 축과 y 축 방향으로 2수준 요인배치 실험점 ②, ③, ④, ⑤를 각각 중심점으로 하여 n 개의 측정점으로부터의 거리의 분산을 구하고, 실험점 중 분산이 가장 작은 점 방향으로 이동해 가면서 궁극적으로 최적 중심점을 탐색한다. 최적 중심점 탐색절차는 다음과 같다.

- (1) <그림 5>의 실험영역의 중심이 되는 ①번 실험점(중앙점)을 중심으로 삼아 가로 및 세로 방향으로 한 변의 길이가 δ 가 되도록 실험영역을 형성한다.

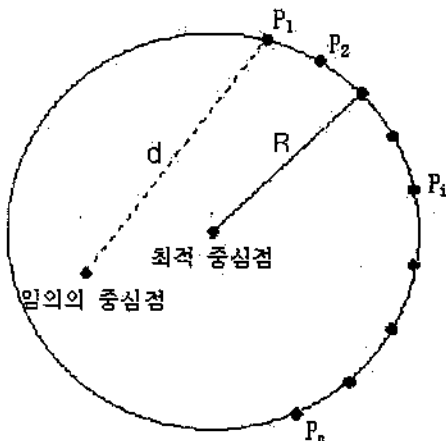


그림 4. 측정점과 원의 중심점.

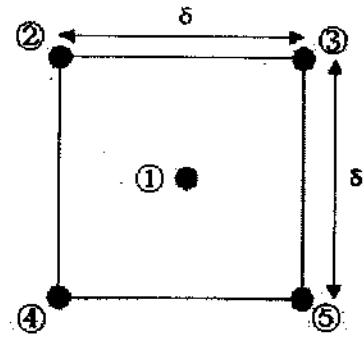


그림 5. 2² 요인배치의 실험점.

- (2) ①번 실험점을 원의 중심점으로 삼고, 중심점으로부터 n 개의 측정점까지의 거리 d_1, d_2, \dots, d_n 을 계산하고, 이들의 분산을 구한다. 4개의 꼭지점에 있는 실험점 ②, ③, ④, ⑤를 원의 중심점으로 하여 중심점으로부터 측정점까지의 거리의 분산을 각각 구한다.
- (3) 분산이 가장 낮은 실험점을 중앙점으로 하여 실험영역을 이동시킨다. <그림 6>과 같이 3번 실험점을 원의 중심점으로 삼았을 때 거리의 분산이 가장 낮다면, <그림 7>과

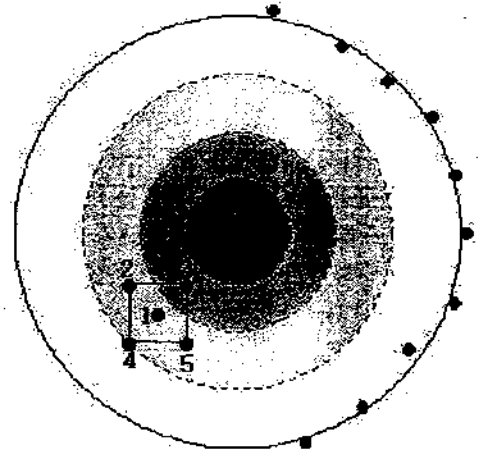


그림 6. 실험 디자인 형성.

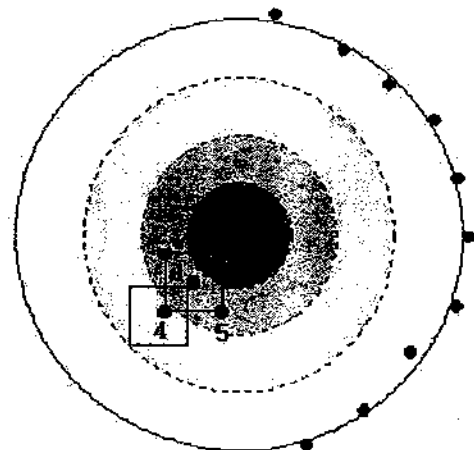


그림 7. 분산이 낮은 실험점으로 이동.

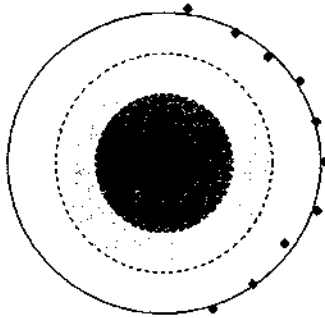


그림 8. 중앙점이 최소 분산을 가질 때의 탐색방법.

같이 영역의 크기를 그대로 유지하면서 분산이 작은 방향으로 실험영역을 이동한다.

- (4) (3)번의 절차를 계속 수행하다가 실험영역의 중앙점을 원의 중심점으로 삼았을 때 분산이 가장 작게 되면, <그림 8>과 같이 실험영역의 크기를 1/2로 줄인 다음, 위의 (1), (2), (3)단계를 따라서 계속 탐색한다.
- (5) (4)번의 단계를 수행하다가 실험영역의 한 변의 길이가 CMM의 측정 정밀도(예를 들어, 동우 IMS Impact의 경우 $2.5 \mu m$) ϵ 보다 작아지면 탐색을 종료하고, 종료 시점의 중앙점을 원의 최적 중심점으로 결정한다.

<그림 9>는 trailing edge 부위의 원 형상을 fitting하는 탐색 절차를 보여 주고 있다.

Leading edge 부위의 타원 형상 fitting 방법은 trailing edge 부위와 마찬가지로 요인배치를 이용하여 타원형상을 구한다. <그림 10>의 XY 좌표계에서 θ 만큼 회전된 타원형상의 두 초점을 L과 R, 임의의 측정점을 P라 두자. 타원의 경우, 선분 LP와 선분 RP의 길이 합을 d 라 두었을 때, d 는 타원의 장축 길이의 2배로서 항상 일정하다. 따라서 n 개의 측정점 각각에 대하여 선분 LP와 선분 RP의 길이의 합인 d_i 를 구하고($i=1, 2, \dots, n$), d_i 값들의 분산이 최소일 때 가장 이상적인 타원 형상을 구할 수 있다.

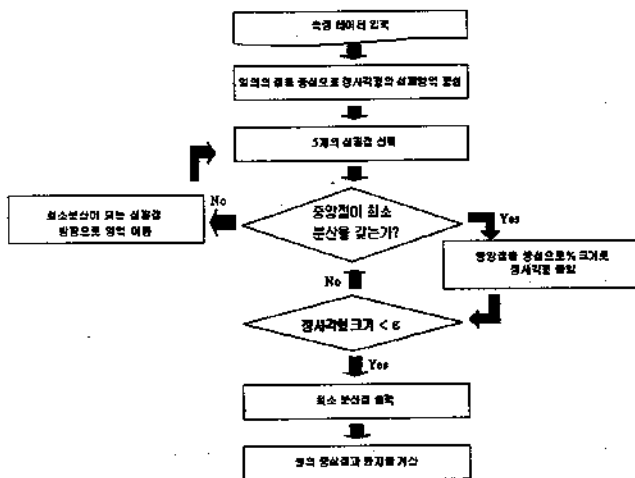


그림 9. Trailing edge 부위 원 형상 fitting을 위한 탐색 절차.

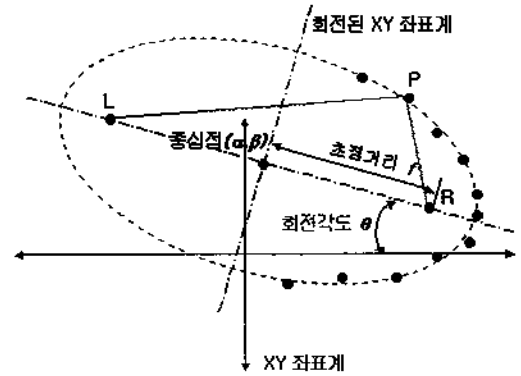


그림 10. 이상적인 타원 형상.

최적의 타원 형상을 구하기 위한 탐색을 함에 있어서, 반응 변수는 거리 d 의 분산으로 두고, 분산에 영향을 주는 인자로는 타원의 중심점 (α, β) , 초점거리 f , 회전각도 θ 를 고려한다. 타원의 형상을 결정하는 모수가 4개(α, β, f, θ) 있으므로 요인 배치를 이용하면 중앙점 외에 $2^4 = 16$ 개의 실험점을 생각할 수 있다. 최적의 타원 형상을 구하기 위한 탐색 절차는 임의의 타원의 중심점 (α, β) , 초점거리 f , 회전각도 θ 의 값을 시작으로 2^4 요인배치를 이용하여 중앙점 포함 총 17개의 실험점 각각에서 거리 d 의 분산을 구하고 이들을 비교한다. 분산이 가장 낮은 실험점으로 이동해 가면서 탐색한다. 이러한 과정을 순차적으로 적용하여 최소 분산을 가지도록 인자들의 최적조건을 탐색해 나간다. 최적조건 탐색 절차는 <그림 9>의 원 형상 fitting을 위한 탐색 절차와 유사하므로 생략한다. 여기서 타원 형상 fitting 방법과 원 형상 fitting 방법의 다른 점은 반응 변수에 영향을 주는 인자(모수)들의 개수가 원 형상의 경우 2개인 데 반하여, 타원 형상의 경우에는 4개로서 고려해야 할 실험점의 수가 많다는 것이다.

4. edge 부위 형상 fitting 예제

현재 보유하고 있는 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)를 이용하여(동우 IMS, 1997), 측정한 airfoil 형상과 edge 부위 측정점들을 <그림 11>과 <표 1>에 나타내었다.

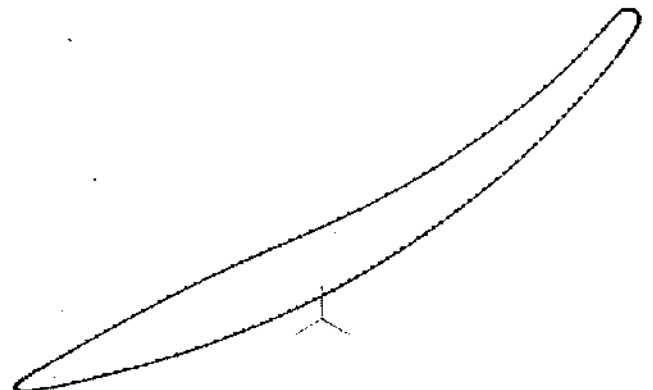


그림 11. CMM을 이용한 airfoil 측정 형상.

표 1. edge 부위 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		

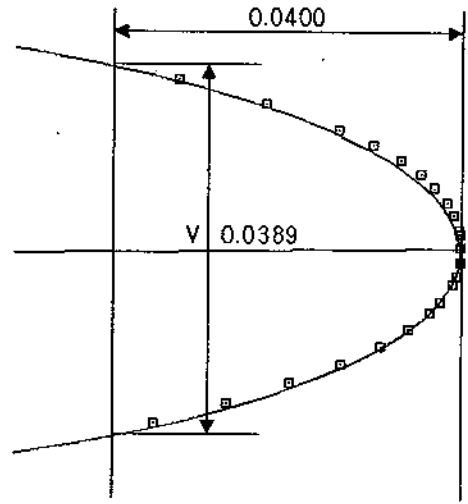


그림 12. Leading edge 부위 fitting 형상.

표 3. Trailing edge 부위 결과값과 규격치 (단위 : inch)

	결과값	비고(규격치)
α_k	-0.5456	중심점 X 좌표
β_k	0.0183	중심점 Y 좌표
R	0.01467	0.0180 ± 0.0025
Var(R)	4.5496E-7	R의 분산

$$\frac{(x - 0.5039)^2}{0.0782^2} + \frac{(y - 0.0247)^2}{0.0223^2} = 1 \quad (2)$$

<표 1>의 trailing edge 부위의 데이터를 이용하여 원 형상 fitting 프로그램을 실행한 결과는 <표 3>과 같다.

Trailing edge 부위의 원 형상을 fitting한 함수식은 아래의 식 (3)과 같으며, <그림 13>에서 fitting한 원의 반경 R값이 <표 3>의 규격치를 벗어남을 알 수 있다.

$$(x + 0.5456)^2 + (y - 0.0183)^2 = 0.01467^2 \quad (3)$$

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

	결과값	비고(규격치)
α_k	0.5039	X 중심점 좌표
β_k	0.0247	Y 중심점 좌표
f_k	0.0752	초점길이
θ	14.9688	회전각도
a	0.0782	장축길이
b	0.0223	단축길이
d	0.1564	LP와 RP의 합
V	0.0389	0.0400 ± 0.0050
Var(d)	308957E-8	거리 d의 분산

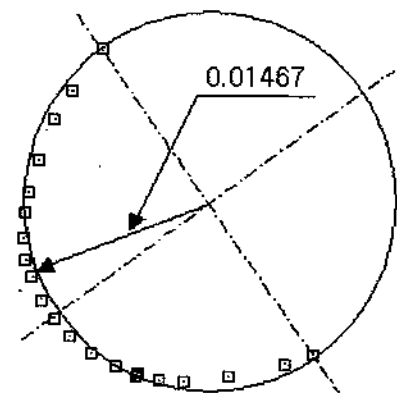


그림 13. Trailing edge 부위 fitting 형상.

5. 결론

edge 부위의 측정오차로 인하여 공정가공시 이상적으로 가공되어 규격 내에 들어온 제품일지라도 측정오차로 인하여 제품 검사시 불합격이 될 소지가 있으며, 반면에 실질적으로 규격을 벗어난 제품이지만 합격으로 판정할 오류가 있다. 따라서 고정밀도를 요하는 제품을 측정할 때에는 가능한 한 측정오차를 감소시키고 정밀한 형상 추정을 해야만 제품의 품질을 높이고 검사 업무의 효율화를 꾀할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 3차원 측정기를 이용하여 터빈 압축기의 airfoil 형상을 측정할 때에, 요인배치법과 최소제곱법을 이용하여 edge(leading edge/trailing edge) 부위에서 자주 발생하는 프로브 slip 현상으로 인한 측정오차의 영향을 최소화하여 최적의 형상을 구하는 fitting 방법 절차를 제시하였다. 본 연구에서 적용된 fitting 절차를 이용하면 국내 관련기업 치수품질 보증 담당자는 현재 사용하는 시행착오적인 방법에 비하여 검사업무를 효과적이고 효율적으로 수행할 수 있을 것이다. 본 연구의

결과는 적절한 수정과 보원을 통하여 다른 기계부품의 품질보증 활동에도 유의하게 적용할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- 동우 IMS (1997), 3차원 측정기 매뉴얼, 동우 IMS.
- Dowling, M. M., Griffin, P. M., Tsui, K. L., and Zhou, C. (1997), Statistical Issues in Geometric Feature Inspection Using Coordinate Measuring Machines, *Technometrics*, 39(1), 3-24.
- Geddam, A., and Kaldor, S. (1998), Interlinking Dimensional Tolerances with Geometric Accuracy and Surface Finish in the Process Design and Manufacture of Precision Machined Components, *IIE Transactions on Design and Manufacturing*, 30(10), 905-912.
- Lee, G., Mou, J., and Shen, Y. (2000), Decoupling the Confounded Effect of Machine Error and Geometric Characteristics of Artifacts in Precision Measurement and Machine Calibration, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 122, 331-337.
- Myer, R. H., and Montgomery, D. C. (1995), *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, New York.



강진우

경상대학교 산업공학과 학사

현재: 경상대학교 대학원 산업시스템공학과 석사과정

관심분야: 3차원측정기 활용, 계측시스템 관리, 품질정보시스템



변재현

서울대학교 산업공학과 학사

한국과학기술원 산업공학과 석사

한국과학기술원 산업공학과 박사

현재: 경상대학교 산업시스템공학부 교수

관심분야: 품질공학, 계측시스템 관리, 품질정보시스템