

압축기 블레이드의 Edge 형상 측정시 3차원 측정기의 탐침 볼 직경 선정을 위한 실험적 연구

정수호 · 변재현[†]

경상대학교 산업시스템공학부 · 항공기부품기술연구센터

An Experimental Study on Selecting the Diameter of Probe Stylus of a Coordinate Measuring Machine in Measuring the Edge Profile of High Pressure Compressor

Sooho Joung · Jai-Hyun Byun

Department of Industrial and Systems Engineering and Research Center for Aircraft Parts Technology,
Gyeongsang National University, Jinjoo, 660-701

When the trailing edge and leading edge of an airfoil contour of high pressure compressor blades are measured, there exists a measurement error due to the size of the probe stylus ball diameter. In this paper an experimental study is provided to determine the optimum diameter of the probe stylus in inspecting the airfoil of the high pressure compressor blade. The measurement and analysis procedure suggested in this paper will be helpful to those who are involved in measuring and inspecting various types of blades.

Keywords: coordinate measuring machine, high pressure compressor, airfoil, blade, leading edge, trailing edge, probe stylus diameter, probe slip error, measurement error

1. 서론

3차원 측정기(coordinate measuring machine, CMM)는 탐침(probe stylus)이 X, Y, Z축 방향으로 이동하고, 공간 좌표값으로부터 각 축 방향으로 움직인 이동량을 파악하여 위치, 거리, 윤곽형상 등을 측정하는 계측기이다(Dongwoo IMS, 1997). 특히, 항공기 부품 중에서 압축기 및 터빈 블레이드, 임펠러 등과 같은 제품들은 형상이 복잡하며 매우 엄격한 공차가 요구된다. 이와 같은 제품들은 정밀하게 가공되어야 하고 공정검사나 최종 치수검사에 3차원 측정기로 정밀하게 측정되어야 한다(Hubele, et al. 1991).

현재 국내 S업체에서는 3차원 측정기를 이용하여 고압 압축

기 블레이드(high pressure compressor blade)를 측정할 때, 높이 방향으로 11개 부분으로 나누고, 각 부분별로 124개의 측정점을 찍어 에어포일(airfoil) 형상을 추정하고 있다(<그림 1> 참조). 총 측정점의 수는 1364개이며, 약 30분의 측정시간이 소요된다. 특히 edge (leading edge/trailing edge) 부위는 곡률 변화가 가장 심하므로, 측정오차를 가능한 한 줄이기 위해 124개의 측정점 중 60개의 측정점을 이 부위에서 측정하고 있으며, off-line programing을 도입하여 edge 부위의 형상에 대해 탐침이 법선벡터 방향으로 진행하도록 하고 있다(Baik, 2002). 그러나 고압 압축기 블레이드 가공시 발생하는 가공 오차, 모델링 오차, NC 데이터 오차 등으로 인해 가공한 형상에 대하여 완벽하게 법선벡터 방향으로 진행하는 것은 불가능하다(Menq and Chen,

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의해 연구되었음.

[†]연락처: 변재현 교수, 660-701 경남 진주시 가좌동 900 경상대학교 산업시스템공학부, Fax: 055-762-6599, e-mail: jbyun@nongae.gsnu.ac.kr
2002년 3월 접수, 2회 수정 후 2002년 8월 게재 확정.

1996). 탐침이 곡률 변화가 심한 edge부위에서 법선벡터 방향으로 완벽하게 진행하지 못하기 때문에 경사각에 대한 탐침 볼 직경오차와 탐침 slip 오차가 발생하게 된다(Kang and Byun, 2000).

본 논문은 3차원 측정기로 고압 압축기 블레이드를 측정하는 업무에서 발생하는 탐침 볼 직경에 따른 오차를 파악하고, 탐침 볼 직경을 어느 정도 크기로 하는 것이 품질보증 활동에 적합한지를 판단하기 위한 실험적 연구 결과를 제시한다. 본 연구에서 이용한 측정 및 분석절차는 다른 형태의 블레이드 또는 임펠러를 측정하고 검사하는 업무에서 최적 탐침 볼을 선정하는 데에 도움이 될 것이다.

2. 에어포일 형상과 탐침 볼 직경오차

압축기 블레이드는 일반적으로 고압의 압축공기를 형성하기 위해 여러 단(stage)으로 구성되어지며 각 단은 서로 유사한 형상으로 제작된다. 본 연구에 사용된 측정 샘플은 제트 엔진 부품인 고압 압축기 블레이드로서 고압 압축 단계 중 13단계 압축기 블레이드의 중간제품이며, 재질은 니켈(50~55%), 크롬(17~21%), 코발트, 탄소, 마그네슘, 티타늄, 철 등으로 구성된 니켈기 초합금이며, 고온 상태에서 높은 극한 인장강도, 높은 항복강도, 내부식성을 가진다(Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 1998).

고압 압축기 블레이드를 설계함에 있어서 공기 압축력이 균일하고 공기 저항이 최소로 되게 하기 위해서 leading edge 부위는 타원 형상, trailing edge 부위는 원 형상으로 설계되어 있다. <그림 1>과 <그림 2>는 각각 고압 압축기 블레이드와 에어포일 형상을 나타내고 있다. <그림 2>는 에어포일 형상규격의 검사도면인데, edge 부위의 규격 검사시 leading edge는 타원형상의 V 규격 값, trailing edge는 원형상의 반지름 R 값을 기준으로 한다.

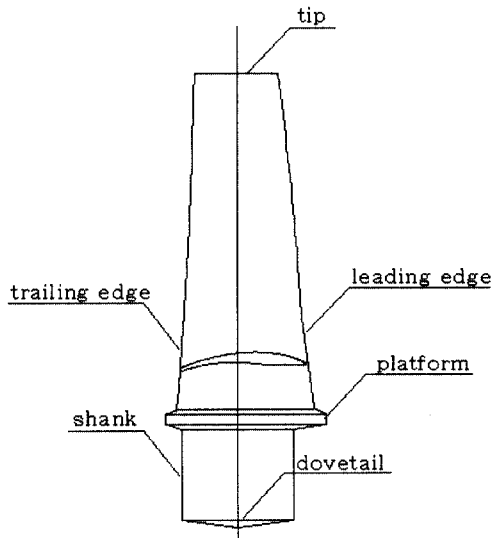


그림 1. 고압 압축기 블레이드.

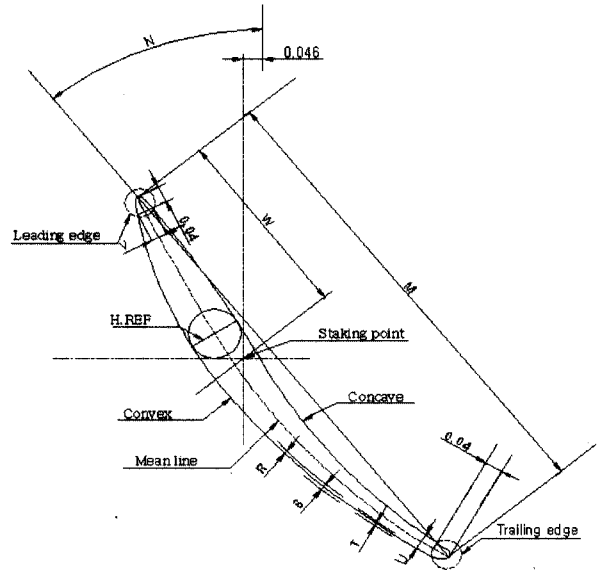


그림 2. 에어포일 형상.

고압 압축기 블레이드 형상을 보면 edge 부분은 경사가 약간 있음을 알 수 있다(<그림 1> 참조). 경사진 각을 3차원 측정기로 측정할 경우, off-line programming을 통하여 edge 부위의 형상에 대해 탐침이 법선벡터 방향으로 진행하도록 하여도, 가공오차, 모델링 오차, NC 데이터 오차 등으로 인하여 가공한 형상에 대하여 정확히 법선 벡터로 진행하는 것은 불가능하다.

<그림 3>에서 볼 수 있듯이 측정자가 실제 측정하고자 하는 점(P)을 3차원 측정기로 측정하였을 때, 경사진 각(θ)에 대하여 실제로 \overline{PA} 만큼 탐침 볼 직경오차가 발생한다(Dowling, et al., 1997).

$$\begin{aligned} \overline{PA} &= \overline{OP} - \overline{OA} = \sqrt{\overline{PT}^2 + \overline{OT}^2} - R \\ &= \sqrt{\left(\frac{R}{\tan \theta}\right)^2 + R^2} - R \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)을 보면, 탐침 볼 직경이 클수록 오차가 더욱 커짐을 알 수 있다. 그러므로 탐침 볼 직경을 각각 1mm, 2mm, 3mm로 두고 고압 압축기 블레이드의 에어포일 형상을 측정한 후, 총 측정 데이터 중에서 leading edge 부위와 trailing edge 부위의 데이터를 각각 추출하고 최소제곱법을 이용하여 leading edge에서는 타원형상의 V 값, trailing edge에서는 원형상의 R 값을 구한다.

3. 측정 방법

본 연구에서 고압 압축기 블레이드를 측정하기 위해 사용된 3차원 측정기는 moving bridge 구조로 되어 있으며, 측정 정밀도와 반복 정밀도는 L을 측정길이라고 할 때, 각각 $2.5 \pm (L/300) \mu\text{m}$ 와 $1.5 \mu\text{m}$ 이다. 그리고 측정에 사용된 probe head와 probe는 RSPH10M과 TP2-5 way이며, 탐침 볼의 직경별 사양은 다음 표에

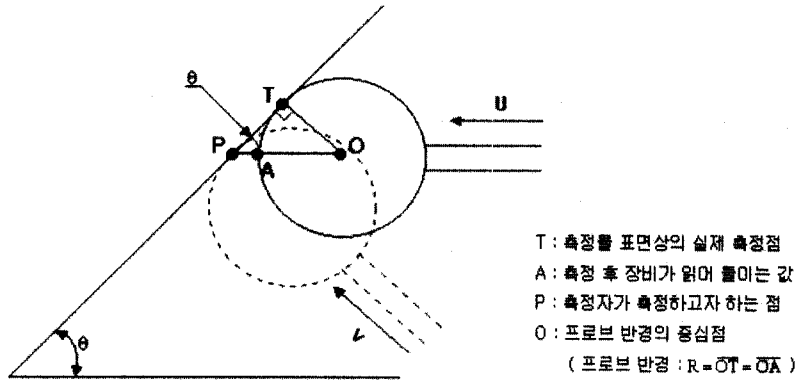


그림 3. 경사진 각에 대한 탐침 볼 직경오차.

나타난 바와 같다.

단위 : mm(inch)

stylus ball size	ball material	stylus length	stem material
1.0(0.04)	ruby	20(0.78)	tungsten carbide
2.0(0.08)	ruby	20(0.78)	stainless steel
3.0(0.12)	ruby	20(0.78)	stainless steel

탐침 볼의 직경은 1mm 보다 작은 0.3mm, 0.5mm, 0.7mm인 것들도 있으나 1mm 보다 작은 것으로 블레이드를 측정하면 약간의 충격에도 부러지기 쉽고, 수동으로 측정할 경우 측정 대상물에 탐침 볼이 닿았는지 아니면 탐침 볼 윗부분인 실린더에 닿았는지를 눈으로 정확히 구별하기가 어렵다. 또한 비용 측면에서 보면, 직경 1mm 미만인 탐침 볼은 1mm 이상인 볼과 비교하였을 때 2배 이상 비싸기 때문에 블레이드 가공업체에서는 사용하지 않고 있다. 반면 탐침 볼 직경이 크면 leading edge와 trailing edge의 끝점을 찍을 가능성이 커짐으로 규격 대비 탐침 볼 직경에 의한 오차가 허용범위 내에 확실하게 들어온다면 탐침 볼의 직경을 크게 하는 것이 좋다. 실제로 블레이드의 측정 및 검사 업무를 수행하고 있는 여러 업체를 조사한 결과, 직경이 1mm 미만인 탐침 볼을 사용하는 업체는 없고, 직경이 1mm, 2mm, 또는 3mm인 탐침 볼을 특별한 기준 없이 사용하고 있다(Choi, 2002). 그러므로 본 측정실험에서는 직경이 1mm 이상 되는 탐침 볼을 사용하여 데이터를 구하고 이러한 데이터로부터, V값, R값 등 모수(parameter)를 구하기로 하였다. 직경 1mm인 탐침 볼을 이용하여 측정된 데이터가 가장 참값에 가깝다고 간주하여, 직경 1mm인 탐침 볼을 이용하여 측정된 데이터를 바탕으로 구한 모수와 2mm와 3mm 직경을 가진 탐침 볼을 이용하여 측정된 데이터에 근거한 모수를 비교하였다. 이러한 비교를 통하여 탐침 볼 직경을 어느 정도 크기까지 하는 것이 직경에 의한 측정오차를 허용할 만한지를 판단하기 위한 실험적 연구 결과를 제시하고자 한다. 만일 측정실험의 결과 2mm 또는 3mm 탐침 볼을 이용한 결과가 1mm을 이

용한 결과와 큰 차이가 없게 나타난다면, 가능한 지름이 큰 탐침 볼을 이용하는 것이 edge의 끝점을 찍을 확률을 높이므로 유리하다.

Virtual DMIS (dimensional measuring interface standard) 소프트웨어를 사용하여 자동측정프로그램을 만들고 탐침 볼 직경을 각각 1mm, 2mm, 3mm로 바꾸어가며 고압 압축기 블레이드의 에어포일 형상을 측정하였다. 여기서 탐침 볼 직경 1mm, 2mm, 3mm 마다 Virtual DMIS를 이용하여 측정된 에어포일 형상의 점 데이터는 탐침 볼 중심의 좌표 값이다. 그러므로 탐침 볼 반경만큼 보정하기 위하여 측정 데이터를 AutoCAD로 불러들여 탐침 볼 반경만큼 offset을 하여 얻은 데이터를 이용하여 에어포일 형상을 분석하였다.

4. 탐침 볼 직경에 따른 edge 부위의 데이터 분석

1mm, 2mm, 3mm의 직경을 가진 탐침 볼을 각각 이용하여 에어포일 형상의 측정데이터는 총 299개이며, 이들 299개의 측정점 중에서 edge 부위의 데이터를 추출하여 분석하였다. Trailing edge를 분석하기 위한 데이터는 <그림 2>의 에어포일 형상에서 중심선(mean line)의 우측 끝점을 중심으로, 아래 <표 2>에 표시한 것처럼 반지름 R의 규격 중심값인 0.018 inch 거리에 있는 25개의 측정점이다. Leading edge를 분석하기 위해서는 중심선의 좌측 끝점부터 <표 4>의 V의 규격 중심값 0.04 inch 이내에 있는 측정점 29개를 추출하였다.



그림 4. 3차원 측정기를 이용한 에어포일 측정점.

<그림 4>는 3차원 측정기를 이용하여 측정한 고압 압축기 블레이드의 에어포일 형상의 측정점들을 나타내고 있는데, edge 부위의 곡률이 매우 큼을 알 수 있다.

그리고 <표 1>은 탐침 볼 직경의 변화에 따른 trailing edge 부위 측정 데이터이다.

Trailing edge 부위의 측정 데이터를 가지고 최소제곱법을 이용하여 아래 식 (2)처럼 원 형상으로 fitting한 결과를 <표 2>에 나타내었다.

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

<표 2>를 보면, 3가지 탐침 볼을 이용하는 경우 모두 반지름 R이 규격을 벗어남을 알 수 있다. 그리고 직경이 1mm와 2mm인 탐침 볼을 쓸 경우를 비교해 보면 반지름 R값의 차이가

0.00008로 거의 없음을 알 수 있으며, 직경이 3mm인 탐침 볼을 쓸 때에는 1mm 또는 2mm인 볼을 쓸 때와 비교해 볼 때 약 0.001 정도 차이가 남을 알 수 있다. 일반적으로 측정오차는 규격 폭의 1/10 보다 작아야 한다(Kalpakkian, 1991). <표 2>를 보면 반지름 R의 규격폭은 $0.0025 \times 2 = 0.005$ 이다. 탐침 볼 직경이 3mm일 경우에는 탐침 볼 직경에 의한 오차가 허용범위를 크게 벗어남을 알 수 있다. 그러므로 직경이 3mm인 탐침 볼은 본 연구에서 고려하는 고압 압축기 블레이드를 측정하기에는 부적합하다는 것을 알 수 있다.

Leading edge 부위의 측정 데이터는 <표 3>에 나타내었다. 측정 데이터를 가지고 타원 형상으로 fitting한 결과는 <표 4>에 있는데, 그 값들을 이용하여 leading edge의 타원형상은 다음과 같은 함수식으로 표현할 수 있다.

표 1. Trailing edge 부위 측정 데이터

(단위 : inch)

No.	탐침 볼 직경 1mm		탐침 볼 직경 2mm		탐침 볼 직경 3mm	
	X 좌표	Y 좌표	X 좌표	Y 좌표	X 좌표	Y 좌표
1	-0.537965	-0.014116	-0.542019	-0.015866	-0.535573	-0.013570
2	-0.542044	-0.015320	-0.544613	-0.016510	-0.546568	-0.016825
3	-0.543766	-0.015762	-0.546360	-0.016774	-0.547237	-0.016890
4	-0.546404	-0.016269	-0.549497	-0.016829	-0.548626	-0.016902
5	-0.547489	-0.016417	-0.551405	-0.016568	-0.551159	-0.016674
6	-0.550630	-0.016423	-0.552814	-0.016220	-0.553351	-0.016039
7	-0.551272	-0.016334	-0.553817	-0.015817	-0.553689	-0.015888
8	-0.553182	-0.015814	-0.555092	-0.015146	-0.555499	-0.014856
9	-0.554489	-0.015308	-0.556692	-0.014014	-0.557236	-0.013573
10	-0.556189	-0.014343	-0.558071	-0.012749	-0.558074	-0.012766
11	-0.557503	-0.013295	-0.558897	-0.011768	-0.559140	-0.011508
12	-0.558940	-0.011739	-0.559672	-0.010579	-0.559629	-0.010743
13	-0.559507	-0.010898	-0.560142	-0.009585	-0.560380	-0.009238
14	-0.559834	-0.010220	-0.560576	-0.008308	-0.560734	-0.008257
15	-0.560566	-0.007783	-0.560922	-0.006487	-0.561096	-0.006644
16	-0.560868	-0.005923	-0.561041	-0.005119	-0.561312	-0.004728
17	-0.560908	-0.003934	-0.561000	-0.004083	-0.561344	-0.003155
18	-0.560900	-0.003831	-0.560794	-0.002471	-0.561320	-0.002920
19	-0.560273	-0.001148	-0.560557	-0.001525	-0.561299	-0.002785
20	-0.559441	0.001064	-0.560070	-0.000005	-0.560394	0.000696
21	-0.558512	0.003065	-0.559303	0.001876	-0.560077	0.001537
22	-0.557222	0.005329	-0.558057	0.004293	-0.559058	0.003687
23	-0.555962	0.007250	-0.557008	0.006055	-0.558041	0.005409
24	-0.554456	0.009343	-0.555315	0.008376	-0.555870	0.008636
25	-0.552756	0.011300	-0.553063	0.011101	-0.553575	0.011477

표 2. Trailing edge 부위의 분석결과값 (단위 : inch)

	탐침 볼 직경			규격값
	1mm	2mm	3mm	
α	-0.54733	-0.54729	-0.54660	X 중심점의 좌표
β	-0.00314	-0.00332	-0.00282	Y 중심점의 좌표
R	0.013792	0.013878	0.014772	0.018 ± 0.0025

$$\frac{(x-\alpha)^2}{a^2} + \frac{(y-\beta)^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

<표 4>의 분석결과를 보면, 각각의 탐침 볼 직경에 따른 측정결과가 모두 규격 V 내에 들어가고 있음을 알 수 있다. 여기서 규격 V 값은 <그림 2>의 에어포일 형상에서 leading edge 부위의 중심선(mean line)의 좌측 끝점부터 0.04 inch 거리에 있는 에어포일의 두께를 의미한다. 탐침 볼 직경이 1mm와 2mm일 경우에는 V 값의 차이가 0.00037이며, 탐침 볼 직경이 1mm일

표 3. Leading edge 부위 측정 데이터 (단위 : inch)

No.	탐침 볼 직경 1mm		탐침 볼 직경 2mm		탐침 볼 직경 3mm	
	X 좌표	Y 좌표	X 좌표	Y 좌표	X 좌표	Y 좌표
1	0.546490	0.079381	0.548139	0.078986	0.549169	0.078250
2	0.549964	0.077552	0.552529	0.076778	0.554895	0.075519
3	0.553337	0.076093	0.557978	0.074144	0.560650	0.072547
4	0.556142	0.074660	0.562212	0.072035	0.565891	0.069733
5	0.559563	0.072979	0.566067	0.069922	0.570158	0.067053
6	0.561889	0.071778	0.569808	0.067532	0.573231	0.064813
7	0.565376	0.069849	0.572746	0.065429	0.575608	0.062620
8	0.568268	0.068108	0.575283	0.063304	0.577237	0.060815
9	0.570677	0.066427	0.576430	0.062074	0.577862	0.059917
10	0.573520	0.064250	0.577915	0.060118	0.579066	0.057474
11	0.575448	0.062518	0.578580	0.058986	0.579364	0.056644
12	0.576794	0.060923	0.579122	0.057616	0.579607	0.055663
13	0.577976	0.058774	0.579534	0.056123	0.579727	0.054761
14	0.578468	0.057333	0.579630	0.054013	0.579585	0.053011
15	0.578614	0.053093	0.579043	0.052365	0.579409	0.052548
16	0.577894	0.051576	0.578675	0.051731	0.578570	0.051025
17	0.576761	0.050381	0.577811	0.050701	0.578279	0.050650
18	0.575291	0.049213	0.576707	0.049661	0.577868	0.050241
19	0.573414	0.048180	0.575706	0.048941	0.576614	0.049248
20	0.571945	0.047564	0.573696	0.047871	0.573206	0.047273
21	0.569311	0.046657	0.571819	0.047158	0.572590	0.047014
22	0.566191	0.045966	0.568675	0.046304	0.570433	0.046359
23	0.563138	0.045552	0.565035	0.045613	0.566098	0.045474
24	0.559319	0.045175	0.561371	0.045106	0.562241	0.044937
25	0.554085	0.044824	0.558026	0.044841	0.556413	0.044481
26	0.549205	0.044443	0.553001	0.044519	0.551827	0.044173
27	0.544833	0.044203	0.548487	0.044264	0.547187	0.043911
28	0.540090	0.044012	0.543752	0.044066	0.542569	0.043650
29	0.535746	0.043754	0.539102	0.043816	0.538404	0.043437

표 4. Leading edge 부위의 분석결과값 (단위 : inch)

	탐침 볼 직경			규격값
	1mm	2mm	3mm	
α	0.483088	0.492809	0.484952	X 중심점의 좌표
β	0.054322	0.054148	0.053624	Y 중심점의 좌표
a	0.094174	0.084966	0.092839	장축 길이
b	0.022987	0.022382	0.023384	단축 길이
V	0.037606	0.037982	0.038455	0.04 ± 0.005

때와 3mm일 때의 차이는 0.00085이다. 일반적으로 측정오차는 규격 폭의 1/10 보다 작아야 하는데, 탐침 볼 직경이 3mm일 경우에는 탐침 볼 직경에 의한 오차가 규격 폭의 1/10인 0.001에 근접함을 알 수 있다. 그러므로 leading edge 부위의 경우에도 직경이 3mm인 탐침 볼을 사용하면 탐침 볼 직경에 의한 측정 오차가 허용범위에 근접하여 부적합하다는 것을 알 수 있다.

실험 데이터의 분석 결과를 정리하여 보면, 고압 압축기 블레이드의 에어포일 측정 시 곡률 변화가 심한 edge 부위(leading edge/trailing edge)를 측정할 경우, 직경이 3mm인 탐침 볼을 쓰면 볼의 크기로 인한 측정오차가 커서 측정 결과를 이용하여 품질보증 업무를 하는 것이 불가능하다. 즉, 잘 가공되어 규격 내에 들어온 제품이지만 탐침 볼 직경에 의한 측정오차로 인해 제품검사 시 불합격이 될 소지가 있으며, 역으로 실질적으로 규격을 벗어난 제품이 합격으로 판정되는 오류가 생길 수 있다. 특히 항공기에 쓰이는 부품은 인명과 직결되는 것이기 때문에 품질보증 활동이 완벽해야 한다. 그러므로 본 논문에서 고려하는 고압 압축기 블레이드를 3차원 측정기로 측정할 경우, 1 mm 또는 2 mm 직경을 갖는 탐침 볼을 이용하는 것이 좋다.

5. 결론

높은 가공 정밀도를 요구하는 고압 압축기 블레이드를 3차원 측정기로 측정할 경우, 곡률 변화가 심한 edge 부위에서는 법선 벡터 방향으로 정확하게 진행하여 측정을 하는 것이 불가능하기 때문에 경사진 각에 대해 탐침 볼 직경오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 3차원 측정기의 탐침 볼 직경을 각각 1mm, 2mm, 3mm로 두고 고압 압축기 블레이드의 에어포일 형상을 측정하였다. 측정된 데이터 중에서 leading edge 부위와 trailing edge 부위의 데이터를 이용하여 최소제곱법으로, leading edge 부위는 타원 형상의 V값을, trailing edge 부위는 원

형상의 R값을 구하였다. 그리고 직경이 1mm인 탐침 볼로 측정할 경우가 가장 참값에 가깝다고 간주하고, 직경 1 mm인 탐침 볼을 이용한 측정결과를 기준으로 하여 2 mm와 3 mm 직경을 가진 탐침 볼을 이용한 측정결과와 비교하였다. 탐침 볼 직경이 3 mm인 경우는 1 mm인 경우와 비교하였을 때, 탐침 볼 직경에 의한 측정오차가 허용할 수 있는 범위를 벗어나거나(trailing edge), 허용범위에 아주 근접해 있음을 알 수 있었다(leading edge). 그러므로 3차원 측정기를 이용하여 본 연구에서 고려하는 고압 압축기 블레이드를 측정할 경우, 직경이 1 mm 또는 2 mm인 탐침 볼을 쓸 수 있는데, 비용이나 edge의 끝점을 찍을 가능성의 측면에서는 2 mm 탐침 볼을 쓰는 것이 유리하고, 모수를 보다 정확하게 파악하는 것이 필요한 경우에는 1mm 탐침 볼을 쓰는 것이 유리하다. 그리고 edge가 날카로운 제품은 2 mm 탐침 볼을 쓰는 것이 좋겠다(Baik, 2002). 종합적으로 보면, 제품개발 초기의 초도품을 생산해야 할 때와 같이 아주 정밀하게 생산을 해야 할 때는 1 mm 탐침 볼을 사용하는 것이 좋은데, 시간이 많이 소요되기는 하겠지만 edge부분에서는 좀 더 측정을 많이 하는 것이 좋겠다. 개발이 끝나고 공정이 안정되어 대량생산을 할 때에는 2 mm 탐침 볼을 쓰는 것이 유리 하겠다.

본 연구에서 이용한 실험적 측정 및 분석절차는 다른 형태의 압축기 블레이드를 측정하고 검사하는 업무에도 이용을 하여 최적 탐침 볼을 선정하는 데에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

Baik, H. G. (2002), Personal Communication, Samsung Techwin.
 Bland, J. A. and Davison, R. (1985), Coordinate Measuring Machines, *Quality Assurance*, 11(3), 74-76.
 Choi, Y. S. (2002), Personal Communication, Dukin Co.
 Dongwoo IMS (1997), *Three-Dimensional Coordinate Measuring Machine Manual*, Dongwoo Innovative Metrology Solutions.
 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.
 Hubele, N. F., Montgomery, D. C. and Chih, W. -H. (1991), An Application of Statistical Process Control in Jet-Turbine Engine Component Manufacturing, *Quality Engineering*, 4(2), 197-210.
 Kalpakjian, S. (1991), *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison-Wesley.
 Kang, J. and Byun, J. -H. (2000), A Study on Fitting the Edge Profile of Airfoil with Coordinate Measuring Machines, *IE Interfaces*, 13(4), 703-708.
 Korean Society for Aeronautical and Space Sciences (1998), *Introduction to Aeronautics and Astronautics*, 3rd Ed., Kyungmoonsa.
 Menq, C. and Chen, F. L. (1996), Curve and Surface Approximation from CMM Measurement Data, *Computers and Industrial Engineering*, 30(2), 211-225.

