http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.5.465 ISSN 2233-6036

에어포일 기계가공 변형 연구 : 지그와 가공단계의 영향

라경운[a], 지성범[b], 조영진[b], 박제홍[a], 서상원[a], 김수진[a*]

A Study on Machining Distortion of Airfoil Effected by Fixture and Process

Kyeong-Woon Ra[a], Seong-Bum Ji[b], Yeong-Jin Jo[b], Je-Hong Park[a], Sang-Won Seo[a], Su-Jin Kim[a*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Building 403, Room 110, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, 660-701, Korea*

[b] *Samwoo Metal IND., LDT, Namsan-dong 604-17, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 642-090, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 10 June 2014
Revised 7 August 2014
Accepted 22 August 2014

Keywords:
Airfoil
Distortion
Machining
Fixture
Al7075
3D Scanning

ABSTRACT

Thin and wide airfoils are difficult to be machined precisely because they are deformed during and after machining processes. This paper presents the results of the airfoil deformation measured by three-dimensional (3D) scanning equipment. It also discusses the influences of fixture and the machining process on the distortion of the thin airfoil. The simple fixture bended the thin airfoil to a U-shape at the first process, and the vacuum fixture decreased the distortion of the machined airfoil at the second process. The long and thin airfoil supported by two points was buckled during the machining at its two end-regions at the third process. Results from this study suggest that use of vacuum fixture decreases the machining distortion of thin and wide airfoils.

1. 서 론

일반적인 머시닝센터 가공에서는 제거되는 칩보다 남는 제품형상이 두꺼워서 가공오차는 장비와 공구의 오차인 수십 마이크로미터 정도지만 에어포일(Airfoil)은 대부분을 제거하고 최종형상은 얇고 넓은 판 형태로 소재가 가공 후 수 미리미터이상 다양한 방향으로 휘어 어려움을 겪고 있다. 가공관련 회사에서는 새로운 제품을 가공 할 때 발생하는 변형을 최소화하기 위한 방법으로 전용 지그(Fixture)를 개발하거나 공구의 회전수와 이송속도 그리고 가공 경로 등 가공 조건을 변경하는 방법을 사용하고 있으며, 주로 현장 작업자의 경험에 의존함으로써 변형을 줄이기까지 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 기계가공 후 발생하는 제품 변형의 요인으로는 소재 자체의 잔류응력과 가공 중 발생하는 절삭력 그리고 온도의 변화 등이 있다[1-3]. 변형을 일으키는 각각의 요인들은 서로 복합적인 작용을 통해 최종 제품에 영향을 미치기에 발생한 변형에 대한 원인을 예측하거나 해결책을 찾기 어렵다[4]. 특히, 항공기 부품의 경우에는 경량화와 강도 향상을 위해 단조과정을 거친 알루미늄 합금 소재를 주로 사용하는데 단조 과정에서 발생한 소재표면의 잔류응력이 가공에서도 영향을 주어 최종 제품의 변형 양상을 예측하기 더 어렵게 만든다[5,6]. 따라서 가공 후 발생하는 변형을 확인하고 개선하기 위해서는 변형을 일으키는 각각의 원인에 대한 개별적 실험과 분석이 필요하며, 최종 제품의 형상이 얇은 판형일 경우 지그에 의한 가공변형 연구가 동반되어야 하나 이에 대한 연구는 부족하다.

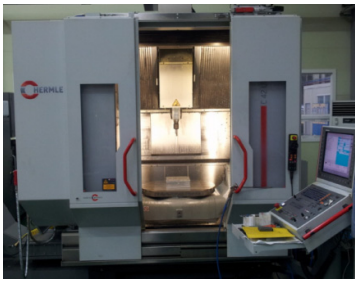
* Corresponding author. Tel.: +82-10-9642-3012
Fax: +82-55-772-1636
E-mail address: sujinkim@gnu.ac.kr (Su-Jin Kim).

본 논문은 에어포일 형상의 제품을 기계 가공할 때 발생하는 변형에 대한 실험적 연구로 지그의 형상과 가공단계가 변형에 미치는 영향에 관한 실험과 분석을 수행하였다. 실험에 사용 된 에어포일은 대량생산이 필요한 개발품으로, 최종 가공 후 에어포일 면에서 발생하는 변형과 뒤틀림이 문제가 되고 있다. 가공은 5축 가공장비를 이용하여 3단계로 이루어지며 각 공정마다 서로 다른 형상의 지그를 사용하여 소재를 고정하였다. 3D로 모델링 된 도면과 실제 가공제품의 차이를 3차원으로 확인하기 위해 3D 스캐닝 장비를 사용하였으며, 각 공정이 끝난 에어포일의 면을 측정함으로써 변형 양상을 확인하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 가공 조건

실험 대상인 에어포일의 표면은 복잡한 곡면형상을 가지고 있어서 5축 가공장비를 통해 가공이 이루어진다. 고속가공이 필요한 알루미늄의 특성상 높은 주축 회전속도를 이용하여 가공이 이루어지며[7], 3단계의 가공공정을 통해 최종 제품이 만들어진다. 측정에는 3D 스캐닝 장비를 사용하여 3D로 모델링 된 도면과 실제 가공제품의 차이를 3차원으로 확인하였다. Fig. 1은 실제 가공과 측정에 사용된 장비의 사진이며 이에 대한 사양은 Table 1에 정리하였다. 에어포일의 가공에는 여러 종류의 공구와 가공 조건이 사용되었으나 에어포일 면을 가공할 때 사용한 가공조건은 회전수 20,000 rpm, 이송속도 12,000 mm/min 이다. Table 2는 에어포일 면 가공에 대한 공정 순서와 공구이다. 황삭 가공에는 D20 라운드 엔드밀을 사용하였고, 정삭가공에는 D32 라운드 엔드밀을 사용하였다. 3차 가공에서는 에어포일의 고정부인 양쪽 끝을 가공하기 위해 D10 볼 엔드밀을 사용하였다.



(a) Machining center

(b) 3D scanning equipment

Fig. 1 Test equipment

2.2 소재 및 측정 위치

에어포일의 원자재는 단조과정을 거친 Al7075로 이에 대한 물성치를 Table 3에 표시하였다. 각 가공단계에 발생하는 에어포일 변형을 쉽게 비교할 수 있도록 에어포일의 부위별 명칭 및 측정위치를 정하고 Fig. 2에 나타내었다. 에어포일의 날개면을 기준으로 오목하게 들어간 곳을 오목면(Concave), 볼록하게 나온 면을 볼록면(Convex)으로 지정하였으며, 바람이 들어오는 앞쪽 모서리를 앞(Leading edge, LE), 뒤쪽 모서리를 뒤(Tailing edge, TE), 가운데를 중앙(Center, CE)로 정하였다. 또한, 변형 양상을 확인하기 위해 에어포일의 양 끝을 기준으로 위(Top), 중간(Middle), 아래(Bottom)로 나누었다.

Table 1 Test equipment

Equipment	Specification
Machining center C40U 5-axis	Max weight: 1,400 kg Stroke: X850 Y700 Z500 mm
3D Scanning ATOS II	Area: 38×29 - 2,000×1,500 mm^2 Point spacing: 0.02 - 0.062 mm

Table 2 Cutting tools

	1st		2nd	3rd
	Rough	Finish	Finish	Finish
Tool	D20	D32	D32	D10 Ball

Table 3 Material properties of Al7075

Yong's Modules	71.7 GPa
Poisson's Ratio	0.33
Density	2810 kg/m^3
Tensile Strength	276 MPa
Yield Strength	145 MPa

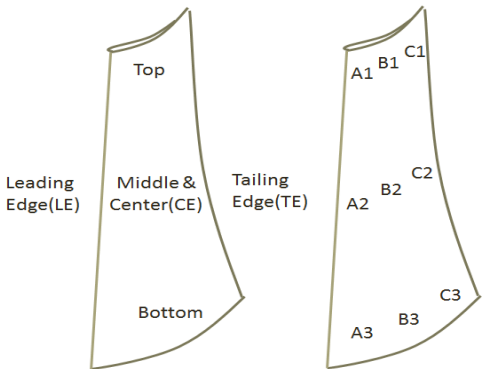


Fig. 2 Naming and measuring points

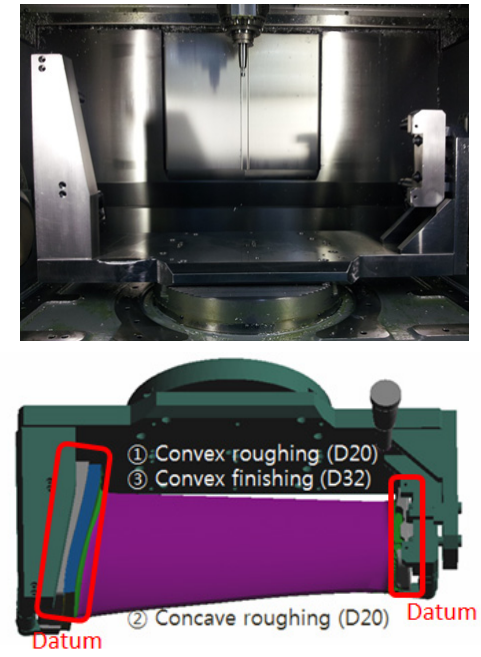


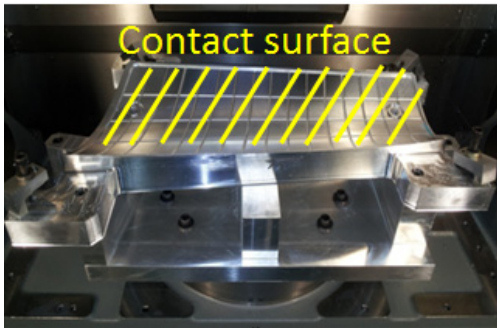
Fig. 3 1st Process in simple supported fixture

처음부터 최종형상으로 가공되는 볼록면이 측정 대상이며 측정 위치는 Fig. 2와 같이 A B C 행과 1 2 3열로 구성된 3×3행렬로 나타내었다. 본문의 Fig. 6과 Fig. 7의 데이터들은 Fig. 2에서 정의된 위치에서 측정된 좌표와 설계 데이터 사이의 오차이다.

2.3 가공 순서 및 지그

실험에 사용된 에어포일의 가공 공정은 총 3단계로 이루어지며, 각 공정마다 서로 다른 형상의 지그가 사용되어 소재를 고정하고 가공 중 발생하는 진동을 줄이는 역할을 한다. Fig. 3은 1차 가공에 사용되는 지그의 형상과 가공방법에 관한 사진과 그림이다. 1차 가공에서 사용되는 지그는 에어포일의 양끝 기준면(Datum)을 고정하고 에어포일의 오목 및 볼록 면을 가공 한다. 먼저 D20 엔드밀로 볼록 및 오목 면을 황삭 가공하고 다음으로 D32 엔드밀로 볼록면만 정삭 가공한다. Fig. 4는 2차 가공에서 사용되는 지그의 형상과 가공방법에 관한 사진과 그림이다. 1차 가공 후 얇아진 에어포일은 가공 중 발생하는 진동에 취약함으로 2차 가공에서는 진공지그(Vacuum Fixture)로 소재를 고정해 보완한다. 진공지그로 1차 가공에서 정삭 된 볼록면을 고정하고 D32 엔드밀을 이용하여 오목면을 정삭한다. Fig. 5는 3차 가공에 사용된 지그와 가공방법에 대한 사진과 그림이다. 3차 가공은 에어포일의 조립부위인 양 쪽 끝을 가공하는 공정으로, 지그로 에어포일의 두 부분을 지지하고 D10 볼 엔드밀 등으로 조립면을 가공한다.

이렇게 본 논문에서는 소재의 양 끝 기준면을 지지하고 에어포일을 가공하는 1차 지그, 에어포일 볼록면 전체를 진공으로 잡고 오목면을 가공하는 2차 지그, 에어포일 중간부분은 자유롭게 두 부분만



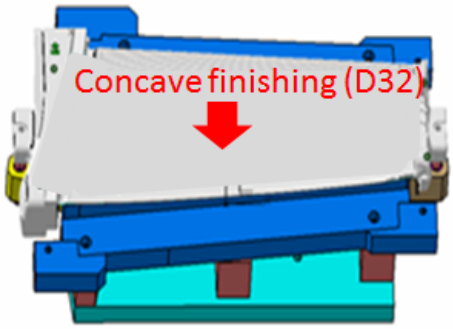
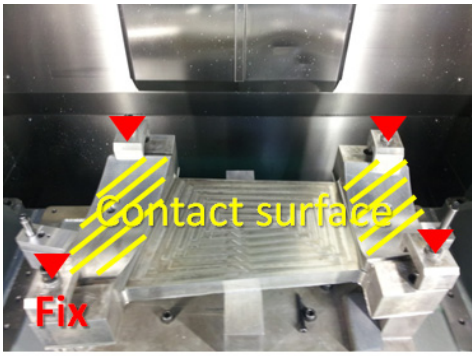


Fig. 4 2nd Process in vacuum fixture



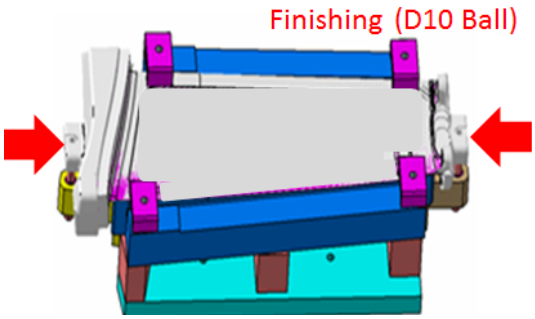


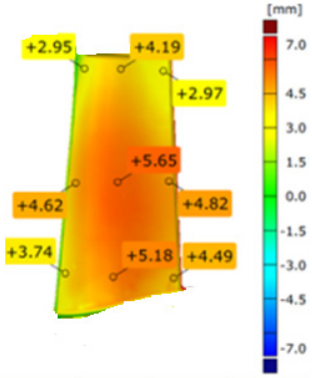
Fig. 5 3rd Process in simple supported fixture

을 지지하고 양 끝 조립면을 가공하는 3차 지그 이렇게 세 가지 지그의 형상과 지지방법에 따른 가공 후 변형량을 측정하고 분석하였다.

3. 측정 결과 및 토의

3.1 각 공정별 에어포일 변형 양상

기계가공 후 발생하는 에어포일의 변형 양상을 확인하기 위해



	A	B	C
1	2.95	4.19	2.97
2	4.62	5.65	4.82
3	3.74	5.18	4.49

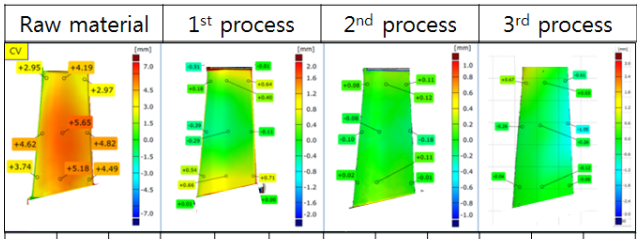
Fig. 6 3D Scanning Data in Test 1 Raw material

3D 스캐닝 장비를 이용하여 가공 전 원자재와 1, 2, 3차 가공 후 에어포일의 볼록면 윤곽형상을 측정하였다. 디자인 유출을 막기 위해 결과 데이터에서 에어포일과 동체의 결합부위인 양쪽 끝 형상을 삭제하였다. 3D 스캐닝 측정값의 편차를 확인하기 위해 가공에 사용된 기준면을 이용하였다.

Fig. 6는 Test 1의 원자재 형상을 3D 스캐닝 장비를 이용하여 측정한 결과 값이다. 측정값이 양의 값을 가질수록 붉은색을 띄며 음의 값을 가지면 푸른색을 띈다. 측정 결과 원자재의 모든 부위가 양의 값을 가짐으로써 볼록하게 나와 있음을 확인 할 수 있다. 특히, 에어포일의 중앙인 B2 지점의 오차가 +5.62 mm로 가장 크며 이러한 현상은 다른 에어포일에서도 동일하게 나타남을 볼 수 있다.

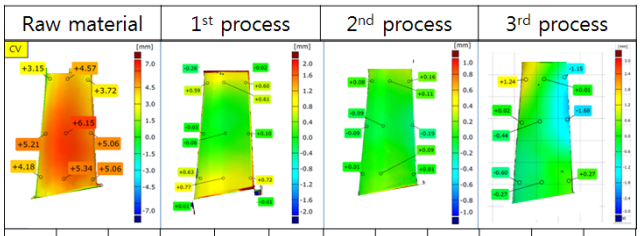
실험에 사용된 4개의 에어포일에 대한 각 공정에서의 3D 스캐닝 측정결과는 Fig. 7에 나타내었다. 그 중 Test 4 소재의 중앙인 A2, B2, C2 지점에서의 측정값 평균은 7.31 mm로 다른 에어포일의 중앙부위 평균치 5.89 mm보다 1.5 mm 크게 나와 원자재의 오차가 큰 소재임을 확인하였다. 따라서 Test 4 소재와 다른 소재의 비교를 통해 원자재의 형상 오차가 가공 후 발생하는 변형에 미치는 영향을 고려할 수 있었다. 1차 가공 후 Test 4 에어포일의 위, 중간, 아래의 측정 포인트의 평균 변형량은 0.43, 0.03, 0.72 mm로 다른 에어포일의 평균 변형량인 0.59, 0.04, 0.72 mm와 차이가 없음으로 원자재의 형상 편차가 가공 변형에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7의 가공 단계별 볼록면의 형상 오차는 시험가공 모두 1차 가공과 2차 가공에서는 오차가 감소한 반면 3차 가공 후에는 오차가 오히려 증가한 것을 알 수 있다. 볼록면의 변형 형태를 보면 1차 가공에서 양 끝이 노란색으로 튀어나오고 중간은 초록색으로 설계



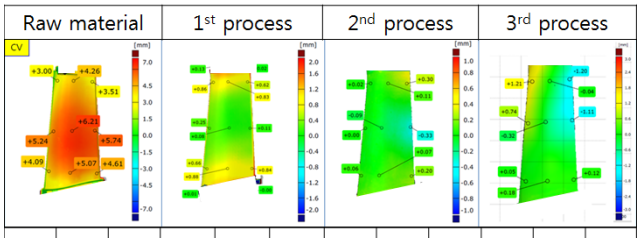
2.95	4.19	2.97	0.8	0.40	0.64	0.08	0.12	0.11	0.67	0.03	-0.61
4.62	5.65	4.82	-0.39	-0.29	-0.11	-0.10	-0.08	-0.18	-0.26	-0.26	-1.05
3.74	5.18	4.49	0.54	0.66	0.71	0.02	0.11	-0.01	-0.04	-0.12	-0.03

(a) 3D Scanning Data in TEST 1



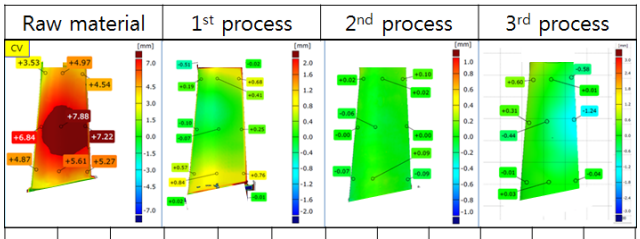
3.15	4.57	3.72	0.59	0.61	0.60	0.08	0.11	0.16	1.24	0.01	-1.15
5.21	6.15	5.06	-0.03	-0.06	0.10	-0.09	-0.09	-0.19	0.02	-0.44	-1.68
4.18	5.34	5.06	0.63	0.77	0.72	0.01	0.09	0.01	-0.60	-0.27	0.27

(b) 3D Scanning Data in TEST 2



3.00	4.26	3.51	0.86	0.83	0.62	0.02	0.11	0.30	1.21	-0.04	-0.12
5.24	6.21	5.74	0.25	0.08	0.11	0.00	-0.09	-0.33	0.74	-0.32	-1.11
4.09	5.07	4.61	0.66	0.88	0.84	0.06	0.07	0.20	0.05	0.18	0.12

(c) 3D Scanning Data in TEST 3



3.53	4.97	4.54	0.19	0.41	0.68	0.02	0.02	0.10	0.60	0.01	-0.58
6.84	7.88	7.22	-0.10	-0.07	0.25	0.00	-0.06	0.00	0.31	-0.44	-1.24
4.84	5.61	5.27	0.57	0.84	0.76	-0.07	0.09	-0.09	-0.01	0.03	-0.04

(d) 3D Scanning Data in TEST 4

Fig. 7 3D Scanning Data

와 같아 U자 형으로 굽었음을 알 수 있으며, 진공지그로 볼록면을 잡고 오목면을 가공한 2차 가공 후 볼록면 전체가 초록색으로 바뀌어 오차가 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 에어포일을 잡고 양 끝 조립 면을 가공하는 3차 가공 후 노란색과 하늘색이 함께 나타

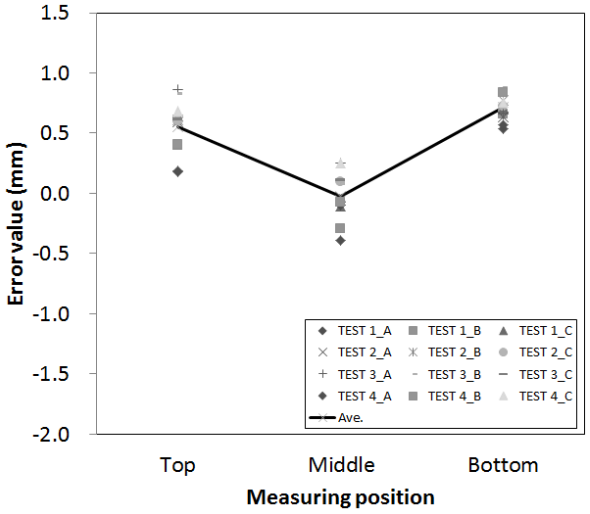


Fig. 8 Error value after 1st Process

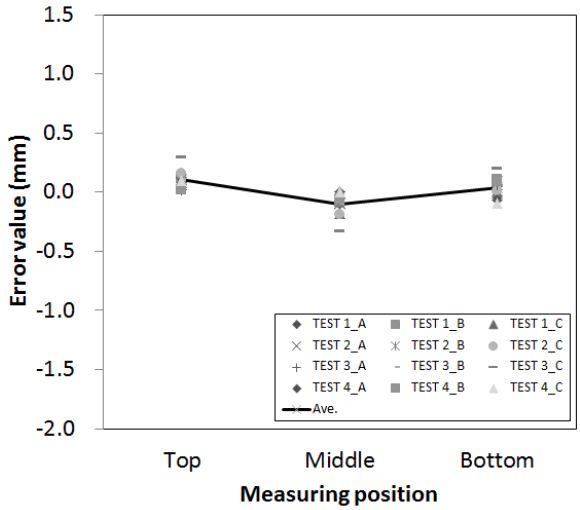


Fig. 9 Error value after 2nd Process

나 곡면이 뒤틀렸음을 알 수 있다.

Fig. 8, 9, 10는 각 공정 별 에어포일의 볼록면에 대한 측정값과의 평균값을 실선으로 표시하고 측정 데이터를 점으로 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 1차 가공 후 소재의 양 끝이 높고 가운데가 낮은 U자 형으로 평균 0.47 mm 휘어져 있음을 확인 할 수 있으며 표준편차는 0.28 mm이다. Fig 9에서 2차 가공 후 평균변형 0.09 mm와 표준편차가 0.08 mm로 오차가 개선되었음을 확인 할 수 있었으며, Fig 10에서 3차 가공 후 평균변형이 0.43 mm이고 표준편차가 0.45 mm로 에어포일의 변형오차가 다시 커짐을 볼 수 있었다.

3.2 지그가 에어포일 기계가공에 미치는 영향

가공 단계별로 에어포일의 형상오차 발생 양상을 토의하기 위해서 Fig. 11에 가공 단계별 지그와 변형을 개념도로 정리하였다.

1차 가공에서는 지그로 양쪽 끝을 고정하고 두꺼운 소재를 황삭

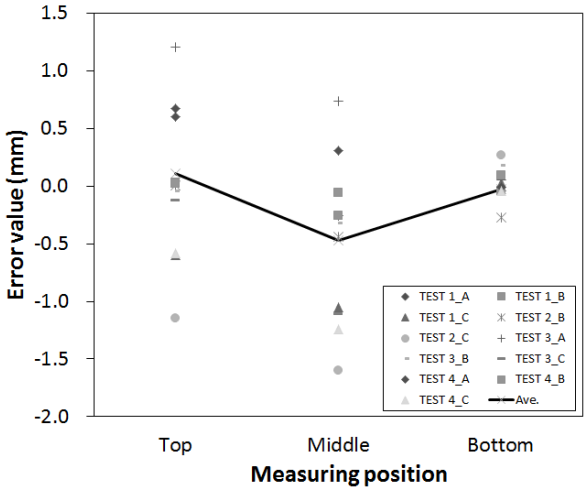


Fig. 10 Error value after 3rd process

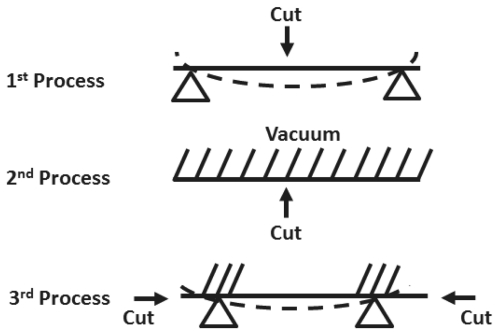


Fig. 11 Airfoil fixture diagram

가공해 얇은 에어포일 형상에 가깝게 만든 후 볼록면을 최종 형상으로 정삭 가공한다. 1차 가공에서 최종 형상으로 가공된 볼록면을 측정하면 Fig. 8과 같이 U자 형으로 휘어진 것을 알 수 있는데 이것은 얇은 빔의 양쪽 끝을 지지하고 중간을 누르면 U자 형으로 휘어지는 것과 같은 원리로 설명할 수 있다.

2차 가공은 진공지그를 이용하여 에어포일의 볼록면 전체를 고정하고 반대쪽인 오목면에 대한 가공이 이루어지며, Fig. 9의 측정결과 가공을 하지 않은 볼록면의 변형이 개선되었음을 확인 할 수 있었다. 이는 변형이 발생한 에어포일의 볼록면이 진공지그에 고정될 때 펴지는 현상이 원인으로 보이며 이로 인하여 가공 부위가 아님에도 볼록면의 형상정밀도가 개선이 되었다.

3차 가공에서 에어포일의 두 면을 고정하고 동체와 조립되는 양쪽 끝을 가공한 후 Fig. 9와 같이 가공되지 않는 볼록면의 오차가 더 커짐을 확인할 수 있었다. 특히 에어포일 형상부의 뒤틀림 양이 실험마다 달라 표준편차가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 3차 지그가 에어포일의 두 부분만 지지하고 가운데가 떠 있는 상태이므로 얇고 긴 빔의 양쪽 끝을 누르면 좌굴(Buckling)이 발생하며 좌굴의 방향은 미세한 초기오차에 따라 크게 달라지는 것과 같은 원리로 설명할 수 있다.

에어포일의 양 끝을 지지하는 1차 3차 지그 고정 방식에서는 형상부를 가공한 경우와 양 끝을 가공한 경우 모두 오차가 컸고 진공지그를 사용한 2차 가공에서는 오차가 개선되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 단조 된 Al7075 소재로 만들어진 에어포일 형상의 제품을 기계가공 하였을 때 발생하는 변형에 대한 실험적 연구로 지그와 가공단계별 영향에 대한 실험을 수행하였다. 측정에는 3D 스캐닝장비가 사용되었으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 소재의 양 끝을 지지하고 볼록면을 최종 정삭 가공하는 1차 가공 후 측정했을 때 U자 형태로 휘어지는 현상이 발생하였으며 이것은 얇은 빔의 양쪽 끝을 지지하고 중간을 누르면 U자 형으로 휘어지는 것과 같은 원리로 설명할 수 있다. 둘째, 에어포일 2차 가공에서 오목면을 정삭 가공하였을 때 반대 면인 볼록면의 형상오차가 개선됨을 볼 수 있었고, 이는 오차가 있는 볼록면을 진공지그의 정확한 면으로 잡고 반대 면을 공구로 누르기 때문에 얇은 에어포일이 지그의 형태로 펴져 오차가 개선된 것으로 보인다. 셋째, 3차 가공에서 에어포일 양쪽 끝을 지지하고 에어포일 형상부가 아닌 바깥 쪽 조립면을 가공한 후 에어포일이 뒤틀려 형상오차가 커짐을 확인하였다. 이것은 얇고 긴 빔이 축방향 하중을 받을 때 좌굴 발생하는 것과 같은 원리로 설명할 수 있다.

이와 같이 에어포일을 기계가공 하였을 때 오차는 지그와 가공방법에 의한 영향이 큼을 확인하였고, 형상정밀도를 높이기 위해서는 2차 가공과 같이 진공지그를 이용하는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 동남 광역경제권 선도산업 R&D사업에 의한 지원을 받아 수행되어졌다.

References

[1] Shin, Y. B., Kim, S. J., 2013, An Experiment of Machineable Width and Thickness of Airframe Thin Plate Structure, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. 22:1 162-167.

[2] Hwang, Y. K., Lee, C. H., 2010, Prediction of Relative Deformation between Cutting Tool and Workpiece by Cutting Force, Journal of the KSPE 27:9 86-93.

[3] Lee, M. J., Hwang, Y. K., Lee, C. M., 2010, A Study on the Development of Analysis Model for Prediction of Relative Deformation between Cutting Tool and Workpiece, Journal of the KSPE 27:9 20-26.

[4] Richter-Trummer, V., Koch, D., Witte, A., Santos, J. F., Castro, P. M. S. T., 2013, Methodology for Prediction of Distortion of Workpieces Manufactured by High Speed Machining Based on an Accurate Through-the-Thickness Residual Stress Determination, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 68 2271-2281.

[5] Robinson, J. S., Hossain, S., Truman, C. E., Paradowska, A. M., Hughes, D. J., Wimpory, R. C., Fox, M. E., 2010, Residual Stress in 7449 Aluminium Alloy Forgings, Materials Science and Engineering A 527 2603-2612.

[6] Lee, U. M., Kim, N. K., Kim, H. J., Lee, I. S., 2009, A Study on Machining Deformation of Major Structure in Aircraft, Proceedings of the KSMPE Autumn Conference 17-19.

[7] Lee, J. H., Lee, D. S., Lee, E. S.. Shin, B. S., 2001, A Study on the Evaluation on High-Speed Machining Characteristics of AL7075, Proceedings of theKOMMA Autumn Conference 220-224.