

# LVDT를 이용한 터빈 베인 측정시스템 개발

## Development of a Turbine-vane Measurement System Using LVDT

\*유종선<sup>1</sup>, #류시형<sup>2</sup>, 유형태<sup>3</sup>

\*J. S. Yu<sup>1</sup>, #S. H. Ryu(ryu5449@chonbuk.ac.kr)<sup>2</sup>, H. T. Yu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 전북대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>전북대학교 기계공학과, <sup>3</sup>시그널웍스(주)

Key words : Turbine-vane, LVDT, Three dimensional measurement system, Machining error, Quality control

### 1. 서론

제트 엔진의 핵심 부품으로 사용되는 베인(vane)은 꼬인 곡면을 포함한 복잡한 삼차원 형상으로 이루어져 있다. 산업 현장에서는 5축 가공기로 가공한 후 수작업으로 사상 작업을 하고, 삼차원 측정기(CMM)로 형상을 전수 측정하며 개당 20~30분의 측정시간이 소요된다. 검사원이 개개의 제품을 치구에 고정하고 지시된 절차에 의해 측정을 하며, 제품이 불량인 경우 재 사상 작업 후에 다시 측정해야 하므로 측정 시간 증가에 따른 생산성 저하, 납기 지연 등의 문제가 발생하게 된다. 전체 공정 중에서 측정에 소요되는 시간이 길어 제품의 납기를 맞추기 위해서는 수시로 야간 작업을 해야 하는 어려움이 있다. 삼차원 측정기는 복잡한 삼차원 형상 측정에 가장 널리 사용되는 방법이나, 장비가 고가이며 항온항습실의 유지비가 높고 숙련된 작업자를 양성하는데에도 많은 시간과 비용이 소요된다. 본 연구에서는 기존의 측정 방식을 개선하기 위해, LVDT 센서를 이용한 베인 전용 측정 시스템과 측정 알고리즘을 개발하였다. 개발된 시스템이 베인의 중요 특징 형상과 치수를 측정하는데 유용함을 확인하였고, 측정 시간의 단축에도 효과적임을 알 수 있었다. 더불어 측정 데이터의 실시간 처리를 통한 품질 관리 시스템을 구축하여 생산 제품의 신뢰성 향상을 도모하였다.

### 2. 형상 설계 및 측정 알고리즘 개발

측정 센서인 LVDT가 부착되는 구동부는 2개의 스텝 모터(CSK543AP-TG10)와 볼 스크류로 구성하였다. 수평축(X축)과 수직축(Y축)에 대하여 각각 1 $\mu$ m/pulse의 이송 분해능을 가지며, Y축은 최대 이동 거리가 80mm, X축은 다수의 베인을 동시 장착하여 측정이 가능하도록 최대 300mm의 거리를 이동할 수 있도록 하였다. 또 Y축의 이송부에는 베인의 양면에서 동시 측정이 이루어지도록 2개의 LVDT 센서가 장착되었다. 베인이 설치되는 치구부는 4개의 제품을 한 번에 고정하여 연속적으로 측정이 되도록 하였다. 개발된 측정시스템의 전체 형상은 Fig. 1과 같다.

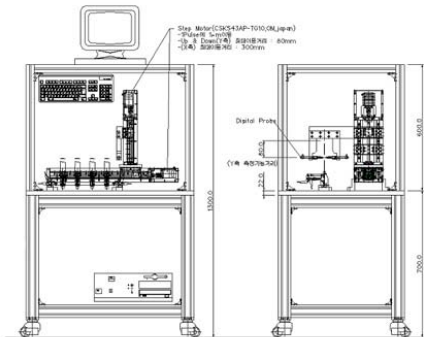
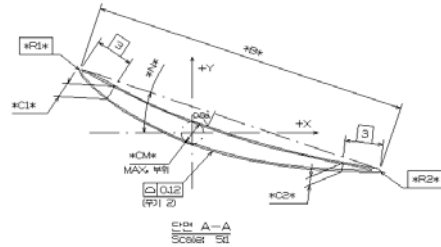


Fig. 1 Layout of turbine-vane measurement system

베인의 각 단면에서 LVDT로부터 얻어진 200개 이상의 점 데이터로부터 도면에 표시된 형상 치수 값들이 계산되도록 C언어를 이용하여 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘의 정확성은 표준 점 데이터들을 이용하여 계산하고, 그 결과 값을 도면에 설정된 값과 일치하는지 비교하여 확인하였다. Fig. 2는 각 단면에서의 측정 항목들과 임의 단면의 표준 값을 나타낸다. 프로브 반경의 보정은 Fig. 3에서 보듯이 이전 점 데이터로부터 곡면의

법선을 구하고 프로브 반경을 고려하여 측정값을 갱신하였다. Table 1은 Leading edge와 Trailing edge의 반경 값을 구하는 알고리즘의 예를 나타낸다.



| AIRFOIL DATA (FIG. 3) |      |                 |     |     |                 |                 |                 |             |  |
|-----------------------|------|-----------------|-----|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|--|
| SECT                  | H    | CS <sub>1</sub> | R1  | R2  | CS <sub>2</sub> | CS <sub>3</sub> | CS <sub>4</sub> | N (DEG)     |  |
| A1-A1                 | 25   | 24970           | 0.0 | 0.0 | 1.254           | 0.693           | 1.748           | 16° 30' 33" |  |
| A2-A2                 | 12.5 | 24949           | 0.0 | 0.0 | 1.309           | 0.693           | 1.743           | 17° 30' 57" |  |
| A3-A3                 | 22.5 | 24937           | 0.0 | 0.0 | 1.305           | 0.693           | 1.743           | 16° 30' 20" |  |
| A4-A4                 | 32.5 | 24945           | 0.0 | 0.0 | 1.341           | 0.690           | 1.744           | 15° 25' 25" |  |
| A5-A5                 | 42.5 | 24937           | 0.0 | 0.0 | 1.239           | 0.685           | 1.750           | 20° 28' 01" |  |

Fig. 2 Vane section profile and dimensional allowance

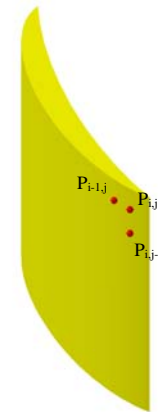


Fig. 3 Compensation method of the probe radius

Table 1 Example of edge radius calculation algorithm

```
// The radius of two side circle
a = sqrt((top[0][0]-top[1][0])*(top[0][0]-top[1][0])+
(top[0][1]-top[1][1])*(top[0][1]-top[1][1]));
b = sqrt((top[0][0]-top[2][0])*(top[0][0]-top[2][0])+
(top[0][1]-top[2][1])*(top[0][1]-top[2][1]));
d = sqrt((top[2][0]-top[1][0])*(top[2][0]-top[1][0])+
(top[2][1]-top[1][1])*(top[2][1]-top[1][1]));
s = (a + b + d) / 2;
r1 = (a*b*d) / (4 * sqrt(s*(s-a)*(s-b)*(s-d)));

a = sqrt((bot[0][0]-bot[1][0])*(bot[0][0]-bot[1][0])+
(bot[0][1]-bot[1][1])*(bot[0][1]-bot[1][1]));
b = sqrt((bot[0][0]-bot[2][0])*(bot[0][0]-bot[2][0])+
(bot[0][1]-bot[2][1])*(bot[0][1]-bot[2][1]));
d = sqrt((bot[2][0]-bot[1][0])*(bot[2][0]-bot[1][0])+
(bot[2][1]-bot[1][1])*(bot[2][1]-bot[1][1]));
s = (a + b + d) / 2;
r2 = (a*b*d) / (4 * sqrt(s*(s-a)*(s-b)*(s-d)))
```

### 3. 측정 시스템 제작 및 성능 평가

Fig. 4는 개발된 베인 전용 측정시스템을 나타낸다. 구동부 가이드 레일을 따라서 볼 스크류와 스텝 모터를 설치하고, X축 가이드 레일과 평행하게 베인 치구부가 고정된다. 구동부 위쪽의 전용 컴퓨터를 통하여 측정 시스템을 제어할 수 있도록 하였다. 시스템 제어 프로그램은 Delphi S/W를 이용하여 구축하였으며, 측정된 점 데이터들과 계산된 주요 형상 치수 값, 그리고 단면의 형상이 모니터에 나타나도록 하였다. 또한 표준 치수와와의 비교를 통해 오차값을 디스플레이하고 제품의 양부를 판별할 수 있도록 하였으며, 게이지 반복성과 재현성 분석을 통해 지속적인 품질 관리가 가능하도록 하였다.

Fig. 5는 LVDT가 베인의 양면을 동시에 측정하는 모습을 보여 주며, 개당 측정 시간이 5분 이내로써 CMM에 비해 측정 시간이 크게 단축되었다. 측정 시스템의 R&R 정밀도는 20% 이하로 양호함을 확인할 수 있었다. Table 2는 본 연구를 통해 개발된 측정시스템과 기존 CMM과의 측정값 비교 결과를 나타낸다. 이로부터 개발된 전용 측정시스템의 신뢰도를 검증할 수 있었다.



Fig. 4 Turbine-vane profile measurement system

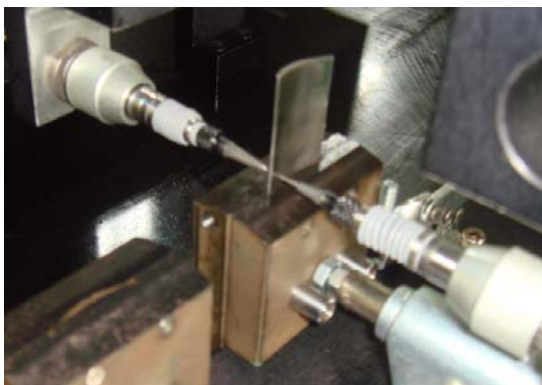


Fig. 5 Measuring procedure by LVDT sensor

Table 2 Comparison with the CMM data (Unit: mm)

| SECT. A1-A1     | B                | R1               | C1               | CM               | N (REF)              |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| 표준 값<br>(표준 오차) | 24.976<br>(-0.4) | 0.11<br>(0.08이상) | 1.254<br>(-0.12) | 1.748<br>(-0.12) | 16°36'33"<br>(18"이내) |
| CMM 오차          | 0.01             | 0.01             | 0.02             | 0.01             | 8'                   |
| 개발시스템<br>오차     | 0.02             | 0.005            | 0.026            | 0.01             | 5'                   |

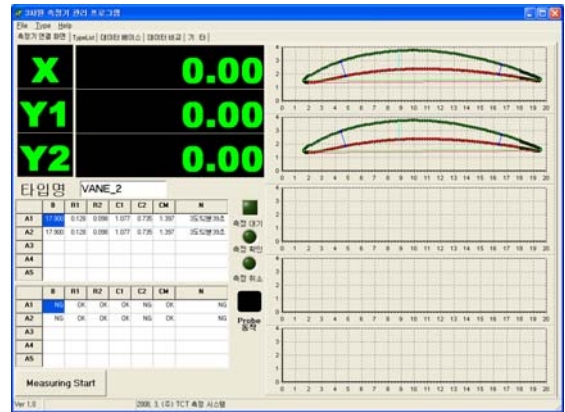


Fig. 6 Screen display of measurement results

Fig. 6은 베인 각 단면부의 측정 형상과 주요 치수, 비틀림 각도, 반경 등을 나타내며, 오차값의 크기와 오차가 발생한 위치를 나타낸다. 따라서, 재 사상 작업을 용이하게 하며 가공상의 문제점을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 고가의 3차원 측정기를 대체할 수 있는 베인 전용 측정시스템을 개발하였다. LVDT 센서를 이용하여 삼차원 복합 곡면이 포함된 베인의 주요 형상과 치수를 측정하였으며, 측정 데이터로부터 각 특징 형상들을 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 프로브 반경의 보정을 통해 측정 데이터의 정밀도를 개선하였으며, 반복성, 재현성 실험과 CMM 측정 데이터와의 비교, 분석을 통해 개발된 시스템의 신뢰도를 검증하였다. 기존 방법에 비해 측정 시간이 4분의 1정도로 크게 단축되었으며, 측정 정밀도는 동등한 수준을 유지하였다. 또한, 측정데이터의 실시간 처리를 통한 품질 관리 시스템을 구축하여 생산 제품의 품질 보증과 신뢰성 향상을 도모하였다.

### 후기

본 연구는 2007년 중소기업청 산학연컨소시엄사업에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. 강병수, 강재관, "접촉식 3차원 형상스캐너를 이용한 터빈 블레이드의 형상 정밀도 측정," 한국공작기계학회 논문집, Vol. 15, No. 6, pp. 76-81, 2006.
2. 길경섭, 정용갑, 박종호, "고효율 제트 베인 설계를 위한 공기역학적 특성 연구," 한국추진공학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 39-45, 2003.
3. 박희재, 안우정, 김왕도, "CAD/CAI 통합에 기초한 박형 단면을 가지는 항공기 터빈 블레이드의 정밀측정기술 개발," 대한기계학회논문집, Vol. 20, No. 6, pp. 1743-1752, 1996.
4. 이갑조, 오상록, 김종관, "정밀가공 부품 검사에 사용되는 3차원 측정기의 측정불확도 연구," 한국공작기계학회논문집, Vol. 14, No. 2, pp. 55-61, 2005.