한국기계가공학회지, 제13권, 제6호, pp.104~110(2014.12) ISSN1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.13 No.6, pp.104~110(2014.12) ISSN2288-0771(online)

http://dx/doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.6.104

윙립 두께 측정용 비접촉식 검사 시스템에 관한 실험적 연구

이인수*, 김해지#, 안명섭**
(* 경남과학기술대학교 대학원 자동차공학과, # 경남과학기술대학교 자동차공학과, ** 한국항공우주산업(주))

Experimental Study on Non-contact Type Inspection System for Wing Rib Thickness Measurement

In-Su Lee*, Hae-Ji Kim#, Myung-Sub Ahn**
(Received 19 November 2014; received in revised form 9 December 2014; accepted 10 December 2014)

ABSTRACT

This paper presents a non-contact inspection system for automatically measuring the thickness of an aircraft wing rip product. In order to conduct the inspection of the wing rib thickness automatically, a non-contact laser displacement sensor, end-effector, and a robot were selected for use. The non-contact type inspection system was evaluated by measuring the measurement deviation of the rotation direction of a C-type yoke end-effector and the transfer direction of a V-slim end-effector. In addition, the non-contact inspection system for wing rib thickness measurements was validated through thickness measurements of a web, flange, and stiffener.

Key Words : Wing Rib(윙립), Non-contact Inspection System(비접촉 검사 시스템), Thickness Measurement (두께 측정), End-Effector(엔드 이펙터)

1. 서 론

기계가공에서 제품의 두께검사는 제품의 강도를 보증하는 매우 중요한 검사 영역이다. 특히, 항공기 날개를 구성하는 윙립(wing rib)은 주익의 대부분의 하중을 지지하는 대형 구조물로써 그 형상이 매우 복잡하다. 윙립의 중량저감을 위해 제품의 바닥(web)과 측면부(stiffener, flange)의 두께를 최소화하여 설계됨으로써 매우 다양한 두께 측정영역이 존재하게 된다. 이로 인해 두께 측정에 많은 시간과 비용이 소요되며, 측정자가 초음파 두께측정기(UT gauge)나 마이크로메타 등의 수동 계측기를 사용하여 측정이 이루어지고 있다. 수동으로 측정이 이루어지기 때문에 측정자의 측정 경험치나 측정 방법에 따라 측정편차가 발생할 가능성이 높고, 생산성 측면에서도 불리하다.

본 논문에서는 윙립의 두께 측정 시스템에 관한 것이며, 측정자에 의해 수동으로 이루어지는 두께 측정 공정을 자동으로 측정과 분석이 가능하도록 자동화 시스템을 구현하고자 한다.

* School of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology
** Korea Aerospace Industries, LTD.
# Corresponding Author :
Dept, of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology
E-mail : khji@gntech.ac.kr

2. 이론적 배경

2.1 레이저 변위 센서의 원리

레이저 변위센서는 레이저삼각법(laser triangulation)을 이용한 거리측정 원리를 이용하여 측정 대상물로부터 반사된 레이져 광을 렌즈로 집광하여 PSD(position sensitive detector)에 반사된 위치로부터 센서까지의 거리를 알아내는 것이다.[1-3] 측정 제품의 정확한 거리 측정을 위해서는 표면반사가 균일해야 하며, 비균일한 반사의 경우 중심점이 이동하여 오차가 발생할 수 있다. 비균일한 반사에서는 거리의 정확도가 대상물 표면의 미세한 구조에 따라 영향을 받을 수 있으며, 이는 필터링 기술을 통해 최소화할 수 있다.

레이저 삼각법의 원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 기하학적 광학의 원리(geometric optics)에 근거한 삼각법 변위 측정 기법으로 서로 θ의 각도를 이루며 교차하는 두 개의 광축을 중심으로 구성된다.

두 광축 중 하나는 측정물의 표면에 광점을 형성하기 위해 사용된 집광렌즈(focusing lens)가 갖는 집광광축이며, 다른 하나는 측정 표면에 형성된 광점의 영상을 수광소자(detector)에 투영하기 위한 영상렌즈(condensing lens)가 갖는 영상광축이다. 측정물 표면 P점에 형성된 광점은 물체의 표면 특성에 따라 광점주위에 가우시안(gaussian)형태로 모든 방향으로 반사되는 것으로 가정할 수 있는데, 이를 경면 반사성분과 램버시안 반사성분으로 나누어 볼 수 있다. 이와 같이 반사된 빛을 수광하기 위해 일정한 거리에 위치한 영상렌즈를 통하여 집광되어 수광소자 위의 점 Q에 집중된다. 이때 측정물이 집광렌즈로부터 집광광축 상에서 직선적으로 이동하면 광점이 이동함에 따라 수광소자상의 영상점이 이동하게 되는데, 이를 영상궤적(image trajectory)이라 하며, 이는 영상광축의 수직방향과 각도 Ø를 이룬다. 일반적으로 영상렌즈는 구면 수차(spherical aberration), 코마(coma), 비점 수차(astigmatism), 시야 뒤틀림(field curvature), 왜곡(distortion) 등의 단색 수차(chromatic aberration)가 존재하는데, 이를 무시하고 근축광학의 원리와 기하광학의 원리에 의해 영상궤적은 수광조사 상을 직선적으로 움직인다고 간주한다.

Fig. 1에 나타낸 광삼각법의 관계식은 얇은 렌즈에 대한 기하광학의 원리에서 물체궤적상의 광점의 이동거리 p와 이에 대응하는 영상점의 이동거리 q는 식 (1)과 같이 주어진다.

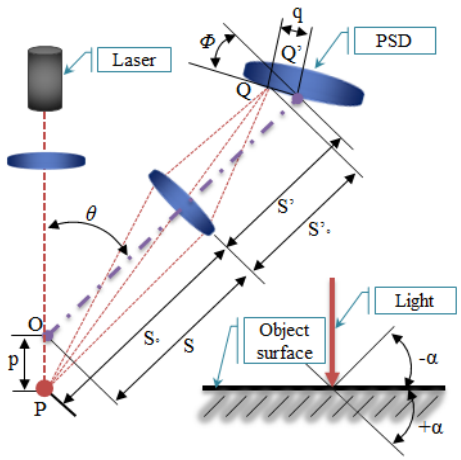


Fig. 1 The geometry of optical triangulation method

$$q = \frac{p f \sin\theta}{(s-f)\cos\Phi + p\cos\Phi\ \cos\theta} \qquad (1)$$

그리고 영상광축의 수직방향과 PSD가 이루는 각도 Φ는 식 (2)의 관계로 구해진다.

$$\Phi = \tan^{-1}\frac{f}{(s-f)\tan\theta} \qquad (2)$$

식 (1)에서 측정물의 O점에서 이동거리 p와 수광소자의 점 O'에서 영상점의 이동거리 q의 관계를 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 측정제품 윙립의 형상

항공기의 대형 날개구조물인 윙립은 주익 대부분의 하중을 지지하는 구조물로 중량저감을 위해 신소재인 Al-Li 합금이 적용된다. 그리고 일체형 박판형상으로 설계되어 그 형상이 매우 복잡하고, 제작과정에서 고난위도의 고속가공기술과 품질관리를 요구한다. 윙립의

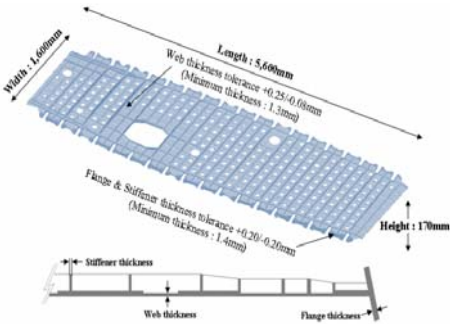
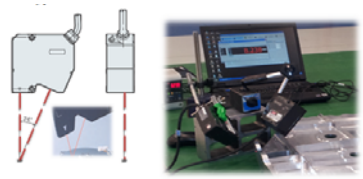


Fig. 2 3D Shape of wing rib and thickness tolerance

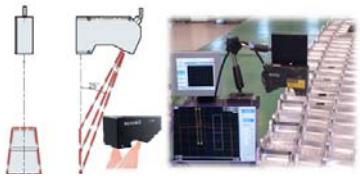
두께치수공차는 +0.20/-0.08mm로 매우 까다롭게 관리되며, 박판형태로 설계가 이루어지기 때문에 제품의 위치별 두께치수 변동이 많다. 따라서 수동방식의 품질검사로는 측정시간, 측정자의 측정능력에 따라 검사품질의 변동 요인이 발생하게 된다. Fig. 2에서는 윙립의 형상과 주요 두께치수의 공차를 나타내고 있다.

3.2 레이저 변위센서 선정 실험

윙립의 두께 측정에 적합한 비접촉식 레이저 변위센서의 선정을 위해 기존에 상용화된 레이저 변위센서 중 포인트 거리측정 방식의 레이저 변위센서와 라인 측정방식의 변위센서를 선정하여 Fig. 3과 같이 비교실



(a) Point type laser sensor



(b) Line type laser sensor

Fig. 3 Laser displacement sensor of non-contact type

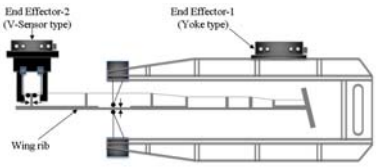


Fig. 4 End-Effector concept for measuring wing rib thickness

험을 하였다. Fig. 3(a)에서는 포인트 방식의 레이저 변위센서로 2개의 센서를 조합하여 양쪽에서 측정하였으며, 측정결과 측정값의 변동 없이 0.01mm의 정밀도로 안정적으로 출력되어 단면형상 측정에 적합한 것으로 나타났다. Fig. 3(b)에서는 라인방식의 레이저 변위센서로 제품의 stiffener와 바닥이 교차하는 필렛 반경(fillet radius)의 형상으로 인해 두께부 단면이 부정확하게 측정되어 단면형상 측정에는 부적합한 것으로 나타났다.

3.3 윙립 측정용 End-Effector

최근의 산업현장에서는 사용목적에 따라 작업환경에 최적화된 다양한 형태의 엔드 이펙트를 상용 로봇에 장착하여 운영하는 사례[4-6]가 늘어나고 있다.

본 논문에서는 레이저 변위센서의 두께측정 실험결과를 바탕으로 선정된 포인트 거리측정 방식의 레이저 변위센서를 이용하여, 윙립 두께측정에 적합한 엔드 이펙터의 개념을 설정하였다. 측정 대상물인 윙립 부품의 경우, 중량저감을 위해 복잡하고 두께변화가 다양한 형상을 가지고 있다. 이러한 제품의 특징 때문에 두께측정 시에 측정장비와 제품간의 간섭이 발생할 확률이 높고, 이를 해결하기 위해 Fig. 4에서와 같이 측정부위에 따라 최적화된 2 가지 형태의 엔드 이펙터를 설계하였다.

윙립의 바닥부 web의 두께를 측정하기 위해 제품의 폭방향으로 접근이 가능하며, 간섭을 최소화한 C형 Yoke 프레임의 상부와 하부의 두 위치에 레이저 변위센서를 장착하여 2채널 변위측정으로 두께측정이 가능하도록 하였다. 그리고 윙립의 측면부 stiffener와 flange 형상의 두께를 측정하기 위해 V형 슬림프레임 하단부 좌측과 우측의 두 위치에 레이저 변위센서와 반사경을 장착하여, 2채널 변위측정으로 두께 측정이 가능하도록 하였다. 측정 로봇에 자동 교환 장치를 두어 측정방법에 따라 엔드 이펙터의 자동교환이 가능하도록 시스템을 구성하였다. Fig. 5에서는 3차원으로 설계된 윙립의 두께 측정용 엔드 이펙터를 나타내고 있다.

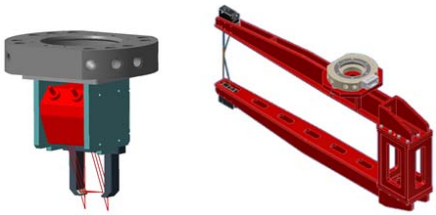


Fig. 5 End-Effector 3D design for measuring wing rib thickness

3.4 측정용 로봇 선정

윙립의 위치별 두께 측정을 위해 C형 Yoke 엔드 이펙터의 하중(75kg)과 손목부의 최대 가변질량 125kg을 지지할 수 있는 FANUC사에서 제작된 R-2000iB/125L 기종의 관절 로봇을 선정하였다. 제어 콘트롤러는 R-30iB로 6+1축 제어가 가능하며, 제품 위치 보정을 위해 2D방식의 IR Vision을 장착하였다. 로봇의 위치 반복 정밀도는 +/-0.2mm, 회전범위는 345.6°의 최대 동작범위를 구현한다. Fig. 6에서는 실험에 적용된 로봇을 나타내고 있다.

3.5 End-Effector의 간섭 검증

엔드 이펙터, 측정로봇 및 측정제품과의 간섭유무를 검증하기 위하여 CATIA 프로그램의 DMU 기능을 이용하였다. Fig. 7(a)에서는 C형 Yoke 엔드 이펙터를 로봇에 장착한 후, 제품의 측면으로 진입 시 장비와 제품간의 간섭과 측정범위를 나타낸 것이다. Fig. 7(b)에서는 V형 슬림 엔드 이펙터를 로봇에 장착한 후, 두께 측정 시 제품의 수직 돌출부와의 간섭과 측정범위를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 엔드 이펙터, 측정로봇 및 측정제품과의 간섭현상은 나타나지 않았다.

3.6 End-Effector의 측정 정밀도 검증

로봇에 장착된 측정용 엔드 이펙터의 레이저 변위센서의 측정 정밀도를 검증하기 위해 Fig. 8에서 보는 바와 같이 블록게이지 시편을 제작하여 지그에 설치하였다. 그리고 로봇을 길이방향, 폭방향, 회전방향 등으로 이동시켜 시편을 반복 측정하였다. 검출된 측정값을 분석하여 로봇의 위치정밀도와 떨림현상이 레이저 변위측정값에 미치는 영향을 분석하였다.

첫째, 수평방향으로 배치된 블록게이지의 두께측정은 로봇에 장착된 C형 Yoke 엔드 이펙터를 이용하여 길이(a), 폭(c), 회전(e)방향 등으로 로봇을 이동과 회전시켜 반복 측정하였다. 둘째, 수직방향으로 배치된 블록게이지의 두께측정은 V형 슬림 엔드 이펙터를 이용하여 길이(b), 폭(d), 회전(f)방향 등으로 로봇을 이동과 회전시켜 반복 측정하였다. 이송방향으로의 측정은 로봇장비의 길이, 폭방향으로 500mm 이송 시킨 후에 재 측정하는 방식으로 각 각 15회 측정하였다. 회전방향으로의 측정은 로봇을 2°, 4°, -2°, -4° 방향으로 회전시켜 재 측정하는 방식으로 각각 15회 측정하였다.

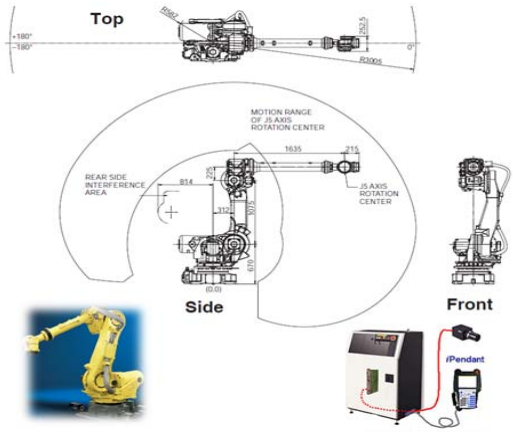


Fig. 6 FANUC R-2000iB/125L Robot

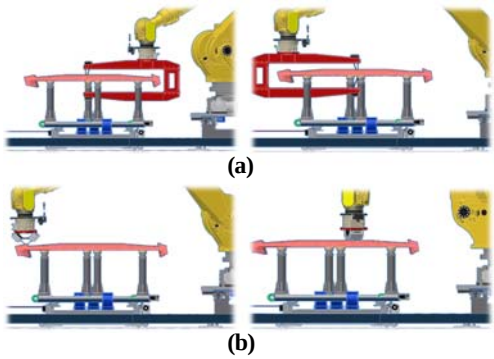


Fig. 7 Interference simulation of End-Effector

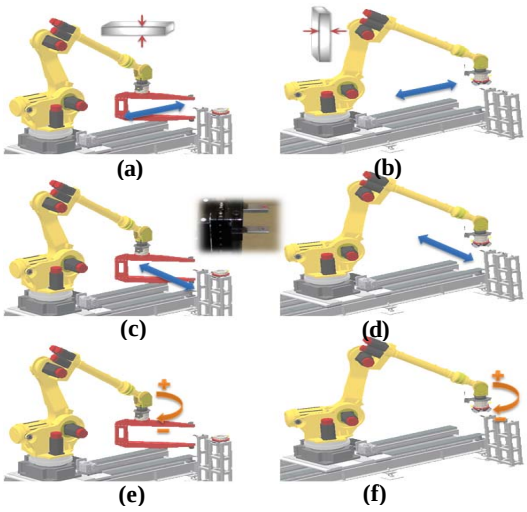


Fig. 8 Measurement accuracy test of End-Effector

4. 실험결과 및 고찰

4.1 블록게이지 시편 측정

Fig. 9에서는 이송방향의 측정 편차를 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 로봇을 길이방향으로 이동시켜 시편의 수평방향으로 측정한 결과이며, Fig. 9(b)는 시편의 수직방향 측정한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9(c)는 로봇을 폭방향으로 이동시켜 시편의 수직방향으로 측정한 결과이고, Fig. 9(d)는 시편의 수직방향으로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 로봇의 이송방향으로 블록게이지 시편의 두께를 측정한 결과에서 최대 약 0.15mm의 측정 편차가 발생하였으며, 전체적으로 안정적인 측정결과를 나타내었다.

Fig. 10에서는 C형 Yoke 앤드 이펙터의 회전방향에 따른 측정 편차를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 로봇의 회전각도가 증가할수록 측정값의 편차가 증가하는 결과를 나타내었다.

Fig. 11에서는 V형 슬림 앤드 이펙터의 회전방향에 따른 측정 편차를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 로봇의 회전각도가 증가해도 측정값의 편차는 큰 변동 없이 안정적인 결과를 나타내고 있다.

블록게이지 시편을 이용한 측정편차의 실험결과에서는 로봇의 이송방향의 변화에 따른 측정편차에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 그러나 로봇의 회전 시에는 엔드 이펙터의 타입에 따라 측정편차가 차이가 발생함을 알 수 있다.

측정편차가 나타난 이유로는 가벼운 V형 엔드 이펙터와 비교하여 상대적으로 무거운 C형 Yoke 엔드 이펙터의 중량으로 인하여 로봇의 손목부의 회전 시에 진동이 증가하여 두께 측정 시에 레이저변위센서 측정값의 편차가 높게 발생되는 것으로 판단된다. 변위센서 측정값의 편차를 줄이기 위하여 로봇의 이송 또는 회전 시에 약 1초의 대기시간을 두고 측정한 결과 측정값의 편차가 감소됨을 확인할 수 있었다.

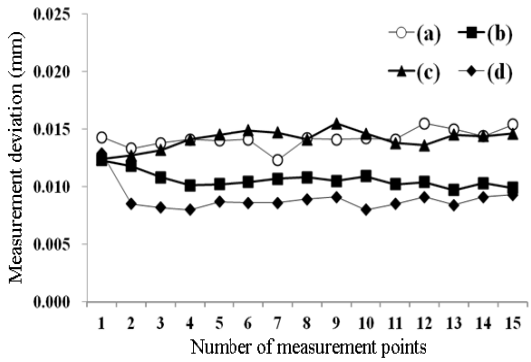


Fig. 9 Measurement deviation of transfer direction

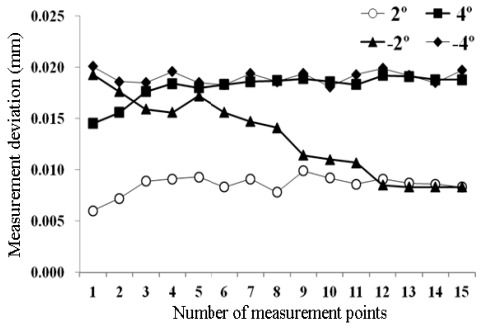


Fig. 10 Measurement deviation of C-type Yoke End-Effector rotation direction

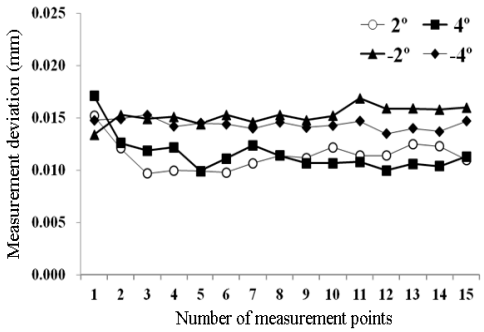


Fig. 11 Measurement deviation of V-type End-Effector rotation direction

4.2 윙립제품 두께 측정

Fig. 12에서는 윙립부품의 측정위치 및 측정사진을 나타내고 있다. 윙립부품에 대한 두께측정은 C형 Yoke 엔드 이펙터로 web 두께 5 포인트, V형 슬림 엔드 이펙터로 flange 두께 5 포인트, stiffener 두께 5포인트 등을 측정하였다.

Fig. 13에서는 윙립제품의 두께 측정편차 결과를 나타내고 있다. Fig. 13(a)에서는 블록게이지 시편 측정편차값을 보정하지 않고 측정한 결과이며, Fig. 13(b)에서는 측정편차값의 옵셋 보정을 한 후 측정된 결과를 나타낸 것이다. 측정결과에서 보는 바와 같이, 보정 전의 두께 측정값은 대부분의 측정값들이 음의 범위의 결과값을 나타내었다. 그러나 측정편차값을 보정한 후의 결과에서는 각 측정 포인트의 두께 값들이 거의 동일한 값에 수렴하는 결과값을 나타내었다. 그리고 자동화 측정에

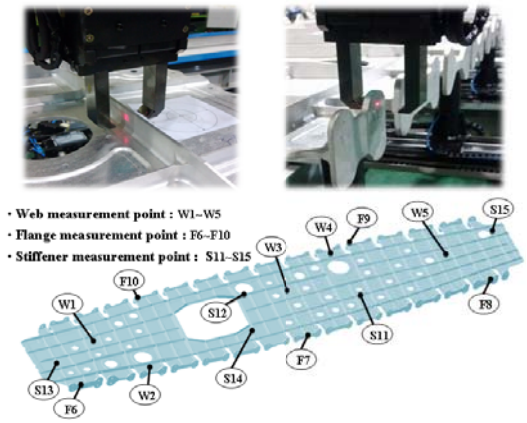


Fig. 12 Thickness measurement point of wing rib

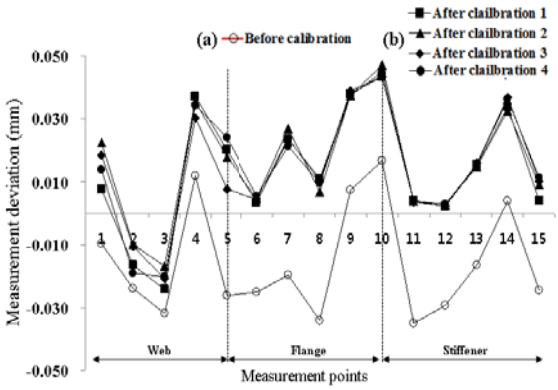


Fig. 13 Thickness measurement deviation of wing rib

따른 두께 측정 값들이 차이가 난 것은 측정표면의 조도상태, 제품의 처짐 및 로봇의 위치오차에 따른 측정값의 변동으로 인해 발생된 것으로 판단된다. 특히, flange 두께부위는 5축 가공으로 완성된 부위로 제품의 기울기와 로봇의 측정자세의 차이로 인해 측정값의 변동이 발생된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 윙립의 두께 측정을 위해 비접촉식 검사 시스템에 관하여 실험적으로 연구되었다.

수작업에 의해 측정되는 윙립부품의 두께 검사공정을 자동으로 구현하기 위해 비접촉식 레이저 변위센서를 부착한 전용 엔드 이펙터를 개발하였다. 센서 적합성 실험과정을 거쳐 윙립 두께측정에 적합한 포인터방식의 레이저 변위센서를 선정하였다.

윙립 두께의 측정방향에 따라 C형 요크 엔드 이펙트와 V형 슬림 엔드 이펙트를 제작한 후 로봇에 장착하여 이송방향과 회전방향의 변동에 따른 측정 편차를 검증하였다. 윙립부품에 대한 두께 측정실험을 통하여 두께 측정 공정의 자동화 가능성을 구현하였으며, 측정물의 형상, 표면조도, 처짐 등의 제품 상태와 로봇의 측정자세 차이가 측정값에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

향후, 윙립의 두께 측정편차를 최소화하기 위하여 측정부분의 표면 상태와 처짐량 등을 인지하고, 측정점에 대한 정확한 수직벡터를 산출한 후 측정자세를 자동 보정하는 알고리즘의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. J. Y. Lee, S. W. Kim, "Design of a Non-contact type Displacement Measurement System Based on Optical Triangulation Method", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 16, No. 6, pp. 1030-1035, 1992.
2. J. S. Park, K. Jeong, "Characteristics of the Laser Displacement Sensor Using Oprical Triangulation Method", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 40-50, 1999.
3. Y. J. Kang, N. G. Park, D. H. Lee, "A Study on Adaptable Non-contact Shape Inspection System", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 25, No. 2, pp. 74-78, 2005.
4. H. J. Kang, M. H. Kweon, Y. S. Suh, Y. S. Ro, "Development of a Robotic System for Measuring Hole Displacement Using Contact-Type Displacement Sensors", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 79-84, 2008.
5. S. H. Chung, D. H. No, "Developent of a Robot for Automation of a Callus Inoculation", Journal of the Bio-Environment Control, Vol. 18, No. 2, pp. 87-94, 2009.
6. K. T. Park, S. J. Kim, T. J. Lho, "A Development of a General Purposed Control System of Robot End-Effector for Inspection and Maintenance of Steam Generator Heat Pipe" Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 1, pp. 33-38, 2013.