

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 III

비접촉식 센서를 이용한 초장축 롤러 측정 장치 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Measuring System for Extra Long Roller Using Non-contact Sensor

김웅¹, 이춘만^{1,✉}, 이문재¹, 박성진¹
Woong Kim¹, Choon-Man Lee^{1,✉}, Mun-Jae Lee¹ and Sung-Jin Park¹

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Changwon National Univ.)
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2010.2.16 / Revised: 2010.3.2 / Accepted: 2010.3.4

Manufacturing accuracy of a precision instrument was essential to stability and efficiency of the product. Accordingly, geometrically accuracy management of precision instrument was very becoming the technique in order to design and manufacturing for machine. In this study, Measuring System is developed for extra long roller using non-contact sensor. Futhermore, It's studied by Geometric Tolerance. Exact roundness is obtained to Least Squares method from the reference circle of measured data. Measuring System is analyzed point of measurement and straightness of extra long roller is evaluated by FEM.

Key Words: Geometric Tolerance (형상공차), Extra Long Roller (초장축 롤러), Non-contact Sensor (비접촉 센서), Laser Sense (레이저 센서), Least Squares Method (최소자승법)

1. 서론

정밀기계를 구성하는 핵심부품의 가공정밀도를 측정, 검사하는 공정은 제품의 성능을 안정화하고 향상시키기 위해 필수 불가결하다고 할 수 있다.¹ 따라서 정밀기계의 기하학적 정밀도의 관리는 기계의 설계와 제작, 그리고 유지에 매우 중요한 기술이 되고 있다. 특히 회전운동을 하는 기계부품에 발생하는 회전 운동의 오차는 회전체의 진원도에 원인이 있으며, 이 진원도가 나쁠 경우 진동과 소음 그리고 마멸이 발생하게 된다. 최근 대두되고 있는 초장축 러빙 롤러는 액정표시소자의 제조 공정 장비인 러빙기에 장착되는 핵심부품이다. 배향막 표면에 러빙포를 이용하여 균일한 압력과 속

도로 마찰시켜 배향막 표면에 고분자 사슬을 일정한 방향으로 정렬함으로써 액정분자의 배향을 결정시켜 주는 장비이다. 이런 용도로 사용되는 러빙 롤러는 기존에 알루미늄 재질을 사용하였으나 길이가 길어질수록 평면과의 평행도를 맞추지 못하는 단점이 있었다. 이에 최근에는 탄소섬유 혹은 유리섬유가 함유된 고강도/고강성의 에폭시 복합재료를 사용하여 롤러의 대형화에 따른 중간부위 처짐량을 최소화하고 있는 추세이다. 최근 개발되고 있는 러빙 롤러는 4m 급으로써 탄소복합재에 스테인레스 입자를 입히는 용사 공정으로 제작되어지고 있다. 이 제품들의 직경은 140mm 이며 치수, 진직도 및 진원도는 각각 20 μm이하, 자중처짐은 50 μm이하이고 길이는 1m ~ 4m 까지 개발되어

졌다. 하지만 기존의 3 차원측정기의 경우 장비가 고가일뿐만 아니라 4m 이상의 길이를 가진 소재에 대한 측정을 위한 측정범위를 가진 것이 없다. 이에 초장축 소재에 대한 진원도 측정을 위한 장치개발이 필수적이다.^{2,5}

이에 본 논문에서는 완성 제품에 대한 가공정밀도를 검사함으로써 제품의 성능을 안정화시키고 향상시키기 위해 4m 급 이상의 초장축 롤러의 진원도를 측정할 수 있는 장치를 개발하였으며, 기존 연구⁶에서 더 나아가 측정데이터에 대하여 최소자승법(Least Squares method, LSC)을 통한 진원도 평가를 실시하였으며, 또한 탄소복합재료를 적용한 유한요소모델 구축을 통하여 초장축 러빙 롤러의 진직도를 평가하고, 이를 통해 측정기의 성능 평가에 그 목적이 있다.

2. 초장축 롤러 측정 장치 개발

본 초장축 롤러 측정 장치는 초장축 스테인리스/탄소복합재료 롤러를 개발하는 과정에서 현장에서 손쉽게 제품의 불량을 선별하고자 제작되었으며, 제작 시 장비검사를 통하여 LM 가이드의 진직도와 회전축의 반복정도는 현장에서 필요한 정밀도를 만족하는 것을 확인하였다. 측정에 이용된 초장축 롤러는 3 차원 측정을 실시하여 측정기 자체의 오차를 비교, 검토하여 신뢰성을 확보하였다. Fig. 1 은 초장축 러빙 롤러를 3 차원 측정장비를 사용하여 정반에 올려놓고 길이 방향으로 200mm 간격으로 7 회에 걸쳐 진원도와 진직도를 측정한 사진을 나타낸다.

측정결과 진원도 평균공차는 0.01mm 로써 진원도 측면에서 아주 양호하게 나타남을 확인하였으

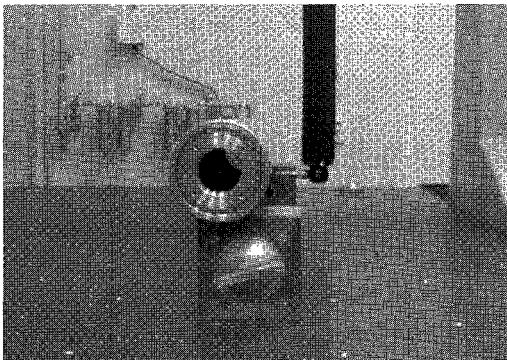


Fig. 1 Test of straightness and roundness

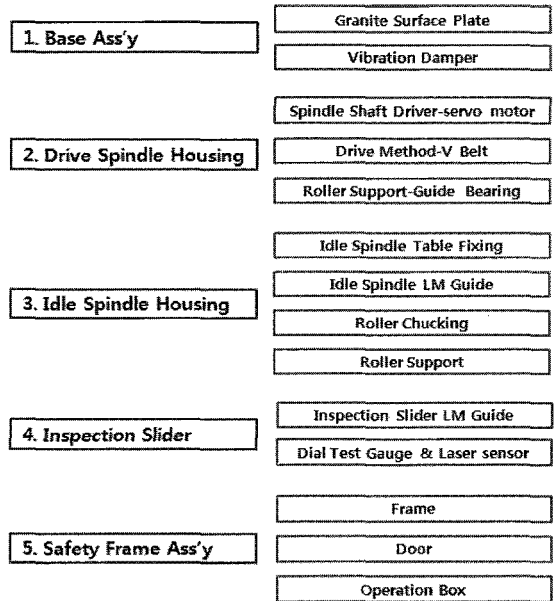


Fig. 2 Organization of measuring system for extra long Roller

며, 진직도 공차도 0.1mm 로서 양호하게 나타났다. 초장축 롤러 측정장치의 구성은 Fig. 2 와 같고, 크게 5 부분으로 구분되어 구성되어 있다. 장치를 지지하는 석정반과 진동흡수를 위한 제진장치로 구성된 Base ass'y 부, 롤러를 회전시키며 측정하기 위한 서보모터, 가이드 베어링으로 구성된 Drive spindle housing 부, 롤러의 고정을 위한 에어 실린더, LM 가이드, 클램프로 구성된 Idle spindle housing 부, 롤러의 측정을 위한 다이얼 게이지와 레이저 센서로 구성된 Inspection slider 부, 장치 보호를 위한 알루미늄 프레임과 도어, 작동 스위치로 구성된 Safety frame ass'y 부로 구성되어 있다.

Fig. 3 은 개발되어진 초장축 롤러 측정 장치의 구성을 나타낸다. 작업자의 편의 및 측정 장치보호를 위하여 전체를 알루미늄 프레임으로 구성하였고 슬라이더 도어를 장착하였다. 데이터와 롤러를 지지할 기초가 되는 석정반은 길이, 폭, 높이는 각각 5000mm, 600mm, 500mm 이며 평탄도는 0.008 μm의 고정밀 석정반을 이용하였다. 진동흡수를 위한 제진장치는 에어 스프링으로 직경은 φ270mm, 높이는 180mm 으로 제작하였으며 자동 Leveling 기능이 가능하도록 하였다.

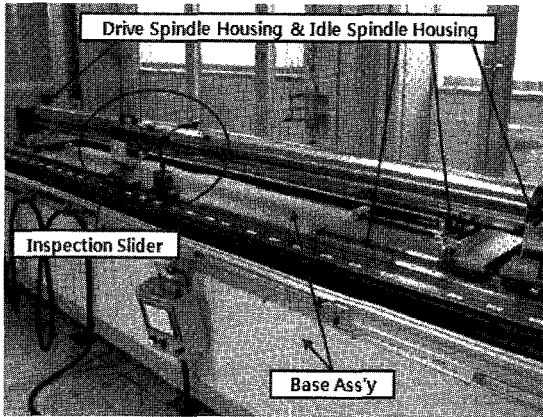


Fig. 3 Geometric tolerance measuring system

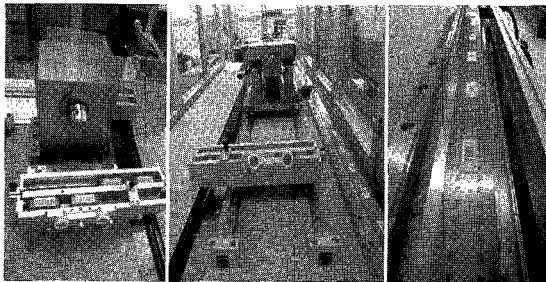


Fig. 4 Spindle housing of measuring system

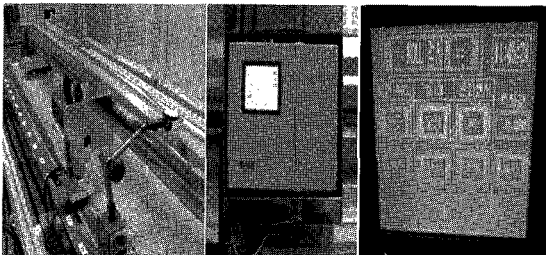


Fig. 5 Inspection sensor of measuring system

Fig. 4 는 러빙 롤러 지지 장치 및 가이드이다. 롤러를 회전시키며 데이터를 측정하기 위해 HC-SFS 352K Mitsubishi 의 최대 2000rpm 까지 회전이 가능한 서보모터를 이용하였으며 롤러를 지지하기 위해 가이드 베어링을 장착하였다. 그리고 레이저 센서를 좌우로 이동시키며 측정하기 위해 주행 평행도 0.005 μm 의 초정밀급 LM 가이드 이용하였다.

Fig. 5 는 롤러의 형상공차를 측정하기 위한 레이저 센서 및 다이얼 게이지와 측정데이터를 표시하는 전장부이다. 제품의 오차 측정을 위하여 본 연구에 적용 가능한 성능을 가진 상용 센서를 사

용하였으며 분해능이 0.001mm 인 다이얼 게이지와 측정범위는 0.5mm 이고 분해능은 0.001mm 인 레이저 센서를 각각 장착하였다.

Fig. 6 은 본 연구를 통해 개발되어진 비접촉식 센서를 이용한 초장축 롤러 측정 장치이다. 측정 원리는 러빙 롤러를 유압실린더를 장착한 척(chuck)을 이용하여 고정 후 가공오차 측정은 근접형 레이저 센서를 이용하여 롤러와의 센서의 거리를 측정한다. 그리고 서보모터를 이용하여 90°씩 회전시켜 점 데이터를 얻는다. 이를 통해 진원도에 대한 데이터 측정이 가능하고 석정반위에 위치한 LM 가이드를 통해 좌우로 위치를 옮겨가며 원통도를 측정할 수 있도록 제작되었다.

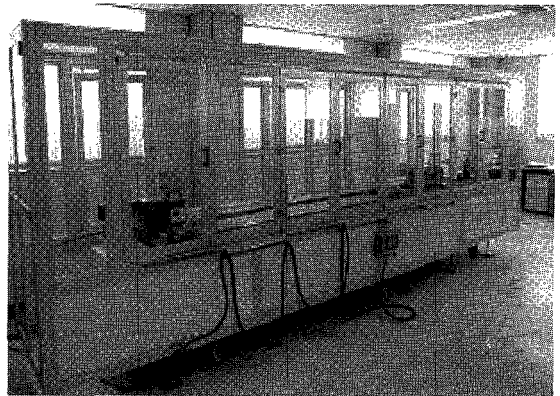


Fig. 6 Measuring system for extra long roller using non-contact sensor

3. 최소자승법을 이용한 진원도

일반적으로 진원도는 실측 단면이 진원에서 원주방향으로 벗어난 정도로 정의되는데 평균원을 구하는 방법에 따라 진원도의 값이 달라진다. 진원도의 측정 및 표시는 각국에 따라 다르지만 크게 직경법, 3 점법, 반경법으로 구한다. 직경법이나 3 점법은 이론적으로 엄밀하지 못하고 여러 모순점이 있다. 이에 반해 반경법은 원형부의 형상을 이론상 가장 정확하게 구할 수 있다. 이에 본 연구에서는 반경법 중에서 평균원과 실측단면과의 반경의 차를 제공하여 그 제공의 총합이 최소가 되는 평균원을 구했을 때, 그 평균원을 최소 자승원이라 하고 그 원의 중심에서 실측단면까지의 최대반경과의 차이로 진원도를 정의하는 최소 자승 중심법을 이용하였다. 먼저 원형의 불연속 측정

데이터로부터 요구되는 기준원은 중심(a, b) 반경 R로 하면 다음과 같이 된다.

$$R^2 = (x-a)^2 + (y-b)^2 \quad (1)$$

또한 임의 측정점 (x_i, y_i) 에서 중심까지의 거리를 R_i 로 하면 최소 자승값 q는 n개의 측정 데이터에 대하여

$$q = \sum_i^n (R - R_i)^2, \text{ where } R_i^2 = x_i^2 + y_i^2 \quad (2)$$

과 같이 되고, 여기서 Fig. 7 과 같이 q를 최소로 하는 함수를 구하는 것이다.⁷

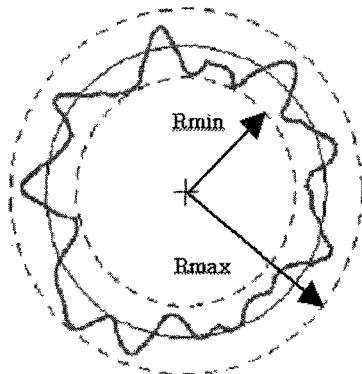


Fig. 7 Least squares center

측정 장치를 이용하여 LCD 패널 러빙용 탄소 복합재 롤러에 대하여 레이저 센서를 이용하여 측정한 오차는 Table 1 과 같다.

3,600mm의 초장축 롤러에 대하여 200mm 단위로 각각 0°, 90°, 180°, 270°로 회전시켜가며 측정을 실시하였으며 각 회전 각도에서 10회 이상의 반복측정을 통하여 재현성을 확인하였다.

Fig. 8은 각각의 측정위치에서 회전각도의 변화에 따라 발생하는 평균편차를 나타내었다. 평균편차는 최대 6.5 μm, 최소 3 μm으로 나타났다.

평균편차를 통해 400mm와 3400mm 부근에서 최대편차가 발생하였고 최소편차는 2200mm에서 나타남을 알 수 있다. 이는 제조공정 시 롤러의 끝단 부근에서 제작오차가 많이 발생하였음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 최대, 최소변위가 발생한 400mm와 2200mm 지점에서 최소자승법을 이용한 진원도 평가를 실시한 그래프이다. 여기서 함수 y는 오차의 총합이 최소가 되는 직선으로써 진원을 나타내는 그래프이다. R²은 최소자승법에 의한 진원에 대하여 접근도를 나타내는 상관계수로써 0과 1 사이의 범위를 가지며 본 결과에서는 0.99와 0.67로 측정 데이터가 진원을 나타내는 직선에 근접함을 알 수 있다.

Table 1 Measured value at roller rotation

Measuring Position (mm)	Measured value at roller rotation(μm)			
	0°	90°	180°	270°
200	15	6	21	15
400	7	13	18	22
600	14	6	19	10
800	19	21	16	8
1000	6	19	10	15
1200	17	12	6	11
1400	8	14	17	16
1600	10	13	16	17
1800	19	18	15	11
2000	11	15	7	5
2200	11	18	15	13
2400	13	12	18	18
2600	16	10	13	17
2800	9	15	17	18
3000	19	10	18	9
3200	11	12	19	20
3400	5	18	10	9
3600	10	5	8	17

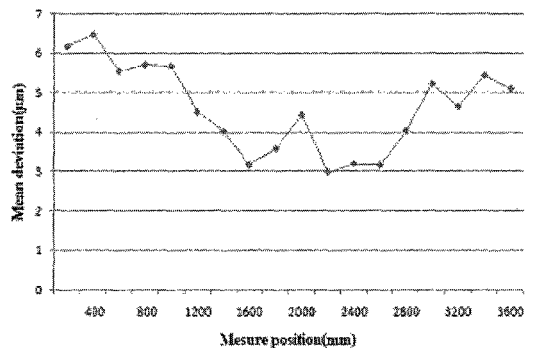


Fig. 8 Mean deviation at measuring position

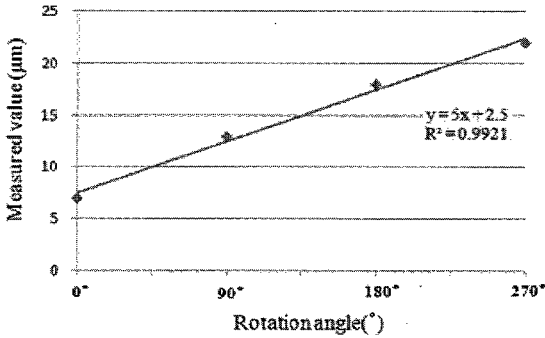


Fig. 9 Roundness using LSC at 400(mm)

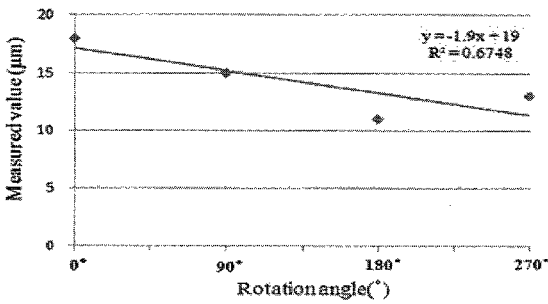


Fig. 10 Roundness using LSC at 2200(mm)

4. 유한요소해석

LCD 제작시 나일론계의 섬유를 식모한 금속의 원통형 롤러를 회전시켜 배향막의 표면을 마찰시켜 배향막을 형성시킨다. 이 공정에서 러빙(Rubbing)이 균일하지 않으면 액정분자의 정렬도가 공간적으로 일정하지 않아 국소적으로 다른 광학 특성을 나타내는 불량을 일으킨다. 이에 본 연구에서는 LCD 제작에 사용되는 복합재를 적용한 롤러의 정적 변형에 의한 최대 처짐량을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용하여 자중에 의한 정해석을 수행하였다. 롤러는 CFRP 복합재로 만들어진 롤러의 바깥부분을 Stainless 재질로 코팅이 되어 있으며 양 끝단에 롤러를 지지하고 회전을 주는 부분은 Aluminum 으로 구성되어 있다. Table 2 에 해석에 사용되어지는 물성치를 나타낸 것이다.

Fig. 11 은 초장축 탄소복합재 롤러에 대한 유한요소모델이며 ANSYS classic Ver. 10 을 사용하였다. 해석 대상은 전체 길이 3750 mm, 최대 외경이 140 mm 로 회전체중 상당한 길이를 가지는 장축이다. 회전 롤러의 자중에 의한 처짐을 해석적 방법으로 고려하기 위하여 전체 모델을 부피를 가지는 요소

를 이용하여 구성하였다. CFRP 롤러부와 외부에 코팅되어 있는 Stainless 부를 각각 Solid 요소로 구성하고 서로 다른 물성을 적용하였으며 두 요소의 접합면은 단단하게 고정되어 있다고 가정하였다. 롤러를 지지하고 회전력을 전달하는 플랜지부 또한 Solid 요소를 이용하여 구성하였다.

Table 2 Material properties of roller

Material	SUS	Aluminum	CFRP
E (GPa)	200	70	Ex = 380 Ey = 5.1 Ez = 5.1
ν	0.33	0.33	$\nu_{12} = 0.281$ $\nu_{13} = 0.281$ $\nu_{23} = 0.470$
G (GPa)	-	-	Gxy = 5.55 Gyz = 5.55 Gxz = 4.55
Density (kg/m ³)	7870	2700	1580

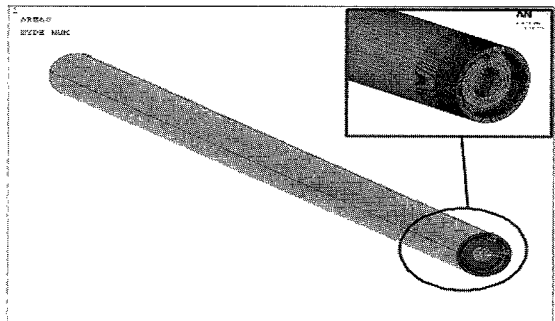


Fig. 11 FE-Model

CFRP 롤러부와 외부에 코팅되어 있는 Stainless 부를 각각 Solid 요소로 구성하고 서로 다른 물성을 적용하였으며 두 요소의 접합면은 단단하게 고정되어 있다고 가정하였다. 롤러를 지지하고 회전력을 전달하는 플랜지부 또한 Solid 요소를 이용하여 구성하였다. 요소분할시 유한요소해석시간과 정확도를 고려하여 곡면에 대해서는 형상을 부분적으로 단순화하여 모델링을 하였다. 그리고 구속 조건에 따라 해석결과가 상당한 변화를 보임으로 최대한 설계치를 반영하기 위하여 구속면 부위의 위치 선정에 주의를 기하였다.

Fig. 12 는 롤러의 구속조건이 클램핑 상태에서 양쪽 가이드부가 롤러의 끝부분을 단단히 고정할 경우로 실제 롤러가 장착되는 조건과 동일한 유한요소해석결과이다. 해석을 위한 하중은 중력에 의한 자중으로써 중력 가속도 $9.81m/s^2$ 를 -y 방향으로 적용하여 정적 해석을 수행하였다. 최대변위는 중심부에서 $21.6 \mu m$ 의 변형이 중력 가속도 적용 방향으로 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 13 은 3 차원 측정기를 이용하여 측정된 진직도와 유한요소모델을 비교하기 위한 해석결과로써 3 차원 측정 시 구속조건이 되는 단순지지로 해석을 실시한 결과이다. 최대변위는 중심부에서 $94 \mu m$ 의 변형이 중력 가속도 적용 방향으로 발생됨을 알 수 있다. 단순지지에 의한 해석결과와 3 차원 측정을 통해 얻은 진직도 $100 \mu m$ 과 단순지지에 의한 해석결과를 비교한 결과 탄소복합재료를 적용하여 구축된 정해석 유한요소모델이 신뢰성을 가짐을 알 수 있다. 그리고 단순지지 조건과 실제 롤러가 장착되는 조건과 비교 시 실제 롤러가 장착되었을 때 정적 처짐이 더욱 적을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 완성 제품에 대한 가공정밀도를 검사함으로써 제품의 성능을 안정화시키고 향상시키기 위해 LCD 패널 러빙용으로 사용되는 4m 급 이상의 초장축 러빙 롤러를 측정할 수 있는 장치를 개발하였다. 그리고 측정데이터에 대하여 최소자승법(Least Squares Center, LSC)을 이용하여 진원도를 평가하였고, 진직도 평가를 위하여 탄소복합재료를 적용한 유한요소모델을 구축하였다. 이를 3 차원 측정결과와 비교함으로써 초장축 러빙 롤러의 진원도, 진직도의 신뢰성을 확보하였다.

1) 각각의 측정위치에서 회전각도의 변화에 따라 발생한 평균편차는 최대 $6.5 \mu m$, 최소 $3 \mu m$ 으로 나타났다. 이는 3 차원 측정기를 이용한 평균 진원도 $10 \mu m$ 와 비교한 결과 본 연구에서 개발한 초장축 롤러 측정 장치가 신뢰성을 가짐을 알 수 있다.

2) 최대, 최소편차가 발생한 400mm 와 2200mm 지점에서 최소자승법을 이용한 진원도 평가를 실시한 결과 최소자승법에 의한 진원도에 대하여 접근도를 나타내는 상관계수 R^2 은 0.99 와 0.67 로 측정데이터가 진원을 나타내는 y 의 함수에 근접함을 알 수 있다.

3) 단순지지에 의한 유한요소해석결과인 $94 \mu m$ 과 3 차원 측정을 통해 얻은 진직도 $100 \mu m$ 를 비교한 결과 탄소복합재료를 적용하여 구축된 정해석 유한요소모델이 신뢰성을 가짐을 알 수 있다. 단순지지 조건과 실제 롤러가 장착되는 조건과 비교 시 실제 롤러가 장착되었을 때 정적 처짐이 더욱 적을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 [RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Park, C. H., Chung, J. H., Kim, S. T. and Lee, H. S., "Development of Submicron Order Straightness Measuring Device," Journal of KSPE, Vol. 17, No. 5, pp. 124-130, 2000.
2. Kwac, L. K., Han, J. H., Kim, H. G., Kim, J. Y. and Kim, H. C., "The development of automation system for LC diameter and roundness measurement," Proc.

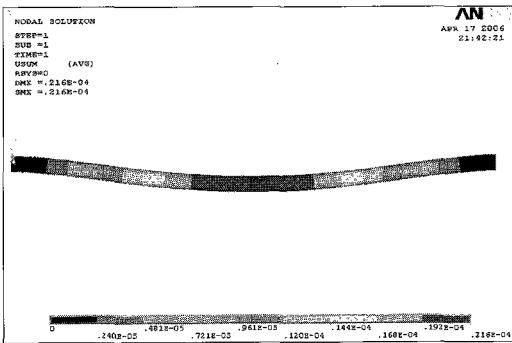


Fig. 12 Analysis result of actual condition

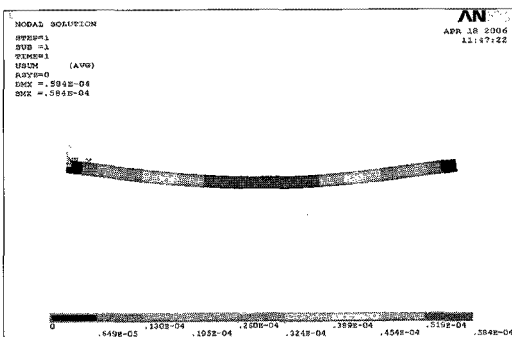


Fig. 13 Analysis result of simple support condition

- of KSMTE Autumn Conference, pp. 3-9, 2006.
3. Han, E. G., Rho, B. O. and Her, M. S., "An Analysis of Performance Error of High Precision Measuring Instrument," Transaction of KSME, Vol. 13, No. 5, pp. 862-874, 1989.
 4. Lee, S. S., Kim, M. J. and Jeon, E. C., "A Study on the Improvement of Circularity Measurement Using Circular Test Method," Transaction of the KSMTE, Vol. 11, No. 2, pp. 24-29, 2002.
 5. Park, H. J., Yae, I. J. and Park, J. S., "Development of Straightness Measurement Technique Using the Profile Matching," Transaction of KSME, Vol. 19, No. 12, pp. 3113-3120, 1995.
 6. Kim, W., Lee, C. M., Park, S. J. and Bae, S. W., "Development of Geometric Tolerance Measuring System for Extra Long Pipe Using Non-contact Sensor," Proc. of KSMTE Spring Conference, pp. 409-413, 2009.
 7. Lee, E. S., Kim, J. G. and Shin, Y. G., "A Study on the Minimum Zone Algorithm for the Calculation of Roundness," Journal of KSPE, Vol. 17, No. 7, pp. 156-161, 2000.