

로타리 스크린의 구조응력 및 진동해석

이 영 신*, 최 명 환*, 한 유 회**, 서 정**, 박 종 호*

Structural Stress and Vibration Analysis of the Rotary Screen

(Y.S. Lee, M.H. Choi, Y.H. Han, J. Suh, J.H. Park)

1. 서 론

로타리 스크린(Rotary Screen)은 섬유 산업에서 염색 가공업 분야에 속하는 직물나염의 제판 시스템에 관련된 것으로, 직물나염이란 프린트 염색이라고도 하며, 직물에 복잡하고 다양한 색과 무늬를 연속적으로 프린트하는 작업이다[1].

레이저를 이용하여 스크린에 무늬를 낼 때 로타리 스크린의 진동은 제품의 정밀도에 큰 영향을 미친다. 따라서 고정밀도의 제품을 만들어 내기 위해서는 고속 회전하는 로타리 스크린의 진동특성을 파악해야 한다.

본 연구의 목적은 레이저를 이용한 로타리 스크린 engraving기의 개발에 있어서 작동 및 운영시의 응력 및 진동해석을 통하여 변형 및 진동을 최소화하는 방안을 찾는 데 있다. 본 연구에서 로타리 스크린 재료인 니켈합금의 기계적 물성은 실험을 통하여 결정하였다. 구조진동해석을 통하여 로타리 스크린의 고유진동 특성을 연구하였으며, 구조응력해석을 통하여 회전수, 초기인장 그리고 편심동의 영향을 고려한 로타리 스크린의 변위 및 응력 등을 고찰하였다. 또한 로타리 스크린의 회전수에 따른 진동특성을 실험을 통하여 고찰하였다.

2. 니켈합금 물성의 결정

로타리 스크린의 재료는 기능상 미세한 육각형의 구멍을 갖고 있는 니켈 합금이다. 초기의 이들

* 충남대학교 기계설계공학과
** 한국기계연구원 레이저가공그룹

미세한 구멍으로 인해 니켈 합금 재료는 구멍이 존재하지 않는 재료에 비해 탄성계수나 밀도 등의 기계적 물성에 저하를 가져온다.

따라서 로타리 스크린 재료의 특성을 파악하고, 유한요소해석에 필요한 물성을 확보하기 위하여 탄성계수와 밀도를 실험을 통하여 결정하였다.

2.1 탄성계수

미세한 구멍을 갖는 니켈합금 재료에 대해서 탄성계수 결정을 위해 인장시편을 제작하였다. 인장시험시 응력과 변형의 관계식으로부터 伸長 δ 는 다음과 같이 표현된다[2].

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (1)$$

여기서 A는 시편의 단면적이고, L은 시편의 길이이며, P는 인장시험시 작용하중이고, E는 재료의 탄성계수이다. 식(1)을 탄성계수 E의 관계식으로 쓰면

$$E = \frac{PL}{A\delta} \quad (2)$$

이다.

인장시편은 두개를 제작하여 시험하였으며, CASE 1은 길이 40 mm, 폭 10.5 mm이고, CASE 2는 길이 50mm, 폭 15mm의 크기를 갖는 시편이다. 이들 시험편에 대한 크기와 실험 결과 값은 Table 1 에 나타내었다. 니켈합금의 탄성계수는 두 실험치의 평균값인 18.0 GPa 로 사용하였다.

2.2 밀도

니켈합금 재료의 밀도는 시편의 일부를 잘라내어 질량을 측정함으로써 결정하였다. 밀도는 시편에 대한 체적과 질량을 알면 다음 식으로부터 구

할 수 있다.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

밀도 결정을 위해 사용한 시편의 크기와 측정된 질량 그리고 계산된 밀도값을 Table 2에 나타내었다. 실험을 통해 계산된 니켈합금의 밀도는 두 경우의 평균값인 5100 kg/m³이다.

3. 해석과정

본 연구에서 로타리 스크린의 구조해석을 수행하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS[3]를 사용하였다.

3.1 기하학적 형상 및 물성

로타리 스크린은 engraving기의 척에 고정되는 알루미늄 고정부와 스크린부로 구성되어 있다. 스크린부는 두께 0.11mm와 직경 200 mm를 갖는 얇은 실린더이다. 스크린의 양쪽 끝단에는 3.2mm의 알루미늄 실린더가 척에 의해서 고정될 수 있도록 설계되었다. Fig.1은 스크린의 길이방향 단면을 나타낸다.

유한요소 해석을 위한 로타리 스크린의 기계적 물성을 Table 3에 나타내었다. 니켈합금의 물성은 실험을 통하여 결정된 값이고, 두 가지 실험 결과의 평균값인 탄성계수 18.0 GPa과 밀도 5100 kg/m³을 사용하였다. 알루미늄 재료는 일반적으로 널리 사용되고 있는 값을 사용하였다.

3.2 해석모델

로타리 스크린에 대한 구조진동해석과 응력해석을 위한 해석 모델을 Fig.2에 나타내었다. 해석 모델은 로타리 스크린의 기하학적 형상을 고려하여 1/2 모델을 생성하였고, 모델에서의 좌표계는 반경 방향과 수직 방향을 각각 X, Y좌표로 선정하고, 로타리 스크린의 길이 방향을 Z좌표로 선정하였다. 사용한 유한요소는 8절점 구조적 쉘요소이고, 360개의 요소와 1228개의 절점으로 모델링하였다.

3.3 경계조건 및 하중조건

양단의 알루미늄 실린더 부분이 척에 의해서 고정되고, 고정된 상태에서 스크린은 회전하게 된다. 따라서 모델에서의 경계조건은 양단 고정으로 보

았다.

본 연구에서는 고려한 하중 조건으로는 정하중과 1200 rpm까지의 회전력, 그리고 척에 의해서 고정된 부분에서 초기 인장력등으로 이들 하중이 작용하면서 회전할 때의 진동 특성을 고찰하였다. 또한 스크린의 기하학적 편심에 의한 영향을 고려할 때의 진동특성도 파악하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 구조진동해석

로타리 스크린의 동적특성을 파악하기 위해서, 외부 하중이 작용하지 않는 정적상태와 회전수 600과 1200 rpm으로 회전할 때의 구조진동해석을 수행하였다. 정하중 상태에서의 기본진동수는 20.05 Hz로 (m,n) = (1,4)모드에서 나타났으며, 1200 rpm으로 회전하는 경우 로타리 스크린의 기본진동수는 23.11 Hz로 3.06 Hz 증가하였다. 이것은 회전력이 스크린에 초기 예응력으로 작용하여 스크린의 강성이 약간 증가하기 때문이다.

Fig.3에는 정적 상태에서 로타리 스크린 길이 방향 반파수(m=1)인 경우에 대한 원주방향 반파수(n)의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타내었다. 이들 모드수에 따른 진동수의 변화는 일반적인 원통형의 경향과 잘 일치한다. 회전수의 증가에 따라 고유진동수는 증가하였으나, 고유진동수에 따른 모드형상은 회전수의 변화에 관계없이 일정한 형상을 보였다.

4.2 구조응력해석

구조응력해석에서는 여러 하중조건, 즉 자중, 회전수, 초기 인장력의 영향 그리고 기하학적 편심에 의한 진동특성 변화등을 고찰하였다. 본 연구에서는 스크린 가공시 Ar-Ion 레이저를 이용하기 때문에 정밀한 무늬를 인쇄하는데 있어서 로타리 스크린의 레이저 빔의 경로(스크린 측면)에서 방향 성분별 변위가 2mm이내로 하는 것을 목표로 하고 있다.

4.2.1 자중의 영향

로타리 스크린은 두께가 0.11 mm로 얇고 길이가 긴 원통형의 실린더이기 때문에, 정하중 상태에서의 로타리 스크린 변위를 살펴보았다. 스크린 측면 레이저 비임의 경로를 따라서 발생하는 자중

에 의한 수직 방향으로의 최대변위는 -0.018mm 로 스크린의 중앙에서 발생하지만 무시할 만한 값이다.

4.2.2 회전력의 영향

레이저를 이용한 로타리 스크린 engraving기의 개발에 있어, 목표로 하는 회전수는 1000 rpm 이상이므로, 회전수를 정적상태에서 1200 rpm 까지 변화시키면서 해석하였다.

Fig.4에는 회전수 변화에 따른 스크린 측면 최대 변위가 발생하는 중앙에서의 반경방향 변위를 나타내었다. 수직방향의 변위는 -0.018 mm 로 회전에 따라 변화없이 자중에 의한 변위값을 일정하게 유지하였다. 그러나 회전수의 증가에 따라 반경방향의 변위는 거의 2차 함수적으로 증가하였다. 1200 rpm 으로 회전할 때 스크린 측면에서의 반경방향 최대변위는 0.23mm 를 보였다.

또한 회전에 따라서 발생하는 스크린에서의 응력은 알루미늄 고정부에 연결되는 스크린부에서 집중되어 나타났으며, 회전수 변화에 따라 변위결과와 유사한 경향으로 증가하였고, 1200rpm 에서 최대응력은 1.52 MPa 으로 비교적 작은 값을 보였다. Fig.5에는 회전수 변화에 따른 스크린부에서의 최대 응력변화를 나타내었다.

4.2.3 초기 인장력의 영향

진동감쇠의 한 방법으로 스크린의 양쪽단에 부착되어 있는 알루미늄의 고정 부위에 스크린의 길이 방향으로 초기 인장력이 작용하고, 회전할 때에 대해 해석하였다. 이때 인장력은 알루미늄 고정부의 끝단에 작용하는 것으로 고려하였으며, 길이 방향으로의 변위를 허용하는 경계조건을 적용하였다. 일정한 회전력 1200 rpm 으로 회전할때, 초기 인장력($0.1, 0.5, 1.0, 3.0\text{ kN}$) 변화에 따른 로타리 스크린의 반경방향 변위와 최대응력값을 Table 4에 나타내었고, Fig.6에는 변위결과를 보였다. 인장력이 작을 때는 회전력의 영향이 크게 나타나지만 인장력이 증가하면서 반경 방향의 변위는 약간 감소하고, 최대응력 값은 크게 증가함을 알 수 있다.

4.2.4 기하학적 편심의 영향

회전시 로타리 스크린의 진동 원인중 하나는 스크린을 engraving기에 고정할때 양쪽단의 중심이 일치하지 않는 기하학적 편심의 존재로 발생할

수 있다. 이들 기하학적 편심을 고려하기 위하여 고정부의 중앙은 원점과 일치시키고, 스크린 중앙에서의 원점이 편심되도록 모델하여 해석하였다.

회전수는 1200 rpm 으로 일정하게 유지하면서 반경방향 편심량(EX)과 수직방향 편심량(EY)을 모두 $5, 10, 20\text{ mm}$ 로 변화시킬때 스크린 측면에서의 변위와 응력등을 Table 5에 나타내었다. 편심의 양에 따라 스크린 중앙에서의 변위가 상당히 증가하고, 회전이나 초기 인장력이 작용하는 경우보다 변위에 더 큰 영향을 줌을 알 수 있다.

5. 실험

5.1 실험장치 및 방법

로타리 스크린의 회전에 따른 진동특성을 파악하기 위한 실험이 이루어 졌다. 로타리 engraving기는 로타리 회전 구동부, Beam Head 장착부 및 직선이동부, 제어부 그리고 레이저 시스템 및 비임 전송부등으로 구성되어 있다. Fig.7에는 로타리 스크린 구동부의 개략도를 나타내었다. 로타리 스크린은 회전 구동부의 축에 의해서 양단이 고정되고, 축의 회전에 의해서 고속회전하게 된다. 회전으로 인해 발생하는 진동의 최대 진폭이 예상되는 스크린 중앙 측면에서 레이저 변위 측정기를 이용하여 변위를 측정하였다.

레이저 변위 측정기에서의 신호는 Oscilloscope에 나타내어지며, 컴퓨터를 이용하여 데이터 처리하였다. Fig.8에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

5.2 실험 결과 및 고찰

실험은 로타리 스크린이 저속 회전하는 상태에서 1200 rpm 까지 고속 회전하는 상태로 200 rpm 단위로 반경 방향의 변위를 측정하였다.

Fig.9에는 거의 정적인 상태라고 할 수 있는 60 rpm 의 저속으로 회전할 때 측정한 로타리 스크린의 반경 방향 변위이다. 그림으로 부터 스크린은 초기에 부분적으로 최대 0.56mm 정도의 편심을 갖고 있으며, 진원으로 부터 상당한 편심을 갖고 있음을 알 수 있다. 양의 방향으로의 변위는 스크린 진원을 기준으로 밖으로의 편심이고, 음의 방향은 내부로의 편심을 나타내고 있다. 실험 결과 회전수가 증가함에 따라 반경방향으로의 변위는 약간씩 증가하다가 약 600rpm 이상의 회전수에서는 거의 일정한 변위를 유지하는 경향을 보였다. 또

한 회전수 증가에 따라 진원을 기준으로 할 때 부분적으로 존재하던 편심이 줄어들었다.

Fig.10에는 1200rpm으로 회전하는 경우의 반경 방향 변위를 측정된 결과이다. 반경 방향 최대변위는 약 0.62mm를 보였으며, 초기 상태에서 변위는 약간 증가하였다. 그러나 초기에 존재하던 부분적인 굴곡이 회전으로 인한 원심력에 의해서 상당히 감소하였다.

1200rpm에서의 실험 결과는 해석결과에 비해 약 3배의 큰 변위를 보였으나, 이것은 해석결과가 진원인 상태에서 회전한다는 조건 때문이라고 생각된다. 그러나 결과들은 Ar-Ion 레이저 engraving 기를 이용한 스크린의 가공에 있어서 목표로 하는 최대변위 2mm의 범위 내에서 거동하고 있어, 정밀한 무늬를 인쇄하는데 문제가 없는 것으로 판단된다.

6. 결론

회전하는 로타리 스크린에 대한 구조진동해석 및 응력해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 로타리 스크린 재료인 니켈합금의 기계적 물성을 실험을 통하여 결정하였다. 니켈합금의 탄성계수는 18.0 GPa 이고, 밀도는 5100 kg/m³ 이다.
- (2) 구조진동해석 결과 정하중 상태에서 로타리 스크린의 고유진동수는 20.05 Hz이고, 회전수 증가에 따라 스크린의 강성이 증가하여 진동수가 증가하였다.
- (3) 회전수에 따른 스크린 측면 반경 방향 변위는 2차함수적으로 증가하고, 1200 rpm으로 회전하고 인장력을 가해 주었을때 변위는 약간 감소하지만 응력은 크게 증가하였다. 또한 기하학적 편심을 갖고 1200 rpm으로 회전하는 경우 편심량에 따라 응력에는 큰 영향이 없지만, 수직·반경 방향의 변위는 크게 증가하였다.
- (4) 실험결과 로타리 스크린은 초기에 진원을 기준으로 편심되어 있으나, 회전함에 따라 부분적인 편심이 상당히 감소하였고, 변위는 약간 증가하였다. 그리고 실험과 해석결과는 레이저 가공시 목표로 하는 2.0mm이내의 변위를 보였다.

※ 참고문헌

1. 한 유 회 외, “직물나염의 생산성 향상을 위한 Rotary Screen 가공 시스템 및 Flat Screen 제판 시스템의 개발(II)”, 한국기계연구원, 1996.
2. S.H. Crandall, N.C. Dahl and T.J. Lardner, “An Introduction to the Mechanics of Solids”, McGraw-Hill, Inc., 1978
3. G.J. Desalvo, “ANSYS Engineering Analysis System User’s Manual of Revision 5.0”, Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania, 1992

Table 1. The specimen geometry and test results of the tensile test

Specimen	Unit	CASE 1	CASE 2
Length(L)	mm	40	50
Thickness(t)	mm	0.11	0.11
Width(b)	mm	10.5	15.0
Applied Force (P)	kgf	20.0	25.0
Elongation (δ)	mm	0.4	0.4
Young’s Modulus(E)	GPa	17.3	18.8

Table 2. The specimen size and mass of the nickel alloy

Specimen	Size a×b×t (mm)	Mass (g)	Density (kg/m ³)
CASE 1	22×135×0.11	17.0	5157.7
CASE 2	25×13×0.11	0.16	5035.0

Table 3. Material properties of the rotary screen

Properties Material	Young’s Modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson’s Ratio(ν)
Aluminum	70	2700	0.30
Nickel Alloy*	18	5100	0.28

* Experimental

Table 4. Displacement and maximum stress of the rotary screen under various initial tension (0~3.0 kN) at rotating speed 1200rpm

Initial Tension (kN)	Displacement (mm)		Stress (MPa)
	Radial	Vertical	
0.0	0.230	-0.018	1.52
0.1	0.228	-0.09	2.16
0.5	0.219	-0.09	7.75
1.0	0.207	-0.09	14.98
3.0	0.116	-0.09	43.90

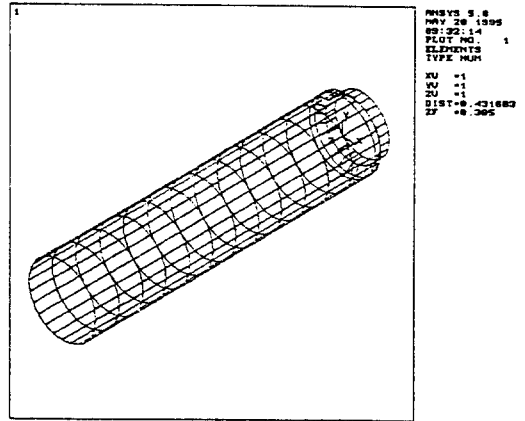


Fig.2 Finite element model of the rotary screen

Table 5. Displacement and maximum stress of the rotary screen under various geometrical eccentricity(0~20 mm) at rotating speed 1200 rpm

Geometrical Eccentricity (EX, EY)	Displacement (mm)		Stress (MPa)
	Radial	Vertical	
0	0.23	-0.018	1.52
5	0.31	0.29	2.59
10	0.44	0.43	3.80
20	1.48	1.44	8.42

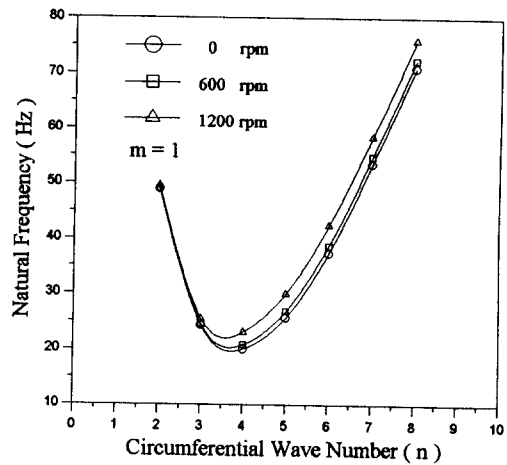


Fig.3 The natural frequency of the rotary screen with various wave number

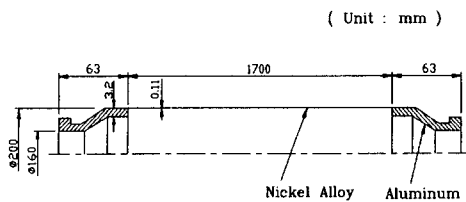


Fig.1 Geometry of the rotary screen

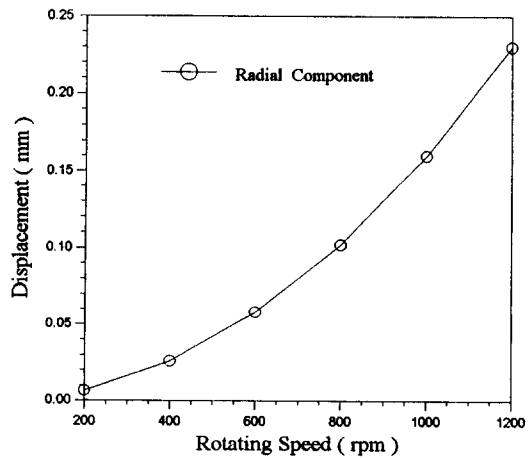


Fig.4 Displacements of the rotary screen under various rotating speed(0~1200rpm)

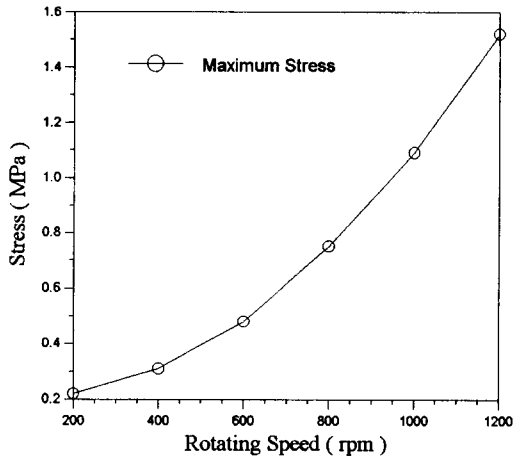


Fig.5 Stresses of the rotary screen under various rotating speed(0~1200rpm)

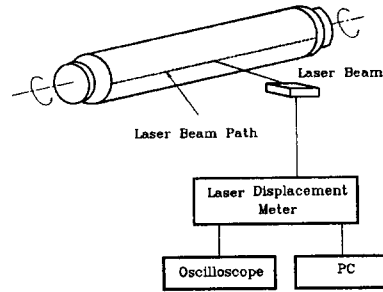


Fig.8 The block diagram of experimental apparatus

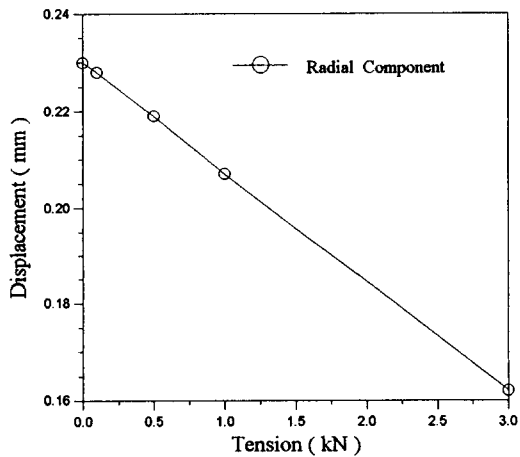


Fig.6 Displacements of rotary screen under various initial tension(0~1000N) at rotating speed 1200 rpm

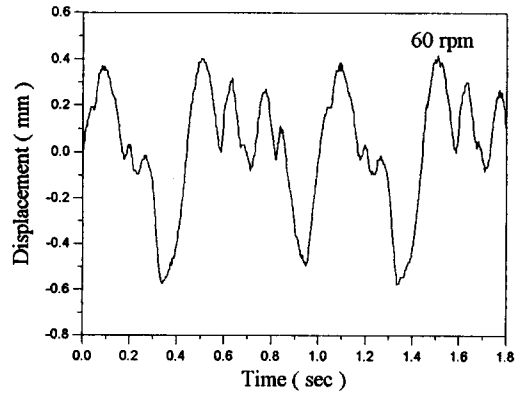


Fig.9 Experimental displacements of the rotary screen under rotating speed 60 rpm

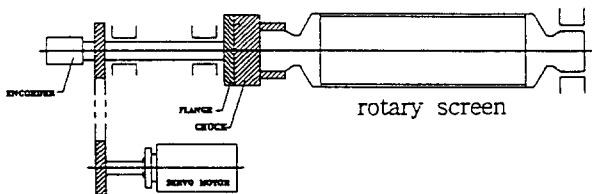


Fig.7 The block diagram of rotary screen driving parts.

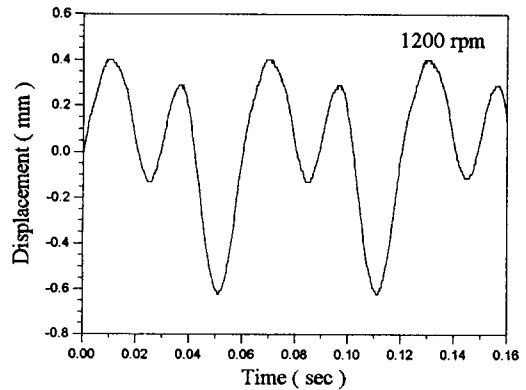


Fig.10 Experimental displacements of the rotary screen under rotating speed 1200 rpm