

정밀나사 비전검사시스템용 자동공급장치 진동특성의 해석

서예린*, 박근†, 김성결**, 나승우***

(논문접수일 2011. 05. 06, 수정일 2011. 07. 02, 심사완료일 2011. 07. 07)

Vibration Analysis for a Feeding Unit of Vision Inspection System of Precision Screws

Ye-Rin Seo*, Keun Park†, Seong-Keol Kim**, Seung-Wu Ra***

Abstract

Recent trends for the miniaturization and weight reduction of portable electronic parts have driven uses of subminiature components. Assembly of the miniaturized components requires subminiature screws of which pitch sizes are micrometer scale. To produce such subminiature screws with high precision threads, not only a precision forming technology but also a high-precision measurement technology is required. The present study covers the development of a vision inspection system for precision screws for the automatic measurement of subminiature screws with high speed and reliability. In this study, the feeding unit that transfers the subminiature screws to the inspection unit is investigated through finite element(FE) analysis. The vibration characteristics of the feeding unit are predicted through FE analyses, from which we can determine whether the subminiature screw can be stably fed into the inspection unit or not. The effects of several design parameters on the vibration characteristics are also discussed.

Key Words : Vision inspection system(비전검사기), Subminiature screw(초소형나사), Feeding unit(이송장치), Finite element analysis(유한요소해석), Modal analysis(모드 해석)

1. 서론

최근 휴대폰을 비롯한 이동통신 기기의 소형화 및 경량화 추세에 의해 초소형 고정밀 나사의 개발이 요구되고 있다. 초소형 고정밀 나사의 생산을 위해서는 나사의 정밀가공 기술뿐 아니라 안정적인 품질평가 기술이 요구된다. 기존의 나사 생산공정에서는 통상적으로 육안 샘플검사를 통해 품질을 평가하였으나, 초소형 고정밀 나사의 경우 양산 초기단계에서는 전수검사

가 요구되는 실정으로 보다 신뢰성이 있는 고속 검사기술이 요구된다.

이러한 산업적 요구에 부응하여 최근 비전(Vision) 시스템을 사용하여 제품의 치수측정 및 품질검사를 고속으로 수행하는 기술이 정밀부품, 반도체, 디스플레이 등의 생산공정에서 적용되고 있다⁽¹⁾. 비전검사 시스템은 카메라에 의해 획득된 영상을 분석하여 제품의 형상정밀도, 표면결함 등을 실시간으로 판정

* 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부 원

† 교신저자, 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부 (kpark@seoultech.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

** 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부

*** (주)서울금속 기술연구소

하는 기술이다. 비전검사 시스템의 성공적인 적용을 위해서는 검사 대상품의 특성에 맞는 광학계, 조명장치, 부품이송장치 등의 하드웨어적 요소와 영상처리 알고리즘, 제어알고리즘 등의 소프트웨어적 요소에 대한 개발이 필요하다⁽²⁾.

본 연구에서는 이중 소형 정밀나사를 안정적으로 이송시킬 수 있는 자동공급 장치의 설계사양 및 진동특성에 대해 고찰하고자 한다. 정밀나사 자동공급 장치(Linear feeder)는 성형된 나사를 정렬하여 진동자의 가진으로 이동시켜 검사부로 공급하는 역할을 수행한다. 자동공급 장치가 부적절하게 설정된 경우 비정상적인 진동의 발생으로 인해 나사의 정렬간격의 균일도가 저하되는 현상이나 위치 이탈로 인한 걸림 현상 등이 발생하는 경우가 발생한 것으로 보고되고 있는데⁽³⁾, 이러한 현상은 특히 나사의 크기가 소형화될 경우 더욱 심각한 문제가 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 정밀나사 자동공급 장치의 형상설계에 따른 진동특성의 변화 및 제품의 이송에 미치는 영향을 고찰하고, 이를 개선하기 위한 설계방안을 제시하고자 한다. 최근 부품공급 장치의 진동특성을 예측하기 위해 유한요소해석을 사용한 모드 형상 분석, 고유진동수 예측 및 동변위 예측 등의 목적으로 유한요소해석을 사용한 수치해석 방법이 적용되어 왔다⁽⁴⁻⁷⁾. 본 연구에서는 산업체에서 사용하고 있는 정밀나사 자동공급 장치를 대상으로 유한요소해석을 적용하여 제품의 안정적인 공급을 위한 최적의 설계사양을 예측하여 장치설계 및 공정조건 설정에 반영하고자 한다.

2. 정밀나사 자동공급장치 개요

2.1 정밀나사 비전검사시스템의 기본 구성

정밀나사 비전검사시스템은 나사의 부위별 영상을 획득하여 주요 치수를 검사함으로써 제품의 불량 여부를 확인하는 장비이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 비전검사시스템은 정밀 하드디스크에 많이 사용되는 M1.7(외경 1.7mm, 길이 2.0mm, 피치 0.35mm) 나사를 대상으로 진행하였다. 상기 나사의 피치 정밀도 분석을 위해서는 마이크로미터급의 분해능을 필요로 하며, 이를 위해 검사부로의 제품 공급시 공급위치의 정밀도를

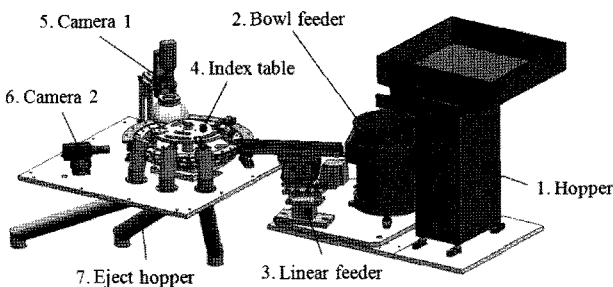


Fig. 1 Configuration of the vision-inspection system

높여야 한다. 또한 나사의 크기가 소형인 점을 고려할 때 공급부에서 균일 크기의 안정적인 진동특성 확보가 필수적으로 요구된다.

Fig. 1에 정밀나사용 비전검사시스템의 기본 구성을 도시하였다. 장비는 크게 제품 공급부, 검사부 및 후처리부로 구성된다. 이중 검사부는 비전검사 장비의 중추적인 역할을 수행하는 부분으로 광학부, 조명부, 영상처리부 등으로 구성되어 있다⁽²⁾. 후처리부에서는 제품의 형상검사 결과에 따라 양품 및 유형별 불량품을 분류하여 배출하는 작업을 담당한다.

본 연구에서의 관심분야인 제품 공급부에서는 호퍼(Hopper)에 투입된 나사가 보울 피더(Bowl feeder)를 통해 선형 나사 공급장치(Linear feeder)로 공급되며, 최종적으로 회전 원판(Index table) 상에 놓여 검사부로 이동하게 된다. 이중 선형 나사 공급장치는 공급부의 핵심적인 역할을 담당하는 장치로서 보울 피더를 통해 공급된 나사를 일정 간격으로 회전원판으로 공급하는 역할을 수행한다.

2.2 선형 나사 공급장치 개요

선형 나사 공급장치는 본체 내부의 진동자가 작동하게 될 때 판 스프링의 탄성을 이용하여 발생하는 진동이 안내부(guide)로 전달되어 제품을 직진방향으로 공급하는 원리로 구동된다. 본 연구에서 사용한 선형 나사 공급장치는 150Hz의 진동수로 가진되어 나사를 일정한 간격으로 공급하는데, 이때 나사 공급장치의 고유진동수와 가진주파수간의 공진을 유발하여 진폭을 높여 공급속도를 향상시켜주어야 한다.

Fig. 2에 선형 나사 공급장치의 형상을 도시하였다. 선형 나사 공급장치의 진동에 영향을 끼치는 요소로는 판 스프링의 탄성, 각도, 보조질량(mass)의 위치, 안내부의 위치 등이 있으며 각 사용 목적에 따라 추가되거나 변경되어 비전검사시스템에 설치된다. 일반적으로 선형 나사 공급장치 개발시 경험적으로 상기 요소들을 조절해가며 사용하고 있으나 여전히 원하는 진동특성을 얻기 위해 많은 시행착오를 거쳐야 한다. 본 연구에서

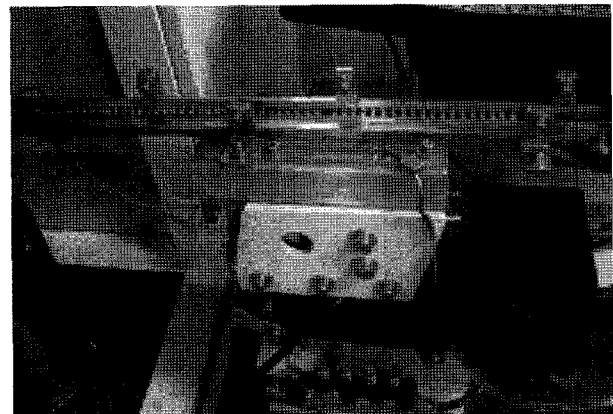


Fig. 2 Linear feeding unit for precision screws

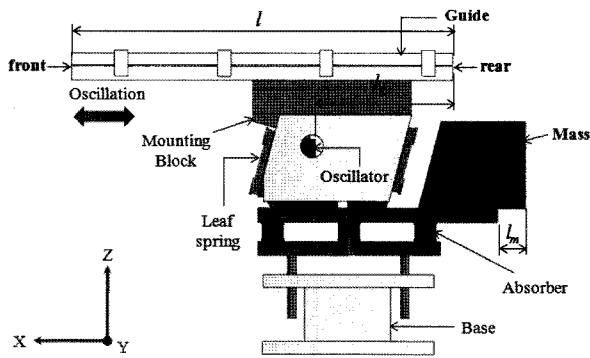


Fig. 3 Configuration of the linear feeder

Table 1. Material properties for modal analysis

Part	Material	Elastic Mod(GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m ³)
Base/Mass	SS41	205	0.30	7850
Guide	SUS304	197	0.31	8000
M/t block	AC4B	71	0.33	2950
Leaf spring	SK5	202	0.28	7830
Absorber	Rubber	0.003	0.49	1090

는 유한요소해석을 사용하여 현재 사용되는 제품의 진동특성을 분석하고 이를 개선하기 위해 설계 변수들을 변경시켜가며 해석을 수행하고자 한다.

본 연구에서는 H社의 선형 나사 공급장치(HLFB-02)를 사용하였다. Fig. 3에 본 연구에서 사용한 나사 공급장치의 개념도를 도시하였다. 장치의 하부는 일반 압연강으로 구성되어 진동을 적절히 유지하고, 상부는 알루미늄 합금, 스테인레스 강 등 전자석 진동자의 성질에 영향을 받지 않는 재질로 이루어져 판 스프링의 탄성으로만 진동이 전달되도록 구성되어 있다. 또한 기본 받침판(base)과 본체 사이에 방진고무(absorber)를 설치하여 상대 부품에 전달되는 진동을 예방한다. Table 1에 나사 공급장치의 주요 부품에 대한 물성치를 요약하였다.

해석 시 검토한 설계 변수는 설계 변경의 용이성을 감안하여 진동자 접촉면과 안내부 후방부의 거리(l_g)와 보조질량의 위치(l_m)로 설정하였다. 안내부는 피더 상부에 장착되어 진동을 통해 보울피더에서 공급된 나사를 일정 간격으로 검사부로 이송시키는 역할을 한다. 본 연구에서 사용한 실제 모델은 안내부 전체길이(l)가 337mm, l_g 는 122mm, l_m 이 25mm로 조립되어 사용되고 있다.

3. 선형 나사공급장치의 진동특성 해석

3.1 모드 해석

선형 나사공급장치(Linear feeder)의 진동특성 해석을 위해

Table 2. Results of the modal analysis

Mode	Natural frequency (Hz)
1	151.61
2	376.84
3	394.21
4	625.73

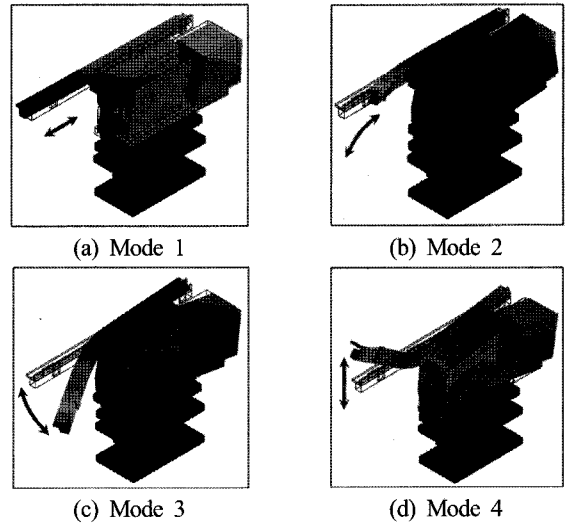


Fig. 4 Vibration mode shapes for the linear feeder

사용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS™를 사용하여 모드해석(Modal analysis)을 수행하였다. 유한요소 모델은 10절점 사면체 요소로 구성되었으며, 유한요소 모델 구성시 안내부와 판 스프링 부에 대해 격자세분화를 수행하였다. 해석 모델의 총 요소 개수는 574,280 개로 구성하였다. 선형 나사공급장치는 바닥에 고정시켜 사용하므로 기본 받침의 바닥면에 구속 조건을 부여하였고 모드 차수는 12개로 설정하여 충분한 범위에서 해석을 진행하였다.

Fig. 4에 각각 선형 나사공급장치의 모드해석 결과를 순차적으로 도시하였다. 주요 모드를 살펴보면 1차 모드에서 판 스프링에 굽힘 변형이 발생하여 안내부가 직선운동을 하는 형태로 변형이 발생되었고, 2~4차 모드에서는 안내부의 각 방향 굽힘 변형이 발견되었다.

상기 결과로부터 제품 공급에 적합한 모드 형상은 병진운동에 해당하는 1차 모드임을 알 수 있다. 나머지 모드(2~4차)는 각각 안내부 자체의 굽힘 모드에 해당하여 나사의 위치정밀도와 공급 균일도를 저하시키는 요인이 된다. Table 2에 해석결과로부터 얻어진 진동 모드에 대한 고유진동수를 요약하였다.

또한 실제 선형 나사공급장치의 고유진동수 확인을 위하여 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였고, 선형 나사공급장치의 안내부의 끝단에 비접촉식 센서를 이용하여 진동특성을 분석하였다. Fig. 6에 해당 실험에서 얻은 결과를 도시하였으며, FFT 분석을 통해 실제 고유 진동수가 149.50Hz 임을 확인하

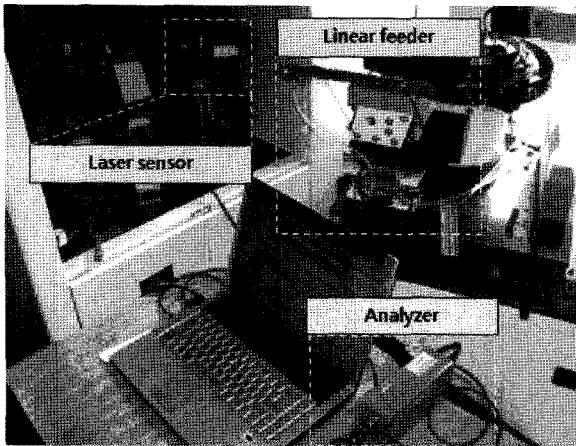


Fig. 5 Experimental setup for vibration measurement

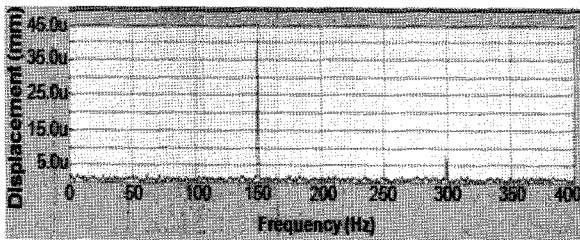


Fig. 6 The measured results of the FFT analysis

였다. 이와 같이 선형 나사공급장치는 1차 모드의 공진 현상을 이용하여 나사를 효과적으로 공급함을 확인하였다.

3.2 조화 응답 해석

앞절에서는 모드해석을 통해 주어진 설계사양에 대한 진동모드 형상을 고찰하여 1차 모드에서 병진 방향 변형이 발생됨을 확인하였다. 실제 선형 나사 공급장치의 작동시 원활한 공급을 위해서는 안내부 진동특성의 추가적인 고찰이 필요한데, 본 절에서는 조화 응답 해석(Harmonic response analysis)을 통해 1차 모드 주변의 특정 가진 진동수로 동작 시 안내부의 위치별 변위특성을 분석하고자 한다. 해석 조건으로는 앞서 모드해석과 동일한 구속조건을 주었으며, 조화 응답 해석을 위해 Fig.3에 표기된 진동자(oscillator) 면에 가진력을 주었다. 해석 범위는 가진 진동수 150 Hz에 근접한 140~160 Hz로 스위프 사인(sweep sine)파를 부과하여 해석을 진행하였다. 이때의 증분값은 0.5 Hz로 하여 총 40구간에 대해 해석을 수행하였다.

안내부 변위의 균일도를 비교하기 위해 전방부(front)와 후방부(rear)간의 변위 비율을 방향에 따라 비교하였다. Fig. 7에 조화 응답 해석의 결과로부터 얻어진 안내부의 양단의 Y-방향(수직방향) 변위의 변화를 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 1차 모드의 고유진동수인 151.6 Hz 부근에서 공진이 발생하였음을 알 수 있다. 또한 전방부의 변위가 후방부에 비해 2.824배 만큼 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 전방부의 횡진동이 상대

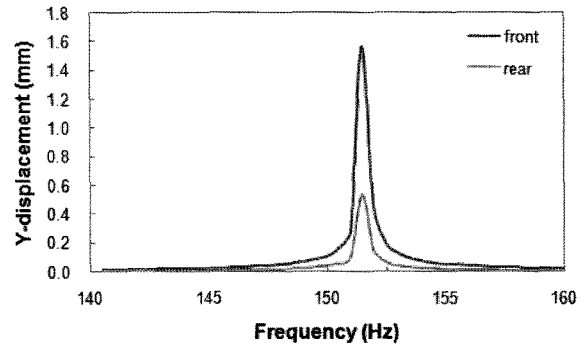


Fig. 7 Comparison of the Y-displacements

적으로 커 나사 걸림 현상이 발생할 가능성이 있음을 의미한다. 한편 X-방향(제품 이송 방향) 변위의 경우 상대비율이 1.004로 전체적으로 고른 진동을 보였다.

상기 조화 응답 해석 결과에서 알 수 있듯이 병진운동에 해당되는 1차 모드와의 공진을 이용하는 경우에도 수직방향(Y-방향)에 해당하는 변위가 존재하며 특히 양끝단의 변위차가 존재할 경우 균일하지 않은 제품 공급이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이 변위차는 직진 방향만이 아닌 미세한 회전성분을 의미하며 제품 공급 효율을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 선형 나사공급장치의 작동시 1차 모드의 고유진동수를 이용하여 공급 효율을 높이면서도 Y-방향의 변위차를 감소하는 방향으로 설계변수를 수정하고, 그에 따른 해석을 수행하여 공급 성능을 향상시킬 수 있는 설계변수를 선정하고자 한다.

4. 진동특성 개선을 위한 설계변수 영향 분석

4.1 보조질량 위치에 따른 진동특성 고찰

우선적으로 선형 나사 공급장치에 장착된 보조질량의 위치(l_m)에 따른 진동 특성을 분석하였다. 보조질량의 위치는 작업 현장에서 가장 용이하게 수정할 수 있는 요소이며, 위치에 따라 본체 무게 중심이 변화되어 진동 특성이 변하게 된다.

보조질량의 위치 변화에 따른 진동특성을 분석하기 위해 초기 설계치(25mm)를 기준으로 5mm씩 위치를 변경시켜가며 각 모델에 대한 모드 해석과 조화 응답 해석을 진행하였다. Fig. 8에 보조질량의 위치 변화에 따른 1차 모드 고유진동수의 변화를 나타내었다. 그래프를 보면 l_m 이 감소할수록, 즉 보조질량이 선형 나사공급장치 본체와 가깝게 조립될수록 고유진동수가 증가함을 알 수 있으며, 위치 5mm 변화시 고유진동수는 약 1.3Hz씩 차이(0.26Hz/mm)가 발생함을 확인하였다. 상기 결과를 활용하여 가진진동수가 변경될 경우 보조질량의 위치를 적절하게 조절하여 공진을 발생시킴으로써 직진방향 공급 효과를 증대시킬 수 있음을 알 수 있다.

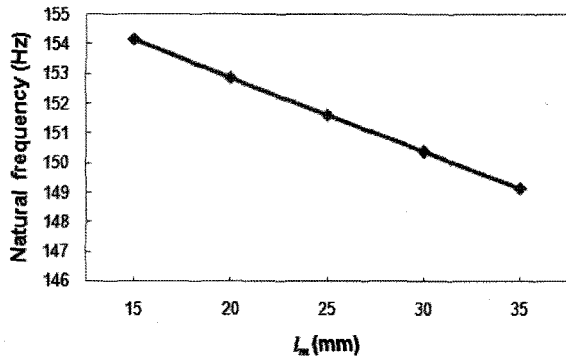


Fig. 8 Natural frequency with respect to l_m

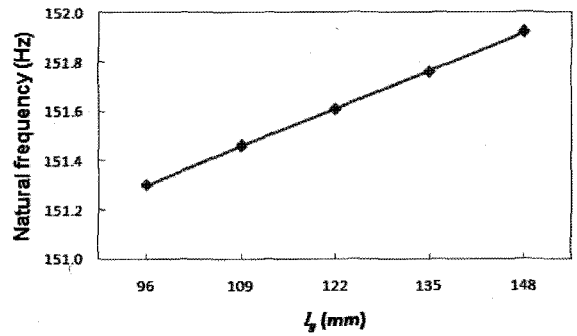


Fig. 10 Natural frequency with respect to l_g

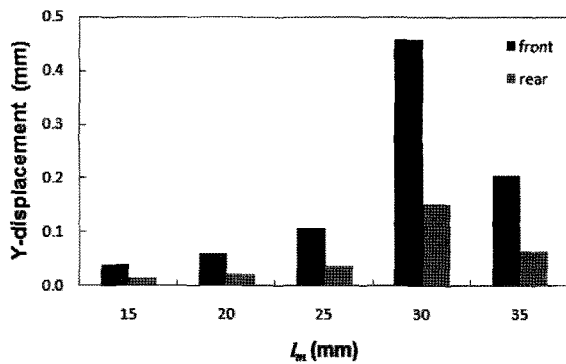


Fig. 9 Y-displacements with respect to l_m

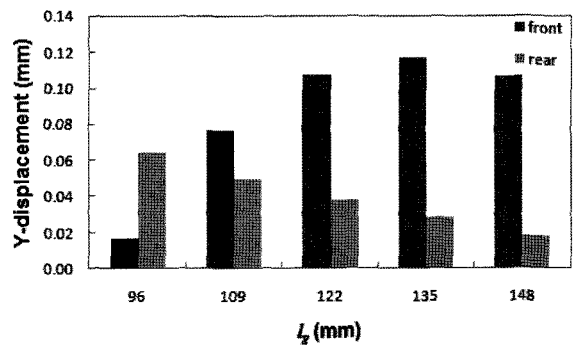


Fig. 11 Y-displacements with respect to l_g

Fig. 9에 가진진동수 150Hz를 기준으로 보조질량 위치에 따른 전방부/후방부의 Y-방향 최대변위를 비교하였다. 보조질량 위치 변화에 따라 Y-방향 변위가 변화하며 설치 위치 30mm이 내에서 본체에 가깝게 조립될수록 변위값이 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있다. 그러나 양단의 변위 비율을 분석해보면 이상적인 1:1 비율은 발견되지 않았다. 이러한 결과로부터 보조질량 위치를 수정하는 것만으로는 안내부 변위의 균일도를 개선하는데 한계가 있음을 알 수 있다.

4.2 안내부 위치에 따른 진동특성 고찰

안내부는 선형 나사공급장치 부품 중 나사 공급과 가장 밀접한 관계를 가진다. 4.1절에서 기술된 바와 같이 보조질량의 위치 변화에 따라 고유진동수가 변화되어 공진조건을 찾을 수 있음을 확인하였으나, 안내부 양단의 변위를 균일하게 맞추기는 쉽지 않음을 알 수 있었다.

따라서 나사 공급과 직접적인 접촉이 되는 안내부의 위치(l_g)를 변경하여 새롭게 해석을 진행하였다. 해석의 통일성을 위해 l_m 을 초기 설계치인 25mm로 다시 설정하였고 l_g 에 대해 실제 적용 가능한 적절한 범위(96 ~ 136mm)를 설정하여 13mm 간격으로 기존 모델을 포함한 총 5개의 모델에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 10에 위치별 고유진동수 변화를 그래프로 도시하였다. 그래프를 보면 안내부의 후방부와 진동자 접촉면의 사이

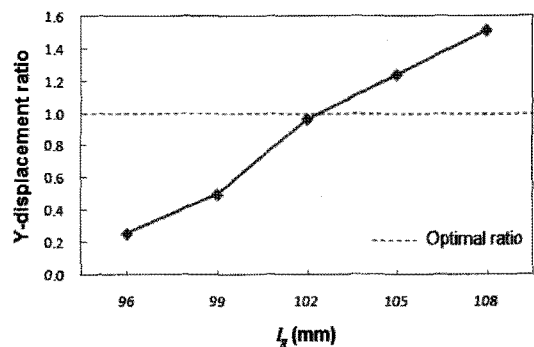


Fig. 12 Y-displacement ratio with respect to l_g

가 줄어들수록 고유 진동수가 약 0.16Hz씩 선형적으로 감소함을 확인할 수 있는데, 이는 0.012Hz/mm에 해당하여 보조질량의 위치에 비해 민감도가 떨어짐을 알 수 있다.

한편 l_g 에 따른 조화 응답 해석 결과를 Fig. 11의 그래프로 도시하였다. 이를 분석해보면 각 위치별로 변위 차이는 존재하나 양단 변위 비율이 각각 다른 값을 보임을 확인할 수 있었다. 특히 3.2절의 조화 응답 해석에서는 후방부에 비해 전방부의 변위값이 전반적으로 크게 나타났는데, 초반 96mm에서의 변위를 살펴보면 그러한 경향과 반대로 전방부의 변위가 후방부에 비해 작은 값을 보임을 알 수 있다. 또한 109mm에서는 양단 변위차이가 기존 약 2.8배에 비해 값이 줄어든 것을 확인할

수 있다. 이러한 점들을 이용하여 이들 구간에서 이상적인 변위 비를 구할 수 있을 것으로 예측하였다. 이에 전방부/후방부간의 상대크기가 교차하는 것으로 나타난 96~109mm구간 내에서 l_g 를 각각 3mm씩 세분화시켜 변화시켜가며 추가적인 해석을 진행하였다.

Fig. 12은 이러한 특정 구간에 대해 변위 비율을 나타낸 그래프이다. l_g 가 102mm로 설정되었을 때 전방부와 후방부의 변위 비율이 가장 이상적인 1:1에 가까움을 알 수 있다. 특히 전술한 바와 같이 안내부 위치의 변경이 고유진동수의 변화에 미치는 영향이 미미한 점을 감안할 때 보조질량의 위치를 조절하여 공진조건을 확보한 상태에서 안내부의 위치를 조절하여 균일한 변형특성을 얻을 수 있도록 진동특성을 미세적으로 조정할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 정밀나사 비전검사시스템용 자동공급장치 및 핵심부품인 선형 나사공급장치의 진동 특성을 고찰하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 해석 결과로부터 제품의 안정적인 공급을 위해 두가지 설계 변수에 대한 진동 특성을 분석하였다. 이러한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유한요소법을 이용한 모드해석을 수행하여 선형 나사공급장치의 고유진동수와 관련 모드형상을 예측하였고, 이중 병진방향으로 공진을 발생시키는 1차 모드의 고유진동수가 151.6Hz로 예측되어 해당 진동수 범위 내에서 가진하면 나사 공급 효율을 높일 수 있음을 확인하였다.
- (2) 조화 응답 해석을 수행하여 가진 진동수를 기준으로 안내부 양단 변위를 각각 분석한 결과 X-방향 변위차는 일정한 반면 Y-방향 변위차가 2.8배 이상 발생하여 나사 공급 효율을 저하시키는 원인으로 작용함을 확인하였다.
- (3) 진동특성을 개선하기 위해 보조질량의 위치를 변경하여 고유진동수와 변위를 분석한 결과 보조질량의 위치의 증가에 따라 고유진동수는 선형적으로 감소하였으며(민감도 0.26 Hz/mm), 이를 바탕으로 보조질량 위치를 미세 조절하여 가진 진동수와의 공진조건을 찾을 수 있음을 확인하였다.
- (4) 안내부의 위치를 변경하며 동일한 해석을 수행한 결과 위치에 따른 고유진동수의 변화는 미미한 반면(민감도 0.012 Hz/mm), Y-방향 양단 변위차가 크게 변하는 것을 확인하

였고 세부구간 분석을 통해 양단 변위가 1:1에 가까운 위치(102mm)를 구할 수 있었다.

상기 연구 결과를 바탕으로 향후 다양한 형태의 정밀부품 자동공급장치의 개발과정에서 이송효율 및 안정성을 동시에 향상시킬 수 있는 설계변수 설정에 활용할 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 핵심애로기술개발사업의 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Malamas, E. N., Petakis, E. G. M, Zervakis, M. Petit, L., and Legat, J. D., 2003, "A Survey on Industrial Vision Systems, Applications, and Tools," *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 2, pp. 171~188.
- (2) Baek, S. B., Lee, K. Y., Park, K., and Ra, S. W., 2011, "Development of Vision Inspection System for Precision Screws," *J. Kor. Soc. Prec. Engng.* Vol. 28, No. 9, pp. 1094~1102.
- (3) Ra, S. W., 2011, *Accuracy Screw's Automatic Inspection and Sorting System using Vision*, KR Patent: 10-1011437.
- (4) Kim, S. C., Kim, H. N., and Kwon, D. H., 1996, "A Study on the Vibration Characteristics of Parts Feeder," *J. Kor. Soc. Mach. Tools Engrs.* Vol. 5, No. 1, pp. 17~25.
- (5) Lee, K. H., Kim, S. H., and Chung, J. T., 2007, "Dynamic Analysis of a Linear Feeder for Uniform Transformation of Grains," *Trans. Kor. Soc. Noise Vib. Engng.* Vol. 17, No. 11, pp. 1069~1076.
- (6) Lee, S. E., and Lee, T. W., 2010, "Vibration Characteristic Analysis of Gimbal Structure in Collection Equipment of Image Information," *J. Kor. Soc. Manuf. Proc. Engrs.* Vol. 9, No. 2, pp. 20~25.
- (7) ANSYS, 2005, *ANSYS User's Manual Version 10.0*, ANSYS Inc.