

다축 초정밀 스테이지의 정밀 제어를 위한 유한요소해석 FEM Analysis for High-Precision Control of Multi-Axis Manufacturing Stage

*김덕준¹, 남경태², #이상무³

*D. J. Kim(mike23@kitech.re.kr)¹, K. T. Nam(robotnam@kitech.re.kr)², #S. M. Lee(lsm@kitech.re.kr)³

^{1,2,3} 한국생산기술연구원 지능형로봇연구부

Key words : FEM, Dual-Stage, High-Precision, Control

1. 서론

기술이 발전하고 IT제품, 광학 제품, 디스플레이 제품, 저장 제품의 사양이 더 고성능화됨에 따라서 핵심 요소 부품들을 미세, 정밀, 그리고 정확하게 생산하는 기술이 요구되고 있다. 제조분야에서의 생산기술은 이미 언급된 제품의 요구를 맞추기 위해서 나노 단위의 정밀 가공 및 생산이 가능한 단계에 있으며 분해능이나 정밀도를 더 향상시키기 위해서 꾸준히 많은 연구가 이루어지고 있다. 나노 단위의 생산을 만족하기 위해서 기존의 단점들을 보완, 개선한 듀얼 스테이지가 대표적으로 많이 연구되고 있다. 듀얼 스테이지는 장거리를 구동할 수 있는 대변위 구동부와 나노 단위로 제어가 가능한 미세 구동부의 결합으로 이루어져 있어 대형 크기의 공정에서도 나노 단위로 생산 공정이 가능하도록 해준다. 본 논문에서 연구 개발 되는 듀얼 스테이지 시스템은 대변위 구동부로 스텝 모터를 볼-스크루에 결합하여 선형 축으로 장거리를 구동할 수 있고 강한 토크로 무거운 공정 기구를 부착해도 구동이 가능하도록 되어 있으며 미세 구동부로는 피에조 액츄에이터를 결합해서 나노 단위의 정밀한 제어가 가능하도록 구성되어 있다. 이러한 듀얼 스테이지 시스템을 X축, Y축, Z축, R축 4축 시스템으로 결합하여 자유도가 높은 생산 공정이 이루어지도록 구성이 되어있다. 각각의 축의 듀얼스테이지 시스템에서 위치 피드백을 주는 리니어 엔코더가 각각 결합되어 있어서 피드백 제어를 통한 나노 단위의 제어가 가능하지만 여러 축의 스테이지가 결합하여 제어 시에는 나노 단위의 공정에 오차를 발생하게 된다. 그 이유는 여러 축의 스테이지와 공정 기구부가 결합 시에 하부에 있는 스테이지가 상부의 자중으로 인해서 미세한 변형이 생기게 되고 제어에 따른 스테이지의 위치에 바뀔 때마다 자중으로 인한 변화 역시 다르게 나타난다. 이러한 외부의 자중으로 인한 변화는 스테이지에 장착된 엔코더를 통해 피드백 되지 않아 나노 단위의 공정에 오차를 주게 된다. 이러한 현상은 생산 스테이지뿐만 아니라 의료기기의 제어에서도 오차 요인으로 작용한다. 예를 들면 치료 목적의 의료 장치의 경우, 레이저를 발생 시키는 갠트리와 그 자세를 결정해주는 매니플레이터로 구분할 수 있는데, 갠트리의 무게는 40kg 정도 나간다. 치료부의 위치를 결정해주는 매니플레이터는 그 자세에 따라서 지지 강성이 변할 수 있고 그에 따라서 처짐 현상이 다르게 나타나게 되는데 치료기기의 이러한 오차는 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 다축의 생산 스테이지에서 나노 단위의 초정밀 위치 제어가 가능하도록 하기 위해서 상부 스테이지의 위치에 따른 하부 스테이지의 미세 변위량을 유한요소해석 기법을 통하여 나노 단위로 해석한다. 그리고 이러한 해석을 상부 스테이지의 전 구동 범위에 대해 실시하여 미세 변위 프로파일을 정의하고 스테이지의 제어 시에 엔코더를 통한 피드백뿐만 아니라 정의된 프로파일 정보도 함께 활용해 나노 단위 제어에 오차가 없도록 한다.

2. 4축 초정밀 스테이지의 구성 및 제어 알고리즘

Fig. 1은 X축, Y축, Z축, R축의 3개의 선형 축과 1개의 원형 축으로 구성된 4축 스테이지의 모습을 보여준다. 각각의 스테이지는 듀얼 스테이지 시스템으로 구성되어 있으며 나노 단위의 제어가 가능하다. 4축 스테이지 시스템은 하부부터 X축, Y축, Z축, R축 순으로 구성되어 있고 제일 상부에는 생산을 위한

기구부가 설치될 것이다.

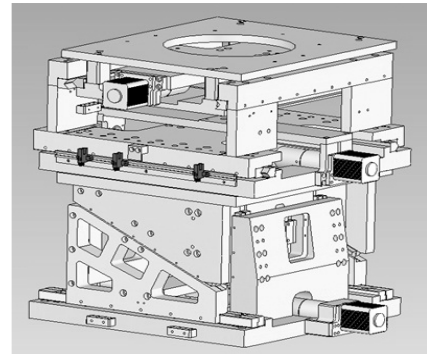


Fig 1. 4-Axis Dual-Stage System for Manufacturing Purpose

시스템 구성에 따라서 X축 스테이지의 경우에는 스테이지의 미세 변형이 상부에 있는 Y축, Z축, R축 하중에서 발생하게 되고 그 정도는 스테이지의 위치에 대해서 다르게 나타난다. 이러한 변형 현상을 엔코더를 통해서 피드백이 되지 않는 특징이 있으므로 나노 단위의 제어에서는 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문에서는 초정밀 나노 단위 제어를 위해서 앞에서 언급한 특성을 제어에 반영하여 오차를 줄일 수 있도록 Fig. 2에 나오는 제어 알고리즘을 제안한다.

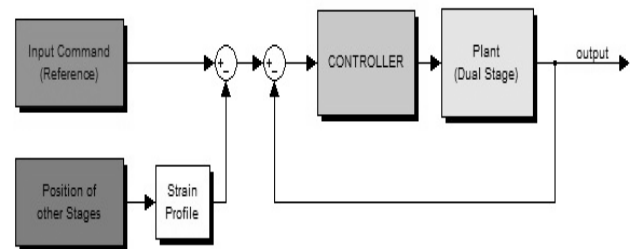


Fig 2. Proposed Control Algorithm using FEM profile data for High-Precision Stage

제안된 알고리즘은 각 축의 스테이지를 피드백 제어할 때 다른 축의 위치 정보도 파악하여 그 때에 엔코더를 통해 피드백 되지 않는 미세변형 현상 정보도 같이 반영해서 제어하는 알고리즘이다. 제안된 알고리즘을 적용하기 위해서는 각 축의 스테이지가 이동할 때 각 축으로 어떠한 미세 변형 현상이 생기는지 정의하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 X축 스테이지가 구동하는 전 범위에 대해서 Z축으로 발생하는 미세 변형(처짐) 프로파일을 ANSYS를 이용한 유한요소기법을 통하여 정의한다. 그리고 그 정의된 프로파일을 Z축 피드백 제어 시에 같이 활용하여 더 정밀한 제어가 가능하도록 한다.

3. 단축 듀얼 스테이지의 유한요소해석 결과

단축 듀얼스테이지를 유한요소해석하기 위해서 실제로 설계된 모델을 단순화시켜서 모의실험을 하였는데 그 모델은 Fig 3에서 보여주고 있다. 제일 하부에 있는 X축 스테이지의 경우에

는 총 구동 범위가 20cm이며 걸리는 하중이 50kg 내외이다.

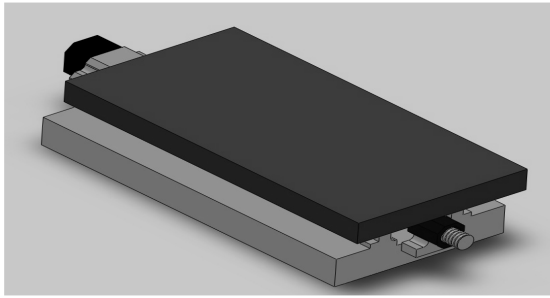


Fig 3. Simplified Model of Dual-Stage for Simulation

스테이지가 구동 범위에 따라서 기구적으로 기하학적 특징이 일정하지 않으므로 스테이지가 받게 되는 Stress 및 Strain이 다르게 된다. X축의 경우 스테이지가 정중앙에 위치할 때는 하중이 균일하게 분포되어 미세변형이 제일 적게 나타날 것이고, 스테이지가 최대 구동 범위에 있을 때에는 스테이지가 외팔보 처짐 형태로 변형이 있을 것이며 그 값도 최대치가 될 것이다. 이러한 X축의 구간에 대해서 제안된 프로파일 정의하기 위해서 Fig. 4 에서 보이는 것처럼 X축 스테이지를 구동 전 범위에 대해서 ANSYS를 이용하여 모의실험을 하였다.

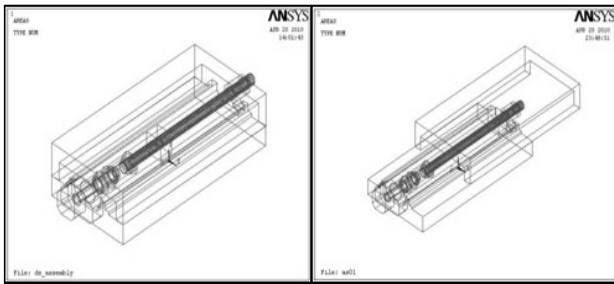


Fig 4. Dual-Stage in ANSYS

ANSYS를 통해서 유한요소해석을 스테이지 구동 전 구간에 대해서 모의실험을 하였다. Fig 4는 전 구간에 대해서 모의 실험한 결과 중에서 최소-최대 범위에 대해서만 결과를 보여주고 있다. 유한요소해석을 통한 모의실험 결과 X축 스테이지의 경우에 스테이지의 위치에 따라서 지지할 수 있는 기하학적 특성이 일정하지 않아 Z축으로 처짐 현상이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

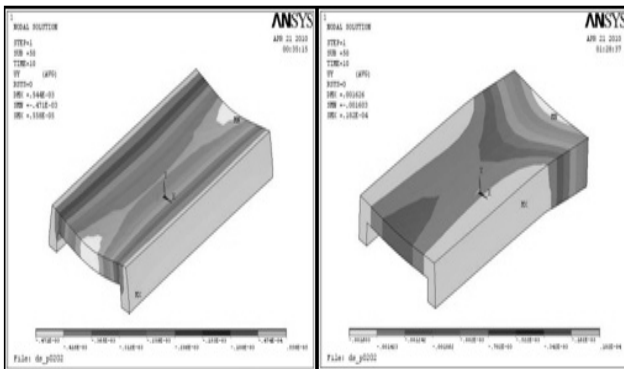


Fig5. FEM Analysis Results in ANSYS

이렇게 해서 얻어진 결과를 스테이지의 전 구동범위에 대해서 프로파일을 정의하였고 Fig. 6에 나타난 그래프와 같다. 프로파일 그래프는 X축의 위치에 따라서 Z축으로 얼마나 변형이 일어나는지 보여준다. 해석결과 Z축으로의 변형(처짐)은 최대 17nm 정도로 제어 성능에 영향을 주는 유효 범위 안에 든다. 따라서 유한요

소해석을 통하여 얻어진 프로파일 정보를 이용하면 다축 스테이지를 제어하면 더 정밀하게 제어할 수 있다.

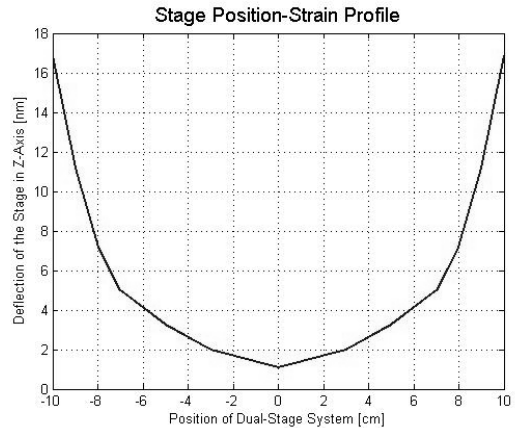


Fig 6. Profile of Stage Position-Strain

4. 결론

다축 초정밀 스테이지는 제품 부품의 생산을 위해서 구성된 시스템이며 최근의 기술적 요소를 만족시키기 위해서 나노 단위의 제어 성능을 보여줘야 한다. 이러한 시스템을 제어할 때 엔코더에서는 나노 단위로 제어가 잘 되지만 실제로는 여러 기구부가 결합되어 있어 기하학적 특성에 의해서 응력을 받게 되고 미세 변형이 일어나 오차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 변형을 유한요소해석 기법을 통해 이러한 현상을 정의하고 엔코더가 피드백 해주지 못하는 이 정보를 이용하여 다축 스테이지를 제어할 때 더 정밀하게 할 수 있다. 본 논문에서 연구 내용은 다축 생산시스템 뿐만 아니라 치료용이나 진단용 의료 장비에서도 마찬가지로 적용하여 더 정밀하게 제어하는데 사용할 수 있다.

후기

본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Woronko, A., Huang, J.J., and Y. Altintas, Y., "Piezoelectric Tool Actuator for Precision Machining on Conventional CNC Turning Centers," Precision Engineering, Vol.27, pp.335-345, 2003.
2. G.J.P. Fleming, S.F.A. El-Lakwah, J.J. Harris and P.M. Marquis, "The effect of core:dentin thickness ratio on the bi-axial flexure strength and fracture mode and origin of bilayered dental ceramic composites", Dent Mater (2005), pp. 164-171.
3. Kessler D, Rust W, Franz U. "Aspekte von Traglastberechnungen mit (ANSYS-)LS-DYNA," Proceedings of the 17th CAD-FEM Users" Meeting, Sonthofen, Germany, 1999.