

하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 특성 해석 Structural Characteristic Analysis of a Hybrid Parallel Kinematic Machine

*문재흠¹, 이원재¹, 이형대¹, #김석일²

*J. H. Moon¹, W. J. Lee¹, H. D. Lee¹, #S. I. Kim(sikim@kau.ac.kr)²

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원, ² 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Key words : Structural characteristic analysis , Parallel kinematic machine

1. 서론

병렬 기구형 공작기계(parallel kinematic machine)는 주축계와 고정 플랫폼(fixed platform)이 다수의 링크들에 의해서 병렬 구조로 결합된 형태의 공작기계를 말하며, 1994년 이후 선진국들을 중심으로 그 연구가 활발히 지속되고 있다. 특히 병렬 기구형 공작기계는 기계 구조의 고강성화 및 공구 이송의 고속화가 가능하기 때문에 많은 주목을 받고 있다. 일반적으로 병렬 기구는 링크들의 양단이 조인트에 의해서 지지되는 관계로 각 링크에는 축 방향 하중만이 작용하기 때문에 구조의 고강성화가 가능하게 된다. 또한 공구가 위치한 가동 플랫폼(moving platform)을 여러 개의 링크들이 지지하고 있기 때문에 절삭력이 분산되어 높은 작업 하중을 견딜 수 있다. 그리고 주축계를 포함한 가동 플랫폼의 관성이 작기 때문에 고속 가공에 유리하고, 링크들이 동일한 모듈 구조로 되어 있기 때문에 대량 생산 시에는 비용을 크게 낮출 수 있다는 장점이 있다. 지금까지 병렬 구조와 관련해서는 헥사포드(hexapod) 구조에서 트라이포드(tripod) 구조까지 다양한 형태들이 연구되어 왔다.

최근에는 5축 가공을 구현하기 위해서 6 자유도를 갖는 헥사포드 구조보다는 3 자유도를 갖는 트라이포드 구조와 2개의 회전축 구조를 병용하는 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 활용이 점차 많아지고 있는 추세이다. 그 이유는 트라이포드 기반의 하이브리드 병렬 기구형 공작기계는 헥사포드 기반의 병렬 기구형 공작기계에 비해서 작업 영역과 유연성 측면에서 강점을 가지고 있기 때문이다. 특히 본 연구에서는 고정 플랫폼, 가동 플랫폼, 그리고 3개의 링크들로 구성된 병렬 구조와 2개의 회전축들로 구성된 직렬 구조를 병용하고 있는 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 특성을 분석하기 위해서 구조 해석 모델을 구축하고, 링크의 길이 변화가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 해석하였다.

2. 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조

본 연구의 해석 대상인 하이브리드 병렬 기구형 공작기계는 Fig. 1과 같은 기본 구조를 가지고 있는데, 고정 플랫폼, 가동 플랫폼, 그리고 3개의 링크(축 1, 2 및 3)로 구성된

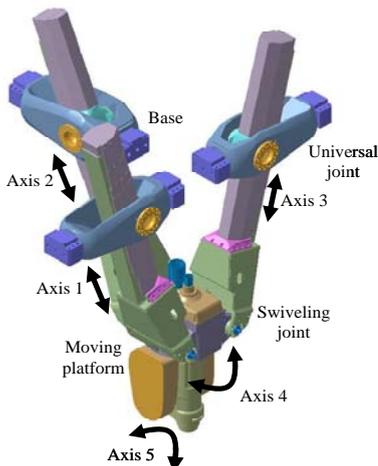


Fig. 1 Schematic diagram of a hybrid parallel kinematic machine

병렬 구조와 2개의 회전축(축 4와 5)으로 구성된 직렬 구조가 병합된 형태이다. 고정 플랫폼과 가동 플랫폼은 각각 유니버설 조인트(universal joint)와 스위블링 조인트(swiveling joint)에 의해서 3개의 링크들과 연결된다. 따라서 공구 선단부의 위치와 자세는 3개의 링크들의 길이 방향 변위와 2개의 회전축들의 회전 각도에 의해서 결정된다. 3개의 링크들인 축 1, 2 및 3의 길이는 유니버설 조인트의 중심점과 스위블링 조인트의 중심점 사이의 거리로 정의할 수 있는데, 축 1과 3은 893 ~ 1,593 mm, 그리고 축 2는 935 ~ 1,635 mm 사이의 길이 범위를 갖는다.

3. 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 특성 해석

3.1 구조 해석 모델

본 연구에서는 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 특성을 평가하기 위해서 Fig. 2와 같은 구조 해석 모델을 구축하였다. 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 해석 모델은 191,356개의 절점(node), 773,322개의 솔리드 요소(solid element), 30개의 매트릭스 요소(matrix element), 그리고 52,571개의 컨택 요소(contact element)로 구성되었다. 특히 매트릭스 요소들은 축 1, 2 및 3에 적용한 볼 스크류의 축방향 강성을 표현하기 위하여 도입되었고, 컨택 요소들은 LM 가이드, 그리고 유니버설 조인트와 스위블링 조인트에 사용된 구름 베어링 등에 대한 접촉면의 강성을 나타내기 위해서 사용되었다. 또한 구조 해석에서는 고정 플랫폼의 지지점을 모두 구속하고, 자중 효과를 고려하였다.

3.2 구조 변형

본 연구에서는 3개의 링크들인 축 1, 2 및 3의 길이가 각각의 길이 범위의 중간값인 1,243, 1,285 및 1,243 mm이고, 축 4와 5의 회전 각도에 의해서 공구의 축 방향이 연직 방향을 향하는 경우를 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 기준 위치로 상정하였다. 그리고 고정 플랫폼이 X축을 중심으로 45° 회전된 상태로 설치된다는 점을 고려해서 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 해석을 수행하였다.

하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 기준 위치에 대한 구조 변형 해석 결과는 Fig. 3에 제시하였다. 구조 변형은 주축계를 포함한 가동 플랫폼이 X축을 회전축으로 하면서 아래로 처지는 형태로 나타났다. 가동 플랫폼 중심의 X축,

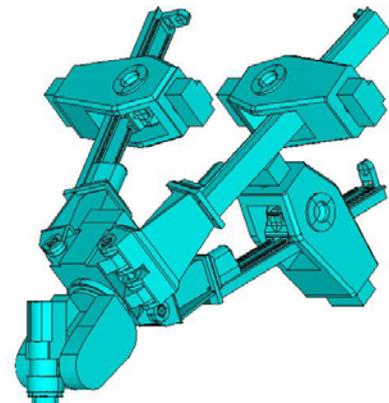


Fig. 2 Virtual prototype of the parallel kinematic machine

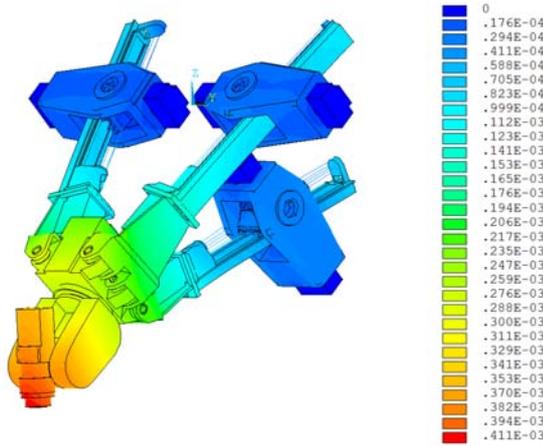


Fig. 3 Structural deformation of the virtual prototype

Y축 및 Z축 방향의 변위 오차는 각각 -2.229, 103.749 및 -235.194 μm 이고, 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차는 각각 -2.236, 229.035 및 -325.465 μm 인 것으로 나타났다.

3.3 링크의 길이 변화에 의한 공구 선단부의 변위 오차

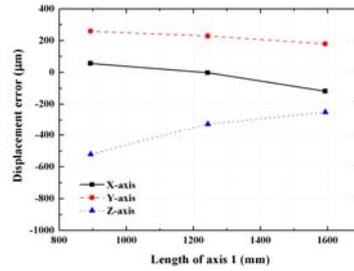
본 연구에서는 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 링크의 길이 변화가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 해석하기 위해서 3개의 링크들인 축 1, 2 및 3의 길이가 각각의 길이 범위의 최소값, 중간값 및 최대값인 경우에 대한 구조 해석을 수행하였다. 축 1과 3의 길이 범위의 최소값, 중간값 및 최대값은 893, 1,243 및 1,593 mm이고, 축 2의 길이 범위의 최소값, 중간값 및 최대값은 935, 1,285 및 1,635 mm이다. 그리고 축 4와 5의 회전 각도는 모든 경우에 대해서 공구의 축 방향이 연직 방향을 향하는 자세로부터 결정하였다.

축 1, 2 및 3의 길이 변화에 따른 공구 선단부의 변위 오차는 Table 1과 Fig. 4에 나타내었다. 축 1의 길이 변화에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 변위 오차는 -117.652, 259.251 및 -521.328 μm 이고, 이 경우의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차의 편차는 174.035, 79.301 및 271.086 μm 이다. 축 2의 길이 변화에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 변위 오차는 -3.613, 264.544 및 -847.539 μm 이고, 이 경우의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차의 편차는 1.377, 106.337 및 696.717 μm 이다. 또한 축 3의 길이 변화에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 변위 오차는 116.450, 256.984 및 -516.508 μm 이고, 이 경우의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차의 편차는 171.200, 77.244 및 268.154 μm 이다. 특히 축 1, 2 및 3의 길이 변화에 대해서 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차의 최대 편차는 234.102, 106.337 및 696.717 μm 이다.

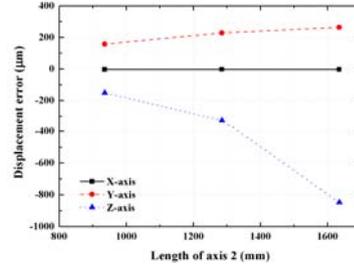
공구 선단부의 X축 방향의 변위 오차는 축 2의 길이 변화보다 축 1과 3의 길이 변화에 의해서 큰 영향을 받는 것으로 나타났는데, 그 원인은 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조가 좌우 대칭이라는 점에서 찾을 수 있다. 그리고 공구 선단부의 Y축과 Z축 방향의 변위 오차의 최대 편차가 모두 축 2의 길이 변화에 의해서 야기된다는 사실로부터 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 강성을 향상시키기 위해서는 축 2의 고강성화 설계가 필요함을 알 수 있다.

Table 1 Displacement error at tool tip due to link length

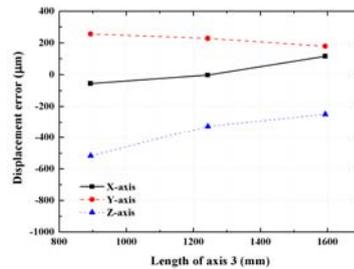
Link	Displacement error (μm)		
	X-axis	Y-axis	Z-axis
Axis 1	-117.652 ~ 56.383	179.950 ~ 259.251	-521.328 ~ -250.242
Axis 2	-3.613 ~ -2.236	158.207 ~ 264.544	-847.539 ~ -150.823
Axis 3	-54.750 ~ 116.450	179.740 ~ 256.984	-516.508 ~ -248.354



(a) Length of axis 1



(b) Length of axis 2



(c) Length of axis 3

Fig. 4 Displacement error at tool tip due to link length

4. 결론

본 연구에서는 고정 플랫폼, 가동 플랫폼, 그리고 3개의 링크들로 구성된 병렬 구조와 2개의 회전축들로 구성된 직렬 구조를 병용하고 있는 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 특성을 분석하기 위해서 구조 해석 모델을 구축하고, 링크의 길이 변화가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 해석하였다. 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 기준 위치에 대한 구조 변형 해석 결과에서는 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차가 각각 -2.236, 229.035 및 -325.465 μm 로 나타났다. 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조가 좌우 대칭이기 때문에 공구 선단부의 X축 방향의 변위 오차는 축 1과 3의 길이 변화에 의해서 지배적인 영향을 받는다. 특히 공구 선단부의 Y축과 Z축 방향의 변위 오차의 최대 편차는 모두 축 2의 길이 변화에 의해서 야기되기 때문에 하이브리드 병렬 기구형 공작기계의 구조 강성을 향상시키기 위해서는 축 2의 고강성화 설계가 필요하다.

후기

본 연구는 지식경제부에서 주관하는 "병렬기구 고유연머시닝센터 개발" 과제의 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Moon, J.H., Cho, H.Y., and Kim, S.I., "Kinematic Analysis of a Hybrid Parallel Kinematic Machining Center Based on Tricept," Spring Conference of KSME, 229-230, 2009.
2. Wang, Y.Y., Huang, T., Zhao, X.M., Mei, J.P., Chetwynd, D.G., and Hu, S.J., "Finite Element Analysis and Comparison of Two Hybrid Robots - the Tricept and the TriVariant," International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.