

베어링특성에 따른 HSK 공구시스템의 정적 및 동적 거동의 유한요소해석

박진효*, 김정석⁺, 구민수⁺⁺, 강익수⁺⁺, 김기태⁺⁺⁺
(논문접수일 2010. 02. 02, 심사완료일 2010. 03. 10)

An Analysis of Static and Dynamic Behavior of the HSK Tooling System According to Bearing Characteristics

Jin-Hyo Park*, Jeong-Suk Kim⁺, Min-Su Ku⁺⁺, Ik-Soo Kang⁺⁺, Ki-Tae Kim⁺⁺⁺

Abstract

Recently, the high-tech industries, such as the aerospace industry, the auto industry, and the electronics industry, are growing up considerably. Because of that, high machining accuracy and productivity of precision parts have been required. The tooling system is important part in the machining center. HSK tooling system is more suitable than BT tooling system for that of high speed machining center. It is because static stiffness and machining accuracy of HSK tooling system are higher than those of BT tooling system.

In this paper, static and dynamic behavior of the HSK tooling System is analyzed according to bearing characteristics and lightweight parts. In order that, three different models of the HSK tooling system are modelled by using a 3D modeling/design program. More stable one in the models of HSK tooling system can be selected by using the FEA (Finite Element Analysis)

Key Words : HSK tooling system(HSK 툴링시스템), Bearing characteristics(베어링특성), Static and dynamic behavior(정적 및 동적거동), Static stiffness(정강성), Finite Element Analysis(유한요소해석)

* 부산대학교 대학원 기계공학부
+ 교신저자, 부산대학교 기계공학부 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC/NSDM) (juskim@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30
++ 부산대학교 기계공학부
+++ 화천기공(주)

1. 서론

최근 자동차, 선박, 항공 및 정보통신등 첨단산업의 빠른 성장으로 인한 정밀부품과 금형에 대한 수요가 증가하여, 이로 인한 정밀도와 생산성 향상의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 부품의 정밀도와 생산성을 충족시켜 줄 수 있는 고속 가공기술이 적용된 고속머시닝센터에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다.

머시닝센터에서 툴링시스템은 핵심부품 중의 하나이다. 기존 머시닝센터의 툴링시스템은 BT타입이 주를 이루고 있다. 하지만 BT타입은 공구샙크가 스피들테이퍼부와와의 접촉에 의한 1면 구속으로 고정되기 때문에 스피들이 고속회전을 하게 되면 공구샙크의 고정에 있어서 문제점이 나타난다. 원심력과 열변형에 의한 스피들 테이퍼 부의 확장이 발생하여 공구샙크를 스피들에 고정시켜주는 드로우바의 인장력에 의해 공구샙크가 축방향으로 더 삽입되게 되어 축방향 정밀도가 악화되며, 이로 인해 스피들 테이퍼부의 마멸이 발생하여 가공시 공구샙크에 작용하는 절삭력에 의해 횡방향 진동이 발생하게 되어 가공정밀도가 악화될 수 있다.⁽¹⁾ 공구샙크의 스티드볼트를 클램핑하는 그리퍼들이 고속회전에 의해 증가하는 원심력에 의해 반경바깥방향으로 벌어지게 되어 스티드볼트에 대한 구속이 약해져서 공구샙크와 스피들축의 접촉강성 약화를 초래한다.⁽²⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해 고속머시닝센터에 장착할 효과적이고 안정적인 툴링시스템이 필요하다.

현재 상용화되어 있는 툴링시스템 중에서 HSK타입은 테이퍼부와 플랜지부의 접촉에 의한 2면 구속으로 고정이 되어 BT타입보다 정강성이 높다.^(3,4) 또한 HSK타입은 구조적인 특징으로 인해 증폭형태의 공구샙크 내부에서 그리퍼에 의해 스피들과 공구샙크의 클램핑이 이루어져서 스피들의 고속회전시 원심력에 의해 오히려 공구샙크의 클램핑이 더욱 견고해진다. 이로 인해 HSK타입은 BT타입에 비해 더 높은 공구접촉강성과 고속회전시 더욱 견고해지는 클램핑에 의해 고속가공시 높은 가공정밀도를 유지할 수 있다.

HSK타입의 스피들에 대한 장점을 바탕으로 최근 국내에서는 고속 머시닝센터용 HSK 툴링시스템의 국산화를 목표로 연구 개발 중에 있으며, 본 논문에서는 유한요소해석 시뮬레이션을 이용하여 50,000rpm급 HSK-E40 툴링시스템의 베어링강성 및 소재경량화가 정적 및 동적특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. HSK-E40 툴링시스템의 구조 및 증폭원리

HSK-E40 툴링시스템은 모터내장형으로 공구샙크(Tool shank), 클램핑콘(Clamping cone), 그리퍼(Gripper), 스페이서(Spacer), 스피들축(Spindle shaft), 베어링(Bearing), 로터(Rotor), 그리고 드로우바(Drawbar)로 구성되어 있다. 로터를 중심으로 공구샙크 방향과 그 반대방향에 스피들축의 지지를 위한 베어링들이 위치하고 있다. 각 부품들이 조립된 HSK-E40 툴링시스템의 전체적인 구조는 Fig. 1에 나타내었다.

클램핑유닛의 핵심부품인 그리퍼와 클램핑콘의 접촉면에는 썸기원리(Wedge principle)가 적용되어 BT타입 툴링시스템보다 더 적은 스프링력으로도 증폭된 클램핑력을 얻을 수 있다. 적용된 썸기원리에 대해서 Fig. 2에 간략하게 나타내었다.

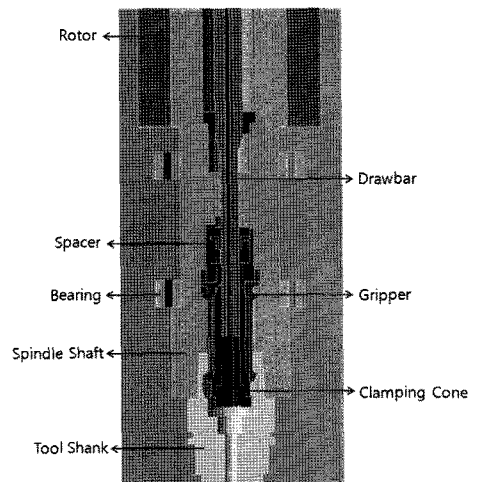


Fig. 1 HSK tooling system

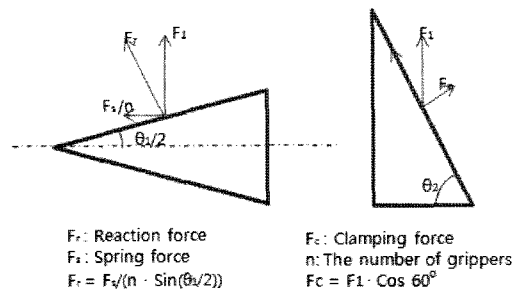


Fig. 2 Wedge principle



Fig. 3 3D model of HSK-E40 tooling system

3. 유한요소해석

유한요소해석을 수행하기 위해 각 부품을 3차원모델화하고, 모델들을 조립한 후 유한요소모델을 생성하였다. 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해, 드로우바에 축방향으로 스프링력을 부여하여 툴링시스템에 클램핑력이 작용하게 한 후에 정적 및 동적 특성에 대한 해석을 수행하였다.

3.1 3차원 모델링

유한요소해석을 수행하기에 앞서 3차원 설계/모델링 전용 프로그램인 Pro/Engineer Wildfire 3.0을 이용하여 HSK-E40 툴링시스템의 각 부품들에 대한 3차원 모델링을 수행하였다. 각 부품을 3차원 모델화한 후 설계도면의 조립도에 따라 정확하게 위치시키고, 공구생크가 스핀들축에 클램핑된 상태를 가정하여 부품들을 재배치했다. 베어링의 조합은 공구생크 방향에 3개, 반대방향에 2개의 베어링을 위치시켰을 경우 정적 및 동적특성 측면에서 안정적이다.⁽⁵⁾ 따라서 본 논문에서는 상기의 베어링조합을 적용하였으며 HSK-E40 툴링시스템의 스핀들을 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 유한요소모델링

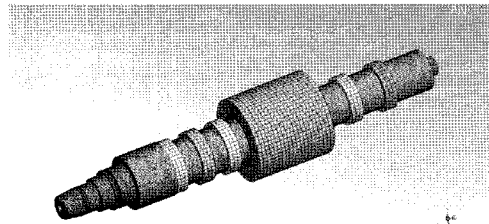
3차원 모델화된 HSK-E40 툴링시스템을 유한요소해석 전용프로그램인 ANSYS WorkBench V11을 이용하여 유한요소모델화하였다. 보다 빠르고 정확한 해석결과를 얻기 위해 주관심대상이 아닌 베어링부품과 로터부품의 요소 평균길이는 4mm로 하고, 나머지 부품들의 요소 평균길이는 1.5mm로 지정하여 유한요소모델을 생성하였다. 요소형상 생성법은 Hex Dominant법을 사용하였으며, 요소의 차수는 20절점 육면체요소를 생성하기 위해 2차(Kept)를 선택하였다. Table 1에 HSK-E40 툴링시스템의 모델에 대한 유한요소 생성조건 및 결과를 나타내었으며, Fig. 4에는 HSK-E40 툴링시스템의 유한요소모델의 형상을 나타내었다.

Table 1 Generation conditions and results of Finite element models

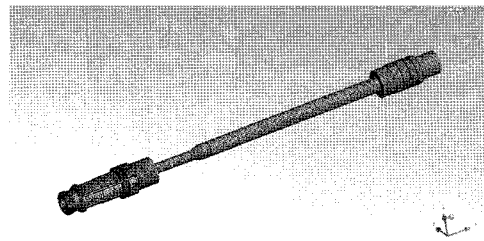
Generation condition	
Method	Hex dominant
Elemental size (mm)	1.5mm / 4.0mm (rotor, bearing)
Solid element midside nodes	Kept (2nd order)
Relevance	100
Relevance center	Fine

Results

Nodes	922,533
Elements	247,084



(a) FE model - outside



(b) FE model - inside

Fig. 4 Finite element model of spindle

3.3 해석 조건

HSK-E40 툴링시스템의 베어링조합에 따른 정적 및 동적 특성을 분석하기 위한 유한요소해석을 수행하기 위해 각 부품의 접촉조건 및 경계조건을 설정하였다. 스프링력을 드로우바에 축방향으로 2,400N을 가하였으며, 스핀들축을 지지하기 위한 베어링의 외부면에 스프링조건을 이용하여 베어링강성을 부여하였다. 각 부품의 접촉조건과 경계조건에 대하여 Fig. 5 및 Table 2에 정리하였다.

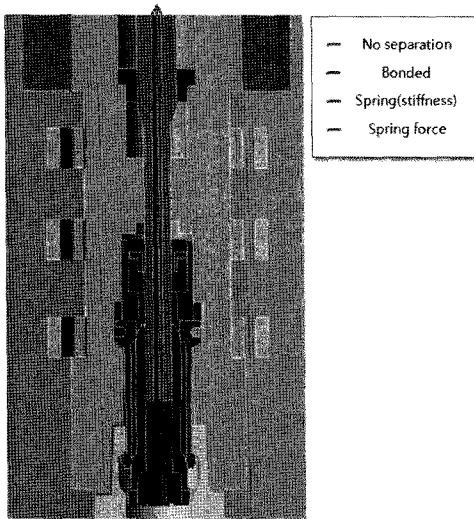


Fig. 5 Boundary condition and contact condition

Table 2 Contact condition of Finite element model

	Contact surface
No separation	Gripper and Clamping cone, Gripper and Tool shank Gripper and Spindle shaft, Gripper and Spacer Drawbar and Spindle shaft, Drawbar and Spacer Tool shank and Spindle shaft
Bonded	Bearing and Spindle shaft, Rotor and Spindle shaft Drawbar and Clamping cone

각 부품에 흔히 사용하는 소재로서 스피들축과 공구샙크에는 SCM 415, 그리퍼와 클램핑콘에는 SNCM 8, 그리고 드로우바와 베어링부품에는 SUJ 2를 적용하였으며, 로터의 소재는 구리로 선택하였다. 적용된 소재들의 물성치는 Table 3에 정리하여 나타내었다.

베어링강성에 따라 HSK-E40 톨링시스템을 Model #1과 Model #2로 나누었다. 베어링강성은 상용제품인 NSK사의 고속주축용 베어링 BNR19H와 BNR19X의 데이터를 이용하였다. Model #1에는 BNR19H, Model #2에는 BNR19X의 데이터를 적용하였으며, 부여된 베어링강성 값은 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Material property

	SNCM 8	SCM 415	SUJ 2	Copper
Young's modulus (GPa)	205	205	210	110
Poisson's ratio	0.29	0.29	0.3	0.34
Density (kg/mm ³)	7.85×10 ⁻⁶	7.85×10 ⁻⁶	7.81×10 ⁻⁶	8.96×10 ⁻⁶
Yield strength (MPa)	1,165	740	2,034	33.3
Ultimate strength (MPa)	1,255	1,160	2,241	210

Table 4 Radial stiffness of bearings

	Front bearing	Rear bearing
Model #1	100N/μm	79.3N/μm
Model #2	117N/μm	101N/μm

4. 유한요소해석 결과

4.1 베어링강성에 따른 정적특성해석

공작물을 가공시 소재의 절삭이 발생하는 공구선단부에는 절삭력이 작용하며, 이로 인해 주축선단부의 굽힘변형이 발생하게 된다. 톨링시스템의 정적특성해석을 위해 톨링시스템의 스피들선단부에 임의의 절삭력 1kN을 가하여 그 변형량을 유한요소해석을 통해 구한 후 정강성을 계산하였다.⁽⁶⁾ 본 논문에서는 톨링시스템의 스피들축만을 이용하여 정강성을 구하는 일반적인 방식과는 다르게 모든 부품들을 조립한 후 공구샙크가 클램핑되어 클램핑력이 작용하는 상태에서 톨링시스템의 정강성을 평가하였다.

스피들선단부에 1kN의 힘을 가하여, 그에 따른 변형량을 이용하여 톨링시스템의 정강성을 산출하였다. 절삭력의 작용위치를 Fig. 6에 나타내었으며, 해석 결과를 이용하여 확인된 스피들 선단부의 변형량 및 이를 이용해 구한 모델별 정강성을 정리하여 Table 5에 나타내었다. 스피들의 정강성은 베어링강성이 Model #2가 Model #1에 비해 4.5% 더 높게 나왔다.

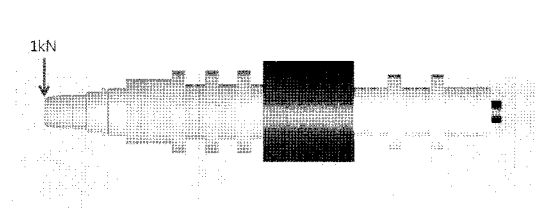


Fig. 6 An application point of force

Table 5 Results of static analysis

	Deformation(mm)	Stiffness(kN/mm)
Model #1	0.065	15.4
Model #2	0.062	16.1

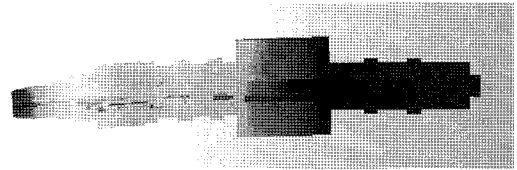
4.2 베어링강성에 따른 동적특성해석

틀링시스템의 베어링강성에 따른 동적특성을 파악하기 위해 모달해석(modal analysis)을 수행하였다. 가공정밀도와 관련이 깊은 굽힘변형과 관련된 진동모드를 구하였으며, 진동수 3,000Hz까지의 진동모드들만을 추출하여 분석을 행하였다. 공구생크가 스피들축에 클램핑되어 클램핑력이 작용하는 상태에서의 동적특성을 파악하기 위해, 초기조건으로 클램핑력이 작용하는 상태의 응력해석데이터를 이용하도록 설정하였다. 두 가지 모델의 진동모드별 형상은 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

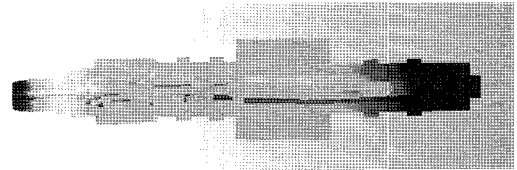
유한요소해석 결과를 통해 베어링강성이 높은 Model #2가 Model #1에 비해 1차 진동모드의 경우 6.1%, 2차 진동모드는 8.2%, 그리고 3차 진동모드는 0.5% 더 높은 고유진동수를 가지며, 이를 통해 베어링강성이 커지면 틀링시스템의 고유진동수가 높아짐을 확인할 수 있었다.

4.3 소재경량화에 따른 동적특성해석

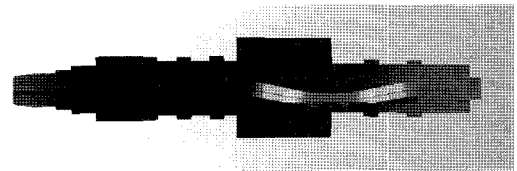
베어링강성에 따른 두 모델의 동적특성해석을 통해 베어링강성이 크면, 고유진동수가 높아짐을 확인하였다. 틀링시스템의 고유진동수가 높으면, 고속가공시 높은 주축회전속도에서도 안정적인 가공이 가능하다. 이에 따라 소재경량화가 틀링시스템의 고유진동수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일부부품의 소재를 변경하였다. 일반적으로 공구생크와 스피들축에 사용되지는 않지만 경량화가 틀링시스템의 고유진동수에 미치는 영향을 파악하기 위해서 소재밀도가 낮으면서 강도가 높은 티타늄합금(Ti-6Al-4V)을 베어링강성이 높은 Model #2의 공구생크와 스피들축에 적용시켰다.



(a) 1,112Hz

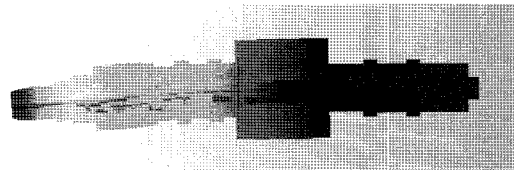


(b) 1,243Hz

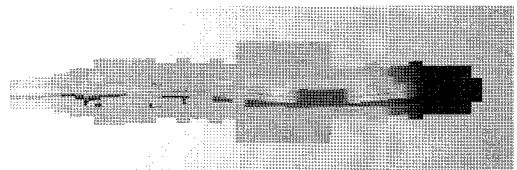


(c) 2,220Hz

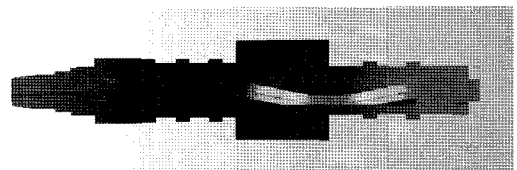
Fig. 7 Mode shapes of Model #1



(a) 1,180Hz



(b) 1,345Hz



(c) 2,232Hz

Fig. 8 Mode shapes of Model #2

티타늄합금의 물성치는 Table 6에 나타내었으며, 경량화된 모델인 Model #3의 진동모드형상은 Fig. 9에 나타내었다.

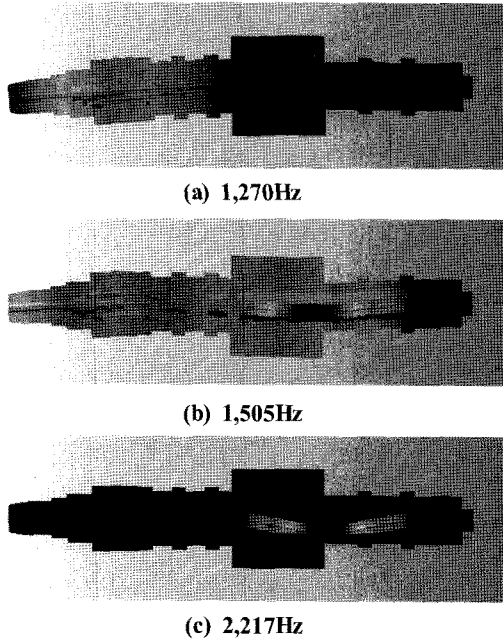


Fig. 9 Mode shapes of Model #3

Table 6 Material property of Ti-6Al-4V

Density (kg/mm ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
4.43×10 ⁻⁶	114	0.33	830	900

유한요소해석 결과를 통해 고유진동수를 비교하면, 경량화된 모델인 Model #3이 Model #2에 비해 1차 진동모드의 경우 7.6%, 2차 진동모드는 11.9% 더 높은 고유진동수를 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 3차 진동모드의 경우 경량화모델의 고유진동수가 0.7% 더 낮음을 확인할 수 있는데, 이는 티타늄합금의 탄성계수(Young's modulus)가 SCM415의 탄성계수보다 낮아서 드로우바에 대한 스핀들축의 지지강성이 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다. 가공정밀도와 관련이 있는 선단부와 스핀들축의 진동모드의 고유진동수가 경량화시킬 경우 더 높아지므로 부품의 경량화는 동적특성 측면에서 긍정적이라고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 유한요소해석 시뮬레이션을 이용하여 베

어링강성 및 소재경량화가 HSK-E40 툴링시스템의 정적 및 동적특성에 미치는 영향을 파악하였으며, 그 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 툴링시스템의 정강성은 베어링강성이 높은 Model #2가 Model #1에 비해 4.5% 더 높게 나왔다.
- (2) 베어링강성이 높은 Model #2는 Model #1에 비해 1차 진동모드는 6.1%, 2차 진동모드는 8.2%, 그리고 3차 진동모드는 0.5% 더 높은 고유진동수를 가진다.
- (3) 경량화된 모델인 Model #3은 Model #2에 비해 1차 진동모드는 7.6%, 2차 진동모드는 11.9% 더 높은 고유진동수를 가진다.
- (4) 해석결과를 통해 베어링강성의 증가와 부품의 경량화는 툴링시스템의 고유진동수를 높이며, 고속가공시 높은 주축회전속도에서도 안정적인 가공이 가능하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 부품소재기술개발사업 “고속화 요소기술 개발” 과제로 화천기공(주)의 지원에 의해 이루어 졌음.

참 고 문 헌

- (1) Kim, J. K., 1995, “The Characteristics of Hollow Shank(HSK) System,” *Journal of Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 4, No. 3, pp. 7~11.
- (2) Bernd, B. and Jay, F. T., 2002, “Conceptual Design of Machine Tool Interfaces for High-Speed Machining,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 4, No. 1, pp. 16~27.
- (3) Aoyama, T. and Inasaki, I., 2001, “Performances of HSK Tool Interfaces under High Rotational Speed,” *CIRP Annals - Manufacturing h Rotatoy*, Vol. 50, Issue 1, pp. 281~284.
- (4) Kim, B. S. and Kim, J. K., 2001, “A Study on the Static Stiffness in the Main Spindle Taper of Machine tool,” *Proceedings of the Korea Society of Machine Tool Engineers spring conference*, pp. 149~154.
- (5) Ku, M. S., Kim, J. S., Kang, I. S, and Kim, K. T.,

2009, “An analysis of static and dynamic characteristics of the HSK tooling system according to bearing arrangements,” *Proceedings of Korea Society of Machine Tool Engineers autumn conference*, pp. 172~177.

(6) Lee, C. H., Park, C. H., and Lee, H. S., 2002, “The Contribution of Spindle Parts to Static, Dynamic Stiffness and Design Improvement,” *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering autumn conference*, pp. 985~988.