

기술 논문

고속가공기용 HSK 툴링시스템의 주축회전속도에 따른 응력분포특성

구민수*, 김정석⁺, 강익수⁺⁺, 박진호⁺⁺, 이종환⁺⁺⁺, 김기태⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2010. 09. 17, 심사완료일 2010. 09. 29)

The Stress Distribution Characteristics of HSK Tooling System According to Spindle Speed

Minsu Ku*, Jeongsuk Kim⁺, Iksoo Kang⁺⁺, Jinhyo Park⁺⁺, Jonghwan Lee⁺⁺⁺, Kitae Kim⁺⁺⁺⁺

Abstract

Recently, the high-tech industries, such as aerospace industry, auto industry, and 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, stress distribution characteristics of the HSK tooling System is analyzed according to the spindle speed. In order that, the mechanism and the force amplification principle of HSK tooling system are analyzed. The HSK tooling system is modelled by using a 3D modeling/design program. Then stress distribution characteristics of HSK tooling system are analyzed according to spindle speed by using the finite element analysis.

Key Words : HSK tooling system(HSK 툴링시스템), Finite element analysis(유한요소해석), Stress distribution characteristics(응력분포 특성), High speed machining center(고속가공기)

* 부산대학교 대학원 기계공학부

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

++ 부산대학교 기계공학부

+++ 한국폴리텍VII대학

++++ 화천기공(주)

1. 서론

최근 자동차, 선박, 항공, 정보통신등 첨단산업의 빠른 성장으로 인한 정밀부품 및 금형에 대한 수요의 증가와 이로 인한 정밀도 및 생산성 향상의 필요성에 의해 고속가공에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되어 왔으며, 일부 부품 및 금형가공업체에서는 고속가공기를 도입하여 생산현장에서 사용하고 있다. 기존의 머시닝센터에서 사용되고 있는 핵심 부품인 툴링시스템은 BT타입이 주를 이루고 있다. 하지만 BT타입은 공구샙크가 스핀들 테이퍼부와의 접촉에 의한 1면 구속으로 고정되기 때문에 스핀들이 고속회전을 하게 되면 공구샙크의 고정에 있어서 문제점을 드러낸다. 원심력과 열변형에 의한 스핀들 테이퍼 부의 확장이 발생하여 공구샙크를 스핀들에 고정시켜주는 드로우바의 인장력에 의해 공구샙크가 축방향으로 더 삽입되게 되어 축방향 정밀도가 악화된다. 이러한 동작의 반복에 의해 스핀들 테이퍼부의 마멸이 발생하여 공구샙크와 스핀들축의 접촉률이 낮아지게 되어 가공시 발생하는 질산력에 의해 횡방향 진동이 발생하게 되어 가공정밀도가 악화될 수 있다⁽¹⁾. 또 다른 문제점으로 공구를 클램핑해주는 그리퍼들이 스핀들이 고속회전함에 따라 증가하는 원심력에 의해 반경바깥방향으로 벌어지게 되어 공구샙크에 대한 클램핑이 약해져 공구샙크와 스핀들축의 접촉강성 약화를 초래하게 된다⁽²⁾. 이러한 문제점을 해결하기 위해 고속가공기에 장착할 효과적인 툴링시스템이 필요하게 된다.

툴링시스템 중에서 HSK타입은 테이퍼부와 플랜지부의 접촉에 의한 2면 구속으로 고정이 되므로 BT타입보다 정강성이 더 높다^(3,4). 플랜지부의 접촉은 스핀들축의 테이퍼부의 팽창을 억제시켜주며, 공구샙크의 축방향이동을 방지해 준다. HSK타입은 구조적인 특징으로 인해 중공형태의 공구샙크 내부에서 그리퍼에 의해 스핀들과 공구샙크의 클램핑이 이루어지게 되며, 스핀들의 고속회전시 원심력에 의해 오히려 클램핑이 더욱 견고해지게 된다. HSK타입은 BT타입에 비해 더 높은 굽힘강성과 고속회전시 더욱 견고해지는 클램핑에 의해 고속가공시 높은 가공정밀도를 유지할 수 있다. HSK타입의 툴링시스템에 대한 장점을 바탕으로 최근 국내에서는 고속 머시닝센터용 HSK 툴링시스템의 국산화를 목표로 연구 개발 중에 있다.

본 연구에서는 고속가공기에서 활용될 수 있는 HSK 공구클램핑유닛의 작동메카니즘과 증폭메카니즘에 대한 파악 및 분석을 수행하고, 유한요소해석 시뮬레이션을 이용하여 현재 개발 중인 HSK 공구클램핑유닛의 회전속도의 변화에 따

른 응력분포변화 및 공구샙크와 스핀들의 접촉부에서의 반력변화에 대해 해석한다. 이 해석 결과를 통해 HSK 툴링시스템의 국산화에 기여하고자 한다.

2. HSK 공구클램핑유닛의 장치메카니즘

부품 및 기구의 설계에 있어서 그에 대한 구동 원리에 대한 이해와 적용은상당히 중요하다고 할 수 있다. 대략적인 형상과 동작형태를 알고 있다고 하여도 그 원리에 대해 정확히 파악하고 있지 않은 상태에서 설계를 수행한다면 원하는 성능을 가진 결과물을 얻어내기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 현재 설계 및 제작을 수행하고 있는 HSK 공구클램핑유닛을 보다 정확하게 설계하고 수행중인 과제에서 요구하는 성능을 가진 결과물을 얻어내기 위하여 HSK 공구클램핑유닛의 구동메카니즘 및 증폭메카니즘에 대해 분석하였다.

2.1 구동메카니즘

Fig. 1에는 공구클램핑유닛의 클램핑 상태와 언클램핑 상태를 나타내었다. 공구가 언클램핑(Unclamping)된 상태에서 드로우바(Drawbar)가 스프링력(Spring force)에 의해 당겨지게 되고, 이로 인해 드로우바에 체결되어 있던 클램핑콘(Clamping cone) 또한 같은 방향으로 이동하게 된다. 그리퍼(Gripper)는 클램핑콘에 접촉을 유지하면서 클램핑콘의 경사면을 따라 반경바깥방향 및 축방향으로 이동하면서 공구샙크(Tool shank)를 클램핑(Clamping)하게 된다. 반대로 언클램핑시에는 공구가 클램핑된 상태에서 유압실린더의 작

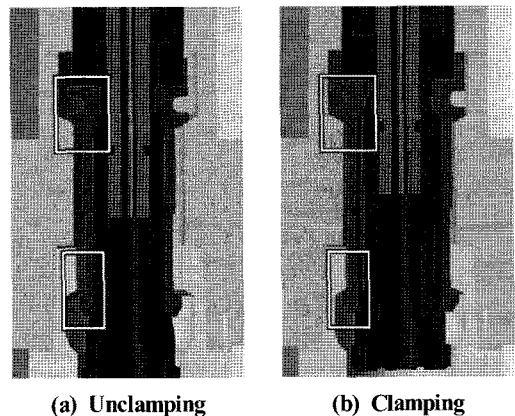


Fig. 1 The states of HSK tool clamping unit

동에 의해 드로우바가 클램핑시와 반대방향으로 밀려나게 되고 드로우바에 체결되어 있던 클램핑콘 또한 같은 방향으로 이동하게 된다. 이로 인해 반경방향으로 작용하던 힘이 사라지게 되고 그리퍼는 스페이스가 클램핑콘의 이동방향으로 밀어줌에 따라 반경안쪽방향으로 이동하게 된다.

2.2 증폭메커니즘

HSK 공구클램핑유닛은 드로우바에 작용하는 스프링력에 의한 클램핑콘의 축방향이동에 의해 그리퍼가 반경바깥방향 및 축방향으로 이동하면서 툴샤프트와 스피indle축을 클램핑하게 된다. 공구를 클램핑함에 있어 클램핑력은 툴샤프트와 스피indle축의 2면 접촉을 유지시켜주는데 중요한 역할을 한다.

HSK 공구클램핑유닛에는 보다 적은 스프링력을 작용시켜 드로우바 및 스프링에 걸리는 부하를 적게 하면서 클램핑력은 증폭시키기 위해 썸기원리가 적용되어 있다. Fig. 2에는 HSK 틀링시스템에서 썸기원리가 적용되는 부분을 표시하였으며, Fig. 3은 썸기원리에 대해 나타내고 있다.

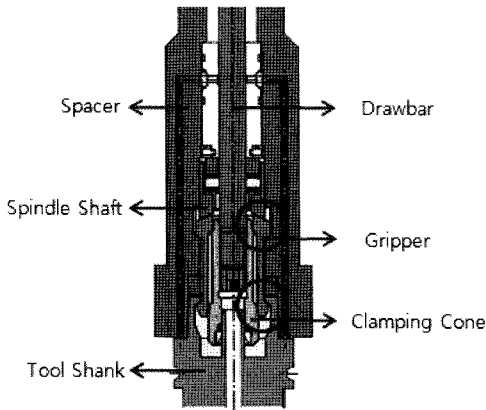


Fig. 2 HSK tooling system

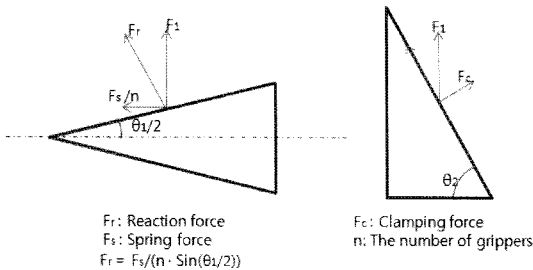


Fig. 3 Wedge principle

F_r 은 그리퍼당 작용하는 반력(Reaction force), F_s 는 스프링력, F_1 은 증폭된 반력의 반경방향 분력, F_c 는 그리퍼당 클램핑력, n 은 그리퍼의 수, $\theta_1/2$ 은 클램핑콘과 그리퍼의 접촉면의 경사각, 그리고 θ_2 는 그리퍼와 툴샤프트의 접촉면의 경사각을 나타낸다.

그리퍼의 수가 6개이므로 $n=6$, 클램핑콘과 그리퍼의 접촉면의 경사각은 10° 이므로 $\theta_1/2=10^\circ$, 그리고 그리퍼와 툴샤프트의 접촉면의 경사각은 60° 이므로 $\theta_2=60^\circ$ 이다.

썸기원리를 이용하여 그리퍼와 툴샤프트의 접촉면 수직방향 성분인 클램핑력을 구하기 위해 식(1)을 이용하여 F_r 을 구한 다음, 식(2)에 F_r 을 대입하여 F_1 을 구한다. 그리고 식(3)에 F_1 을 대입하여 F_c 를 구하고, 구해진 F_c 에 그리퍼 갯수 6을 곱하여 총클램핑력을 계산할 수 있는 식(4)를 구한다. 식(4)를 이용하여 계산된 HSK-E50과 HSK-E40의 클램핑력을 Table 1에 나타내었다.

$$F_r = F_s / (n \cdot \sin(\theta_1/2)) \tag{1}$$

$$= F_s / (6 \cdot \sin 10^\circ)$$

$$= 0.96 F_s$$

$$F_1 = \cos 10^\circ \cdot F_r \tag{2}$$

$$= \cos 10^\circ \cdot 0.96 F_s$$

$$= 0.95 F_s$$

$$F_c = F_1 \cdot \cos \theta_2 \tag{3}$$

$$= 0.95 F_s \cdot \cos 60^\circ$$

$$= 0.48 F_s$$

$$\sum F_c = n \cdot F_c \tag{4}$$

$$= 6 \cdot F_c$$

$$= 2.88 F_s$$

Table 1 Clamping force of HSK clamping unit

	HSK-E50	HSK-E40
Spring force (N)	3,850	2,400
Clamping force (N)	11,088	6,912

3. 회전속도의 변화에 따른 응력분포해석

본 논문의 연구대상인 HSK 공구클램핑유닛의 유한요소 해석을 수행하기 위해 우선 각 부품의 3차원모델링을 수행하고, 그 모델을 이용하여 유한요소모델을 생성하였으며, 스피들축의 회전속도의 변화에 따른 응력분포변화 및 공구생크와 스피들축 접촉면의 반력변화에 대한 해석을 수행하였다.

3.1 3차원 모델링

유한요소해석을 수행하기 위해 우선 그리퍼, 스피들축, 톨생크, 클램핑콘, 스페이서, 베어링, 로터, 그리고 드로우바를 3차원 설계/모델링 전용프로그램인 Pro/Engineer Wildfire 3.0을 이용하여 모델링하였다. 각 부품을 모델링한 후 설계도면의 조립도에 따라 정확하게 위치시키고, 공구생크가 스피들축에 클램핑된 상태를 가정하여 부품들을 재배치했다. Fig. 4에는 본 논문의 연구대상인 HSK 공구클램핑유닛을 포함하고 있는 스피들의 전체적인 조립단면을 나타내었다.

3.2 유한요소모델링

3차원 모델링 후 조립된 스피들을 유한요소해석 전용프로

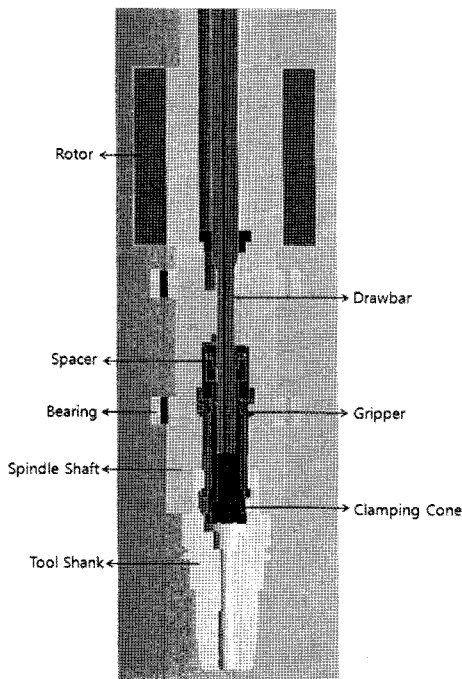


Fig. 4 3D model of HSK tooling system

그램인 ANSYS WorkBench V11을 이용하여 유한요소모델화하였다. 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 해석시간은 많이 소요되지만, 요소수를 늘리는 방향으로 유한요소모델링을 수행하였다. 응력변화의 주 관심대상이 아닌 베어링부

Table 2 Generation conditions and results of Finite element models

Generation condition	
Method	Hex dominant
Elemental size (mm)	1.5 mm / 4.0 mm (rotor, bearing)
Solid element midside nodes	2nd order (Kept)
Relevance	100
Relevance center	Fine
Results	
Nodes	918,420
Elements	245,894

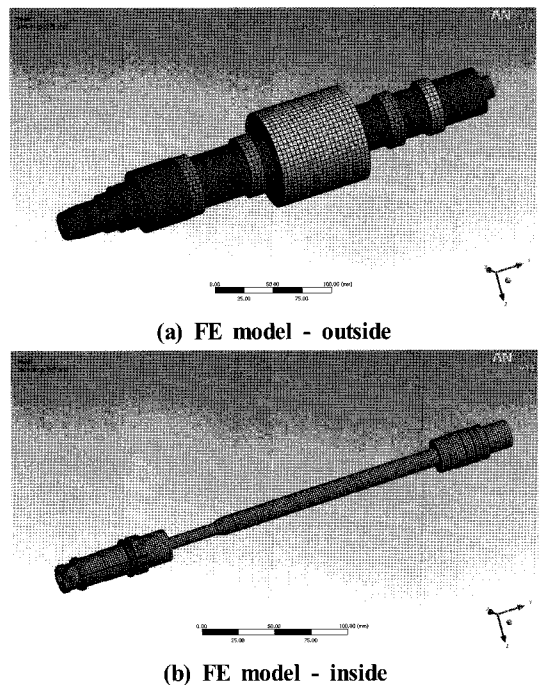


Fig. 5 Finite element model of spindle

품과 로터부품의 요소 평균길이는 4mm로 하고, 나머지 부품들의 요소 평균길이는 1.5mm로 지정하였다. 요소형상생성법은 Hex Dominant법을 사용하였으며, 요소의 차수는 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 요소생성을 위해 2차(Kept)를 선택하였다.

Table 2에 HSK 툴링시스템의 스핀들부 전체의 유한요소 생성조건 및 결과를 나타내었으며, Fig. 5는 HSK 툴링시스템의 스핀들부 전체의 유한요소모형을 나타내고 있다.

3.3 해석 조건

유한요소해석 전용프로그램인 ANSYS WorkBench V11을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 회전속도에 따른 응력분포변화를 해석하기 위해 스핀들축에 회전속도를 부여하였으며, 이를 포함한 각 부품의 접촉조건 및 경계조건에 대해서는 Fig. 6와 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 3 Contact conditions 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

Table 4 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

각 부품에 흔히 사용하는 소재로서 그리퍼와 클램핑콘에는 SNCM 8, 스핀들축과 공구생크에는 SCM 415, 그리고 드로우바와 베어링부품에는 SUJ 2가 적용되었으며, 로터의 소재는 구리로 선택하였다. 적용된 소재들의 물성치를 Table 4에 정리하여 나타내었다.

4. 유한요소해석 결과

Fig. 7에는 각각의 회전속도에 따른 HSK 공구클램핑유닛의 응력분포에 대해 나타내었다. 응력분포해석 결과 회전속도가 증가함에 따라 공구클램핑유닛에 발생하는 응력이 전체적으로 증가함을 확인할 수 있다. 이는 회전속도가 증가함에 따라 공구생크와 스핀들축을 클램핑해주는 역할을 하는 그리퍼가 원심력에 의해 점점 더 반경바깥방향으로 펼쳐짐에 의한 것으로 파악된다. 최대응력은 그리퍼에서 발생하였으며 원심력에 의한 반경바깥방향으로의 펼쳐짐에 의해 더 많은 응력이 공구생크와 스핀들축의 접촉부에서 발생하였으며, 그리퍼의 중간부분은 반경바깥방향으로 작용하는 원심력에 의해 원심력의 방향과 동일한 방향으로 굽힘이 발생함을 확인할 수 있다.

스핀들축이 정지상태일 때의 최대응력은 391.5MPa이며, 스핀들축의 회전속도가 10,000rpm일 때의 최대응력은 404.8MPa, 20,000rpm일 때의 최대응력은 455.9MPa, 30,000rpm일 때의 최대응력은 632.8MPa, 40,000rpm일 때의 최대응력은 880.4MPa, 50,000rpm일 때의 최대응력은

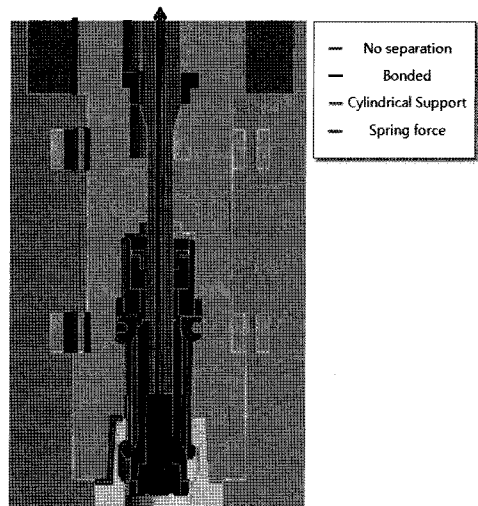


Fig. 6 Boundary condition and Contact condition

932.12MPa로 나타났다. 위의 유한요소해석결과에 따른 회전속도별 최대응력과 이를 이용해 구해진 안전계수에 대해 Table 5에 정리하여 나타내었다.

설계 최대회전속도인 50,000rpm에서 계산된 안전계수는 1.25로 나타났다. 안전계수의 설정치는 신뢰성이 있는 소재이며, 사용환경이 정해져 있고, 하중 및 응력의 크기를 확실히 알 수 있는 경우에는 1.25이상으로 하여야 한다⁽⁵⁾.

위의 유한요소해석 결과를 통해 회전속도가 증가함에 따

라 그리퍼가 원심력에 의해 반경바깥방향으로 점점 더 이동함을 파악할 수 있었고, 이로 인해 그리퍼와 공구생크, 그리퍼와 스핀들축의 접촉부에서 발생하는 응력이 증가함을 확인할 수 있었다. 이를 이용하여 회전속도에 따른 공구생크와 스핀들축의 접촉면에서의 반력성향에 대해서도 분석해보았다. 스핀들의 회전속도가 증가할수록 접촉면반력이 증가함을 확인할 수 있었으며, 그 결과를 Table 6에 정리하여 나타내었다.

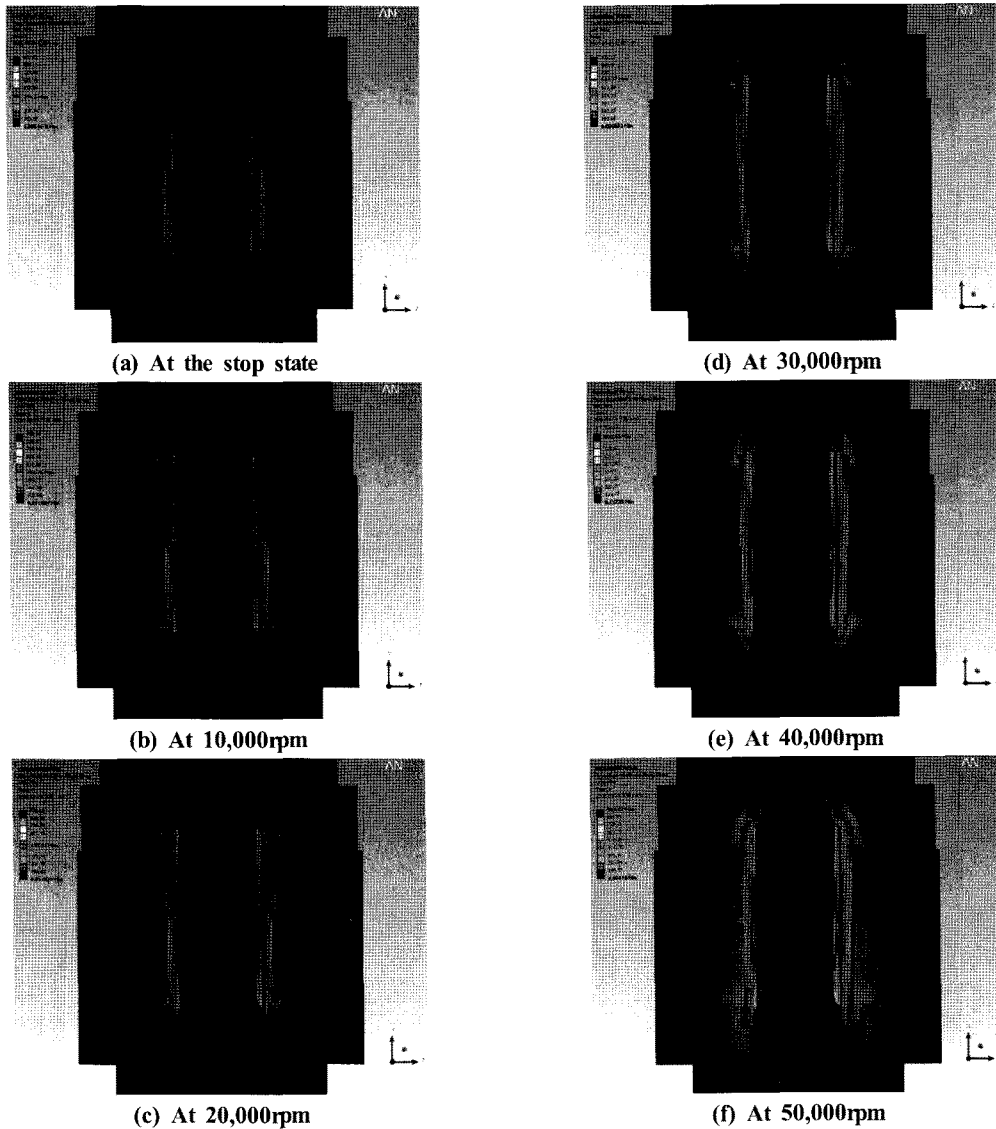


Fig. 7 The stress distribution according to the spindle speed

Table 5 The maximum stress and the safety factor according to spindle speed

Spindle speed (rpm)	Maximum stress (MPa)	Safety factor
0	391.5	2.98
10,000	404.8	2.88
20,000	455.9	2.56
30,000	632.8	1.84
40,000	880.4	1.32
50,000	932.1	1.25

Table 6 The reaction force according to spindle speed

Spindle speed (rpm)	Reaction force (N)
0	12,805
10,000	13,222
20,000	14,569
30,000	16,773
40,000	19,859
50,000	22,960

BT타입 툴링시스템의 경우 회전속도가 증가할수록 스피ndl의 테이퍼부가 원심력에 의해 반경방향으로 팽창하게 되며, 공구생크가 클램핑력에 의해 축방향으로 더 이동하게 된다. 이러한 공구생크의 이동은 축방향 가공정밀도를 감소시킬뿐만 아니라 스피ndl 테이퍼부를 더욱 팽창시키게 되며, 이로 인해 공구생크와 스피ndl축의 접촉면의 접촉률이 낮아지게 된다⁽¹⁾.

이와 달리, 이번 유한요소해석 결과를 통해 HSK타입 툴링시스템은 스피ndl의 회전속도가 증가함에 따라 공구생크와 스피ndl축의 접촉면의 반력이 증가함을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 HSK타입 툴링시스템은 고속가공시 공구생크와 스피ndl축의 접촉면의 접촉강성 및 접촉률이 증가함을 파악할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 고속가공기에 장착되는 HSK 공구클램핑유닛의 구동메카니즘과 증폭메카니즘의 파악 및 분석을 수행하였고, 유한요소해석을 이용하여 회전속도의 변화에 따

른 HSK 공구클램핑유닛의 응력분포변화 및 공구생크와 스피ndl축 접촉부의 반력변화를 해석하였으며, 상기의 결과를 이용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) HSK 공구클램핑유닛의 클램핑동작과 언클램핑동작은 클램핑콘의 축방향이동에 따른 그리퍼의 경사면 이동 및 스페이서의 상호 운동에 의해 이루어진다.
- (2) HSK 공구클램핑유닛은 클램핑콘과 그리퍼의 접촉면에 작용하는 썬기원리에 의해 짧은 행정거리와 낮은 스프링력으로도 클램핑력이 증폭되어 안정적인 공구생크의 클램핑이 가능하다.
- (3) 스피ndl축의 회전속도가 증가할수록 원심력에 의해서 그리퍼가 반경바깥방향으로 이동하여 공구클램핑유닛에 발생하는 응력이 전체적으로 증가함을 확인하였다.
- (4) HSK타입 툴링시스템은 BT타입 툴링시스템과는 달리 회전속도가 증가함에 따라 공구생크와 스피ndl축의 접촉면의 반력이 증가함을 확인하였으며, 이를 통해 고속가공시 공구생크와 스피ndl축의 접촉면의 접촉강성 및 접촉률의 증가를 파악할 수 있다.

참고 문헌

- (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, Bossmanns and Jay, F. Tu, 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 Technology*, 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 KSMTE spring conference*, pp. 149~154.
- (5) Robert, C. Juvinall, and Kurt, M. Marshek, 2000, *Fundamentals of Machine Component Design*, Wiley, U.S.A., pp. 252~255.