

고속 주축에서 클램핑력 및 회전수 변화에 따른 주축 인터페이스 접촉률 변화에 관한 연구 (1)

황영국*, 이춘만#, 정원지**

A Study on the Contact Interval in the Main Spindle Interface of High Speed Spindle according to Variation of Clamping Force and Rotational Speed (1)

Young Kug Hwang*, Choon Man Lee# and Won Jee Chung**

ABSTRACT

High speed machining has become the main issue of metal cutting. Due to increase of the rotational speed of the spindle, problems, such as the run-out errors, reduced stiffness, must be overcome to improve the machining accuracy. In order to solve the problems, it is important to determine the appropriate clamping unit and tooling system. This paper presents an investigation into an evolution of contact interval which is the interface between spindle taper hole and tool holder shank of the spindle. Finite element analysis is performed by using a commercial code ANSYS according to variation of clamping forces and rotational speeds. This paper proposed fit tolerance in order to evaluate the effects of clamping force and rotational speed on the contact interval in the spindle interface. From the finite element results, it has been shown that the rotational speed rather than clamping force mostly influence on the variation of the contact interval.

Key Words : High speed spindle(고속 주축), Spindle taper hole(주축 구멍), BT shank(BT 샹크), Clamping force(클램핑력), Rotational speed(주축 회전수)

1. 서론

최근 공작기계 기술은 생산성 향상을 지향한 고속화 기술, 생산 공정의 합리화를 위한 다기능 복합화 기술에 더해 환경 대응화 및 지능·정보화 기술 개발이 중요시 되고 있다. 이를 실현하기 위한

요소기술로는 주축 회전의 고속화, 주축 강성의 증대, 이송속도의 고속화, ATC의 고속화 등 기계와 공구의 고성능화는 물론 공작기계와 공구를 인터페이스하는 툴링기술 역시 중요시되고 있다^{1,2}.

고속, 고정도 가공에 적합한 툴링 조건에 대한 문제로는 툴 홀더 샹크(Shank)의 형상문제, 주축과

접수일: 2005년 7월 14일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

* 창원대학교 대학원 기계설계공학과

교신저자: 창원대학교 기계설계공학과

E-mail cmlee@sarim.changwon.ac.kr Tel. (055) 279-7572

** 창원대학교 기계설계공학과

공구의 클램핑(Clamping) 문제가 주요 논의의 대상이 되고 있다³. 즉 공구를 공작기계에 얼마나 고정밀도로 부착시킬 것인가와 그 상태를 가공 중에도 얼마만큼 유지시킬 수 있는가 하는 것이다.

현재 주로 사용되고 있는 툴 홀더 생크로는 주축 선단의 테이퍼면 만을 구속시키는 일면 구속 방식인 BT 생크가 주로 사용되고 있다. BT 생크는 테이퍼면의 일면만을 구속하므로 주축이 고속 회전함으로 인해 툴링 회전의 불균형에 기인하는 진동, 원심력에 의한 주축 선단의 변형에 의한 축방향 정밀도 저하, 원심력에 의한 클램핑력(Clamping force) 저하 등의 문제점들로 인해 고속 가공에의 적용에 그 한계가 있다⁴. 이에 상기의 문제점들을 개선할 수 있는 고속·고정도 대응 생크로써 주축 선단의 Taper 면과 Flange 면을 동시에 접촉시키는 이면 구속 방식의 생크들이 연구, 실용화 되고 있다. 대표적인 이면 구속 방식으로는 HSK, KM, BBT 방식이 있으며, HSK 와 KM 방식은 홀더 부분을 중공으로 만들어 툴 생크 자체의 질량을 줄여 원심력을 감소시키고, 고강성 구조로 고속 회전시에도 안정적인 회전을 가능하게 한다. 또한 Short taper이므로 공구교환시간도 단축되는 장점을 가지고 있다. 하지만 1/10 Short taper 생크구조이고 툴 생크를 중공으로 만들므로 기존 방식인 BT 생크와의 호환성이 없고, 장착시 발생할 수 있는 편심으로 이면 접촉이 제대로 이루어지지 못할 수 있다. BBT 방식은 일반 BT 방식의 홀더에 주축 선단 구속 기능만을 추가한 형태로 이면 구속 방식이면서도 BT 형식과 동일한 툴 생크의 형상을 유지하여 기존의 스피들을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 HSK 방식 등에 비해 원심력의 영향을 크게 받고, 공구교환시간이 길다. 이상에서 살펴본 것과 같이 이면구속 방식은 일면 구속방식에 비하여 굽힘 강성이 일반적으로 높고 공구 체결반복의 안정성과 체결정도가 높으므로 정적, 동적 안정성이 높고 고속 대응성이 좋다^{5,6}. 하지만 이 방식들 또한 규격화, 기존의 BT 생크와의 호환성, ATC 등 기존 주변 장치의 활용 등 여러 가지 문제점들이 있다. 따라서 고속 가공기의 개발에서 임의의 주축 직경에 대한

적절한 주축 인터페이스 형상을 선정하는데 그 기준을 어디에 두는가 하는 것은 대단히 중요하다.

클램핑 기구(Clamping device)는 일반적으로 콜릿(Collet), 드로바(Draw bar), 클램핑 스프링(Clamping spring)등으로 구성된다. 클램핑 스프링에 의한 클램핑력에 의해 드로바가 당겨지고 콜릿이 풀 스텐드(Pull stud)를 잡아당겨 주축 선단과 툴홀더의 생크부가 밀착하게 된다. 이때 클램핑력이 지나치게 강하면 언클램프 시간이 길어져 전체적인 공구 교환 시간이 길어지고 주축의 베어링 부위 중 언클램핑력을 지지하는 베어링 부위가 빨리 손상된다. 또한 너무 적으면 공구의 굽힘 강성이 저하되고 진동이 발생하여 가공결과에 악영향을 끼친다. 따라서 적절한 클램핑력의 선정이 중요하다.

앞서 살펴본 바와 같이 공작기계 주축이 고속 회전 함에 따라 주축 인터페이스부의 강성을 유지할 수 있는 적절한 주축 인터페이스 형태 및 클램핑력의 선정이 중요하다. 하지만 현재 그에 대한 명확한 기준이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 테이퍼 접촉률 변화특성을 분석하여 임의의 주축 직경에 대해 요구되는 주축 인터페이스부의 강성을 유지할 수 있는 적절한 주축 인터페이스 형태 및 주축 회전수를 제시하고자 한다. 이를 위해 고려한 주축 인터페이스 형태로는 일면 구속방식인 BT 방식과 이면 구속방식이면서도 BT 방식과 호환이 가능한 BBT 방식을 선정하였다. 이는 동일한 주축에서 인터페이스 형태만을 일면 구속에서 이면 구속으로 바꿀 경우를 평가하기 위해서이다. 선정된 두 방식에 대해 클램핑력, 주축 회전수를 달리 하여 유한요소해석을 수행하여 접촉률 변화 특성을 분석하였고, 그 결과를 평가할 수 있는 테이퍼 접촉률 평가 방법을 제안하였다.

2. 접촉률 평가 방법

주축에서 테이퍼 접촉률은 일반적으로 Fig.1 에 보이는 Plug taper gage를 사용하여 실험적으로 측정한다⁷. 하지만 이것은 정지 상태의 접촉률을 측

정하므로 실제 운전 중의 접촉률과는 다를 수 있다. 즉 고속 가공기에서와 같이 주축의 고속회전에 의한 선단 변형량이 클 것으로 예상되는 경우 그 오차가 더욱 더 클 것이다. 이에 본 논문에서는 주축이 회전하고 있을 때의 주축 인터페이스와 툴 홀더 생크부 간의 접촉률 평가를 해석적 방법을 이용하여 평가 하기위해 치수공차(tolerance)와 끼워맞춤(fit)의 개념을 도입하였다.

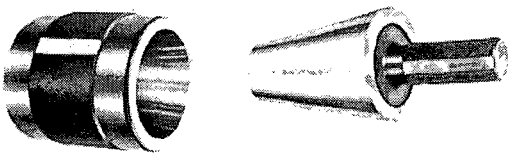


Fig. 1 Taper gage

일반적으로 두 물체가 접촉되었다는 것은 두 물체 사이에 틈새(clearance)가 존재하지 않는다는 것이다. KS B 0401에서 정의하는 끼워맞춤 중 헐거운 끼워맞춤(clearance fit)은 항상 틈새가 생기는 끼워맞춤이고, 억지 끼워맞춤(interference fit)은 항상 쥘새(interference)가 생기는 끼워맞춤이다⁸. 주축 테이퍼부위와 툴 홀더 생크부 간에 틈새가 있을 경우는 횡방향 진동을 발생시켜 가공 정밀도를 악화시키고 결합부 강성 또한 저하된다. 반면 쥘새가 있을 경우 두 물체가 완전히 접촉되어 있지만 과도한 언클램핑력 필요에 의한 TT Time증가 및 접촉부 마멸 등의 문제가 발생한다. 따라서 주축 인터페이스 결합부에서는 상용하는 끼워맞춤 중 중간 끼워맞춤(transition fit)에서 정하는 치수 허용차 내에 있을 경우 가장 이상적으로 접촉되어 있는 것으로 볼 수 있다.

이에 본 연구에서는 구멍·축의 공차역이 완전히 또는 부분적으로 겹치는 중간 끼워맞춤 영역을 기준으로 하여 주축인터페이스의 접촉률을 평가하고자 한다. 여기서 상용하는 끼워맞춤은 H구멍을 기준구멍으로 하고 이에 적당한 축을 선택하여 끼워맞춤은 구멍기준 끼워맞춤과, h축을 기준축으로 하여 이것에 적당한 구멍을 선택하여 끼워맞춤은 축기준 끼워맞춤이 있다. 본 논문에서 고려하고자 하는 문제에서는 주축 인터페이스부를 구멍으로 보고, 툴 홀더 생크부를 축으로 볼 수 있다. 이때 주축 인터페이스의 선단부는 주축 회전수에 따른 변

형량의 차이에 의해 여러개의 공차역 클래스가 발생할 수 있으므로 구멍기준 끼워맞춤을 적용하기 어렵다. 따라서 Table 1에 보이는 상용하는 축기준 끼워맞춤을 적용하여 테이퍼 접촉률을 평가하였다.

Table 1 Preferred tolerance for shafts

기준축	구멍의 공차역 클래스												
	헐거운 끼워맞춤			중간 끼워맞춤			억지 끼워맞춤						
h5				H6	JS6	K6	M6	N6	P6				
h6		F6	G6	H6	JS6	K6	M6	N6	P6				
		F7	G7	H7	JS7	K7	M7	N7	P7	R6	S7	T7	
h7		F7	F7	H7									
		F8		H8									

주축 인터페이스 부위의 접촉여부를 평가하기 위해 축기준 끼워맞춤 중 구멍의 공차역 클래스가 JS7, K7인 두 가지 경우를 적용하여 각각 평가해보았다. 이 경우 구멍의 기초가 되는 치수허용차는 KS B 0401을 참고할 경우 Table 2와 같다.

Table 2 Fundamental deviation for holes

기준치수 [mm]	공차역 위치	
	JS7	K7
	치수 허용차 [μ m]	
30~50	12	7

3. 유한요소해석

클램핑력 및 주축 회전수를 달리 하였을 때 주축 인터페이스 형태에 따른 주축 인터페이스와 툴 홀더 생크부 간의 접촉률 변화 특성을 보기 위해 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 해석을 수행하였다.

3.1 유한요소 모델링

본 연구에서는 BT type의 주축인터페이스 형태에 대해서는 D사의 직경 64mm, 최대 20,000rpm, BT40용 스피들들 주축 선단만을 고려한 2차원 축대칭 형상으로 단순화하여 모델링 하였고, BBT

type에 대해서는 동일한 직경에 대하여 플랜지면만을 추가로 접촉시켜 모델링 하였다. 이는 주축 직경이 다른 경우에는 주축의 고속 회전에 의한 원심력의 영향이 달라지고, 사용되어지는 베어링이 달라지는 등 주축의 설계 자체가 변하므로 직접적인 비교가 불가능하기 때문이다. 유한요소해석 모델은 Fig. 2, 3과 같으며 주축 테이퍼부와 툴 홀더 생크부의 두 개의 부분으로 구분하여 모델링 하였다. 해석에 사용된 요소는 2차원 4절점 이고, 요소의 거동은 축대칭으로 하였다.

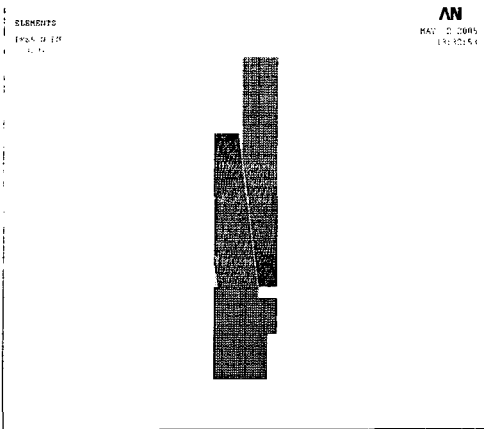


Fig. 2 F.E.M modeling of BT shank

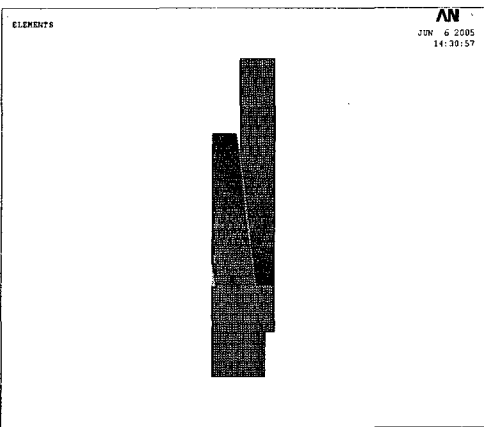


Fig. 3 F.E.M modeling of BBT shank

하중조건은 클램핑력 및 주축 회전에 의한 원심력의 효과를 고려하기 위해 다단계 하중을 적용하였다. Fig. 4에 보이는 것과 같이 첫 번째 하중 단계

에서 툴 홀더 부위에 클램핑력을 적용하고 두 번째 하중 단계에서 전체 부위에 주축 회전에 의한 원심력을 적용하여 해석을 수행하였다. 즉 첫 번째 하중 단계는 공구가 클램핑된 상태이고, 두 번째 하중 단계는 무 부하 상태의 운행 중으로 볼 수 있다. 적용 하중 조건은 일반적으로 공작기계 회사에서 많이 사용하고 있는 범위를 조사하여 Table 3과 같이 하였다.

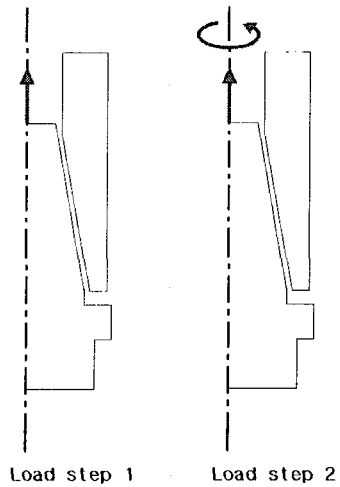


Fig. 4 Load step for finite element analysis

구속조건은 주축 테이퍼부의 y방향 변위만을 구속하였다. 이는 주축 인터페이스의 접촉부가 계속 경계조건이 변화하여 경계조건을 미리 정할 수 없는 접촉비선형 문제이기 때문이다.

해석은 Table 3에 나타낸 12가지 경우에 대하여 Argumented Lagrange Method를 사용하여 수행하였다.

Table 3 Load conditions for finite element analysis

클램핑력 [N]	주축 회전수 [rpm]
9800, 11760, 13720	10,000, 15,000, 20,000, 25,000

3.2 해석결과 및 고찰

BT type의 경우는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 주축의 선단 측에서 최대 변형량이 발생하고 BBT type의 경우는 Fig. 6에 보이는 바와 같이 주축 선단의 조금 위쪽에서 최대 변형량이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 플랜지면의 접촉 여부 때문인 것으로

판단된다. BBT type의 경우는 플랜지면이 접촉되므로 플랜지면의 마찰 효과로 인해 최대 변형량이 주축 최선단의 조금 위쪽에서 발생한다. 이로 인해 절삭저항의 작용점과 지지점의 관계로 볼 때 BBT type이 굽힘 강성 측면과 떨림 측면에서 더 유리함을 알 수 있다.

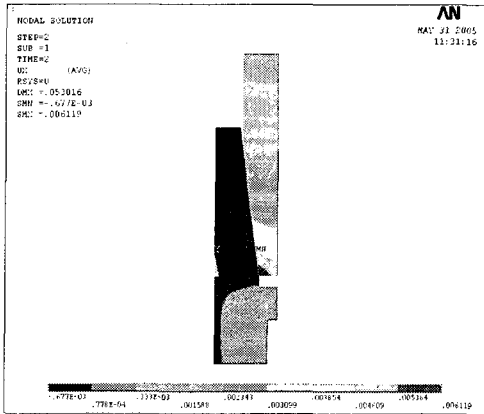


Fig. 5 Deformation results of BT shank by finite element analysis

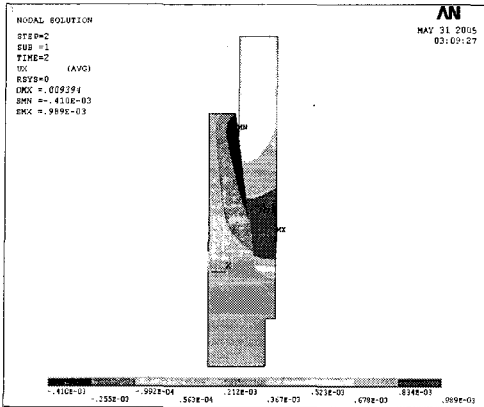


Fig. 6 Deformation results of BBT shank by finite element analysis

Fig. 8~10는 주축 회전속도에 따른 주축 테이퍼부의 변형량을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 노드번호에 대한 주축 테이퍼부의 위치는 Fig. 7과 같이 주축 최 선단을 60번으로 하여 노드 번호가 낮아질수록 주축 선단에서 멀어지는 것으로 하였다. BT

type, BBT type 모두 주축 회전수가 커질수록, 주축 선단 쪽으로 갈수록 변형량이 증가한다. 하지만 BT type의 경우는 nodal point 0~30사이에서는 변형량이 완만하게 증가하다가 그 이후 가파르게 증가하였고, BBT type의 경우는 nodal point 0~40 까지 변형량이 완만하게 증가하고, 그 이후는 변형량이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 BBT type의 경우는 플랜지면의 접촉에 의한 마찰효과가 주축 선단측의 변형을 억제하여 nodal point 40 이후에도 변형량이 크게 증가하지 않고 유지된 것으로 판단된다. 이로 인해 BT type의 테이퍼 접촉률이 BT type의 경우보다 월등히 향상됨을 확인할 수 있다.

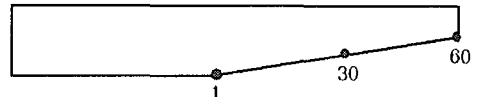


Fig. 7 Nodal point for modeling of spindle taper hole

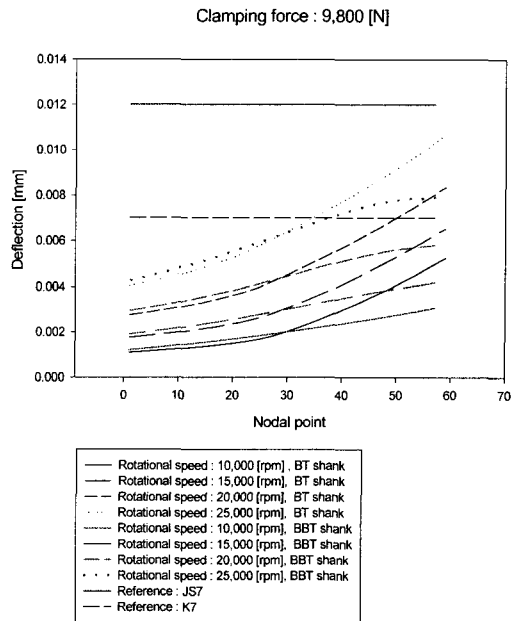


Fig. 8 Nodal point-deflection curves for clamping force=9,800 N

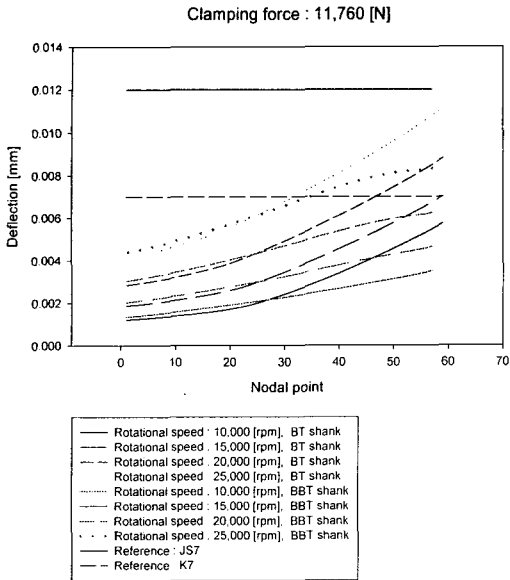


Fig. 9 Nodal point-deflection curves for clamping force=11,760 N

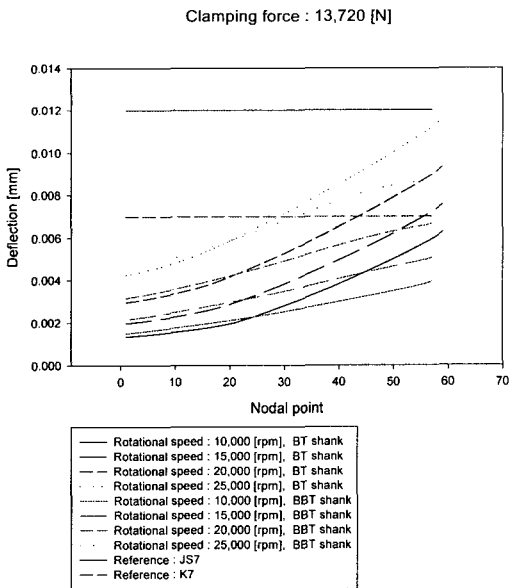


Fig. 10 Nodal point-deflection curves for clamping force=13,720 N

Fig. 11~14는 클램핑력에 따른 주축 테이퍼부의 변형량을 그래프로 나타낸 것이다. BT type과 BBT type이 동일한 주축회전수에서 변형량의 차이를 보

이는데 이것은 클램핑력과 구속 면수의 차이에 의한 것으로 판단된다. BT type의 경우 주축 테이퍼부 일면만 구속되므로 주축이 고속 회전함으로 인해 주축 테이퍼부가 팽창되고 이에 따라 툴링의 가라앉음 현상이 발생한다. 이는 축 방향 정밀도를 저하시킬 뿐만 아니라 주축테이퍼부의 반경방향 변형량에도 영향을 미쳐 변형량을 더욱 크게 하는 것으로 판단된다. 하지만 BBT type의 경우는 주축 테이퍼부와 플랜지부의 이면이 구속되므로 주축이 고속회전 하더라도 툴링의 축 방향 가라앉음 현상이 발생되지 않는다. 따라서 BT type의 경우보다 상대적으로 클램핑력이 주축 반경방향 변형에 미치는 영향이 작아 접촉률 유지측면에서 유리한 것으로 판단된다.

또한 Fig. 11~14에서 동일한 주축 회전수에서 클램핑력이 증가함에 따라 주축 테이퍼부의 접촉률은 점점 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과만을 본다면 주축 테이퍼부의 접촉률에는 클램핑력이 커질수록 악영향을 끼친다. 하지만 클램핑력이 커질수록 절삭저항에 대한 굽힘 강성이 커진다는 연구 결과도 발표되어 있다². 따라서 설계단계에서 목적에 맞는 적절한 클램핑력의 선정이 중요하다. 추후 절삭저항을 고려한 테이퍼부 접촉률 변화특성에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

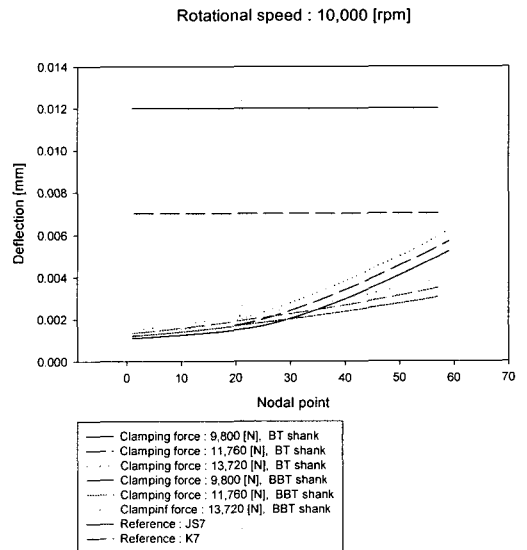


Fig. 11 Nodal point-deflection curves for rotational speed=10,000 rpm

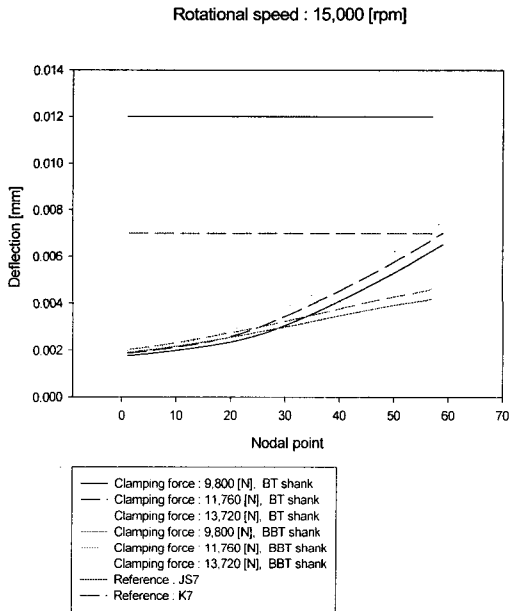


Fig. 12 Nodal point-deflection curves for rotational speed=15,000 rpm

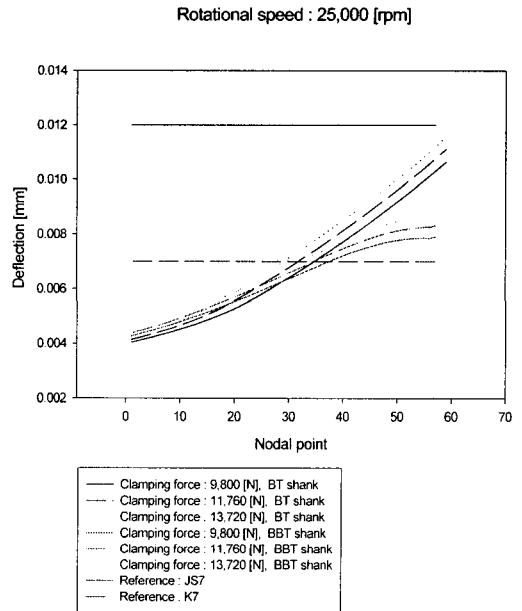


Fig. 14 Nodal point-deflection curves for rotational speed=25,000 rpm

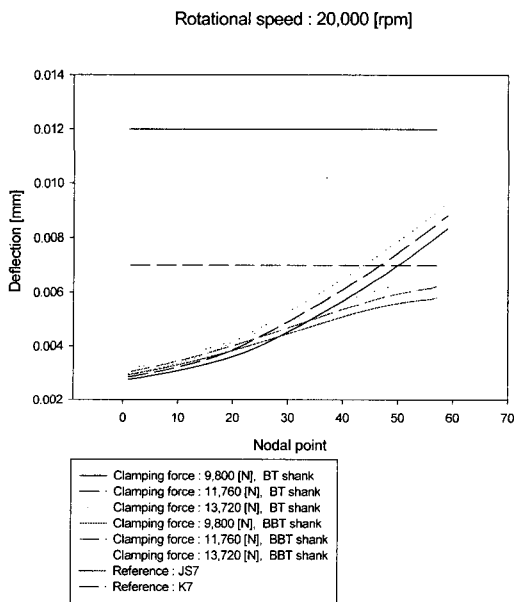


Fig. 13 Nodal point-deflection curves for rotational speed=20,000 rpm

일반적으로 공작기계 주축 인터페이스 부위는 접촉률을 80% 이상 유지해야 한다. 해석결과 Table 4에서 확인할 수 있듯이 BT type의 경우 JS7기준을 적용할 경우 고려한 모든 하중영역에서 접촉률 80% 이상을 유지하였다. 그러나 K7기준을 적용할 경우 적용하중 조건 중 클램핑력이 9,800 N일 경우는 20,000 rpm, 11,760 N과 13,720 N일 경우는 15,000 rpm 이하에서만 접촉률 80% 이상을 유지하였다. BBT type의 경우는 JS7기준을 적용할 경우 고려한 모든 하중영역에서 접촉률 80% 이상을 유지하였고, K7기준을 적용할 경우 주축 회전수 20,000 rpm 이하의 모든 조건에서만 접촉률 80% 이상을 유지하였다.

이상의 결과에서 BBT type의 경우가 축방향 정밀도 뿐만 아니라 굽힘 강성 측면에서도 BT type의 경우보다 유리한 것으로 판단되며, 고속회전에서 테이퍼 접촉률 또한 우수한 것으로 나타났다. 따라서 동일한 주축에서 툴링시스템 만을 BT type에서 BBT type으로 바꿀 경우 테이퍼 접촉률 분석을 통한 정강성 측면에서만 본다면 약 25%의 주축 회전

수를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 동일한 주축 회전수일 경우에도 접촉률 향상에 의한 주축 떨림의 감소로 가공물의 치수 정밀도, 표면품질 향상 등 고품위 가공이 가능할 것으로 기대된다. 추후 추가적인 해석을 통해 주축 떨림에 대한 정량적인 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

Table 4 Contact interval results by finite element analysis

Clamping force [N]	Rotation speed [rpm]	Contact interval [%]			
		BT		BBT	
		JS7	K7	JS7	K7
9,800	10,000	100	100	100	100
	15,000	100	100	100	100
	20,000	100	83.05	100	100
	25,000	100	57.63	100	65.52
11,760	10,000	100	100	100	100
	15,000	100	98.31	100	100
	20,000	100	77.97	100	100
	25,000	100	52.55	100	60.34
13,720	10,000	100	100	100	100
	15,000	100	93.22	100	100
	20,000	100	72.88	100	100
	25,000	100	49.15	100	56.9
Rotation speed [rpm]	Clamping force [N]	Contact interval [%]			
		BT		BBT	
		JS7	K7	JS7	K7
10,000	9,800	100	100	100	100
	11,760	100	100	100	100
	13,720	100	100	100	100
15,000	9,800	100	100	100	100
	11,760	100	98.31	100	100
	13,720	100	93.22	100	100
20,000	9,800	100	83.05	100	100
	11,760	100	77.97	100	100
	13,720	100	72.88	100	100
25,000	9,800	100	57.63	100	65.52
	11,760	100	52.55	100	60.34
	13,720	100	49.15	100	56.9

4. 결론

주축 회전수 및 클램핑력에 따른 테이퍼 접촉률 변화 특성을 평가하기 위해 ANSYS를 이용하여 BT

type, BBT type의 주축 인터페이스 형태에 대해 비선형 해석을 수행 하였고, 그 결과를 분석하기 위해 치수공차 개념을 이용한 테이퍼 접촉률 평가방법을 제안하였다. 제안한 테이퍼 접촉률 평가방법 및 유한요소해석으로부터 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 상용하는 끼워맞춤 중 중간 끼워맞춤에서 정하는 치수 허용차 내에 있을 때 이상적으로 접촉되어 있는 것으로 가정하고, 이것을 해석적 방법을 이용한 테이퍼 접촉률 평가방법으로 제안하였다.

2. 제안된 주축 인터페이스 접촉률 평가방법을 이용하여 분석한 결과, 본 연구에서 고려한 BT type 주축의 경우 15,000 rpm이하에서는 항상 접촉률 80% 이상을 유지하였다. 하지만 클램핑력이 11,760 N 이상, 주축회전수가 20,000 rpm 이상일 경우는 만족하지 못하였다. 따라서 이 경우는 주축 인터페이스 접촉률 저하에 의한 진동과 굽힘 강성 등의 문제가 생길 것으로 사료된다.

3. BBT type 주축의 경우 최대 작동영역인 20,000 rpm 이하에서는 항상 접촉률 80% 이상을 유지하였다. 이는 플랜지면의 접촉에 의한 마찰효과가 주축 선단의 변형을 억제하였기 때문으로 사료된다. 따라서 본 연구를 통해 일반적으로 알려진 BBT type 툴 생크의 장접인 축 방향 정밀도 저하 방지뿐만 아니라 고속회전으로 인한 접촉률 저하 방지에도 큰 효과가 있다는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다.

4. 유한요소해석을 통해 BT type과 BBT type의 최대 변형량 발생 부위를 비교해 본 결과, BBT type의 경우 최 선단 측에서 조금 위쪽에서 최대 변형량이 발생하였다. 이를 통해 BT type과 BBT type이 동일한 접촉률을 유지할 경우 BBT type이 밴딩 강성 측면에서 더 유리할 것으로 사료된다.

5. 동일한 주축에서 툴링시스템 만을 BT type에서 BBT type으로 바꿀 경우 테이퍼 접촉률 분석을 통한 정강성 측면에서만 본다면 약 25%의 주축 회전수를 증가시킬 수 있을 것으로 판단되고, BT type의 경우는 클램핑력이 주축 테이퍼부의 접촉률에 큰 영향을 미치므로 주축 개발과정에서 클램핑력 선정에 보다 신중해야 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 주축 회전수와 클램핑력에 따른 주축 선단의 변형량을 조사하여 접촉률을 분석하였다. 이때 절삭저항의 영향은 고려하지 않아 클램핑력에 의한 효과를 제대로 분석할 수 없었다. 따라

서 향후 이에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 생각되며, 또한 접촉률을 평가할 수 있는 실험적 방법을 개발하여 해석결과와 비교해 봄으로써 제안된 테이퍼 접촉률 평가방법의 검증이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Zverev, I. A., Eun, I. U., Chung, W. J., Lee, C. M., "Thermal Model of High-Speed Spindle Units," KSPE International Journal, Vol. 17, No. 5, pp. 668-678, 2003.
2. Chernopyatov, Y. A., Lee, C. M., Chung, W. J., "A New Approach Increasing the Rotational Accuracy of Ball-Bearing Spindle by Using Proper Bearing Positioning," KSPE International Journal, Vol. 4, No. 5, pp. 15-22, 2003.
3. Kahng, C. H., "Machine Tool Technology ; The Present and the Future," KSPE, Vol. 12, No. 6, pp. 5-12, 1995.
4. Kim, B. S., Kim, J. K., "A Study on the Stiffness in the Main Spindle Taper of Machine Tool," KSMTE, Vol. 10, No. 6, pp. 15-20, 2001.
5. Kim, J. K., "A Characteristic of Dual-Contact HSK System," KSMTE, Vol. 4, No. 3, pp. 7-11, 1995.
6. Seong, S. H., Lee, D. W., Lee, C. M., Baek, H. J., Oak, J. S., Choi, U. J., "Dual-Contact Tooling System for 5-Head Router Machine," KSPE conference proc., pp. 788-791, 2004.
7. Kalpakjian, S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials," Prentice Hall, pp. 178-181, 2002.
8. Lee, J. W., Kim, J. H., Kim, K. H., "Mechanical Drawing & Auto CAD 2000," Bookshill, pp. 65-75, 2000.