

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

황영국*, 조영덕(창원대 대학원 기계설계공학과), 이춘만, 정원지(창원대)

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

Y. K. Hwang, Y. D. Cho(Grad. Students, CNU), C. M. Lee, W. J. Chung(Dept. of Mech. Design & Manufacturing, CNU)

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 evaluation 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 샙크), 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 회전속의 고속화, 주축 강성의 증대, 이송속도의 고속화, ATC의 고속화 등 기계와 공구의 고성능화는 물론 공작기계와 공구를 인터페이스하는 툴링기술 역시 중요시되고 있다.

고속, 고정밀 가공에 적합한 툴링 조건에 대한 문제로는 툴 홀더 샙크(Shank)의 형상문제, 주축과 공구의 클램핑(Clamping) 문제가 주요 논의의 대상이 되고 있다. 즉 공구를 공작기계에 얼마나 고정밀도로 부착시킬 것인가와 그 상태를 가공 중에도 얼마만큼 유지시킬 수 있는가 하는 것이다. 이는 공작기계와 고속, 고정밀화 됨에 따라 주축 인터페이스

이스부의 강성에 점점 더 큰 영향을 미치므로 중요시되고 있다.

현재 주로 사용되고 있는 툴 홀더 샙크로는 일면 구속 방식인 BT 샙크가 주로 사용되고 있다. BT 샙크는 주축이 고속 회전함으로 인해 툴링 회전의 불균형에 기인하는 진동, 원심력에 의한 주축 선단의 변형에 의한 축방향 정밀도 저하, 원심력에 의한 클램핑력(Clamping force) 저하 등으로 인해 고속가공에의 적용에 그 한계가 있다. 이에 상기의 문제점들을 개선할 수 있는 고속·고정밀 대응 샙크로써 주축 선단의 Taper 면과 Flange 면을 동시에 접촉시키는 이면 구속 방식의 샙크들이 연구, 실용화 되고 있다. 하지만 이 방식들 또한 규격화, 기존의 BT 샙크와의 호환성, ATC 등 기존 주변 장치의 활용 등 여러 가지 문제점들이 있다. 따라서 고속가공기의 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 스테드(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 적게 가하면 공구의 bending 강성이 저하되고 진동이 발생하여 가공결과에 악영향을 끼친다. 따라서 적절한 클램핑력의 선정이 중요하지만 현재 대부분 경험에 의존하고 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 공작기계 주축이 고속회전함에 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 일차적으로 BT40용 주축 인터페이스 형태에 대해 클램핑력, 주축 회전수 변화에 따른 테이퍼 접촉률 변화 특성을 해석적 방법을 이용하여 고찰함으로써 임의의 주축 직경에서 BT40용 주축 인터페이스 형태에 대한 최적의 클램핑력 및 회전수를 제시하고자 한다.

2. 접촉률 평가 방법

주축에서 테이퍼 접촉률은 일반적으로 Fig.1에 보이는 Plug taper gage를 사용하여 측정한다. 이것은 정지 상태의 접촉률을 측정하므로 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 위해 치수공차(tolerance)와 끼워맞춤(fit)의 개념을 도입하였다.



Fig. 1 Taper gage

일반적으로 두 물체가 접촉되었다는 것은 두 물체사이에 틈새(clearance)가 존재하지 않는다는 것이

다. KS B 0401에서 정의하는 끼워맞춤 중 헐거운 끼워맞춤(clearance fit)은 항상 틈새가 생기는 끼워맞춤이고, 억지 끼워맞춤(interference fit)은 항상 틈새가 없는 끼워맞춤이다. 주축 테이퍼부와 툴 홀더 생크부 간에 틈새가 있을 경우는 횡방향 진동을 발생시켜 가공 정밀도를 악화시키고 결합부 강성 또한 저하된다. 반면 틈새가 있을 경우 두 물체가 완전히 접촉되어 있지만 과도한 unclamping 시간 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 논문에서는 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 인터페이스부가 구멍이 되고, 툴 홀더 생크부가 축이 된다. 이때 주축 인터페이스의 선단부는 주축 회전수에 따른 변형량의 차이에 의해 여러 개의 공차역 클래스가 발생할 수 있으므로 구멍기준 끼워맞춤을 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 Table 1에 보이는 상용하는 축기준 끼워맞춤을 적용하여 평가하였다.

Table 1 Preferred tolerance for shafts

기준 축	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		E7	F7	H7									
			F8	H8									

주축 인터페이스 부위의 접촉여부를 평가하기 위 구멍의 공차역 클래스가 JS7, K7인 두 가지 경우를 적용하여 각각 평가해 보았다. 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 [μm]	
30-50	12	7

3. 유한 요소 해석

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

3.1 유한요소 모델링

본 연구에서는 D사의 직경 64mm, 최대 20,000rpm, BT40용 스피들들을 주축 선단만을 고려한 2차원 축대칭 형상으로 단순화하여 모델링 하였다. 유한요소해석 모델은 Fig. 2와 같으며 주축 테이퍼부와 톨 홀더 생크의 두 개의 부분으로 구분하여 총 4,814개의 절점과 4,744개의 요소로 모델링 하였다. 해석에 사용된 요소는 2차원 4절점 이고, 요소의 거동은 축대칭으로 하였다.

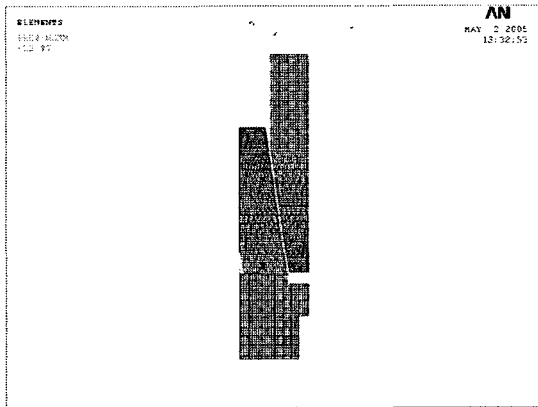


Fig. 2 F.E.M modeling of spindle interface

하중조건은 클램핑력 및 주축 회전에 의한 원심력의 효과를 고려하기 위해 다단계 하중을 적용하였다. 즉 첫 번째 하중 단계에서 톨 홀더 부위에 클램핑력을 적용하고 두 번째 하중 단계에서 전체 부위에 주축 회전에 의한 원심력을 적용하여 해석을 수행하였다. 적용 하중 조건은 Table 3과 같다.

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 해석 결과 및 고찰

Fig. 4~7은 회전속도 및 클램핑력에 따른 주축 테이퍼부의 각 노드점에서의 변형량을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 노드번호에 대한 주축 테이퍼부의 위치는 Fig. 3과 같다. 주축 회전수와 클램핑력이 커질수록 변형량이 점점 커짐을 알 수 있다. 또한 노드 번호가 커질수록, 즉 주축 선단쪽의 변형량이 그 위쪽보다 더 큼을 알 수 있다. 이는 접촉이 떨어지는 부위가 주축의 선단쪽, 즉 가공 부위에서 가까운 쪽부터 일어나므로 반대의 경우보다 가공 품위에 더 큰 악영향을 끼침을 알 수 있다. 또한 주축 회전수가 클램핑력보다 테이퍼 접촉률에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

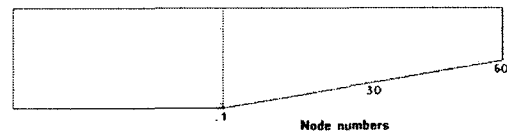


Fig. 3 Node number for modeling of spindle taper hole

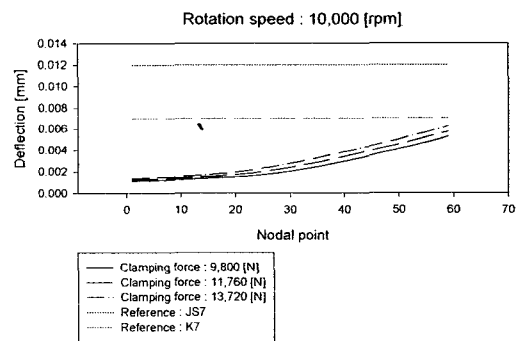


Fig. 4 Spindle taper hole deflection for rotational speed=10,000 rpm

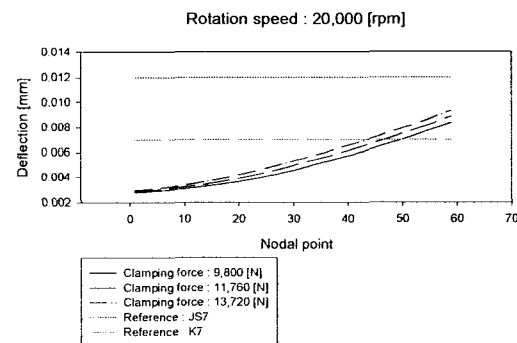


Fig. 5 Spindle taper hole deflection for rotational speed=20,000 rpm

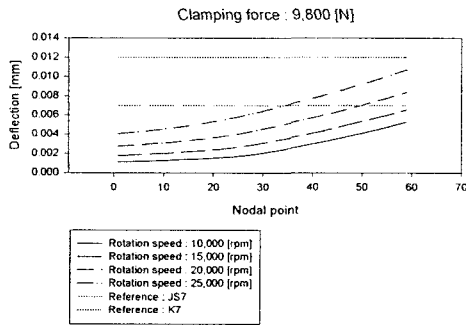


Fig. 6 Spindle taper hole deflection for clamping force=9,800 N

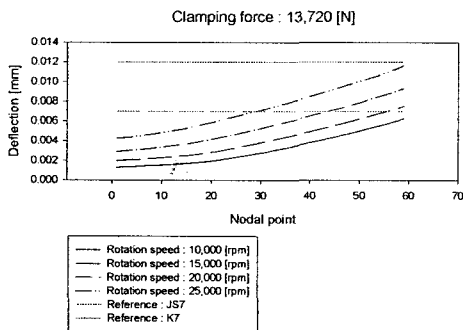


Fig. 7 Spindle taper hole deflection for clamping force=13,720 N

일반적으로 공작기계 주축 인터페이스 부위는 접촉률을 80% 이상 유지해야 한다. 해석결과 Table 4에서 확인할 수 있듯이 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.

Table 4 Results of finite element analysis

Clamping force [N]	Rotation speed [rpm]	공차의 위치에 따른 접촉률 [%]	
		JS7	K7
9,800	10,000	100	100
	15,000	100	100
	20,000	100	83.05
	25,000	100	57.63
11,760	10,000	100	100
	15,000	100	98.31
	20,000	100	77.97
	25,000	100	52.55
13,720	10,000	100	100
	15,000	100	93.22
	20,000	100	72.88
	25,000	100	49.15
Rotation speed [rpm]	Clamping force [N]	공차의 위치에 따른 접촉률 [%]	
		JS7	K7

10,000	9,800	100	100
	11,760	100	100
	13,720	100	100
15,000	9,800	100	100
	11,760	100	98.31
	13,720	100	93.22
20,000	9,800	100	83.05
	11,760	100	77.97
	13,720	100	72.88
25,000	9,800	100	57.63
	11,760	100	52.55
	13,720	100	49.15

4. 결론

주축 회전수 및 클램핑력에 따른 테이퍼 접촉률 변화 특성을 평가하기 위해 ANSYS를 이용하여 비선형 해석을 수행하였고, 그 결과를 분석하기 위해 치수공차 개념을 이용한 테이퍼 접촉률 평가방법을 제안하였다. 유한요소해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주축 회전수가 클램핑력보다 주축 인터페이스의 접촉률에 미치는 영향이 더 큼을 확인할 수 있었다.

2. 제안된 주축 인터페이스 접촉률 평가방법을 이용하여 분석한 결과, 본 연구에서 고려한 주축의 경우 15,000 rpm 이하에서만 항상 접촉률 80% 이상을 유지하였다. 따라서 클램핑력이 11,760 N 이상, 주축 회전수가 20,000 rpm 이상일 경우는 주축 인터페이스부의 접촉률 저하에 의한 진동과 강성 문제가 심각할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 주축 회전수와 클램핑력에 따른 주축 선단의 변형량을 조사하여 접촉률을 분석하였다. 이때 결삭저항의 영향은 고려하지 않아 클램핑력에 의한 효과를 제대로 분석할 수 없었다. 따라서 향후 이에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강철희, “공작기계기술의 현재와 미래(3)”, 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 6, pp. 5-12, 1995
- 김배석, 김중관, “공작 기계 주축 테이퍼 결합부 정강성에 관한 연구”, 한국공작기계학회, Vol. 10, No. 6, pp. 15-20, 2001
- 서남섭, “최신 기계공작법”, 동명사, 2002