

절삭저항을 고려한 툴 인터페이스부의 정강성 분석

신재호*, 이춘만+, 황영국**

(논문접수일 2007. 11. 28, 심사완료일 2008. 2. 25)

A Study on Static Stiffness of Tool Interfaces Considering Cutting Resistance

J. H. Shin*, C. M. Lee+, Y. K. Hwang**

Abstract

Spindle units of machine tool are very important part in the manufacturing area. Recently high speed machining has become the main issue of metal cutting. To develop high speed machine tools, a lot of studies have been carried out for high speed spindle. Due to increase of the rotational speed of the spindle, there has been renewal of interest in tooling system of high speed spindle. This paper concerns the static stiffness in the main spindle interface according to variation of clamping force, rotational speed and tool holder shank. Finite element analysis is performed by using a commercial code ANSYS workbench. From the results, it has been shown that the geometry of tool holder shank is mostly influence on the variation of the static stiffness in the main spindle interface.

Key Words : Static stiffness(정강성), High speed spindle(고속 주축) Dual contact tooling system(이면 구속 툴링 시스템)

1. 서론

최근 공작기계 기술은 고속 절삭을 통한 생산성 및 가공정밀도의 향상, 난삭재의 고능률 가공을 지향하여, 공작기계 주축의 고속화에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 고속절삭을 적용하면 종래의 복잡한 생산공정이 합리화되며 가공 정밀도나 가공면 품질의 향상 그리고 가공 비용 절감 등의 효과가 기대되는 반면, 거기에는 해결하여야 할 많은

과제도 존재한다. 이와 같은 흐름속에 고속 주축에서 툴링 시스템의 역할 또한 재인식되었으며, 그 관련 연구로서 고속 주축에서 클램핑력(clamping force) 및 회전수 변화에 따른 주축 인터페이스(interface) 접촉률 변화에 관한 연구⁽¹⁾, 유한 요소법을 이용한 주축 인터페이스부의 정강성 특성⁽²⁾, 절삭저항을 고려한 이면구속공구의 주축 인터페이스부 접촉률 분석에 관한 연구⁽³⁾ 등이 보고되고 있다.

주축의 고속화로 인한 툴링시스템(tooling system)의 문

* 창원대학교 기계설계공학과

+ 교신저자, 창원대학교 메카트로닉스공학부 (cmlce@changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

** 창원대학교 기계설계공학과

점은 툴링의 회전불균형으로 인한 진동, 원심력에 의해 주축 테이퍼(taper)가 확장되고 드로우바(draw bar) 인장력에 의해 툴링이 축방향으로 가라앉는 현상, 원심력에 의해 공구 파지력의 저하 등이 있다. 이러한 문제점에 대응하여 툴링의 내,외경 연삭 다듬질 및 평형잡기, 열박음 척 및 압입 척의 개발 등, 고속 회전형 툴링의 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있다.

현재 주로 사용되고 있는 툴 홀더 생크(tool holder shank)는 BT 생크로, 주축 선단의 테이퍼면의 일면만을 구속하는 일면 구속 방식의 생크이다. 일면 구속 방식의 생크는 상기에 열거한 진동, 툴링의 가라앉음, 공구파지력의 저하 등 문제점을 가지고 있어 고속회전의 적용에 한계가 있다.

이러한 문제점을 개선한 고속, 고강성의 생크로써, 주축 선단의 테이퍼면과 플랜지면(flange)에 동시에 접촉하는 HSK, BBT, KM, CAPT 등의 이면구속방식의 생크가 연구, 개발되었으며 일부 기술 선진국에서 채택하여 사용되고 있다. HSK, KM, CAPT 등의 생크는 일면 구속 방식의 툴홀더에 비하여 고강성 구조로 정동적 안정성이 높으며, 중공축을 채용하여 중실축을 채용한 생크에 비해 질량이 작아 원심력에 의한 나쁜 영향이 적어 고속대응에 유리한 측면을 가지고 있다. BBT 생크는 BT 생크의 형상에 플랜지면의 구속을 추가시켜, 종전의 BT타입의 스피ndl과 ATC 등 주변 장치와 호환이 가능하다는 장점이 있어 착실히 보급되고 있다.

현재 여러 종류의 생크가 채택되고, 각각의 규격에 대하여 연구가 활발히 진행되고 있지만 규격들 간의 직접적인 성능의 비교에 대한 보고는 많지 않다. 이에 본 논문에서는 기하학적 형상이 다른 규격들의 주축 운전시의 정강성을 비교하고자 한다.

본 논문에서는 HSK, BBT, BT 타입 중, 중절삭 가공용 생크 6종에 대하여 클램핑력, 주축 회전수, 절삭저항에 따른 툴 홀더 생크부의 변위를 도출하고, 그 결과를 분석하였다.

2. 유한 요소 해석

사용하는 툴 홀더 생크, 각 규격들에 대한 절삭저항에 의한 굽힘강성, 주축 회전에 의한 원심력효과, 클램핑력에 의한 툴 홀더 생크의 가라앉음 현상의 변화를 분석하기 위하여 실험계획을 수립하고 상용 코드인 ANSYS Workbench를 이용하여 유한 요소 해석을 수행하였다.

2.1 유한 요소 모델링

본 논문에서 고려된 툴 홀더 생크의 규격은 HSK타입의 HSK63, HSK100시리즈, BBT타입의 BBT40, BBT50시리즈, BT타입의 BT40, BT50시리즈이다. 중절삭 이상의 가공에 사용되는 툴홀더를 고려하였다. 스피ndl의 유한 요소모델은 주축 선단만을 고려하여 3차원 모델을 구축하였으며, 전 모델에서 스피ndl의 길이는 같으며, HSK63, BBT40, BT40의 스피ndl 외경이 동일하며, HSK100, BBT50, BT50의 스피ndl 외경을 동일하게 하였습니다. 스피ndl 직경은 국내 스피ndl 전문 업체의 설계도면을 참고하여 모델을 구축하였다. 각 규격의 툴 홀더 생크는 절삭저항을 부여하고 축방향 및 반경 방향 변위를 측정하기 위하여 생크부 이외에 콜릿(collet)의 모델을 추가하였으며 툴홀더 모델의 외경은 테스트 아바(test abar)를 참고하여 모델링하였다.

하중 조건은 다단계하중으로 클램핑력, 회전에 의한 원심력, 절삭저항의 순서로 부여하였으며, 구속조건은 앵글러 콘택트 볼 베어링의 구속효과를 주기 위하여 주축 밑단을 구속하였다. 클램핑력, 회전속도, 절삭저항의 수준과 툴 홀더 생크의 규격은 Table 1에 나열하였다. 스피ndl의 회전속도는 국내 중절삭용 스피ndl의 운전속도를 조사하여 3수준으로 선정하였으며, 클램핑력과 절삭력은 선행연구^(1,2)의 해석조건

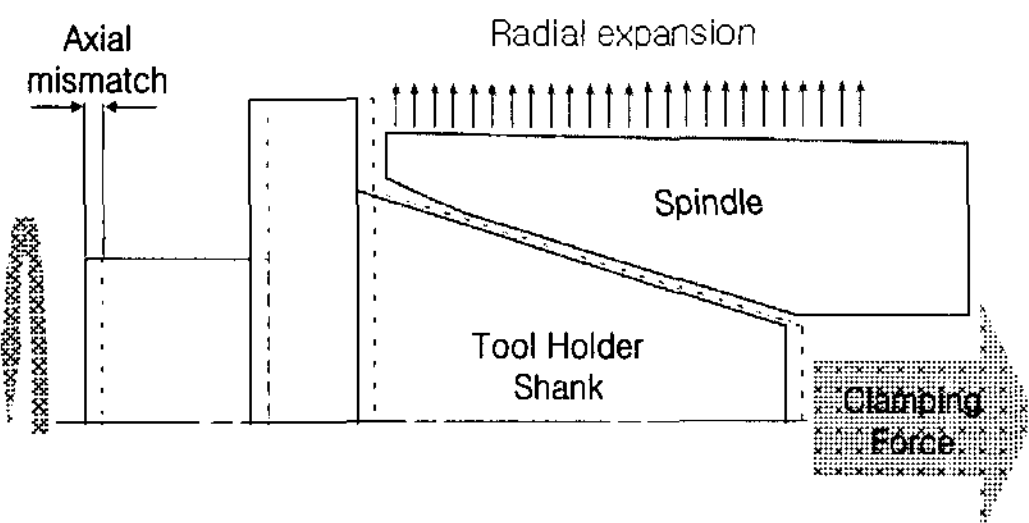


Fig. 1 Axial mismatch of BT shank(7/24 long taper)

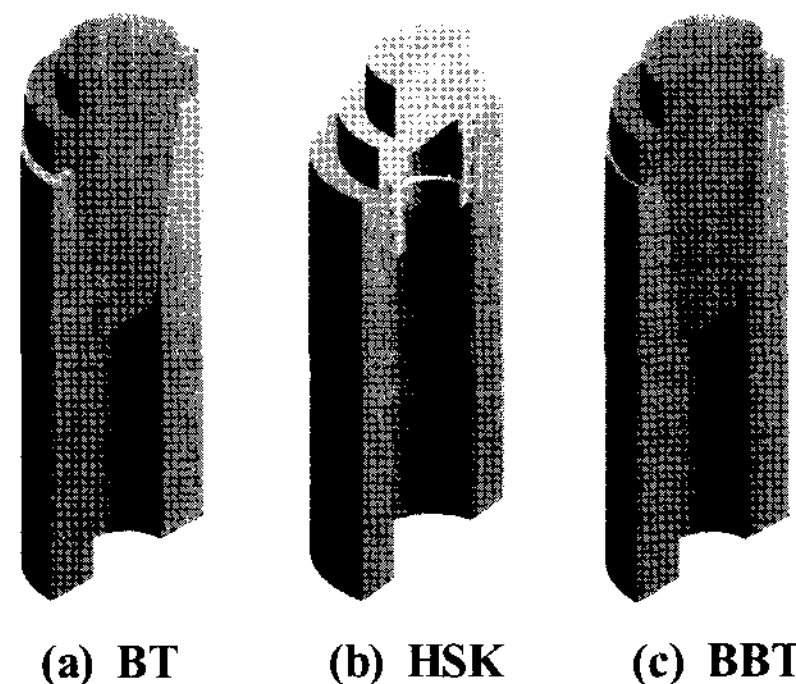


Fig. 2 3-D Modeling of Tool holder shank

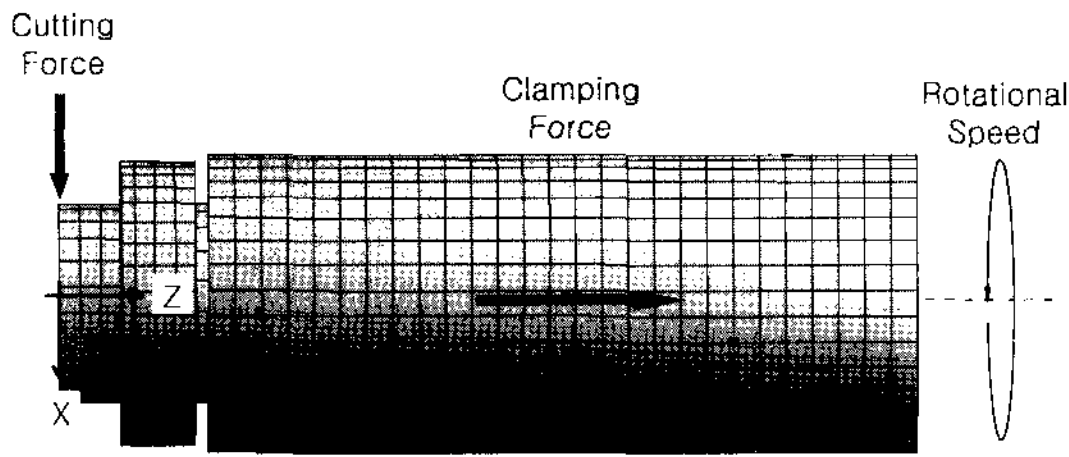


Fig. 3 FE model of tool holder shank

Table 1 Load condition for finite element analysis

Shank type	Rotational speed	Clamping force	Cutting force	
	[RPM]	[N]	[N]	
BT40	15,000	9,800	500	
BT50				
BBT40	20,000			
BBT50				
HSK63	25,000			13,700
HSK100				

을 참고하였다. Fig. 3은 주축 인터페이스의 유한 요소 모델이다. 주축의 테이퍼, 플랜지면과 툴 홀더 생크의 경계조건에는 금속간의 마찰효과를 고려한 접촉 경계조건을 적용하여 유한 요소 해석을 수행하였다.

2.2 해석결과 및 고찰

일반적으로 절삭 가공 시에 툴 홀더 생크의 거동을 살펴본다면 클램핑력에 의해 툴 홀더 생크가 축방향으로 가라앉고, 주축이 회전하여 원심력에 의해 주축테이퍼부가 확장되며, 절삭 가공중의 저항에 의하여 굽힘 하중을 받게 된다.

툴 홀더 생크에 가해지는 하중, 경계의 형상 변화 등은 주축과 공구 체결의 주요 논점인 공구를 공작기계에 얼마나 고정밀도로 부착하는가와 그 상태를 가공 중에 얼마만큼 유지시킬 수 있는가의 문제와 직결된다.

본 논문에서는 상기 문제의 후자의 관점에 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 따라서 공구체결의 기하학적 오차는 고려되지 않았으며, 공구 체결 후 절삭가공시의 툴 홀더 생크의 점 P의 변위를 도출함으로써 각 규격의 툴 홀더 생크의 정강성을 분석하고자 하여, 고속절삭 가공에 있어서의 정밀가공에 적합한 툴 홀더 생크 선정에 도움이 되고자 하였다.

점 P의 위치는 툴 홀더 생크의 콜릿부의 선단면 정중양의

Table 2 Result of finite element analysis

Shank type	Rotational speed [RPM]	Clamping force [N]	Cutting force [N]	Radial displacement of point P [μm]	Axial displacement of point P [μm]
BT40	15,000	9,800	500	8.364	22.989
		13,700	500	8.326	27.081
	20,000	9,800	500	8.435	33.559
		13,700	500	8.367	37.601
	25,000	9,800	500	8.544	46.888
		13,700	500	8.445	51.198
BT50	15,000	9,800	500	6.593	52.380
		13,700	500	6.248	55.596
	20,000	9,800	500	6.798	88.571
		13,700	500	6.646	92.495
	25,000	9,800	500	7.933	133.69
		13,700	500	7.661	137.70
BBT40	15,000	9,800	500	7.662	6.835
		13,700	500	7.393	8.258
	20,000	9,800	500	8.296	9.537
		13,700	500	7.931	10.886
	25,000	9,800	500	9.192	12.883
		13,700	500	8.536	14.308
BBT50	15,000	9,800	500	5.119	10.591
		13,700	500	4.115	11.220
	20,000	9,800	500	6.780	17.680
		13,700	500	6.163	18.260
	25,000	9,800	500	7.485	26.699
		13,700	500	6.429	27.363
HSK63	15,000	9,800	500	4.546	8.412
		13,700	500	4.170	9.594
	20,000	9,800	500	5.507	12.731
		13,700	500	4.854	13.878
	25,000	9,800	500	7.004	18.141
		13,700	500	5.881	19.331
HSK100	15,000	9,800	500	4.227	11.020
		13,700	500	3.206	11.410
	20,000	9,800	500	5.074	18.813
		13,700	500	3.924	19.230
	25,000	9,800	500	8.040	28.836
		13,700	500	5.723	29.221

지점이며 Fig. 4와 같다.

BT40, BBT40, HSK63타입의 툴홀더 생크의 반경 방향변위의 해석 결과는 Fig. 5~6에 선도로 나타내었다. 위 두 선도

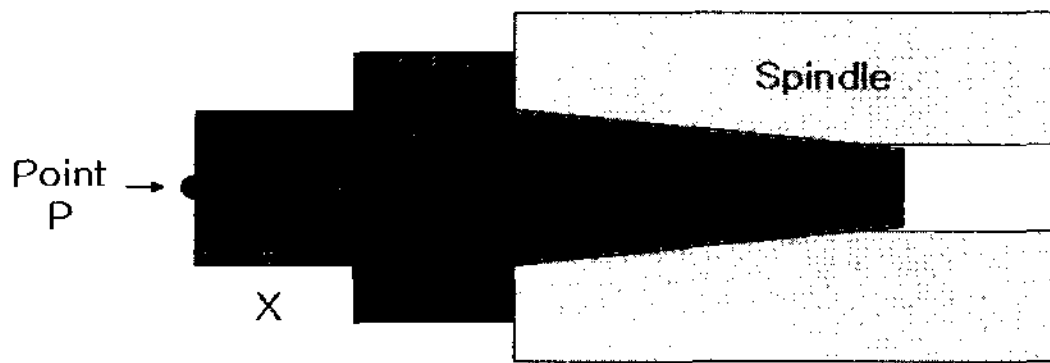


Fig. 4 Position of point P

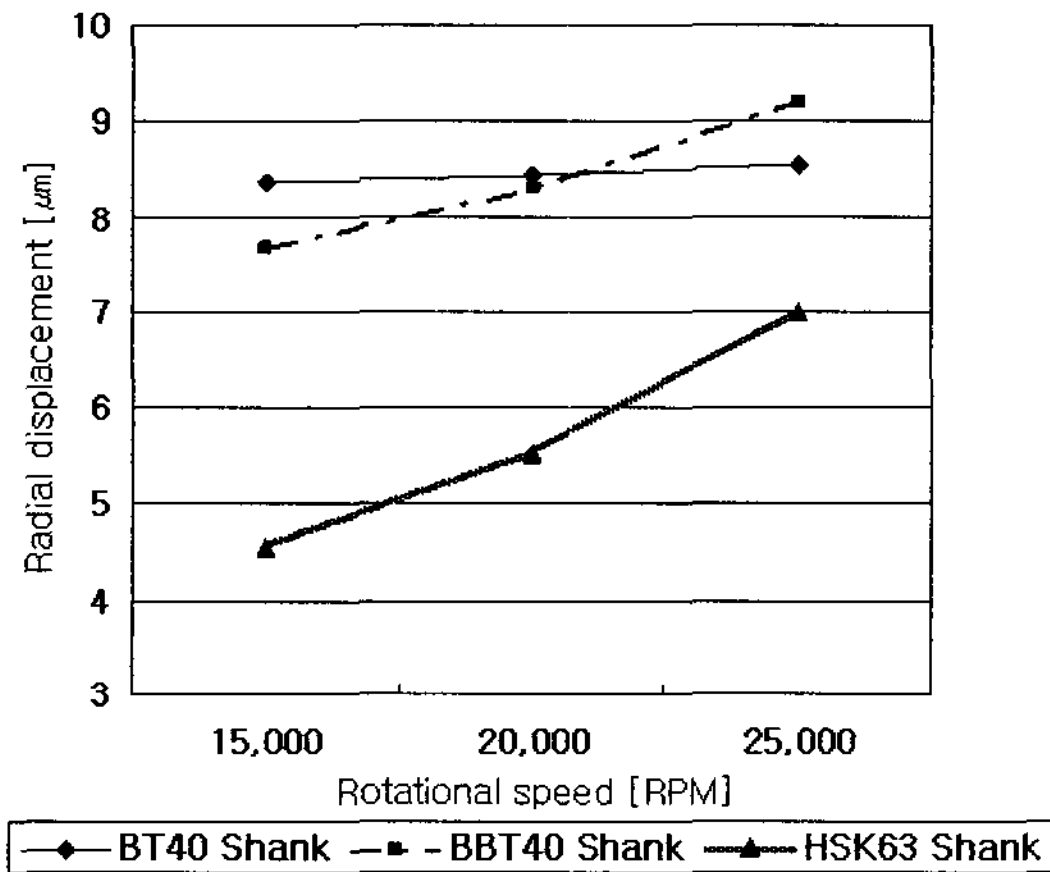


Fig. 5 Rotational speed vs. Radial displacement (Clamping force = 9,800N)

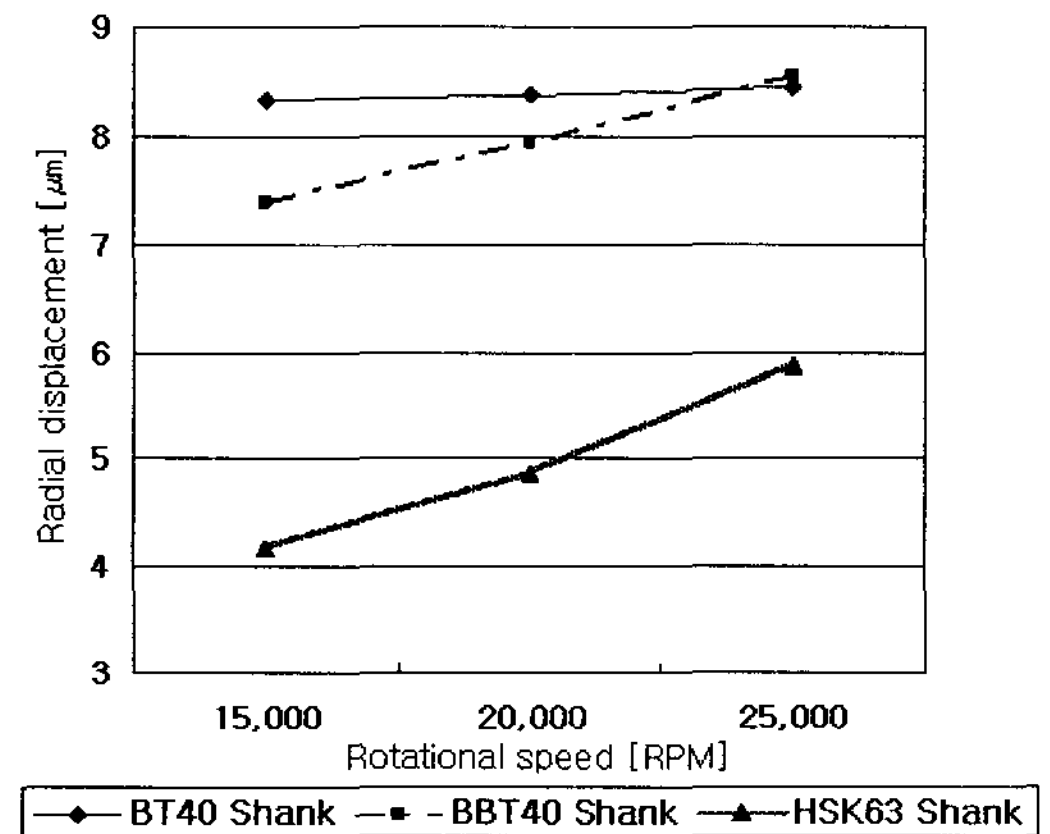


Fig. 6 Rotational speed vs. Radial displacement (Clamping force = 13,700N)

에서 나타난 바와 같이 BT40 생크의 경우 회전속도의 영향에 대한 영향은 거의 받지 않고 회전속도의 전 구간에서 거의 비슷한 반경방향 변위가 도출되었다. BBT40 생크의 경우, 회전속도 25,000RPM 구간에서는 BT40 생크에 비하여 더 큰 반경방향 변위를 보였다. 이는 두 타입의 생크가 테이퍼 구조가 동일하나 주축 선단면 팽창으로 인하여 BBT40 생크의 플랜지면이 반경방향으로 당겨지는 효과가 나타난 것이다.

HSK63 생크는 회전속도 전 구간에서 BT40, BBT40 생크에 비하여 약 50%의 변위가 도출되어 우수한 반경방향 강성을 보였으나, 회전속도가 15,000RPM에서 25,000RPM으로 증가함에 따라 변위증가의 구배가 커지는 것을 확인하였다. 이는 HSK

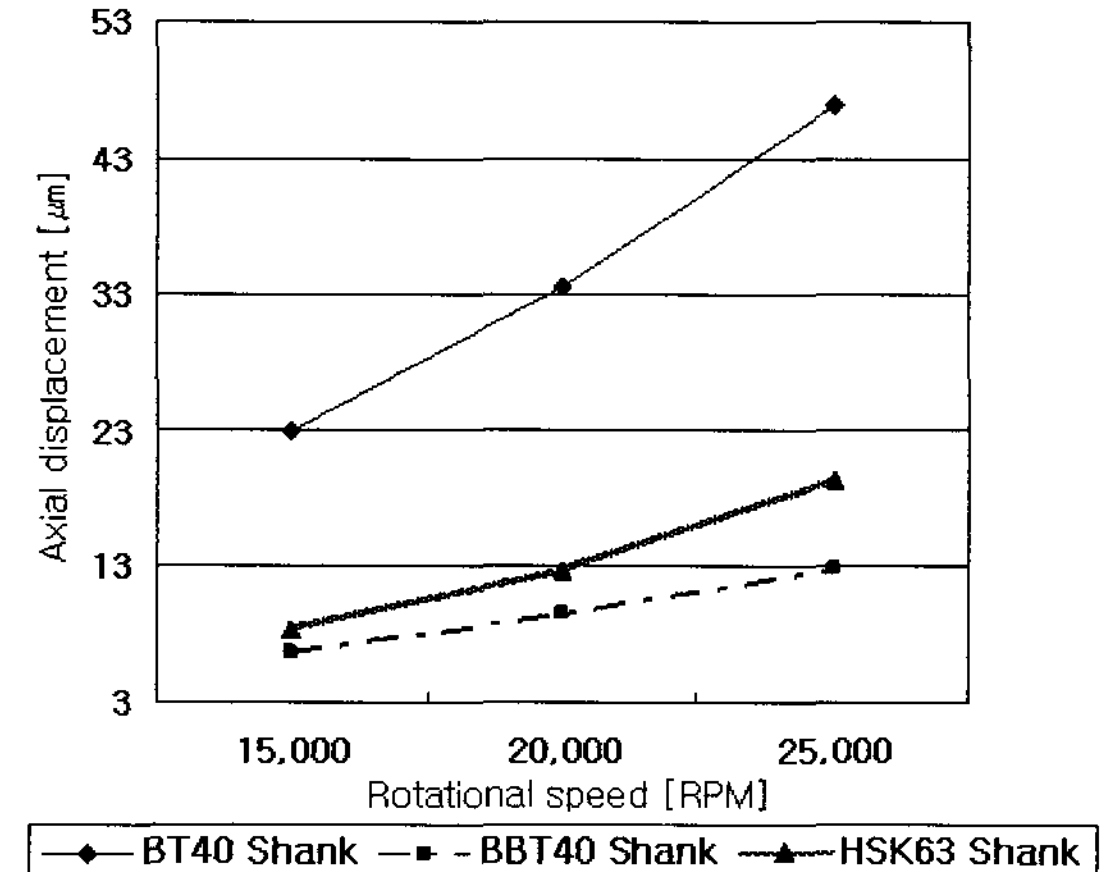


Fig. 7 Rotational speed vs. Axial displacement (Clamping force = 9,800N)

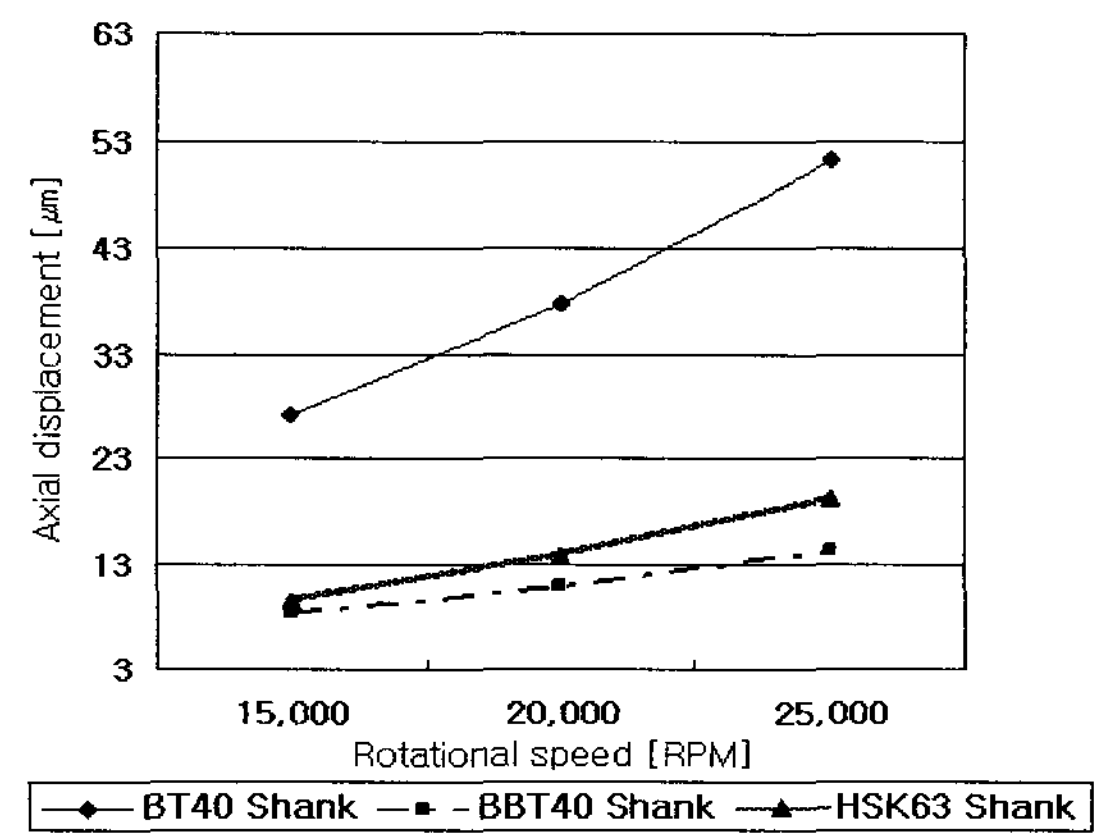


Fig. 8 Rotational speed vs. Axial displacement (Clamping force = 13,700N)

생크의 구조가 증공축을 채용하여 증실축을 채용한 BT, BBT 생크에 비하여 원심력에 대한 반경방향 강성이 취약한 것으로 나타났다. 또한 전체 구간에서 모든 규격의 툴홀더 생크가 클램핑력이 9,800N일 때보다 13,700N일 때 작은 변위가 도출되었다. 클램핑력이 강해지면 반경방향 강성이 강해진다는 연구 결과도 보고되어 있으며 이를 해석적으로 확인하였다. 축방향 변위의 해석 결과는 Fig. 7~8에 나타내었으며, 일면 구속 방식의 툴홀더 생크인 BT 생크의 변위가 BBT, HSK 생크의 변위에 대하여 10 μ m이상, 약 3배의 변위가 도출되었다. 이는 생크의 거동에서 언급한 바와 같이, 툴링의 가라앉음 현상이 나타난 것인데 반해, 플랜지면이 주축의 테이퍼 면과 동시에 접촉하는

BBT, HSK 생크에서는 작은 변위가 도출되었으며, HSK 생크가 BBT 생크에 비하여 약간 더 우수한 강성을 보였다.

세 타입의 생크 모두 회전속도 전 구간에서 회전속도가 커질수록 축방향 변위가 증가하였다. 회전속도가 커지면, 주축의 반경방향 팽창량이 커져 툴홀더 생크가 축방향으로 밀려들어가는 툴링의 가라앉음 현상이 발생하며 이는 일면 구속방식의 생크에서 두드러지게 나타난다. 또한 클램핑력이 커지면 축방향 변위도 커지는 경향을 나타내었다.

Fig. 9~10은 BT50, BBT50, HSK100 툴홀더 생크의 반경방향 변위의 해석 결과이다. 반경방향 변위해석의 결과에서는 거의 모든 구간에서 BT40, BBT40, HSK63 생크의 변위보다

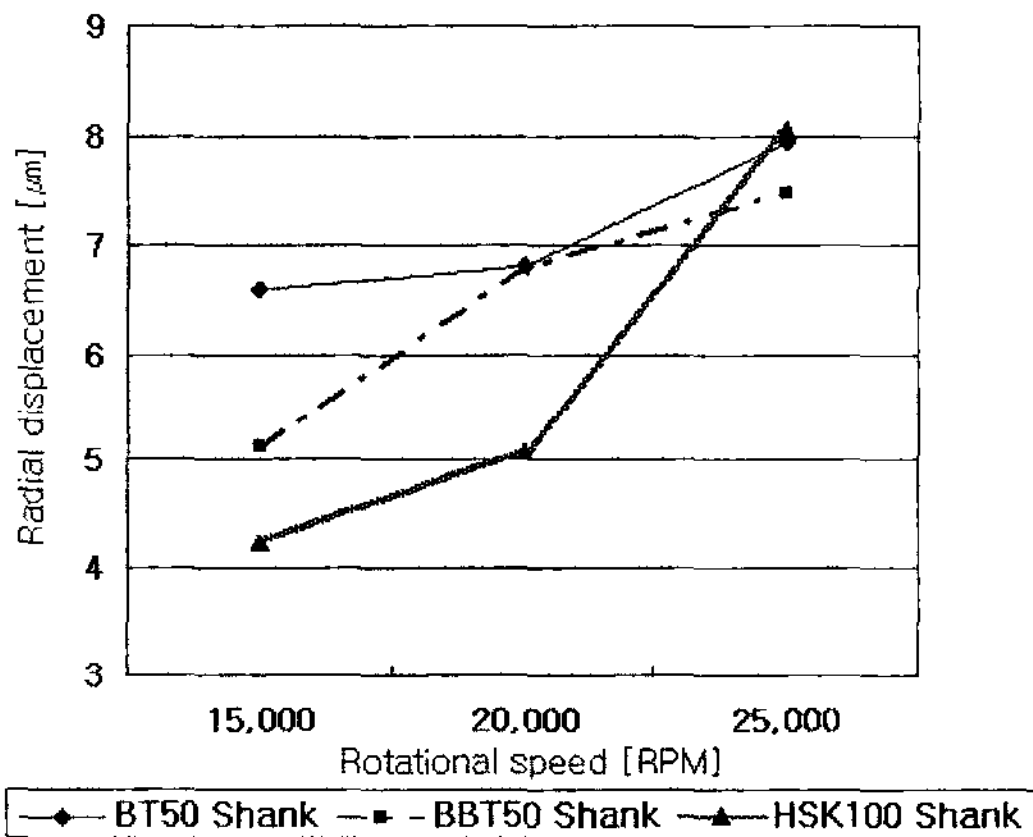


Fig. 9 Rotational speed vs. Radial displacement (Clamping force = 9,800N)

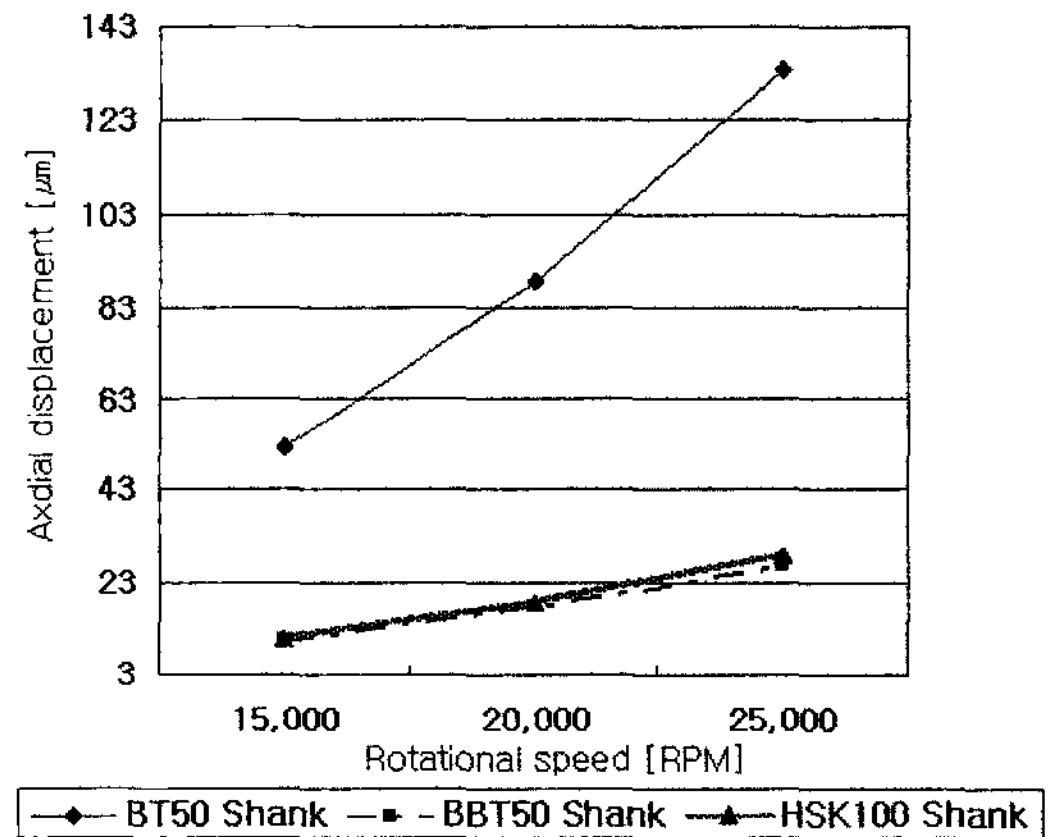


Fig. 11 Rotational speed vs. Axial displacement (Clamping force = 9,800N)

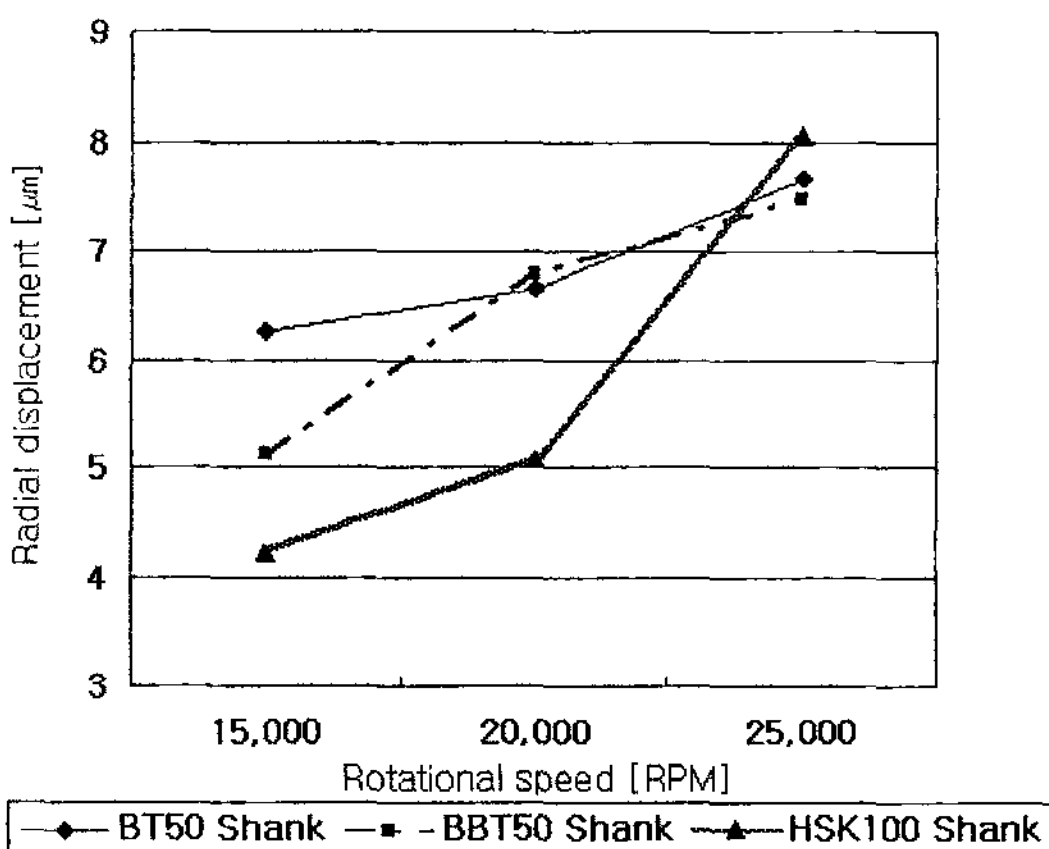


Fig. 10 Rotational speed vs. Radial displacement (Clamping force = 13,700N)

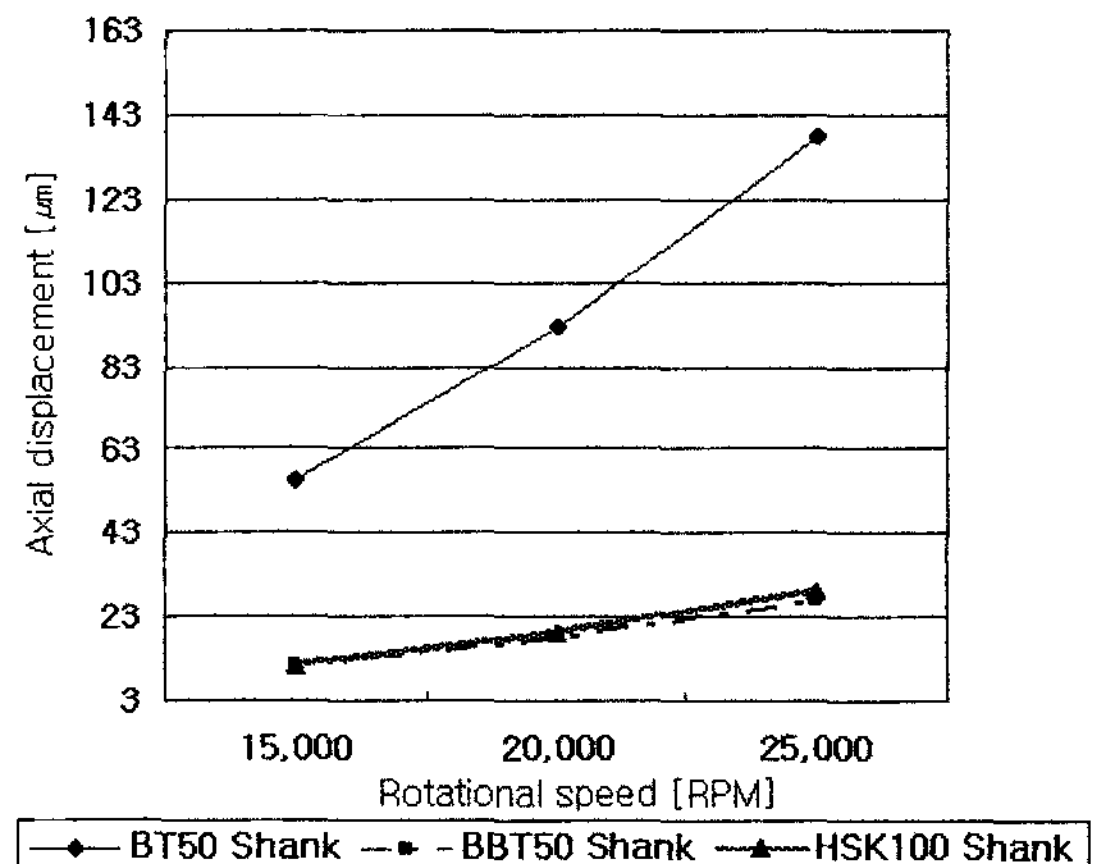


Fig. 12 Rotational speed vs. Axial displacement (Clamping force = 13,700N)

작은 변위가 도출되었다. 반경방향 절삭 저항 500N은 절삭 수준으로 볼 때 중절삭에 해당한다고 볼 수 있다. 위의 결과에서 BT40급의 툴링 시스템에 비하여 BT50급의 툴링 시스템이 더 적은 변위를 나타내, 피삭재의 기하학적 오차 생성 및 기계 강성 측면에서 볼 때 중절삭에 더 유리한 것으로 나타났다. BBT50 생크와 HSK100 생크의 경우 약 1 μ m 정도로 HSK100 생크의 변위가 작았으며, 일면 구속 방식의 툴 홀더 생크인 BT50의 반경 방향 변위가 가장 크게 도출되었다.

HSK100 생크의 경우 HSK63 생크의 해석에서의 회전 속도 상승에 의한 변위 상승의 효과가 매우 크게 나타났으며, 이는 주축과 툴 홀더 생크 외경이 HSK63 생크에 비해 크므로 원심력에 의한 반경방향 팽창량의 증가로 인한 것이다.

Fig. 11~12는 BT50, BBT50, HSK100 툴 홀더 생크의 축방향 변위의 해석 결과이다. 이전의 BT40, BBT40, HSK63 생크의 축방향 변위와 비교하여 보았을 때, BT50, BBT50, HSK100 생크의 변위가 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 BT50, BBT50, HSK100 등 BT50급 해석모델의 외경이 BT40급의 모델에 비하여 증가하였으나, 축방향 길이는 동일하여, 원심력에 의한 반경 방향 팽창이 증가하여 나타난 결과이다. BT50 생크의 해석에서 축방향 변위는 BBT50, HSK63 생크의 해석결과와 비교할 때, 이전 BT40 생크의 해석 결과와 마찬가지로 월등히 큰 것으로 나타났다. 일면 구속 방식의 툴 홀더 생크는 원심력으로 인한 주축 테이퍼부의 확장의 영향을 받아 축방향 가라앉음 현상이 더 두드러지게 나타났으며, 전 구간에서 축방향 변위는 클램핑력이 커질수록, 회전속도가 빨라질수록 커지는 경향을 보였다.

3. 결론

유한요소법을 이용하여 상용하는 툴 홀더 생크인 BT, BBT, HSK 타입의 툴 홀더 생크에 대하여 클램핑력, 주축의 회전속도, 절삭저항을 부여하여 주축 인터페이스부의 정강성을 해석적으로 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 해석의 전 구간에서 BT40, BBT40, HSK63 생크 등 BT40급의 해석의 결과에 비하여 BT50급의 반경 방향 변위가 작게 도출되어 BT50급이 중절삭에 더 유리함을 확인하였다.
- (2) 일면구속 방식의 BT 생크에 비하여 이면 구속 방식의 BBT, HSK 생크에 대한 반경방향 변위가 작으므로 강성이 더 높은 것으로 나타났으나, 중공의 형상을 가진 HSK 생크는 세 가지 타입의 생크 중, 회전속도 증가에

- 의한 반경방향 변위 증가율이 가장 큰 경향을 보였다.
- (3) 일면구속 방식인 BT 생크는 주축회전으로 인한 반경방향 팽창과 클램핑력으로 인하여 생크가 주축에 축방향으로 밀려 들어가는 툴의 가라앉음 현상이 두드러지게 나타난 반면에 BBT, HSK 생크 등, 이면구속 방식의 생크가 플랜지면의 구속으로 축방향 변위가 일면 구속에 비하여 월등히 작게 도출되었으며, 고속회전에서도 높은 축방향 강성을 나타냈다.
- (4) 세 가지 타입의 툴 홀더 생크의 해석에서 클램핑력이 강해지면 반경방향 변위가 작게 나타나, 클램핑력이 강할수록 주축인터페이스의 반경 방향 강성 또한 증가하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03]과 지역산업기술개발사업[10027452] 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Ro, S. K., Park, J. K., and Kyung, J. H., 2003, "Analysis of Dynamic Characteristics of A High-speed Milling Spindle," *Transactions of the KSMTE spring* pp. 484~487.
- (2) 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 KSPE 02F093* pp. 985~988.
- (3) Hwang, Y. K., Lee, C. M., and Chung, W. J., 2007, "Static Stiffness Characteristics of Main Spindle Interface using Finite Element Method," *Journal of the KSPE* Vol. 16, No. 1.
- (4) Kim, S. T., Chio, D. B., and Cho, W. S., 2002, "Analysis on the Thermal Characteristics of the Spindle with High Frequency Motor according to the Cooling Methods," *Journal of the KSPE* pp.969~974.
- (5) Song, C. K. and Shin, Y. J., 2004, "Effect of Preload on Running Accuracy of High Speed Spindle," *Transaction of the KSMTE* Vol. 11 No. 2.