

## 공작기계 주축 테이퍼 결합부 정강성에 관한 연구

김배석\*, 김종관\*\*

### A Study on the Static Stiffness in the Main Spindle Taper of Machine Tool

Bae-Suck Kim\*, Jong-Kwan Kim\*\*

#### Abstract

This paper presents the experimental study of the static stiffness for the BT shank(7/24 long taper) and the HSK tool shank(1/10 short taper) in the main spindle taper of machine tool. The static stiffness test was performed under different experimental conditions.

It is turned out that the effective axial drawing force is larger than 6kN in the 7/24 test tool shank and 8kN in the 1/10 test tool shank. As a test result, considering that the actual drawing force of the machining center is about 1300kgf and axial drawing force 12kN is equivalent amount as a 1220kgf, it is turned out that 1/10 test tool shank superior to 7/24 test tool shank in the static stiffness.

**Key Words :** Static stiffness(정강성), Axial drawing force(축인장력), Main spindle taper(주축 테이퍼부)

### 1. 서 론

공작기계 산업은 전체 기계공업 산업 발전을 주도하는 핵심 기반 산업이며, 특히 제품의 품질 향상, 생산성 향상 및 관련 산업의 기술 개발을 좌우하는 필수적인 분야이다. 최근 공작기계 기술 개발 방향은 고정밀화, 고속화, 고성능화를 지향하고 있으며, 머시닝센터를 이용한 고속 절삭 가공시 이들 욕구의 충족을 위하여 다양한 툴링 기술

의 연구<sup>(1)</sup>가 요구되고 있다.

머시닝센터에서 툴링은 기계 본체와 절삭 공구간의 인터페이스를 다루는 것으로써, 고속, 고정밀, 지능화, 다기능화, 무인화에 적용하기 위한 것이다. 고속 절삭 가공을 위해서는 툴링 시스템의 강성을 높여 진동 절감을 통한 양호한 주축구조가 설계되어야 하고 고속 회전마찰에 의한 발열 억제 문제가 해결되어야 한다.

일반적으로 주축 결합부는 일정 규격의 테이퍼로 만들

\* Graduate school, Chosun Univ.  
(김배석 kabas098@hanmail.net)  
\*\* Chosun Univ.

고 틀 홀더 역시 테이퍼 생크로 만들어 완전 결합시킨 구조로, 홀더 교환시 오차가 적고, 결합강성이 크고, 고정밀도 결합이 가능하고, 주축과의 조립 및 분해가 용이하다는 장점<sup>(2)</sup>들로 장기간에 걸쳐 사용되어 왔다.

주축과 공구의 테이퍼 결합부에 관한 연구로서 7/24 테이퍼 결합부 강성에 관한 실험적, 이론적 연구<sup>(3)</sup>가 행해졌고, 7/24 테이퍼를 포함한 6종류의 테이퍼 비의 공구모형을 사용하여 결합부 강성에 미치는 테이퍼비 영향도 실험적으로 고찰<sup>(4)</sup>되었다. 그리고 보다 고속회전 특성에 부합되는 툴링 시스템 연구로는 공구결합부에 플랜지 형상을 갖는 1/10 중공 테이퍼 생크공구에 대한 연구<sup>(5)</sup>가 수행되었다.

최근 사용되는 머시닝센터의 주축 최고 회전수는 10,000rpm 이상을 넘어 고속화되면서 지금까지 채용되고 있는 BT 생크(7/24 롱 테이퍼)로는 여러가지 문제점<sup>(6)</sup>들이 나타나고 있다. 즉, BT 생크는 테이퍼부만이 접촉하면서 회전하므로, 저속회전에 비하여 고속회전시 원심력과 열변형으로 인해 주축 테이퍼부가 확장되고, 드로잉 볼트의 인장력에 의해서 틀 생크가 주축에 미끄러져 들어가므로 축방향 정밀도를 저하시키게 되며, 테이퍼 구멍은 마모에 의해 형상 정밀도를 악화시키고 횡방향 진동을 발생시켜 결과적으로 공작물의 가공 정밀도에 악영향을 미치는 결과를 초래한다. 따라서 BT 생크의 문제점을 보완하여 보다 고속화 되어지고 있는 주축 설계에 대응하고자 새로운 툴링 시스템의 연구개발이 추진되고 있으며, 대표적으로 틀 생크 형식이 1/10 슛 테이퍼에 플랜지 측면과 테이퍼부를 2면 접촉시켜 결합부 강성을 보강한 새로운 방법으로 2면 구속 Hollow Shank(HSK)<sup>(7-8)</sup>가 개발되어 실용화에 대한 각종 실험이 진행되고 있다.

1/10 중공 테이퍼 생크는 7/24 생크에 비하여 ①굽힘 강성이 일반적으로 높고, ②자동 공구교환시의 위치 정도가 극히 양호하고, ③공구의 위치 조정 없이 고정도 가공 조작을 행할 수 있고, ④공구 교환 시간이 짧은 장점을 인정받고 있으나, 지금까지 모든 공작기계 주축들이 7/24 생크를 채용하여 공급되었기 때문에 신속한 교체는 불가능한 상태이지만, 초고속회전이 요구되는 전용 공작기계는 1/10 중공 테이퍼 생크 채용으로 상기 장점을 충분히 활용할 수 있으므로써 가공 부품의 정밀도와 생산성 향상을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 상용 머시닝센터의 BT 생크(7/24 롱 테이퍼)와 최근 고속 고강성용으로 채택되고 있는 1/10 슛 테이퍼의 2면 구속 생크(HSK)를 모델화한 실험장치를 통

해서 툴링 시스템의 정강성 측면에서 공구 고정을 위한 인장력과 절삭력 작용조건에 따라 테이퍼 결합부의 하중변위 거동의 고찰을 통해서 HSK 툴링 시스템과 BT 툴링 시스템의 주축 정강성 특성을 실험적 방법으로 규명하고자 하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 주축 정강성

일반적으로 공작기계 주축의 하중-변위선도는 비선형 특성을 보이지만 공작기계 강성의 평가에 사용되는 일정한 굽힘 하중에 미치는 강성은 식 (1)과 같다.

$$k = \frac{F}{\delta} \text{ (kN/}\mu\text{m)} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 정강성,  $F$ 는 하중점에 작용시킨 굽힘 하중,  $\delta$ 는 굽힘 하중에 의한 하중점의 변위

### 2.2 경사각

Fig. 1은 굽힘 하중에 따른 축 변형을 표시하고 있다. 정강성  $k$ 는 결합부 이외에 공구 원통부의 굽힘 변형이 포함되어 있다. 하중  $F$ 를 작용시켰을 때 하중점의 변위  $\delta$ 는 식 (2)와 같다.

$$\delta = \delta_o + \delta_\theta + \delta_E \text{ (}\mu\text{m)} \quad (2)$$

여기서,  $\delta_o$ 는 기준면에서 테이퍼 축심의 반경방향 변위,  $\delta_\theta$ 는 기준면에서 테이퍼 축심의 경사에 의한 변위,  $\delta_E$ 는 공구 원통부의 탄성 변형에 의한 변위

여기서 하중점에서 기준면 사이의 5점에서 측정한 변위  $\delta$ 는  $\delta_E$ 를 포함한 값으로 하고  $\delta_o + \delta_\theta$ 를 구한다.  $\delta_o + \delta_\theta$ 는 직선으로 되며 이것을 최소 자승법을 사용하여 직선 근사하고, 그 직선의 구배  $\alpha$ 를 구하여 경사각  $\theta$ 로 한다.

$$\theta = \tan^{-1} \alpha \approx \alpha \quad (3)$$

이에 의하면  $\delta_E$ 는 공구의 기하학적 형상 및 재질에 의해서 결정되어 지며 인장력  $P$ 와는 관계가 없다. 따라서  $\delta_o + \delta_\theta$ 는 결합부의 존재에 의해서 생긴 변위로 된다. 단,  $\delta_o$ 는 많은 경우 무시할 수 있는 작은 값이며 결합부

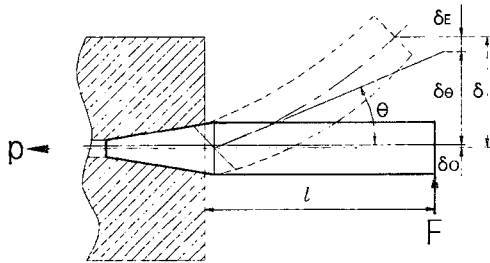


Fig. 1 Deformation of taper shank tool

의 존재에 따른 최대의 영향은  $\delta_\theta$  로 표시된다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

##### 3.1.1 테스트용 툴 생크

본 연구에 사용한 테스트용 툴 생크는 KS B 4014<sup>(9)</sup>의 "7/24 테이퍼의 주축끝 및 생크"에 명시된 호칭 번호 40(BT40)의 테이퍼부 대경부의 치수( $\phi 44.45$ )와 KS B 526410의 "테스트 바"에 명시된 7/24 테이퍼붙이 테스트 바 테이퍼 번호 40에 의해서 직경  $\phi 40$ , 유효측정 길이 300mm로 2mm의 게이지 라인을 두어 제작 사용하였다. 테이퍼 접촉률은 테이퍼 게이지에 의해서 80% 이상임을 확인하였으며, 접촉면은 SCM415강 재질로 침탄열처리 후 연삭하였다. 상기 7/24 테이퍼 생크인 BT40에 동일한 조건으로 테이퍼 대경부 치수가  $\phi 48.43$ mm로 2면구속 1/10 테이퍼 생크의 HSK-63 테스트용 툴 생크를 제작하였다. HSK-63 테스트용 툴 생크는 테이퍼부와 플렌지부가 동시에 접촉되는 양면 구속형으로 되어 게이지 라인이 없으며 직경  $\phi 40$ , 유효측정 길이 300mm로 하였으며 접촉부는 접촉률 80% 이상이 유지되도록 열처리후 연삭을 행하였으며 동일재료와 조건으로 제작하였다. 제작된 실물 툴 생크는 Photo.1과 같다.

##### 3.1.2 주축 정강성 실험장치 및 제작

주축 정강성 실험을 위하여 자체 제작한 실험 장치는 Photo. 2와 같다. 이 장치는 결합부의 강성을 비교 측정하기 위하여 작용 하중과 공구에 해당하는 툴 생크와 주축 몸체에 해당하는 부시(Bush)를 인장 볼트로 강력 체결시킨 구조로 설계 제작하였으며, 따라서 BT40 툴 생크와 HSK63의 규격에 맞는 테이퍼 부시를 별도 제작하였고

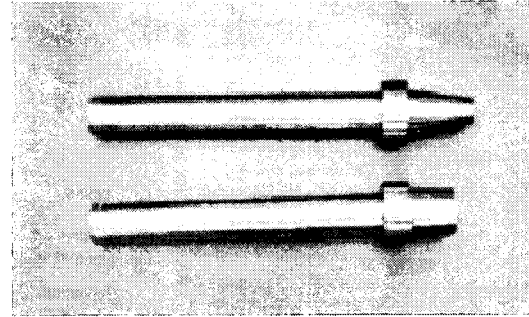


Photo. 1 The shape of BT40 & HSK63 test tool shank

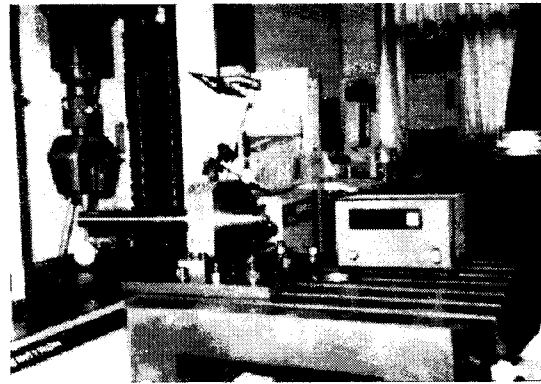


Photo. 2 Photograph of experimental apparatus

견고한 정반 위에 설치된 블록에 상호 교환 되도록 고정시킨 구조이다. 툴 생크를 결합시키기 위한 인장용 볼트는 토크 렌치를 사용하여 인장력을 가하도록 하였으며 힘의 간섭을 피하고 균일한 축방향 하중이 작용하도록 설계 제작하였다.

주축재료는 높은 경도와 강성을 요구하고 특히 표면에서의 높은 경도가 필요하다. 따라서 각각의 테이퍼 부시는 주축 재료 중에서 SCM415강을 사용하여 제작하였으며 테스트 바의 끝단에 작용하는 굽힘 하중에 대해 충분한 기계적 강도와 강성을 유지되도록 위해 블록 및 테스트 바와의 접촉 부위는 침탄 열처리하여  $H_{RC}55$  이상으로 급속 표면을 경화시키고 연삭가공하였다.

#### 3.2 실험 방법

공작기계 주축단부는 비교적 높은 경사의 테이퍼부로 인장력에 의한 삽입작업을 행하는 셸프 릴리스 테이퍼로

설계 되어 있으며, 풀 스테디 부분에 가해지는 인장력은 BT40의 경우 약 1300 kgf가 적용된다. 본 실험에서는 주축과 공구를 결합시키는 인장 볼트에 가해지는 인장력과 작용 하중에 따른 주축 테이퍼부에서 공구를 체결해주는 정도가 되는 정강성을 측정하기 위하여, 2kN, 4kN, 6kN, 8kN, 10kN, 12kN의 인장력을 작용시켜 주축과 공구 결합력을 변화시키고, 절삭력이 작용하는 동일한 조건으로 테스트 툴 생크 끝단에 작용 하중을 0에서 1.2kN까지 작용 하면서 생크 끝단에서 발생하는 최대 변위량과 변위 형상을 측정하였다. 테이퍼부 접촉면 상태는 윤활 상태에서 양호한 결합 특성을 나타내므로 머신 油 No.10을 살포한 윤활 상태에서 실험을 하였다. Fig. 2는 변위량 측정 장치 개략도이다.

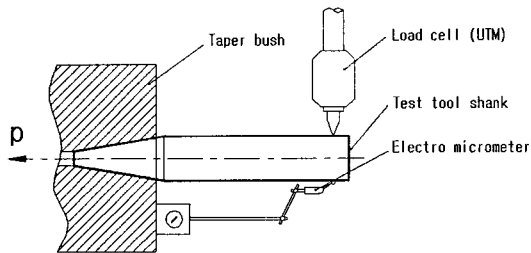


Fig. 2 Schematic diagram for deflection test device

주축계의 굽힘 변위에 의한 정강성 시험 방법은 KS B 4001<sup>(11)</sup> 규정에 준하며, 이는 선반의 주축 및 심압대, 내면 연삭기의 슛돌축 및 공작기계의 주축계의 굽힘 강성의 시험법으로, 주축에 축 직각 방향의 하중을 가했을 때의 하중 방향 변위량을 테스트 인디케이터로 측정하는 조건으로 수행하는 시험방법이다. 이 시험법에 따라서 300mm 테스트 툴 생크 끝단에 가해지는 작용하중은 Instron 4206-001, U.T.M(Universal Testing Machine)을 사용하였으며, 각각의 인장력을 작용시키는 방법은 토크 렌치를 사용하여 최대 1.2kN 까지 작용 하중을 증가시키면서 발생하는 각각의 변위량을 측정하였다. 굽힘 변위량의 측정은 KS 규정에 준하며, 변위 측정점은 BT40에서는 툴 생크의 플렌지면에서 끝단으로 265mm 지점에서, 그리고 HSK-63은 267mm의 지점에서 생크 끝단부에 직각 방향으로 하중을 가하고 하중점과 일직선상의 축 직각방향에서 다이얼 게이지를 사용하여 변위값을 측정하였으며, 여기서 굽힘 하중이 작용할 때 볼트 체결 부분인 블럭과 테이퍼 부시에 자체 변위

오차가 발생하여 툴 생크의 전체 변위량의 변화에 영향을 미칠 수 있으므로 마그네트 스탠드를 테이퍼 부시의 정면에 설치하고 이에 대한 영향을 배제시킨 상태에서 테스트 툴 생크에서 발생하는 굽힘 변위량만을 측정하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 7/24 테스트 툴 생크(BT40)의 정강성

전술한 실험장치 및 방법에 의하여 작용 하중과 굽힘 변위에 대한 실험을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과로써 하중-변위선도는 반경 방향 작용 하중 0.6kN 이하에서의 변화 상태는 거의 선형으로 비례하였으며, 축 방향의 인장력 증가에 따른 변화 상태 또한 거의 유사함을 알 수 있었다. 따라서 주어진 실험조건에서 비교적 적은 범위에서 굽힘 변위량은 축 방향 인장력에 크게 영향을 미치지 않고 일정한 정강성을 유지함을 확인하였으나, 작용하중이 커지면 굽힘 변위량도 선형적으로 비례해서 커지고, 축 방향 인장력이 커질수록 생크와 부시의 결합력이 향상되므로 굽힘 변위량은 점차 적어져서 정강성이 양호해짐을 확인할 수 있었다.

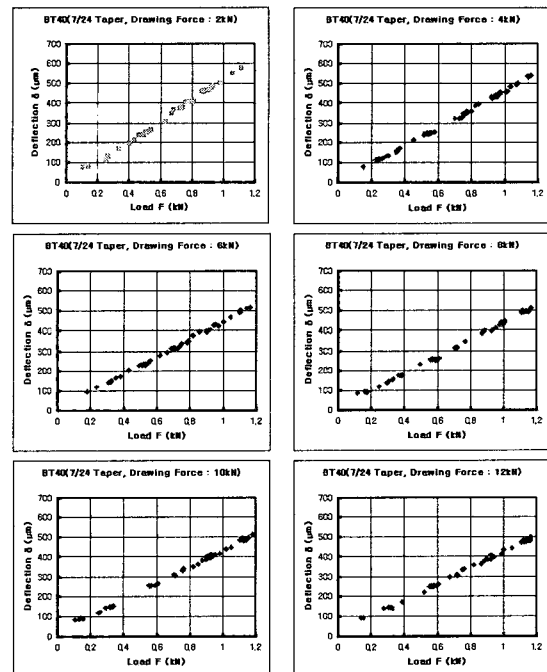


Fig. 3 Tool shank bending deflection values by working load (BT40, Drawing force : 2~12kN)

### 4.2 1/10 테스트 툴 샹크(HSK63)의 정강성

전술한 실험장치 및 방법에 의하여 작용 하중과 굽힘 변위에 대한 실험을 실시하였고, 그 결과를 Fig.4에 나타내었다. 실험 결과로써 1/10 테스트 툴 샹크는 축방향 인장력 6kN 이하에서 하중-변위선도는 일반적으로 비선형으로 비례하는 특성을 보이며 작용 하중에 따른 굽힘 변위량도 급격히 증가됨을 확인 할 수 있다. 이는 샹크 구조상 축 방향 인장력의 부족으로 테이퍼부와 플렌지부가 완전한 2면구속을 이루지 못한 상태에서 작용하중을 받기 때문으로 생각된다. 축 방향 인장력 8kN 이상에서는 하중-변위선도의 변화 상태는 거의 선형의 비례관계를 나타내며, 축 방향 인장력 증가에 따른 굽힘변위량 증가는 약 10%임을 확인할 수 있었다. 따라서 실험 조건에서 1/10 테스트 툴 샹크 결합부 정강성을 유지할 수 있는 축방향 인장력은 8kN 이상임을 확인할 수 있었다.

### 4.3 정강성의 결과 및 고찰

7/24과 1/10 테스트 툴 샹크의 정강성 고찰에 대한 실험 결과를 Table 1에 나타낸다.

실험 결과에서 7/24 테이퍼 샹크는 축 방향 인장력이 증

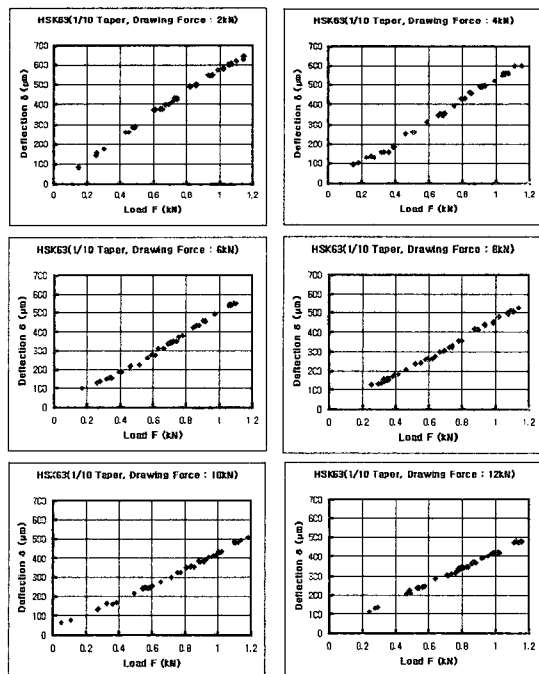


Fig. 4 Tool shank bending deflection values by working load(HSK63, Drawing force : 2~12kN)

가하면 정강성도 선형적으로 비례증가하게 되는 특성을 보이며, 축방향 인장력에 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 1/10 테이퍼 샹크는 축방향 인장력이 6kN 이하에서는 작용 하중에 비례하여 변위량이 점차 증가하지만 8kN 부터는 굽힘 변위량이 2배 이상 증가되며, 따라서 정강성은 축 방향 인장력에 크게 받아서 하중증가에 따라 비례함을 확인할 수 있다. 축 방향 인장력 6kN 까지는 7/24 테이퍼가 1/10 테이퍼에서 보다 정강성이 약 15%정도 우수함을 보이며, 축방향 인장력 8kN 이상에서부터는 1/10 테이퍼의 정강성이 우수함을 확인할 수 있다. 이는 축방향 인장력이 적은 경우에는 테이퍼의 접촉면적이 정강성에 직접적인 영향 인자로 작용하여 접촉 면적이 약 1.7배 큰 7/24 테이퍼의 정강성이 우수하게 나타나는 것으로 사료된다. 그러나 인장력이 커지면 1/10 테이퍼 샹크에서는 테이퍼부와 플렌지부가 2면 구속됨에 따라 정강성은 급격히 상승하게 되어 축 방향 인장력이 정강성에 커다란 영향을 미친다고 할 수 있다. 그러나 1/10 테이퍼 샹크는 제작상 또는 보관상 오차로 인하여 완전한 2면 구속이 이루어지지 않게 되면 기존의 7/24 테이퍼 샹크보다도 정강성이 저하되고 결과적으로 가공정도도 급격히 저하되므로 제작기술 및 보관, 유지의 제반 기술의 축적이 필요하다. 7/24 테이퍼의 축방향 인장력 6kN에서 정강성은 1/10 테이퍼의 축방향 인장력 8kN에서의 정강성과 비슷하며, 7/24 테이퍼에서 가장 큰 축방향 인장력 12kN에서의 정강성 1/10 테이퍼의 축방향인장력 10kN에서의 정강성과 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 7/24과 1/10 테스트 툴 샹크의 정강성을 비교한 내용으로, 정강성 비교 결과 축방향 인장력 8kN에서 7/24과 1/10 테이퍼 샹크의 정강성이 유사하게 되며, 그

Table 1 Comparison of the static stiffness of 7/24 taper (BT40) and 1/10 taper(HSK63) shank

Drawing force P (kN)	Static stiffness $k$ (kN/ $\mu$ m)	
	7/24 test tool shank	1/10 test tool shank
2	1.986	1.722
4	2.19	1.862
6	2.21	1.984
8	2.2	2.202
10	2.21	2.307
12	2.3	2.35

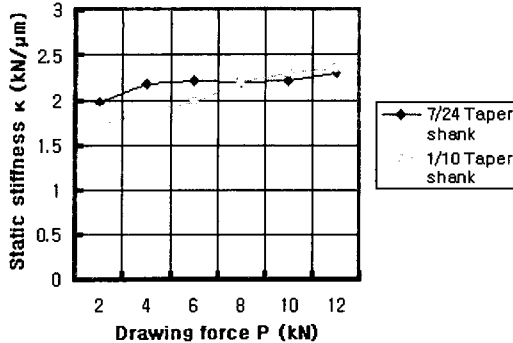


Fig. 5 Comparison of the static stiffness between 7/24 taper (BT40) and 1/10 taper(HSK63) shank

이상의 인장력에서는 2면 구속 형식인 1/10 테이퍼 샹크의 정강성이 우수함을 확인할 수 있다. 이는 상용 머시닝 센터의 7/24 톨 샹크(BT40)의 실용 인장력이 약 1300kgf 임을 감안할 때 인장력 12kN(약 1225kgf)에 상당하는 부분에서 정강성의 영향을 고려하는 것이 바람직하므로 실용성면에서 1/10 테이퍼가 7/24 테이퍼보다도 정강성이 양호한 특성을 실험을 통하여 확인하였다. 또한 테이퍼 결합부의 정강성을 유지할 수 있는 적정한 축방향 인장력은 7/24 테이퍼에서는 6kN 이상, 1/10 테이퍼에서는 8kN 이상임을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 테이퍼부와 플렌지부의 2면 구속용 HSK-63 (1/10 샷 테이퍼)과 BT40 (7/24 룡 테이퍼)를 모델화한 실험장치를 대상으로 테이퍼 결합부의 인장하중 조건과, 반경방향하중 조건에 따른 주축계 굽힘에 대해 실험하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 7/24 테이퍼 샹크(BT40)의 하중-변위선도의 변화상 태는 축방향 인장력에 무관하게 선형적특성을 보이지만, 1/10 테이퍼 샹크(HSK63)의 하중-변위선도는 축방향 인장력 6kN 이하에서는 비선형의 비례특성을 보이며, 그 이상의 인장력이 작용되어야 선형적 비례특성으로 변화함을 확인할 수 있었다.
- (2) 7/24 테이퍼 샹크의 정강성 실험결과에서 축방향 인장력이 6kN에서, 그리고 1/10 테이퍼 샹크에서는 8kN 이상에 이르면 적정 정강성 값이 결정됨을 확인

할 수 있었다.

- (3) 결합부의 적정 인장력(12kN)이 유지된다면 1/10 테이퍼 샹크가 7/24 테이퍼 샹크보다 정강성측면에서 우수함을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 2000년도 조선대학교 학술 연구비 지원을 받아 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) 정성중 : "공작기계 산업의 전망과 과제", 한국공작기계학회지, Vol. 8, No. 1, 1999.
- (2) 강철희 : "공작기계기술의 현재와 미래(3)", 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 6, 1995.
- (3) 堤正巨 : "7/24テ-パ 結合部の剛性に関する研究", 日本機械學會論文集(C編), 48卷, 431號, pp. 1050-1057, 1982.
- (4) 上田和弘 : "圓するテ-パ 比の結合部剛性に及ぼす影響", 東京農工大學昭和63年度修士學位論文研, 1989.
- (5) M. Weck : "Trends of Manufacturing Technology Looking Towards the 21st Century", I-industrial Technical Seminar, Kobe, 1993.
- (6) 월간기계설계 : "고강성의 2면구속 톨 샹크", pp. 119-127. 1994.
- (7) 堤 正巨 : "1/10テ-パ 結合部に關する研究", 精密工學會春季大會學術講演會講演論文集, pp. 899-900, 1996.
- (8) Jim Lorincz : "Unraveling the HSK riddle, Tooling&Production", pp. 39-42, 1994.
- (9) 한국공업규격 : "7/24테이퍼의 주축끝 및 샹크", KS B 4014, 1986.
- (10) 한국공업규격 : "테스트 바", KS B 5264, 1991.
- (11) 한국공업규격 : "공작기계의 시험 방법 통칙", KS B 4001, 1990.