

공작기계 주축 테이퍼 결합부 정강성에 관한 연구

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

김배석* (조선대학교 대학원), 김종관 (조선대학교 기계공학부)

Bae-Suck Kim(Graduate school, Chosun Univ.), Jong-Kwan Kim(Chosun Univ.)

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). The static stiffness test was performed under different experimental conditions. The results obtained are as follows ;

As known in the analysis results of the Load-Deflection diagram of the 7/24 Test tool shank, it is turned out that the diagram is a linear characteristics without regard to axial drawing force, and according as the axial drawing force get to the 6kN, the static stiffness of the shank increase linearly. Thus the effective axial drawing force which maintains the static stiffness of the Main spindle taper of Machine Tool is larger than 6kN. It is found that the Load-Deflection diagram with 6kN of drawing force in the 1/10 Test tool shank is characterized by non-linear. But according as the axial drawing force is increasing by the 8kN, the diagram is characterized by linear. And increasing amount of deflection is about 60%. Therefore commendable axial drawing force is larger than 8kN. As a 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.

1. 서론

머시닝센터에서 틀링은 기계본체와 절삭공구간의 인터페이스를 다루는 것으로서, 고속, 고정밀, 지능화, 다기능화, 무인화에 적용하기 위한 것이다. 고속절삭가공을 위해서는 틀링 시스템의 강성을 높여 진동절감을 통한 양호한 주축구조가 설계되어야 하고 고속 회전마찰에 의한 발열 억제 문제가 해결되어야 한다.

일반적으로 주축결합부는 일정규격의 테이퍼로 만들고 툴 홀더 역시 테이퍼 생크로 만들어 완전 결합시키는 구조로, 그 특징을 살펴보면 홀더 교환시 오차가 적고, 결합강성이 크고, 고정밀도 결합이 가능하고, 주축과의 조립 및 분해가 용이하다는 장점¹⁾들로 장기간에 걸쳐 사용되어 왔다.

주축과 공구의 테이퍼 결합부에 관한 연구로서 7/24 테이퍼 결합부 강성에 관한 실험적, 이론적 연구²⁾가 행해졌고, 7/24 테이퍼를 포함한 6종류의 테이퍼 비의 공구모형을 사용하여 결합부 강성에 미치는 테이퍼비 영향도 실험적으로 고찰³⁾되었다. 그리고 보다 고속회전 특성에 부합되는 틀링 시스템 연구로는 공구결합부에 플랜지 형상을 갖는 1/10 중공 테이퍼 생크공구에 대한 연구⁴⁾가 수행되었다.

최근 사용되는 머시닝센터의 주축 최고회전수는 10,000rpm 이상을 넘어 고속화되면서 지금까지 채용되고 있는 BT 생크(7/24 Long taper)로는 여러가지 문제점⁵⁾들이 나타나고 있다. 즉, BT 생크는 테이퍼부만이 접촉하면서 회전하므로, 저속 회전에 비하여 고속회전시 원심력과 열변형으로 인해 주축 테이퍼부가 확장되고, 드로잉 볼트의 인장력에 의해서 툴 생크가 주축에 미끄러져 들

여기서, k 는 정강성, F 는 하중점에 작용시킨 굽힘하중, δ : 굽힘하중에 의한 하중점의 변위

여기서, k 는 정강성, F 는 하중점에 작용시킨 굽힘하중, δ : 굽힘하중에 의한 하중점의 변위

여기서, k 는 정강성, F 는 하중점에 작용시킨 굽힘하중, δ : 굽힘하중에 의한 하중점의 변위

2. 2 경사각

Fig. 1은 굽힘하중에 따른 축변형을 표시하고 있다. 정강성 k 는 결합부 이외에 공구원통부의 굽힘변형이 포함되어 있다. 하중 F 를 작용시켰을 때 하중점의 변위 δ 는 식 (2)와 같다.

$$\delta = \delta_0 + \delta_\theta + \delta_E \quad (2)$$

여기서, δ_0 는 기준면에서 테이퍼 축심의 반경방향 변위, δ_θ 는 기준면에서 테이퍼 축심의 경사에 의한 변위, δ_E : 공구 원통부의 탄성변형에 의한 변위

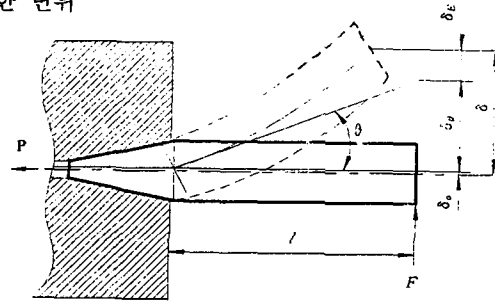


Fig. 1 Deformation of Taper shank Tool

여기서 하중점에서 기준면 사이의 5점에서 측정된 변위 δ 는 δ_E 를 포함한 값으로 하고 $\delta_0 + \delta_\theta$ 를 구한다. $\delta_0 + \delta_\theta$ 는 직선으로 되며 이것을 최소자승법을 사용하여 직선 근사하고, 그 직선의 구배 α 를 구하여 경사각 θ 로 한다.

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

이에 의하면 δ_E 는 공구의 기하학적 형상 및 재질에 의해서 결정되어지며 인장력 P 와는 관계가 없다. 따라서 $\delta_0 + \delta_\theta$ 는 결합부의 존재에 의해서 생긴 변위로 된다. 단, δ_0 는 많은 경우 무시할 수 있는 작은 값이며 결합부의 존재에 따

여가므로 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 주축설계에 대응하고자 새로운 툴링 시스템의 연구개발이 추진되고 있으며, 대표적으로 툴 생크 형식이 1/10 슛 테이퍼에 플랜지 측면과 테이퍼부를 2면 접촉시켜 결합부 강성을 보강한 새로운 방법으로 2면 구속 Hollow Shank(HSK)⁶⁻⁷⁾가 개발되어 실용화에 대한 각종 실험이 진행되고 있다.

1/10 중공 테이퍼 생크는 7/24 생크에 비하여 ①굽힘강성이 일반적으로 높고, ② 자동공구교환시의 위치정도가 극히 양호하고, ③ 공구의 위치조정없이 고정도 가공 조작을 행할 수 있고, ④ 공구교환 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 활용하므로써 가공부품의 정밀도와 생산성 향상을 기대할 수 있다.

2. 이 론

2.1 주축 정강성

일반적으로 공작기계 주축의 하중-변위선도는 비선형이지만 공작기계 강성의 평가에 사용되고 있는 일정한 굽힘 하중에 미치는 강성은 식 (1)과 같다.

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

른 최대의 영향은 δ_0 로 표시된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1 테스트용 Tool shank

본 연구에 사용한 테스트용 툴 샹크는 KS B 4014⁸⁾의 “7/24 테이퍼의 주축끝 및 샹크”에 명시된 호칭번호 40(BT40)의 테이퍼부 대경부의 치수($\phi 44.45$)와 KS B 5264⁹⁾의 “테스트 바”에 명시된 7/24 테이퍼붙이 테스트 바 테이퍼번호 40에 의해서 직경 $\phi 40$, 유효측정 길이 300mm로 2mm의 게이지 라인을 두어 제작사용 하였다. 테이퍼 접촉률은 테이퍼 게이지에 의해서 80% 이상임을 확인하였으며, 접촉면은 SCM415강 재질로 침탄열처리 후 연삭가공하였다. 상기 7/24 테이퍼 샹크인 BT40에 동일한 조건으로 테이퍼 대경부 치수가 $\phi 48.43$ mm로 2면구속 1/10 테이퍼 샹크의 HSK-63 테스트용 툴 샹크를 제작하였다. HSK-63 테스트용 툴 샹크는 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 샹크는 Photo.1과 같다.

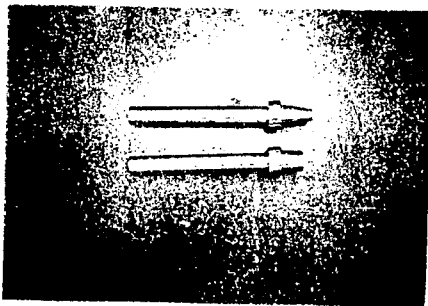


Photo. 1 The shape of BT40 & HSK63 Test tool shank

3.1.2 주축 정강성 실험장치 및 제작

주축 정강성 실험을 위하여 자체 제작한 실험장치는 Photo.2와 같다. 이 장치는 결합부의 강성을

비교측정 하기 위하여 작용하중과 공구에 해당하는 Tool shank와 주축몸체에 해당하는 Bush를 인장볼트로 강력체결시킨 구조로 설계 제작하였으며, 따라서 BT40 Tool shank와 HSK63의 규격에 맞는 Taper bush를 별도 제작하였고 견고한 정반위에 설치된 블록에 상호 교환되도록 고정시킨 구조이다. Tool shank를 결합시키기 위한 인장용 볼트는 토오크 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 Taper bush는 주축재료중에서 SCM415강을 사용하여 제작하였으며 Test bar의 끝단에 작용하는 굽힘하중에 대해 충분한 기계적 강도와 강성을 유지되도록 위해 Block 및 Test bar와의 접촉부위는 침탄열처리하여 $H_{RC}55$ 이상으로 금속 표면을 경화시키고 연삭가공하였다.

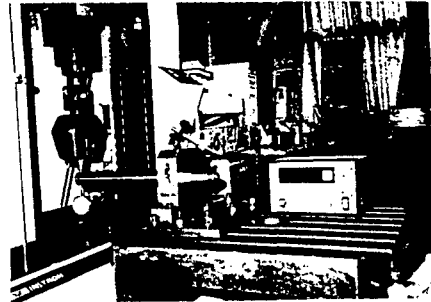


Photo. 2 Photograph of experimental apparatus

3.2 실험 방법

공작기계 주축단부는 비교적 높은 경사의 테이퍼부로 인장력에 의한 삽입작업을 행하는 Self-Release-Taper로 설계 되어 있으며 Pull-Stud 부분에 가해지는 인장력은 BT40의 경우 약 1500 kgf 이 표준이다. 본 실험에서는 주축과 공구를 결합시키는 인장볼트에 가해지는 인장력과 작용하중에 따른 주축 테이퍼부에서 공구를 체결해주는 정도가 되는 정강성을 측정하기 위하여, 먼저 토오크 렌치로써 2kN, 4kN, 6kN, 8kN, 10kN, 12kN의 인장력을 작용시켜 주축과 공구 결합력을 변화시키고, 절삭력이 작용하는 동일한 조건으로 Test tool shank 끝단에 작용하

중을 0 ~ 1.2kN 까지 변화시켜 작용하면서 Shank 끝단에서 발생하는 최대 변위량과 변위형상을 측정하였다. 테이퍼부 접촉면 상태는 윤활 상태에서 양호한 결합 특성을 나타내므로 Machine油 No.10을 살포한 윤활 상태에서 실험을 하였다. Fig. 2는 변위량 측정장치 개략도이다.

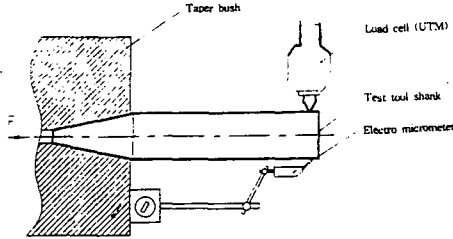


Fig. 2 Schematic diagram for deflection test device

주축계의 굽힘변위에 의한 정강성 시험방법은 KS 규정에 준하며, 이는 선반의 주축 및 심압대, 내면 연삭기의 슛돌축 및 공작기계의 주축계의 굽힘 강성의 시험법으로, 주축에 축직각 방향의 하중을 가했을 때의 하중방향 변위량을 테스트 인디케이터로 측정하는 조건으로 수행하는 시험 방법이다. 이 시험법에 따라서 300mm Test tool shank 끝단에 가해지는 작용하중은 Instron 4206-001, Universal Testing Machine을 사용하였으며, 각각의 인장력을 작용시키는 방법은 Torque Wrench를 사용하여 최대 1.2kN 까지 작용하중을 증가시키면서 발생하는 각각의 변위량을 측정하였다. 굽힘 변위량의 측정은 KS 규정¹⁷⁾에 준하며, 변위 측정점은 BT40에서는 Tool shank의 플렌지면에서 끝단으로 265mm 지점에서, 그리고 HSK-63은 267mm의 지점에서 Shank 끝단부에 직각 방향으로 하중을 가하고 하중점과 일직선상의 축 직각방향에서 다이얼 게이지를 사용하여 변위값을 측정하였으며, 여기서 굽힘하중이 작용할 때 볼트체결부분인 Block과 Taper bush에 자체 변위오차가 발생하여 Tool shank의 전체 변위량의 변화에 영향을 미칠 수 있으므로 마그네트 스텐드를 Taper bush의 정면에 설치하고 이에 대한 영향을 배제시킨 상태에서 Test tool shank에서 발생하는 굽힘 변위량만을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 7/24 Test tool shank(BT40)의 정강성

전술한 실험장치 및 방법에 의하여 작용하중과 굽힘변위에 대한 실험을 실시하였고, 그 결과를 Fig.3에 나타내었다. 실험결과로서 하중-변위선도는 반경방향 작용하중 0.6kN 이하에서의 변화상태는 거의 선형으로 비례하였으며, 축방향의 인장력증가에 따른 변화상태 또한 거의 유사함을 알 수 있었다. 따라서 주어진 실험조건에서 비교적 적은 범위에서 굽힘변위량은 축방향 인장력에 크게 영향을 미치지 않고 일정한 정강성을 유지함을 확인하였으나, 작용하중이 커지면 굽힘변위량도 선형적으로 비례해서 커지고, 축방향 인장력이 커질수록 생크와 부시의 결합력이 향상되므로 굽힘변위량은 점차 적어져서 정강성이 양호해짐을 확인할 수 있었다.

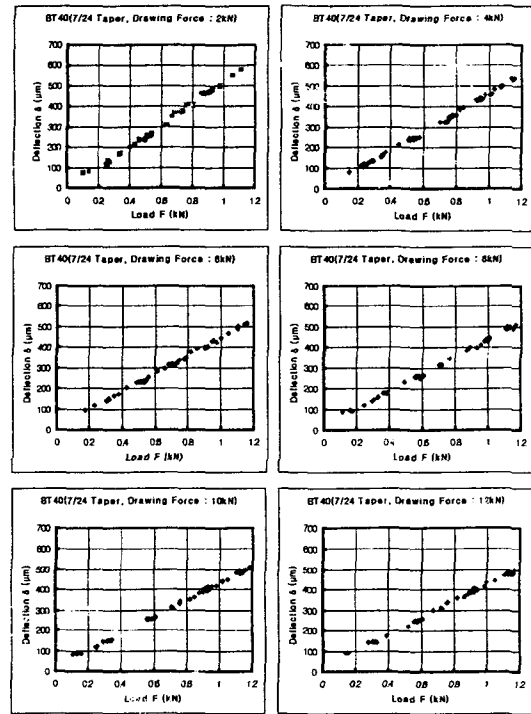


Fig.3 Tool shank bending deflection values by working load(BT40, Drawing force : 2~12kN)

4.2 1/10 Test tool shank(HSK63)의 정강성

전술한 실험장치 및 방법에 의하여 작용하중과 굽힘변위에 대한 실험을 실시하였고, 그 결과를

Fig.4에 나타내었다. 실험결과로써 1/10 테스트틀 생크는 축방향 인장력 6kN 이하에서 하중-변위선도는 일반적으로 비선형으로 비례하는 특성을 보이며 작용하중에 따른 굽힘변위량도 급격히 증가됨을 확인 할 수 있다. 이는 생크 구조상 축방향인장력의 부족으로 테이퍼부와 플랜지부가 완전한 2면구속을 이루지 못한 상태에서 작용하중을 받기 때문으로 생각된다. 축방향 인장력 8kN 이상에서는 하중-변위선도의 변화상태는 거의 선형의 비례관계를 나타내며, 축방향 인장력 증가에 따른 굽힘변위량 증가는 약 10%임을 확인할 수 있었다. 따라서 실험조건에서 1/10 테스트틀 생크 절합부 정강성을 유지할 수 있는 축방향 인장력은 8kN 이상임을 확인할 수 있었다.

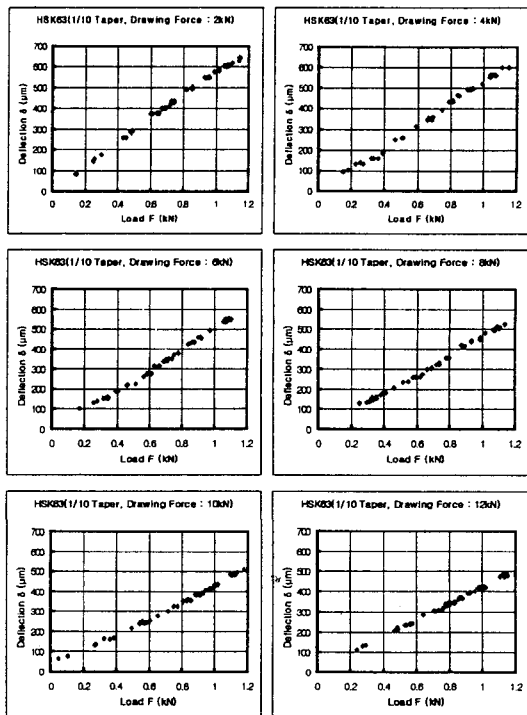


Fig.4 Tool shank bending deflection values by working load(HSK63, Drawing force : 2~12kN)

4.3 정강성의 결과 및 고찰

7/24과 1/10 테스트틀 생크의 정강성 고찰에 대한 실험 결과를 Table.1에 나타낸다.

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/ μ 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

상기 실험결과에서 7/24 테이퍼 생크는 축방향 인장력이 증가하면 정강성도 선형적으로 비례증가하게 되는 특성을 보이며, 축방향 인장력에 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 1/10 테이퍼 생크는 축방향 인장력이 6kN 이하에서는 작용하중에 비례하여 변위량이 점차 증가하지만 8kN 부터는 굽힘변위량이 2배 이상 증가되며, 따라서 정강성은 축방향 인장력에 크게 받아서 하중증가에 따라 비례함을 확인할 수 있다. 축방향 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 영향인자로 작용하여 접촉면적이 약 1.7배 큰 7/24 테이퍼의 정강성이 우수하게 나타나는 것으로 사료된다. 그러나 인장력이 커지면 1/10 테이퍼 생크에서는 테이퍼부와 플랜지부가 2면 구속됨에 따라 정강성은 급격히 상승하게 되어 축방향 인장력이 정강성에 커다란 영향을 미친다고 할 수 있다. 그러나 1/10 테이퍼 생크는 제작상 또는 보관상 오차로 인하여 완전한 2면 구속이 이루어지지 않게되면 기존의 7/24 테이퍼 생크보다도 정강성이 저하되고 결과적으로 가공정도도 급격히 저하되므로 제작기술 및 보관, 유지의 제반 기술의 축적이 필요하다고 사료된다. 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 비교결과 축방향 인장력 8kN에서 7/24과 1/10 테이퍼 샹크의 정강성이 유사하게 되며, 그 이상의 인장력에서는 2면 구속 형식인 1/10 테이퍼 샹크의 정강성이 우수함을 확인할 수 있다. 이는 상용 머시닝센터의 7/24 툴 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 적절한 축방향 인장력은 7/24 테이퍼에서는 6kN 이상, 1/10 테이퍼에서는 8kN 이상임을 확인할 수 있다.

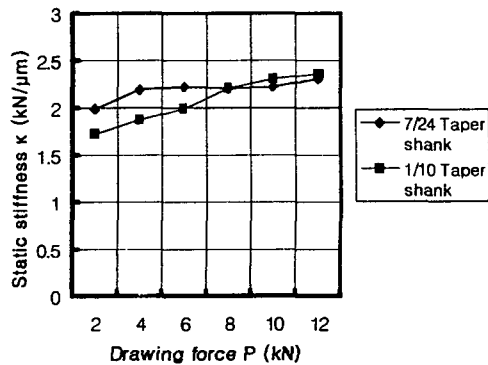


Fig. 5 Comparison of the static stiffness between 7/24 Taper(BT40) and 1/10 Taper(HSK63) shank

5. 결론

본 연구에서는 테이퍼부와 플렌지부의 2면 구속용 HSK-63 (1/10 Short taper)과 BT40 (7/24 Long taper)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 변화상태는 축방향 인장력에 무관하게 선형적 특성을 보이지만, 1/10 테이퍼 샹크(HSK63)의 하중-변위선도는 축방향 인장력 6kN 이하에서는 비선형의 비례특성을 보이며, 그 이상의 인장력

이 작용되어야 선형적 비례특성으로 변화함을 확인할 수 있었다.

(2) 7/24 테이퍼 샹크의 정강성 실험결과에서 축방향 인장력이 6kN에서, 그리고 1/10 테이퍼 샹크에서는 8kN이상에 이르면 적정 정강성 값이 결정됨을 확인할 수 있었다.

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

참고문헌

1. 강철희 : 공작기계기술의 현재와 미래(3), 한국정밀공학회지, Vol. 12, No 6, 1995. 6
2. 堤正巨 : 7/24テーパー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, 1982, pp. 1050-1057.
3. 上田和弘 : 圓するテーパー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.
4. M. Weck : Trends of Manufacturing Technology Looking Towards the 21st Century, Industrial Technical Seminar, Kobe, 1993. 5.
5. 월간기계설계 : 고강성의 2면구속 툴 샹크, 1994. 10, pp. 119-127.
6. 堤正巨 : 1/10テーパー結合部に関する研究, 精密工學會春季大會學術講演會講演論文集, 1996, p. 899-900.
7. Jim Lorincz : Unraveling the HSK riddle, Tooling&Production, 1994. 10, pp. 39-42.
8. 한국공업규격 : 7/24테이퍼의 주축끝 및 샹크, KS B 4014, 1986.
9. 한국공업규격 : 테스트 바, KS B 5264, 1991.