

형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치 설계

이동주⁺, 신우철*, 박형욱⁺⁺, 노승국⁺⁺, 박종권⁺⁺, 정준모⁺⁺⁺

(논문접수일 2008. 4. 29, 심사완료일 2008. 7. 7)

Design of Tool Clamping Device Based on a Shape Memory Alloy

Dong-Ju Lee⁺, Woo-Cheol Shin*, Hyung-Wook Park⁺⁺, Seung-Kook Ro⁺⁺,
Jong-Kweon Park⁺⁺, Jun-Mo Chung⁺⁺⁺

Abstract

This paper describes a tool-clamping/unclamping mechanism for application of a micro-spindle. The mechanism is based on one-way shape memory effect and interference-fit. The corresponding mathematical models and a few considerable design parameters are mentioned in this paper. Especially, necessary conditions for the clamping and unclamping operation are investigated through finite element analysis. The analysis results show that the differences between the diametral deformations of the tool holder in high temperature and that in low temperature are increased according to amounts of the interference. Thus the less interference between the tool-holder and the ring, the less tolerance to allow the clamping and unclamping operation because the inner diameter of the tool holder in high temperature should be smaller than the diameter of the tool shank, and that in low temperature should be larger than the diameter of the tool shank. In addition, the design for maximization of clamping force are investigated based on finite element analysis. The results show that the more amounts of the interference, the more clamping force. As the result, the interference should be considered as a important factor to maximize the tool clamping force.

Key Words : One-way shape memory effect(단일 방향성 형상기억효과), Shape memory alloy(형상기억합금), Tool clamping device(공구클램핑 장치).

1. 서론

현재 상용되는 소형 스핀들 시스템의 공구 홀더장치는

대부분 테이퍼 콜릿을 이용하고 있다⁽¹⁻³⁾. 이 테이퍼 콜릿 척 방식은 콜릿에 공구를 삽입하고 축방향 힘을 가하여 테이퍼 면에서 반경방향 분력을 얻어 공구를 체결하는 원리이다. 따

* 교신저자, 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (swcl@kimm.re.kr)

주소: 305-343 대전광역시 유성구 장동 171

+ 충남대학교 기계공학과

++ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

+++ 충남대학교 기계공학과 대학원

라서 이 방식의 스피들에는 축방향 힘을 가하는 장치로서 스프링 또는 나사 체결 구조가 필요하다. 따라서 스피들의 소형화에 있어서 이 부수적인 장치들이 제약이 될 수 있다. 또한 회전 시 공구 흔들림은 회전축과 공구 중심축 사이의 편차가 영향을 미치게 되는데 이 방식은 콜렛의 형상오차 성분이 누적되는 문제와 원심력에 의한 테이퍼 면의 불균일한 변형이 테이퍼 접촉부를 떨어뜨려 공구의 축방향 정밀도와 체결력을 떨어뜨리는 문제가 있다.

테이퍼 콜렛 적 방식의 문제점을 극복하기 위해서는 직접 반경방향 체결력을 얻는 메커니즘이 필요하다. 기존의 쉬링크 피트(shrink fit) 공구홀더가 이 방식이나 공구교환을 위해 별도의 가열시스템이 필요하므로 소형 공작기계에 적용하기에 적합하지 않다. 그리고 공구교환을 위해 고온가열이 필요하고 공구홀더 부분이 주축에서 분리되어야 하므로 소형 주축에 적용하기에 어려움이 있다. 또 다른 방법으로서 유압적 방식은 필요한 유압조정장치와 유로로 인해 소형화가 어렵고 질량 불균형 요소가 구조적으로 존재하게 되어 회전 진아아웃에 악영향을 미치게 된다.

이와 같은 기존 공구 클램핑 장치들의 단점을 보완하기 위하여 형상기억합금을 이용하여 공구 체결력을 얻는 공작기계 주축의 공구 클램핑 장치를 개발하고 있다. 이 형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치는 반경방향의 체결력을 직접 얻는 방식으로서 콜렛이 필요 없고 수십 도의 온도차를 통해 작동이 가능하므로 공구 클램핑 및 언클램핑이 쉽고 간단하다. 그리고 외형이 작고 간단하며 축대칭 구조를 지니고 있어 소형 주축 적용에 유리하다.

본 논문은 형상기억합금 기반 공구클램핑 장치에 관련된 이론을 정리하고 유한요소 해석을 통해 설계에 필요한 특성을 고찰하였다. 첫째, 단일 방향성의 형상기억합금을 이용하여 클램핑 및 언클램핑의 양방향성 작동을 구현할 수 있는 공구홀더의 설계조건을 정립하였다. 그리고 체결력을 최대화하기 위한 설계조건을 고찰하였다.

2. 기본 원리

2.1 형상기억합금

형상기억효과란 마르텐사이트 상이 되는 저온에서 변형된 형상기억합금이 오스테나이트 상이 되는 고온에서 원래 형상으로 회복하는 특성을 말한다. 특히 형상기억합금이 외부 구조물과의 접촉으로 인해 형상 복원이 구속될 경우 복원 응력(recovery stress)이 발생되며 이 특성을 이용하여 여러 가지 클램핑 기구가 개발되어 왔다⁽⁴⁾.

특히, 공구 클램핑 장치는 일반 클램핑 장치와 달리 클램핑 작동만큼 언클램핑 작동이 중요하게 고려되어야 한다. 다시 말하면 공작기계 주축의 공구 클램핑 장치로서 적용되기 위해서는 공구교환 때마다 클램핑 및 언클램핑 작동이 반복적으로 이루어 질 수 있어야 한다. 따라서 본 연구와 같이 형상기억합금에 의해 체결력을 얻는 클램핑 장치의 경우 클램핑 및 언클램핑의 양방향성거동을 위해서는 양방향성(two-way) 형상기억효과를 고려해 볼 수 있다⁽⁵⁾. 즉, 저온과 고온의 조건에 대해서 각각 일정한 형태를 갖는 형상기억합금을 적용함으로써 자체적으로 클램핑 및 언클램핑 동작을 구현시킬 수 있다. 그러나 일반적으로 상용화된 형상기억합금은 단일방향성(one-way) 형상기억효과를 지니고 있어 양방향성 특성을 갖기 위해 별도의 반복훈련과정이 필요하다⁽⁶⁾. 본 논문은 이러한 형상기억합금의 반복훈련과정 없이 공구홀더의 클램핑 및 언클램핑의 양방향성 작동이 가능하도록 단일방향성 형상기억효과를 지닌 형상기억합금을 이용한 공구 클램핑 메커니즘을 제안하고자 한다.

2.2 기본 구조

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치의 기본구조로서 크게 주축 끝단의 공구홀더 부분과 형상기억합금 링으로 구성된다⁽⁷⁾. 공구홀더에는 중심에 공구가 삽입될 구멍과 측면에 슬롯들이 가공되어 있다. 공구구멍의 직경은 삽입될 공구의 생크부 직경과 끼워맞춤 공차를 고려하여 결정된다. 측면의 슬롯은 클램핑 및 언클램핑 작동 시 공구홀더의 반경방향 탄성변형을 돕는 기능을 한다. 특히, 단일방향성 형상기억효과로 양방향성 작동을 구현하기 위해서 형상기억합금 링이 공구홀더에 억지끼워 맞

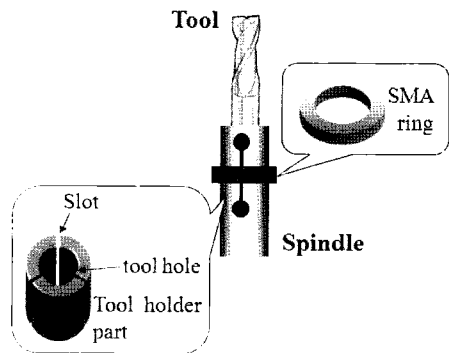


Fig. 1 Basic configuration of SMA-based tool clamping device

축(interference fit) 구조로 삽입되는 특징을 갖는다. 이 형상기억합금 링을 공구홀더에 끼우기 위해서 전용지그를 이용하여 형상기억합금 링을 냉각시킨 상태에서 내경을 확대 소성변형시킨 후 삽입하는 방법을 적용하고 있다⁽⁸⁾.

2.3 작동 원리

단일방향성 형상기억합금을 통해 클램핑 및 언클램핑의 양방향성 동작을 구현하기 위해서 공구홀더와 형상기억합금 링 사이의 억지끼워 맞춤 구조가 핵심이 된다. 저온에서 확대 소성변형된 형상기억합금이 공구홀더에 끼워진 뒤 고온의 오스테나이트 상이 되면 형상기억합금 링의 원형 내경보다 큰 직경의 공구홀더로 인해 형상 복원이 제지되고 그 결과 복원응력이 발생하게 된다. 이 복원응력에 의해 공구홀더는 수축되는 탄성변형이 이루어져 삽입된 공구를 클램핑하게 된다. 반대로 형상기억합금이 다시 냉각되어 마르텐사이트 상으로 변해가면 복원응력은 줄어들고 자체 탄성도 떨어지게 된다. 그 결과 형상기억합금의 복원력이 공구홀더 자체의 탄성력보다 작게 되어 공구홀더는 초기 형상으로 점점 회복되고 삽입된 공구는 언클램핑 상태가 된다.

3. 설계 모델

3.1 관련 이론

앞 절에서 언급한 형상기억합금 링에 의한 공구홀더의 변형을 이론적으로 고찰하기 위하여 두 실린더 요소의 억지끼워 맞춤 메커니즘에 대한 2차원 해석모델을 적용하였다⁽⁹⁾. 먼저 형상기억합금 링에 의해 공구홀더에 반경방향으로 가해지는 접촉면압의 크기는 P_c 는 다음 식으로 나타낼 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$P_c = \frac{D_h - d_{sma}}{\frac{D_h}{E_h} \left(\frac{D_h^2 + d_h^2}{D_h^2 - d_h^2} - \gamma_h \right) + \frac{d_{sma}}{E_{sma}} \left(\frac{D_{sma}^2 + d_{sma}^2}{D_{sma}^2 - d_{sma}^2} + \gamma_{sma} \right)} \quad (1)$$

여기서 d_h 는 홀더의 내경, D_h 는 홀더의 외경, γ_h 는 홀더 재료의 포아송 비, E_h 는 홀더재료의 탄성계수, D_{sma} 는 형상기억합금 링의 외경, d_{sma} 는 형상기억합금의 내경, E_{sma} 는 형상기억합금의 탄성계수, γ_{sma} 는 형상기억합금의 포아송 비를 의미한다.

그리고 P_c 에 의한 공구홀더의 변형을 고찰하기 위하여 Fig. 2와 같이 홀더의 한 부분을 단순보 형태로 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 공구홀더의 슬롯 한부분에 대한

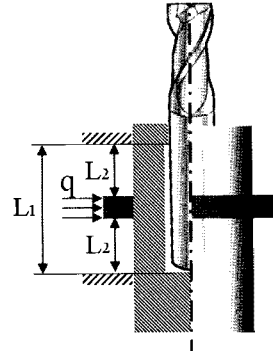


Fig. 2 Deflection model of tool holder

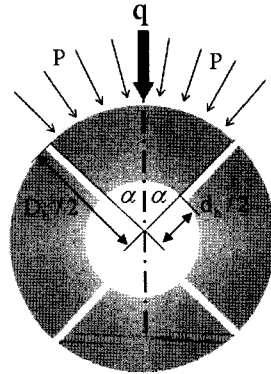


Fig. 3 Cross-section element of tool holder

접촉면압 P 와 분포하중 q 는 다음 식과 같은 관계에 있다.

$$q = 2P \int_0^\alpha \cos \theta d\theta \quad (2)$$

따라서 공구홀더 중 P_c 가 작용하는 곳의 변형을 Δ_s 이라 할 때 그 크기는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta_s = \frac{q_c (5L_1^4 - 24L_1^2 L_2^2 + 16L_2^4)}{384E_h I} \quad (3)$$

3.2 설계 변수

형상기억합금 링과 공구홀더의 억지끼워맞춤 구조에 따른 공구홀더의 변형에 관한 이론식 (1)~(3)을 보면 많은 변수들이 존재함을 알 수 있다. 하지만 실제적으로 공구 클램핑 장치에만만 관계된 설계변수는 다음과 같은 이유로 많지 않다. 첫째, 공구홀더는 주축의 일부이기 때문에 γ_h 와 E_h 는 주축 재료 특성으로 결정된다. d_h 는 삽입할 공구의 생크

부 직경과 적당한 끼워맞춤 공차를 고려하여 결정된다. 공구 홀더 외경 D_h 은 주축선단의 직경으로서 회전주축의 진동 모드에 대한 영향과 가공 시 공작물과의 간섭여부를 함께 고려하여 결정되어야 한다. 형상기억합금의 경우 재료 자체를 개발하지 않는다면 E_{sma} , γ_{sma} 를 설계변수로 적용하기 어렵다. 결국 형상기억합금 링의 외경 D_{sma} 과 공구홀더와의 체결여유(amount of interference)를 고려한 내경 d_{sma} 그리고 슬롯의 형상과 개수만이 설계변수로 고려될 수 있다. 본 논문은 이 중에서 공구홀더와 형상기억합금 링 사이의 체결여유에 대한 특성을 중점적으로 고찰하였다. 본 논문에서 고려한 관련 변수들과 각 적용값들을 Table 1에 정리하였다.

3.3 클램핑 및 언클램핑 구동에 대한 설계

형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치의 클램핑 및 언클램핑 작동에 대하여 형상기억합금의 상(phase)에 따른 공구홀더의 직경방향 수축 변형량을 상용 유한요소해석 프로그램(ANSYS)을 이용한 해석결과를 통하여 고찰하였다. 길이가 13mm이고 폭이 1mm인 슬롯이 90도 간격으로 있는 모델과 없는 모델에 대해서 체결여유에 따른 공구홀더의 최대 변형

Table 1. Parameters corresponding with SMA-based tool clamping device

Part	item	parameter	value (unit)	
Tool holder	dimension	inner dia.	3.01(mm)	
		outer dia.	5.30(mm)	
		length of a slot	4.00(mm)	
		the number of slots	4	
	mechanical property	Elastic coefficient	200(Gpa)	
		Poisson's ratio	0.3	
Interference-fit	dimension	amount of interference	variable	
SMA ring	dimension	inner dia.	5.0(mm)	
		outer dia.	8.0(mm)	
		thickness	2.0(mm)	
	mechanical property	high temp.	Elastic coefficient	75(Gpa)
			Poisson's ratio	0.3
		low temp.	Elastic coefficient	28(Gpa)
		Poisson's ratio	0.3	

량을 고온의 오스테나이트 상일 때와 저온의 마르텐사이트 상일 때 각각 해석하였고 그 유한요소 모델을 Fig. 4에 보여주고 있다. 모델에서 형상기억합금 링과 공구홀더 사이의 연결조건으로서 접촉면에 오프셋 값을 설정하여 억지끼워맞춤 구조의 체결여유값을 적용하였다. Fig. 5는 해석결과로서 모

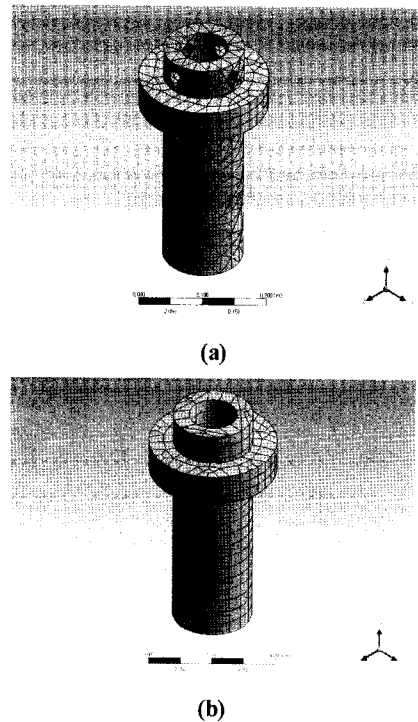


Fig. 4 Finite element model with four slots(a) and finite element mode without a slot(b)

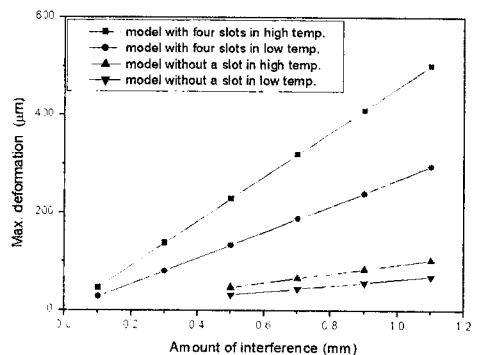


Fig. 5 FEM analysis results about diametrical deformations of tool holder according to amounts of interference

든 경우 체결여유에 따른 공구홀더의 변형량이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 이는 앞 절의 관계 이론식 (1)~(3)을 통해 유추할 수 있는 결과와 일치함을 알 수 있다. 공구홀더에 슬롯이 있는 경우와 없는 경우를 비교했을 때 슬롯이 있는 경우가 전반적으로 변형량이 크고 그래프에서 음영으로 표시한 고온과 저온일 때의 변형량 차가 큰 것으로 나타났다. 또한 체결여유가 커질수록 이 변형량 차도 커지는 경향을 볼 수 있다.

형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치가 클램핑 및 언클램핑 작동을 구현할 수 있기 위해서는 두 온도에 따른 공구홀더 변형 차 범위 내에 공구생크와 공구구멍 사이의 끼워맞춤 허용공차 크기가 결정되어야 한다. 다시 말하면 공구생크와 공구구멍사이의 간극(clearance)이 저온상태의 변형량 보다 는 크고 고온상태의 변형량 보다 는 작아야 한다. 따라서 슬롯이 없는 모델의 경우처럼 온도에 따른 변형차가 크지 않은 경우 끼워맞춤 허용공차의 여유가 없어서 클램핑 및 언클램핑 작동 가능영역이 매우 제한되고 체결여유를 크게 설계할 때 이 작동 가능영역이 확대됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 슬롯의 폭 너비에 따른 공구홀더의 최대 반경방향 변형량에 대한 유한요소해석 결과이다. 슬롯이 없는 경우 보다 슬롯이 있을 때 두 온도에서 변형의 차가 두 배정도 크게 나타나지만 슬롯의 폭 너비가 커질지라도 변형차가 증가하지는 않음을 볼 수 있다. 그 이유는 슬롯의 폭 너비가 커질수록 저온과 고온에서의 변형이 거의 동일한 비율로 증가하기 때문으로 사료된다. 결과적으로 슬롯의 폭 너비 변수가 본 공구 클램핑 장치의 작동영역 크기와 무관하기 때문에 공구홀더의 내면과 공구 생크부와의 접촉면적을 가능한 크게 할 목적으로 슬롯의 폭을 가능한 작게 설계하는 것이 바람직함을 고찰할 수 있다.

3.4 체결력을 최대화하기 위한 설계

형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치의 체결력에 대한 이론적 고찰을 위해 Fig. 7과 같은 공구 생크부가 삽입된 공구홀더와 형상기억합금 링으로 이루어진 모델을 통해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 8은 해석결과로서 체결여유가 커질수록 공구구멍의 내벽과 공구 생크부 사이의 최대 접촉압력이 선형적으로 커짐을 알 수 있다.

결과적으로 형상기억합금 링과 공구홀더 사이의 체결여유는 본 형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치의 설계 상 중요한 요소로서 공구홀더의 클램핑 및 언클램핑 작동영역의 크기와 공구 체결력 크기에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

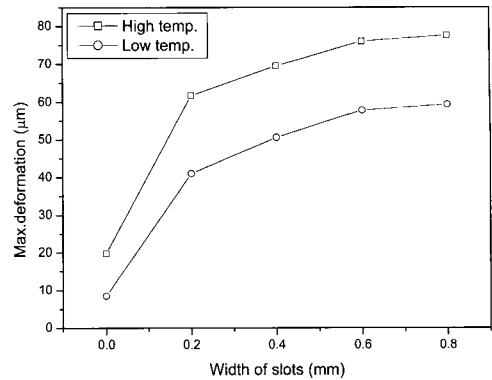


Fig. 6 FEM analysis results about radial deformations of tool holder according to widths of slots

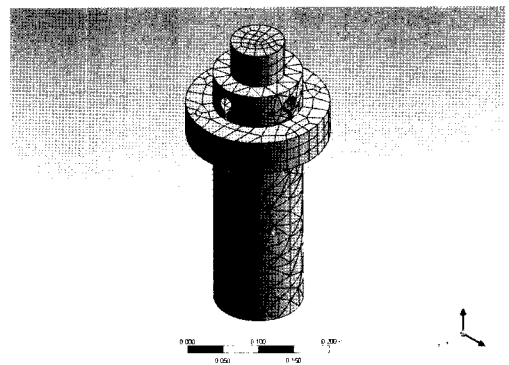


Fig. 7 Finite element model with four slots including part of tool shank

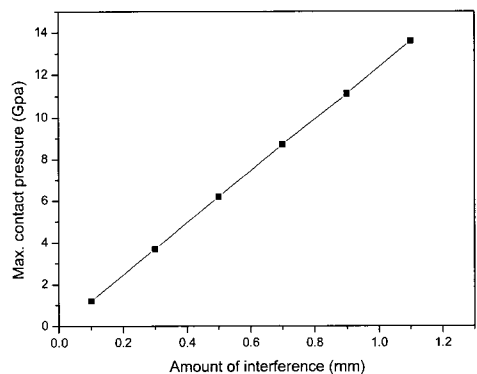


Fig. 8 FEM analysis results about contact pressures between tool hole and tool shank according to amounts of interference

4. 결론

본 논문은 형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치에 대한 관련 이론을 정리하였고 유한요소해석을 통해 클램핑 및 언클램핑 작동과 공구 체결력에 관한 특성을 고찰하였다. 세부 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 공구홀더에 슬롯이 있을 때와 형상기억합금 링 사이의 체결여유가 커질수록 온도차에 따른 공구홀더의 직경방향 수축 변형차가 커진다. 즉, 본 공구 클램핑 장치의 클램핑 및 언클램핑 작동영역이 커지는 것으로서 공구생크부와 공구구멍 사이의 끼워맞춤공차의 허용범위가 커지는 효과를 얻을 수 있다.
- (2) 슬롯의 폭 너비에 따른 공구홀더의 최대 반경방향 변형량에 대한 유한요소해석 결과로서 슬롯의 폭 너비의 크기가 본 공구 클램핑 장치의 클램핑 및 언클램핑 작동영역 크기에 거의 영향을 미치지 않음을 확인 하였다. 즉, 본 클램핑 장치의 작동영역 변화를 고려할 필요없이 슬롯의 폭을 가능한 작게 설계하여 공구홀더의 내면과 공구 생크부와의 접촉면적을 가능한 크게 하고 그 결과로서 공구 체결력을 극대화할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.
- (3) 공구홀더와 형상기억합금 링 사이의 체결여유와 공구 체결력의 관계를 고찰한 결과 체결여유가 커질수록 공구 체결력이 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

결과적으로 형상기억합금 링과 공구홀더 사이의 체결여유는 본 형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치의 설계 상 중요한 요소로서 그 크기가 커질수록 작동면과 체결력면에서 좋은 결과를 기대할 수 있다. 향후연구로서 이 체결여유를 최대화할 수 있는 실질적인 구현방법을 고안하고 그 결과 향상된 성능여부를 실험적으로 확인하고자 한다.

참고 문헌

- (1) GSI Group, Inc., 2007, PCB spindles, August 2007, <<http://www.westwind-airbearings.com/pcb/index.html>>.
- (2) NAKANISHI INC., n.d., dental, August 2007, <http://www.nsk-nakanishi.co.jp/en/industrial/products/imf_index.html>.
- (3) COLIBRI, n.d., micromachining & fine milling, August 2007, <<http://www.colibrispindles.com/prod1.asp?pr=1>>.
- (4) Kang, W., 2006, "Finite Element Analysis of NiTi Alloy Tubes with the Superelastic Behavior," *Transaction of KSAE*, Vol. 14, No. 5, pp. 100~106.
- (5) Sung, H., 2007, *High-Speed Fluid Bearing Micro-Spindles for Meso-Scale Machine Tools*, Ph.D Dissertation of the Northwestern University, U.S.A., pp. 122~162.
- (6) Otsuka, K. and Wayman, C. M., 1998, *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, New York, pp. 159~162.
- (7) Shin, W. C., Ro, S. K., Park, J. K., Lee, D. W., and Chung, J. M., 2007, "Investigation for Clamping Properties of the Tool Clamping Devices based on the Shape Memory Alloy for Application of a Micro Spindle System," *Transaction of the korea society of machine tool engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 9~14.
- (8) Chung, J. M., Shin, W. C., Park, J. K., and Lee, D. J., 2008, "Implementation of the rotating tool clamping device using a shape memory alloy," *Transaction of the korea society of machine tool engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 16~20.
- (9) Kim, T. J., Kang, H. J., Kim, C., Chu, S. J., and Kim, H. Y., 2008, "Analysis of the Warm Shrink Fitting Process for Assembling the Part(Shaft and Output Gear)," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 6, pp. 47~54.
- (10) Doughtie, V. L., Vallance, A., and Kreisle, L. F., 1964, *Design of Machine Members*, McGraw-Hill, New York, pp. 456~457.