

## 형상기억합금을 이용한 열박음 공구홀더 개발

신우철\*, 노승국<sup>+</sup>, 김병섭<sup>+</sup>, 박종권<sup>+</sup>

(논문접수일 2010. 06. 14, 심사완료일 2010. 09. 02)

### Developmnet of Shrink-Fit Tool Holder using Shape Memory Alloys

Woo-Cheol Shin\*, Seung-Kook Ro<sup>+</sup>, Byung-Sub Kim<sup>+</sup>, Jong-Kweon Park<sup>+</sup>

#### Abstract

Conventional shrink-fit tool holders have positive features, such as high accuracy, high strength, high stiffness and low sensitivity to centrifugal forces, but they require heavy investments for heating and cooling equipment. Generally the heating equipment has to heat the tool holder up to 200~300°C for tool changes. This paper introduces a novel shrink-fit tool holder that is able to unclamp a tool at 40~50°C. This feature makes it possible to switch between the clamped and unclamped states by using a simple device, which has lower power, smaller size and lower cost than the heating equipment of the conventional shrink-fit tool holders. The proposed shrink-fit tool holder is able to expand its tool hole by using the shape memory alloys which are integrated in the tool holder body. Performances of the SMA shrink-fit tool holder were evaluated experimentally. The experimental results confirm that the proposed tool holder is feasible in aspects of clamping/unclamping operations, clamping force and repeatability of tool setup.

**Key Words** : Shrink-fit tool holder(열박음 공구홀더), Tool change(공구교환), Shape memory alloy(형상기억합금)

## 1. 서론

공구홀더는 공작기계의 중요한 구성요소 중 하나로서 공구 셋업오차 크기 및 체결 컴플라이언스 성능들은 가공정밀도에 직접 영향을 미치게 된다. 더불어 공구홀더는 일반 사용자들이 직접 다루는 부분이기 때문에 조작 상 편리성을 겸

비해야만 한다.

현재 상용되는 공구홀더 타입들 중에 열박음(Shrink-Fit) 공구홀더는 콜릿(collet)방식이나 유압방식 등의 다른 공구홀더보다 성능면에서 우수한 것으로 평가되고 있다<sup>(1)</sup>. 공구 체결력이 대체적으로 뛰어나고 공구홀더 끝단의 외경이 작아서 깊은 홈 가공이 가능하고 공구홀더를 구성하는 부품

\* 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부 (swc1@kimm.re.kr)  
주소: 305-343 대전시 유성구 신성로 104

+ 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부

수가 적기 때문에 부품 누적공차에 의한 기하학적 셋업오차가 작고 회전 시 질량 불균형에 의한 진동발생도 적다.

열박음 공구홀더는 특히 공구 클램핑 및 언클램핑 작동 전환이 외력이 아닌 온도에 의해 이루어지기 때문에 공구셋업 재현성이 우수하다. 콜렛방식의 경우 콜렛의 이동과 변형에 의해 체결력이 발생하므로 메카니즘 상 공구셋업 불확도가 크다. 특히 작업자에 의해 외력으로 공구교환이 이루어지는 경우 가해지는 힘의 크기 및 방향의 미소한 변화로 공구셋업이 달라질 수 있다. 반면에 온도는 크기에 의해서만 결정된다. 따라서 작업자의 숙련도 또는 자질에 따라 달라질 수 있는 요소가 외력을 이용하는 경우의 절반이 된다고 볼 수 있다. 또한 필요한 가열 및 냉각 작동도 전용장치에서 자동 또는 반자동으로 구현되기 때문에 재현성이 높은 공구교환이 가능하다.

반면에 현재 상용되는 열박음 공구홀더의 단점은 다음과 같다. 공구의 재질이 공구홀더의 재질과 유사한 스틸인 경우 적용이 어려운 점과 공구교환 시간이 오래걸리는 문제가 있다. 하지만 최근 이들 문제는 유도가열방식을 통해 극복되고 있다. 보다 근본적인 문제는 공구홀더를 200℃ 이상 가열해야하는 데 있다. 이를 구현하기 위해 별도의 전용 공구교환장치가 필요하기 때문이다. 이 장치는 공구 언클램핑을 위해서 공구홀더를 높은 온도로 가열하는 장치와 다시 상온으로 냉각시키는 장치로 구성된다. 현재 상용제품을 보면 그 가격이 매우 고가이며 차지하는공간도 적지않다<sup>(2)</sup>. 그리고 조작상 공구교환을 위해 공구홀더가 스프링들에서 분리되어야만 하는 구조적인 제약도 단점으로 들 수 있다. 또한 최근 에너지 관리 규정 ISO 50001의 도입을 추진하는 등 생산 시스템의 에너지 효율에 관심을 갖는 추세로 볼 때 현재의 열박음 공구홀더는 에너지 효율 측면에서 개선되어야 할 필요가 있다<sup>(3)</sup>.

본 연구는 이러한 기존 열박음 공구홀더의 장점을 유지하면서 단점을 보완할 수 있는 개선된 열박음 공구홀더 개발을 목표로 하고 있다. 이를 실현하기 위해서는 근본적으로 공구교환을 위한 가열온도를 가능한 낮출 필요가 있다. 일반적으로 가공중인 공구홀더의 온도가 대략 40℃를 넘지 않는 점을 고려할 때 40~50℃ 정도만 가열하여도 공구 언클램핑이 된다면 간소한 가열장치로 공구교환이 가능할 것이다. 더불어 상온으로 냉각하는 장치도 간소화될 수 있고 공구교환 시간도 보다 단축될 수 있을 뿐만 아니라 에너지 효율면에서도 기존의 열박음 공구홀더보다 크게 향상될 수 있다.

이 개선된 열박음 공구홀더를 구현하기 위하여 형상기억합금(SMA, Shape Memory Alloy)을 적용한 새로운 구조

의 열박음 공구홀더를 제안하고자 한다. 그 개념에 대해서는 본 학회 2010년 춘계학술대회에서 처음 발표한 바 있다<sup>(4)</sup>. 기존 열박음 홀더의 자체 열팽창하는 원리 대신하여 공구홀더에 내장시킨 형상기억합금이 적정 수준의 온도에서 공구홀더 내경을 확대시키는 기본원리를 갖는다. 본 논문은 이 기본원리를 바탕으로 구조적으로 공구홀더의 기능에 충실하도록 설계한 내용을 보이고 있다. 또한 제작된 시제품에 대하여 실험적으로 작동상태 및 기본성능들을 고찰함으로써 개선된 열박음 공구홀더의 유용성을 검증하였다.

## 2. 기본구조 및 원리

Fig. 1은 본 열박음 공구홀더의 기본구조 및 원리를 보여주고 있다. (a)는 공구 클램핑 상태로서 기존 열박음 공구홀더와 같이 상온에서 공구홀더몸체와 공구생크부 사이 간섭끼움(Interference fit) 상태이다. 링 형태의 형상기억합금은 그 외경부가 공구홀더 끝단부와 억지끼워맞춤형태로 삽입되어 있다. 공구 클램핑 상태의 온도영역에서 형상기억합금은 마르텐사이트 상의 낮은 강성상태로 존재하게 된다. 그 결과 억지끼워맞춤된 형상기억합금 링은 공구홀더몸체의 탄성력에 의해 원형보다 크게 수축변형된 상태로 있다. (b)는 공구 언클램핑 상태로서 고온 영역에서 내장된 형상기억합금 링이 오스테나이트 상태가 된 경우이다. 오스테나이트 상태의 형상기억합금은 자체 탄성계수가 마르텐사이트 상태에 비해 3배 이상 증가하게 되며 원형으로 형상복원하려는 특성을 보이게 된다<sup>(5)</sup>. 즉, 공구 클램핑 상태에서 수축된 형상기억합금 링이 원형으로 회복되고자 직경이 커지게 되고 이때 발생하는 형상기억합금의 복원력은 공구홀더몸체를 반경방향으로

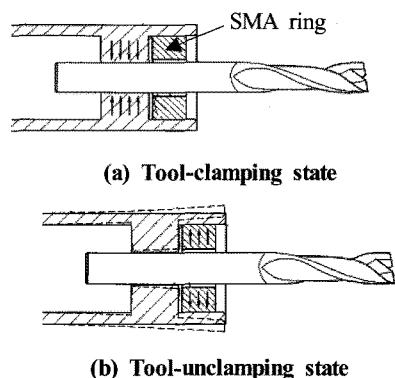


Fig. 1 Configuration and operating principle

로 확대시켜 공구를 언클램핑상태(점선)로 만든다. 형상기억합금 상변태의 온도특성은 그 조성비를 통해 임의로 조절이 가능하다. 본 연구에서는 이 온도조건을 40°C 정도가 되도록 설계제작하였다.

### 3. 설계 및 시제품 제작

#### 3.1 설계

앞 단원에서 제안한 원리를 구현하는 데 있어서 설계상 고려해야할 점이 있다. 첫째는 클램핑 상태일 때 공구생크부와 접촉한 공구홀더몸체부의 면적이 기존의 열박음 공구홀더에 비해 크게 줄어든 점이다. 이는 삽입된 한 개의 형상기억합금 링이 고온상태에서 공구홀더를 벌릴 수 있는 영역에 한계가 있기 때문이다. 접촉면적이 줄어들면 클램핑 상태의 공구체결력이 기존방식에 비해 떨어질 수 밖에 없다. 둘째로서 형상기억합금의 경도는 HRC 26 수준이다. 일반적인 공구홀더의 경도가 HRC 45 수준인 것을 감안할 때 반복되는 공구와의 접촉에 의해 마모가 예상된다. 따라서 삽입된 형상기억합금 링의 내경과 공구는 직접접촉을 피하는 것이 바람직하다. 이 때 셋업된 공구의 오버행 길이가 기존 열박음 공구홀더에 비해 보다 길어지게 된다. 이는 가공시 발생하는 굽힘강성을 떨어뜨리는 결과를 가져오게 된다.

위에서 언급한 두 문제를 해결하기 위해 본 논문은 Fig. 2와 같은 설계를 제안하고자 한다. 먼저 두 개의 형상기억합

금 링을 공구생크부의 상·하부에 각각 위치하여 언클램핑 작용력을 가하도록 하였다. 그 결과 공구와 홀더 사이의 접촉영역을 축방향으로 확대할 수 있게 되었다. 제작상 이를 실현하기 위해서 공구와 공구홀더몸체 사이에 클램핑 슬리브 요소를 추가로 구성하였다. 실질적으로 공구를 클램핑 및 언클램핑하는 역할을 하는 클램핑 슬리브는 공구홀더몸체부와는 반영구적으로 결합된다. 본 논문에서는 이 반영구적인 결합을 열박음 방식으로 구현하였다. 클램핑 슬리브와 공구홀더몸체부 사이 결합부에는 일정구간 빈 공간(Air gap)이 형성되어있다. 이 여유공간을 통해 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 언클램핑 상태일 때 형상기억합금 링들에 의한 슬리브의 변형(점선표시)이 형성될 수 있다. 또한 체결된 공구의 오버행 길이를 가능한 줄이기 위해 두 번째 형상기억합금 링(SMA ring(2))의 내경부분에도 공구생크부와 접촉하는 지지부를 구성하였다.

#### 3.2 시제품 제작

본 논문의 시제품은 생크직경 3mm의 공구를 적용하도록 설계 및 제작되었다. 적용된 형상기억합금은 Ni과 Ti의 합금으로 (주)에스엠에이를 통해 주문 제작하였다. 외형 크기로서 내경, 외경, 두께는 각각 8.94mm, 6.00mm, 2.10mm이다. 클램핑 슬리브에 형상기억합금 링이 삽입될 때 체결여유(amount of interference)는 직경방향으로 0.27mm로 설계제작하였다. 이 크기는 형상기억합금 링 외경의 약 3%가 된다. 형상기억합금의 변형률은 최대 8%까지 가능하지만 이 때의 반복수명은 수 회에 불과하다. 반대로 변형률이 3% 이하 일 때는 반복수명이 수십만번에 이른다<sup>(6)</sup>. 이점을 고려하여 형상기억합금 링의 체결여유를 결정하였다. Fig. 3은 제작된 형상기억합금의 온도특성을 테스트한 결과로서 DSC (Differential Scanning Calorimetry)선도를 보여주고 있다.

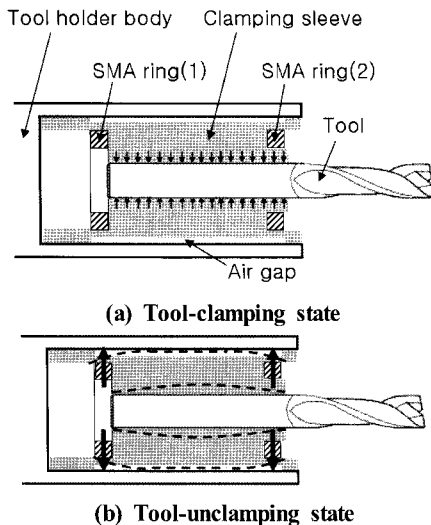


Fig. 2 Conceptual design of the SMA shrink fit tool holder

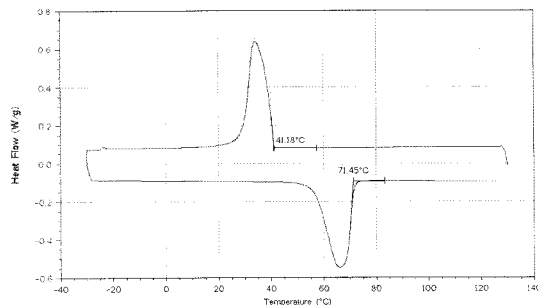


Fig. 3 DSC curve of applied SMA

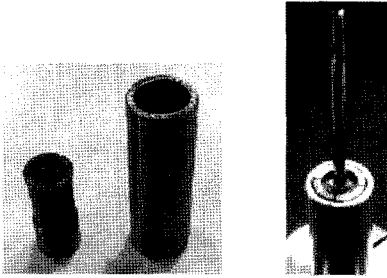


Fig. 4 Prototype of SMA shrink fit tool holder

신도를 통해 알 수 있듯이 제작된 형상기억합금의 오스테나이트 상변태 종료온도(Mf)는 71.45°C이고 마르텐사이트 상변태가 시작온도(Af)는 41.18°C이다. 클램핑 슬리브의 공구삽입 홀과 공구와의 체결여유는 직경방향으로 15~23μm로 제작되었다. Fig. 4은 제작된 시제품을 보여준다. 왼쪽 사진은 클램핑 슬리브와 공구홀더몸체부이고 오른쪽은 공구홀더로 조립된 상태에서 생크 3mm 엔드밀이 체결된 모습이다.

#### 4. 실험적 고찰

##### 4.1 클램핑/언클램핑 특성

본 형상기억합금 기반 열박음 공구홀더의 클램핑 및 언클램핑 작동상태를 확인하고자 온도에 따른 공구삽입 홀의 변형상태를 실험적으로 고찰하였다. Fig. 5는 이를 위한 실험장치로서 열이 가해지는 공구홀더 외경에 열전대를 설치하고 공구삽입 홀 내벽에 전기마이크로미터를 설치하였다. 두 계측기의 신호를 동시에 획득하여 온도에 따른 홀 내벽의 반경방향 변위를 고찰하였다.

Fig. 6은 실험결과를 보여주고 있다. 상온의 클램핑 상태를 변위의 기준으로 온도가 상승함에 따라 반경방향 변위가 약 30μm까지 커짐을 보이고 있다. 다시 상온으로 냉각했을 때 변위도 초기위치로 돌아왔다. 이 과정에서 전체적으로 보이는 히스테리시스 특성은 구속상태의 형상기억합금에 나타나는 고유한 작동특성이다. 세부적인 특성을 살펴보면 상온에서 40°C까지의 가열구간은 변위의 변화가 거의 없다가 40°C에서 50°C 구간에서 변위가 급변함을 보인다. 70°C 부근 이후에서 온도가 상승하여도 변위가 거의 변하지 않는다. 이 현상은 Fig. 3에서 보인 형상기억합금의 오스테나이트 변태종료 온도(Af) 71.45°C 특성 때문이다. 다시 상온으로 냉각되는 동안에 45°C 이하부터 변위가 크게 작아진다. 이 역

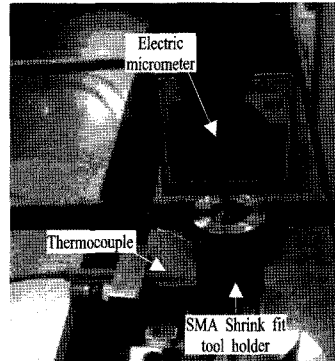


Fig. 5 Experimental setup for measuring tool-holder displacement with temperature

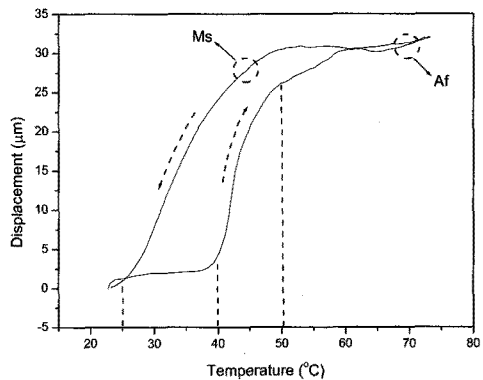


Fig. 6 Displacement of the SMA shrink fit tool holder according to changes in temperature

시 Fig. 3의 마르텐사이트 변태시작 온도(Ms) 41.18°C 특성 때문이다. 결과적으로 본 열박음 공구홀더는 상온에서 40°C까지 공구 클램핑 상태를 유지하며 40°C에서 50°C 사이의 가열로 공구 언클램핑 상태로 전환이 가능함을 확인할 수 있다. 본 시제품의 언클램핑 작동온도는 42°C 부근으로서 이는 공구와 공구삽입 홀 사이의 체결여유 크기를 고려할 때 Fig. 6의 실험결과에 거의 부합됨을 알 수 있다.

##### 4.2 체결력

본 형상기억합금 기반 열박음 공구홀더의 체결력을 확인하고자 클램핑 상태의 공구에 비틀림을 가해 체결토크를 측정하였다. Fig. 7는 이를 위한 실험장치로서 직경 3mm의 맨드릴의 한쪽을 공구홀더에 체결하고 다른 쪽을 토크미터에 고정된 상태에서 비틀림력을 가하는 동안 토크미터의 출

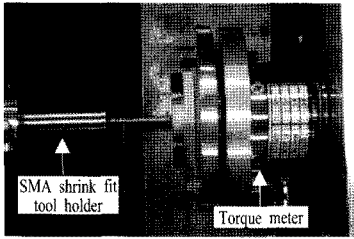


Fig. 7 Experimental setup for measuring clamping torque performance of tool holder

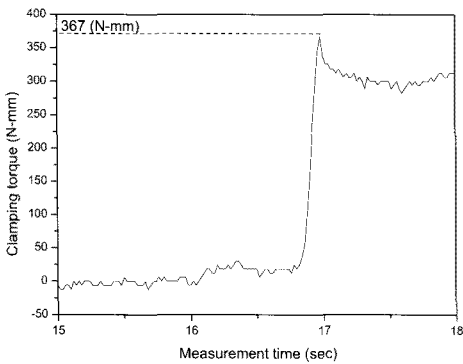


Fig. 8 Clamping torque performance of the SMA shrink fit tool holder

력신호를 연속적으로 획득하였다.

Fig. 8은 실험결과로서 비틀림력을 가하기 시작하는 순간에 토크가 수직적으로 상승한 후 공구와 맨드릴사이의 마찰이 일어나는 동안에 마찰력에 의한 일정 수준의 토크를 보이고 있다. 공구와 맨드릴 사이 마찰이 일어나기 직전의 최대 토크로 공구홀더의 체결토크로 평가할 때 그 크기는 367 N-mm로 측정됐다. 생크직경을 고려할 때 공구홀더의 원주방향 체결력은 245N로 평가된다. 이는 생크직경 3mm의 밀링공구들로 이루어질 수 있는 가공의 절삭력 수준을 고려할 때 충분한 체결력으로 판단된다<sup>(7)</sup>.

### 4.3 공구셋업 정밀도

본 형상기억합금 기반 열박음 공구홀더의 공구셋업 정밀도를 확인하고자 셋업된 공구의 중심축과 공구홀더의 중심축 사이의 편각을 측정하였다. Fig. 9는 이를 위한 실험장치로서 범용 3차원 측정기(ZEISS Co, Contura G2)를 이용하였다. 동일한 조건에서 공구 셋업을 6회 반복하였고 매 셋업 시 공구의 중심축과 공구홀더의 중심축이 이루는 편각을 측

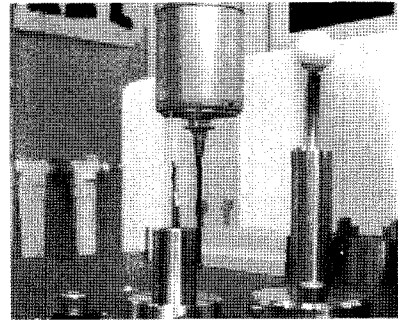


Fig. 9 Experimental setup for measuring tool-setup precision of tool holder using coordinate measurement machine

Table 1 Measurement results of misalignment between axes of tool and tool holder and their standard deviation

Number of Experiments	Angle of deviation(°)
1	0.0775
2	0.0875
3	0.0817
4	0.0831
5	0.0844
6	0.0786
Standard deviation	0.0037

정하였다.

Table 1은 측정결과이다. 반복 정밀도로서 공구셋업편각의 표준편차인 0.0037°를 결과로 얻었다. 이 결과를 B ISO 10897에 근거하여 생크 3mm 공구의 흔들림 크기로 나타냈을 때 0.65 $\mu$ m의 공구셋업 정밀도 평가결과를 얻을 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 기존 열박음 공구홀더의 단점으로 제시한 고온의 가열과 그에 따른 고가의 가열 및 냉각장치의 필요성 문제를 해결하기 위하여 적정 수준의 낮은 온도의 가열로도 공구교환이 가능한 열박음 공구홀더를 개발하였다. 본 논문은 이 개선된 열박음 공구홀더를 구현하기 위하여 형상기억합금을 적용한 새로운 구조의 열박음 공구홀더를 소개하였다. 그리고 실험적으로 형상기억합금 기반 열박음 공구홀더

의 특성을 고찰하였다. 그 결과로서 구체적으로 다음과 같은 세부연구결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 본 공구홀더의 온도에 따른 공구삽입 홀 내벽의 변위를 측정된 결과 40℃ 까지 클램핑 상태를 유지하고 그 이상 50℃ 수준으로 가열할 때 공구삽입 홀의 직경이 크게 확대됨을 확인하였다. 본 시제품의 경우 42℃의 가열온도에 도달했을 때 공구 언클램핑 상태가 되었다. 이로써 본 논문이 제안하는 열박음 공구홀더 메커니즘을 통해 적정 수준의 낮은 온도에서 공구교환이 실현 가능함을 검증하였다.
- (2) 본 공구홀더의 체결상태에서의 체결력을 실험적으로 측정하였다. 측정결과로서 원주방향 체결력으로 245N으로 평가되었다. 적용한 공구의 생크직경이 3mm임을 감안할 때 3mm이하 밀링가공의 절삭력에 대응할 수 있는 충분한 체결능력을 지닌 것으로 판단된다.
- (3) 본 공구홀더의 공구셋업 정밀도를 3차원측정기를 이용하여 측정된 결과 0.65 $\mu$ m의 공구셋업 정밀도를 확인하였다. 이 결과를 통해 1 $\mu$ m 이하의 공구흔들림 재현성을 지닌 공구홀더를 기대할 수 있다.

결과적으로 본 논문에서 의도했던 열박음 공구홀더의 개선된 작동특성을 검증하였고 공구홀더로서의 기본성능 평가를 통해 그 유용성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 산업원천기술개발사업 “나노 기반 초정밀/초미세 Hybrid 가공시스템 개발” 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 말씀을 올립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Choi, C. H., 2001, “High Speed Machining & Technology of Tooling for Die and Mold Making,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 8, pp. 18~23.
- (2) Rivin, E. I., 2000, “Tooling Structure: Interface between Cutting Edge and Machine Tool,” *Annals of the CIRP*, Vol. 49, pp. 591~634.
- (3) Park, C. W., Kwon, K. S., Kim, W. B., Min, B. K., Park, S. J., Sung, I. H., Yoon, Y. S., Lee, K. S., Lee, J. H., and Seok, J., 2009, “Energy Consumption Reduction Technology in Manufacturing - A Selective Review of Policies, Standards, and Research,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 5, pp. 151~173.
- (4) Shin, W. C., Ro, S. K., and Park, J. K., 2010, “Shrink Fit Tool Holder Using Shape Memory Alloy: Feasibility Test,” *Proceeding of the KSMTE Spring Conference 2010*, p. 36.
- (5) Lee, D. J., Shin, W. C., Park, H. W., Ro, S. K., Park, J. K., and Chung, J. M., 2008, “Design of Tool Clamping Device Based on a Shape Memory Alloy,” *Transaction of the Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 70~75.
- (6) Otsuka, K. and Wayman, C. M., 1998, *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, New York, pp. 49~96.
- (7) Lee, H. U., Cho, D. W., Ehmann, K. F., Ko, T. J., and Yun, W. S., 2006, “Prediction of Cutting Forces in Micro-End-Milling Using the Cutting-Condition-Independent Cutting Force Coefficients,” *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 34, pp. 453~459.