

형상기억합금 기반 공구클램핑 장치를 위한 자동공구교환 시스템 개발

신우철*, 노승국⁺, 김병섭⁺, 박종권⁺
(논문접수일 2010. 6. 29, 심사완료일 2010. 8. 12)

Development of Automatic Tool Change System of the SMA-Based Tool Clamping Device

Woo-Cheol Shin*, Seung-Kook Ro⁺, Byung-Sub Kim⁺, Jong-Kweon Park⁺

Abstract

This study developed an automatic tool change system of the SMA-based tool clamping device for applications of micro-machine tools. This paper first describes clamping and unclamping procedures of the automatic tool change system and its basic configuration. Second, it presents fabrication techniques of components, such as a heating/cooling system and a tool loader. Finally, it describes automatic tool change test conducted with a prototype in which the fabrication techniques of components were employed. As the results of the test, times needed for clamping and unclamping operations were estimated to 18(s) and 8(s) respectively. The experimental results confirm that the proposed automatic tool change system can be successfully applied to micro-machine tools.

Key Words : SMA(형상기억합금), Tool clamping device(공구클램핑 장치), Automatic tool change system(자동공구교환 시스템), Micro-machine tool(초소형 공작기계).

1. 서론

초정밀 공작기계의 주축 시스템을 개발하는 데 있어서 콜렛 척 방식 공구 클램핑장치를 적용할 때 다음 사항들이 문제될 수 있다. 콜렛 척은 구조적으로 몇몇 부품들이 상호

연계하여 체결력을 만들기 때문에 구성요소들의 누적공차 및 조립 불확도에 의해 고정밀도의 공구셋업을 얻기 힘들다. 특히, 소형 공구홀더에 주로 적용되는 조임너트를 이용하는 방식에서는 체결 시 콜렛에 비틀림 변형을 일으켜 셋업된 공구가 텅팅되고 불균일한 체결력 분포를 초래한다.⁽¹⁾ 또한 이

* 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (swc1@kimm.re.kr)

주소: 305-343 대전시 유성구 신성로 104

+ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

방식에서는 공구 클램핑 및 언클램핑 전환이 외력에 의해 수동으로 이루어지기 때문에 작업자의 자질 및 숙련도에 따라 공구교환시간이 오래 걸릴 수 있고 공구 셋업의 재현성이 떨어질 수 있는 단점이 있다.

또한 기존 소형 공구 클램핑장치들은 자동공구교환 구현에 불리한 구조를 지니고 있다. 조임너트를 이용하는 콜렛척 방식은 자동공구교환 시스템이 구성된 예를 찾아보기 힘들다. 스프링 콜렛을 이용하는 경우는 주축 내부에 드로우바와 같은 축방향 가압장치가 구성되면 가능하지만 이 가압장치로 인해 주축의 소형화에 제약을 받게된다.⁽²⁾ 현재 상용되는 열박음 방식 공구 클램핑장치 경우는 공구홀더 몸체를 200℃ 이상 가열할 때 공구교체가 가능하고 이를 위해 별도의 가열 및 냉각장치가 필요하다. 또한 가열 및 냉각작동을 원활하게 하기 위해 대부분 열박음 공구홀더는 아버구조를 통해 주축으로부터 분리된 뒤 가열 및 냉각장치 상에서 공구교환이 이루어진다. 따라서 열박음 공구 클램핑장치는 주축과 공구 클램핑장치가 일체형으로 되어 있는 소형 주축계에는 거의 적용되지 않고 있다. 더불어 열박음 공구 클램핑장치는 공구 자체의 열팽창 때문에 재질이 스틸계통인 경우 적용이 어려운 점, 공구교환 시간이 상대적으로 오래 걸리는 문제, 그리고 현실적으로 가열 및 냉각장치의 단가가 매우 고가이며 차지하는 공간도 적지않음이 단점으로 지적되고 있다.⁽¹⁾

본 논문에서 다루는 형상기억합금 기반 공구클램핑 장치는 초소형 주축계에 적용하고자 개발되어 왔으며 다음과 같은 특징을 지니고 있다. 첫째 구성요소로서 링타입 형상기억합금이 전부이기 때문에 누적공차 및 조립 불확도가 낮고 소형화에 용이하다. 둘째 공구셋업 정밀도가 우수하다. 외력이 아닌 온도변화로써 공구 클램핑 및 언클램핑 전환이 이루어지고 원형의 형상기억합금에 의해 원주 상으로 균일한 체결력을 얻을 수 있기 때문이다. 열박음 공구 클램핑장치와 비교했을 때 공구교체를 위해 필요한 온도변화량이 약 십분의 일로 작다. 따라서 에너지 소모가 적고 필요한 장치의 규모와 단가가 훨씬 낮다. 또한 모든 재료의 공구에 적용 가능하며 공구홀더 표면의 경화 및 변색의 문제가 없다.

지난 수 년 동안 형상기억합금 기반 공구클램핑 장치는 설계개념 정립, 체결력 및 공구셋업오차 등의 성능 검증 그리고 소형 스핀들에 적용하여 고속가공 테스트를 수행하였고 본 학회를 통해 발표한 바 있다.⁽³⁻⁵⁾ 본 연구는 형상기억합금 기반 공구 클램핑장치의 실용성을 보다 높이고자 전용 자동공구교환 시스템을 개발하였다. 그 실현 가능성에 대해서도 본 학회 2009년 춘계학술대회에 발표한 바 있다.⁽⁶⁾

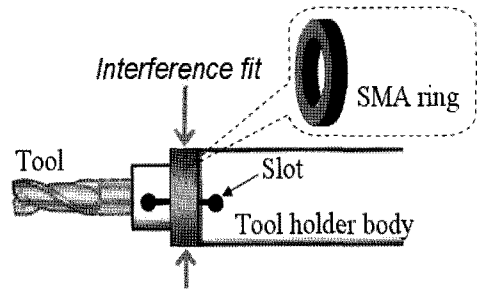


Fig. 1 Basic configuration of SMA-based tool clamping device

본 논문은 그 동안의 연구결과를 기반으로 형상기억합금 기반 공구클램핑 장치의 전용 자동공구교환장치 개발에 대한 기술적인 내용을 구체적으로 보여주고 있다. 첫째 자동공구교환 프로세스 및 시스템의 기본구성을 소개하고 둘째 필요한 요소기술에 대한 설명과 성능평가 결과를 제시하고 있다. 끝으로 제작된 시제품을 통해 자동 공구교환 프로세스를 구현하고 그 결과를 통해 유용성을 검증하고 있다.

2. 시스템 구성

2.1 공구 클램핑 장치

Fig. 1은 형상기억합금 기반 공구클램핑 장치의 기본구조로서 주축 끝단의 공구홀더몸체 부분과 형상기억합금 링의 구성을 보이고 있다. 형상기억합금 링은 공구홀더몸체 외경과 역끼워맞춤으로 삽입되어 있고 공구홀더몸체 축중심에는 공구삽입홀이 있다. 온도에 따른 형상기억합금의 상태에 따라 공구삽입홀은 삽입된 공구의 생크부와 짝새를 갖거나 틈새를 갖도록 가변되는 특징을 지닌다. 측면의 슬롯은 이러한 공구삽입홀의 탄성변형을 돕는 기능을 한다.

형상기억합금 기반 공구클램핑 장치의 클램핑 및 언클램핑 작동이 전환되는 온도기준은 적용된 형상기억합금의 온도특성에 의해 결정된다. 본 연구에 적용된 형상기억합금의 마르텐사이트 변태 시작온도는 0℃이고 오스테나이트 변태 종료온도는 20℃이다. 따라서 본 공구클램핑 장치는 상온에서 클램핑 상태를 유지하고 영하의 저온영역에서 언클램핑 상태가 될 수 있는 작동특성을 지니고 있다.⁽⁵⁾

2.2 자동공구교환장치 기본구조

본 연구의 자동공구교환장치 설계조건으로서 다음 특별 사항들을 고려하였다. 첫째, 초소형 주축의 구조상 특징으로

공구홀더가 주축에서 분리되지 않는다. 따라서 공구와 홀더가 함께 수급되었던 일반방식과는 달리 공구만 수급되어야 한다. 둘째, 초소형 공작기계 적용을 고려하여 필요한 제어 이송계 구성이 최소화 되어야 한다. 이를 위해 가능한 공작기계의 기본 이송축을 이용하는 메커니즘 구성이 필요하다. 셋째, 형상기억합금 공구클램핑 장치의 클램핑 및 언클램핑 작동 구현 특성을 고려하여 가열 및 냉각장치를 포함해야 한다. 가열장치는 50°C 정도의 가열성능이 요구되고 냉각장치는 0°C 이하로 냉각할 수 있는 성능이 요구된다.

위 설계조건을 고려한 공구교환장치의 기본구조는 Fig. 2와 같다. 공구교환 시 주축몸체가 공구교환장치의 클램핑 및 언클램핑 위치로 이동하며 이때 공작기계의 기본 이송축 X, Z을 이용한다. 공구 클램핑 및 언클램핑 위치에는 가열 및 냉각장치가 장착되어 있으며 영하로 냉각된 콜드블록과 형상기억합금 링이 접촉 시 냉각되고 온풍이 배출되는 국소영역에서 가열된다. 공구로더(Tool loader)를 통해 삽입될 공

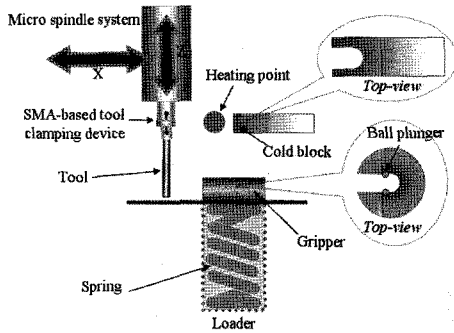


Fig. 2 Basic configuration of Automatic tool change system

구를 정한 위치에서 공구클램핑 장치에 삽입하거나 교체할 공구를 빼내는 기능을 한다. 공구로더는 회전 스테이지에 다수 구성되어 공구를 선택적으로 수급할 수 있다.

2.3 공구교환 프로세스

Fig. 3은 언클램핑 과정을 도식적으로 보여주고 있다. 공구를 체결한 클램핑장치가 로더 상부로 진입한다(a). 공구클램핑 장치는 형상기억합금과 콜드블록의 접촉위치에 이르러 냉각이 진행되고 이때 공구는 로더의 그립퍼에 의해 고정된다(b). 언클램핑 온도까지 냉각된 후 공구클램핑 장치가 상승하면 공구는 그립퍼에 의해 로더 남게 된다(c).

Fig. 4는 클램핑 과정을 도식적으로 보여준다. 공구클램핑 장치가 공구가 고정된 로더 상부로 진입한다(a). 진입초기에 공구클램핑 장치는 공구를 삽입하지 못한 채 아래로 누르게 되고 로더의 베이스는 스프링의 탄성 압축변형을 일으키며 아래쪽으로 이동한다(b). 이때 공구클램핑 장치의 형상기억

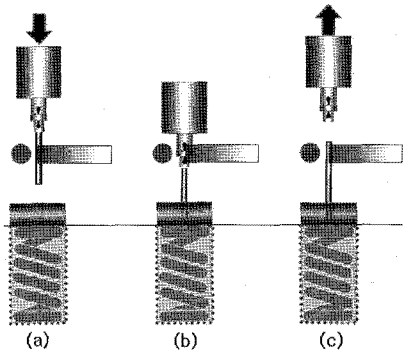


Fig. 3 Tool unclamping procedure

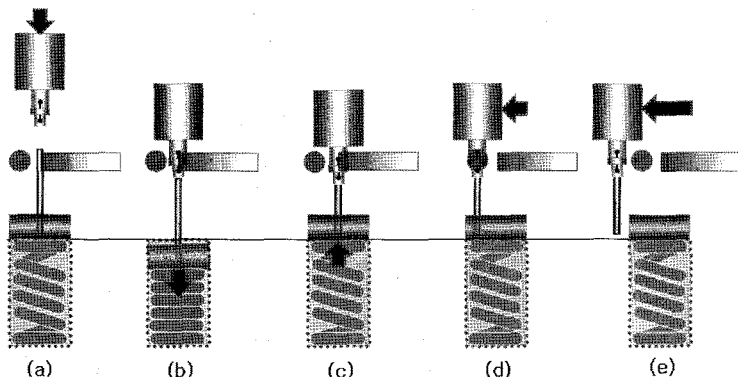


Fig. 4 Tool clamping procedure

합금은 콜드블록과 접촉위치에 있게 되므로 얼마 후 언클램핑상태로 전환되며 공구는 스프링의 탄성력에 의해 공구삽입홀 안으로 삽입된다(c). 삽입된 공구와 함께 공구 클램핑장치는 로터 측면으로 스텝 이송하여 가열공기가 배출되는 가열점에 위치하게 된다(d). 가열점에서 완전히 공구를 클램핑한 공구클램핑 장치는 로터로부터 이탈한다(d).

3. 시제품 제작 및 성능평가

3.1 가열 및 냉각장치

소형 가열장치는 다양한 방식의 소형히터가 상용화되어 있기 때문에 선정 폭이 큰 반면에 소형 냉각장치는 그렇지 못하다. 기존 연구에서는 수동 냉각장치로서 냉매방식 급속 냉각스프레이를 적용하였으나 자동공구교환장치에 적용하기에는 제어 구성이 어렵고 소모 시 교체해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 논문에서는 냉각장치로서 펠티어 소자를 적용하였다. 펠티어 소자에 의한 냉각은 접촉에 의한 열전달을 통해 이루어진다. 적용된 펠티어 소자는 Vortex Semiconductor Inc.의 VS1M-1.4-127-3.5 모델로서 그 크기는 30×30mm 이고 냉각에 필요한 최대 흡열량은 33.2W 이며, 최대 온도 격차는 70.4℃ 까지 가능한 성능을 지니고 있다.

콜드블록은 펠티어 소자의 냉각면과 냉각대상인 형상기억합금 사이에 열전달 매개체 역할을 한다. 두 요소의 적절한 상대위치에서 냉각이 이루어질 수 있도록 구성되었다. 형상기억합금 링과 접촉하는 부분의 콜드블록은 접촉면적을 가능한 크게 할 수 있는 형상을 가지고 있으면서 뒷면과 측면에서 진입 가능한 구조를 가진다. 콜드블록의 재질은 열전달이 특성이 양호한 알루미늄으로 정하였다.

Fig. 5는 본 논문의 가열 및 냉각장치의 기본구조를 보여주고 있다. 펠티어 소자의 가열면은 방열판과 접촉해 있으며 냉각팬을 통해 방열이 이루어진다. 이때 방출되는 열기의 일부를 덕트구조를 통해 가열노즐로 이동시켜 형상기억합금 가열에 이용하였다. 가열노즐로부터 배출되는 온풍의 온도를 보완하고자 가열노즐 내부에 열선을 추가 구성하였다. 펠티어 소자의 냉각면은 앞서 설명한 바와 같이 콜드블록과 접촉해 있으며 가열부와 이웃한 곳에 위치해 있다.

Fig. 6은 본 연구를 통해 제작된 가열 및 냉각장치 시제품의 가열 및 냉각성능을 테스트한 결과이다. 가열성능은 처음 작동 후 50초 경과한 이후부터 약 55℃의 가열온도에 도달하였고 냉각성능은 100초 경과 후 영하로 냉각되어 최대 -15℃의 냉각성능을 보였다. 이 결과로써 대략 2~3분 경과 후 가열 및 냉각에 적용하는 게 타당함을 알 수 있다.

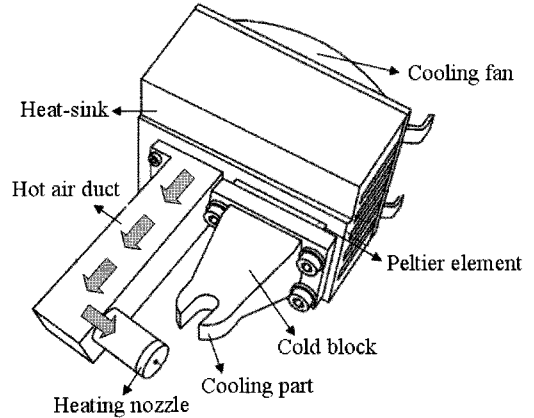


Fig. 5 Configuration of Heating and Cooling device

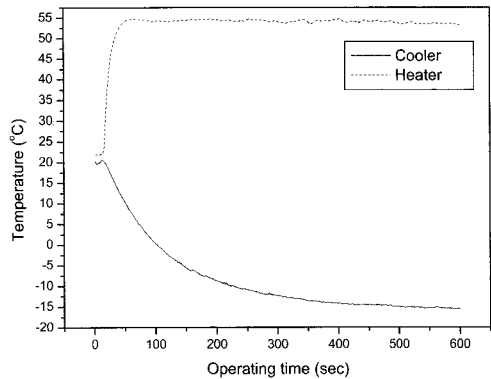
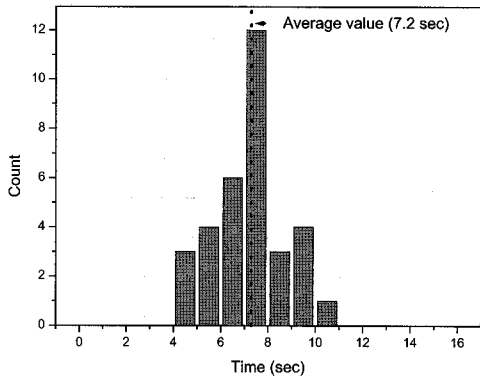


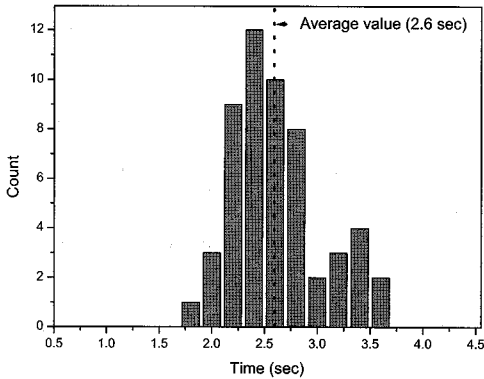
Fig. 6 Experimental result of Heating and Cooling performances

Fig. 7은 가열 및 냉각장치 시제품의 성능평가로서 공구 클램핑 및 언클램핑 시 소요시간을 측정된 결과를 보여주고 있다. 먼저 공구 클램핑 실험은 공구클램핑 장치가 언클램핑 상태인 채로 서서히 이송하는 중에 가열이 시작된 때부터 공구가 클램핑되어 클램핑장치와 함께 이송되기 시작할 때까지의 시간을 측정하였다. Fig. 7(a)은 그 실험결과로서 실험을 총 31회 반복한 결과 그 평균 소요시간은 7.2초이고 표준편차는 1.56초로 평가되었다.

다음으로 공구 언클램핑 시 소요되는 시간을 평가하기 위해 공구 클램핑 상태에서 콜드블록에 접촉한 시점부터 언클램핑 상태로 전환되어 공구가 자중에 의해 스스로 빠진 시점까지의 시간을 측정하였다. Fig. 7(b)은 그 실험결과로서 총 55회 반복 실험한 결과 평균 소요시간은 2.6초이고 표준편



(a)



(b)

Fig. 7 Experimental results of times needed for clamping operation (a) and unclamping operation (b)

차는 0.44초로 평가되었다.

3.2 공구 로더 장치

공구 로더장치는 크게 세 가지 기능을 지니고 있다. 첫째는 공구의 장탈착이 가능하도록 지정된 곳에 공구를 위치시키고 정한 자세를 유지시키는 것이다. 이를 위하여 로더의 상부에 그립퍼를 구성하였다. 그립퍼는 두 개의 볼 플런저를 이용하여 공구 생크부가 수직 반원 홈 가이드에 밀착되도록 누르는 구조이다. 특히 제한한 공구교환과정을 보면 공구는 상하방향으로 출입 가능하고 한 쪽 측면방향으로는 빠질 수 있어야 하기 때문에 볼 플런저는 이러한 출입방향으로 공구 이동을 가능하게 하면서 지정된 위치에서 공구가 수직하게 자세를 유지하도록 지지하는 역할을 한다. 둘째는 공구 클램핑 과정에서 공구를 언클램핑 상태로 전환된 공구클램핑 장치로 밀어넣는 기능이다. 이것은 공구를 상방향 이송시키는

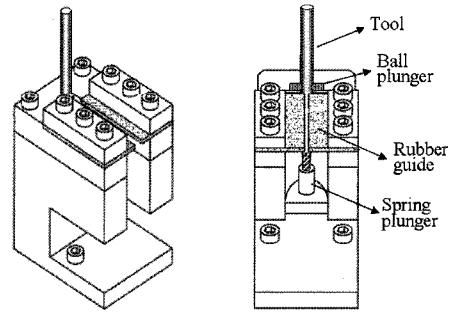


Fig. 8 Configuration of tool loader device

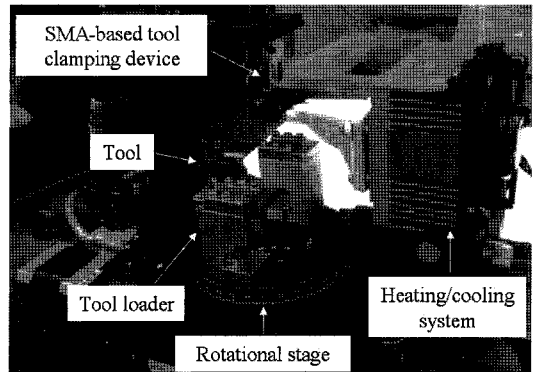


Fig. 9 Prototype of automatic tool change system

메커니즘으로 구현된다. 이를 위해 별도의 이송 시스템을 구성하는 대신에 스프링 플런저의 탄성 복원력을 이용하여 간소화 하였다. 세째는 공구 클램핑 과정에서 언클램핑 상태의 공구클램핑 장치에 삽입된 공구가 가열지점으로 이동하는 동안에 자중에 의해 빠지는 것을 방지하는 기능이다. 이를 위해 냉각지점과 가열지점 사이 구간에 공구를 삽입된 상태로 유지하도록 받쳐주는 지지 가이드를 구성하였다. 본 장치는 이 부분에 고무 가이드를 적용함으로써 유연한 고무 특성 상 공구의 측면 이송에 대해서는 큰 부하를 끼치지 않으면서도 공구가 아래로 빠지지 않도록 지탱할 수 있었다.

3.3 자동공구교환장치

제안한 형상기억합금 기반 공구클램핑 장치의 자동 공구 교환 시스템의 시제품을 Fig. 9와 같이 제작하였다. 공구홀더는 X, Z방향 직선이송 스테이지에 장착하였다. 이는 동작 기계의 기본 이송축에 해당한다. 공구 로더장치는 두 셋트를 제작하여 회전테이블 상에 180도 간격으로 구성하였다. 이것은 일종의 터릿구조로서 외부에서 공급되는 공구를 가열

및 냉각이 이루어지는 지점으로 위치시키거나 사용한 공구를 외부로 회수하는 역할을 한다.

본 시제품을 통해 공구교환작동을 수행하면서 공구 클램핑 과정의 소요시간과 공구 언클램핑 과정 소요시간을 각각 측정하였다. 공구 클램핑 과정으로서 공구클램핑 장치가 로터의 공구로 진입을 시작할 때부터 가열을 통해 공구가 클램핑 된 후 로터로부터 빠져 나가는 때까지의 클램핑 시간은 최소 18초가 소요되었다. 공구클램핑 장치가 로터로 진입을 시작할 때부터 공구를 로터에 남겨두고 공구클램핑 장치가 빠져나와 초기 위치로 도달할 때까지 8초가 소요되었다. 위 두 과정에서 형상기억합금 냉각을 위해 콜드블록과 접촉해 있는 시간은 4초로 설정하였고 온풍에 의한 가열시간은 11초로 설정한 결과이다. 이 값들은 앞 단원의 결과로서 평균 소요시간에 표준편차 값을 고려하여 결정된 것이다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 자동공구교환 프로세스와 장치를 통해 형상기억합금 기반 공구클램핑 장치의 자동공구교환이 가능함을 검증하였다.

4. 결론

본 논문은 초소형 공작기계에 유용한 자동 공구교환 메커니즘을 실현하고자 형상기억합금 기반 공구 클램핑 장치의 전용 자동 공구교환 시스템을 개발하였다. 연구수행과정을 통해 구체적으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 자동공구교환을 위한 프로세스로서 5단계의 클램핑 과정과 3단계의 언클램핑 과정을 제안하였다. 이 프로세스에서 이송 메커니즘은 공작기계의 기본 X축과 Z축 이송 테이블로 구현하고 추가로 필요한 공구삽입 이송장치를 스프링의 탄성변형을 이용함으로써 시스템 제어장치 구성의 간소화를 실현할 수 있었다.
- (2) 자동 공구교환 시스템의 구성요소로서 펠티어 소자를 이용한 가열 및 냉각장치를 개발하였다. 가열장치에 열선을 추가로 구성한 결과 요구성능을 충분히 만족하는 가열온도 55°C와 냉각온도 -15°C 성능을 얻을 수 있었다. 펠티어 소자의 작동에 필요한 가열부의 방열을 형상기억합금 가열에 적용함으로써 단일 장치로 가열 및 냉각기능을 구성 가능했다. 이로써 시스템의 구성이 보다 간소화될 수 있었다.
- (3) 제작된 시제품에 대한 공구 클램핑 및 언클램핑 동작상태를 테스트하였다. 공구교환 동작은 원활히 이루어졌

고 소요시간을 측정된 결과로서 클램핑 시 18초, 언클램핑 시 8초가 소요됨을 확인하였다. 이로써 본 논문에서 제안한 자동공구교환 프로세스와 장치 구성이 유용함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 차세대 신기술 개발 사업 “차세대 마이크로 팩토리 시스템 개발 사업” 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rivin, E. I., 2000, “Tooling Structure: Interface between Cutting Edge and Machine Tool,” *Annals of the CIRP*, Vol. 49, pp. 591~634.
- (2) Kim, S. J., Bae, M. I., Kim, H. C., and Kim, K. S., 2006, “A study on the design, manufacturing and performance evaluation of air bearing spindle for PCB drilling,” *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 29~36.
- (3) 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 KSMTE*, Vol. 16, No. 6, pp. 9~14.
- (4) 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 KSMTE*, Vol. 17, No. 1, pp. 16~20.
- (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 KSMTE*, Vol. 17, No. 5, pp. 70~75.
- (6) Shin, W. C., Ro, S. K., Kim, B. S., and Park, J. K., 2009, “Development of Auto Tool Change System of the SMA-Based Tool Clamping Device,” *Proceeding of the KSMTE Spring Conference 2009*, pp. 48~53.