

## SMA를 이용한 공구홀더의 자동공구교환장치 개발

이성철<sup>a\*</sup>, 노승국<sup>a</sup>, 박종권<sup>a</sup>

## Development of Automatic Tool Changer of SMA Tool Holder

Sungcheul Lee<sup>a\*</sup>, Seung-Kook Ro<sup>a</sup>, Jong-Kweon Park<sup>a</sup><sup>a</sup> Department of Ultra Precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery and Materials, 156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	18	August	2015
Revised	13	October	2015
Accepted	27	January	2016

## Keywords:

Shape memory alloys (SMA)  
Tool holder  
Automatic tool changer (ATC)  
Micromanufacturing

## ABSTRACT

Micromanufacturing is a useful system for reducing energy consumption. For micromanufacturing, tool clamping and workpiece clamping are important components to realize the machining process. Therefore, a shape memory alloy (SMA) ring type tool holder is developed. In addition, this holder needs cooling and heating processes to execute the tool clamping process. This study suggests a cooling/heating device based on peltier elements. The device will be applied to the heating/cooling process of an automatic tool changer (ATC) for the SMA tool holder. This study introduces the configuration and operating principle of the proposed ATC system. The description and prototype evaluation of this system were given. Plastic bolt and aluminum block were selected to enhance the cooling performance, and the installed tool was changed in 17 s during the experiments.

## 1. 서론

SMA(shape memory alloy) 기반 공구 클램핑(clamping) 장치는 온도변화에 따라 공구 클램핑 상태와 언클램핑(unclamping) 상태가 전환된다. SMA 링은 톨 홀더에 공구 클램핑력을 발생하는 요소로써, 가공이 이루어지는 상온에서는 클램핑력을 공구에 가하고, 가공이 이루어지지 않는 저온에서는 공구를 언클램핑하는 작용을 한다. 따라서 30°C 이상에서 공구가 클램핑 되고 0°C 이하에서 언클램핑 상태가 된다. 이러한 SMA 기반 공구 클램핑 장치의 클램핑 및 언클램핑 전환을 자동제어하기 위해서는 무엇보다도 전기적 제어가 가능하고 반영구적 구동이 가능한 가열 및 냉각장치가 요구된다.

Shin 등<sup>1)</sup>은 열전소자가 내장된 냉각 가열 장치를 활용하여 자동 공구교환장치를 만들었다. 그렇지만 거치대에 스프링 플런저가 내

장되어 있고, 고무 가이드가 공구를 지지하는 구간이 있는 등 공구 교환 프로세스가 복잡하고, 공구 클램핑 안정성을 떨어뜨린다. 이를 극복하기 위해 단순한 구조의 공구 거치대를 제작하고, 공구 교환 메커니즘을 단순화시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 구조적으로 단순화된 공구 거치대를 바탕으로 한 SMA 기반 자동공구교환장치를 제작하여, 공구 교환이 가능함을 보였다. 단순화된 메커니즘 실험을 통해, 공구 교환 시간도 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

## 2. 자동공구교환장치(ATC)

## 2.1 SMA 공구 홀더 작동원리

형상기억 효과란 저온인 마르텐사이트 상에서 변형된 형상기억

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7896  
Fax: +82-42-868-7180

E-mail address: sclee@kimm.re.kr (Sungcheul Lee).

합금이 고온인 오스테나이트 상에서 원래 형상으로 회복하는 특성을 말한다. 형상기억합금이 고온인 오스테나이트 상에서 복원 현상이 일어나는 경우, 외부 구조물과의 접촉이 있으면 구속에 의해 복원 응력이 발생한다. 이러한 복원 응력을 응용한 다양한 종류의 클램핑 장치가 개발되었다<sup>2-4)</sup>. 그 장치의 하나로 Fig. 1에서와 같이 SMA 기반 공구 홀더가 제안되었다.

가공을 위한 공구 홀더는 공구 교환을 자주 진행하기 때문에, 클램핑 작동 뿐만 아니라 언클램핑 작동 모두 중요하다. 공작기계가 가공 시 황삭 공정과 정삭 공정에 사용되는 공구가 다르며, 이수가 되는 복합 가공 구현을 위해서도 공구 교환 시 클램핑과 언클램핑 동작이 반복적으로 이루어져야 한다. 이런 클램핑과 언클램핑 작업을 위해 양방향성 형상기억 효과를 이용하기도 한다<sup>5)</sup>. 그러나 일반적인 형상기억합금은 단일방향성 형상기억 효과를 가지고 있으므로, 양방향성의 효과를 내기 위해 특별한 훈련 과정을 거쳐야 한다. 그래서 이러한 훈련 과정이 필요 없는 형태의 단일 방향성 SMA 재료를 이용한 공구 홀더가 개발되었다<sup>6)</sup>.

단일 방향성 형상기억합금을 이용하여 클램핑과 언클램핑 동작을 구현하기 위해서, SMA 링과 공구 홀더 간의 억지끼워맞춤을 구현하였다. 마르텐사이트 상에서 공구 홀더의 외경보다 크게 SMA 링 내경을 확대해서 억지끼워맞춤으로 삽입한다. 이 때 공차 조건을 통해, 홀더 내경이 공구보다 크게 제작한다. 상온인 오스테나이트 상이 되면, SMA 링에 형상 복원 응력이 발생하게 되어 공



Fig. 1 Shape of tool holder based on SMA

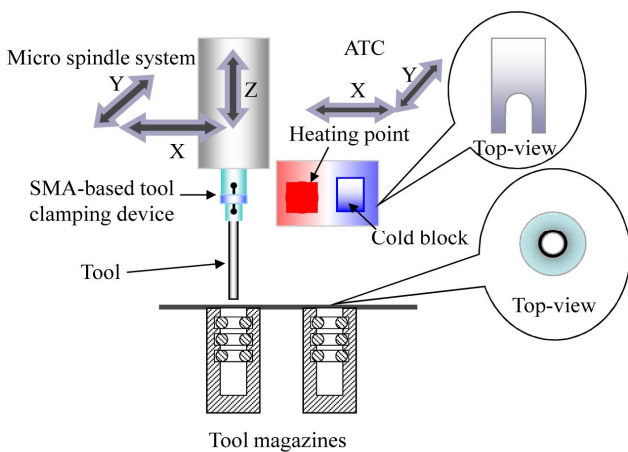


Fig. 2 System configuration of automatic tool changer system

구 홀더가 수축되는 탄성변형이 나타난다. 홀더 내부의 반경 방향으로 탄성변형이 생겨, 홀더의 반경이 작아진다. 이 변형에 의해 삽입된 공구를 클램핑한다. 즉 저온에서는 공구 직경보다 크고, 상온에서는 공구의 직경보다 작아지는 홀을 이용하여 클램핑 하는 홀더를 개발하였다.

## 2.2 자동공구교환장치 기본구조

본 연구의 자동공구교환장치 설계를 위해 다음 사항들을 고려하였다<sup>1)</sup>. 첫째, 초소형 주축의 구조상 공구 홀더가 주축에서 분리되지 않아, 공구만 수급되는 구조를 가진다. 둘째, 초소형 공작기계 적용을 고려하여 자동공구교환장치의 제어 이송계 구성을 최소화 하였다. 자동공구교환장치의 제어 구성을 단순화하는 대신, 공작기계의 기본 이송축을 이용하는 메커니즘으로 구성하였다. 셋째, 형상기억합금 공구 홀더의 작동을 위해 가열 및 냉각 장치를 포함한다. 냉각장치는 0°C 이하로 냉각할 수 있고, 가열장치는 30°C 정도의 가열성능이 요구된다. 이를 바탕으로 한 공구교환장치의 기본구조는 Fig. 2와 같다. 공구교환 시 스핀들은 X축과 Z축을 이용하여, 클램핑 및 언클램핑 위치로 이동하며, 공구교환장치는 X축과 Y축으로 이동하여 가열과 냉각을 진행한다. 공구 언클램핑 시 영하로 냉각된 콜드 블록과 SMA 링이 접촉되고, 공구 클램핑 시에는 온풍이 배출되는 국소영역을 SMA 링에 근접시켜 가열된다. 공구 매거진(tool magazine)을 통해 빈 공간에 공구를 언클램핑 하거나 사용될 공구를 정한 위치에서 홀더에 삽입 교체할 수 있다. 공구 매거진은 직선 형태로 구성되어 다수의 공구를 선택적으로 배치할 수 있다.

## 2.3 공구교환 프로세스

Fig. 3은 언클램핑 과정을 도식적으로 보인다. 공구를 체결한 스핀들이 매거진 상부로 진입한다 (a). 공구홀더의 SMA 링은 콜드 블록과 접촉해서 냉각되고, 이 때 공구는 매거진 내 고무링 그리퍼에 의해 고정된다 (b). 언클램핑 온도까지 냉각한 후 스핀들이 상승하면 공구는 그리퍼에 의해 매거진에 남는다 (c). 그 후 콜드블록은 Y축 방향으로 이동하여 초기 위치로 진입한다.

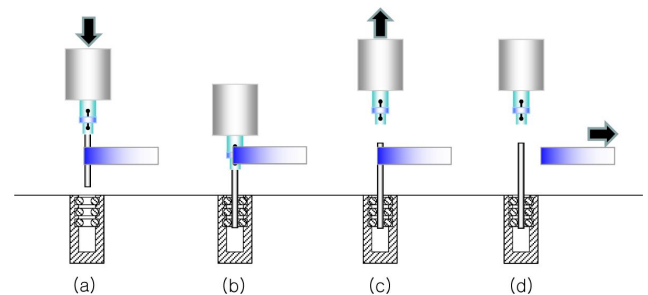


Fig. 3 Procedure of tool unclamping

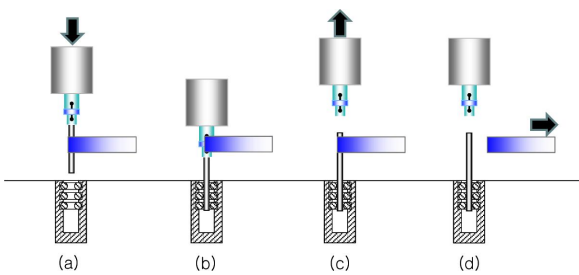


Fig. 4 Procedure of tool clamping

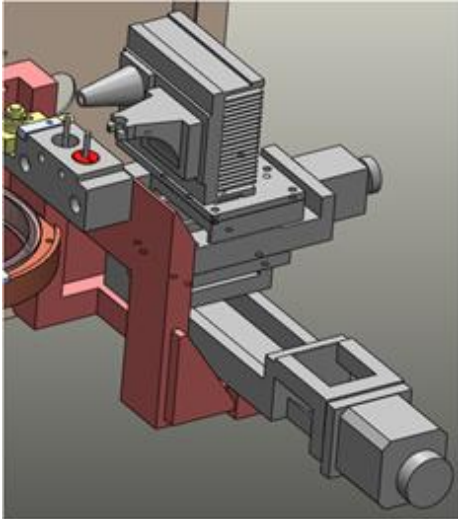


Fig. 5 design of automatic tool changer

Fig. 4는 클램핑 과정을 도식적으로 보인다. 냉각된 공구홀더를 공구가 고정된 공구 매거진 상부로 이송된다 (a). 이 때, 공구 홀더는 충분히 냉각된 상태이므로, 공구는 공구삽입 홀 안으로 삽입된다 (b). 삽입된 공구근방으로 가열부가 이동, 가열을 진행한다 (c). 가열점에서 완전히 공구를 클램핑한 공구 홀더를 매거진으로부터 이탈시키면 클램핑이 완성된다 (d).

### 3. SMA 기반 자동공구교환장치 설계

본 자동공구교환장치는 다음과 같이 구성되어 있다. SMA 링을 가열 및 냉각할 수 있는 가열냉각 장치와 이 냉각 장치를 틀 홀더와 근접 및 이격시키는 XY축 스테이지가 있다 (Fig. 5 참조). 사용될 공구를 준비하거나 사용 중인 공구를 보관할 일자로 구성된 공구 매거진이 있다. 이러한 장비는 XYZ 3축 동작기계에 부착되어 있어서, 자동으로 공구 교환이 가능하게 구성되어 있다.

#### 3.1 가열 및 냉각 장치 구성

공구 클램핑 장치의 SMA를 냉각시키기 위해 냉각된 콜드블록에 접촉시키는 방법을 이용하였다. 기존에 수동으로 SMA를 냉각시키기 위해 사용했던 냉각 스프레이를 이용한 냉매방식은 빠르고

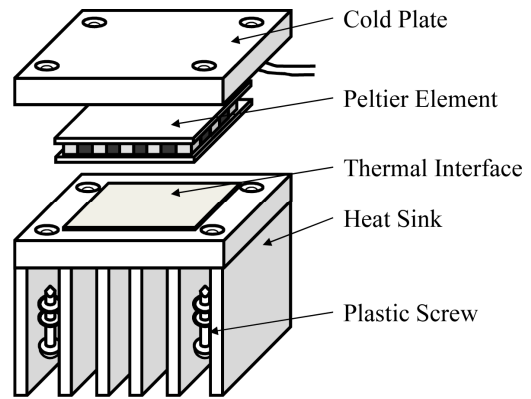


Fig. 6 Configuration of cooling and heating device

효과적인 냉각성을 지니고 있다. 그렇지만, 전기적 제어를 구성하기에 어렵고 냉매가 소모품이므로 자동제어를 구성하기에 적합하지 않다. 대신에 열전소자(peltier element)를 이용하여 콜드블록을 냉각시키고, 이 콜드블록을 SMA에 접촉시켜 냉각하는 방법을 적용하였다. 링 타입의 SMA와 접촉하는 콜드블록의 면적을 최대화하는 콜드블록 접촉부 형상을 설계하였다.

공구 홀더의 SMA를 가열시키기 위해 열풍에 노출시키는 방법을 이용하였다. 가열 목적은 영하의 언클램핑 상태에서 빠르게 클램핑 상태로 전환하기 위한 것이다. 따라서 가열온도가 고온일 필요는 없다. 하지만 상온보다 높은 온도로 클램핑력이 가능하기에 30~40°C의 열풍으로 가열하고자 하였다. 열풍을 만들기 위해서 열선과 팬(fan)을 구성하였다. 두 요소 모두 전기적 제어가 가능하고 간소한 외형을 지니고 있어 작은 크기의 SMA 링을 가열시킬 수 있다.

또한, 냉각/가열 메커니즘의 성능 향상을 위해서는 SMA 링과 열원 사이의 열전달이 중요하다. 매개체의 열전도 차이를 활용하여 냉각/가열 성능을 높일 수 있는 방안을 실험으로도 고찰할 것이다.

#### 3.2 형상기억합금의 냉각/가열 메커니즘의 효율화 설계

냉각장치로써 적용된 열전소자는 전기에너지를 통해 한쪽의 열을 다른 한쪽으로 이동시키는 역할을 한다. 따라서 한쪽 면은 냉각되고 다른 한쪽 면은 가열이 된다. 이 두 면은 열적으로 간섭되지 않을수록 냉각성은 향상된다. 그러기 위해서는 Fig. 6과 같이 가열되는 면에 방열장치가 구성된다. 열전소자의 냉각면과 냉각대상 사이에는 콜드블록이 구성되어 열전도의 중간 매개체 역할을 한다.

열전소자를 이용한 냉각장치의 효율을 고찰하고자 Fig. 7과 같은 열전소자 냉각장치를 구성하고 SMA 접촉부인 콜드블록 아래쪽에 열전대를 부착하여 냉각 성능을 테스트하였다. 적용된 열전소자는 (주)씨엔엘 VS1M-1.0-127-3.5로써 최대 흡열량은 33.2 W이다. 첫 번째 실험은 콜드블록의 재질이 알루미늄일 때와 황동일 때를 비교하였다. 그 결과로써 Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이 알

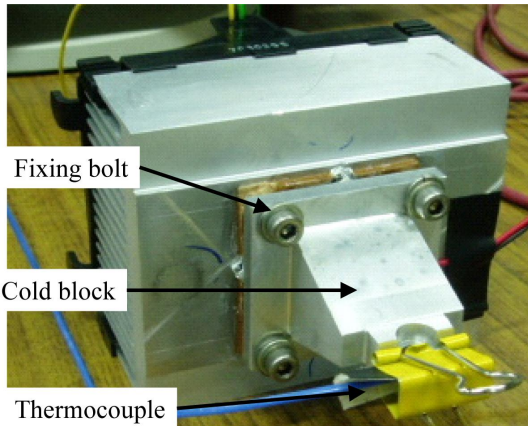
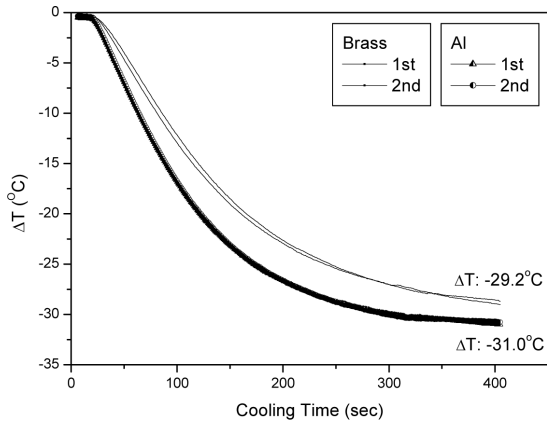
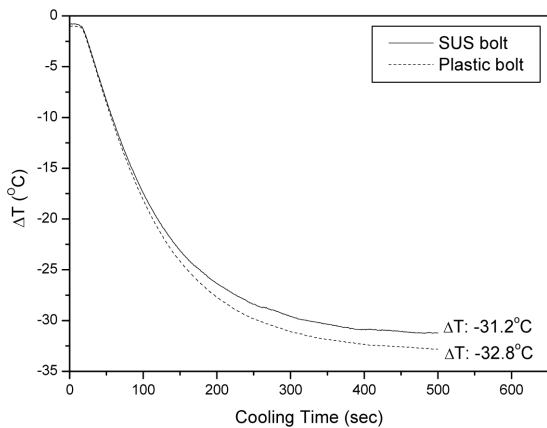


Fig. 7 Experimental setup for measuring temperature



(a) Cooling performance comparison based on the material of the cold block



(b) Cooling performance comparison based on the material of the fixing bolt

Fig. 8 Cooling performance comparison of the cold block

루미늄 콜드블록일 때 1.8°C만큼 더 냉각시킬 수 있었다. 이는 알루미늄의 열전달계수(210 W/mK)가 황동(116 W/mK)보다 높기 때문에 열전도율이 높아서 나타나는 현상으로 판단된다<sup>7)</sup>. 두 번째로 열전소자의 가열면과 냉각면 사이의 열전도를 가능한 줄이고자 고정볼트의 재질을 스테인레스강에서 플라스틱으로 바꾸었다. 본

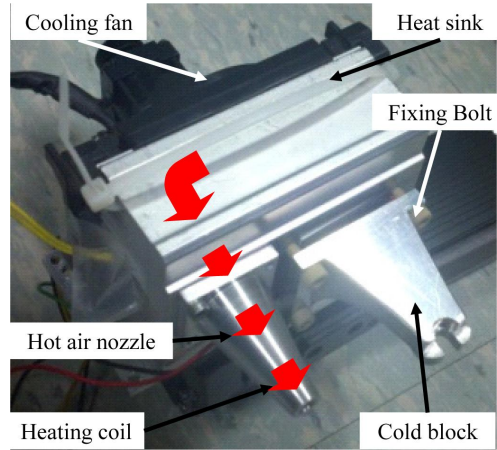


Fig. 9 Basic configuration of cooling and heating device

냉각장치가 시스템 구성 상 큰 강도가 요구되는 부분이 아니기 때문에 플라스틱 볼트 고정도 문제되지 않는다. Fig. 8(b)에서 보이는 바와 같이 플라스틱 볼트를 사용했을 때 1.6°C만큼 더 냉각시킬 수 있었다. 이 때, 콜드블록과 방열장치와의 단열이 중요하므로 열전도 계수가 상대적으로 낮은 플라스틱 볼트가 단열 효과가 있어, 냉각 효과가 더 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 냉각장치 성능을 고려하여, 알루미늄 재질의 콜드 블록 및 플라스틱 재질의 고정볼트를 사용하였다.

가열장치는 앞서 언급한 바와 같이 열선과 팬으로 구성하였다. 방열장치의 냉각팬에 의해 방열판으로부터 배출되는 공기의 일부를 형상기억합금 가열부로 유도하여 배출하도록 고안하였다. 또한 배출구 끝단에 열선을 구성하여 배출공기의 온도를 원하는 온도로 조절할 수 있도록 구성하였다. Fig. 9는 본 연구에서 고안한 SMA 가열 및 냉각장치 기본구성을 보여주고 있다.

### 3.3 공구 매거진 제작

공구 매거진 내에 소형 공구(drill, end mill 등)를 거치할 수 있는 공구 거치대를 설치하였다. 종래에 개발된 머시닝센터 등과 같은 자동가공기에 있어서의 공구 거치대는 공압이나 유압기구를 사용하여 공구를 클램핑과 언클램핑 하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 머시닝센터와 같은 자동가공기는 사용하는 공구를 동력을 사용하여 거치하는 것을 볼 수 있으나 여기서 사용한 공구거치대는 공구를 무동력 방식으로 거치할 수 있다. 또한, 공구거치대에 거치하는 공구의 파지력을 균일하게 하고, 힘을 조정하여 공구거치대에 삽입되는 공구의 위치가 변동되지 않고 거치되는 구조를 갖게 하였다<sup>8)</sup>.

기존의 거치대는 스프링 플러저가 내장되어 있어 공구를 클램핑하기 전에 공구를 탄성력으로 지지했는데<sup>6)</sup>, 현재 시스템에서는 충분히 냉각을 시킨 후 위치로 가기 때문에 이 부분이 필요가 없다. 또한, 이전 연구에는 가열부로 이동하기 위해 공구를 지지하는 고무 가이드 구간이 있었다. 그렇지만 본 연구에서는 공구의 정밀한



클램핑을 위해 공구 대신 가열부가 이동하는 메커니즘을 사용함으로써, 이러한 부가장치가 없는 단순한 형태의 공구 매거진을 제작하였다.

여기서 사용된 거치대는 다음과 같은 구조를 가진다 (Fig. 10 참조). 거치대 내부의 공구 삽입구에 다수의 오링을 내장하여, 공구가 삽입된 후에 삽입된 위치 그대로 유지할 수 있게 하였다. 공구 세팅 시 공구의 위치 조정 등의 추가 교정 작업이 필요 없게 되므로 인해 공구의 세팅 시간이 크게 절감된다. 또한, 진동이나 충격에 의한 거치대 내측에 삽입된 공구의 위치가 변함이 없어 반복 정밀도를 높일 수 있다. 거치대 외측의 세트스크류의 조절을 통해, 공구의 가압력을 임의로 조절할 수 있는 효과도 가진다. 현재 모듈에서는 직선 형태의 공구 매거진에 2개의 공구 거치대를 장착했으며, 필요 시 개수를 증가시켜 확장할 수 있다.

### 3.4 공구교환장치의 설계 및 시제품 제작 성능시험

제한한 SMA 기반 공구 홀더의 자동공구교환장치의 시제품을 Fig. 11과 같이 제작하였다. 공구홀더는 XYZ 3축 직선이송 스테이지에 장착하였다. 공구 거치대는 두 개를 제작하여 직선 매거진

에 배치하였다. 가열/냉각 장치는 리드스크류와 LM블록으로 구성된 XY 스테이지에 장착되어 있다.

Fig. 12는 본 ATC 시제품의 공구 클램핑 및 언클램핑 작동과정을 단계별로 보여주고 있다. 먼저 공구 홀더를 교체위치로 이동 (a) 후 공구 삽입을 위해 1초간 홀더를 하강하고 6초간 콜드블록에 접촉함으로써 홀더를 냉각한다 (b). 콜드블록에 의해 공구의 언클램핑이 완료되고 (c), 1초간 다른 공구의 클램핑을 위해 공구 홀더를 교체위치로 이동한다 (d). 3초 후 냉각된 홀더를 클램핑 위치로 하강하여 홀더 내부로 공구를 위치시킨 후 가열부를 홀더 근처로 접근시킨다 (e). 6초간 가열을 통해 공구 클램핑을 완료한다 (f).

공구교체위치에서 공구를 홀더에 언클램핑 및 클램핑 하는데 소요되는 시간은 17초임을 실험적으로 확인하였다. 대형 공작기계의 톨 교환 시간보다는 길지만, 공구를 수동으로 교환하는 시간에 준하는 시간 내에 자동공구교환이 가능함을 확인하였다. 또한, 기존의 터릿형 공구교환장치에서는 공구 교환에 총 25초가 소요되었기에<sup>6)</sup> 8초의 교환시간 단축 효과가 있음을 확인하였다.

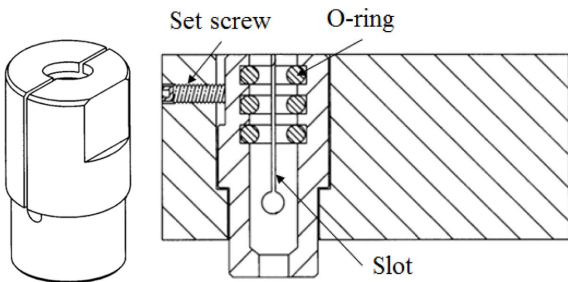


Fig. 10 Configuration of the tool magazine

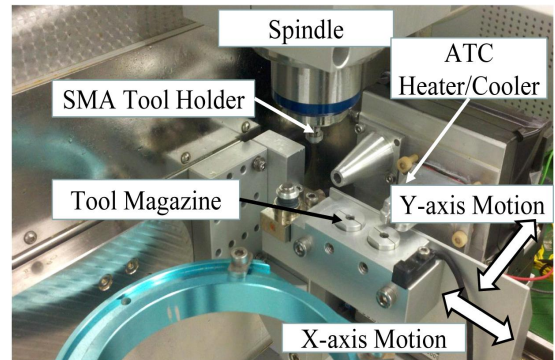


Fig. 11 Prototype of ATC

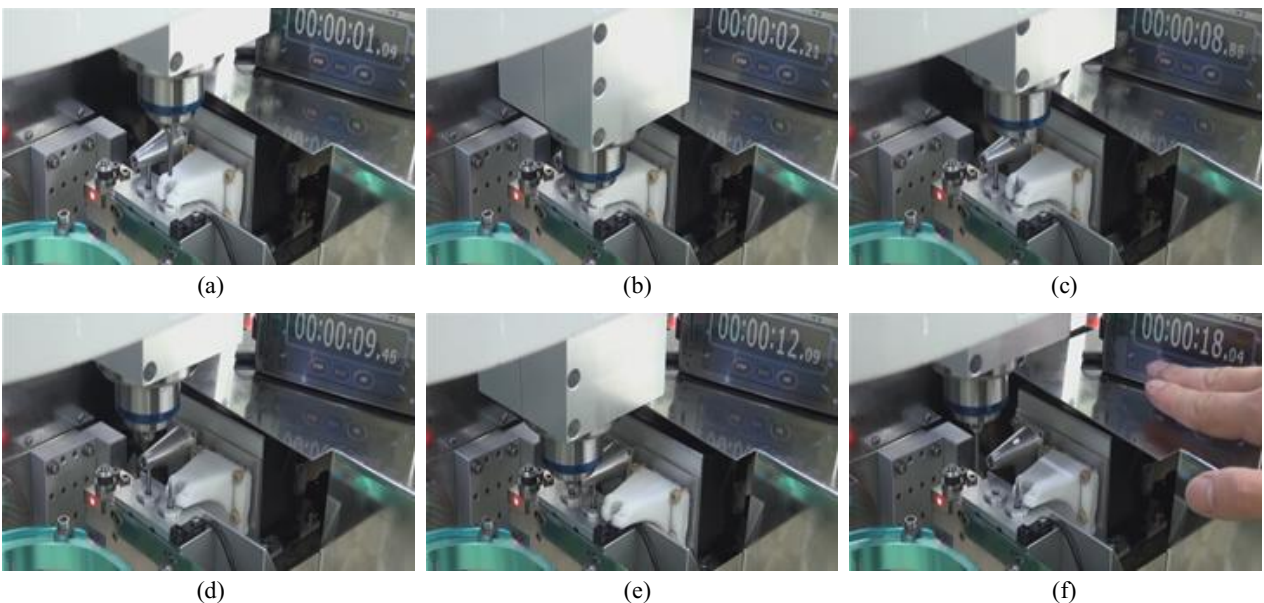


Fig. 12 Procedure of automatic tool changer

#### 4. 결 론

본 논문은 소형 공작기계용으로 개발된 SMA 기반 공구 홀더용 전용 자동공구교환장치 개발에 대해서 논의하였다. 자동공구교환을 위한 프로세스로써 4단계의 언클램핑 과정과 4단계의 클램핑 과정을 제안하였다. 이 프로세스에서 이송 메커니즘은 공작기계의 기본 XYZ축 이송테이블을 활용하였고, 기계식 공구 매거진을 장착하였다. 자동공구교환장치의 구성요소로써 열전소자를 이용한 가열 및 냉각장치를 개발하였다.

실험을 통해서 고정볼트로 플라스틱 재질을 사용하는 경우 1.6°C만큼 더 냉각시킬 수 있으며, 콜드블록 재질을 알루미늄으로 선정하면, 1.8°C만큼 더 냉각시킬 수 있음을 보였다. 가열장치에 열선을 추가로 구성한 결과 요구 성능을 만족하는 가열온도 30°C와 냉각온도 -15°C 성능을 얻었다. 제작된 시제품에 대한 공구 언클램핑 및 클램핑 동작 상태를 테스트한 결과, 공구교환 동작은 원활히 이루어졌고 소요시간을 측정된 결과 공구 교환이 17초에 완료됨을 보였다.

본 논문에서는 실험을 통해 재질을 변화시킴으로써 냉각 효율을 향상시킬 수 있음을 보였고, 제안한 자동공구교환 프로세스를 통해 기존의 장치에 비해 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

#### References

- [1] Shin, W. C., Ro, S. K., Kim, B. S., Park, J. K., 2010, Development of Automatic Tool Change System of the SMA-based Tool Clamping Device, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 19:5 710-715.
- [2] Kang, S. B., Yoon, K. S., Nam, T. H., Kim, J. S., Gjunter, V. E., 2002, Fracture Treatment using TiNi Shape Memory Alloy Bone Fixater (BRM-SH System), *Materials Transactions*, 43:5 1049-1051.
- [3] Ro, S. K., Park, J. K., Park, H. D., Kim, Y. K., 2013, Development and Evaluation of Ultra-precision Desktop NC Turning Machine, *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 22:4 747-754.
- [4] Otsuka, K., Wayman, C. M., 1998, *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 222-231.
- [5] Malukhin, K., Sung, H., Ehmann, K., 2012, A Shape Memory Alloy based Tool Clamping Device, *Journal of Materials Processing Technology*, 212:4 735-744.
- [6] Shin, W. C., Ro, S. K., Park, H. W., Park, J. K., 2009, Development of a Micro/Meso-tool Clamp using a Shape Memory Alloy for Applications in Micro-spindle Units, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 49:7-8 579-585.
- [7] MATWEB, n.d., viewed 18 August 2015, <<http://www.matweb.com/>>.
- [8] Hwang, Y. S., 2010, Tools Stationary Plate for Small CNC Milling Machine, KR Patent: 20-0447305.