

양방향성 형상기억합금을 이용한 공작물 척킹장치: 유용성 검증

신우철*, 노승국⁺, 박종권⁺
(논문접수일 2009. 5. 15, 심사완료일 2009. 9. 18)

Workpiece-Chucking Device Using Two-Way Shape Memory Alloys: Feasibility Test

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

Abstract

In this study, a workpiece-chucking device that generates a chucking force from a shape memory alloy is introduced. This paper first presents train procedure to transform a commercial one-way shape memory alloy into a two-way shape memory alloy, which makes unclamping mechanism of the chucking device simpler than that using the one-way shape memory alloy. Second, it describes a conceptual design of the workpiece-chucking device using the two-way type shape memory alloy. Third, it presents a prototype and its chucking characteristics, such as time-response of clamping/unclamping operations and a relationship between temperatures and chucking forces. Finally, it describes a mill-machining test conducted with the prototype. The results confirm that the proposed workpiece-chucking device is feasible for micro machine-tools.

Key Words : Workpiece-chucking device(공작물 척킹장치), Two-way shape memory alloy(양방향성 형상기억합금), Micro machine-tool(초소형 공작기계)

1. 서론

제품의 다기능화 및 소형화 경향에 따라 마이크로/메조 크기 부품의 수요는 점차 증가하고 있으며 관련된 효율적인 생산방식으로서 마이크로팩토리가 주목받고 있다.⁽¹⁾ 지금까지 소형부품 생산에 MEMS 방식이 주로 적용되고 있는 것이 사실이다. 그러나 점차 다품종 소량생산 체계로 전환되어 가고 복잡한 제품 형상과 다양한 재료의 적용을 요구함에 따라

MEMS 방식의 한계가 드러나고 있다. 그 결과 전통적 가공 방식을 기반으로 한 초정밀 가공 생산기술이 소형제품 생산에 시도되고 있다.⁽²⁾ 마이크로팩토리는 소형부품 가공이 가능한 최소 외형의 초정밀 가공기들로 구성된 생산 시스템으로서 에너지 및 자원절약, 부대설비 감축 효과와 생산라인의 용이한 재구성을 기대할 수 있다.⁽³⁾

초소형 공작기계를 개발하기 위해서는 핵심 구성요소들 중의 하나인 공작물 척킹장치의 소형화가 필요하다. 범용

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

공작기계에 적용되고 있는 기존 공작물 척킹장치들은 소형화에 한계가 있다. 예로서 스크류를 이용한 바이스 구조는 외형이 S배의 스케일 요소로 축소될 때 S^2 배로 허용전단응력이 떨어지기 때문에 원하는 체결력을 유지하기 위해서는 소형화에 한계가 있다. 다른 방식으로서 유압-공압을 이용하여 척킹하는 방식 또한 외형적으로 실린더의 크기가 S배 축소될 때 가압력의 크기는 S^2 배로 축소되는 문제가 있다⁽²⁾. 더불어 부수적인 장치로서 컴프레서, 축압기, 필터, 레귤레이터, 밸브장치 등이 필요하기 때문에 초소형 공작기계 시스템 적용에 적합하지 않다. 진공척 방식 역시 이러한 주변장치가 필요할 뿐만 아니라 주로 판형 공작물 고정에만 적합하여 적용상 한계를 지니고 있다.

공작기계에 있어서 공작물 척킹장치는 이송 테이블이나 주축과 같은 구성요소들에 비해 외형적으로 단순한 구조를 지니고 있지만 가공 정밀도에도 직접적으로 영향을 미칠수 있는 매우 중요한 요소일 뿐만 아니라 최종 사용자가 조작하는 부분으로서 조작상 편리성을 지니고 있어야 한다. 생산 시스템이 다품종 소량생산 체계로 바뀌면서 가공라인에서 빈번한 공작물의 교환이 이루어기 때문에 가공공정 시간 중 많은 시간이 공작물 교환시간에 할당 될 정도로 공작물 척킹에 대한 중요성이 커지고 있다. 또한 공작물 척킹상태의 동적 컴플라이언스가 높을 경우, 가공시 채터발생으로 인해 가공정도가 떨어지게된다⁽⁴⁾. 반대로 소형부품 가공시 과도한 체결력이 가해질 경우 공작물의 형상을 변형시켜 가공 치수정도를 떨어뜨리는 문제를 야기할 수 있다⁽⁵⁾. 결과적으로 공작물 척킹장치는 기본적으로 작동이 용이해야하며 적절한 체결력을 통해 공작물을 안정적으로 고정할 수 있는 성능이 요구된다.

본 연구는 초소형 공작기계에 적용이 가능한 공작물 척킹장치 개발을 목적으로 형상기억합금(SMA)을 도입하여 척킹장치의 구성을 간소화 하고 체결력 제어 기능을 구현하고자 하였다. 본 논문에서 상용 단일방향성 형상기억합금을 반복훈련과정을 통해 양방향성 형상기억합금으로 전환하여 적용함으로써 기본구조를 보다 간소화할 수 있었다. 또한 온도에 따른 체결력의 변화를 실험적으로 고찰하여 본 척킹장치의 체결력 제어 가능성을 확인하였다.

2. 양방향성 형상기억합금

2.1 형상기억효과

형상기억효과란 형상기억합금이 저온의 마르텐사이트 상에서 변형된 후에 고온의 오스테나이트 상에서 원래 형상으

로 스스로 회복되는 특성을 말한다. 구체적으로 단일방향성(one-way) 형상기억효과란 형상기억합금이 단지 오스테나이트 상의 원형만 기억하고 있어 외력에 의한 변형 후에 원형 회복만 가능한 특성을 말한다. 이와 구별된 양방향성(two-way) 형상기억효과란 형상기억합금이 원형뿐만 아니라 저온의 마르텐사이트 상일 때의 특정 형상을 기억하고 있어 외력 없이도 온도 조건에 따라 원형과 또 다른 특정 형상으로 전환이 가능한 특성을 말한다⁽⁶⁾. 상용 형상기억합금은 대부분 단일방향성 형상기억효과를 지니고 있으며 양방향성 특성을 갖기 위해서는 단일방향성 형상기억합금에 별도의 반복훈련과정을 거쳐야만 한다.

2.2 양방향성 형상기억효과 훈련

양방향성 형상기억효과를 지니기 위한 형상기억합금의 훈련방법으로서 마르텐사이트 상일 때 형상기억합금에 과도한 변형을 가한 후 열적 사이클링(thermal cycling) 처리를 하는 방법이 있다⁽⁷⁾. 본 연구에서 양방향성 형상기억효과 훈련에 적용된 실험장치를 Fig. 1에 보여주고 있다. 정밀바이스로 외력을 가하여 형상기억합금을 변형시키고 이때 변형량을 다이얼게이지를 통해 측정하였다. 열적 사이클링 구현을 위하여 가열장치로서 소형 열풍기를 이용하여 대략 50°C 정도로 가열하였고 냉각장치로서 냉각 스프레이를 사용하여 대략 -20°C 정도까지 냉각하였다. 본 연구에 사용된 형상기억합금은 Ni-Ti계 ((주)바이오스마트)로서 마르텐사이트 상변태 시작온도는 약 10°C, 오스테나이트 상변태 종료온도는 약 20°C이다. 형상기억합금의 원형은 링형태로서 크기는 내경 6 mm, 외경 9 mm 그리고 두께는 2 mm 이다.

양방향성 훈련은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 형상기억합금 링을 정밀바이스에 고정한 후 냉각 스프레이를 이용하

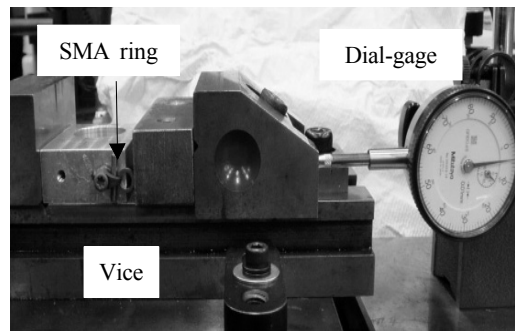


Fig. 1 Experimental setup for two-way train of shape memory alloys

여 약 -20°C 까지 냉각시켰다. 그리고 정밀바이스로 형상기억합금 링을 1 mm 압축변형 시켰다. 압축 후 온도가 다시 상온으로 났을 때 형상기억합금 링은 원형으로 회복되었다. 정밀바이스로 외력을 가하지 않은 상태에서 형상기억합금 링을 다시 냉각시켰을 때 링은 스스로 190 μm 압축변형함을 확인하였다. 그 다음에 형상기억합금 링을 냉각시킨 상태에서 외력을 다시 가하여 1 mm 압축변형 시키고 상온에서 회복시키는 사이클을 5회 수행한 후 냉각 시 스스로 변형되는 크기를 측정 한 결과 220 μm 임을 확인하였다. 이 사이클을 5회 더 수행한 후 냉각 시 스스로 변형되는 크기를 측정 한 결과 동일하게 220 μm 임을 확인하였다.

Fig. 2는 훈련된 형상기억합금 링의 양방향성 거동 특성을 검증하기 위한 실험장치를 보여주고 있다. 형상기억합금 링의 온도를 측정하기 위해 열전대를 부착하였고 변형량을 측정하기 위하여 전기 마이크로미터를 이용하였다. 열전대의 온도측정 신호와 전기 마이크로미터의 변형신호를 A/D 보드를 통하여 동기적으로 획득하였다.

Fig. 3은 훈련된 형상기억합금 링의 양방향성 거동에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 상온에서 약 -20°C 의 저온 의 온도 변화에 의해 형상기억합금 링은 진원에서 타원으로 형상이 스스로 변하며 그 변형량은 직경방향으로 대략 220 μm 이었다. 특히, 냉각과 가열의 온도 사이클 동안에 형상기억합금 링 형상의 변위는 그림과 같이 히스테리시스 특성을 보였다. 이 히스테리시스 특성은 온도에 따라 형상기억합금의 형상이 변하는 동안 분자구조 이동으로 발생하는 내부 마찰에 인한 것으로서 형상기억합금 고유의 열역학적 특성이다.⁽⁶⁾ 구체적으로 냉각 시 약 10°C 이하부터 링의 형상이 급격히 변형되는데 이는 본 연구에 적용된 형상기억합금의 마르텐사이트 상변태 시작온도가 10°C 부근인 특성을 지니고 있기 때문이다. 다시 상온으로 온도가 상승할 때에도 -10°C 부터 링의 원형 회복이 두드러지게 이루어 지는 현상도 형상기억합금의 오스테나이트 상변태 시작온도가 약 -10°C 인 특성을 지니고 있기 때문이다. 20°C 이후 부터 온도에 따른 변위의 변화가 급격히 떨어진 것은 적용된 형상기억합금이 약 20°C 에서 오스테나이트 상변태 종료가 이루어져 원형을 거의 회복했기 때문이다.

결과적으로 본 형상기억합금이 적용된 공작물 척킹장치는 상온에서 최대 클램핑 상태를 유지하게 되고 냉각 시 언클램핑 상태가 될 수 있으며 공작물 척킹장치의 조(jaw)가 이동할 수 있는 작동영역 크기는 형상기억합금링의 최대 변형량인 220 μm 임을 알 수 있다.

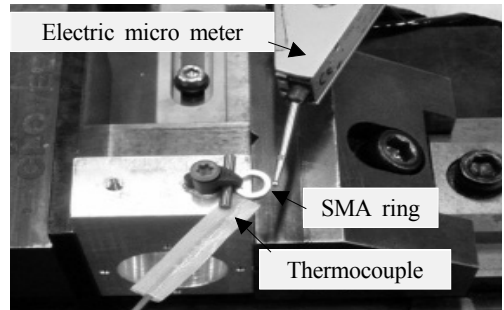


Fig. 2 Experimental setup for measuring deformations of SMA ring according to changes in temperature

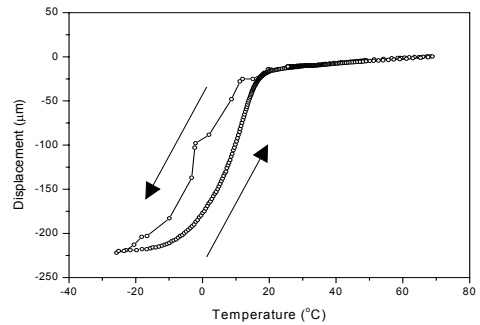


Fig. 3 Experimental results of deformations of SMA ring according to changes in temperature

3. 초소형 공작물 척킹장치

3.1 기본원리

형상기억합금을 이용한 척킹장치는 근본적으로 형상기억합금의 복원응력(recovery stress)을 기반으로 한다. 복원응력은 원형으로 복원 중인 형상기억합금이 외부 구조물과의 기계적 접촉으로 인해 구속될 경우 발생한다. 현재 이 특성을 이용한 여러 가지 클램핑 기구가 개발되어 왔다⁽⁸⁾. 본 클램핑 장치에서도 형상기억합금 링의 원형 복원이 공작물로 인해 구속될 때 발생하는 복원응력으로부터 척킹력을 얻어 공작물을 클램핑하는 원리이다.

그러나 일반적인 클램핑 장치들과는 달리 공작기계의 공작물 척킹장치는 클램핑 작동만큼 언클램핑 작동이 중요하게 고려되어야 한다. 왜냐하면 공작물 교환이 필요할 때마다 클램핑 및 언클램핑 작동이 반복적으로 이루어져야 하기 때문이다. 따라서 클램핑 작동뿐만 아니라 언클램핑 작동 역시 응답성이 좋고 정확하게 이루어져야 한다. 기존 연구에서는

단일방향성 형상기억합금 링을 적용하고 언클램핑 작동을 위해 외부 탄성력을 이용하는 방식을 구현하였다⁹⁾. 저온상태의 형상기억합금은 고온상태일 때보다 탄성계수가 떨어지는 특성이 있어 상대적으로 쉽게 변형되기 때문에 외부 스프링을 이용해 언클램핑 방향의 탄성력을 가하여 언클램핑 상태를 구현하였다. 하지만 이 스프링 탄성력은 클램핑 상태일 때에도 존재하기 때문에 형상기억합금의 체결력이 스프링 탄성력 크기만큼 상쇄되는 문제가 있다. 이 문제는 척킹 장치의 작동구간 크기와의 연관된다. 즉, 작동구간을 크게 하기 위해서는 언클램핑 시 링의 변형이 커야하므로 보다 큰 스프링력이 필요하다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 그 스프링력만큼 클램핑 작동 시 체결력은 줄어들게 된다. 이러한 구조적 모순을 해결하기 위해서 외부 탄성력 없이 형상기억합금 스스로 클램핑 상태와 언클램핑 상태의 전환이 가능하게 되어야 한다. 이것이 양방향성 형상기억합금의 적용이 필요한 이유이다.

3.2 기본구조

본 논문에서 제안하는 공작물 척킹 장치의 기본구조를 Fig. 4에 보이고 있다. 링형상의 양방향성 형상기억합금이 적용되어 온도에 의한 형상변화를 통해 클램핑 및 언클램핑 작동을 구현하는 구조를 볼 수 있다. 형상기억합금 링이 저온 상태일 때 타원형상이 되므로 공작물을 착탈할 수 있는 공간상 여유를 갖게된다. 반대로 고온 상태가 되면 형상기억합금 링이 원형으로 회복되는 중에 장착된 공작물에 의해

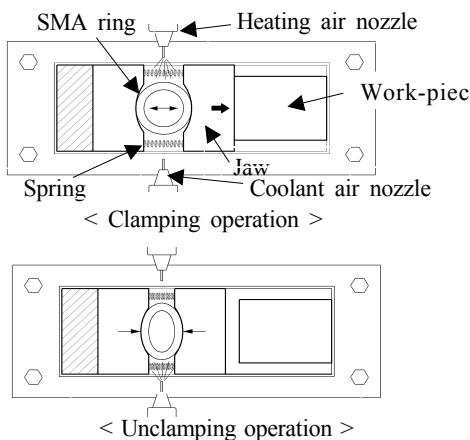


Fig. 4 Basic configuration of SMA-based workpiece-chucking device

구속되어 완전히 원형을 이루지 못하게 된다. 그 결과 복원 응력이 발생되고 장착된 공작물은 클램핑 상태가 된다. 클램핑/언클램핑 시에도 형상기억합금 링이 일정한 위치에서 작동하기 위해서 조(jaw)를 포함한 양 옆의 구조물의 접촉면이 링에 맞도록 곡면으로 제작되고 두 구조물은 스프링으로 구속되어 항상 적당한 압축력으로 링을 지지하는 구조를 이루고 있다. 이 스프링의 탄성력은 앞서 언급한 언클램핑을 위한 탄성력에 비해 훨씬 작아도 문제없다. 온도 제어를 위해 형상기억합금과 근접한 곳에 가열공기 노즐과 냉각공기 노즐이 위치하도록 하였다.

4. 실험적 고찰

4.1 시작품 제작

Fig. 5는 본 연구의 결과로서 일차적으로 제작된 형상기억합금 기반 공작물 척킹 장치의 시작품을 보여주고 있다. 구성 부품의 수가 적기 때문에 소형 제작이 용이하였다. 제작된 시작품을 통해 본 척킹 장치의 특성을 실험적으로 고찰하고 그 유용성을 검증하였다.

4.2 체결력 특성

Fig. 6은 본 시작품의 온도에 따른 체결력 특성을 고찰하기 위한 실험장치를 보여주고 있다. 열전대를 형상기억합금에 부착하여 온도를 측정하였다. 공작물 체결위치에는 로드셀을 장착하고 조에 고정된 바를 통해 로드셀 감지점으로 힘을 전달하는 구조를 구성하였다.

Fig. 7은 시작품의 온도에 따른 클램핑/언클램핑 작동에 대한 시간 응답성 실험결과를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 언클램핑 응답성으로서 냉각 스프레이로 냉각했을 때 결과이다. 온도 변화보다 체결력 변화가 약간 빨랐으나 거의 유사

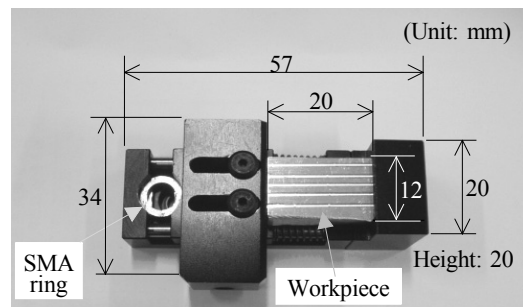


Fig. 5 Prototype of SMA-based workpiece-chucking device

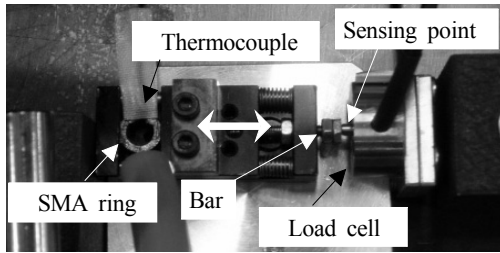


Fig. 6 Experimental setup for measuring chucking forces of prototype according to changes in temperature

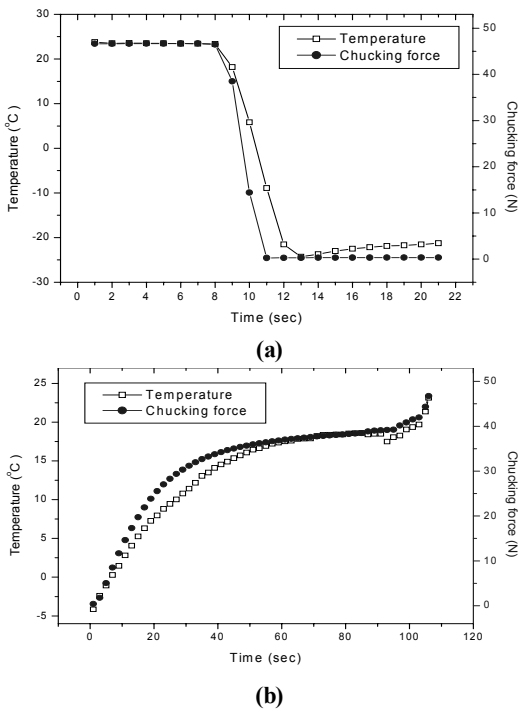


Fig. 7 Time-responses for chucking force of SMA-based chucking device according to changes in temperature: (a) during unclamping and (b) during clamping

한 응답성을 보였다. 적용된 냉각장치를 통해 언클램핑 상태로 전환하는데 약 3초가 소요되었다. Fig. 7(b)는 클램핑 응답성으로서 언클램핑 상태의 저온에서 당시 대기온도 17°C로 상승할 때까지 약 90초 간 방치한 후 소형 온풍기를 통해 강제 가열하는 동안에 체결력 변화를 보이고 있다. 언클램핑 결과와 같이 체결력의 변화가 온도변화 보다 약간 빨랐으나

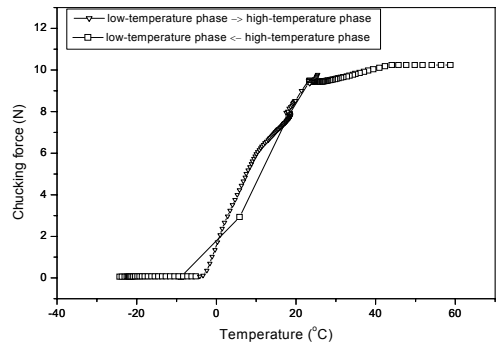


Fig. 8 Chucking force of SMA-based workpiece-chucking device according to changes in temperature

거의 유사한 응답성을 볼 수 있다. 즉, 본 형상기억합금 기반 공작물 척킹장치의 클램핑/언클램핑 작동 응답성은 가열/냉각 응답성에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 온도에 따른 체결력 변화에 대한 실험결과를 보이고 있다. 공작물과 조(jaw)가 처음 접촉한 상태의 온도 0°C부터 형상기억합금의 오스테나이트 상변태 종료온도인 20°C까지 구간에서 선형관계를 보이고 있다. 그리고 Fig. 3에서와 같은 온도 히스테리시스 특성을 보이지 않는다. 그 이유는 체결력은 형상기억합금의 복원이 공작물에 의해 구속된 이후에 나타나며 이때 더 이상 외형적 복원은 일어나지 않으며 대신 내부적으로 복원응력이 발생하게 된다. 외형 변화가 없으므로 앞서 설명한 형상기억합금 분자구조 이동에 의한 내부 마찰이 발생되지 않기 때문에 히스테리시스 특성을 나타내지 않는 것이다. 결과적으로 온도 변화의 방향과는 무관하고 그 크기에 의해서만 체결력이 변화가 일어나며 둘 사이 관계가 선형적이므로 제어 구성이 용이할 것으로 판단된다.

본 형상기억합금 기반 척킹장치의 공작물 체결 유용성을 검증하기 위해 시작품을 적용한 마이크로 엔드 밀링가공 테스트를 수행하였다. 가공 테스트 시 절삭조건은 스피indel 회전 속도 100,000 rpm, 절삭이송속도 0.34 mm/s 그리고 절삭깊이 10 μm로 설정하였다. 가공물 재질은 알루미늄합금이며 사용된 절삭공구는 날직경 1 mm의 두 날 평엔드밀 이다. 실험적 검증은 동일한 가공조건에서 일반 스크류 체결방식으로 공작물을 고정할 경우와 본 형상기억합금 기반 척킹장치로 고정할 경우의 가공면 프로파일을 서로 비교함으로써 이루어졌다. Fig. 9는 두 경우의 가공면 프로파일 측정결과를 보여주고 있다. 두 프로파일 모두 최대 높이가 차가 1.2 μm 수준으로 유사한 가공면 특성을 보이고 있다.

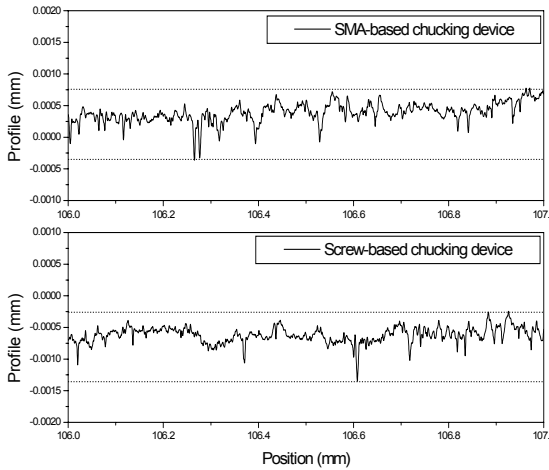


Fig. 9 Machining results using SMA-based chucking device and using commercial screw-based chucking device

5. 결론

본 논문은 초소형 공작기계에 적용이 가능한 초소형 공작물 척킹장치 개발을 목적으로 양방향성 형상기억합금을 이용함으로써 간소해진 척킹장치 기본 구조를 소개하고 체결력 제어 가능성을 검토하였다. 구체적으로 다음과 같은 세부 연구결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 상용 단일방향성 형상기억합금을 별도의 반복훈련과정을 거쳐 양방향성 형상기억합금으로 전환함으로써 언클램핑 작동을 위한 외력 없이도 형상기억합금 스스로 클램핑 및 언클램핑 작동을 구현할 수 있게 되었다. 그 결과 보다 큰 체결력은 얻을 수 있고 척킹장치의 구조를 보다 간소화할 수 있어 소형화에 용이할 것으로 판단된다.
- (2) 본 연구에서 제작된 시작품의 체결력 시간 응답성을 실험적으로 고찰한 결과 작동온도변화와 거의 동일한 응답성을 볼 수 있었다. 즉, 빠른 온도제어 장치를 통해 신속한 클램핑 및 언클램핑 전환이 가능할 것으로 예상된다.
- (3) 시작품의 온도와 체결력 관계를 실험적으로 고찰한 결과 선형관계를 갖는 작동구간이 존재하며 온도 히스테리시스 특성은 나타나지 않음을 확인하였다. 따라서 작동온도조절로써 체결력 제어가 용이할 것으로 판단된다.
- (4) 시작품을 적용한 가공 테스트를 수행하여 본 형상기억합금 기반 척킹장치가 가공 시 공작물을 안정적으로 고

정할 수 있는 성능을 지녔는지 검증하였다. 동일한 가공 조건에서 일반 스크류 체결방식을 적용한 경우와 동일한 가공결과를 얻음으로써 척킹장치로서 유용성을 확인하였다.

결과적으로 본 형상기억합금 기반 척킹장치는 기존 방식과 동일한 공작물 체결성능을 가지면서도 간소한 구조를 지녀 소형화가 가능하고 빠른 작동을 구현할 수 있으며 적절한 체결력 제어가 용이한 특징을 지녔다.

향후연구계획으로서 형상기억합금의 온도제어 방법을 보다 간소화할 수 있는 방법을 모색하고 효과적인 온도제어를 통해 체결력을 능동적으로 제어할 수 있는 공작물 척킹 시스템을 구현하고자 한다.

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) Luo, X., Cheng, K., Webb, D., and Wardle, F., 2005, “Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 515~528.
- (2) Kussul, E., Baidyk, T., Leopoldo, R. H., Alberto, C. R., and Velasco, G., 2006, “Scaling down of micro-equipment parameters,” *Precision Engineering*, Vol. 30, pp. 211~222.
- (3) Okazaki, Y., Mishima, N., and Ashida, Kiwamu, “Microfactory-Concept, History, and Developments,” 2004, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 837~844.
- (4) Park, J. K., Ro, S. K., Yoo, J. H., Kim, M. K., and Kook, J. H., 1998, “A Study on the Stability of Chucking System for Machine Tools,” *Proceeding of the KSMTE Spring Conference 1998*, pp. 135~142.
- (5) Kim, W. S. and Kim, D. H., 2005, “Factors Affecting the Form Accuracy in Ultra-precision Turning,”

- Proceeding of the KSMTE Autumn Conference 2005*, pp. 200~205.
- (6) Otsuka, K. and Wayman, C. M., 1998, *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, New York.
- (7) Sung, H., 2007, *High-Speed Fluid Bearing Micro-Spindles for Meso-Scale Machine Tools*, Ph.D Dissertation of the Northwestern University, USA.
- (8) Humbeck, J. V., 1999, "Non-medical applications of shape memory alloys," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 273-275, pp. 134~148.
- (9) Shin, W. C., Park, H. W., Ro, S. K., and Park, J. K., 2007, "Development of a Fixture System for Micro Scale Workpieces Using a Shape Memory Alloy," *Proceeding of the KSME Autumn Conference 2007*, pp. 36~37.