

형상기억합금을 이용한 회전공구 클램핑 장치 구현

정준모⁺, 신우철*, 박종권⁺⁺, 이동주⁺⁺⁺
(논문접수일 2007. 3. 9, 심사완료일 2007. 10. 28)

Implementation of the rotating tool clamping device using a shape memory alloy

J. M. Chung⁺, W. C. Shin*, J. K. Park⁺⁺, D. J. Lee⁺⁺⁺

Abstract

This paper presents the construction of micro tool clamping device using a Ni-Ti shape memory alloy(SMA) ring. Clamping force of the device is produced by elastic force of the SMA reverted to its original shape in normal temperature. Phase transformation of the SMA was realized by temperature control using a peltier element. Prototype of the SMA tool clamping device was fabricated and examined its clamping force and clamping/unclamping operation.

Key Words : micro tool clamping device(소형 공구 클램핑 장치), shape memory alloy(형상기억합금), peltier element(펄티어소자)

1. 서론

최근 IT, BT, RT의 신산업 분야는 소형화, 지능화, 복합화를 지향하는 기술추세에 있다. 따라서 단위 체적당 구성부품의 수가 늘어나게 되고 소형부품의 필요성과 수효는 점점 증가할 것으로 예상된다. 이를 토대로 소형부품의 생산성 향상을 목적으로 가공물 크기가 줄어든 만큼 가공 시스템의 크기를 축소하여 에너지 절감, 시설 및 관리비 경감 그리고 환경오염을 줄이는 효과를 얻고자 하는 연구가 진행 중에 있다⁽¹⁾.

형상기억합금이란 온도의 변화에 의하여 변형된 형상이 원래의 형태로 돌아갈 수 있는 금속재료를 말하고 이러한 특성을 형상기억효과라고 한다. 형상기억효과는 초기에 변

형된 형상기억합금이 온도가 상승하면서 원래의 형상으로 복귀하려는 특성을 말하며, 이러한 특성은 매우 큰 복원응력(recovery stress)을 발생시키기도 한다.

초탄성 거동은 상대적으로 높은 온도에서 일어나는 현상으로 부하, 제하 과정에서 비선형 특성을 유발한다. 이러한 변형에 대한 복원은 주위의 환경과 경계조건에 의한 형상기억합금 재료의 마르텐사이트 상변태(martensite phase transformation)의 결과이다. 응력이 없는 상태에서 높은 온도의 조건에서 형상기억합금은 모상(parent phase)인 오스테나이트 상의 형태로 존재하며, 온도가 낮아지면 결정구조가 마르텐사이트 상으로 변하게 된다. 응력이 없는 경우 형상기억합금은 네 개의 천이온도(transition temperature)가

+ 충남대학교 기계공학과 대학원
* 교신저자, 한국기계연구원 지능기계센터 (swc1@kimm.re.kr)
주소: 305-343 대전시 유성구 장동 171
++ 한국기계연구원 지능기계센터
+++ 충남대학교 기계공학과

존재하며, 다음과 같이 정의된다⁽²⁾.

- M_s : 마르텐사이트 상변태 시작온도
- M_f : 마르텐사이트 상변태 종료온도
- A_s : 오스테나이트 상변태 시작온도
- A_f : 오스테나이트 상변태 종료온도

공작기계 소형화를 구현하기 위해서는 부품의 크기 축소와 함께 구성부품의 수를 가능한 줄이는 방법이 효과적일 것으로 판단된다. 특히, 주축에 드릴, 엔드밀 같은 공구를 장착하는 부분에 대해 기존 메커니즘은 아버나 폴릿에 공구를 삽입하고 조(jaw)를 이용하거나 테이프 면에 유압이나 나사 체결력을 가하여 클램핑력을 발생시키는 방식이 주류를 이루고 있다. 이 방식은 아버나 폴릿과 같은 매개체가 필요하고 클램핑력을 얻기 위해 별도의 유압장치나 기구 메커니즘이 필요하여 소형화하는 데 어려움이 있다.

본 논문은 형상기억합금을 적용하여 공구 클램핑 장치를 컴팩트한 구조로 구현하여 소형화를 실현하는 데 궁극적인 목적을 두고 있다. 이를 위해 형상기억합금 링의 내경을 저온에서 확대시키고자 펠터 소자를 적용한 확대기구를 제작하고 그 변형률을 고찰하였다. 그리고 형상기억합금 공구 클램핑 장치의 프로토타입을 제작하고 클램핑 토크와 언클램핑 작동을 실험적으로 확인하였다.

2. 형상기억합금 공구 클램핑 장치

2.1 형상기억합금

변형된 형상기억합금이 원래 형상으로 회복될 때 외부 구조물에 의해 그 거동이 제약되면 형상기억합금에 의해 상당한 복원응력이 발생하게 된다. 이러한 형상기억합금의 복원응력을 이용하여 여러 가지 클램핑 기구가 개발되어 왔다⁽³⁾. 그 예로서 항공기에 사용되는 튜브 커플링, 패스너(fastener), 파이프 커플링⁽⁴⁾, 골절된 뼈를 조여 주는 기구⁽⁵⁾ 등이 있다. 기본 작동원리는 형상기억합금을 마르텐사이트 상변태 온도 영역에서 변형시켜 클램핑 시키고자 하는 곳에 위치시킨 뒤 상온에서 발생하는 형상기억합금의 복원응력을 이용하여 클램핑하는 원리이다.

위에서 언급한 형상기억합금의 기존 클램핑 장치들과 구별되게 본 논문의 공구 클램핑 장치가 갖는 특징으로는 클램핑 작동만큼 언클램핑 작동도 중요하게 고려되어야 한다는 점이다. 다시 말하면 공작기계 주축의 공구 클램핑 장치로서 적용되기 위해서는 공구교환 때마다 클램핑/언클램핑 작동이 반복적으로 원활하게 이루어 질 수 있어야 한다는 것이

다. 이를 위해서 양방향성(two-way) 형상기억합금을 적용하여 클램핑/언클램핑 조건에 맞는 형상을 스스로 변화시킬 수 있는 클램핑 구조를 고려해 볼 수 있다. 그러나 형상기억합금이 양방향성을 갖기 위해서는 별도의 반복훈련(train) 과정을 거쳐야 하는 어려움이 있다. 이 점을 고려하여 본 논문은 단일방향성(one-way) 형상기억합금을 적용하여 클램핑/언클램핑 작동을 구현할 수 있는 구조를 제안하고 있다.

본 연구에 적용한 형상기억합금은 Ni-Ti계(주)바이오스마트로서 조성비는 Ni 50.4%, Ti 49.6%이다⁽⁶⁾. M_s 는 10°C 부근이고 A_f 는 30°C 부근이다. 이 형상기억합금의 상변화 특성으로 10°C 이하 저온에서 적은 힘으로 소성변형이 가능하고 30°C 이상에서 원래 형상으로 복원되어 82GPa의 탄성계수를 지니게 된다.

2.2 기본 구조

Fig. 1은 형상기억합금을 이용한 공구 클램핑 장치의 기본 구조를 보여주고 있다. 주축선단에 공구 생크부가 삽입될 구멍과 클램핑력에 의해 반경방향 탄성변형이 용이하게 일어날 수 있도록 슬롯이 120° 간격으로 가공되어 있다. 형상기억합금 링은 상온에서 오스테나이트 상으로 존재하며 이 때 그 내경은 주축선단 외경보다 다소 작게 제작된다. 따라서 형상기억합금 링이 M_s 이하 온도로 냉각된 상태에서 내경이 적당한 크기로 확대되어야 주축 선단에 끼울 수 있다. 형상기억합금 링이 주축선단에 끼워진 후 상온상태가 되면 형상기억합금의 복원응력에 의해 주축 선단부가 반경방향으로 수축 변형하여 삽입된 공구를 클램핑하게 된다. 반대로 형상기억합금이 냉각되어 마르텐사이트 상이 되면 복원응력이 사라지기 때문에 수축 변형되었던 주축 선단부가 탄성력에

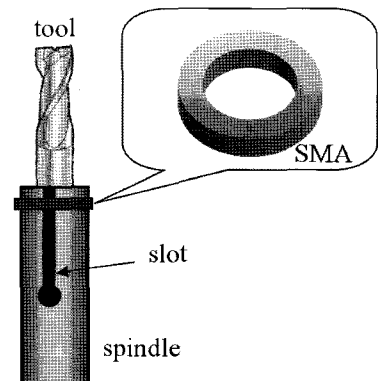


Fig. 1 Basic construction of SMA tool clamping device

의해 원래 형상으로 회복되고 공구는 언클램핑 상태가 된다.

이 메커니즘은 기존의 클램핑 장치에 주로 사용되는 테이퍼면이 없는 특징이 있다. 그 결과 테이퍼 면의 가공정도에 따른 클램핑력 저하와 기하학적 공구 셋업 오차 발생 문제가 고려되지 않는다. 또한 클램핑력을 얻기 위한 나사 또는 기어구조라든지 스프링 또는 유압장치가 형상기억합금 링으로 단순화됨으로써 회전 시 진동을 유발시키는 질량불균형 요소가 크게 줄어들었다. 따라서 고속회전 주축에도 적합한 형태로 사료된다. 그리고 형상기억합금을 이용한 액추에이터는 유압 액추에이터에 비해 소형화 되었을 때 보다 높은 파워 밀도를 지니고 있다⁷⁾.

3. 실험 및 결과고찰

3.1 형상기억합금 확대 실험

본 연구에 적용한 형상기억합금을 저온상태에서 내경을 확대시켜 소성변형 시킨 후 다시 무부하 상온상태에 놓아 형상이 복원되는 특성을 실험적으로 확인하였다. 이 실험을 위한 장치를 Fig. 2에 보이고 있다. 형상기억합금을 냉각시키기 위한 장치로서 펠티어 소자를 적용하였다⁸⁾. 본 연구에 적용한 펠티어 소자는 Vortex Semiconductor Inc.의 VS1M-1.4-127-6.0모델이다. 열전소자의 크기는 40×40mm이고 최대 heat pumping capacity는 52.9W이다. 형상기억합금의 특성 상 영하온도 영역과 상온에서 작동하기 때문에 정밀한 온도제어는 필요치 않을 것으로 판단되어 펠티어 소자 구동에 별도의 피드백 제어 시스템은 구성하지 않고 직류전원만 인가하였다. 이 펠티어 소자와 접촉해 있는 쿨드블록에 나사로 상하로 이동할 수 있는 원추블록을 장착했다. 이 원추블

록에 실험대상인 형상기억합금을 끼운 뒤 나사를 회전하여 원추블록을 아래로 이동시킬 때 테이퍼 면 접촉에 의해 형상기억합금 내경이 확대되는 구조이다.

실험대상인 형상기억합금의 원형치수는 내경 $\phi 8.98\text{mm}$, 외경 $\phi 12.84\text{mm}$ 두께 2mm이다. 이 형상기억합금 링의 확대실험결과를 Table 1에 정리하였다. 확대된 상태의 링 외경은 원추블록에 끼워진 상태에서 측정된 것으로 네 번째 실험이 링을 최대로 확대한 경우가 된다. 한편 확대된 상태의 링 내경은 원추블록에서 빼낸 후 측정된 것으로서 네 번째 실험에서 최대 확대력을 가했음에도 불구하고 세 번째와 동일한 크기로 나타난 것을 볼 때 형상기억합금 링이 소성변형할 수 있는 최대 크기는 한정되어있고 적용된 형상기억합금 링의 경우 그 크기가 $\phi 9.30\text{mm}$ 인 것으로 사료된다. 첫 번째와 두 번째 실험에서 형상기억합금 링의 내경을 각각 $\phi 9.16\text{mm}$, $\phi 9.15\text{mm}$ 로 소성변형 시킨 이후에 상온에서 무부하 상태로 놓았을 때 내경이 $\phi 9.03\text{mm}$ 으로 회복되었다. 세 번째 실험에서 좀 더 크게 변형시켰을 때 복원된 링의 내경이 $\phi 9.05\text{mm}$ 로 나타났으나 네 번째 실험에서 다시 $\phi 9.03\text{mm}$ 으로 복원된 것을 볼 때 세 번째 실험 후 형상기억합금 링이 영구변형이 일어난 것은 아님을 알 수 있다. 그 원인은 내경 측정에 있어서 0.01mm 분해능 전기 버니어캘리퍼스를 이용하는 중에 측정위치 및 측정압의 변동에 따른 측정 오차로 사료된다.

위 실험에서 적용된 형상기억합금 링이 냉각상태에서 최대 $\phi 9.30\text{mm}$ 로 소성변형이 가능함을 확인하였고 이 결과를 토대로 형상기억합금이 끼워질 주축 선단부분의 외경을 결정하였다. 상온에서 링과 주축선단 사이의 간섭량을 가능한 크게 하여 체결력을 높이고자 하였고⁹⁾ 조립여유도 고려하여 주축선단의 직경을 $\phi 9.25\text{mm}$ 로 설계 제작하였다.

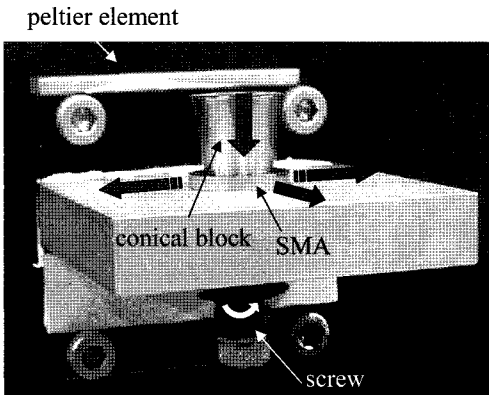


Fig. 2 Expansion test of SMA ring

Table 1 Expansion test results of SMA ring

temperature (load)	low temp. (expansion)		normal temp. (release)	
	external	inside	external	inside
dia.(mm) count	external	inside	external	inside
the beginning	-	-	12.84	8.98
1st	13.26	9.16	12.84	9.03
2nd	13.25	9.15	12.82	9.03
3rd	13.35	9.30	13.12	9.05
4th	13.45	9.30	13.12	9.03

3.2 체결력 평가실험

Fig. 3은 형상기억합금 공구 클램핑 장치의 클램핑력 측정 장치를 보여주고 있다. 클램핑된 공구는 직경 6mm 드릴이다. 공구 생크 상단부에 홀더를 이용하여 링크구조로 로드셀(CAS Co.)과 연결하였다. 로드셀의 다른 쪽은 외부에 고정되어 있다. 형상기억합금 공구 클램핑 장치는 공구의 생크 하단부를 체결한 상태이고 스펀들은 회전 스테이지 상에 장착되어 있다. 회전 스테이지가 회전함으로써 공구 클램핑 장치와 공구 사이에 비틀림 작용이 일어난다. 이때 로드셀에 감지되는 인장력 거동을 측정한다.

Fig. 4는 회전 스테이지가 회전하는 동안 로드셀 측정신호로 유추한 클램핑 토크의 변화곡선을 보여주고 있다. 부하가

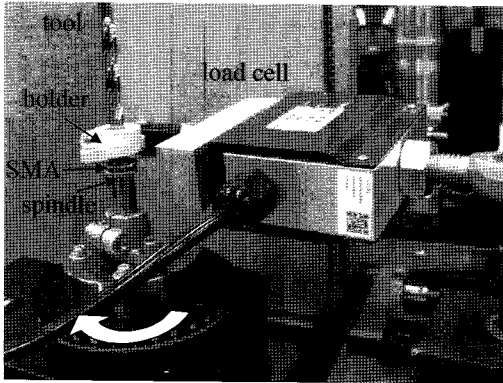


Fig. 3 Experimental setup for measuring tool clamping force

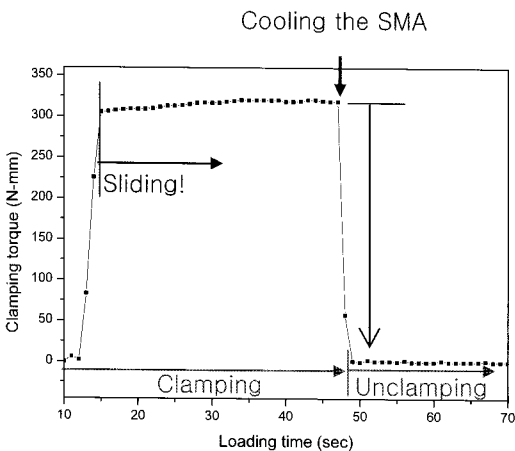


Fig. 4 Results of tool clamping force of SMA tool clamping device

걸린 이후 급상승 하다 약 300 N-mm 부근부터 거의 일정해진다. 이것은 공구와 공구 클램핑 장치 사이에 슬라이딩이 일어나기 때문이다. 이 결과로서 슬라이딩이 일어나기 직전의 클램핑 토크 305 N-mm을 본 형상기억합금 공구 클램핑 장치의 최대 클램핑 토크로 평가되었다.

실험에서 공구와 클램핑 장치 사이에 슬라이딩이 일어날 때에도 형상기억합금에 의한 클램핑력은 유지되고 있다. 언클램핑 특성을 확인하기 위해 슬라이딩 되는 중에 형상기억합금을 냉각시켜보았다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 형상기억합금 냉각에 의해 클램핑 토크가 제로로 떨어졌다. M_s 이하 온도에서 형상기억합금이 복원응력을 잃어버렸기 때문이다. 이로써 형상기억합금에 의한 공구 클램핑과 언클램핑 작동을 온도제어를 통해 구현할 수 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 형상기억합금을 적용하여 공구 클램핑 장치를 구현함으로써 보다 콤팩트한 구조의 공구 클램핑 메커니즘을 소개하고 있다. 구체적으로 다음사항들을 수행하였다.

- (1) 'O'형상의 형상기억합금을 적용하여 공구 클램핑 장치의 기본구조를 보이고 있다. 기존 콜렛-척 방식의 공구 클램핑 장치에 비해 부품의 수가 크게 줄어들었으므로 소형화에 용이하고 누적공차에 의한 셋업오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 주축 체결을 위해 형상기억합금을 냉각상태에서 확대시킬 기구를 펠터어 소자와 원추블록을 이용하여 제작하였다. 확대실험 결과 냉각된 상태에서 내경이 $\phi 8.98\text{mm}$ 에서 최대 $\phi 9.30\text{mm}$ 으로 확대 소성변형시킬 수 있었고, 다시 상온에서 $\phi 9.03\text{mm}$ 으로 복원되는 결과를 확인할 수 있었다. 이와 같은 형상기억합금 링의 확대 가능범위 내에서 주축선단 공구홀더 부분의 외경치수를 결정할 수 있다.
- (3) 형상기억합금 기반 공구 클램핑 부분을 제작하여 클램핑 토크를 실험적으로 평가한 결과 305 N-mm 성능을 확인함으로써 마이크로 엔드밀링, 드릴링에 적용 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 공구가 클램핑된 상태에서 형상기억합금 링을 냉각시켰을 때 클램핑 토크가 제로로 떨어짐을 실험적으로 확인함으로써 온도제어를 통해 클램핑/언클램핑 작동 구현이 가능함을 보였다. 이것은 단일방향성 형상기억합금을

통해 양방향성 효과를 얻기 위하여 본 논문에서 제안한 메커니즘이 실현 가능함을 입증한 것이다.

향후 계획으로는 클램핑력을 극대화하기 위해 형상기억 합금의 소성변형량과 상온 시 복원력의 관계를 고찰하고 형상기억합금의 복원력에 따른 주축 선단부 구조해석 및 형상 설계를 수행하고자 한다.

참고 문헌

- (1) Park, J. K., Ro, S. K., Kim, B. S., and Kyung, J. H., 2005, "Design of Micro-Machining System for Micro/Meso Mechanical Component," *KSMTE Autumn Conference*, pp. 391~396.
- (2) Lee, I., and Yang, S. M., 2004, "Character and Application of SMA," *Journal of the KSME*, Vol. 44, No. 6, pp. 34~39.
- (3) Otsuka, K., and Wayman, C. M., 1998, *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, New York, pp. 220~239.
- (4) Brinson, L. C., and Lammering, R., 1993, "Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and Their Application," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 30, No. 23, pp. 3261~3280.
- (5) Kang, S. B., Yoon, K. S., Nam, T. H., Kim, J. S., and Gjunter, V. E., 2002, "Fracture Treatment Using TiNi Shape Memory Alloy Bone Fixater (BRM-SH System)," *Material Transactions*, Vol. 43, No. 5, pp. 1049~1051.
- (6) Kim, E. Y., Park, J. W., Jeong, S. Y., Lee, D. W., and Park, J. K., 2006, "Chucking/Clamping System for Miniaturized Machine using SMA," *KSMTE Spring Conference*, pp. 145~150.
- (7) Malukhin, K., and Ehmann, K., 2006, "A Monolithic Shape Memory Alloy Based Micro/Meso Scale Manipulator," *5th International Workshop on Micro-Factories*.
- (8) Shin, W. C., Ro, S. K., Park, J. K., and Lee, D. W., 2006, "Study on the micro tool clamping device using SMA and peltier element," *KSMTE Autumn Conference*, pp. 250~254.
- (9) Doughtie, V. L., Vallance, A., and Kreisle, L. F., 1964, *Design of Machine Members*, McGraw-Hill, pp. 456~457.