

레이저 가공을 이용한 형상기억합금 박막 마이크로 액추에이터 제조 Manufacturing of Shape Memory Alloys(SMA) Sheet Micro actuator using Laser Machining

*김승원¹, #조규진¹, 주종남¹

*S. W. Kim¹, #K. J. Cho(kjcho@snu.ac.kr)¹, C. N. Chu¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Shape Memory Alloys(SMA) Sheet, Micro actuator, Laser Machining, Taguchi Methods

1. 서론

마이크로 로봇의 제작에 있어 액추에이터의 선정은 로봇의 크기와 무게, 동작 특성을 결정하는 중요한 설계 고려사항이다. 현재 마이크로 로봇의 액추에이터 발전 방향은 기존의 모터와 기어의 사용을 최소한으로 하고, 로봇 본체의 크기와 무게를 최소화 하는 방향으로 나아가기 위해 초소형 액추에이터를 개발하는 추세다. 그 중에서 형상기억합금(Shape Memory Alloys, SMA)을 이용한 액추에이터가 마이크로 로봇 분야에서 주목을 받고 있다.

형상기억합금은 니켈(Ni)과 티타늄(Ti)을 기반으로 구성된 합금으로 온도에 따라 원자들의 결합구조가 바뀌어 하나의 물질에서 서로 다른 응력-변형률의 관계가 나타나는 현상을 갖는다. 이러한 특성을 이용하면 형상기억합금을 액추에이터로 활용할 수 있다. 현재 형상기억합금을 이용한 마이크로 액추에이터의 형태는 대다수가 와이어 형상 스프링, 코일 형상 스프링, 2 차원 평면 스프링 등이 있다. Leester-Schädel, M. 등의 연구에서는 형상기억합금 박막을 가지고 레이저 가공을 통해 다양한 형상의 2 차원 평면 스프링을 제작하여 마이크로 집게와 인공근육, 수술용 삽입관 조절기에 사용하였다[1]. 위의 논문에서처럼 형상기억합금 박막을 액추에이터 소재로 사용한 이유는 기존 액추에이터보다 체적을 적게 차지하여 액추에이터로 사용하는 마이크로 구조물의 크기를 줄일 수 있기 때문이다.

마이크로 액추에이터에 사용할 형상기억합금 박막 소재의 2 차원 평면 스프링을 제작하려면 기존의 기계절단 방식으로 가공하기 힘들다. 따라서 마이크로 액추에이터의 개발에는 광학절단 가공 방식으로 레이저 가공을 이용한다. 하지만 레이저 가공 또한 설계한 스프링 형상을 절단한 후의 절단 형상을 깨끗이 하기 위해서는 다수의 연구 논문에서 수행하고 있고 Leester-Schädel, M. 등의 연구에서처럼 가공 후 에칭과 같은 후처리가 필요하다 [1]. 하지만 가공물의 에칭을 통한 후처리는 절단면을 깔끔하게 만드는 대신에 절단면을 포함한 가공 소재의 20%에 해당하는 체적이 식각되기 때문에 재료의 소모가 심한 단점이 있다. 따라서 재료의 소모 없이 레이저 가공단계에서 온전한 가공 형상을 유지하기 위해서는 고려해야 할 요인들이 있다. 가공 대상물에 영향을 미치는 가공 조작 변인으로 레이저 출력, 레이저 절단속도, 재료 두께, 레이저 모드 등을 가지고 레이저 가공 특성과 가공 결과물의 품질을 분석한 연구가 Mathew, Jose 등, El-Taweel, T. A. 등의 논문에서 살펴볼 수 있다 [2-3]. 이러한 가공 조작 변인들을 조절하여 얻을 수 있는 가공 품질로는 광재(Dross), 절단 폭, 열 변형 영역(Heat affected zone, HAZ) 등을 고려할 수 있다.

따라서 본 연구의 주제는 형상기억합금 박막 소재의 마이크로 액추에이터 스프링의 제작에 있어 레이저 가공으로 얻을 수 있는 마이크로 액추에이터의 품질과 가공 조작 변인의 상관관계를 분석하는 것이다. 이 연구를 수행하는데 있어 실험 설계의 효율성 향상을 위해 실험 수행 계획에 Taguchi 실험계획법을 적용하였다. 이 방법을 적용하여 최소한의 실험 자료를 가지고 가공 조작 변인과 가공 결과물 품질과의 상관관계를 도출하였다.

Table 1 Typical properties of Ni-Ti shape memory alloys

Properties	Description
Melting point (°C)	1,310
Density (kg/m ³)	6,500
Thermal conductivity of the Martensite (W/mK)	9
Thermal conductivity of the Austenite (W/mK)	18
Electrical resistivity (μΩcm)	50-110

Table 2 Experimental parameters and levels

Input parameter	Symbol	Level		
		-1	0	1
Power (W)	P	7	9	11
Pulse repeat rate (kHz)	PRR	25	30	35
Cutting cycle (time)	CC	4	8	12
Cutting cycle delay time (s)	CCDT	0	10	20

2. 실험장비, 소재 및 실험방법

실험 장비로 사용한 레이저 장비는 IPG Photonics 사의 YLP-1/100/20 Ytterbium-doped 1064 nm pulsed fiber laser 로서, 장비 성능은 평균 출력이 20 W 이고 과장 폭은 100 ns, 과장 반복속도는 20-50 kHz, 빔 품질은 M² > 1.6 이다.

가공 소재인 형상기억합금 박막은 Memory-Metalle GmbH 사 Alloy H 모델로 주요 사용 용도는 액추에이터 응용이다. 성분비는 니켈이 약 49 % 를 차지하고 있다. 형상 기억 발현 온도범위는 95-110 °C 이다. 박막 두께는 50 μm 를 사용하였다. 실험에 사용한 형상기억합금 박막의 물성치는 Table 1 과 같다.

본 실험에서는 4 가지 가공 조작 변인들을 각각 3 단계로 나누었고 Table 2 와 같다. 4 개의 변인에 대해 각각 3 단계로 나누어서 나올 수 있는 실험 모델은 총 81 개이다. 이것을 전부 실행하는 것은 실험에 소요되는 자재, 시간 비용 측면에 있어서 비효율적이다. 따라서 최소의 실험 모델로 전반적인 최적 가공 조건을 결정하기 위해, Taguchi 실험계획법에 따라 L9(3⁴) 직교 배열표를 작성하였고 Table 3 에 명시하였다. 실험 수행에 있어 외부간섭효과를 줄이기 위해 각 모델마다 3 회씩 실험을 수행하였다.

Table 3 L9(3⁴) matrix for the experiments

Case	P	PRR	CC	CCDT
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	1	1	1
4	0	-1	0	1
5	0	0	1	-1
6	0	1	-1	0
7	1	-1	1	0
8	1	0	-1	1
9	1	1	0	-1

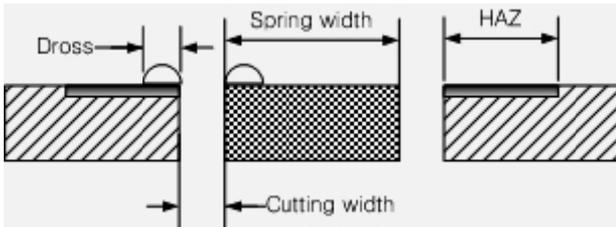


Fig 1. Geometry of the laser cut

Table 4 Experimental results and SN ratio

Case	Spring width		Dross		Cutting width		HAZ	
	μm	η	μm	η	μm	η	μm	η
1	177	-4498	22	-26.67	21	-26.30	45	-32.97
2	178	-4499	27	-28.73	26	-28.27	33	-30.27
3	180	-4511	23	-27.18	27	-28.75	52	-34.30
4	173	-44.78	25	-28.02	20	-26.15	37	-31.33
5	148	-43.39	30	-29.64	54	-34.63	62	-35.90
6	175	-44.86	19	-25.73	39	-31.82	40	-32.12
7	136	-42.67	42	-32.44	64	-36.17	100	-39.97
8	158	-43.99	17	-24.78	54	-34.70	39	-31.79
9	136	-42.69	65	-36.32	69	-36.74	82	-38.28

3. 결과 분석

실험을 수행하여 측정된 스프링 폭, 광재 폭, 절단 폭, 열 변형 영역 범위를 가공 품질로 선정하였다. 측정 기준은 Fig. 1에 도시하였다.

총 9 가지 모델의 실험 결과를 가지고 품질 계산을 수행할 때 망소(Smaller-the-better, SB) 기법을 가정으로 삼고, 이에 따른 SN(Signal Noise) 비를 산출하였다. 실험 모델 별 품질을 계산할 때 사용한 SN 비(η) 계산은 식 (1)을 사용하였고, 모델 i 에 대해서 측정된 품질 값 3 개의 평균을 \bar{x}_i^2 로 설정하여 계산한 결과는 Table 4와 같다.

$$SB_{\eta} = -10\log\bar{x}_i^2 \quad (1)$$

SN 비의 절대값이 클수록 그에 해당하는 변수가 품질에 미치는 영향력이 크다고 해석할 수 있다. 산출한 SN 비(η)를 가지고 각 가공 조작 변인의 단계별로 평균을 내어 하나의 가공 조작 변인에서의 SN 비의 최대값과 최소값의 차를 통해 해당 가공 조작 변인의 가공 품질에 대한 기여도를 계산하였고 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Parameters influence rank and contribution

Parameters	Spring width		Dross	
	Rank	Contribution (%)	Rank	Contribution (%)
P	1	49.8	3	24.06
PRR	4	2.5	4	13.33
CC	3	23.2	1	34.86
CCDT	2	24.5	2	27.75

Parameters	Cutting width		HAZ	
	Rank	Contribution (%)	Rank	Contribution (%)
P	1	48.83	2	29.57
PRR	2	18.07	4	15.97
CC	3	16.87	1	31.45
CCDT	4	16.23	3	23.02

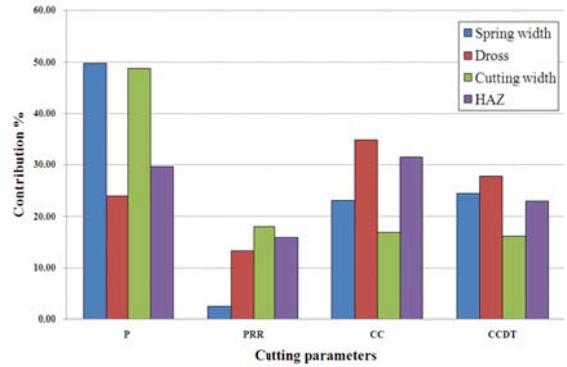


Fig. 2 Contribution of cutting parameters on the quality of cut

4. 결론

앞서 분석한 Table 5의 가공 조작 변인의 가공 품질에 대한 기여도를 그래프로 그려보면 Fig. 2와 같다.

대체로 레이저 출력이 전반적인 가공 품질에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있고, 특별히 가공물 형상에 해당하는 스프링의 폭과 절단 폭에 있어서는 결정적인 영향 변수라고 할 수 있다. 스프링 폭을 최대한 유지하기 위해서는 출력을 7 W로 낮추어야 한다. 단, 출력을 낮추게 되는 만큼 가공 절단 폭이 감소하기 때문에 반복가공이 필요할 수 있다.

펄스 반복율은 가공 품질에 20% 미만으로 영향을 미치고 있다. 레이저 장비의 상당수가 펄스 반복율을 조절할 수 있게 되어 있고, 이를 통해 빔의 에너지를 조절할 수 있다. 하지만 실험 결과에 따르면 형상기억합금 박막의 레이저 가공 시 미치는 영향이 미미하기 때문에 가공 과정에 있어서 주요 조작 변인으로 설정하지 않는 것이 바람직하다.

가공 횟수는 주로 광재와 열 변형 영역과 같은 가공 손상에 관련하여 영향을 미치고 있다. 따라서 가공 대상물의 손상을 최소화 하기 위해서는 가공 횟수를 최소화 해야 할 것이다. 따라서 4 회의 가공 횟수가 적절하다.

가공 횟수 지연 시간은 가공 대상물을 온전히 유지하면서 손상을 최소화 하는데 주요 요인으로 작용함을 확인할 수 있다. 지연 시간을 길게 설정할수록 가공 품질이 향상된다. 따라서 지연 시간을 20 초 이상으로 설정하면 우수한 가공 품질을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. Leester-Schädel, M., Hoxhold, B., Lesche, C., Demming, S., and Büttgenbach, S., "Micro actuators on the basis of thin SMA foils," *Microsystem Technology*, **14**, 697-704, 2008.
2. Mathew, Jose, Goswami, G. L., Ramakrishnan, N., and Naik N. K., "Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites," *Journal of Materials Processing Technology*, **89-90**, 198-203, 1999.
3. El-Taweel, T. A., Abdel-Maabound, A. M., Azzam, B. S., and Mohammad, A. E., "Parametric studies on the CO₂ laser cutting of Kevlar-49 composite," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **40**, 907-917, 2009.
4. Taguchi, G., *Quality Engineering Series*, vol.4: Taguchi Methods-Design of Experiments, the United States of America, the ASI press; 1993.