

## 전해가공을 이용한 Nitinol 형상기억합금의 그루브 패턴 가공특성에 관한 연구

신태희<sup>+</sup>, 김백겸<sup>+</sup>, 백승엽<sup>++</sup>, 이은상<sup>\*</sup>  
(논문접수일 2008. 10. 27, 심사완료일 2009. 10. 13)

### The Machining Characteristics of Groove Patterning for Nitinol Shape Memory Alloy Using Electrochemical Machining

Tae-Hee Shin<sup>+</sup>, Baek-Kyoum Kim<sup>+</sup>, Seung-Yub Baek<sup>++</sup>, Eun-Sang Lee<sup>\*</sup>

#### Abstract

A development of smart materials is becoming a prominent issue on present industries. A smart material, included in functions, is needed for micro fabrication. A shape memory alloy(SMA) in a smart material is best known material. Ni-Ti alloy, composed of nikel and titanium is one of the best shape memory alloy(SMA). Nitinol SMA is used for a lot of high tech industry such as aero space, medical device, micro actuator, sensor system. However, Ni-Ti SMA is difficult to process to make a shape and fabrications as traditional machining process. Because nitinol SMA, that is contained nikel content more than titanium content, has similar physical characteristics of titanium. In this paper, the characteristics of ECM grooving process for nitinol SMA are investigated by experiments. The experiments in this study are progressed for power, gap distance and machining time. The characteristics are found each part. Fine shape in work piece can be found on conditions; current 6A, duty factor 50%, gap distance 15 $\mu$ m, machining time 10min.

**Key Words** : Shape Memory Alloy(형상기억합금), Nitinol SMA(니티놀 형상기억합금), Electrochemical grooving(전해 그루브가공), Electrochemical machining(전해가공)

+ 인하대학교 기계공학과 대학원  
++ 인덕대학 기계설계과  
\* 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (leees@inha.ac.kr)  
주소: 402-751 인천시 남구 용현동 253

## 1. 서론

산업기술의 발전과 함께 초소형 제품에 사용될 수 있는 기능성 소재의 개발이 이루어고 있다. 대표적으로 고기능성 소재로 알려진 형상기억합금은 항공우주산업, 의료기기, 마이크로 액추에이터, 소형 센서시스템 등에 사용되고 있다. 형상기억합금은 특정온도에서 형성된 임의의 형상이 물리적 변형에 대하여 특정온도 구역의 도달시 복원되는 특성을 지니고 있는 기능성 소재로 잘 알려져 있다. 특히 nitinol 형상기억합금(Shape Memory Alloy ; SMA)는 Au-Cd, Fe-Pt와 Ni-AL등의 형상기억합금 중 형상의 복원율이 우수한 합금으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

Nitinol SMA는 니켈과 티타늄의 성분으로 구성되어있으며 니켈이 약 50%를 초과하는 질량비를 갖고 있다. 하지만 nitinol SMA는 티타늄과 흡사한 물리적 특성을 지니고 있는 난 가공재료로서 기존의 기계가공으로 가공을 할 경우 가공 표면에 열적영향 및 잔류응력의 존재 등으로 가공의 어려움을 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 비접촉 가공인 레이저 가공 및 특수가공법이 도입되었지만 가공 후 미세 버의 생성 및 열적 영향부의 발생으로 재료의 형상복원율을 저하시키는 요인이 되었다. 열적 영향부 및 미세 버의 생성을 막을 수 있는 가공법으로 금속공작물의 전기화학적 용출을 이용한 전해가공이 연구되어지고 있다. 이미 전해가공은 nitinol 형상기억합금의 미세가공에 적합하고 전류효율이 100%에 근접한 전해조건에서는 형상복원응력이 전해가공에 의해 특별히 영향을 받지 않는다는 연구결과가 있다.<sup>(2-4)</sup>

전해가공은 금속의 산화-환원반응을 이용하여 금속공작물을 부분적으로 용출시켜 가공하는 방법으로 공구는 환원전극인 (-)극에 연결되고 금속공작물은 산화전극인 (+)극에 연결시킨 후 전해액을 통하여 전류를 인가하면 (+)극에서 금속이 이온화되어 용출되고 이에 환원전극(-)은 자유전자를 얻어 환원됨으로서 수소기체를 발생하게 된다. 이에 금속 공작물은 전해액을 통하여 금속 양이온이 전해질의 음이온과 결합하여 금속 산화물이 되어 공작물이 제거되어 비접촉가공이 이루어지며 가공 후 잔류응력 및 열적 영향을 배제한 가공을 이루어낼 수 있다.<sup>(5-7)</sup>

본 연구는 nitinol SMA의 효과적인 전해가공방법을 제시하고 전해가공에서의 주요변수인 가공전류, Duty factor, 가공간격, 가공시간에 따른 가공깊이정도와 가공전극과의 형상 오차 특성을 비교 분석하였다. 또한 nitinol SMA 가공결과에 대한 데이터베이스를 구축하여 실제 제품에 적용하기 위한 것이 목적이다.

## 2. 실험구성

### 2.1 실험장치

Nitinol SMA의 전해가공 특성을 분석하기위하여 Fig. 1과 같은 동심원 형상의 전극을 제작하여 실험을 수행하였다. 전극의 직경은 21mm이며 동심원 각각의 폭은 0.5mm, 0.75mm, 1mm, 1.25mm이고, 돌출된 전극사이 간격은 1mm로 가공하였다. 전해액은 전극의 중심으로부터 공급되도록 설계하였다. 돌출된 전극 사이에는 각 돌출전극의 전류를 집중시키기 위하여 에폭시를 이용하여 절연하였다.

Fig. 2는 본 실험의 개략도이다. 전해액은 별도의 전해탱크로부터 전극으로 공급되며 전해액의 순도를 유지하기 위하여 정화필터를 거치게 하였다. 가공전극은 Z축의 이송이 가능하여 0.1mm단위의 조절이 가능한 정밀 스테이지를 사용하였다. 전류공급장치를 통하여 공구전극과 가공전극의 접촉상

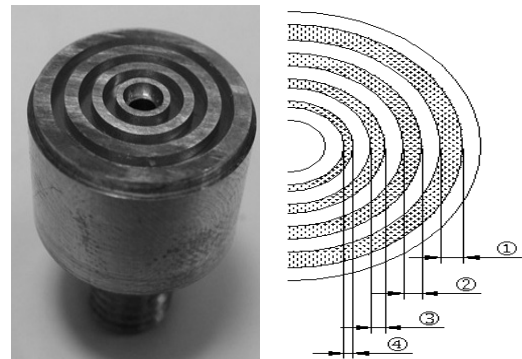


Fig. 1 Image and design of copper electrode  
① 1.25mm ② 1mm ③ 0.75mm ④ 0.5mm

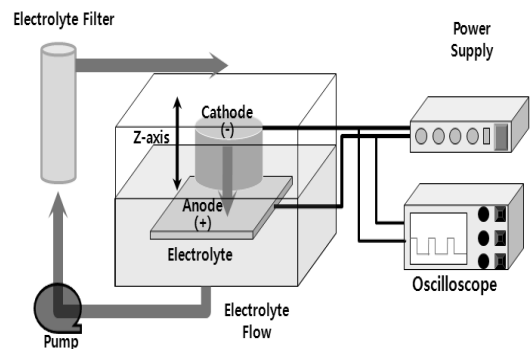


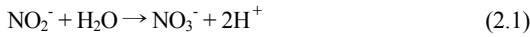
Fig. 2 Schematic of experiment setup

태를 확인할 수 있다. 전류공급장치는  $\mu\text{s}$  단위의 펄스 on/off 시간을 조절할 수 있으며, 25A의 출력이 가능한 용량을 지녔다.

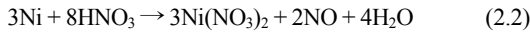
### 2.2 전해액 조성

전해가공에서 전해액은 가공전극을 용출시켜주는 가장 중요한 요소이다. 적절한 화학적 반응을 일으킬 수 있도록  $\text{NaNO}_2$ 와  $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ 을 혼합하여 사용하였다.

식 (2.1)과 (2.2)는  $\text{NaNO}_2$ 성분이 Ni를 용출하는 과정을 화학식을 보여준다.



$\text{NaNO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 가 반응하여  $\text{NO}_3^-$ 와  $2\text{H}^+$ 가 발생하고  $\text{NO}_3^-$ 는 결합된 수소와 함께 Ni를 용출시킨다. 이 반응식은 식 (2.2)와 같다.



이때 금속 산화물로 생성되는  $3\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 에서 Ni는  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 로 합성될 수 있어 효과적인 Ni성분의 용출을 위하여  $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ 을 첨가하여  $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6^{2-}$ 이 금속산화물의 생성에 방해되는 요인을 제거하도록 하였다.<sup>(8)</sup>

실험은 전류조건의 영향을 알아보기 위하여 인가전류와 Duty factor를 변화하였으며 전해가공의 주요 변수인 가공 간극과 가공시간의 특성을 알아보기 위한 실험으로 구분하

여 진행하였다. Table 1은 본 연구간 실험조건을 보인다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 전류조건의 영향

#### 3.1.1 인가전류의 영향

Fig. 3은 인가전류에 따른 가공 깊이를 보여준다. Duty factor는 50%, 간극  $20\mu\text{m}$ , 가공시간을 10분으로 고정했고 인가전류는 4A를 시작으로 5A, 6A, 8A, 10A, 12A로 점점 증가시켜 실험을 진행하여 각각의 데이터를 수집하였다. 대체적으로 인가된 각 전류에 대하여 Groove1부터 Groove4의 순서로 깊이가공 결과의 차이를 보였다. 인가전류가 높아 질수록 그루브의 가공깊이는 증가하지만 낮은 인가전류에 비하여 각 그루브의 가공깊이의 편차가 증가되었다. 낮은 전류를 인가 시 전극의 Groove1의 전류집중현상이 상대적으로 줄어들어 전류가 전면적으로 전극에 분포되는 이유로 분석된다. 또한 높은 전류의 인가는 전해작용의 활성화로 인하여 과도한 재료제거를 보인다.

Groove1이 다른 그루브들 보다 가공깊이가 깊은 것을 볼 수 있다. 이것은 전극의 끝단부분에 전류가 집중되는 전해가공의 특성으로 설명 할 수 있고 이 특성이 각 그루브들의 깊이의 편차가 생기게 하는 원인으로 분석된다. 가공전극의 가장 끝단부분인 Groove1에 형성된 전류집중현상은 다른 부분보다 전해현상을 더욱 활발히 발생시키는 요소가 된다. 가공전극의 가장 끝단부분인 Groove1에서 형성되는 전류집중현상은 Groove4로 올수록 그 집중된 전류의 양이 줄어들

Table 1 Experimental Conditions

Condition	Values
Applied Current	4A ~ 12A
Pulse on/off time	10 $\mu\text{s}$ /20 $\mu\text{s}$ , 20 $\mu\text{s}$ /20 $\mu\text{s}$ , 75 $\mu\text{s}$ /20 $\mu\text{s}$
Electrode(cathode)	Copper
	① 1.25mm ② 1mm ③ 0.75mm ④ 0.5mm
Workpiece(anode)	nitinol shape memory alloy
Frequency	1.1KHz
Electrode gap	5 $\mu\text{m}$ ~ 30 $\mu\text{m}$
Surface observation	An optical microscope
Machining Time	6min ~ 14min
Electrolyte	$\text{NaNO}_2$ (1.5M)
	$\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ (0.1M)

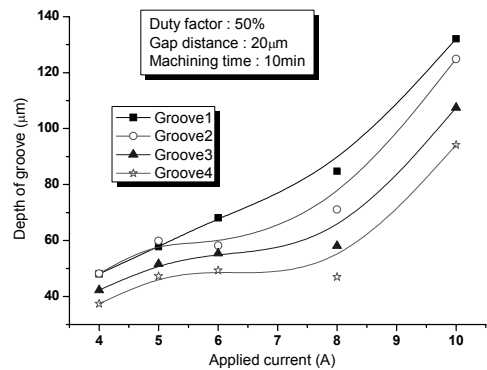


Fig. 3 Variation of groove depth according to applied current

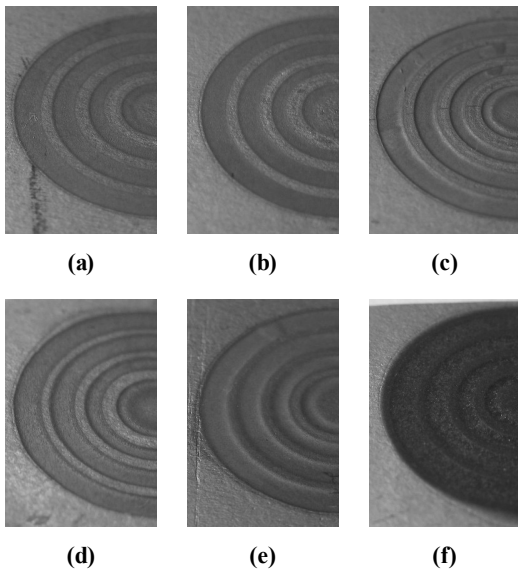


Fig. 4 Image of work-piece after process as various current (a) 4A (b) 5A (c) 6A (d) 8A (e) 10A (f) 12A(Machining Time 10min, Gap distance 20 $\mu$ m Duty factor 50%)

어 가공현상에 영향을 미치며 결국 각 그루브들의 가공 깊이에 편차가 생기게 되는 것이다.

Fig. 4는 인가전류에 따른 가공형상의 정밀도를 보여준다. 4A부터 6A까지의 실험결과 가공부분과 가공되지 않는 부분의 경계가 뚜렷이 보인다. 하지만 8A부터 10A의 시편에서는 그 경계면을 찾을 수 없고 12A의 시편은 인가전류의 과다로 인하여 전극의 절연부분을 넘어선 전면적 가공이 수행되고 공작물이 검게 타버리게 된 것을 본 실험에서 알 수 있듯이 전극의 형상과 재료 특성에 따라서 최적의 가공 조건이 필요함을 알 수 있다.

### 3.1.2 Duty factor의 영향

Duty factor는 전류의 on/off의 비로서 전류가 on되어있는 시간을 나타낸다. 식 (3.1)은 Duty factor를 수식화 하고 있다.

$$\text{Duty factor} = \frac{V_{on}}{V_{on} + V_{off}} \times 100 \quad (3.1)$$

가공경계면이 남아있고 각 그루브의 깊이 편차가 작고 그

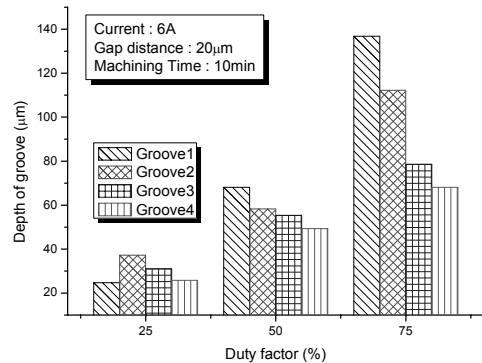


Fig. 5 Variation of groove depth according to duty factor

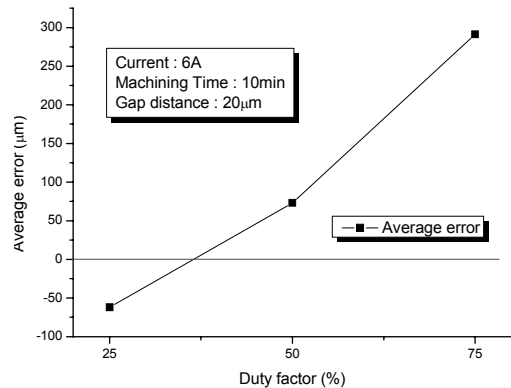


Fig. 6 Average error of width after process as duty factor

깊이가 깊은 6A의 인가전류에서 Duty factor의 영향을 알아보기 위하여 간극 20 $\mu$ m, 가공시간을 10분으로 고정하고 Duty factor를 변화하여 실험을 진행하였다. Fig. 5는 Duty factor에 따른 각 그루브 가공깊이의 그래프를 보인 것이다. 그래프에서 보이듯이 Duty factor가 증가함에 따라 모든 그루브들의 가공 깊이도 함께 증가함과 동시에 각 그루브간 가공편차 또한 증가함을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5에서 보이는 가공편차 역시 전류집중현상 때문이라고 분석된다.

Fig. 6은 Duty factor에 따른 가공형상의 평균 오차를 나타낸다. 가공된 각 그루브의 폭을 측정하여 평균값을 계산하고 가공전극의 돌출된 부분의 폭의 평균값을 기준으로 평균 오차를 나타내었다.

Duty factor에 따른 형상오차는 25%에서 가공전극보다 작게 측정되었다. 50%이상의 Duty factor에서 가공형상은 전극

의 형상과 평균 형상오차가  $75\mu\text{m}$ 이며 75%에서는  $291.25\mu\text{m}$ 의 평균오차를 보였다. 이를 통하여 Duty factor에 따라 가공의 양상이 다르게 나타나며 Duty factor가 25%에서 충분한 전해현상이 발생하여 Duty factor가 부족하였다고 판단할 수 있다. 반면 50%와 75%의 Duty factor에서 가공전극의 평균치보다 큰 값이 계산되어 과도한 전해현상이 이루어졌으며 Fig. 5와 관련하여 전류인가시간이 높아질 수록 가공된 형상 오차 및 각 그루브 간의 편차가 크게 발생함을 알 수 있다.

### 3.2 가공간극의 영향

nitinol SMA를 이용한 전해가공 조건 중 공구전극과 가공전극의 간극에 대한 가공영향을 분석하기 위하여 인가전류 6A와 Duty factor 50%의 변수를 설정하고 극간 거리를 변화하여 10분간의 전해가공결과를 분석하였다. Fig. 7은 간극의 영향을 보여주고 있다. 극간 거리가 줄어들수록 가공깊이는 증가함으로 보이고  $5\mu\text{m}$ 부터  $15\mu\text{m}$ 까지의 극간 거리에 따른 가공깊이정도와 비교하여 극간거리  $20\mu\text{m}$ 에서  $15\mu\text{m}$ 의 사이에서  $31.8\mu\text{m}$ 의 큰 깊이 가공의 향상을 보인다. 또한 간극이  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ,  $15\mu\text{m}$ 로 유지되었을 때 전극형상과 가장 가까운 형상을 보였다. 하지만  $5\mu\text{m}$ 와  $10\mu\text{m}$ 의 간극에서 전체 형상 중 Groove1의 일부가 가공이 안 된 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유로는 전해액이 전극의 중심으로부터 바깥쪽으로 이동하면서 내부 전극으로부터 전해현상에 의하여 용출되는 용출물이 부분적으로 적층되어 전해현상에 방해를 주어 일부가 가공이 되지 않은 것으로 분석된다.

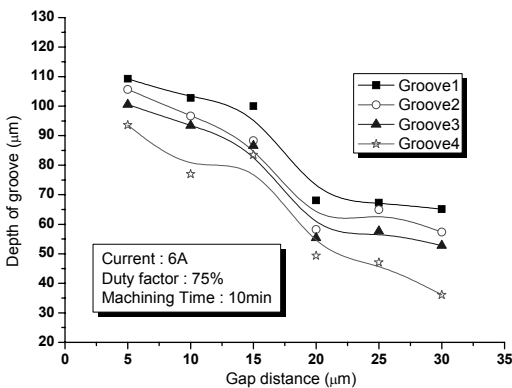


Fig. 7 Average error of width after process as duty factor

Fig. 8의 (a)와 (b)는 가공간극을 각각  $5\mu\text{m}$ 와  $15\mu\text{m}$ 로 띄워 놓고 전해가공을 한 후 Groove1의 일부분을 250배 확대시켜놓은 사진이다.

Fig. 9는 동일시간 동일조건에서 간극의 변화를 주어 가공된 각 그루브의 폭을 측정하여 전극의 형상 치수와 비교한 각 그루브의 오차평균을 나타낸다. 가공전극과 공작물 간의 거리가 멀어질 수록 형상의 오차평균이 증가함을 보인다. 이는 가공간극이 증가할 수록 가공전극으로부터 공작물에 발생하는 전해현상의 범위가 증가함을 보인다. 이것은 간극이 너무 커지게 되면 저항이 많이 발생하게 되고 가공 결과에 많은 영향을 미치게 되는 것으로 분석이 되며 Fig. 7과 관련하여 가공간극이 증가함에 따라 가공되는 깊이는 줄어들고 가공전극의 형상과의 오차는 증가함을 알 수 있다.

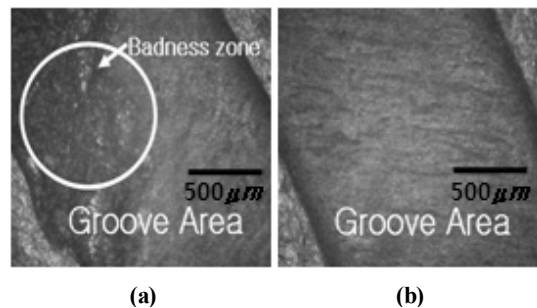


Fig. 8 Micrographics of surfaces on (a)  $5\mu\text{m}$  and (b)  $15\mu\text{m}$  gap distance, (Machining Time 10min, Gap distance  $15\mu\text{m}$  Duty factor 50%)

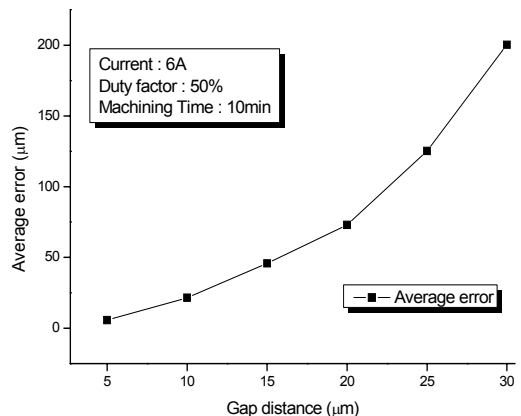


Fig. 9 Average error of width after process as gap distance

### 3.3 가공시간의 영향

Fig. 10은 본 연구에서 가공시간에 따른 깊이가공의 영향을 나타낸다. 가공시간의 증가와 함께 가공깊이가 증가하고 가공시간 10분부터 가공량이 낮아짐을 알 수 있다. 또한 가공시간이 증가함에 따라 각 그루브의 가공편차가 줄어들음을 확인할 수 있다.

이와 같은 두 가지 현상은 가공시간이 지남에 따라 초기에 설정된 15 $\mu$ m의 간극이 용출되는 공작물의 표면의 양만큼 점점 증가하여 10분의 가공시간을 기준으로 Groove4와 마주보는 부분의 Groove1이 가장 깊게 가공되고 Groove2, Groove3, Groove4의 순서로 가공되었다.

가공시간의 증가와 함께 Groove1을 시작으로 각 그루브의 가공깊이 곡선의 기울기는 차례로 점차 낮아짐을 보이게 되고 가공깊이의 편차가 시간이 증가함과 동시에 줄어드는 것을 볼 수 있다.

이는 앞서 서술한 간극의 증가로 인하여 전해현상 둔화되어 나타나는 현상과 비슷한 현상으로 분석 할 수 있다. 가공이 시작되면 가공전극의 Feed rate가 없는 상황에서는 재료가 가공됨과 동시에 간극은 점차 증가하게 되며 그로인해 앞서 언급한 전해작용이 둔화되는 현상을 보이게 되는 것이다. 전류집중현상으로 짧은 시간에 깊게 가공된 Groove1은 가장먼저 가공간극이 증가해 가공범위를 가장 빨리 벗어나게 되어 가공이 점차 더디게 진행 되는 것이고, 이러한 현상은 시간이 지남에 따라 차례로 다른 각각의 그루브들에서도 일어나게 되는 것이다.

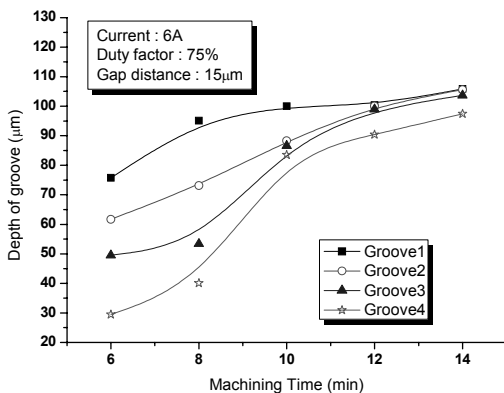


Fig. 10 Variation of groove depth according to machining time

### 4. 결론

Nitinol SMA의 전해 그루브 가공실험을 통하여 전해가공에서 인가전류, Duty factor, 가공간극, 가공시간의 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인가전류가 높아질수록 각 그루브의 가공깊이는 깊어지는 것과 동시에 각 그루브간 가공편차가 증가함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 전극의 끝단부분인 Groove1에 전류가 집중되는 현상과, 높은 인가전류로 인하여 발생한 과도한 전해현상이 원인이 됨을 알 수 있었다. Duty factor는 증가시킬수록 가공깊이 또한 증가하고 50%이상의 Duty factor에서 가공전극과의 형상비교에서는 75 $\mu$ m 이상의 오차가 발생했다. 각 그루브간 가공편차가 증가하는 것 또한 과도한 전류의 인가가 원인으로 분석된다.
- (2) 가공간극의 증가는 전극으로부터 발생하는 전해영향 범위를 증가시켜 가공형상오차가 커지게 되며 가공깊이 또한 낮아짐을 알 수 있었다. 가공간극이 5 $\mu$ m일 때와 10 $\mu$ m일 때에서 가공깊이의 편차와 가공형상의 평균오차가 감소하였으나 원활하지 않은 금속산화물의 배출로 인한 전해현상장애를 발생시켰고 이것은 결국 Groove1 및 Groove2가 부분적으로 가공되지 않은 결과를 가져왔다.
- (3) 가공시간이 증가함에 따라 가공깊이의 편차가 줄어들음을 알 수 있었다. 전류를 인가하면 재료가 용출되기 시작하는데 가공시간의 증가에 따라 일정깊이 이상이 용출되면서 초기 설정된 가공간극보다 간극이 증가하게 되고 점점 전해가공의 범위를 벗어나게 된다. 이것은 결국 전해현상을 둔화시키는 요소가 되며 전류집중현상으로 인해 상대적으로 초기 가공깊이가 깊은 Groove1에서 Groove2, Groove3, Groove4의 순서로 각 그루브간 가공깊이의 편차를 줄이는 요소가 되는 것으로 분석된다.

### 참고 문헌

- (1) Mukherjee, R., Christian, T. F., and Thiel, R. A., 1996, "An actuation system for control multiple shape memory alloy actuator," *Sensor and Actuators A:physics*. Vol. 55, pp. 185~192.
- (2) McGeough, J. A., 1974, *Principles of Electrochemical machining*, Chapman Hall, London.
- (3) Wei, B., Rajurkar, K. P., Talpallikar, S., "Identification

- of Interelectrode Gap Size in Pulse Electrochemical Machining,” *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 144, No. 11, pp. 3913~3918.
- (4) Choi, Y. S and Park, K. Y, 2000, “Relationship between Machining Characteristics & Current Efficiency in Electro Chemical Machining of Ni-Ti Shape Memory Alloy,” The KSMTE Autumn conference 2000, pp. 320~325.
- (5) Lee, E. S. and Kim, C. G., 2003, “A study on machining characteristics of the electropolishing of aluminum alloy,” *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 17~21.
- (6) Ahn, S. H., Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K., Chu, C. N., 2003, “Localized electro-chemical micro machining using ucali short pulse,” *The Korean Society of Mechanical Engineering Spring conference*, pp. 1052~1058.
- (7) Schuuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., and Etrl, G., 2000, “Electrochemical micro machining,” *Science*, Vol. 289, pp. 98~101.
- (8) Ma, X. Z., Zhang, L., Cao, G. H., Lin, Y. and Tang, J., 2007, “Electrochemical micro-machining of nitinol by confined-etchant-layer technique,” *Electrochimica Acta*, Vol. 52, pp. 4191~4196.