

# 플라즈마 아크 절단에서 팁-모재간 거리 자동제어 시스템에 관한 연구

구진모\*, 김재웅\*\*

## A Study of an Automatic Tip-to-Workpiece Distance Control System for Plasma Arc Cutting

Jin-Mo Ku\*, Jae-Woong Kim\*\*

### ABSTRACT

Plasma arc cutting is one of the most widely used processes in metal cutting fields and is a process that produces parted metal plates by cutting them with an arc plasma established between the electrode tip and the plate(workpiece). When the tip-to-workpiece distance varies during cutting, the cut quality, for example the kerf width, is deteriorated by the change of plasma arc. The variations of tip-to-workpiece distance are due to the different factors such as inaccuracies in setting the torch or workpiece, thermal distortions during cutting, and uneven surface of workpiece. The control to keep the tip-to-workpiece distance constant is thus indispensable to improve the flexibility of automatic plasma arc cutting system applications.

In this study, an arc sensor which utilizes the electrical signal obtained from the plasma arc itself was developed. The arc sensor has an advantage that no particular sensing device is necessary and real-time sensing of the tip-to-workpiece distance is possible directly under the plasma arc. The relationship between plasma arc voltage and tip-to-workpiece distance was determined through the repeated experimental results. The model was used for developing an automatic tip-to-workpiece distance control system of plasma arc cutting. It could be shown that the proposed system has a successful capability of tip-to-workpiece distance control.

**Key Words** : Plasma arc cutting (플라즈마 아크 절단), Tip-to-workpiece distance(팁-모재간 거리),  
Arc sensor(아크 센서), Plasma arc voltage(플라즈마 아크 전압)

### 1. 서론

절단 공정의 자동화는 대량 생산 체제에 있어서 제품의 생산성을 향상시키고, 적정한 수준의 품질을 유지시키는 관점에서 필연적으로 요구된다. 절

단공정에서 발생할 수 있는 다양한 절단 조건의 변화중에서 절단 대상물의 열변형이나 부정확한 장착 등으로 인한 장착오차를 가지는 경우 균일한 품질의 절단부를 얻기 힘들다. 즉 팁-모재간 거리가 변하면 플라즈마 아크의 형상이 달라져 절단폭의 변

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남대학교 기계공학부

화를 유발한다. 일반적으로 팁-모재간 거리가 길어지면 절단폭이 커지며, 짧아지면 절단폭이 작아지게 된다. 따라서 균일한 품질의 절단부를 얻을 수 있고 절단중의 열변형에 의한 모재의 뒤틀림이나 장착오차에 대해 강건하게 대처할 수 있는 부가적인 센서 시스템의 개발이 요구된다.

절단 대상물에서 발생한 오차를 감지하여 보정하기 위한 센서로는 크게 접촉식 센서와 비접촉식 센서가 있는데, 탐침과 안내롤러 등을 이용한 접촉식 센서는 기계적인 동작에 의해 센싱이 이루어지므로 신뢰도가 높으나 동작 경로에 제한이 따르며 모재의 다양한 형상에 대한 적용에 한계를 가진다. 비접촉식 센서에는 시각센서, 전자기센서 그리고 아크센서를 들 수 있는데, 아크 센서는 절단중 측정된 절단 토치와 모재사이의 아크 전압과 팁-모재간 거리와의 관계를 이용한 센서로서, 대 전력 사용에 의한 측정상의 어려움이 존재하지만, 실시간 센싱이 가능하고 장치가 비교적 간단하고 저렴하며 신호의 측정위치와 토치의 위치가 동일하므로 별도의 좌표보정이 필요하지 않다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 팁-모재간 거리 제어용 센서로 아크센서를 채택하였다.<sup>1), 2), 3)</sup>

본 연구에서는 아크센서로서 플라즈마 아크 전압을 측정할 수 있는 회로를 구성하여 플라즈마 아크 전압과 팁-모재간 거리의 상관관계를 실험을 통하여 구하였으며, 아크 센서를 이용하여 절단 과정중 팁-모재간 거리를 일정하게 유지 할 수 있는 팁-모재간 거리 자동제어 알고리즘을 개발하였고, 제어시스템을 구축하였다. 구축된 팁-모재간 거리 자동제어 시스템을 통하여 실험한 결과 팁-모재간 거리를 일정하게 유지시킴으로써 균일한 절단폭을 얻을 수 있다.

## 2. 플라즈마 아크 센서

### 2.1 플라즈마 아크의 발생 원리

플라즈마 아크를 발생시키기 위해서 두 전극 사이에 전류를 통과시켜 전극과 노즐사이의 공기 분자들을 가속시키면 공기 분자들이 서로 충돌하여 에너지가 증가하게 된다. 이 에너지가 원자핵과 전자들 사이의 결합력을 넘어서게 되면 분자들이 이온화되어 양이온과 전자들로 구성된 고온의 아크가 발생하는데, 그 온도가 약 20000 °C를 넘

어서면 플라즈마 아크가 발생된다.<sup>4), 5)</sup>

플라즈마 아크 절단 공정에서 플라즈마 아크 발생순서를 간략히 기술하면, 먼저 불활성 가스를 토치 노즐을 통해 분사시킨다. 그 다음에 텅스텐 전극과 노즐사이에 고주파를 발생시키면 이 고주파에 의해 텅스텐 전극과 노즐 사이의 공기 절연이 붕괴되어 두 극 사이가 전기적으로 도체화된다. 이 때 낮은 전류의 파일럿 아크가 발생되어 텅스텐 전극과 모재 사이에 이온화된 통로가 형성된다. 이 이온화된 통로를 통해 대전류가 흐르면서 플라즈마 아크 방전이 발생되고 플라즈마 아크 절단 공정이 시작된다.<sup>6)</sup> 이 발생과정을 Fig. 1에 도식화하여 나타내었다.

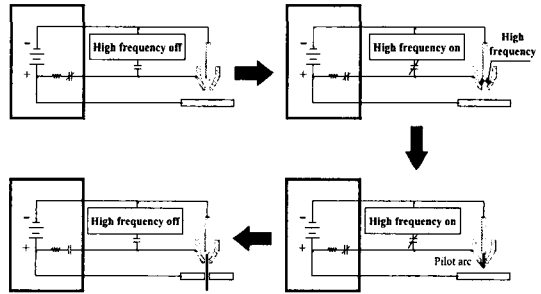


Fig. 1 Principle of plasma arc generation

### 2.2 플라즈마 아크 전압 측정장치 및 신호처리

플라즈마 아크 절단시 팁-모재간에 인가되는 플라즈마 아크 전압을 측정하기 위한 회로도를 Fig. 2와 같이 설계, 제작하였다. 첫 번째 부분은 3개의 저항을 이용하여 실제 절단 전압을 컴퓨터 입력에 적합하도록 축소시키는 부분이다. 실제 플라즈마 아크 전압을 측정된 결과 약 100~150V 정도이므로 1/41의 축소비를 갖는 저항을 사용하여 구성하였다. 두 번째는 차동 증폭기를 이용하여 팁-모재간 거리에 따른 플라즈마 아크 전압의 변화를 크게 하였다. 저항을 통해 측정된 전압값이 팁-모재간 거리가 0mm 일 때 약 2V 정도의 수준이므로 이 전압을 0V 수준으로 떨어뜨리고, 전압 변화량을 크게 인식하기 위해 5배 증폭하였다. 세 번째 부분은 플라즈마 아크 전압의 고주파를 제거하고 신호의 평활화를 위해 10Hz의 차단 주파수를 갖는 저역 통과 필터이다.

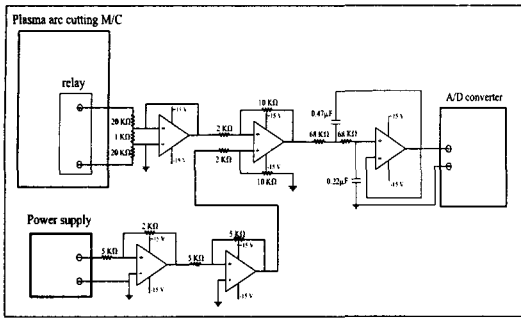


Fig. 2 Signal measurement and processing circuit

Fig. 2와 같은 측정회로를 이용해 팁-모재간 거리가 0mm 일 때 A/D 컨버터의 샘플링 속도를 1kHz로 하여 측정한 대표적인 신호를 Fig. 3에 나타내었다.

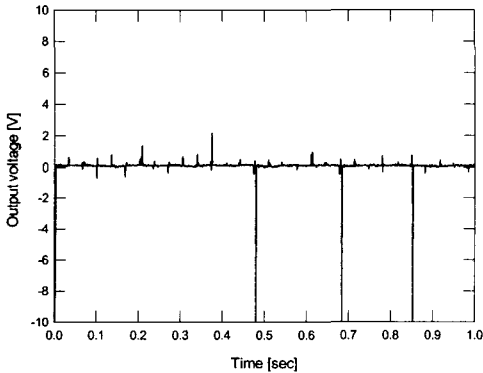


Fig. 3 Sensor output signal with low pass filter

그림에서 볼 수 있듯이 저역 통과 필터를 통과시킨다 하더라도 센서출력 신호의 변동이 나타나고 있다. 이러한 변동을 제거하기 위해서 소프트웨어적인 신호처리로서 디지털 필터링인 구간 이동평균법과 가중 이동평균법을 적용하여 더욱 평활하게 만들었다. 구간 이동평균법은 다음 식에 의해서 표현된다.

$$V_f(n) = \left[ \sum_{k=1}^{d_1} V_o(n \times d_1 + k) \right] / d_1 \quad (1)$$

$$(n=0, 1, 2, \dots)$$

여기서,

$V_o$  : 저역 통과 필터를 통과한 신호

$V_f$  :  $V_o$ 를  $d_1$ 개의 구간으로 평균을 취한 신호

$d_1$  : 평균구간

구간 이동평균법을 통하여 출력되는 신호는 평균 구간( $d_1$ )에 따라 달라지며 평균 구간이 클수록 드로스나 스패터에 의한 출력전압의 미소한 변동 성분이 제거된 평탄한 신호가 출력된다. 그러나 이러한 평균구간은 신호의 평활 뿐만 아니라 토치 위치의 보정을 위한 시간에도 영향을 미치게 되어 평균 구간이 과도하게 커지게 되면 변화하는 절단 전압 신호를 반영하는데 어려움이 있어서 제어용 신호로서는 부적합하게 된다. 본 연구에서는 실험을 통하여 최적의 평균 구간을 10개로 결정하였다. 이렇게 처리된 센서출력 신호를 Fig. 4에 나타내었다.

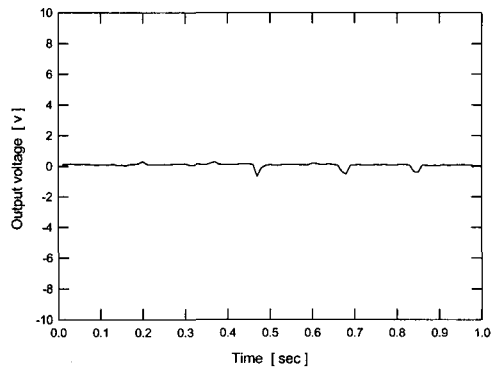


Fig. 4 Filtered and averaged signal

### 2.3 팁-모재간 거리 변화에 따른 센서출력 전압의 변화

팁-모재간 거리의 변화에 따른 플라즈마 아크 전압의 변화를 조사하기 위해 본 연구에서 구성한 측정장치를 이용하여 여러 조건에 대해 실험하였다. 여기서 플라즈마 아크 전압은 측정회로에 의해 일련의 과정을 거치므로 센서출력값은 플라즈마 아크 전압에 비례하는 값을 가지게 된다. Table 1에 나타낸 절단 조건을 사용하여 2mm 두께의 강판에 대해 실험한 결과, 팁-모재간 거리 변화에 따른 센서출력 신호는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다.

그림에서 팁-모재간의 거리 변화에 따른 센서출력 전압은 선형비례 관계를 보이므로 다음과 같은 간략한 식으로 표현할 수 있다.

$$V = \alpha \cdot L + \beta \quad (2)$$

여기서,  $\alpha, \beta$  : Constant

$L$  : Tip to workpiece distance

Fig. 5와 같은 결과를 (1)식에 근사시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = 0.762 \cdot L - 0.285 \quad (3)$$

따라서, 플라즈마 아크 절단시 센서출력 전압차 ( $\Delta V$ )로부터 추론할 수 있는 팁-모재간 거리의 변화( $\Delta L$ )는 다음과 같다.

$$\Delta L = \Delta V / a \quad (4)$$

여기서,  $a$  : constant

Table 1 Cutting condition for experimental modeling

Tip to workpiece distance (mm)	Cutting current (A)	Thickness (mm)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Cutting velocity (cm/min)
0.0	60	2.0	5.5	120
2.0	60	2.0	5.5	120
4.0	60	2.0	5.5	120
6.0	60	2.0	5.5	120

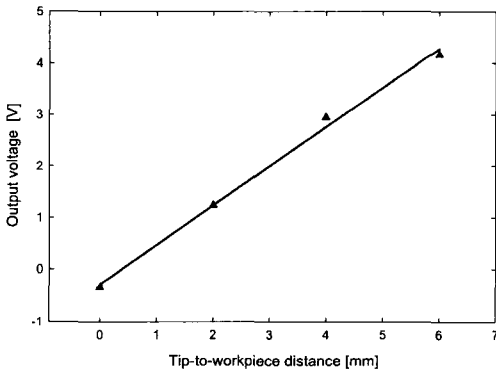


Fig. 5 Relationship between sensor output voltage and tip-to-workpiece distance

### 3. 팁-모재간 거리 제어 시스템

#### 3.1 팁-모재간 거리 제어 알고리즘

본 연구에서는 절단 시작점에서의 플라즈마 아크의 측정 전압을 기준 전압으로 하여 절단중에 기준 전압을 유지하도록 토치의 높이방향 이송축인 Z축을 움직여 팁-모재간 거리를 제어하였다. Table 2는 기준 전압을 이용하여 팁-모재간 거리 제어를 하기 위한 알고리즘을 나타내고 있다.

Table 2 Tip-to-workpiece distance(TWD) control algorithm using reference voltage value

Sensor output voltage variation [ $V_{ref} - V$ ]	Tip-to-workpiece distance
+	increase
-	decrease

여기서 기준전압과 현재 전압을 비교하여 팁-모재간 거리 제어를 위한 방향을 결정하며, Z축으로 전송될 최종적인 팁-모재간 거리 보정값은 식(4)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_d = V_d / a \quad (5)$$

여기서,  $Z_d$  : 토치 이송량

$V_d$  : 기준 전압과 현재 전압의 차( $V_{ref} - V$ )

$a$  : coefficient of eq.(2)

이와 같은 제어방법을 개략도로 나타내면 Fig. 6과 같다.

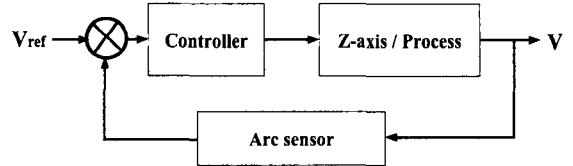


Fig. 6 Block diagram of TWD control

#### 3.2 팁-모재간 거리 제어를 위한 신호처리 및 실험장치

Fig. 4와 같이 구간 이동평균법을 취한 절단 전압신호에도 드로스나 스페터에 의한 잡음 신호 등에 의해 미소한 변동 성분들이 여전히 존재하기 때문에 구간 이동평균법을 취한 센서출력 신호에 가중 이동평균법을 적용하였다. 적용한 가중 이동평균법은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$V_t(n) = (1 - w_1) \times V_t(n-1) + w_1 \times V_f(n) \quad (6)$$

여기서,

$V_t(n)$  : 가중 이동평균 전압값

$V_t(n-1)$  : 전 가중 이동평균 전압값

$V_f(n)$  : 구간 이동평균을 취한 전압값

$w_1$  : 가중치

가중 이동평균법은 적용한 가중치에 따라 필터링의 효과가 달라지게 된다. 즉 구간 이동평균을 취한 전압( $V_f(n)$ )에 곱해지는 가중치  $w_1$ 이 크면 필터링의 효과가 미약하고  $w_1$ 이 작으면 보다 평활한 신호가 출력되나 가중 이동평균을 취한 신호에서 시간 지연이 발생하게 되어 팁-모재간 거리 제어 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 플라즈마 아크 절단 실험을 통하여 제어용 신호로서 가장 적절한 가중치를 결정하고자 한다.

본 연구에서 사용된 실험장치는 플라즈마 아크 절단 토치를 장착한 3축 직선 서보 이송장치, 플라즈마 아크 절단기, 절단 전압 신호를 획득하기 위한 저항, 차동 증폭회로, 저역 통과 필터로 구성된 신호처리기와 A/D 변환기, 산업용 컴퓨터로 구성되며 전체 시스템의 구성은 Fig. 7과 같고 일반적인 현장에서 사용되는 플라즈마 아크 절단 속도가 20 mm/sec이므로 본 연구에서는 그 실용성 측면을 고려하여 절단속도를 20mm/sec로 하였다.

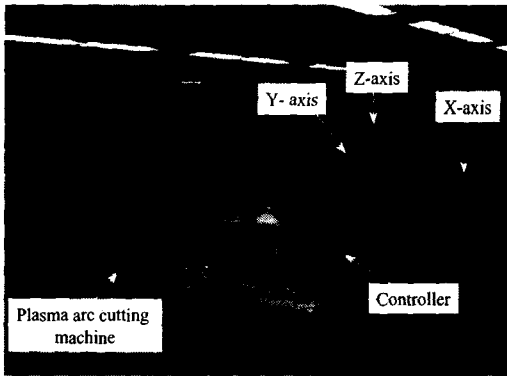


Fig. 7 System configuration

플라즈마 아크 절단중 측정, 처리된 아크 센서 출력신호를 팁-모재간 거리 제어 알고리즘에 적용시켜 토치가 보정해야 할 Z축 거리를 구한다. 이렇게 계산된 데이터를 이용하여 Z축의 서보 모터에 보정 거리만큼의 펄스를 출력시킴으로써 팁-모재간 거리를 제어한다. 실험조건은 Table 3과 같다.

4. 실험 결과 및 검토

기준 전압과 현재 전압값을 비교하는 팁-모재간 거리 제어 알고리즘을 적용해 높이 변화가 있는 형

상의 절단에 제어실험을 행하였다. 실험에서 팁-모재간 거리 변화에 따른 센서출력 전압의 변화량은 모델링을 통하여 얻은 식(3)의 결과를 사용하였다.

Table 3 Experimental condition

Workpiece	2mm thick mild steel
Cutting current	60 A
Tip-to-workpiece distance	2 mm
Gas pressure	5.5 kg/cm <sup>2</sup>
Cutting speed	20 mm/sec
Cutting distance	150 mm

Fig. 8과 9는 팁-모재간 거리 제어를 위한 신호 처리에 적용되는 가중 이동평균의 가중치를 변화시켜가면서 실험한 결과를 나타내었다. 이때 시스템의 제어 주기는 0.05 sec로 하였다. Fig. 8과 9에 나타낸 제어 결과를 보면, Fig. 8(c),(d), Fig. 9(c)에서 처럼 현재 입력된 데이터에 적용되는 가중치가 작을수록, 즉 이전의 데이터에 의한 영향이 크게 작용할수록 기준 높이에서 벗어나는 양이 커짐을 알 수 있다. 이것은 Z축 움직임에 의해서 생성된 전압 신호에 의한 영향보다 이전에 생성된 전압신호의 영향이 크게 작용하여 전압 신호의 변동은 줄었으나, 이동평균에 의한 시간 지연이 발생하게 되고, 이러한 전압신호에 의해서 Z축이 움직이게 되기 때문에 실시간으로 높이 오차를 보정하지 못하고 오차가 점차 누적됨을 알 수 있다. 또 Fig. 8(a), Fig. 9(a)와 같이 현재 데이터에 적용된 가중치가 큰 경우를 보면 필터링 효과가 나타나지 않아 불안정한 결과가 나타남을 알 수 있다. 이미 신호처리를 위한 H/W에서 절단주파수 10Hz의 저역통과필터를 사용했음에도 불구하고 더욱 필터링 효과가 필요하다는 것을 알 수 있으며, 가중치가 0.7일 때 절단면 추적 성능이 안정되고 우수한 것으로 보아 팁-모재간 거리를 대변하는 신호의 주파수 성분은 10Hz보다 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최적의 신호처리를 위한 가중 이동평균의 가중치를 0.7로 결정하였다.<sup>7)</sup>

다음은 각종 신호처리 알고리즘의 적용과 시스템의 동적 거동에 따른  $a$  값의 적정성을 확인하기 위해 식(5)에 의해 결정된 보정거리에 대해 비례계

인( $k_p$ )을 적용하여 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 10, 11에 나타내었다. Fig. 10, Fig. 11로부터 개인이 1일 때 가장 좋은 제어 결과를 보이고 있고, 이것으로 봐서 앞에서 플라즈마 아크 센서를 모델링한 결과가 적절했다는 것을 알 수 있다.

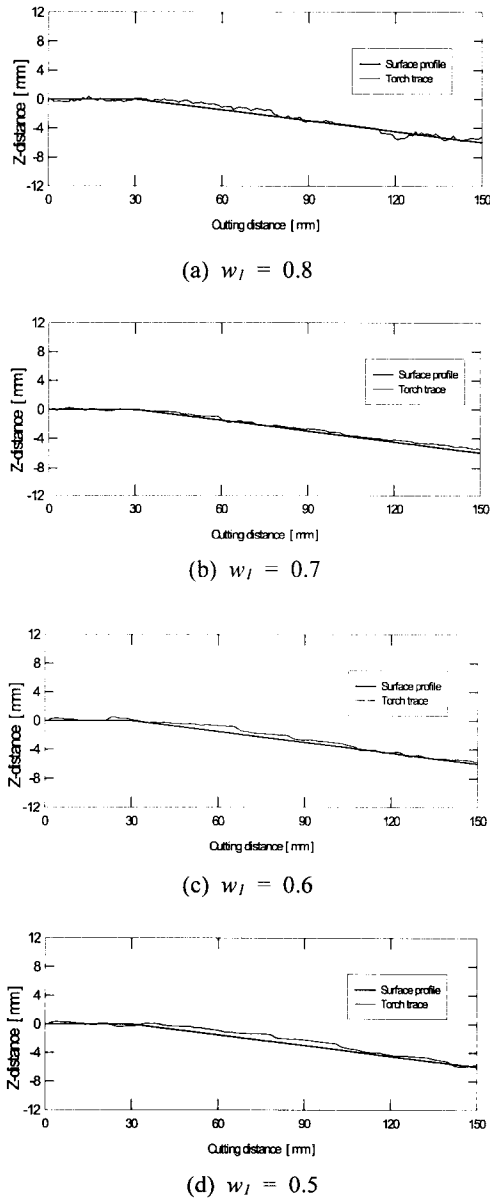


Fig. 8 Control result according to weighting factor( $w_I$ ) for moving averaged (downward)

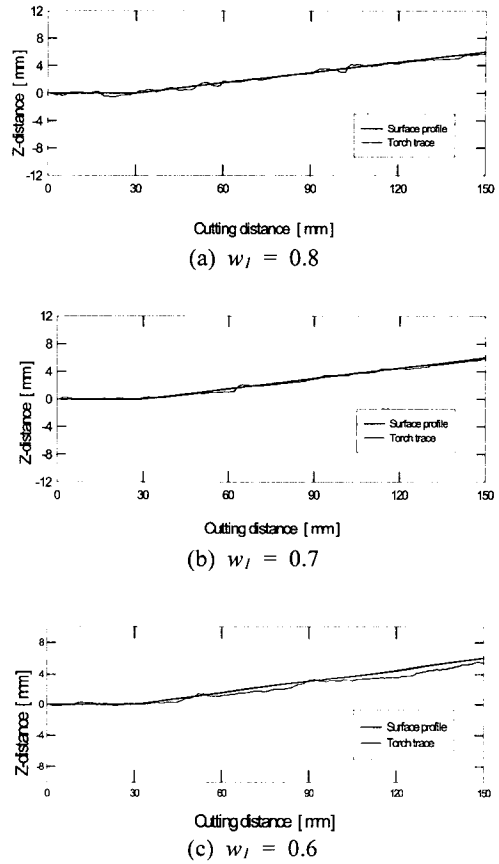
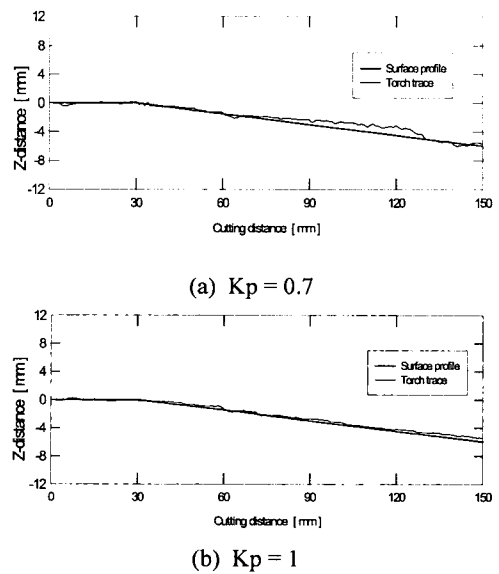
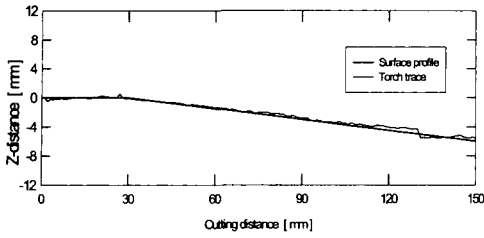


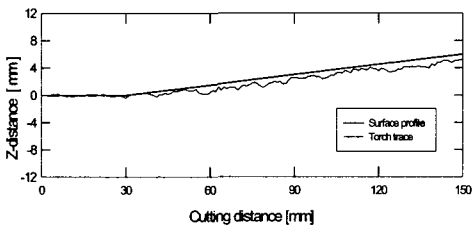
Fig. 9 Control result according to weighting factor( $w_I$ ) for moving averaged (upward)



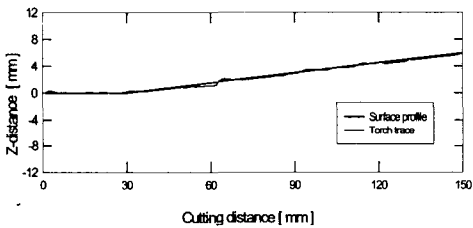


(c)  $K_p = 1.3$

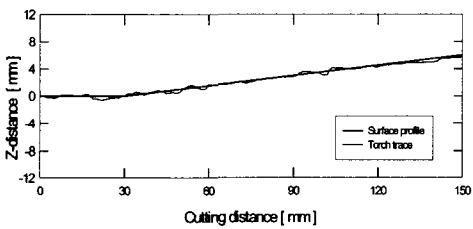
Fig. 10 Control result according to proportional gain( $K_p$ ) (downward)



(a)  $K_p = 0.7$



(b)  $K_p = 1$

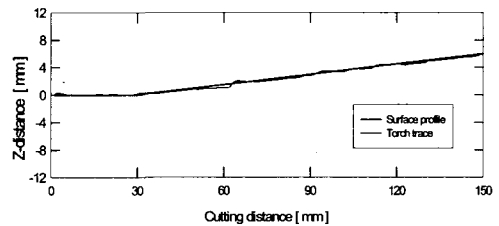


(c)  $K_p = 1.3$

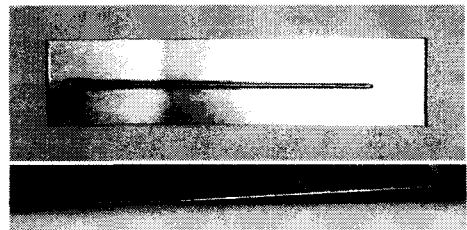
Fig. 11 Control result according to proportional gain( $K_p$ ) (upward)

게인이 1보다 작은 경우인 Fig. 10(a), Fig. 11(a)를 보면 실제 보정량보다 적은 양을 Z 축에 전송하므로 팁-모재간 거리가 커짐에 따라 토치가 미처 따라가지 못하고 오차가 누적되어 점점 더 커짐을 볼 수 있다. 게인이 1보다 큰 경우인 Fig. 10(c), Fig.

11(c)를 보면 실제 보정량보다 큰 값을 Z축에 전송하므로 과도한 Z축의 움직임으로 인해서 팁-모재간 거리 제어 정밀도가 저하된다. 이렇게 결정된 가중 이동평균의 가중치와 비례 계인 값을 적용하여 팁-모재간 거리 제어 실험을 하였다. Fig. 12는 +6mm의 높이 오차를 가지는 모재에 대해 실험한 결과이고, 오차는 -0.55 ~ +0.2mm 이내로 제어되었다. Fig. 13은 -6mm의 높이 오차를 가지는 모재에 대해 실험한 결과이고 오차는 -0.33 ~ +0.5mm 이내로 제어되었다. 그리고, 보다 급한 경사를 가지는 모재에 대한 적응성을 검토하기 위해 실험하였고, 그 결과를 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 14는 높이 오차가 +4mm에서 -4mm로, Fig. 15은 높이 오차가 -4mm에서 +4mm로 변화하는 모재에 대한 실험 결과이고 오차는 각각 -0.62mm ~ +0.65mm, -0.53 ~ +0.63mm 이내로 제어되었다. 그리고 제어를 하지 않은 경우와 제어를 한 경우의 절단 폭의 변화를 Fig. 16에 나타내었고, 보인 바와 같이 팁-모재간 거리를 제어하지 않았을 경우에는 절단폭이 2.9mm ~ 1.2mm로 거의 선형적으로 변화하였지만, 팁-모재간 거리를 제어한 경우에는 절단폭이 거의 1.4mm로 유지됨을 알 수 있다. 따라서 높이 오차가 최대 0.65mm 나더라도 절단폭의 오차는 0.16mm 이내로 제어되어 절단폭의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

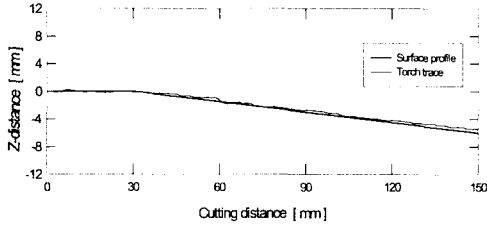


(a) Controlled torch trace

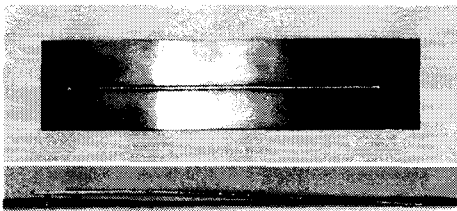


(b) Photograph of cut workpiece

Fig. 12 Result of TWD control (upward moving)

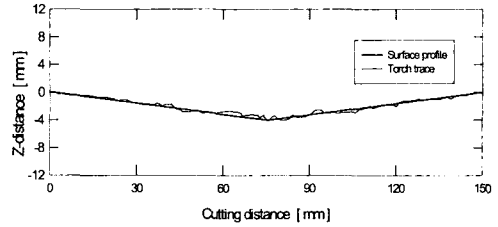


(a) Controlled torch trace



(b) Photograph of cut workpiece

Fig. 13 Result of TWD control (downward moving)

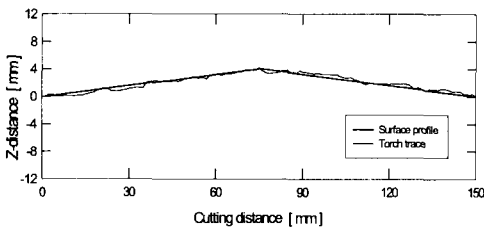


(a) Controlled torch trace

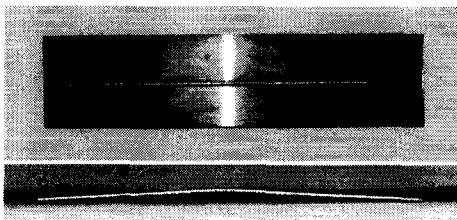


(b) Photograph of cut workpiece

Fig. 15 Result of TWD control (downward and upward moving)



(a) Controlled torch trace



(b) Photograph of cut workpiece

Fig. 14 Result of TWD control (upward and downward moving)

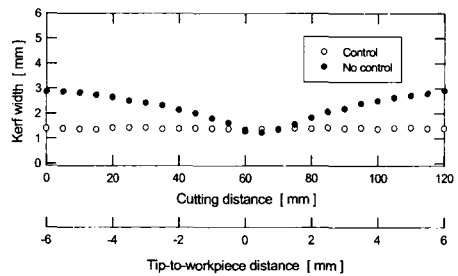


Fig. 16 Comparison of kerf width

### 5. 결론

본 연구에서는 플라즈마 아크 절단에서 팁-모재간 거리를 제어하는 알고리즘을 개발하여, 절단중 발생하는 열변형과 절단 대상물의 장착오차 등으로 인한 높이 변화에 적응하는 팁-모재간 거리 자동제어 시스템을 구축하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 플라즈마 아크 절단중 팁-모재간 거리가 변화하면 아크 전압이 변화하게 된다. 팁-모재간 거리 변화에 따른 플라즈마 아크 전압의 변화를 이용해



팁-모재간 거리 자동제어 시스템을 구축하였다.

2. 팁-모재간 거리를 제어하기 위한 센서로 아크 센서를 적용하기 위해 플라즈마 아크 전압 측정 회로를 구성한 후 실험적 모델링을 통하여 선형적인 팁-모재간 거리와 센서출력 전압과의 관계를 구하였다.

3. 팁-모재간 거리 자동제어를 위해 결정한 변수는 시스템의 제어 주기는 0.05 sec, 가중 이동평균의 가중치는 0.7, 비례 게인 값은 1이다. 이렇게 설정된 변수 값으로 팁-모재간 거리 제어실험 결과  $\pm 0.65\text{mm}$  이내로 제어되었고, 절단폭의 변화는  $\pm 0.16\text{mm}$  이내로 제어되었다.

4. 다양한 절단 조건에서 팁-모재간 거리 제어 실험을 한 결과, 팁-모재간 거리 제어를 하지 않은 경우에 비해 절단품의 품질과 절단폭 등으로 평가해 볼 때 양호한 제어 결과를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

1. H. Nomura et al. : Automatic Real-time Bead Height Control with Arc Sensor in TIG Welding, Trans. of JWS, Vol. 18, No. 2, pp. 35-42, 1987.
2. H. Nomura et al. : Automatic Real-time Bead Height Control with Arc Sensor (Report 2), Trans. of JWS, Vol. 18, No. 2, pp. 43-50, 1987.
3. H. Nomura : Sensor and Control systems in Arc Welding, CHAPMAN & HALL, 1994.
4. F. Craig : The plasma arc process-a review, Welding Journal, Vol. 66, No. 2, pp. 19-25, 1988.
5. G. M. Skinner and R. J. Wichhan : High quality plasma arc cutting and piercing, Welding Journal, Vol. 46, No. 8, pp. 657-664, 1967.
6. 엄두간, 토치-모재간 거리 제어 자동 플라즈마 절단 시스템에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, 1991.
7. 오승준, 김재웅 용접로봇용 아크센서 및 인터페이스 시스템, 한국정밀공학회, 제17권, 제1호, pp. 76-82, 2000년 1월.