

## 수직 원호 용접을 위한 메커니즘 구현에 관한 연구<sup>§</sup>

노태양<sup>\*†</sup> · 장원택<sup>\*</sup> · 김재권<sup>\*</sup> · 박종연<sup>\*\*</sup>

\* 현대중공업 산업기술연구소, \*\* 현대중공업 해양사업본부

### Mechanism for Vertical Welding for a Combination of Circular and Linear Paths

Tae Yang Noh<sup>\*†</sup>, Won Tek Jang<sup>\*</sup>, Jae Kwon Kim<sup>\*</sup> and Jong Yoen Park<sup>\*\*</sup>

\* Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industry, \*\* Division of Offshore & Engineering, Hyundai Heavy Industry.

(Received December 15, 2010 ; Revised August 18, 2011 ; Accepted September 1, 2011)

**Key Words :** Carriage(캐리지), Cover Plate(커버 플레이트), Distance Error(거리 오차), Welding Device(용접 장치)

**초록 :** 용접 장치 설계 시 고려해야 할 중요한 요소 중의 하나는 용접 궤적과 토치의 간격 오차를 줄이는 것이다. 특히 원호와 직선이 결합된 용접 궤적의 경우는 변곡점에서 오차의 영향이 크게 작용한다. 본 연구의 대상은 선체 블록 내부 탱크와 탱크 사이의 유체(물, 기름 등) 이동을 방지하기 위하여 설치되는 커버플레이트(Cover Plate) 용접으로서, 커버플레이트 원호용접은 위보기, 수직, 아래보기의 3 가지 자세를 동시에 포함한다. 본 연구는 작업 궤적의 각 구간 사이에서 발생하는 토치의 궤적 오차를 최소화할 수 있는 2 축 소형 용접 장치 개발에 관한 것으로서, 원호와 직선 부 사이의 변곡점에서 발생하는 토치 궤적 오차를 최소화하기 위한 구동 메커니즘 도출 과정에 대하여 기술하였다.

**Abstract :** One of the primary concerns in the design of welding devices is how to reduce the distance error between the welding path and the torch, especially when the path has a combination of circular and linear parts. This study investigated a mechanism for reducing the tracking error in the tangent area of a circular and linear path. A portable welding device, called a carriage, has been designed for a specific welding path by considering the distance error deviation. This welding carriage for vertical cover plate welding consists of a rail, a welding torch and the carriage body itself.

#### - 기호설명 -

- A : 선행 롤러의 좌표(mm)
- B : 후행 롤러의 좌표(mm)
- Rc : 덧판의 반경(mm)
- Rr : 레일의 반경(mm)

### 1. 서론

선박 건조, 건설 또는 대형 철골 구조물의 제작 현장에서는 Fig. 1 과 같이 주판(base plate) 위에 T 형태의 보강재(stiffener)가 종방향으로 다수 접합되

고 보강재를 가로지르는 방향으로 격벽(transverse plate)이라 불리는 횡방향 부재가 조립되는 구조를 자주 접할 수 있다. 횡방향 부재의 조립이 완료된 후 보강재와 횡방향 부재가 교차하는 영역에는 Fig. 1 에서와 같이 빈 공간이 존재한다. 이러한 빈 공간은 횡방향 부재의 조립을 위해 존재하며, 조립이 끝난 후에는 Fig. 3 과 같은 형태의 부재로 모두 덧대어 용접을 수행한다. 이런 커버 플레이트 또는 덧판의 용접 작업은 전 둘레 필릿 용접으로서, 전자세(수평, 수직 그리고 아래보기) 용접을 필요로 한다. 이러한 커버 플레이트 용접작업은 대형 선박 1 척당 약 2000 개가 소요된다. 커버 플레이트의 용접작업은 수량도 많지만 작업자의 용접 자세가 힘든 이유로 용접품질과 생산성이 떨어지는 문제가 발생하고 있다.

본 연구는 이동 및 설치가 간편한 소형, 경량의 전용 용접장비 개발에 관한 것으로서, 전자세 용

§ 이 논문은 대한기계학회 2010 년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, [tynoh@hhi.co.kr](mailto:tynoh@hhi.co.kr)

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

접 구간에 대응하기 위한 최소 궤적 오차를 가질 수 있는 장치의 메커니즘 구현에 관한 것이다. 적용된 메커니즘 도출을 위해 구동 방법을 제시하고, 제시된 구동 방법의 문제점을 해결하기 위해 구동 방법을 발전시켜 나가는 과정을 기술하였다.

Fig. 2 에 선체 블록 내부 및 개발된 용접장치를 나타내었다. 작업 대상인 커버 플레이트의 형상을 Fig. 3 에 나타내고, Table 1 에 커버 플레이트의 외형치수를 기술하였다. 커버 플레이트의 원호 용접을 자동으로 하기 위해서는 크게 두 가지의 치수가 중요하다. 첫 번째는 커버 플레이트의 반경( $r$ ) 이고, 두 번째는 직선부 길이( $L1$ ) 이다. 커버 플레이트의 반경은 일반적으로 110~120mm 로 보강재 플랜지 두께에 따라 가변적으로서, 일반적으로 반경은 115mm 이다. 그리고 커버 플레이트의 직선부 길이는 150~200mm 까지 다양하게 변한다.

2. 기구부 구성 및 메커니즘 설계

커버 플레이트 용접을 위한 기계시스템의 전체 구성은 Fig. 2 와 같이 캐리지, 레일 그리고 ‘셀’이라고 불리는 단위 작업 조립 구조물로 구성된다.

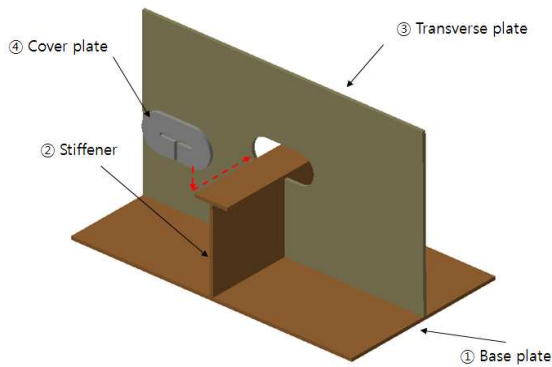


Fig. 1 Assembly of plates and its stiffener

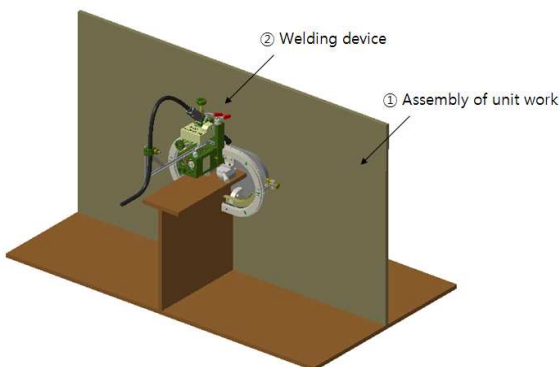


Fig. 2 Welding device for the cover-plate welding

레일과 캐리지 본체는 서로 분리 가능한 구조로서 개별 취급이 가능하다. 작업 시 레일을 조립 구조물의 해당 커버 플레이트 위로 장착하고 고정된 이후 캐리지 본체를 레일 위로 탑재하는 순서를 따른다.

2.1 캐리지 본체의 구성

캐리지 본체는 크게 캐리지 몸체, 주행부 구동 어셈블리, 위빙 어셈블리, 토치 간격 조절 X, Y 슬라이드 유닛 그리고 토치로 구성되어 있다. Fig. 4 에 캐리지 본체의 하부 구성을 나타내었다. Fig. 5 은 캐리지 본체를 아래에서 올려다본 도면으로서 주행 롤러와 가이드 롤러를 표시하고 있다. 주행 롤러는 고정형으로서 주행부 구동 어셈블리와 결합되어 있으며, 가이드 롤러는 스프링 장력에 의해 캐리지 본체의 주행시 곡선부와 직선부의 변곡점에 대해서 대응할 수 있도록 하였다.

Table 1 Dimension of a cover plate

L1	보강재 플랜지 폭	150~200 mm
T	보강재 플랜지 두께	20~40 mm
r	$100 + t/2$	110~120 mm
L2	$L1 + 200 + t$	370~440 mm

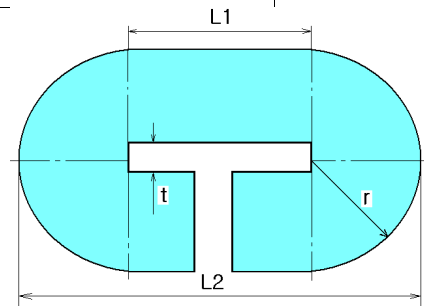


Fig. 3 Configuration of a cover plate

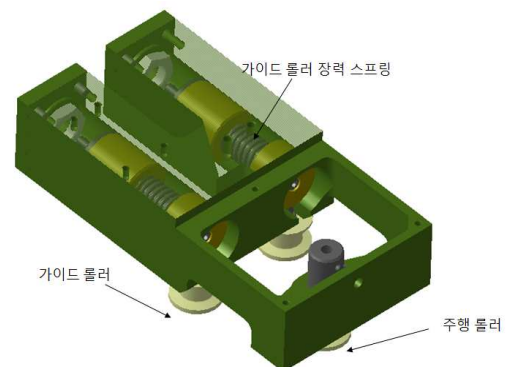


Fig. 4 The welding device's body configuration (a)

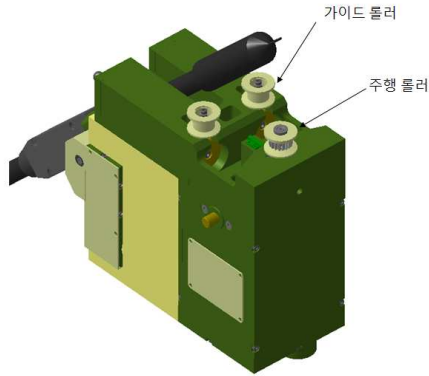


Fig. 5 The welding device's body configuration (b)

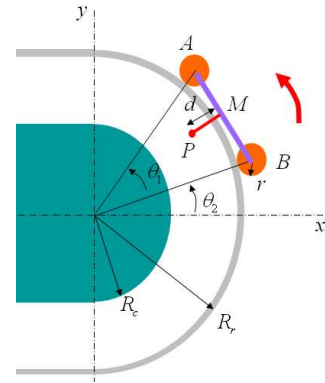


Fig. 7 Kinematic configuration of the 1<sup>st</sup> type

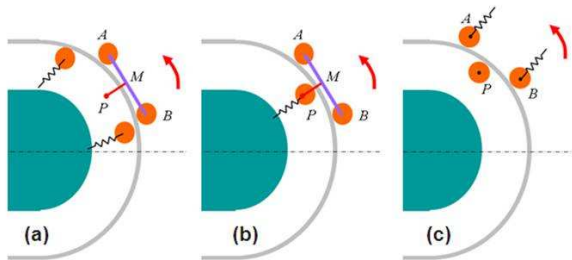


Fig. 6 Comparison of the three driving methods; (a) method1 - 2 fixed rollers & 2 spring-guided rollers, (b) method2 - 2 fixed rollers & 1 spring-guided rollers, (c) method3 - 1 fixed rollers & 2 spring-guided rollers

2.2 주행 구동 방식 설계

커버 플레이트는 용접부 궤적이 직선부와 반원의 곡선부로 이루어진다. 용접부 전체가 직선부 또는 곡선부 단일 궤적으로 이루어진 경우는 주행상의 기하학적 변화가 문제가 되지 않는다. 직선부와 곡선부의 접점, 즉 변곡점에서 주행 롤러에 기하학적 변화가 동반되며, 이러한 변화는 용접 토치 끝단의 위치 변화를 야기시킨다. 따라서 변곡 부위에서의 용접 결함을 유발할 수 있으므로, 본 연구에서는 캐리지 본체의 주행시 변곡부에서의 기하학적 변화를 궤적과 토치 사이의 오차를 1mm 이내로 최소화할 수 있는 방안을 검토하였다. 구동 메커니즘 선정을 위해 주행 방식을 선정하고, 선정된 주행 방식의 토치 궤적 오차를 분석하였다. 선정된 주행 방식을 구현할 때 발생하는 문제점을 해결하기 위해 또 다른 형태의 주행 방식을 도출하고 유사한 과정으로 몇 단계를 거치면서 주행 방식을 개선하였다.

최종적으로 3 개의 주행 방식을 검토하였으며, Fig. 6 에 구동 방식에 대한 형상을 나타내었다. 구동 방식은 크게 구동 롤러 개수에 따라 구분될 수 있으며, 첫 번째와 두 번째 주행 방식은 구동 롤러가 2 개인 방식을 나타낸다. 각각의 구동 방식

에서 장단점이 존재하며, 구동 방식에 대한 토치 궤적 오차 분석과 문제 해결 방안을 아래에 기술하였다.

2.2.1 구동 방식 1

토치 궤적 오차 분석을 위해 토치의 위치 좌표를 계산하였으며, Fig. 7 에 구동 관계식에 적용된 좌표계를 나타내었다. if  $\theta_1 + \theta_2 \leq 90^\circ$  에서의 A 와 B 의 위치 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} (R_r + r)c(\theta_1 + \theta_2) \\ (R_r + r)s(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} (R_r + r)c\theta_2 \\ (R_r + r)s\theta_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서, M 의 위치 벡터는 A 와 B 의 벡터에 수직인 방향의 방향벡터를 이용하여 구한다.

$$\vec{M} = \frac{1}{2}(A+B) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (R+r)\{c\theta_2 + c(\theta_1 + \theta_2)\} \\ (R+r)\{s\theta_2 + s(\theta_1 + \theta_2)\} \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 M 의 크기는 다음과 같다.

$$|\vec{M}| = \frac{1}{2}(R+r)\sqrt{2+2c\theta} \tag{4}$$

따라서, 직선 AB 의 법선 방향으로 거리 d 의 위치에 존재하는 토치 P 의 좌표를 계산할 수 있으며, P 의 좌표는 A 점과 B 점의 위치의 함수로 이루어진다. 2 개의 롤러가 모두 원호 궤적 상에 존재할 때는 토치와 궤적의 거리는 일정하게 유지된다. 그러나 앞쪽의 롤러가 변곡점을 통과하기 시작할 때, 즉, 롤러 A 가 변곡점을 통과하기 시작하면 A 점의 좌표는 수평방향(x 방향)으로만 값이 변화를 보이며 수직방향(y 방향)으로는 일정한 값

을 가지게 된다. 따라서, A 의 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} x \\ R+r \end{bmatrix} \quad (5)$$

x 는 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$x = 2(R+r)c\theta_2 \pm \sqrt{((R+r)c\theta_2)^2 + K} \quad (6)$$

여기서,  $K = 2(R+r)^2(1-s\theta_2) - L^2$  이고 L 은 두 개의 롤러 사이의 거리를 나타낸다. 위 식에서 x 는 음의 값을 취해야 하므로 A 점의 x 좌표에 대한 식은 다음과 같다.

$$x = 2(R+r)c\theta_2 - \sqrt{((R+r)c\theta_2)^2 + K} \quad (7)$$

구동방식 1 에 의한 토치 궤적을 Fig. 8 에 나타내었으며, 토치 궤적의 변화에 대한 애니메이션을 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 10 에 구동 롤러의 간격에 따른 토치 궤적 변화를 나타내었다. 구동 롤러의 간격이 커질수록 토치의 궤적 변화 역시 커지는 것을 확인 할 수 있다. 토치 궤적 변화의 상한선을 1mm 으로 제한하는 경우 구동 롤러의 최소 간격은 40mm 이내임을 확인할 수 있다.

2.2.2 구동 방식 2

2.2.1 의 구동 방식의 검토 결과 토치 궤적 오차 1mm 를 유지하기 위해서는 2 개 구동 롤러의 간격이 40mm 이내를 유지해야 한다. 이러한 구조는 크기의 문제 때문에 실제 구현하기가 어렵다는 한계가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 2 개의 구동 롤러를 사용하고 1 개의 가이드 롤러를 사용하는 방식으로 변경하여 변곡점에서의 토치 궤적 오차를 분석하였다. 기본적으로 앞서 살펴본 2 개의 구동 롤러 방식에서 필연적으로 발생하는 토치 간격 변화 이외에 Fig. 11 과 같이 변곡점을 지나칠 때, 구동 롤러가 레일을 이탈하는 구조적인 문제를 보였다.

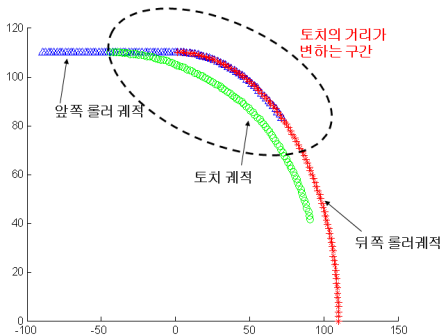


Fig. 8 The locus of the 1<sup>st</sup> type's torch

2.2.3 구동 방식 3

2.2.2 의 구동 방식을 보완하기 위해, 1 개의 구동 롤러와 2 개의 가이드 롤러를 이용하는 방식을 도출하였으며, 본 논문에서 기술된 캐리지는 이러한 구동 방식을 채택하였다. Fig. 12 에 적용된 구동 방식을 도식화하여 나타내었다. 이 방법은 캐리지가 주행 중에 단일 구동 롤러의 랙/피니언 접촉점을 기준으

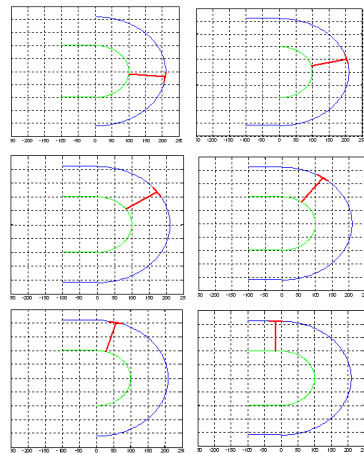


Fig. 9 Animation of the 1<sup>st</sup> type

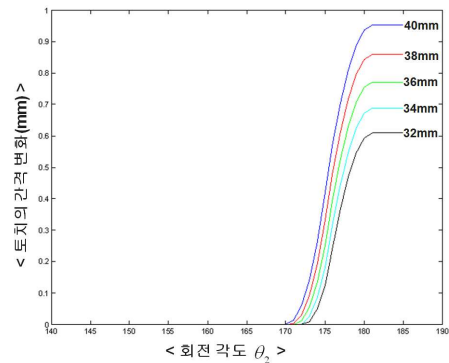


Fig. 10 The distance error of the torch and specified welding path according to the roller's distance variation

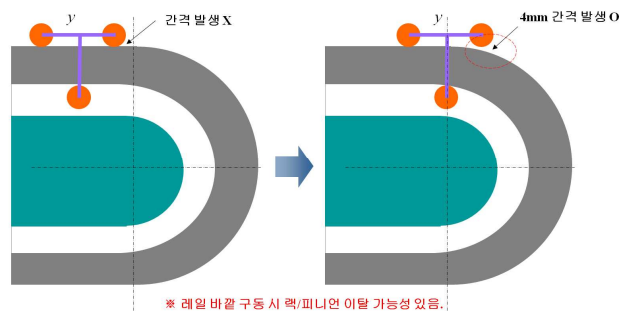


Fig. 11 The distance error of the 2<sup>nd</sup> type

로 몸체 전체가 상하로 흔들릴 수 있으며, 이로 인해 토치 궤적 오차가 발생하는 문제를 안고 있다. Fig. 13 에 주행 중 몸체의 각도 변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 몸체는 주행각도( $\theta$ )에 따라서 가이드 스프링 장력과 자체 무게로 인한 모멘트 차이로 인해 아래로 각도  $\Phi$ 만큼 추가적으로 기울어지게 된다. 주행각  $\theta$ 에 따른 몸체의 기울어지는 각 $\Phi$ 의 변화는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$kd_2^2\phi + mgr \sin \theta - mgd_1 \sin(\theta - \phi) = 0 \quad (8)$$

여기서, 첫 번째 항은 회전중심 C 에 대한 스프링 장력에 의한 모멘트이며, 두 번째 항은 구동롤러의 회전력에 의한 모멘트이다. 그리고 마지막 세 번째 항은 자중에 의한 모멘트이다. 주행각  $\theta$ 의 변화에 대한 각도 $\Phi$ 의 변화를 Fig. 14 에 나타내었다. 주행각  $\theta$ 가 약 94(deg) 근처에서  $\Phi$ 는 약 3.5(deg)의 최대값을 가진다. 이러한  $\Phi$ 의 변화는 주행 캐리지 몸체의 각도 변화를 의미하며, 이로 인해 용접 토치의 진행 각 변화를 일으킨다. 주행 시 토치의 진행 각 변화는 결국 토치 끝단의 궤적 오차를 유발시킨다. 토치의 진행 각 변화에 대한 토치 끝단의 궤적오차를 상쇄시키기 위해 Fig. 15 와 같이 토치의 와이어 끝단이 구동 롤러와 레일의 접촉점에 일치하도록 정렬시켰다. 따라서, 구동 방식 3 에서 발생하는 주행 시 몸체 각도 변화  $\Phi$ 에 대해 토치 끝단의 궤적오차는 발생하지 않도록 설계하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 구동 방식에 따른 토치 오차 비교 수직 원호 궤적을 포함하는 용접 궤적 추종을 위

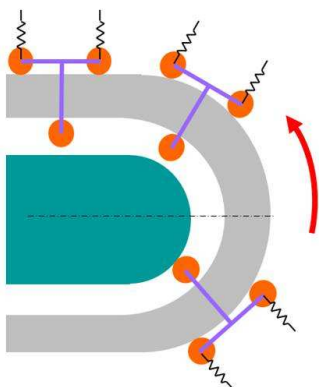


Fig. 12 Configuration of the 3<sup>rd</sup> driving method

해 본 연구에서는 토치의 궤적 추종 오차를 최소화 하기 위한 구동 메커니즘을 3단계에 걸쳐서 분석 및 보완하는 과정을 거쳤다. 각각의 구동 메커니즘에 따른 토치 오차 비교를 위해 다음 3가지의 사항을 고려하였다.

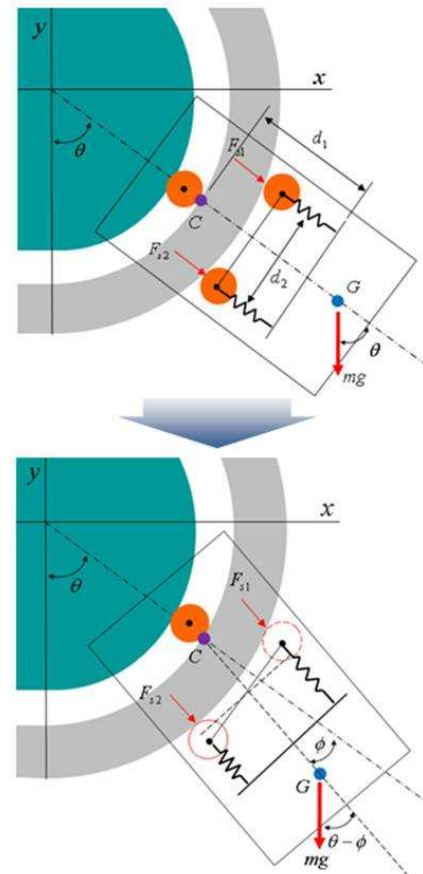


Fig. 13 Body angle variation during the operation

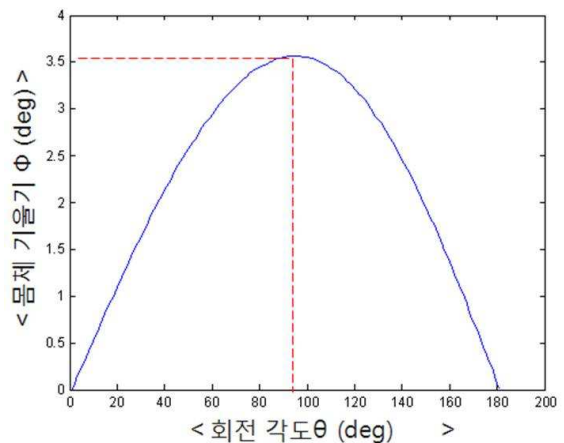
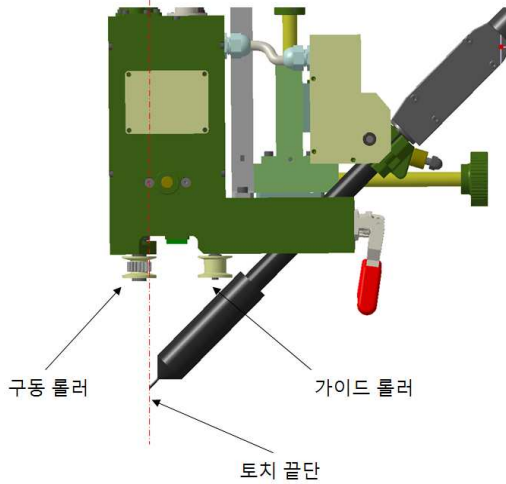


Fig. 14 Graph of body angle variation during the operation

**Table 2** Dimension of a cover plate

	Type 1	Type 2	Type 3
$e_{path}$	2.1 mm	4 mm	0 mm



**Fig. 15** Alignment of the end of the torch and driving roller

$$e_{Total} = e_{path} + e_{weav} + e_{wire} \quad (9)$$

여기서,  $e_{path}$ 는 구동 방식에 따른 토치 끝단과 기준 궤적 사이의 오차를 의미하며,  $e_{weav}$ 는 위빙 장치에서 발생할 수 있는 기어의 백래쉬 등의 기계적인 오차를 의미한다. 마지막으로  $e_{wire}$ 는 와이어의 불균일한 직진성으로 인한 오차이다. 본 연구에서 검토된 구동 방식은 모두 같은 위빙 장치와 토치를 사용하므로 동일한  $e_{weav}$ 와  $e_{wire}$ 를 가정하였다. 따라서, 3가지 구동 방식에 대한 토치 끝단의 궤적 추종 오차만을 비교하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 3가지 구동 방식에 대한 최대 오차를 비교하기 위해 동일한 롤러의 간격 60mm 조건을 적용하였다. 따라서, 구동 방식3의 경우가 최소 오차를 보임을 알 수 있다.

3.2 위치에 따른 주행 속도 및 용접 조건

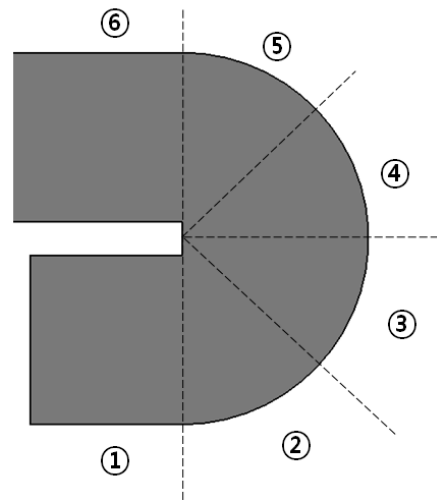
궤적을 따라 장치가 이동하는 구간별로 용접 자세가 달라지며, 이에 대응하기 위해 Fig. 16과 같이 궤적을 6개의 구간으로 나누고, 각 구간별로 용접 조건(주행 속도, 전류, 전압 및 위빙 조건)을 설정하였다. 각각의 용접 조건들은 요구되는 각장(leg length)에 따라 용접 테스트를 수행하여 결정하였으며, 1개의 각장에 대한 용접 조건을 Table 3에 나타내었다. 지정된 주행속도에 따라서 PD제어를 적용하였으며, 위빙의 경우 P제어를 적용하였다.

**Table 3** Welding conditions for the sections

	①	②	③	④	⑤	⑥
전류(A)	200~220					
전압(V)	22~26					
주행속도 (cm/min)	13	13	10	10	16	16

**Table 4** Field test results

	기존 작업	개선된 작업
작업시간	50 min	20 min
평균아크율	25%	55%



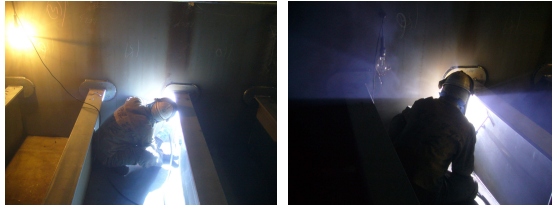
**Fig. 16** Welding section division

3.3 현장 적용성 평가

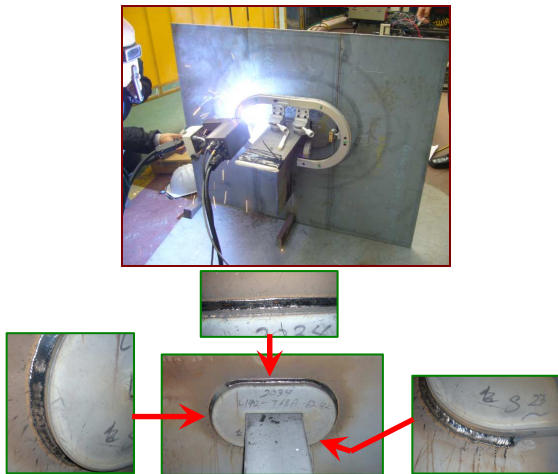
본 연구에서는 구동 방식3을 적용하여 시스템을 제작하고 용접테스트를 수행하였다. 이를 바탕으로 평균 아크율과 작업 소요시간 두 가지를 기준으로 현장 적용성을 평가하였다. 기존의 작업 방법은 Fig. 17과 같이 협소 공간에서 전량 수작업에 의해 수행되었으며, 작업 소요시간은 용접 및 보수 작업을 포함하여 개당 50분이다. 이때, 순수 용접 시간은 약 13분으로서 작업시간 대비 평균 아크율은 약 25% 수준이다. 본 연구를 통해 개발된 장치를 이용하는 경우 총 작업시간 20분, 순수 용접시간 약 11분으로서 작업시간 대비 평균 아크율이 약 55%이다. 이러한 정량적인 결과 이외에 열악한 작업환경의 개선 및 작업자의 편의성 향상의 효과와 안전사고 예방 등 무형의 효과를 얻을 수 있었다.

**Table 5** Path error & productivity contribution

$e_{path}$	작업시간	평균 아크율
0 mm	생산성 250% 개선	220% 증가



**Fig. 17** Previous manual welding in the field



**Fig. 18** Welding test and its result

#### 4. 결론

본 연구는 수직 원호 궤적을 포함하는 커버플레이트의 자동 용접을 위한 전용 용접 장치 개발을 위한 목적으로서, 토치 끝단의 궤적 추종 오차를 최소화 하기 위한 구동 메커니즘 구현에 관한 것이다. 3

단계의 구동 방법 비교와 오차 분석을 통해서 토치 끝단의 궤적 추종 오차를 최소화 할 수 있는 구동 방법을 발전시켰으며, 이를 적용하여 현장 적용성을 평가하였다. Table 5에 구현된 메커니즘의 토치 끝단 오차와 현장 적용성 평가 결과를 요약하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 수직 원호 궤적을 포함하는 변곡점에서의 토치 궤적오차를 최소화 할 수 있는 메커니즘을 구현하였다.
- 구현된 메커니즘을 적용한 커버플레이트 전용 용접장치를 개발하여 현장 적용성을 평가하였으며, 기존 수작업과 비교하여 250%의 작업시간 향상과 55%의 평균 아크율 향상을 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Nikravesh, P. E., 1988, *Computer-Aided Analysis of mechanical systems*, Prentice Hall, pp. 78~83.
- (2) Noh, T.-y., Lee, Y.-s., Jung, C.-w. and Oh, Y.-c., 2009, "Development of a Grinding Robot System for the Engine Cylinder Liner's Oil Groove," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 6, pp. 614~619.
- (3) John J. Craig, 2005, *Introduction to Robotics*, Prentice Hall, pp. 31~39.
- (4) Maxon motors, 2009, *Maxon motor's manual*, maxon motors
- (5) Misumi Korea, 2009, *Misumi mechanical standard part catalog*, Misumi Korea.
- (6) Faires J., D. and Burden, R. L., 1996, *Numerical method*, Sigma Press, pp. 47~51.
- (7) Jeon, Y. B., Kim, S. B. and Park, S. S., 2002, "Modeling and Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding," *Trans. Of the KSME*, Vol. 16, No. 1, pp. 83~93.
- (8) Park, K., Kim, Y., Sung, B. K., Yeom, C. and Rhee, S., 2007, "Development of an auto-welding system for CRD nozzle repair welds using a 3D laser vision sensor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 1720~1725.