

디지털식 연단속 용접용 캐리지 개발

김상봉/부경대학교 기계자동차공학부 교수

1. 머리말

용접공정은 유해 가스, 소음, 분진, 강한 자외선 등으로 인해 열악한 작업환경을 가지며, 이러한 요인으로 숙련공의 부족은 물론 생산성의 저하 그리고 지속적이고 안정적인 품질관리가 곤란한 생산공정으로 뽑힌다. 특히, 조선 공정에서의 용접작업은 용접선이 타공정에 비해 길고 또한 밀폐된 공간에서의 용접이 많이 이루어지기 때문에 작업자 보호 및 생산성 향상 차원에서 자동화 및 간이 자동화의 확대가 시급히 요구되는 공정이다.

선박 건조공정에서 많이 사용되어지고 있는 용접용 캐리지는 용접토치를 탑재하고 용접선을 따라 주행하면서 용접작업을 행하는 기기인데, 현재 이러한 용접용 캐리지는 대부분이 아날로그 회로를 기반으로 개발되어져 사용되고 있으며, 이러한 기존의 용접용 캐리지는 오픈루프 제어방식이므로 정밀한 용접속도 제어가 곤란하다. 특히 용접구간과 비용접구간이 존재하는 단속 용접조건에서 작업을 수행하기 위해선 그 구조가 상당히 복잡해질 뿐만 아니라, 용접거리와 비용접거리 제어성능은 상당히 낮다.

본 고에서는 마이크로프로세서(intel 80c196kc)를 기반으로 한 소형의 연단속 용접용

캐리지 개발결과와 실험을 통해 입증된 유효성을 보이도록 한다. 본 개발팀에서 개발된 캐리지의 특징은 다음과 같다. 기존 아날로그 캐리지가 가진 기능뿐만 아니라, 대형 철구조물 특히, 조선 공정에서의 가접공정이나, 입열량이 제한된 박판용접 조건에서 요구되는 단속 용접기능과 용접 종단부의 크레이터 처리기능, 용접 초기의 가속 및 용접 종단부에서의 감속기능을 가진다. 캐리지는 제어부, 구동부, 로봇본체, 전원공급부, 안전장치로 구성되어지며, 캐리지의 속도 및 주행거리 피드백은 포토센서를 사용하였다. 또한, 개발된 캐리지는 많은 현장 적용실험을 통해 용접시 발생하는 열과 노이즈에 강인하도록 하드웨어 및 소프트웨어를 설계, 개발하였다.

2. 캐리지 하드웨어 구성

2.1 캐리지의 기계부

〈그림 1〉은 설계, 제작된 캐리지의 전체적인 하드웨어 구성을 나타낸 것이다. 캐리지는 제어부, 구동부, 로봇본체, 전원공급부 및 안전장치로 구성되며, 제어부는 마이크로프로세서를 포함한 주제어장치, 주행제어를 위한 DC모터 드라이버, 용접조건 입력을 위한 조작판으로 구성하였다. 구동부는 주행을 위한 4개의 구동바퀴

와 동력원인 DC모터, 기계적인 동력전달부로 구성된다. 로봇본체는 알루미늄으로 제작하여 경량화를 도모하였으며, 용접토치를 정확한 용접점에 위치시킬 수 있도록 X,Y 2축의 슬라이더를 설계 제작하였다. 또한, 필렛용접과 아래 보기 용접 모두를 수행할 수 있도록 수평축의 슬라이더를 100mm로 설계하였다. 안전장치는 용접중 돌발적으로 발생할 수 있는 모재 끝단이나 용접선 이탈을 감지하여 자동으로 정지시키는 기능을 담당한다. 캐리지의 추락방지를 위해 로봇 바닥에 리미트 센서를 탑재하였다. 캐리지는 무거운 용접용 케이블을 견인하면서 주행하여야 하기 때문에 설정방향으로 자세를 유지하면서 주행하기 위해서는 큰 견인력이 요구된다. 그러나 무거운 케이블을 견인할 만큼의 큰 견인력을 얻기 위해서는 캐리지의 자중이 그 만큼 커야 하는데, 캐리지의 자중이 커질수록 견인력은 증가되지만, 그만큼 캐리지를 취급하기 곤란해지며, 경제적이지 못하다. 따라서, 캐리지의 무게중심을 고려하여 자석을 탑재함으로써 캐리지의 자중에 비해 큰 견인력을 확보할 수 있도록 하였다.

모터축과 구동바퀴의 기어비는 360:1로 선정하였으며, 기어비를 높게 설계함으로써 속도 피드백에 대한 정밀도 향상과 동시에 큰 구동

토크를 얻을 수 있었다. 구동휠의 소재는 휠과 바닥간의 충분한 구동마찰과 용접주변 열에 의한 열화가 없는 소재가 요구되는데, 본 연구에서는 내열 우레탄수지를 사용함으로써 충분한 내열성과 구동마찰력, 내마모성을 얻을 수 있었다.

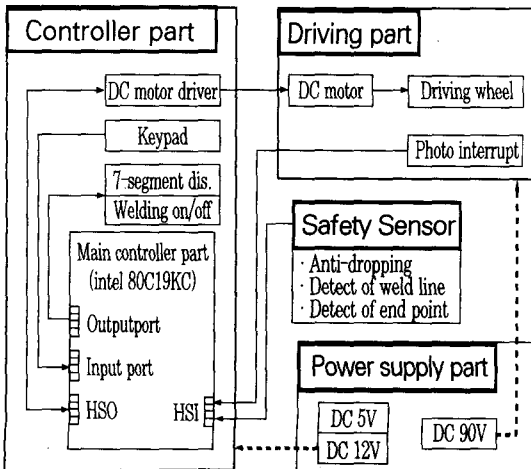
〈표 1〉은 본 연구에서 개발된 연단속 캐리지의 사양을 나타낸 것이다.

2.2 제어부 구성 및 설계

주제어장치는 인텔사의 16bit 원칩 마이크로 프로세서인 80c196kc를 기반으로 설계 제작하였다.

80c196kc의 특징은 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)형으로 저전력형이며 고속인 CPU 코어(core)에 인터럽트(interrupt) 관리자, AD(Analog/Digital) 변환기, PWM(Pulse Width Modulator) 발생기, HSI/HSO(High Speed Input/Output), 타이머(timer), 카운터(counter) 등이 단일 칩에 장착되어 다양한 제어시스템에 쉽게 적용시킬 수 있는 CPU이다.

80c196kc의 고속 데이터 입력부인 HSI(High Speed Input) 포트는 안전장치에서 발생된 신호의 입력과 구동모터의 속도제어를 위



〈그림 1〉 디지털 제어방식의 용접 캐리지의 구성도

〈표 1〉 연단속 용접 캐리지 사양

	Idem	Size or Range
Body	Size	145×200×285(W×L×H)
	Weight	6kg
	Driving method	DC Motor, 4 Wheel
Fuction	Welding speed	100~1000mm/min
	Welding distance	10mm ~ 10m
	Nonwelding distance	10mm ~ 10m
	Initial acceleration distance	1mm ~ 100mm
	End deceleration distance	1mm ~ 100mm
	Crater time	0.1sec ~ 10sec
Input power	110/220V 60Hz (Free voltage)	

한 포토 인터럽트 센서의 속도 피드백신호를 입력받는다. 속도 검출은 포토 인터럽트 센서의 펄스 입력시간을 80c196kc의 Timer 1을 이용하여 측정하였다.

고속 데이터 출력부인 HSO(High Speed Output) 포트는 DC모터 구동을 위해 모터 드라이버에 PWM(Pulse Width Modulation) 신호를 출력한다. 80c196kc의 입출력 포트 중 입력포트는 조작판에서 사용자가 입력한 용접 조건을 입력받는 기능을 수행한다. 출력포트는 용접기에 용접 On, Off 신호를 출력하며, 또한 사용자가 입력한 용접조건을 7-segment로 디스플레이하는 기능을 담당한다. 용접조건 설정은 용접속도, 초기 용접속도, 가속구간, 마무리 용접속도, 감속구간, 연단속 용접설정, 용접구간과 비용접구간의 거리설정, 크레이터 시간, 진행방향 전/후 설정으로 이루어져 있다.

2.3 모터 드라이버

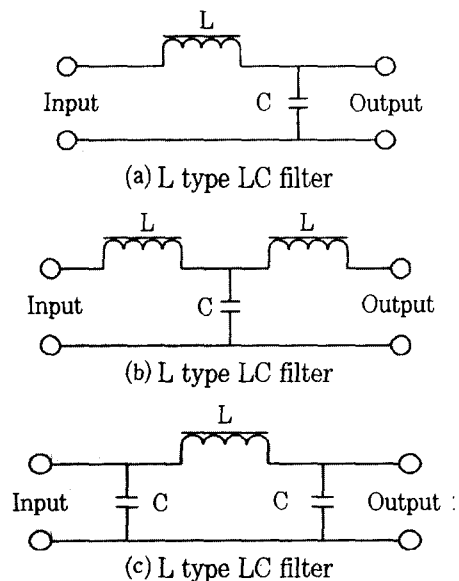
모터 구동방식은 PWM 제어방식을 채택했으며 제어 알고리즘은 다음과 같다. 주제어부의 마이크로프로세서가 HSO 포트를 이용하여 PWM파를 출력하면 포토 커플러(Photo-coupler TLP250)를 통해 노이즈제거 및 전원 분리를 행한다. 포토 커플러로 입력된 PWM파의 DC +5V는 DC +12V로 그리고 DC 0V는 DC -12로 변환되어 출력되는데, 이러한 출력 형태는 DC 5V 레벨보다 FET 스위칭 특성이 우수하며 노이즈 저감효과 또한 크고, 특히 용접공정중 발생하는 강한 전원서지 노이즈에 능동적으로 대처한다.

DC모터의 특징 중 하나인 역전류 발생은 제어회로를 파괴하거나 오동작을 일으키는데 이러한 역전류의 발생은 모터 정지시 더욱 강하게 발생한다. 따라서, DC모터 드라이버 설계시 반드시 이 역전류에 대한 보호회로가 요구된다. 본 개발에서는 정전압 다이오드와 콘덴서를 이용한 서너버 회로를 구성하여 역전류 보호회로를 설계하였다. 캐리지에 사용된 모터의 정격은 DC 90V, 0.2A, 15W이다.

2.4 전원회로 필터링 설계

전원공급시스템은 주제어부의 전원공급을 위한 DC 5V와 포토 커플러용 전원 DC $\pm 12V$, 그리고 DC모터 전원용 DC 90V가 있는데, 이들 모든 전원들은 서로 완전 절연되어야 하며, 콘덴서(C)와 코일성분(L)을 이용하여 전원 안정화 회로를 설계하였다. 외부 전원공급은 AC220V와 AC110V 모두 사용이 가능하도록 설계하였다.

일반적으로 전원공급회로에 있어서 상용주파수의 전원라인과 직류전원회로는 절연되어 있는데, 1차측에 고주파 입력이 가해지면 1차 및 2차 권선 사이에 부유용량(浮遊 인덕턴스, stray inductance)을 통해 고주파 전압이 2차측에 전송된다. 이때 이 부유용량은 펄스성 전원 노이즈로 작용하여 전체 시스템의 오동작을 일으키며 기기에 치명적인 손상을 일으킨다. 이러한 전원 노이즈 억제방법으로 라인필터(Line filter)에 의한 전원 노이즈 제거방법이 많이 사용된다. 라인필터는 주파수 대역, 전류용량에 따라 설계되고 노멀모드(전원 라인간) 및 코먼코드(전원라인과 접지간) 쌍방의



<그림 2> 전원 안정화용 L, T, π 형 필터

노이즈 성분을 동시에 제거하는 특성을 가지고 있다.

〈그림 2〉는 라인필터의 기본회로 구성을 나타낸 것이다. 역 L형 및 T형 LC 필터는 전원의 고주파 임피던스가 작고 또한 부하측 고주파 임피던스가 큰 경우에 효과가 있다. π 형 LC 필터는 전원측에 고주파 임피던스가 큰 경우에 적합하다. 용접현장은 작게는 몇 대에서부터 많게는 수십까지 같은 그라운드에 접지를 같이 하고 있으며, 이들 용접기는 동시에 용접되기도 하며 또한, 불규칙적인 시차를 두고 용접을 행한다. 따라서, 이들 전원과 같이 연결된 전원을 공급받는 캐리지는 전원노이즈 및 환경노이즈에 노출된 상태이므로 개발단계에서의 노이즈 조건과는 많은 차이가 있다. 공급되어지는 전원 전압의 순간적인 강압과 승압은 모터 및 내부 회로에 큰 충격을 준다. 따라서 본 연구에서는 T형 LC 필터를 병렬로 연결하고 또한 π 형 LC 필터 형태와 같이 콘덴서를 직렬로 연결하는 방법을 제안한다. 이러한 방법은 용접시스템과 같은 입력 전원 변동이 심한 경우 전원 안정화에 큰 효과를 볼 수 있었다.

3. 연단속 용접 캐리지 제어 알고리즘

3.1 연단속 용접 캐리지 속도 제어 알고리즘

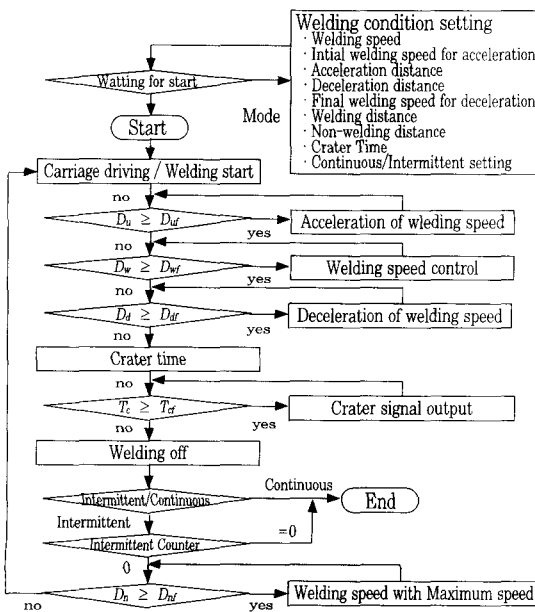
〈그림 3〉은 연단속 용접 캐리지의 제어 알고리즘을 플로차트로 나타낸 것이다.

박판 모재 또는 용접 입열량이 제한된 용접조건인 경우 단속용접이 적용되는데 각각의 용접조건에 따라 용접거리와 비용접거리를 달리 설정한다. 용접을 행하는 용접구간에서는 설정된 용접속도로 주행하지만 캐리지의 작업성을 높이기 위해 용접을 행하지 않는 비용접구간에서 캐리지는 최대속도(200cm/min)로 주행한다. 용접구간 및 비용접구간 모두 속도 및 이동거리를 모터축에 부착된 포토 인터럽트센서를 이용하여 피드백 제어한다.

캐리지의 용접속도 제어는 PD제어기를 통해 제어되는데 $e(t)$ 는 목표 용접속도에 대한 용접속도 오차이며, PD제어 입력 $U(t)$ 는 식 (2)와 같다. 여러 속도범위에서 실험한 결과 PD제어기의 게인은 $K_P=0.35$, $K_D=0.48$ 로 설정하였다.

$$e(t) = V_w - V_{wf} \quad (1)$$

$$U(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$



- D_w 설정된 용접거리
- D_n 설정된 비용접거리
- D_{wf} 피드백된 용접거리
- D_{nf} 피드백된 비용접거리
- D_u 설정된 가속거리
- D_{uf} 피드백된 가속거리
- D_d 설정된 감속거리
- D_{df} 피드백된 감속거리
- T_c 크레이터 시간
- V_w 용접속도
- V_{wf} 피드백된 용접속도
- V_i 가속을 위한 초기속도
- V_r 감속구간 마지막속도
- V_{an} 가속구간에서 n번째 속도
- V_{dn} 감속구간에서 n번째 속도
- ΔV_a 가속구산에서의 속도 증분

〈그림 3〉 연단속 캐리지 제어 알고리즘 흐름도

3.2 용접속도 가감속 제어

용접 시작부는 흔히 모재의 온도가 낮은 상태에서 용접이 시작되기 때문에 용접 시작부는 용접 입열량이 충분하지 못하게 되고 이로 인해 모재와 용융금속의 융합불량을 초래하게 된다. 이에대한 대책으로 <그림 4>의 (a)와 같이 용접 시작부와 종단부에 별도의 모재를 하나 덧붙인 형태의 엔드탭(End tap)을 사용하거나, (b)와 같이 백스텝(Back step)법을 이용하여 용접을 행하는데, 이러한 방법을 이용하면 고품질의 용접품질은 얻을 수 있지만, 생산비 및 재료에 많은 소실이 발생할 뿐만 아니라 구조적으로 이런 방법을 적용할 수 없는 경우도 있다. 따라서 본 연구에서는 용접조건에 따라 용접 시작부와 종단부의 용입조절을 위해 용접속도를 가감속 제어하는 알고리즘을 개발하였다.

<그림 5>는 단속용접일 때의 용접속도 패턴을 나타낸 것이다. 먼저 (a)는 용접 시작부의

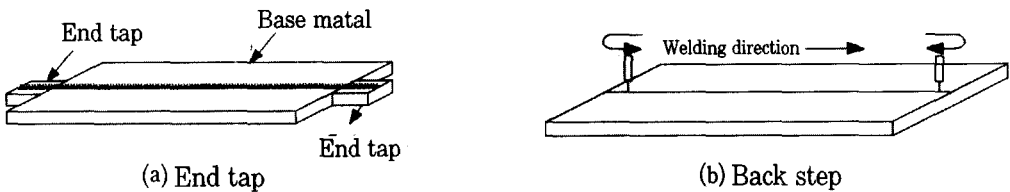
충분한 용입을 위해 가속을 행하는 구간으로 사용자가 용접조건에 따라 용접 초기속도와 가속구간을 설정하면 설정된 초기용접속도에서 본 용접속도까지 가속을 행한다. 가속구간의 속도 제어는 설정된 가속구간을 0.1mm 단위로 나누고 각 구간에 대한 용접속도 증분값을 식 (3)과 같이 계산한다. 가속구간에서는 주행 거리에 대한 피드백은 이루어지지만, 속도제어를 위한 피드백제어는 행하지 않으며, 가속구간에서의 속도는 미리 연산된 속도 입력값으로 가속을 행하는데, 가속구간의 n번째 입력속도는 식 (4)와 같다. (b)는 설정된 용접속도로 주행하는 구간으로 이때의 속도제어는 식 (2)와 같이 PD제어를 통해 이루어진다. 또한 (c)는 용접 종단부에서 크레이터 처리만으로 비드 형성이 부족할 경우 용접 종단부에 감속구간을 설정하여 용접을 행하는 감속구간이다.

$$\Delta V_a = \frac{V_w - V_i}{Da/0.1}$$

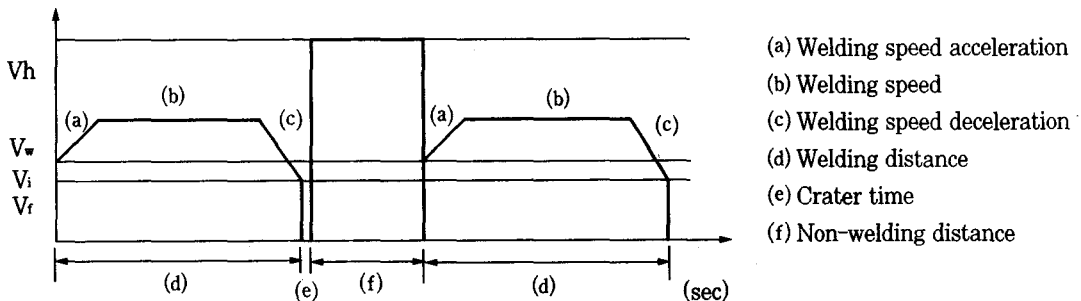
$$\Delta V_d = \frac{V_w - V_f}{Da/0.1} \quad (3)$$

$$V_{an} = V_i + (\Delta V_a \times n)$$

$$V_{dn} = V_w - (\Delta V_d \times n) \quad (4)$$



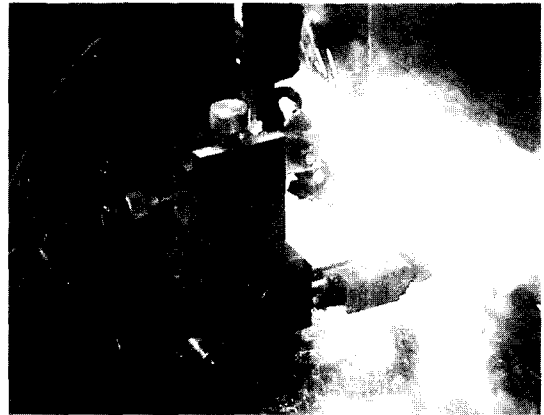
<그림 4> 용접 시작부와 종료부 용접방법



<그림 5> 단속용접의 경우 속도 패턴

3.3 크레이터 처리기능

크레이터 처리는 용접 끝단부의 비드 함몰을 막기 위해 마지막 용접부에서 크레이터 처리를 행하는데 크레이터 처리조건은 각 용접기 제조사마다 약간의 차이는 있지만 통상 본 용접전류에 약 50~70% 내외의 전류값을 크레이터 전류로하여 용접을 행한 후 용접을 마친다. 이러한 크레이터 처리는 크레이터 처리시간을 조절하여 비드 외형을 제어하는데 각각의 용접조건에 따라 다르게 설정되어야 한다. 따라서 용접 캐리지는 다양한 크레이터 처리조건 설정에 대응하기 위해 0.1sec 단위로 0~10sec까지 설정할 수 있도록 설계하였다. 또한 용접공정 중 예기치 않은 안전장치의 신호나, 사용자 임의의 정지명령 등의 비상정지가 발생하면 자동적으로 크레이터를 수행한 후 용접을 종료한다.

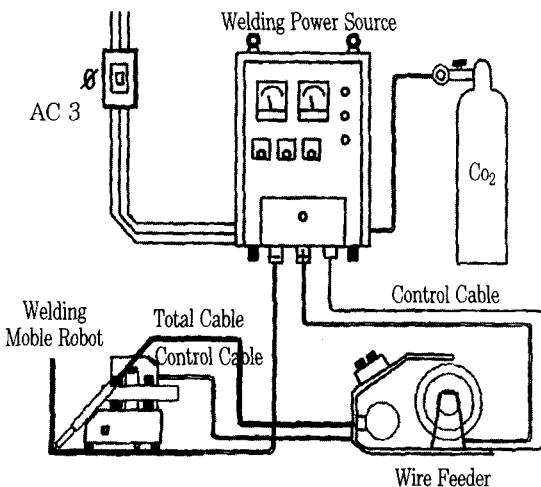


〈사진 1〉 연단속 캐리지의 용접방법

4. 용접실험 및 결과

본 연구에서 개발된 용접 캐리지의 성능을 시험하기 위해 연강 4mm 두께의 판재를 서로 필렛결합 형태로 단속용접을 수행하였다. 이 때 용접조건은 〈표 2〉와 같고, 〈그림 6〉은 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 〈사진 1〉은 실제

캐리지가 용접을 수행하고 있는 장면을 나타낸 사진이며, 〈사진 2〉는 단속 용접된 모재의 비드 외관사진을 나타낸 것이다. 설정된 용접거리와 비용접거리를 정확히 주행하였는가를 알아보기 위해 현장에서 많은 시험을 거친 결과 최초의 비드가 1mm 늦게 형성되었으며 그 이후 비드 및 비용접거리는 1mm의 오차도 없이 정확하게 제어되었다. 최초비드가 1mm 지연되어 형성되는 것은 구동부의 기어 백래쉬가 그 원인이라 판단된다.



〈그림 6〉 용접 시스템 구성도

〈표 2〉 용접조건

Work piece	Mild Steel 4t (mm)
Joint type	Filet joint
Welding wire	1.4φFlux Cored Wire
Welding current	200A
Welding voltage	25V
Welding speed	45cm/min
Sliding gas	18 l/min CO ₂
Power source type	Thyristor type
Welding/nonwelding distance	50mm - 200mm



〈사진 2〉 용접 비드 외관



〈사진 3〉 크레이터 처리된 비드 외관

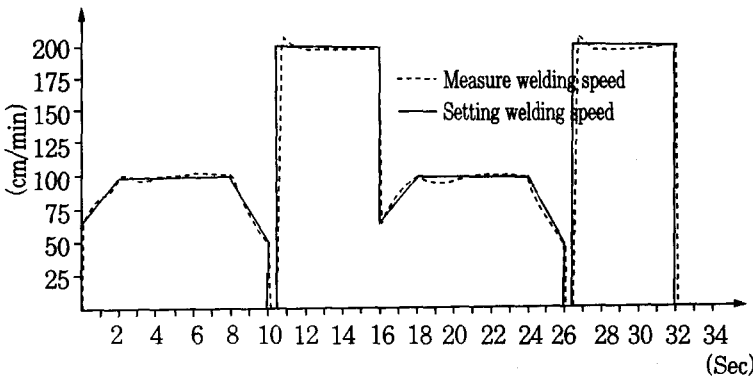
〈사진 3〉은 감속구간을 20mm, 마무리 용접 속도를 42cm/min, 본 용접속도 45cm/min으로 용접조건을 설정하고 용접한 경우 비드의 중단부를 나타낸 것이다. 표면 비드의 함몰없이 미려한 비드 외관을 얻었다. 〈그림 7〉은 캐리지의 속도추종성을 시험하기 위해 용접을 행하지 않는 상태에서 가속구간 30mm, 감속구간 25mm로 설정하여 주행할 때 측정된 캐리지의 속도를 나타낸 것이다. 실선은 설정된 속도이고, 점선은 측정된 속도를 나타낸다.

5. 기대되는 활용효과

본 연구에서 개발된 연단속 캐리지는 원칩 마이크로프로세서를 기반으로 설계/개발 되었

으며, 기존의 연속 캐리지의 기능뿐만 아니라, 단속용접, 용접 시작부와 중단부에 용접속도가 감속제어 및 크레이터 처리기능과 안정장치를 갖춘 다기능 연단속 용접 캐리지이다. 여러 용접현장에 적용한 결과 우수한 작업성과 고품질의 용접부를 얻었을 수 있었다.

개발된 연단속 캐리지는 밀폐된 공간에서의 용접작업뿐만 아니라, 작업자가 접근하기 힘들고 위험한 작업공간에서의 용접작업도 원활히 수행할 수 있기 때문에 조선 고정중의 밀폐된 선실 용접작업, 위험한 선체의 난간 용접작업에 탁월한 작업능력을 가지고 있다. 연단속 캐리지는 조건용접공정뿐만 아니라, 철구조물, 교량, 일반 용접작업에도 그 활용범위가 확대될 것으로 기대된다.



가속구간	30mm
감속구간	25mm
가속 초기속도	700mm/min
감속 마무리속도	500mm/min
용접속도	1000mm/min
용접구간 거리	100mm
비용접구간 속도	200mm/min
비용접구간 거리	180mm
크레이터 시간	0.5sec

〈그림 7〉 설정된 용접속도 페턴과 측정된 용접속도