

# 셀프실드아크 용접금속의 확산성수소량에 미치는 용접변수의 영향

방국수\* · 박찬\*\*

\*부경대학교 신소재시스템공학과

\*\*부경대학교 재료공학과

## Effects of Welding Parameters on Diffusible Hydrogen Contents in FCAW-S Weld Metal

Kook-Soo Bang\* and Chan Park\*\*

\*Department of Materials System Engineering, Busan, Korea

\*\*Department of Materials Science and Engineering, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Diffusible hydrogen content 확산성수소량, Welding parameters 용접변수, FCAW-S weld metal 셀프실드 용접금속

**ABSTRACT:** The effects of the welding parameters, contact tip-to-workpiece distance (CTWD), current, and voltage on the diffusible hydrogen content in weld metal deposited by self-shielded flux cored arc welding were investigated and rationalized by comparing the amount of heat generated in the extension length of the wire. This showed that as CTWD increased from 15mm to 25mm, the amount of heat generated was increased from 71.1J to 174.8J, and the hydrogen content was decreased from 11.3mL/100g to 5.9mL/100 g. Even if little difference was observed in the amount of heat generated, the hydrogen content was increased with an increase in voltage because of the longer arc length. A regression analysis showed that the regression coefficient of voltage in self-shielded flux cored arc welding is greater than that in CO<sub>2</sub> arc welding. This implies that voltage control is more important in self-shielded flux cored arc welding than in CO<sub>2</sub> arc welding.

### 1. 서 론

플럭스 코어드 와이어를 사용하는 셀프실드아크용접(Self-shield flux cored arc welding, FCAW-S)은 외부로부터 보호가스를 사용하지 않기 때문에 가스용기 설치가 어려운 고층 건물에서나 한냉지에서 용접 같은 옥외용접에 널리 사용 되어 왔으나, 용접금속 충격인성의 지속적 향상으로 해양구조물 등에서도 그 적용이 확대되고 있다(Haack et al., 1980; Keeler, 1981a; Keeler, 1981b; Rodgers and Lochhead, 1987). 특히 자켓트에서 브레이스와 래그를 용접하는 경우 이음부는 편면 V형 그루브를 사용하는데 가스노즐이 없는 본 용접법은 루트부의 원하는 위치에 와이어를 정확히 위치시키는 것이 가능하며 와이어와 모재의 균일한 혼합을 얻을 수 있는 장점이 있다(Boniszewski, 1992). 하지만 고장력강을 사용하여 셀프실드아크 용접하는 경우에는 응력이 집중되는 이러한 루트부에서 저온균열의 발생에 주의를 요한다.

일반적으로 용접부의 저온균열은 경화조직, 응력 그리고 확산

성수소의 세 요인에 의하여 발생한다고 알려져 있으며, 경화조직과 응력이 동일한 경우에는 확산성수소량이 많을수록 저온균열이 발생하기 쉽다(Easterling, 1992). 플럭스 코어드 와이어를 사용하는 경우 용접부 확산성수소량은 용접변수에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 전압의 증가는 아크 중 수소의 혼입을 증대시켜 수소량을 증가시키나, 콘택터팁과 모재사이의 거리(Contact tip-to-workpiece distance, CTWD)나 전류의 증가는 와이어 저항발열을 증대시켜 수소량을 감소시킨다고 알려져 있다(White, et al., 1992; Dixon and Hakansson, 1995; Harwig, et al., 1999; Kiefer, 1996). 하지만 이런 연구는 대부분 CO<sub>2</sub>용접과 같은 보호가스를 사용하는 용접을 대상으로 수행되어 왔으며 보호가스를 사용하지 않는 FCAW-S 용접의 경우에는 연구결과를 찾기 어렵다. FCAW-S 용접의 경우에는 보호가스를 사용하지 않기 때문에 대기로부터 수소의 혼입이 많을 것으로 예측되어 더욱 더 수소관리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 FCAW-S 루트부 용접 시 용접금속에서의 확산성수소의 억제에 위하여 용접변수(CTWD, 전류, 전압)가 확산성수소량에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

Received 1 June 2013, revised 26 September 2013, accepted 10 October 2013

Corresponding author Kook-Soo Bang: +82-51-629-6379, ksbang@pknu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

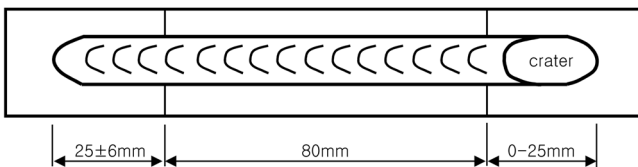
**Table 1** Welding conditions used

Variable	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	CTWD (mm)	Heat input (kJ/cm)
CTWD	200	20	20	15	12
				20	
				23	
Current	180	20	18	20	12
	200		20		
	230		23		
Voltage	200	18	18	20	12
		20	20		
		23	23		

**2. 실험방법**

실험에 사용한 와이어는 AWS E81T8-Ni1 상당 직경 1.6mm 플렉스 코어드 와이어다. 각 용접변수의 영향을 조사하기 위하여 Table 1의 조건으로 용접하였다. 다른 용접변수는 일정하게 유지하며 CTWD, 전류, 그리고 전압을 각각 15mm~25mm, 180A~230A, 18V~23V로 변경하였다. 용접전류와 전압을 변경하는 경우에는 입열량을 12kJ/cm로 일정하게 유지하기 위하여 용접속도를 18cm~23cm/min로 변경하였다. 용접 후 용접금속 확산성수소량은 AWS A4.3-86의 수은치환법에 따라 측정하였다. 인장강도 600MPa의 압연강을 25mm×12mm×80mm의 수소포집용 시편으로 가공한 후 400°C서 2시간 동안 탈가스처리한 다음 Fig. 1과 같이 두 개의 탭 사이에 위치시켜 FCAW-S 용접하였다. 용접은 직선비드법으로 하였고 스타팅탭에서 비드길이가 25±6mm, 크레이터를 포함한 런오프탭에서 비드길이가 25mm 이하가 되도록 하였다. 용접완료 후에 시험편 내의 확산성 수소가 외부로 빠져나가지 못하게 얼음물에서 강하게 흔들어 급냉시킨 후 물기를 완전히 제거하여 -70°C의 드라이아이스 알코올 용액에 장입하였다. 용액 내에서 최소 2분 이상 유지하여 충분히 냉각시킨 다음 탭과 슬래그를 제거하였다. 이 때 대기 중에 노출되는 시간을 1분을 넘지 않도록 하였다. 이후 시험편을 수은이 채워진 유디오미터 내에 장입하여 45°C에서 72시간 동안 발생하는 수소를 포집하였다. 포집된 수소는 표준압력과 온도에서의 수소부피로 변환한 후 용착금속 100g당 수소량으로 나타내었다. 기본적으로 네 시험편의 평균값을 측정값으로 하였다. 또한 용접 중 와이어 송급속도를 송급속도측정기를(WELTEC NWC-2000A) 사용하여 측정하였고, 초고속카메라를(Photron fastcam 1280) 이용하여 1000fps의 속도로 촬영하여 와이어 돌출길지와 아크 길이를 측정하였다.

확산성수소량은 AWS A4.3-86의 수은치환법에 따라 측정하였다.



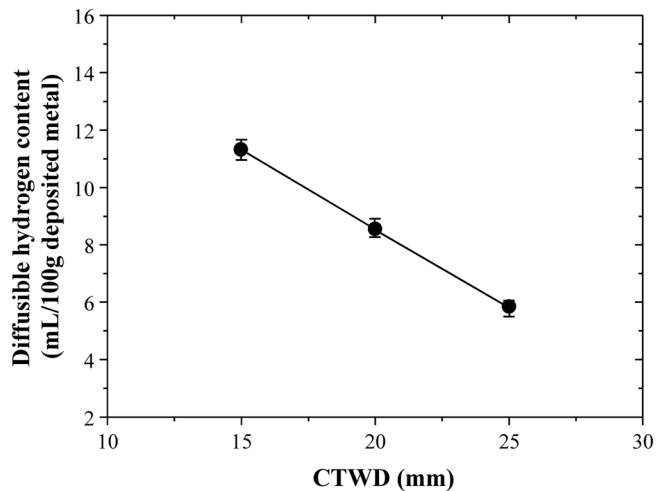
**Fig. 1** Welding tab assembly for diffusible hydrogen content measurement

인장강도 600MPa의 압연강을 25mm×12mm×80mm의 수소포집용 시편으로 가공한 후 400°C서 2시간 동안 탈가스처리한 다음 Fig. 1과 같이 두 개의 탭 사이에 위치시켜 FCAW-S 용접하였다. 용접은 직선비드법으로 하였고 스타팅탭에서 비드길이가 25±6mm, 크레이터를 포함한 런오프탭에서 비드길이가 25mm 이하가 되도록 하였다. 용접완료 후에 시험편 내의 확산성 수소가 외부로 빠져나가지 못하게 얼음물에서 강하게 흔들어 급냉시킨 후 물기를 완전히 제거하여 -70°C의 드라이아이스 알코올 용액에 장입하였다. 용액 내에서 최소 2분 이상 유지하여 충분히 냉각시킨 다음 탭과 슬래그를 제거하였다. 이 때 대기 중에 노출되는 시간을 1분을 넘지 않도록 하였다. 이후 시험편을 수은이 채워진 유디오미터 내에 장입하여 45°C에서 72시간 동안 발생하는 수소를 포집하였다. 포집된 수소는 표준압력과 온도에서의 수소부피로 변환한 후 용착금속 100g당 수소량으로 나타내었다. 기본적으로 네 시험편의 평균값을 측정값으로 하였다. 또한 용접 중 와이어 송급속도를 송급속도측정기를(WELTEC NWC-2000A) 사용하여 측정하였고, 초고속카메라를(Photron fastcam 1280) 이용하여 1000fps의 속도로 촬영하여 와이어 돌출길지와 아크 길이를 측정하였다.

**3. 실험결과 및 고찰**

Fig. 2에 CTWD에 따른 확산성수소량의 변화를 나타내었다. CTWD가 15mm에서 20mm, 25mm로 증가함에 따라 수소량은 11.3mL/100g, 8.6mL/100g, 5.9mL/100g으로 감소하고 있다. 이러한 CTWD 증가에 따른 수소량의 저하는 용접 중 와이어의 돌출길이(Extension length)에서 저항가열이 증대하여 와이어가 포함하고 있는 수분이나 수소가 더 많이 증발하기 때문인 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 Pitrun이 제안한(Pitrun, 2004) 방법을 따라 CTWD에 따른 돌출길이에서 저항발열량(Q)의 계산을 시도하였다. 저항 R을 가지는 와이어에서 전류 I가 시간 t 동안 흐르는 경우 Q는 다음과 같이 주어진다.

$$Q = I^2Rt \tag{1}$$



**Fig. 2** Effect of CTWD on the diffusible hydrogen content in weld metal

한편 와이어 저항  $R$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \rho L/A \tag{2}$$

여기서  $\rho$ 는 와이어 고유저항,  $L$ 은 와이어 돌출길이, 그리고  $A$ 는 전류가 흐르는 와이어 단면적이다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$Q = I^2 \rho L t / A \tag{3}$$

용접과정 중 와이어는 가열되기 때문에 온도증가  $\Delta T$ 에 따른  $\rho$ 의 변화는 상온에서  $\rho_{20}$ 를 측정하여 다음 식을 사용하여 보정하였다.

$$\rho_T = \rho_{20}(1 + a\Delta T) \tag{4}$$

여기서  $\sigma_T$ 와  $\rho_{20}$ 은 각각 온도  $T$ 와 상온에서의  $\rho$ 값을 나타내고  $a$ 는 온도계수를 나타낸다. 전류가 흐르는 와이어 후프는 저탄소강이나 편의를 위하여 순철이라고 가정하면  $a$ 는  $0.00651/^\circ\text{C}$ 이다. 용접 중 와이어 온도는 상온에서 용접까지 불균일한 분포를 나타내나 계산에서는 상온과 용접의 중간온도인 약  $800^\circ\text{C}$ 를  $\Delta T$ 로 하였다. 이러한 가정을 사용하여  $\rho$ 값을 구하면  $8.26 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 이다. 한편 와이어 돌출길이  $L$ 은 용접과정 중 아크를 초고속 촬영하여 직접 측정하였다. Fig. 3에 각 CTWD 조건에서 초고속 촬영한 아크 사진을 나타내었다. 사진을 사용하여 CTWD를 측정된 결과 CTWD가 15mm, 20mm, 25mm로 증가함에 따라 돌출길이도 12.33mm, 18.07mm, 21.24mm로 증가함을 알 수 있다.

마지막으로 저항발열시간  $t$ 는 돌출길이를 와이어 송급속도로

나누면 계산 가능하다. 와이어 송급속도 측정장치를 사용하여 송급속도를 측정된 결과 CTWD가 15mm, 20mm, 25mm로 증가함에 따라 송급속도는 399cm/min, 459cm/min, 482cm/min로 증가하였다. 따라서 저항발열시간  $t$ 는 각 CTWD에서 0.185s, 0.236s, 0.264s로 증가한다. 이상의 값들을 식 (3)에 대입하면  $Q$ 의 계산이 가능하다. Fig. 4에 CTWD에 따른  $Q$ 의 변화를 나타내었다. CTWD가 15mm, 20mm, 25mm로 증가함에 따라  $Q$ 가 71.1J, 132.9J, 174.8J로 증가한다. 즉 CTWD가 15mm에서 25mm로 증가함에 따라  $Q$ 는 두 배 이상 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 CTWD의 증가는 용접과정 중 돌출길이에서 저항발열량을 크게 증가시켜 확산성수소량을 저감시킴을 알 수 있다.

Fig. 5에는 전류에 따른 확산성수소량의 변화를 나타내었다. 전류가 180A, 200A, 230A일 때 수소량은 각각 8.1mL/100g, 8.6mL/100g, 8.2 mL/100g으로 큰 변화가 없다. 이 전류변경시험에서는 입열량을 12kJ/cm로 일정하게 유지하기 위하여 용접속도를 변화시켰다. 그런데 이런 용접속도의 변화는 용접을 완료하는데 걸리는 시간에 차이를 나타내어 시험편으로부터 확산성수소가 빠져나갈 수 있는 시간에 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 용접속도가 확산성수소에 미치는 영향을 먼저 확인하였다. 변화시킨 용접속도는 최소 18cm/min에서 최대 23cm/min으로 5cm/min의 차이가 난다. 본 실험에서 스타팅탭을 제외한 시험편과 런오프탭에서 용접된 비드길이는 약 100mm로 이러한 용접속도의 차이로 인해 용접이 끝날 때 까지 시험편이 냉각되는 시간에는 약 7s의 차이가 난다. 이러한 시간의 차이는 용접완

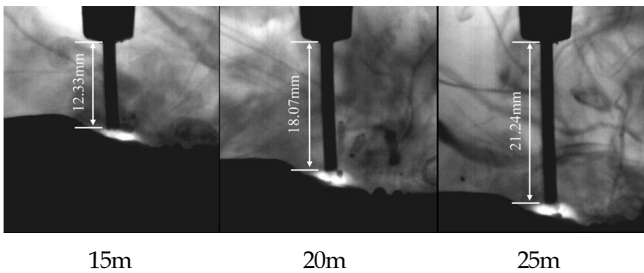


Fig. 3 Photographs showing extension length with different CTWD

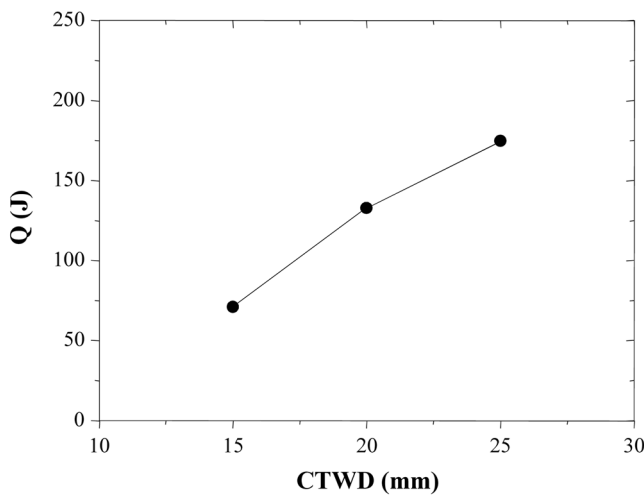


Fig. 4 Variation of  $Q$  as a function of CTWD

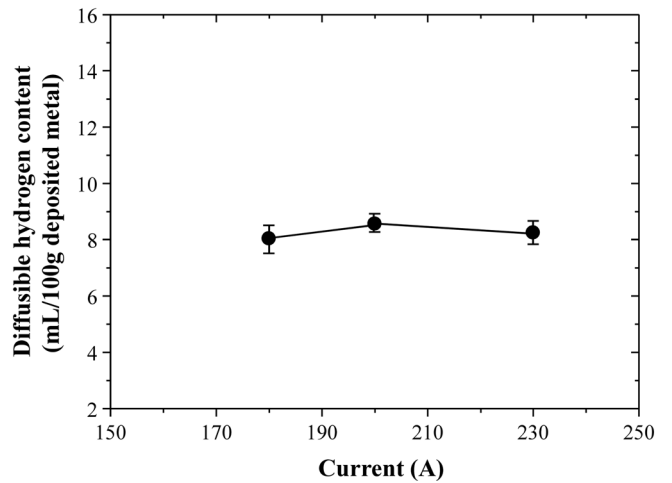


Fig. 5 Effect of current on the diffusible hydrogen content in weld metal

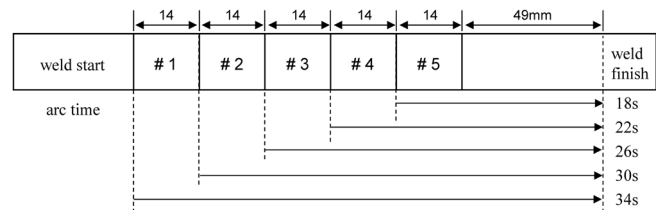


Fig. 6 Modified test assembly to investigate the effect of welding speed on the diffusible hydrogen content

료 후 시험편을 급냉하기 전에 시험편으로부터 수소가 빠져나갈 수 있는 시간에 차이를 제공하여 수소량 측정치에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 영향을 조사하기 위하여 다음과 같은 실험을 행하였다. Fig. 6과 같이 연속하여 놓여진 5개의 시험편을 200A-20V-21cm/min, CTWD 20mm의 조건으로 용접하였다. 이 경우 용접을 시작하여 끝날 때까지 걸리는 시간은 1번 시험이 34s로 가장 길고, 5번 시험이 18s로 가장 짧다. 즉 최대 차이는 16s이다. 이는 본 실험에서 용접속도 차이에 기인하는 냉각시간의 차이 7s보다 길다. 용접 후 1~5시험편의 확산성수소량을 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 모든 시험의 확산성수소량은 큰 차이 없이 6.5mL/100g~7.0mL/100g을 나타내고 있다. 따라서 본 실험에서 용접속도의 차이는 확산성수소량에 큰 영향을 미치지 않아 앞서 Fig. 5의 결과는 순전히 전류의 영향에만 기인함을 알 수 있다.

CTWD 변경시험과 동일한 방법으로 전류의 변화에 따른 저항발열량의 변화를 계산하였다. 먼저 돌출길이의와 송급속도를 측정된 결과 전류가 180A에서 230A로 증가하면 돌출길이는 약

18mm로 큰 차이를 나타내지 않았으나 송급속도는 389cm/min에서 570cm/min으로 크게 증가하였다. 그 결과 가열시간은 0.277s에서 0.191s로 감소하였다. 이 값들을 사용하여 저항발열량을 계산하면 발열량은 125.7J에서 142.9J로 약간 증가하였다. 이런 점은 CTWD를 변화시킨 경우와 크게 다르다. 즉 CTWD의 증가는 발열량을 크게 증가시켰으나 전류의 증가는 발열량에 큰 차이를 나타내지 않았다. 이런 이유로 전류의 증가에 따라 확산성수소량에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 본 실험과 같은 전류의 미미한 영향은 Pitrun의 실험결과에서도 확인되고 있다 (Pitrun, 2004).

Fig. 8에는 전압에 따른 확산성수소량의 변화를 나타내었다. 전압변경 실험에서도 입열량을 일정하게 유지하기 위하여 용접속도를 변경시켰으나 앞서 설명한 것처럼 이런 속도차이는 확산성수소량에 영향을 미치지 않는다. 그림에서 보는바와 같이 전압이 18V, 20V, 23V로 증가함에 따라 확산성수소량은 7.2 mL/100g, 8.5mL/100g, 12.6mL/100g으로 증가하고 있다. 앞서와 동일한 요령으로 저항발열량을 계산하였다. 전압이 18V에서 23V로 증가하여도 발열량은 138.9J에서 121.4J로 변화하여 큰 차이가 없었다. 따라서 이런 전압의 증가에 따른 확산성수소량 증가는 저항발열량에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 9에는 고속카메라로 관찰한 전압변화에 따른 아크길이의 변화를 나타내었다. 전압이 18V에서 23V로 증가함에 따라 아크길이는 점차 증가하여 1.5mm에서 2.8mm로 증가한다. 따라서 전압증가에 따른 확산성수소량의 증가는 아크길이의 증가에 따라 외부로부터 유입되는 수소량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 실험에서 CTWD, 전류, 그리고 전압을 독립변수로, 그리고 확산성수소량을 종속변수로 하여 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

$$[H]_D = -3.21 + 4.28 \times 10^{-4} I + 1.14V - 0.55CTWD \quad (5)$$

여기서  $[H]_D$ ,  $I$ ,  $V$ ,  $CTWD$ 는 각각 용착금속 100g당 확산성수소량(mL/100g), 전류(A), 전압(V), 그리고  $CTWD$ (mm)를 나타낸다. 회귀식의 상관계수는 0.93이며 각 변수의 정성적인 영향은

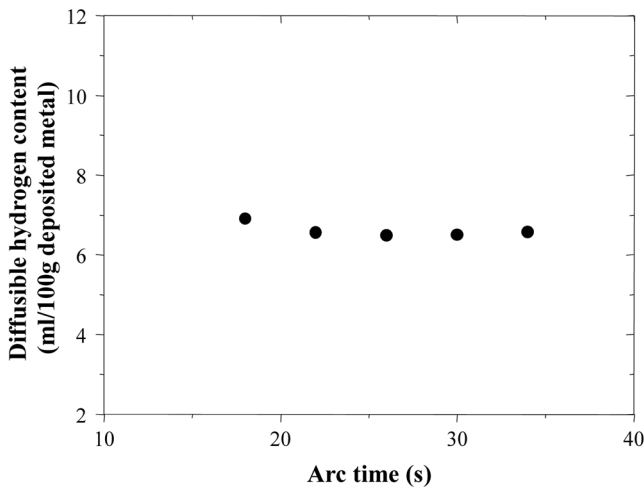


Fig. 7 Effect of arc time on the diffusible hydrogen content in weld metal

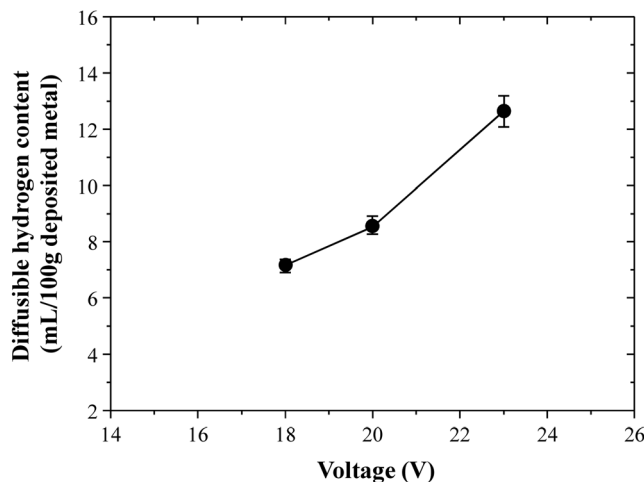


Fig. 8 Effect of voltage on the diffusible hydrogen content in weld metal

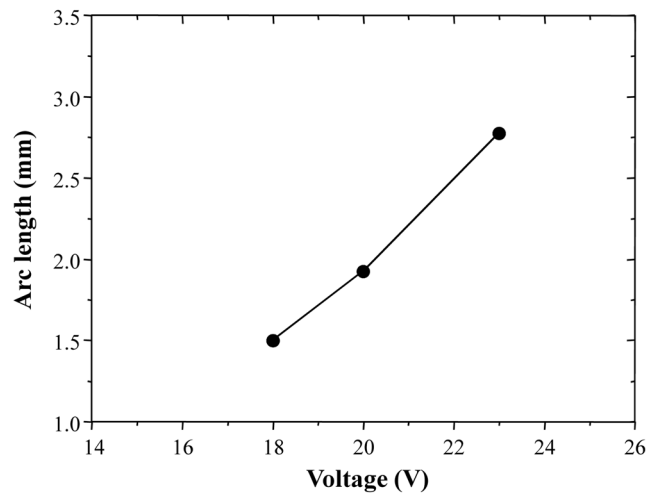


Fig. 9 Variation of arc length as a function of voltage

위에서 설명한 결과와 잘 일치하다. 즉 전류의 영향은 아주 미미한 반면 전압의 증가는 수소량을 증가시키고 CTWD의 증가는 수소량을 감소시킨다. 본 저자들은(Han et al., 2010) 플렉스 코어드 와이어를 사용하는 CO<sub>2</sub>아크용접에서 본 실험과 동일하게 전류, 전압, 그리고 CTWD를 각각 변경하여 확산성수소량의 변화를 측정된 결과 다음과 같은 회귀식을 얻었다.

$$[H]_D = -1.62 + 5.02 \times 10^{-3} I + 0.53 V - 0.34 CTWD \quad (6)$$

각 변수의 정성적인 영향은 셀프실드아크용접인 본 실험과 동일하다. 하지만 각 변수들의 회귀계수를 비교하면 셀프실드아크용접에서 전압의 회귀계수가 1.14로 CO<sub>2</sub>아크용접에서 전압의 회귀계수 0.53보다 특히 크다. 이런 점으로부터 보호가스를 사용하지 않는 셀프실드아크용접의 경우 아크길이 증가에 따른 수소량의 증가가 CO<sub>2</sub>아크용접보다 커 용접변수 중 전압의 관리가 중요함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

셀프실드아크용접 시 용접금속에서의 확산성수소의 억제를 위하여 용접변수(CTWD, 전류, 전압)가 확산성수소량에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CTWD가 15mm에서 25mm로 증가함에 따라 확산성수소량은 11.3mL/100g에서 5.9mL/100g으로 감소하였다. 이러한 주된 원인은 CTWD의 증가에 따라 와이어 돌출길이에서 저항발열량이 71.1J에서 174.8J로 두 배 이상 증가하기 때문이다.

(2) 전류의 변화는 확산성수소량에 큰 영향을 나타내지 않았으나, 전압은 18V에서 23V로 증가함에 따라 확산성수소량이 7.2mL/100g에서 12.6mL/100g으로 증가하였다. 이러한 전압의 영향은 아크길이 증가함에 따라 외부로부터 수소의 혼입이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 셀프실드아크용접과 CO<sub>2</sub>아크용접에서 각 용접변수들의 영향을 회귀분석한 결과 셀프실드아크용접에서 전압의 회귀계수가 CO<sub>2</sub>아크용접에서 전압의 회귀계수보다 특히 컸다. 따라서 보호가스를 사용하지 않는 셀프실드아크용접의 경우 CO<sub>2</sub>아크용접보다 용접변수 중 전압의 관리가 더욱 중요함을 알 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- Boniszewski, T., 1992. Self-Shielded Arc Welding. Abington Publishing, Cambridge
- Easterling, K., 1992. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford
- Dixon, B., Hakansson, K., 1995. Effects of Welding Parameters on Weld Zone Toughness and Hardness in 690MPa Steel. Welding Journal, 74(4), 122s-132s
- Haeck, R., Phelps, B., Smith, A., 1980. Developing Consumables and Process for Work on Offshore Platforms. Welding & Metal Fabrication, 48(9), 441-449
- Han, D.W., Bang, K.S., Jeong, H.C., Lee, J.B., 2010. Quantitative Analysis on the Effects of Welding Parameters on Diffusible Hydrogen Contents in Weld Metal Produced by FCAW Process. Journal of Korean Welding and Joining Society, 28(2), 54-59
- Harwig, D., Longenecker, D., Cruz, J., 1999. Effects of Welding Parameters and Electrode Atmospheric Exposure on the Diffusible Hydrogen Content of Gas Shielded Flux Cored Arc Welds. Welding Journal, 78(9), 314s-321s
- Keeler, T., 1981a. Innershield Welding. Part 1 Development and Applications. Metal Construction, 13(11), 667-673
- Keeler, T., 1981b. Innershield Welding. Part 2 Properties. Metal Construction, 13(12), 750-753
- Kiefer, J., 1996. Effects of Moisture Contamination and Welding Parameters on Diffusible Hydrogen. Welding Journal, 75(5), 155s-161s
- Pittrun, M., 2004. The Effect of Welding Parameters on Levels of Diffusible Hydrogen in Weld Metal Deposited Using Gas Shielded Rutile Flux Cored Wires, Ph. D. Thesis, The University of Wollongong
- Rodergs, K., Lochhead, J., 1987. Self-Shielded Flux Cored Arc Welding - The Route to Good Fracture Toughness. Welding Journal, 66(7), 49-59
- White, D., Pollard, G., Gee, R., 1992. The Effect of Welding Parameters on Diffusible Hydrogen Levels in Cored Wire Welding, Welding & Metal Fabrication, 60(6), 209-216