

# 플럭스 코어드 와이어별 권취 위치 및 대기노출시간이 용착금속의 확산성 수소량에 미치는 영향

김동윤\* · 황인성\* · 김영민\*<sup>†</sup> · 김동철\* · 강문진\*

\*한국생산기술연구원 부품기능연구부

## Effects of Winding Position and Air Time on Diffusible Hydrogen Content in Weld Metal using Flux Cored Wire

Dong Yoon Kim\*, In Sung Hwang\*, Young-Min Kim\*<sup>†</sup>, Dongcheol Kim\* and Munjin Kang\*

\*Advanced Functional Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : ymkim77@kitech.re.kr

(Received August 27, 2020 ; Revised September 21, 2020 ; Accepted September 28, 2020)

### Abstract

In this study, the diffusible hydrogen contents of each weld using three flux cored wires with different hoop types were measured. The hoop shape of the flux cored wire used in the experiment is one seamless type and two fold types. In general, the flux cored wire is manufactured in a spool type. When the spool type wire is exposed to air, the diffusible hydrogen content may vary depending on each winding position. Therefore, diffusion hydrogen contents according to the winding position of each flux core wire were compared. Second, diffusible hydrogen contents of spool-type flux cored wire were measured according to the change in time exposed to air. The test specimen was prepared in accordance with AWS A4.3 specification, and diffusible hydrogen contents were measured using the gas chromatogram method. The welding conditions were fixed at current 260 A, voltage 28.0 V, welding speed 45 cm/min, shielding gas 100% CO<sub>2</sub>, and gas flow rate 25 ℓ/min. As a result, diffusible hydrogen contents tend to decrease as the wire located inside than the outside. The seamless-type flux-cored wire showed the least change diffusible hydrogen contents in the weld according to winding positions. Diffusible hydrogen contents of the weld using the fold-type flux-cored wire are higher than that of the seamless-type flux-cored wire weld. Diffusible hydrogen contents in the weld was different depending on hoop joint shapes of the fold-type flux-cored wire.

Key Words : Flux cored wire, Diffusible hydrogen, Seamless type, Fold type, Winding position, Air time

## 1. 서 론

플럭스 코어드 와이어는 우수한 작업성과 높은 생산성으로 해양구조물 및 조선 등의 용접에 널리 사용된다. 일반적인 플럭스 코어드 와이어는 내부에 플럭스 분말이 존재하며 외부의 후프(hoop)나 파이프와 같은 외피금속이 둘러싼 구조이다. 와이어 구조 특성상 내부 플럭스는 수분 흡습이 취약하고 솔리드 와이어 대비 용접 후 상대적으로 높은 확산성 수소량을 보인다<sup>1)</sup>. 이

러한 용접부 확산성 수소는 저온균열을 유발하는 요인 중 하나로 확산성 수소 거동과 관련된 연구가 수행되어져 왔다.

용접부 확산성 수소를 저감하기 위하여 용접소재 및 용접와이어의 성분변화에 대한 다양한 연구가 수행되었다. Albert 등은 용접소재의 Cr, Mo의 함유량에 따른 용접부 확산성 수소 거동을 연구하였으며, Cr의 함유량이 증가할수록 확산성 수소가 감소한다는 것을 보고하였다<sup>2)</sup>. Rissone 등은 shielded metal arc welding (SMAW) 공정을 사용하여 전극봉 플럭스의 CaO

함유량에 따른 용접부 확산성 수소량에 대해서 조사하였으며, CaO 함유량이 증가하면 용접부 확산성 수소량이 감소하는 것을 확인하였다<sup>3)</sup>. Matsushita 등은 플렉스 코어드 와이어의 플렉스 성분에 탄화물을 첨가시켜 아크 대기의 수소 분압을 저하시켰고 이에 용접부 확산성 수소가 감소한다고 보고하였다<sup>4)</sup>. 또한 플렉스 성분에 불화물(fluoride)의 첨가를 통한 용접부 확산성 수소량이 감소시킬 수 있다는 선행 연구들이 보고되었다<sup>4-6)</sup>.

그리고 용접공정 조건을 변화시켜 용접부 확산성 수소 변화에 대한 연구도 수행되었다. Han 등은 용접 공정 변수인 contact tip to work distance(CTWD)를 변화시켜 용접부 확산성 수소량을 조사하였는데, CTWD가 증가할수록 와이어의 저항 발열이 증가하여 와이어의 운환제나 수분 등이 증발하였고 용접부 확산성 수소가 감소한다고 보고하였다<sup>7)</sup>. Kim 등은 입열량 변화에 따른 용접부 확산성 수소를 비교하였다. 용접속도는 동일하게 하고 입열량을 변화시켰으며 17 kJ/cm 이상의 고 입열에서 용접부 확산성 수소량이 급격히 증가함을 확인하였다<sup>8)</sup>. Kiefer 등의 보고에 의하면 용접부 확산성 수소 변화에서 용접 전류, 전압은 양의 상관관계, CTWD는 음의 상관관계가 있으며, 용접속도에는 영향이 없었다<sup>9)</sup>.

마지막으로 용접과정에서 환경 변화에 따른 용접부 확산성 수소 거동 연구가 수행되었다. Kim은 flux cored arc welding(FCAW) 공정에서 보호 가스가 아크 및 용융풀을 보호하여 주변 공기가 용융풀에 혼입이 적어 SMAW 공정보다 작은 양의 용접부 확산성 수소를 보이는 것으로 판단하였다<sup>10)</sup>.

이와 같이, 용접부 확산성 수소 저감하기 위하여 용접재료 성분 변경, 용접조건 변경 등 선행연구가 수행되었으며 용접 과정에서의 환경 변화에 따른 용접부 확산성 수소 거동을 확인한 연구들이 수행되었다.

확산성 수소 거동과 관련된 선행 연구들을 살펴보면

용접재료의 보관 상태를 확인하기는 어려웠다. 그리고 현재 플렉스 코어드 와이어를 많이 사용하고 있는 조선 산업 현장에서는 용접재료 재고 및 사후 관리가 철저히 이루어진다. 사용 후 남은 플렉스 코어드 와이어를 항온·항습기에 보관하여 재사용하거나 일정기간 방치된 와이어는 폐기 처분하는 경우도 발생한다. 이러한 원인으로 인해 와이어 보관 상태 및 플렉스 코어드 와이어의 권취 위치에 따른 확산성 수소에 대한 가이드를 제시한 연구들이 부족한 것으로 판단된다.

그래서 본 연구에서는 현장에서 많이 사용되고 있는 플렉스 코어드 와이어 3종에 대하여 동일한 온도 및 습도에서 노출된 와이어의 권취 위치 및 대기 노출 시간에 따른 용접부 확산성 수소 거동에 대해 비교 및 분석하였다.

## 2. 용접재료

### 2.1 플렉스 코어드 와이어

본 연구에서는 Table 1와 같이 3종의 플렉스 코어드 와이어를 사용하여 용접부 확산성 수소량을 비교하였다. Seamless형 플렉스 코어드 와이어의 AWS규격은 A5.29 E81T1-C1A6-K2 H4, Fold\_I, Fold\_II형은 A5.29 E81T1-K2C H5 이었으며, 와이어 직경은 1.2 Φ로 동일하였다. 그리고 와이어의 표면의 경우 Seamless형은 구리 도금이 되어 있었으며, Fold\_I, Fold\_II형은 베이킹 처리가 되어 있었다. 실험에 사용된 플렉스 코어드 와이어의 화학 성분 및 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

플렉스 코어드 와이어는 Fig. 1와 같이 일반 및 진공형태로 와이어를 포장하고 출고된다. 와이어에 수분 방지 및 이물질이 와이어 표면에 묻는 것을 방지하기 위해서이다. Seamless형 플렉스 코어드 와이어는 Fig. 1(a)와 같이 일반포장 상태였으며, Fold\_I, Fold\_II의 플렉스 코어드 와이어는 Fig. 1(b)와 같이 진공포장

**Table 1** The flux cored wired applied in diffusible hydrogen test

Type	AWS Spec.	Wire diameter	Manufacturer	Appearance of surface
Seamless	A5.29 E81T1-C1A6-K2 H4	1.2 Φ	Company A	
Fold_I	A5.29 E81T1-K2C H5	1.2 Φ	Company B	
Fold_II	A5.29 E81T1-K2C H5	1.2 Φ	Company A	

**Table 2** Chemical composition and mechanical properties of flux cored wire

Type	Chemical composition (%)							Mechanical property			
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	EL (%)	Impact Value (-60°C/J)
Seamless	0.04	0.30	1.20	0.010	0.010	-	1.50	545	600	25	65
Fold_I	0.04	0.38	1.32	0.010	0.008	-	1.40	550	620	27	70
Fold_II	0.04	0.35	1.35	0.012	0.011	1.50	-	540	620	28	60



(a) General packing (b) Vacuum packing

**Fig. 1** Packing method of flux cored wire

상태였다.

플럭스 코어드 와이어는 내부에 플럭스가 존재하고 플럭스를 감싸는 외피금속인 후프(hoop)로 이루어져 있다. 실험에 사용된 플럭스 코어드 와이어별 와이어

**Table 3** The cross section of flux cored wire (×50)

Type	Hoop joint	Cross section
Seamless	Seamless	
Fold_I	Lap	
Fold_II	Butt	

단면을 Table 3와 같이 확인하였다. 3종의 플럭스 코어드 와이어의 단면형상의 형태는 모두 튜브형상이었으며 후프(hoop) 이음부 형상에 차이를 보였다. Seamless형 플럭스 코어드 와이어는 후프를 완전히 봉합하여 이음부가 없는 형상이었으며, Fold\_I형 플럭스 코어드 와이어는 후프의 이음부가 겹치기 형상이었다. 마지막으로 Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어는 후프의 이음부가 맞대기 형상이었다<sup>11)</sup>.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 확산성 수소 측정 방법

일반적으로 용접부의 확산성 수소는 AWS A4.3, JIS Z3118, ISO 3690 규격에 의거하여 측정한다. 앞에서 언급한 3가지의 규격은 시편의 전처리 방법, 확산성 수소 포집 온도 및 시간의 조금의 차이는 있으나 거의 유사한 방법으로 확산성 수소를 측정한다. 본 연구에서는 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성 수소량 측정 방법으로 AWS A4.3<sup>12)</sup> 규격을 적용하였고, JIS Z 3118<sup>13)</sup>, ISO 3690<sup>14)</sup> 규격을 참조하였다.

와이어의 용접부 확산성 수소를 측정하기 위해서는 시험편 준비, 용접 시험편 제작, 확산성 수소 측정과 같이 3 단계로 나뉜다.

시험편은 크기 25(W)×40(L)×12(t)mm로 가공된 SM490 강재를 사용하였으며, 625 ± 10°C 온도에서 1시간 동안 열처리를 통해 시험편의 탈수소 처리를 진행하였다. 그 후 시험편을 그라인딩하여 표면 산화물을 제거하였다.

탈수소 처리된 시험편을 구리 재질로 제작된 수냉 지그에 고정하고 Bead-On-Plate(BOP)용접을 실시하여 Fig. 2와 같이 용접 시험편을 제작하였다.

제작된 용접 시험편을 용접종료 후 5초 이내로 얼음물에 장입한 뒤 액체질소에 60초 이상 장입시켜 용접부 수소 방출을 최대한 억제시켰다. 액체질소에 장입한 용접 시험편을 꺼내 측정 시험편(test plate)을 절단하고 표면 스파터와 슬래그를 1분 이내에 제거하였다. 그 후 확산성 수소 측정 시험편을 얼음물에 넣고 표면의 얼음이 다 녹을 때까지 담근 후 아세톤으로 헹구고



Fig. 3 The appearance of measurement equipment

에어를 불어 건조시킨 뒤 포집기에 투입하였다. 포집기는 45°C, 72시간 동안 수소 포집 후 용접부 확산성 수소량을 측정하였다.

용접부 확산성 수소량을 측정하는 방법에는 수은법(Mercury method), 글리세린 치환법(Glycerine replacement method), 가스 크로마토그래프법(Gas chromatography method)이 있다. 본 연구에서는 작업자 안정성 및 수소 측정 정확도가 우수한 가스 크로마토그래프법을 이용하여 확산성 수소량을 측정하였다. 확산성 수소 측정 장비 외관은 Fig. 3에 나타내었다.

### 3.2 실험 조건

본 연구에서는 플렉스 코어드 와이어가 대기에 노출된 상태 및 시간에 따라 용접부 확산성 수소 거동에 대하여 평가하였다. 첫 번째로 플렉스 코어드 와이어가 대기에 노출된 상태에 따른 확산성 거동을 평가하기 위하여 와이어 포장을 개봉하여 항온·항습한 공간에 3일 동안 보관 후, 이 와이어를 이용하여 용접을 수행하였다. 그 후 확산성 수소 측정 규격에 의거하여 와이어의 권취 위치에 따른 용접부 확산성 수소를 정량적으로 평가하였다. 두 번째로는 플렉스 코어드 와이어의 대기 노출 시간에 따른 용접부 확산성 수소 거동을 평가하기 위하여 와이어를 개봉하여 항온·항습 공간에 3, 30일 동안 보관 후 용접부 확산성 수소량 변화를 비교하였다. 용접 방법 및 용접 조건들은 Table 4와 같이 고정하여 용접 중 외부 영향에 대한 확산성 수소 오차를 최소화하였다.

용접 조건은 Kuebler 등에 의해 보고된 문헌에 따르

Table 4 Welding conditions used in this study

	Conditions
Welding process	FCAW
Welding current (Wire feed rate)	260 A (11.0 m/min)
Welding voltage	28.0 V
Welding speed	45 cm/min
Shielding gas	100% CO <sub>2</sub> (25 ℓ /min)
CTWD	20 mm

는 용접 입열량에 따라 용착 금속의 크기가 변화하며 용착 금속의 크기 변화가 용접부 확산성 수소량 변화에 영향을 미친다고 하였으며, 용접 입열량 0.95 kJ/mm에서 용접부 확산성 수소량이 가장 많이 발생한다고 보고하였다<sup>15)</sup>. 본 연구에서도 이와 유사한 0.97 kJ/mm 수준의 용접 입열을 가지는 용접 조건으로 고정하여 용접 시험편을 제작하였다.

#### 3.2.1 플렉스 코어드 와이어의 권취 위치에 따른 확산성 수소량 평가 방법

일반적으로 플렉스 코어드 와이어는 흡습 등과 같은 이유로 페일팩 형태(100, 200, 300 kg)가 아닌 스펀 형태(12 kg)로 제작되어 출고된다. 그래서 와이어는 원형 타입의 플라스틱에 감겨져 있는 형태이다. 이러한 플렉스 코어드 와이어의 권취 위치별 확산성 수소량 거동을 평가하기 위하여 Fig. 4와 같은 위치에서의 와이어를 이용하여 용접 시험편을 제작하였다. No.1, No.2, No.3는 와이어 스펀의 표면인 첫 번째 층에 위치한 와이어를 사용하였고, No.4, No.5, No.6은 두 번째 층에 위치한 와이어를 사용하였다. No.7, No.8, No.9는 세 번째 층, No.10은 네 번째 층, No.11은 다섯 번째 층, No.12는 여섯 번째 층에 위치한 와이어를 사용하였다. 이와 같이 와이어의 권취 위치를 변화시켜 총 12개의 용접 시험편을 제작하였다.

#### 3.2.2 플렉스 코어드 와이어의 대기노출 시간에 따른 확산성 수소량 평가 방법

온도(20.0 - 25.0°C), 습도(25 - 30 %)를 일정하게

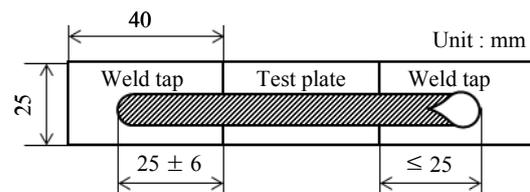


Fig. 2 The schematic diagram of welding specimen for measuring diffusible hydrogen

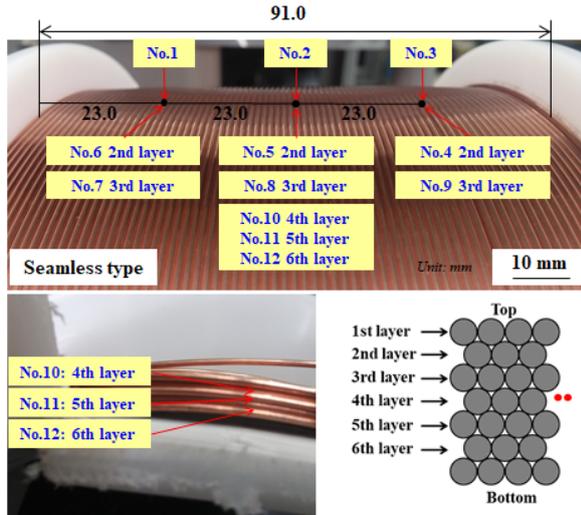


Fig. 4 Position on diffusible hydrogen measurement of flux cored wire

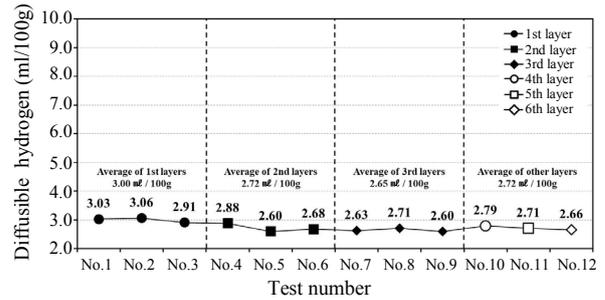
유지한 공간에서 플럭스 코어드 와이어를 30일 동안 보관 후 와이어의 권취 위치에 따른 확산성 수소량을 측정하였다. 그리고 대기 노출 시간 3일과 30일에 대한 확산성 수소량을 비교하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

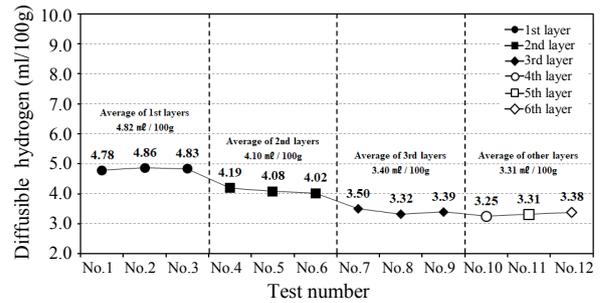
##### 4.1 플럭스 코어드 와이어의 권취 위치에 따른 확산성 수소량

3층에 대한 플럭스 코어드 와이어의 권취 위치에 따른 용접부 확산성 수소량을 측정하였다. 앞 서 언급한 것과 같이 와이어의 포장 개봉 후 온도(20.0 - 25.0°C), 습도(25 - 30 %)의 항온·항습한 공간에서 3일 보관 후 확산성 수소를 측정하였다.

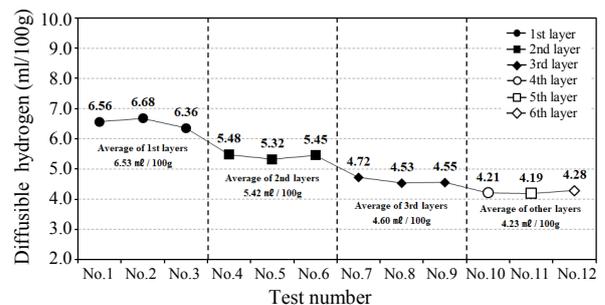
Fig. 5는 플럭스 코어드 와이어별 권취 위치에 따른 용접부 확산성 수소량을 측정한 결과이다. 3종의 플럭스 코어드 와이어 모두 아래쪽에 위치할수록 용접부 확산성 수소량이 감소하였다. Seamless형의 플럭스 코어드 와이어는 최외각 층에서 평균 3.00 ml/100g의 확산성 수소를 보였으며, 두 번째 층에서 평균 2.72 ml/100g, 세 번째 층에서 평균 2.65 ml/100g, 그 외의 층에서 평균 2.72 ml/100g의 용접부 확산성 수소량을 보였다. 두 번째 층부터 용접부 확산성 수소량은 2.65 - 2.72 ml/100g으로 거의 일정한 수준이었다. Fold\_I형 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성 수소량은 최외각 층에서 평균 4.82 ml/100g, 두 번째 층에서 평균 4.10 ml/100g, 세 번째 층에서 3.40 ml/100g, 그 외 층에서는 평균 3.31 ml/100g으로 측정되었다. 세 번째 층에서부터 3.30 - 3.40 ml/100g 수



(a) Seamless type



(b) Fold\_I type



(c) Fold\_II type

Fig. 5 Diffusible hydrogen content at coil positions of weld metal deposited using of flux cored wire

준으로 거의 일정한 확산성 수소량을 보였다. Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어는 최외각 층에서 평균 6.53 ml/100g, 두 번째 층에서 평균 5.42 ml/100g, 세 번째 층에서 4.60 ml/100g, 그 외 층에서 평균 4.23 ml/100g의 확산성 수소량이 측정되었다. 3종의 플럭스 코어드 와이어 중 Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어에서 가장 많은 양의 확산성 수소가 검출되었다.

측정결과에서 보듯이 스펀 형태인 플럭스 코어드 와이어의 권취 위치가 아래쪽에 위치할수록 용접부 확산성 수소는 감소하는 경향을 보이며 수렴하였다. 용접부 확산성 수소량이 수렴해지는 부분은 제조 중 플럭스에 흡습된 수분과 용접 중 외부에서 유입되어 발생하는 플럭스 코어드 와이어의 최소 수준의 확산성 수소량으로 판단된다.

그리고 최외각 와이어에서 용접부 확산성 수소량은 가장 높게 나타났다. 이는 3일 동안 대기에 노출되면서

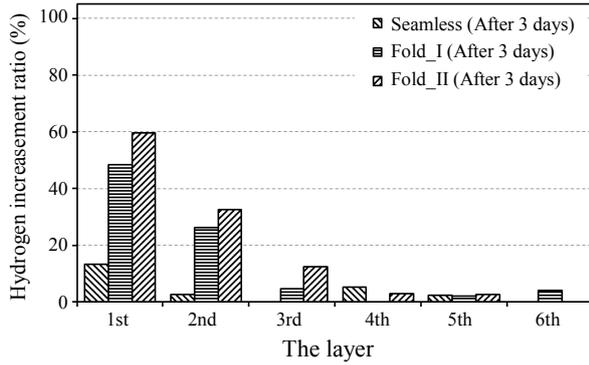


Fig. 6 The diffusible hydrogen content increasement ratio of flux cored wire(3 days)

와이어 표면에 활착된 수분과 플럭스에 흡수된 수분으로 판단된다.

Fig. 6에서 플럭스 코어드 와이어별 권취 위치에 따른 용접부 확산성 수소의 변동률을 비교하여 나타내었다. Seamless형 플럭스 코어드 와이어의 확산성 수소량 중 가장 낮은 확산성 수소량은 2.60 ml/100g에서 최외각 층은 15.3 %로 증가하였으며, 두 번째 층에서 4.6 %로 증가하였다. Fold\_I형 플럭스 코어드 와이어의 최소 확산성 수소량 3.25 ml/100g 대비 최외각 층에서 48.3 %, 두 번째 층에서 26.1 %의 증가를 보였다. Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어는 최소 확산성 수소량 4.09 ml/100g를 기준으로 최외각 층에서 59.7 %, 두 번째 층에서 32.5 %, 세 번째 층에서 12.5 % 수준의 확산성 수소 증가율을 보였다.

Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어의 확산성 수소량 증가율이 가장 높았으며, Seamless형 플럭스 코어드 와이어의 확산성 수소 증가율이 가장 낮음을 확인하였다. Seamless형 플럭스 코어드 와이어는 후프의 이음매가 봉합되어 플럭스에 수분이 흡수되지 않고 와이어 표면의 수분만이 용접부 확산성 수소에 영향을 주는 것으로 판단되며, Fold형 플럭스 코어드 와이어는 플럭스 및 와이어 표면에 수분이 흡수되어 용접부 확산성 수소에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그리고 Fold형 플럭스 코어드 와이어의 경우, 후프 이음부 형상에 따라 플럭스에 흡수되는 수분의 양이 다르다는 것을 정량적으로 판단할 수 있다.

#### 4.2 플럭스 코어드 와이어별 대기 노출 시간에 따른 확산성 수소량

항온-항습한 공간에서 30일 동안 보관한 플럭스 코어드 와이어를 이용하여 용접부 확산성 수소량을 측정 한 후 3일 보관한 플럭스 코어드 와이어의 확산성 수

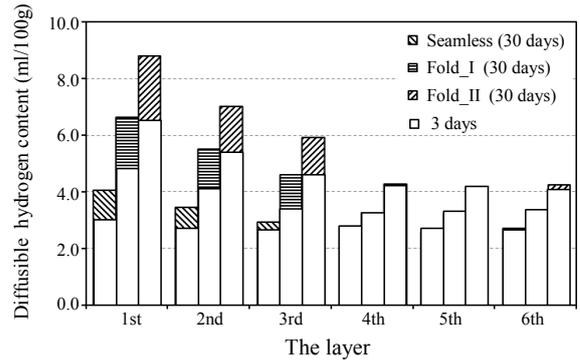


Fig. 7 Diffusible hydrogen content according to air time of flux cored wires

소량을 Fig. 7와 같이 비교하였다. 3종의 플럭스 코어드 와이어 모두 대기 노출 시간이 증가하면 용접부 확산성 수소량은 증가하는 경향을 보였다. 플럭스 코어드 와이어의 권취 위치 중 네 번째 층부터 일정 수준으로 확산성 수소량이 수렴하였다.

최외각 층에서 Seamless형 플럭스 코어드 와이어는 30일 후 확산성 수소량이 4.05 ml/100g이었으며 3일 후 3.00 ml/100g보다 1.05 ml/100g의 확산성 수소량이 증가하였다. Fold\_I형 플럭스 코어드 와이어는 30일 후 6.62 ml/100g이었고, 3일 후 4.82 ml/100g보다 확산성 수소량이 1.80 ml/100g 증가하였다. Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어는 30일 후 8.80 ml/100g의 확산성 수소량을 보였고, 3일 후 6.53ml/100g 보다 2.27 ml/100g의 확산성 수소량이 증가하였다.

두 번째 층에서 Seamless형 플럭스 코어드 와이어는 3일 후 2.72 ml/100g에서 30일 후 3.46 ml/100g으로 0.74 ml/100g의 확산성 수소량이 증가하였으며, Fold\_I형 플럭스 코어드 와이어는 3일 후 4.10 ml/100g에서 30일 후 5.50 ml/100g으로 1.40 ml/100g의 확산성 수소량이 증가하였다. Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어는 30일 후 7.00 ml/100g으로 3일 후 보다 1.59 ml/100g의 확산성 수소량이 증가하였다.

세 번째 층에서 Seamless형 플럭스 코어드 와이어는 30일 후 2.93 ml/100g으로 3일 후 보다 0.28 ml/100g 증가하였으며, Fold\_I형 플럭스 코어드 와이어는 30일 후 4.60 ml/100g으로 3일 후 보다 1.20 ml/100g이 증가하였다. Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어는 30일 후 5.91 ml/100g으로 3일 후 보다 1.31 ml/100g의 확산성 수소량이 증가하였다. 그 외 아래 층에서는 3일 및 30일 경과에도 유사한 수준의 확산성 수소량을 보였다.

최외각 층에서의 대기 노출 시간에 따른 확산성 수소

의 증가량이 가장 컸으며, 아래쪽에 위치한 와이어일수록 확산성 수소 증가량은 감소하였다. 이와 같은 이유는 스펀 형태로 권취된 플럭스 코어드 와이어는 대기와 가깝게 위치한 와이어가 아래층에 위치한 와이어를 감싸주어 대기에서 유입되는 수분을 플럭스 내부 및 와이어 표면 활착되는 것을 막아주는 것으로 판단된다.

또한, 3종의 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성 수소량 증가량을 확인한 경우 Seamless형 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성 수소량 증가량이 가장 낮았으며, Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성 수소량 증가가 가장 높았다.

일반적으로 용접소재의 표면 산화, 와이어 표면에 활착된 수분, 플럭스에 흡수된 수분, 용접 중 외부에서 유입되는 수분 등에 의해 용접부 확산성 수소량이 결정된다. 본 연구에서 용접소재는 확산성 수소 실험 전 표면에 그라인딩 처리 및 열처리를 통하여 용접소재에 대한 수분을 최소한으로 유지하였으며 용접 시에는 용접 조건 및 보호가스 성분, 유량을 일정하게 하여 용접에 발생하는 용접부 확산성 수소량은 유사할 것으로 판단된다. 그래서 용접소재의 표면 산화 및 용접 중 외부에서 유입되는 발생하는 확산성 수소량은 거의 유사하다고 가정하였을 때, 표면에 활착된 수분 및 플럭스에 흡수된 수분이 용접부의 확산성 수소량에 미치는 영향에 대하여 확인할 필요가 있다. 그래서 플럭스 코어드 와이어별 표면에 활착된 수분이 용접부 확산성 수소량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 솔리드 와이어를 사용하여 용접부 확산성 수소량을 비교하였다. 솔리드 와이어는 용접 와이어 내부에 플럭스가 삽입되어 있지 않고 완전히 강재로 채워진 용접 와이어이다. 이러한 솔리드 와이어를 사용하면 용접와이어 표면에 활착된 수분의 영향이 용접부 확산성 수소량 변화에 미치는 영향을 비교 평가 할 수 있을 것으로 판단하였다. 용접부 확산성 수소 측정에 사용한 솔리드 와이어는 플럭스 코어드 와이어와 동일한 직경인 1.2 Φ를 사용하였으며, AWS A5.18 ER70S-6 이었다. 그리고 제조일로부터 약 10 개월이 지난 용접 와이어를 사용하였다. 플럭스 코어드 와이어의 확산성 수소 실험과 동일하게 수행하였다.

Fig. 8은 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어의 용접부 확산성 수소량을 비교한 것이다. 개봉 및 제조일로부터 시간의 차이는 있지만 솔리드 와이어의 용접부 확산성 수소량이 가장 적음을 확인할 수 있었다. 최외각 층에서 3.40 ml/100g으로 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성 수소량보다 낮은 수준인 것을 확인할 수 있었다. 그리고 솔리드 와이어의 권취 위치가 아래쪽에 위치할수록 용접부 확산성 수소량은 감소하는 경향을 보였으며, 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성

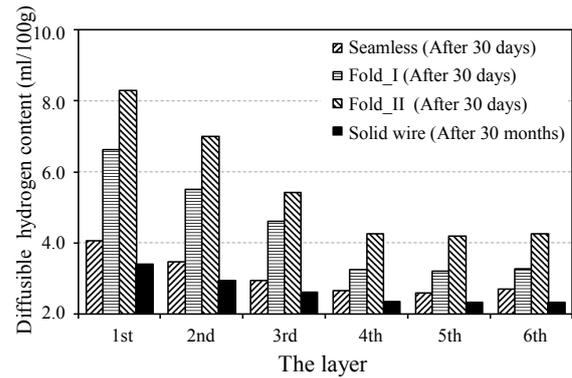


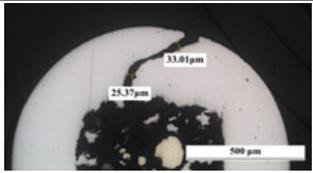
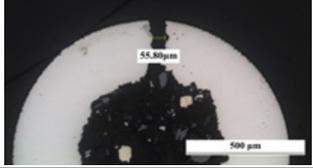
Fig. 8 The diffusible hydrogen content comparison of flux cored wire and solid wire

수소보다 낮은 수준임을 확인할 수 있었다. 이와 같이 솔리드 와이어의 용접부 확산성 수소량은 와이어 표면에 활착된 수분 및 용접 중에 발생된 확산성 수소라고 유추할 수 있다. 플럭스 코어드 와이어와 직경이 1.2 Φ로 동일하여 와이어 표면에 활착된 수분은 거의 유사하다고 가정하였을 때, 플럭스 코어드 와이어별 용접부 확산성 수소량의 차이는 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 플럭스 코어드 와이어 내부 플럭스에 흡수된 수분으로 유추되며 플럭스 코어드 와이어의 후프 이음부 형상에 따라 플럭스에 흡수된 수분 정도가 달라져 용접부 확산성 수소량에 차이를 보인 것으로 판단된다.

### 4.3 플럭스 코어드 와이어별 단면비교

4.2의 결과를 요약하면 Seamless형 플럭스 코어드 와이어의 확산성 수소가 가장 적게 발생하였으며, Fold\_I형, Fold\_II형 순으로 용접부 확산성 수소량은 증가하였다. 그 중 Fold\_I형과 Fold\_II형 플럭스 코어드 와이어의 용접부 확산성 수소 차이를 보였는데 이는 플럭스에 흡수량이 달랐기 때문인 것으로 판단된다. 플럭스 코어드 와이어의 후프 이음부는 대기로부터 내부의 플럭스에 수소가 흡수되는 유일한 경로이다. 그래서 Fold형 플럭스 코어드 와이어의 후프 이음부 형상 차이를 Table 5와 같이 단면 분석을 수행하여 비교하였다. Fold\_I형은 후프 이음부가 겹치기 형상으로 되어 있었으며, 25.3 ~ 33.0 μm 수준의 이음부의 틈새가 존재하였다. Fold\_II형은 후프 이음부가 맞대기 형상이었으며, 55.8 μm 수준의 이음부 틈새가 존재하였다. 또한 외부로부터 내부 플럭스가 위치한 이음부 길이는 Fold\_I형은 430 μm 이었으며, Fold\_II형은 250 μm이었다. Fold\_I형이 Fold\_II형보다 이음부의 틈새도 좁으며 외부로부터 플럭스까지의 이음부 길이도 길어 내부 플럭스에 흡수되는 수분이 적을 것으로 판단된다. 이와 같

**Table 5** The cross section of fold type flux cored wire (×100)

Type	Hoop joint	Cross section
Fold_I	Lap	
Fold_II	Butt	

이 후프 이음부 형상이 용접부 확산성 수소량 변화에 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 후프 이음부 형상이 다른 3 종의 플렉스 코어드 와이어를 이용하여 권취 위치 및 대기 노출 시간에 따른 용접부 확산성 수소량을 비교하였다.

1) Seamless형 플렉스 코어드 와이어는 Fold형 플렉스 코어드 와이어보다 낮은 수준의 용접부 확산성 수소량이 측정되었다. Fold형 플렉스 코어드의 경우, 후프 이음부가 겹치기 형상인 Fold\_I형의 와이어가 맞대기 이음부 형상을 가지는 Fold\_II형의 와이어어보다 용접부 확산성 수소량이 적었다.

2) 플렉스 코어드 와이어의 권취 위치가 아래쪽에 위치할수록 용접부 확산성 수소량은 감소하였고, 일정 수준 이하 층에서는 수렴하는 경향을 보였다.

3) 3종의 플렉스 코어드 와이어를 향온·향습한 공간에서 30일 동안 보관 후 용접부 확산성 수소량을 측정하였다. 향온 향습한 공간에서 3일 보관한 플렉스 코어드 와이어보다 많은 양의 용접부 확산성 수소량이 검출되었다. 그리고 와이어 권취 위치가 아래쪽에 위치할수록 용접부 확산성 수소량은 감소하였으며 일정 수준 이하의 위치에서는 용접부 확산성 수소가 수렴되었다. Fold형 플렉스 코어드 와이어 보다 Seamless형 플렉스 코어드

Type	Diffusible hydrogen content (ml/100g, 3 days)					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Seamless	3.00	2.72	2.65	2.79	2.71	2.66
Fold_I	4.82	4.10	3.40	3.25	3.31	3.38
Fold_II	6.53	5.42	4.60	4.21	4.19	4.28

Type	Diffusible hydrogen content (ml/100g, 30 days)					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Seamless	4.05	3.46	2.93	2.66	2.60	2.70
Fold_I	6.62	5.50	4.60	3.25	3.20	3.28
Fold_II	8.30	7.00	5.41	4.26	4.20	4.25

와이어의 낮은 수준의 확산성 수소량을 보였다.

4) 현재 조선업에서는 완전히 소모되지 않은 플렉스 코어드 와이어일지라도 대기에 노출된 시간이 오래되었다고 판단되면 폐기처분하는 실정이다. 이는 용접재료의 낭비로 이어지며 가격 경쟁력을 하락시키는 원인이 된다. 본 논문을 통하여 A5.29 E81T1-C1A6-K2 H4, A5.29 E81T1-K2C H5, A5.29 E81T1-K2C H5 (1.2 Φ) 플렉스 코어드 와이어가 대기 노출 시간이 30일 이내이면 대기에 노출된 와이어를 제거하고 권취 위치 아래에 위치한 와이어를 사용하여 작업에 요구되는 수준 이하의 용접부 확산성 수소량을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 중소기업벤처부 월드클래스 300 프로젝트기술개발지원사업 “디지털 캣펫 실현을 위한 초경량 카울크로스 변형제어 스마트 제조기술 개발” 과제 지원으로 수행되었습니다.

ORCID: Dong Yoon Kim: <https://orcid.org/0000-0002-9147-9971>  
 ORCID: In Sung Hwang: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8670>  
 ORCID: Young-Min Kim: <https://orcid.org/0000-0003-2531-5386>  
 ORCID: Dongcheol Kim: <https://orcid.org/0000-0001-6667-2094>  
 ORCID: Munjin Kang: <https://orcid.org/0000-0003-0598-0848>

### References

1. T. H. Kim and C. G. Park, Development of Welding Consumables for GMAW and FCAW, *J. Weld. Join.* 35(6) (2017) 96-100. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.14>
2. S. Kalbert, V. Ramasubbu, N. Parvathavarthini and T. P. S. Gill, Influence of alloying on hydrogen-assisted cracking and diffusible hydrogen content in Cr-Mo steel welds, *Sādhanā*, 28(3-4) (2003) 383-393. <https://doi.org/10.1007/BF02706439>
3. N. D. Rissone, I. Bolt, J. Jorge, P. Corvalan, E. Surian, ANSI/AWS A5.1-91 E6013 rutile electrodes: The effect of wollastonite, *Weld. J.* 76(11) (1997) 498-s - 507-s.
4. M. Matsushita and S. Liu, Hydrogen control in steel weld metal by means of fluoride additions in welding flux, *Weld. J.* 79(10) (2000), 295-s - 303-s.

5. I. K. Pokhodnya, A. P. Paltsevich, V. V. Golovko and A. S. Koteltchouk, Technology and metallurgy methods for decreasing diffusible hydrogen content, *Weld. World.* 43(4) (1999) 81-90.
6. J. Tsuboi, S. Nakano and K. Sato, The behavior of hydrogen in arc welding (Report1), *J. Japan Weld. Soc.* 42(3) (1973) 189-201.  
<https://doi.org/10.2207/qjjws1943.42.189>
7. D. W. Han, K. S. Bang, H. C. Jeong and J. B. Lee, Quantitative analysis on the effects of welding parameters on diffusible hydrogen contents in weld metal produced by FCAW process, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 28(2) (2010) 174-179.  
<http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2010.28.2.054>
8. J. H. Kim, J. S. Seo, H. J. Kim and H. S. Ryoo, Effect of welding heat input on diffusible hydrogen content, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 25(3) (2007) 3-5.  
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2007.25.3.003>
9. J. H. Kiefer, Effect of moisture contamination and welding parameters on diffusible hydrogen, *Weld. J.* 76(5) (1996) 155-s - 161-s.
10. H. J. Kim, Effect of air condition on diffusible hydrogen content, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 23(2) (2005) 112-115.
11. W. David, Tubular wire welding, Woodhead publishing limited, (1994) 35-37.
12. AWS A4.3-93, Standard methods for determination of the diffusible hydrogen-content of martensitic, bainitic, and ferritic steel weld metal produced by arc welding, *American Welding Society (AWS)*, (1992).
13. JIS Z 3118, Method of measurement for hydrogen evolved from steel welds, *Japanese Industrial Standard first Ed.* (1992).
14. ISO 3690, Welding and allied process determination of hydrogen content in ferritic steel arc weld metal, *International Standard second Ed.* (2000).
15. R. Kuebler, M. Pitrun and I. Pitrun, The effect of welding parameters and hydrogen levels on the weldability of high strength Q & T steel welded with FCAW consumables, *Australasian Weld. J.* 45(1) (2000), 38-47.