

# FCA용착금속에서 발생하는 저온균열의 특성

서준석 · 김재학 · 김희진 · 유희수

## Characteristics of Cold Cracks in FCA Weld Metal

Jun Seok Seo, Jae Hak Kim, Hee Jin Kim and Hoi Soo Ryoo

### 1. 서 론

고장력강의 용접부에서 발생하는 저온균열은 발생 위치에 따라 용접영향부(HAZ)균열과 용착금속부(weld metal)균열로 분류된다. HAZ균열은 발생위치에 따라 보다 세분화되어 토우균열, 언더비드균열 등으로 분류되며, 용착금속균열은 균열형상에 따라 셰브론(Chevron)균열 및 수직균열로 분류된다<sup>1)</sup>. 셰브론균열은 염기성플럭스를 사용한 SAW 용착금속에서 최초로 발견되었으며, 발견된 균열형상이 < 와 같은 형상을 하고 있기 때문에 붙여진 이름이다<sup>2)</sup>. 이후에도 셰브론균열에 대해서는 많은 연구자들이 보고하였는데, 주로 SAW 용착금속을 대상으로 하였다<sup>3-5)</sup>. 그러나 최근에는 FCA용착금속에서 발생하는 저온균열도 이러한 형상을 가지고 있음이 확인되었다<sup>6)</sup>.

본 기술보고에서는 E71T-1급의 FCA용접재료를 사용하여 '다층구속균열시험'을 수행하는 과정에서 셰브론균열과는 다른 형상의 저온균열이 용착금속 내에 존재함을 확인하였기에 이에 대해 보고하고자 한다.

### 2. 용접재료 및 시험편

본 기술보고에서 보고하는 용착금속 시험편은 Fig. 1의 그루브형상에 국내에서 시판되고 있는 E71T-1급의

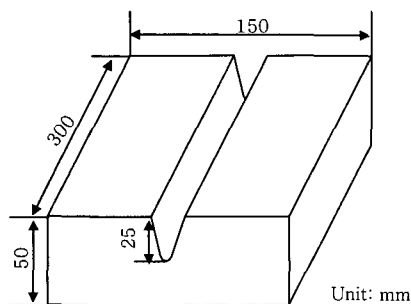


Fig. 1 Geometry of multipass restraint weld cracking test specimen

Table 1 Chemistry and diffusible hydrogen of FCA weld deposits

Chemical Composition (wt. %)						HD (ml/100g)
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	
0.045	0.55	1.17	0.03	0.03	0.01	4.93

FCAW 용접재료를 사용하여 용접한 시험편이다. 모재는 50mm 두께의 선급용 EH36강재이며, 용착금속의 화학조성과 확산성수소량(HD) 측정 결과는 table 1과 같다.

Fig. 1의 시험편을 H형 지그에 완전히 구속시킨 상태에서, 20kJ/cm의 입열(heat input)조건으로 다층용접을 실시하였다. 층간온도는 40°C 이하로 설정하였다. 용접이 완료된 시험편은 구속된 상태로 대기 중에 72시간 이상 방치한 다음, 지그로부터 시험편을 탈착하여 이면부에서 초음파탐상(ultrasonic test)을 실시하였다. 초음파탐상에서 결함이 발견된 부위를 10mm 정도의 두께로 절단하고, 절단된 시험편은 SAM(scanning acoustic microscope)장비로 스캔 탐상을 실시하여 결함 위치를 재확인하였다<sup>7)</sup>. 결함 위치가 확인된 시험편에 대해서는 결함부위만을 재차 절단하여 제반 시험을 수행하였다.

### 3. 저온균열의 특성

다층구속균열시험이 완료된 시험편에 대해 초음파 검사(UT)를 의뢰하였는데, 모두 8군데에서 결함이 존재하고 있다고 보고되었다. 확인된 UT결함의 실체를 확인하기 위하여 결함이 위치한 부위를 절단하여 SAM으로 분석하였다. Fig. 2은 SAM에 의해 분석한 결과들 중의 하나를 보여 주는 것이다. 이 그림은 마크로 조직 사진과 SAM에 의해 나타난 2차원적인 균열 형상을 보여 주고 있는데, 본 시험에는 3개의 미세균열이 존재하

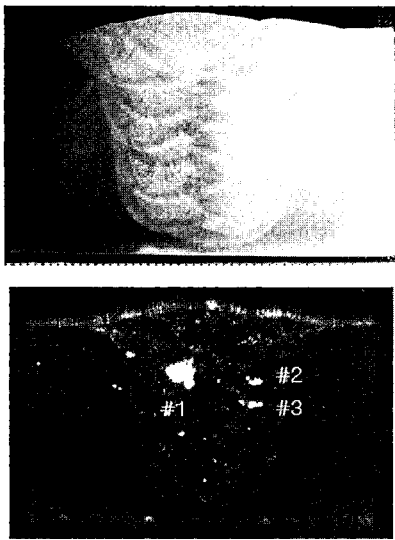


Fig. 2 Macrograph of cross-section specimen and its SAM image showing three cracks in different location

고 있음을 알 수 있다. 편의상 각각의 균열을 #1, #2, #3로 명명하고 각각에 대해 균열특성을 조사하였다.

먼저 크기 및 형상에 있어서 나타나는 차이를 보면, #1균열은 직경이 약 4mm 정도인 2차원 형상을 가지고 있는데 반하여, #2 및 #3균열은 선형에 가까우며 상대적으로 크기가 매우 작은 균열이다. 마크로조직에 대응하여 이들의 위치를 확인하여 보면, #1균열은 최종층(final layer) 바로 밑에 있는 비드의 중앙부에 위치하고 있는데 반하여, #2 및 #3균열은 비드 하단부에 위치하고 있다. 이러한 균열들의 미세조직적 특성을 확인하기 위하여 Fig. 2의 시편을 세로 방향으로 절단하였다. 첫 번째 절단면은 #1 균열의 중앙부를 관통하도록 하였으며, 두 번째 절단면은 #2 및 #3균열의 중앙부를 관통하도록 하였다. 그리고 절단면에 나타난 균열의 형상을 규명하고 미세조직적 특성을 분석하였다.

Fig. 3은 #1균열의 중앙부를 세로방향으로 절단한 절단면에서 관찰한 결과이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 #1균열은 용접 진행 방향에 대해 45° 정도의 각도를 가지고 있는데, 이는 세브론균열(chevron crack)의 전형적인 형태이다<sup>1)</sup>. 세브론균열은 입계페라이트에서 미세균열들이 생성되고 이들이 연결됨으로써 형성되는 균열이다. 따라서 #1균열은 입계페라이트가 잘 발달되어 있는 주상정조직 부위에 한정되어 있으며, 균열 선단이 재결정부위(결정립 미세화 부위)에 이르면 균열 전파가 정지된 모습을 보여 주고 있다. Fig. 4는 본 균열의 파면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과인데, 전형적인 수소취화(hydrogen embrittlement) 파단면의 양상을 보여 주고 있다.

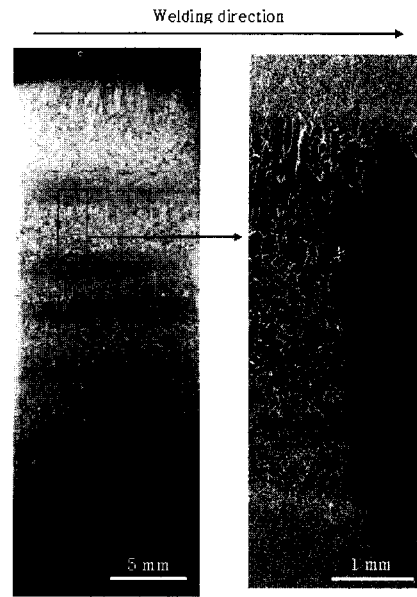


Fig. 3 Macro- and micrographs taken in the region of crack #1

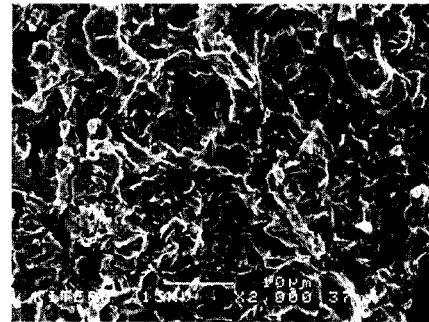


Fig. 4 SEM fractograph of crack #1

한편 Fig. 5는 #2 및 #3 균열의 중앙부를 세로 방향으로 절단한 절단면에서 이들 균열을 관찰한 결과이다. 이들은 용접선 방향과 특정한 각도를 가지고 있지는 않지만, 이들은 비드 하단부의 용융선(fusion line)을 따라 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 특징은 Fig. 5(b)의 #3균열 형상에서 확실히 보여 주고 있다. 그리고 이들 균열의 또 다른 특징은 이들이 미세조직 상에서 밝게 보이는 띠모양의 조직 내부를 따라 전파되고 있다는 것이다. 광학현미경 상에서 국부적으로 밝게 나타나는 것은 에칭 정도에 있어서 차이가 있기 때문인데, 이러한 차이는 이들 부위의 화학조성이 주위와 상이할 경우에 나타날 수 있는 현상이다. 이러한 가정의 타당성을 확인하기 위하여 동일 시편을 과에칭하여 SEM으로 관찰 및 균열 주위의 화학조성을 EDX로 분석하였다.

Fig. 6은 과에칭한 시편에서 #3 균열부위의 미세조직을 고배율 SEM으로 관찰한 사진이다. 이 그림에서

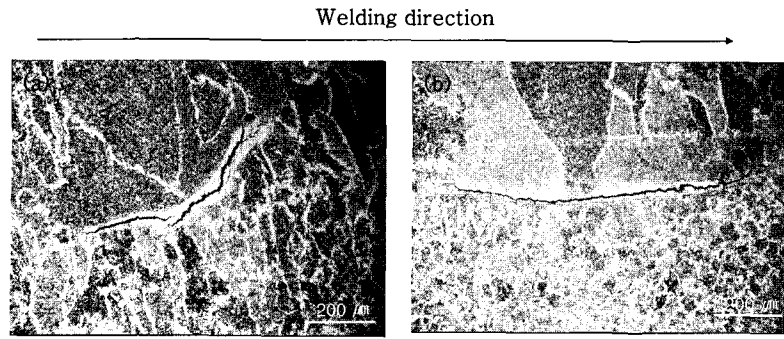


Fig. 5 Micrographs taken in the region of (a) crack #2 and (b) crack #3

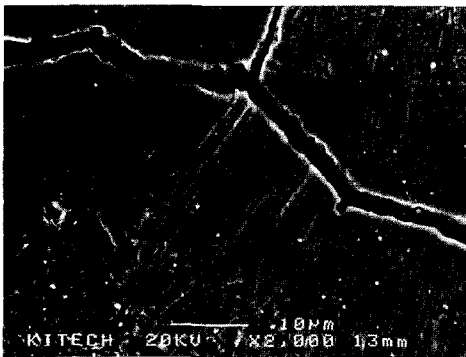


Fig. 6 SEM micrograph taken in high magnification

알 수 있듯이 균열부 주위에는 마르텐사이트 조직이 형성되어 있으며, 균열은 구오스테나이트 입계를 따라 전파하였다. Fig. 7은 균열 부위를 EDX분석한 결과인데, 균열부위에 Si와 Mn이 집중적으로 편석되어 있음을 보여 준다. EDX 정량분석을 실시한 결과를 보면 Si은 최대 3.6%, Mn은 5.8%, 그리고 Ti는 0.42%를 기록하였다. 그리고 미세경도는 기지조직이 220Hv 정도인데 반하여 균열 인접 부위에서 350Hv 이상을 보여 주었으며 최대치는 448Hv를 기록하였다.

#### 4. 편석에 의한 저온균열 발생원인 추정

상기한 결과에서 보여 주었듯이, 본 보고에서 사용한 FCA용착금속부에는 두 가지 유형의 저온균열이 존재하고 있다. 하나는 전형적인 세브론균열이며 다른 하나는 합금원소의 편석을 동반한 균열이다. 앞에서 언급한 바와 같이 세브론균열에 대해서는 이미 여러 연구자들이 보고한 바 있을 뿐만 아니라 생성기구에 대해서도 어느 정도 명확히 밝혀진 상태이다. 그러나 편석균열에 대해 언급한 논문은 단 한 편밖에 찾아 볼 수 없었다. 이 논문은 TWI에서 보고한 것인데, 이 논문의 목적은 SAW 및 FCAW 용착금속 저온균열에 미치는 제반 인자(입열, 모재의 두께 등)의 영향을 규명코자한 것이었다<sup>8)</sup>.

이를 규명하는 과정에서 SAW용착금속에서는 세브론균열만이 발견되었으나, FCA용착금속에서는 국부적인 편석에 의해 발생한 저온균열도 존재함을 확인하였던 것이다. 그리고 편석에 의해 발생한 균열의 형상이 Fig. 5에서 보여 준 것과 동일한 것이었다. 그러므로 편석균열은 FCA용착금속에서만 나타날 수 있는 특이한 저온균열이라고 할 수 있으며, 이러한 균열이 발생하는 원인은 FCA 용접재료만이 가지고 있는 재료적 특성에 기인하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 편석균

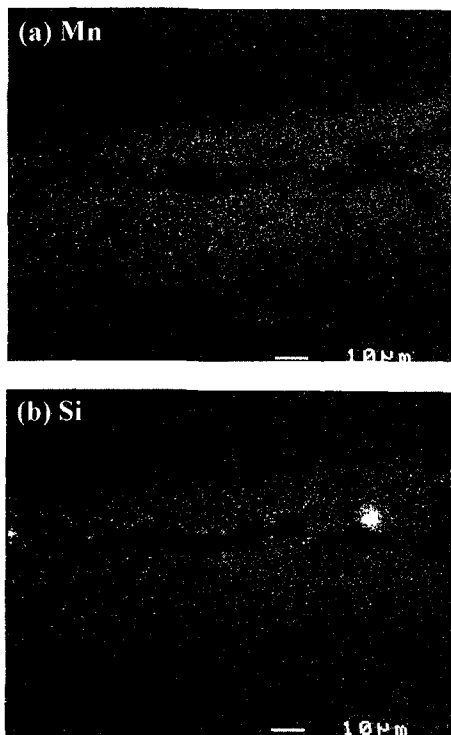


Fig. 7 Result of EDX mapping performed in the surrounding region of crack #3. Note the localized segregation of Mn and Si around the crack

열의 생성기구는 FCAW 용접재료 만이 가지는 특성에 근거하여 제안되어야 할 것이다.

FCA 용접재료를 제조함에 있어 용착금속에 필요한 합금원소는 분말상태로 플럭스에 첨가하게 되는데, 용융풀로 이행된 합금분말은 완전히 용융되고 충분히 희석되어 화학조성이 균일하게 되는 것이 일반적이다. 그런데 어떠한 이유로 인해 용융된 합금분말이 온전히 희석되지 못한 상황에서 바로 응고하게 되면 합금원소가 국부적으로 편석된 결과로 나타날 수 있는 것이다. 그러한 상황을 두 가지로 예상할 수 있는데, 다음은 각각의 경우를 기술한 것이다.

첫 번째는 용융풀의 유동이 활발하지 못하여 합금원소가 충분히 섞이지 못한 경우이다. 이러한 상황은 용융선(fusion line) 직상의 용융금속에서 나타날 수 있다. 용융선에 인접한 용융금속은 온도가 상대적으로 낮아 점성이 높을 뿐만 아니라, 하부에 존재하는 고상기지의 저항으로 유동속도가 가장 낮을 수밖에 없는 위치이다. 이러한 위치에 합금분말이 유입 되면, 용융은 되더라도 용융풀에 온전히 섞이지 못하여 편석으로 나타날 수 있다는 것이다. Fig. 5(b)의 #3균열을 보면 균열이 용융선에 인접하여 용융선을 따라 전파하고 있는데, 이러한 균열 형상이 본 가정의 타당성을 입증하여 주는 것이다.

다음으로는 합금분말이 용융되어 완전히 희석되어야 하는데, 이에 필요한 시간이 충분히 제공되지 않은 경우이다. 이러한 경우는 플럭스에 조대한 합금분말이 혼입되어 있어 용융·희석에 보다 긴 시간이 요구되는데 반하여 용접입열은 낮아서 용융풀이 급속히 응고되는 상황에서 발생할 수 있는 것이다. 즉 용융된 합금분말이 미처 희석되지 못한 상황에서 응고되는 상황이다. TWI 보고서에서<sup>8)</sup> 보여준 편석균열이 1kJ/cm의 저입열 조건에서 생성된 것이라는 사실이 본 가정의 가능성을 높여 주고 있다. 이러한 가정이 사실이라면 결국 용접입열이 작을수록 편석균열이 발생할 가능성은 높아지는 것이다.

그러나 상기한 두 가지 가정은 아직은 입증되지 않은 가설 수준이며, 이를 입증하기 위해서는 그리고 보다 확실한 원인을 규명하기 위해서는 추가적인 확인 및 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 5. 맺 음 말

FCA 다층용접부에서 나타나는 저온균열은 두 가지 유형이 있는데, 하나는 세브론 균열이며 다른 하나는

Si과 Mn과 같은 합금원소가 편석되어 국부적으로 경한 조직을 생성하기 때문에 발생하는 편석균열이다. 편석균열은 잘 알려져 있지 않은 균열 형태로서, 1992년의 TWI의 보고서에서 간단히 언급된 바 있는 균열이다. 따라서 본 보고서는 편석균열에 관한 두 번째 보고가 되는 것이다.

편석균열은 FCAW 용착금속부에서만 발견되고 있어, 본 균열은 FCAW 용접재료의 특성에 기인하는 균열이라고 할 수 있다. 저자들은 FCAW 용접재료의 특성에 근거하여 본 균열의 생성기구를 두 가지로 가정을 하여 보았지만 현재로서는 어설픈 가설 수준일 뿐이다. 하지만 본 보고에서 보고하는 편석균열이 시판되고 있는 FCAW 용접재료를 사용하여 용접한 용접부에서 발생하였음을 감안하여, FCAW 용접재료를 제조하는 입장이나 이를 사용하는 사용자 입장에서는 이러한 유형의 저온균열이 실제 현장에서도 생성될 수 있다는 가능성에 대비하여 필요한 조치를 취해야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행되었기에, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Hee Jin Kim, Bong Yong Kang: Morphological characteristics of cold cracking in weld metal, *Journal of KWS*, **20-6**(2002), 748 (in Korean)
2. S. N. G. Thomas: The implication of weld cracking in practice, *Metal Construction*, **1-2**(1969), 142
3. D. J. Allen, b. Chew, P. Harris: The formation of Chevron cracks in submerged arc weld metal, *Welding Journal*, **61-7**(1982), 212s
4. J. M. F. Mota, R. A. Apps: "Chevron cracking"- a new form of hydrogen cracking in steel weld metal, *Welding Journal*, **61-7**(1982), 222s
5. G. Jinjin, W. Zuquin: Chevron cracking in medium strength low alloy steels, *Welding International*, **3-11**(1989), 984
6. H. W. Lee: The relationship between boron content and crack properties in FCAW deposited metal, *Welding Journal*, **85-6**(2006), 131s
7. H. J. Kim, B. Y. Kang: Effect of microstructural variation on weld metal cracking of HSLA-100 steel, *ISIJ Int.*, **43-5**(2003), 706
8. R. J. Pargeter: Effects of arc energy, plate thickness and preheat on C-Mn steel weld metal hydrogen cracking, TWI report No. 461/1992, TWI, Abington Cambridge, UK (1992)



- 서준석(徐俊錫)
- 1979년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 용접재료개발
- e-mail: jss3953@kitech.re.kr



- 김희진(金喜珍)
- 1953년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail : kimhj@kitech.re.kr



- 김재학(金載學)
- 1979년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 용접부 확산성수소량 측정
- e-mail: kjh0479@kitech.re.kr



- 유희수(柳會洙)
- 1965년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 디지털용접전원개발, 자동제어, 집합조직
- e-mail : hsryoo@kitech.re.kr