

용접금속에서 발생하는 저온균열의 형상 특성

김희진·강봉용

Morphological Characteristics of Cold Cracking in Weld Metal

Hee Jin Kim and Bong Young Kang

1. 서론

다층 용접부에서 발생하는 저온균열은 그림 1에서 도식적으로 보여 주는 바와 같이 발생위치에 따라 열영향부(HAZ) 균열과 용접금속부(weld metal) 균열로 대별되는데¹⁾, 열영향부 균열에 대해서는 과거부터 많은 연구가 수행되어 이에 대한 특징이 잘 알려져 있다. 즉 경도가 높고 응력이 집중되는 루트부위(루트균열) 또는 토우부위(토우균열)에서 주로 발생되며, 열영향부에 국한되어 나타나거나 열영향부에서 시작하여 용접금속부로 전파되는 형태를 보여준다. 그리고 열영향부 균열은 열영향부에서도 최고경도를 보여주는 부위를 따라서 전파하기 때문에 용접선 방향에 평행하게 나타나는 것이 일반적이다.

그러나 용접금속부에서 나타나는 저온균열은 발생위치 및 형상이 다양할 뿐만 아니라 외부 표면으로 노출되지 않는 경우가 많기 때문에, 경우에 따라서는 고온균열로 판정될 수도 있다. 특히 용접금속 내부에서 발생하는 저온균열은 극히 미세하여 방사선 투과시험으로는 한계가 있기 때문에, 현장에서는 이를 초음파 탐상으로 검출하고 파단시험에 의해 검증을 하게 되는 경우가 많다.

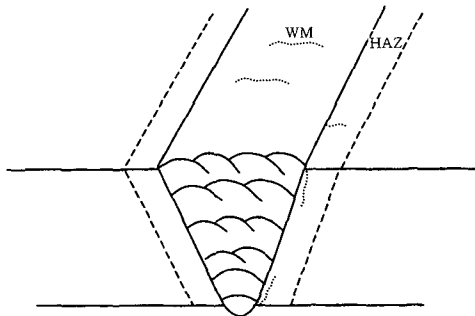


Fig. 1 Location of cold cracks generally developed in multipass welded joint

이에 본 기술보고에서는 용접금속에서 발생하는 저온균열의 형상특성 및 미세조직적 특성을 보다 명확히 함으로써 이를 고온균열과 혼동하지 않도록 하고, 불필요한 검증을 위해 소비되는 경비와 시간을 절약하고자 하였다.

2. 용접금속부 저온균열의 외형적 특성

저온균열이 용접금속에서, 그것도 단층용접에서 발생할 수 있다는 사실은 Flanigan 등²⁾에 의해 최초로 보고되었다. 이들은 셀룰로오즈계 용접재료(E6010)를 사용하여 비드-온-플레이트(bead-on-plate)용접을 실시하고 용접 직후에 용접부를 수냉시켰다. 수냉된 용접금속부를 절단하여 길이 방향의 단면을 관찰한 결과, 용접금속 내부에는 많은 미세균열(0.4mm 이하)이 존재하고 있으며 이들은 모두 한결같이 용접선에 수직인 방향으로 위치하고 있음을 발견하였다. 그러나 저수소계 용접재료(E6016)를 사용한 경우에는 이러한 균열이 크게 저감되는 것을 확인하고 이들이 모두 수소에 의해 발생되는 균열이라고 보고하였다. 이들은 비록 급냉조건에서 발생된 균열이지만 현장에서도 이와 유사한 조건에서는 충분히 발생할 수 있는데, 그와 같은 균열이 보고되지 않고 있는 것은 이들이 너무 미세하여 비파괴 검사에서 검출되지 않았을 가능성이 높다고 하였다.

한편 다층 용접부의 용접금속에서 발생하는 저온균열은 용접선 방향과 평행한 종균열(longitudinal crack) 또는 이에 수직인 횡균열(transverse crack)의 형태로 나타난다. 그림 2의 사진들은 실제 용접과정에서 발생된 각각의 균열을 보여주고 있는데 이들은 용접금속부 저온균열의 가장 전형적인 형상이다. 그림 2의 (a)는 X-그루브 개선에서 한쪽 면에 초층과 두 번째 층을 용접한 상태에서 관찰된 종균열인데, 루트부에서 시작된 균열이 용접금속부를 관통하여 두 번째 비드 표면까지 전파한 균열이다. 그림 2의 (b)는 그루브 용접이 완전

히 끝난 상태에서 나타난 횡균열들인데, 이들은 액체침투 탐상시험을 실시한 결과 확인된 것들이다. 여기서 보여주는 균열은 표면까지 전파된 균열 만을 보여주는 것이고, 보다 많은 수의 균열들이 내부에 존재하고 있었다. 횡균열을 종단면(longitudinal cross section)에서 관찰하여 보면, 용접비드 표면에 수직한 방향으로 나타나는 것이 일반적인데, 경우에 따라서는 45° 각도를 가지고 나타나기도 한다. 이렇게 45° 각도를 가지고 나타나는 균열을 특히 세브론 균열(Chevron cracking)이라고 부른다.

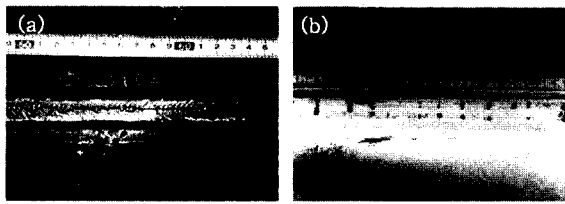


Fig. 2 Typical morphology of cold cracks propagating (a) in longitudinal direction and (b) in transverse direction

2.1 초층 용접부에서의 저온균열

그루브 용접의 초층에서는 루트부에서 균열이 자주 발생하는데, 균열 발생처는 열영향부 또는 용접금속부이다. 이들은 서로 경쟁적인 관계에 있어 보다 취약한 부위에서 발생하여 전파하게 된다. 즉 조건에 따라서는 열영향부 균열이 되기도 하고, 용접금속부 균열이 되기도 한다는 것이다. 이러한 현상은 y-그루브 균열시험에서 자주 경험하게 된다. 그림 3에 있는 y-그루브 시험사진들은 HY-80강에 수동 용접봉으로 용접한 경우인데, 예열온도 75°C의 경우와 같이 예열온도가 낮은 경

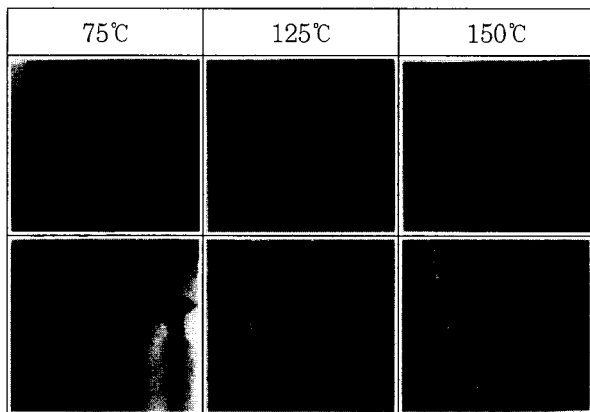


Fig. 3 Cross sections of weld beads made on y-groove cracking test specimens in different pre-heating temperatures

우에는 용접금속부에서 시작하여 이를 관통하는 균열이 발생한다. 그러나 예열온도가 상승하여 125°C가 되면 열영향부에서 시작하여 열영향부를 따라 진전하다가 용접금속부로 진입하는 경향을 보인다. 그리고 예열온도가 충분히 높으면 어디에서도 균열은 발생하지 않는다. 즉 예열온도가 상승함에 따라 균열시작 부위가 용접금속부에서 열영향부로 천이하는 현상이 나타난다는 것이다.

Matsuda 등³⁾은 이러한 경쟁적 관계를 확인하고자 TRC시험(tensile restraint cracking test)을 수행하였다. TRC시험은 y-형 그루브를 가진 시편에 단층 용접을 실시하고 임의의 응력을 부가하여 용접부 균열을 발생시키는 시험방법이다. 그들은 여러가지 시험변수에 따른 시험 결과를 그림 4로써 표현하였는데, 이로부터 용접부에 부가되는 응력이 높아질수록 확산성수소량이 높아질수록 용접금속의 경도가 높아질수록 열영향부 균열이 용접금속부 균열로 천이함을 알 수 있다.

루트 패스를 관통하는 균열을 거시적으로 보면 고온균열과 유사한 형상을 가지게 되는데, 이들은 보다 자세히 관찰하여 보면 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 5는 전형적인 고온균열을 보여주고 있는데, 고온균열은 비드 단면의 중앙에 수직으로 위치하며 비드 표면에서는 중앙선을 따라 일직선으로 나타나게 된다. 그러나 저온균열은 그림 2의 (a) 및 그림 3에서 보듯이 비드 표면이나 단면 어디에서도 직선적이지 못하고, 왜곡되어 나타나게 된다. 이와 같이 저온균열과 고온균열은 직진성에 있어서 가장 큰 차이점이다. 각각의 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하면 보다 확실히 구분할 수 있지만, 파면관찰을 하지 않더라도 직진성에 있어서의 차이점을 이해하고 있으면 육안 관찰만으로도 구분할 수 있는 것이다.

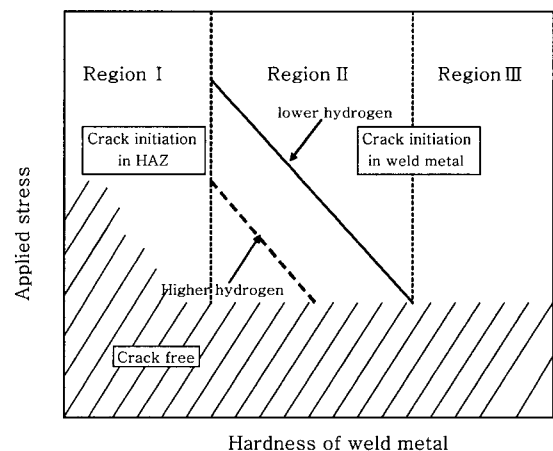


Fig. 4 Crack initiation site controlled by diffusible hydrogen content, applied stress and weld metal hardness

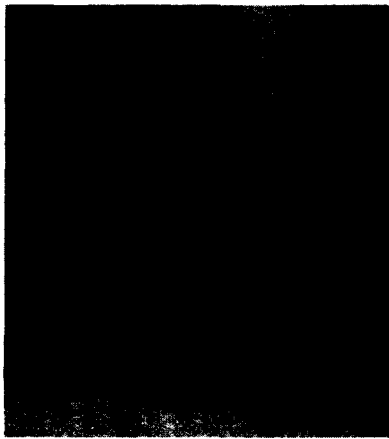


Fig. 5 Typical morphology of hot crack

2.2 다층 용접부에서의 저온균열

다층용접 용접금속부에서 발생하는 저온균열의 특징 중의 하나는 그림 1에서 보여주는 바와 같이, 용접선에 수직한 횡방향으로 생성된다는 것이다. 그런데 이들을 용접부 종단면에서 보면, 그림 6과 같이 표면에 수직한 방향으로 전파한 균열(이후 이를 수직균열, vertical crack, 이라고 부름)이거나 또는 그림 7과 같이 표면과 45도의 방향을 가지고 발달된 균열(inclined crack 또는 Chevron crack이라고 부름)의 두 가지 형태로 나타난다. 45도의 방향을 가지고 있는 균열은 서로 직각으로 교차하는 형상을 보여 주기 때문에 이를 특별히 세브론(Chevron)균열이라고 부른다⁴⁾. 수직균열은 표면까지 전파하여 외부에 노출되기도 하지만, 대부분의 횡균열은 그림 6 및 7에서 보듯이 용접금속 내부에 존



Fig. 6 Typical morphology of vertical cracks developed in a longitudinal center-section of a multipass weld



Fig. 7 Typical morphology of Chevron cracks developed in a longitudinal section of a multipass weld⁴⁾

재하게 된다.

세브론 균열은 1960년대 후반에 서브머지드 아크 용접(SAW)용으로 열기성 소결 플럭스가 사용되기 시작되는 시점에서 발견되기 시작하였다⁵⁾. 초기에는 용접금속이 다음 패스에 의해 고온으로 재가열되어 발생한다는 의견도 제시되었으나 결국에는 수소유기균열의 일종임이 여러 연구자들에 의해 밝혀지게 되었다^{4,6,7)}. 그리고 이들은 전단응력(shear stress)이 최대가 되는 45° 방향으로 전위가 이동하여, 이들이 입계에 집중됨으로써 입계 페라이트가 균열 개시처가 된다고 하였다. 그 밖에도 Jinjin 등⁷⁾은 용접금속의 강도와 세브론 균열의 상관성을 검토한 결과 세브론 균열은 항복강도가 500Mpa 이하인 용접금속에서만 나타나는 균열이라고 하였다. 그리고 Mota 등⁴⁾은 중강도(medium strength)급 용접금속에서는 세브론 균열이 발생하지만 고강도(high strength)급 용접금속에서는 수직균열이 나타난다고 하였다. 이렇게 일정 수준의 강도에서 세브론 균열이 나타나고, 강도가 증가함에 따라 균열의 방향이 변화하는 것은 미세조직의 영향에 의한 것이라고 할 수 있다. 세브론 균열은 두 가지 단계를 거쳐 생성되는 것으로 알려져 있다. 먼저 강도가 약한 입계페라이트(grain boundary ferrite) 조직에서 균열이 생성되어 입계를 따라 전파되고, 이들이 45°의 각도를 가지고 입내를 관통하여 연결됨으로써 세브론 형상의 균열을 만들게 된다는 것이다. 따라서 입계페라이트가 많지 않거나 전혀 없는 고강도 용접금속에서는 초기 균열이 세브론 형상으로 발전할 수 없기 때문에 응력에 수직한 방향으로 전파하여 수직균열이 되는 것이다.

다층용접 용접금속에서 나타나는 수직균열의 특징은 이들이 주로 최종 용접층(final layer) 바로 밑에 밀집되어 존재하는 경향이 있다는 것이다. 이와 같은 경향은 여러 연구자들에 의해 보고되었으며^{8,9)}, 그림 6에서도 명백히 보여주고 있다. 이와 같이 표면 가까이에서 균열이 집중적으로 나타나는 현상에 대해서 Takahashi 등⁸⁾은 그림 8 및 9와 같은 시험 결과를 토대로 이 지점에서 잔류응력과 확산성 수소량이 최대에 이르기 때문이라고 설명하였다. WES 1105의 해설서에는 다층 용접에서 수소농도가 축적되는 상황을 이론적으로 계산하였는데, 용접 층수가 증가할수록 수소농도는 증가함을 보여주었을 뿐만 아니라 4~5층 정도에 이르면 최대치에 수렴하게 되어 더 이상의 증가는 없다고 하였다¹⁰⁾.

그러나 이상의 보고와는 다소 상이한 연구결과도 다수 보고된 바 있다. 이 등¹¹⁾은 50mm 판재에 플럭스스크어드 아크용접(FCAW)을 실시하였는데, 그림 10에서

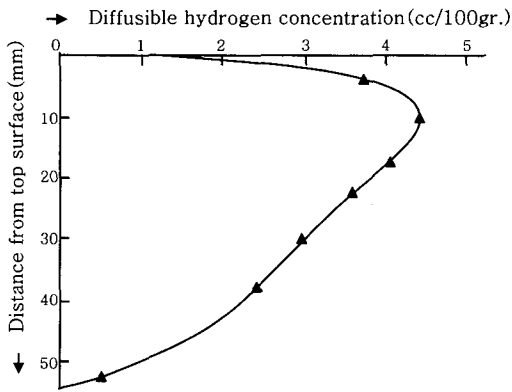


Fig. 8 Profile of diffusible hydrogen content of 50mm thick weld in thickness direction⁸⁾

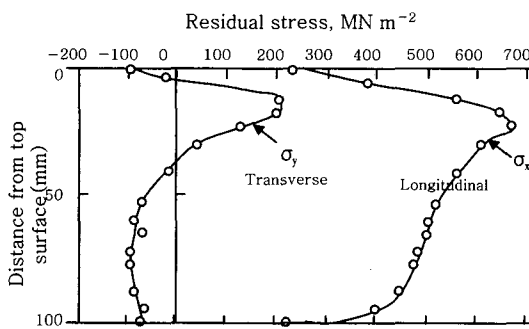


Fig. 9 Residual stress distribution of 100mm thick weld in thickness direction⁸⁾

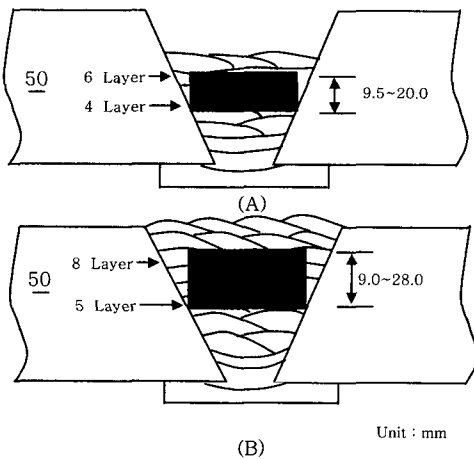


Fig. 10 Location of cold cracks developed in FCA weld deposit made with (A) 7-layer and (B) 10-layer welding¹¹⁾

보여주는 바와 같이 7층만 용접한 시편에서는 균열이 4층과 6층 사이에 걸쳐 분포하여 유사한 결론을 보여 주었으나, 10층으로 완전히 용접한 시편에서는 5층과 8층 사이에 걸쳐 분포하였고 바로 아래에 위치한 9층에는 균열이 존재하지 않았다고 하였다. 더구나 X-그루브

에 서브머지드 아크용접을 실시한 시편에서는 그림 11과 같이 최종 층에서만 균열이 발견되었는데, 그것도 표면으로부터 일정 거리만큼 (9.5~12mm) 떨어진 부위에서만 국부적으로 존재한다고 보고하였다¹²⁾. 이와 같이 이들의 결과는 Takahashi의 결과⁸⁾와 많은 차이를 보여주었지만, 이의 정당성을 입증할 수 있는 이론적 근거는 제시하지 못하였다.

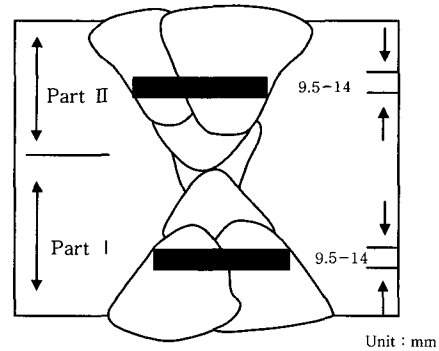


Fig. 11 Location of cold cracks developed in SA weld deposit made in 50mm thick plate¹²⁾

한편 Pargeter¹³⁾는 V-그루브 개선을 한 50mm 판재에 서브머지드 아크용접을 실시하고 균열의 위치를 확인한 바, 모든 균열이 표면으로부터 13~20mm 사이에 존재하고 있었다고 보고하였다. 이 또한 최종 층 바로 밑층에서 발생하여 상하 양쪽으로 성장해 나간다는 Takahashi⁸⁾의 주장과는 일치하지 않는 시험결과이다. 이들은 특히 초음파 탐상(UT)에서 검출하지 못한 균열이 금속현미경으로 단면 관찰하여 확인되었다고 보고하면서 용접금속부 균열은 시편을 절단하여 광학현미경으로 관찰하여야 한다고 하였다. 그리고 Okumura 등¹⁴⁾은 40mm 두께의 강판에 K-groove 개선을 하고 800Mpa급의 서브머지드 아크용접을 실시하였는데, 이 경우에 있어서는 중앙부에 수직균열이 밀집되어 있음을 보여주었다.

이상과 같이 수직균열의 위치에 대해서는 연구자마다 각기 다른 실험결과를 보여주고 있다. 그리고 이러한 차이가 어떠한 원인에 의해 나타나는지에 대한 설명은 어디에서도 찾아 볼 수 없었다. 향후 이에 대한 연구가 보다 광범위하게 수행되어 이를 확실히 규명할 필요가 있다.

3. 저온균열의 파면 형상

Hart¹⁵⁾는 G-BOP 시편에서 발생된 저온균열 파면으로부터 연성(micro-void coalescence), 및 취성파괴가

일어날 수 있으며, 취성파괴는 벽계(quasi-cleavage), 또는 입계(intergranular)파괴 등으로 다양하게 나타날 수 있음을 보여주었다. 그리고 전과경로는 입계를 따라 전파하는 경향이 있는데, 미세경도가 270Hv 이하인 경우에는 그러한 경향이 적지만, 경도가 270Hv 이상인 경우에는 입계페라이트를 따라, 입계페라이트가 존재하지 않는 경우는 구오스테나이트 결정립 입계를 따라 전파하는 경향이 증가한다고 하였다. 균열이 입계를 따라 선택적으로 전파하는 경향은 일렉트로 슬래그 용접부에서도 보고되고 있다. 그런데 이상의 보고들은 매우 거시적인 관찰의 결과들이다. 이미 보고하였듯이 용접금속의 미세조직은 매우 다양한데¹⁷⁾, 이들 각각의 구성요소들이 파면 형성에 미치는 영향과 균열 저항성의 차이 등에 관한 보고는 그다지 많지 않을 뿐만 아니라 서로 상반된 결과가 보고되어 있다. 수소취성에 미치는 미세조직의 영향이 지대함에도 불구하고 용접금속의 미세조직에 대해서는 다소 부족하다고 판단된다. 이에 대해서는 다음의 기술보고를 통하여 보고하고자 한다.

4. 맺음말

최근 용접성이 향상된 구조용 강재가 출현함에 따라 용접금속부 저온균열에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이는 고강도 강재의 사용량이 증가하고 모재의 두께가 증가하기 때문이라고 하겠다. 강재는 두께가 증가하더라도 화학조성의 변화가 적기 때문에 용접성의 저하 정도는 크지 않은 반면 용접금속부는 확산성수소량 및 잔류응력이 축적되기 때문에 두께가 증가하면 균열 발생 가능성이 점차 증가하게 된다. 용접금속부에서 발생하는 저온균열은 균열의 위치 및 형상에 있어서 고온균열과는 외형적으로 구분 가능하다. 그러나 이들은 비드 표면에서 육안으로 확인할 수 있는 정도의 크기를 가진 경우도 있지만 대부분의 경우에 있어서 균열의 크기가 매우 작고 표면으로 노출되지 않기 때문에 이들을 완전히 검출한다는 것은 용이한 일이 아니다. 초음파 탐사를 실시한다고 하더라도 검출 한계가 있기 때문에 이러한 균열이 용접금속 내부에 존재해 있을 가능성은 매우 높다고 하겠다. 향후 비파괴 검사기술이 발전하여 검출 한계가 보다 낮아지면 용접금속부에서의 저온균열은 제조자에게 커다란 부담이 될 소지가 있다. 따라서 이에 대한 체계적인 연구와 대책이 수립되어야 할 것이다.

감사의 글

본 기술보고는 저자중의 한사람인 강봉용박사의 학위 논문을 정리 보완한 것입니다. 학위과정에서 지도편달

을 아끼지 않으신 황선근교수님께 감사드립니다. 그리고 원고정리를 위해 수고한 김남훈, 박장호에게 고마움을 표합니다.

참고 문헌

1. H. Suzuki, N. Yurioka: Delayed cracking caused by hydrogen in steel welding, *Tetsu-to-Hagane* (J. Iron Inst. Japan), **67-10**(1982), 1657-1669 (in Japanese)
2. A. E. Flanigan, M. Kaufman: Microcracks and the low-temperature cooling rate embrittlement of welds, *Welding Journal*, **30-12**(1951), 613s-622s
3. F. Matsuda et. al.: Criterion of alternative initiation of cold cracking in HAZ or weld metal for root pass welds of high strength steels, *Trans. of JWRI*, **12-2**(1983), 75-85
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-228s
5. S. N. G. Thomas: The implications of weld cracking in practice, *Metal Construction*, **1-2**(1969), 142
6. D. J. Allen, B. Chew, P. Harris: The formation of Chevron cracks in submerged arc weld metal, *Welding Journal*, **61-7**(1982), 212s-221s
7. G. Jinjin, W. Zuqian: Chevron cracking in medium strength low alloy steel welds, *Welding International*, **3-11**(1989), 984-989
8. E. Takahashi, K. Iwai: Relations between occurrence of the transverse cracks and parameters of residual stress and diffusible hydrogen, *Journal of Japan Welding Society*, **48-10**(1979), 865-872 (in Japanese)
9. T. Yatake, N. Yurioka, R. Kataoka, E. Tsunetomi: Studies on delayed cracking in steel weldments (Report 3), *Journal of Japan Welding Society*, **50-3**(1981), 291-296 (in Japanese)
10. WES 1105-1985: Cracking test for single-bevel groove multi-layer welds, Japan. Welding Ass. (1985)
11. H. W. Lee, S. W. Kang, D. S. Um: A study on transverse weld cracks in thick steel plate with the FCAW process, *Welding Journal*, **-12**(1998), 503s-509s
12. Hae-Woo Lee, Sung-Won Kang: A study on transverse cracks in 50mm thick steel plate with SAW process, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, **15-4**(1997), 563-573
13. R. J. Pargeter: Effect of arc energy, plate thickness and preheat on C-Mn steel weld metal hydrogen cracking, *TWI Report 461/1992*, Nov. 1992
14. T. Okumura, K. Horikawa: Transverse crack in submerged-arc welding of 80kg/mm² tensile strength steel, *Proc. of Int. Sym. on Precaution of Cracking in Welded Structure*, 1971, IA7.1-IA7.17

15. P. H. M. Hart: Resistance to hydrogen cracking in steel weld metal, *Welding Journal*, **65-1** (1986), 14s
16. R. Thibau, S. R. Bala: Influence of electrosag weld metal composition on hydrogen cracking, *Welding*

Journal, **62-5** (1983), 97s-104s
17. H. J. Kim, B. Y. Kang: Microstructural characteristics of steel weld metal, *Journal of Korea Welding Soc.*, **18-5**(2000), 25-32 (in Korean)



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



- 강봉용(姜奉龍)
- 1960년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail: kanbo@kitech.re.kr