

## 후판 용접부 횡균열 발생에 미치는 잔류응력의 영향

이 해 우·이 동 진·강 성 원

## Effect of Residual Stresses Depends on Transverse Cracks in Thick Steel Weldments

Hae-Woo Lee, Dong-Jin Lee and Sung-Won Kang

## 1. 서 론

용접부는 국부적인 가열 냉각으로 인한 용접부 온도 불균일 분포로 인해 필연적으로 잔류응력이 발생된다. 즉 용접부는 용접입열에 의해 가열되어 팽창하게 되고 냉각되는 동안 열적변화에 따라 잔류응력이 발생되는데 이와 같은 잔류응력은 용접부 변형 뿐만 아니라 용접균열의 중요한 원인이 된다<sup>1-6</sup>. 어떤 시험편을 균일한 온도로 가열 후 균일하게 냉각시키면 팽창 및 수축은 일어나지만 열응력은 발생되지 않는다. 그러나 Fig. 1 (A)처럼 스폿용접을 했을 경우 원판의 중심부는 국부적으로 팽창되지만 이를 둘러싼 부분에 의하여 변형이 구속되므로 열을 가한 부분은 압축응력이 이를 둘러싼 부분은 인장 응력이 발생된다. 그러나 중심부를 가열시킨 후 냉각시키게 되면 중심부는 수축을 시작하게 되고

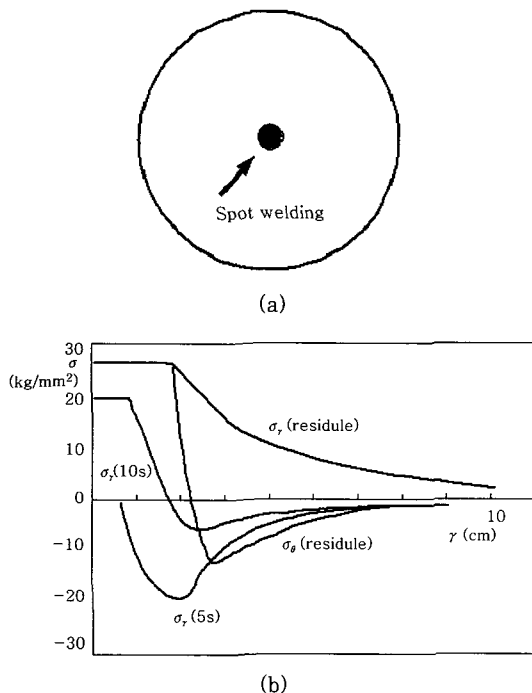


Fig. 1 Residual stresses in joint of spot welding

이를 둘러싼 부분이 이를 저지하려고 하므로 중심부에는 인장응력이 걸리고 주위를 둘러싼 부분은 압축응력이 생겨 Fig. 1(B)와 같이 반지름 r방향의 잔류응력이 분포하게 된다<sup>7-8</sup>.

여기서 발생하는 응력은 원판 내에서의 평형 상태 즉 자기평형상태로 되는데 이와 같이 구속에 의해 발생하는 상태를 내부구속(internal restraint)이라고 표현한다. 다른 예를 생각하면 Fig. 2처럼 2개의 봉을 벽에 완전히 고정시키고 중앙부를 용접하면 용접입열이 부재 끝으로 전도되면서 냉각되어 수축을 일으킨다. 만약 봉이 벽에 고정되지 않은 상태라면 봉의 길이는 처음 길이보다 짧아지겠지만 벽에 완전히 고정되어 있으므로 봉의 변형은 생기지 않는 대신 변형에 대응하는 응력이 발생할 것이다. 이 응력 상태는 벽의 반력과 평형상태를 이루고 있으므로 자기평형 상태는 아니다. 이와 같은 응력을 외적구속(external restraint)이라고 표현한다.

## 2. 구속응력 평가 및 균열 관계

구속응력은 물체의 변형을 억제하기 위해 생긴 응력으로 정의되며 용접 시 발생하는 잔류응력은 열소성을 일으킨 부분의 수축 변형을 주위에서 억제하기 때문에 생긴 구속응력의 일종이다. 구속응력은 Fig. 3의 RRC (rigid restraint cracking) 시험에서 이해 할 수 있

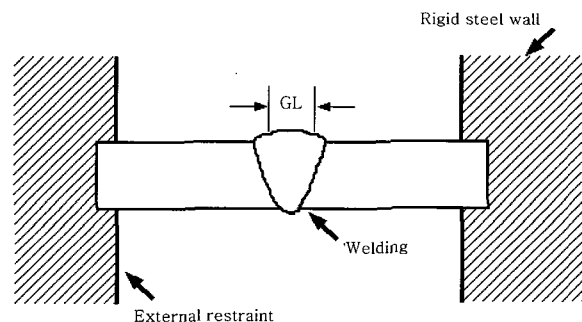


Fig. 2 External restraint of weld joints

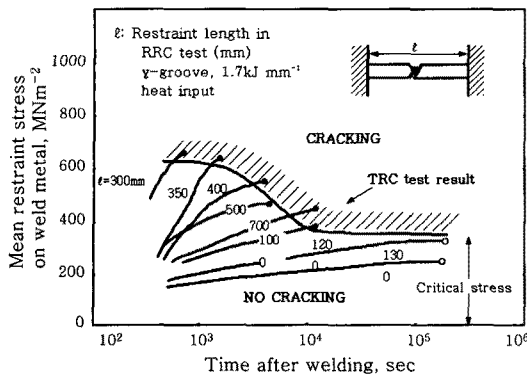


Fig. 3 Comparison of results by RRC and TRC tests

는데 구속길이( $\ell$ )는 용접부가 냉각되는 동안 열 소성 작용에 대해 일정하게 유지 되었다면 구속응력은 구속 길이가 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타낼 것이다<sup>9)</sup>.  
 맞대기 용접부의 구속도(RF)는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$RF = Eh / \ell = \eta r f h$$

여기서,  $E$  : 탄성계수  
 $h$  : 판 두께  
 $\ell$  : 구속길이  
 $rf$  : 구속계수  
 $h$  : 판 두께 보정계수

Fig. 4는 강도가 다른 용접부에 있어 구속도와 구속 응력과의 관계를 나타내고 있으며 구속도와 구속응력은 항복이 일어나기 전까지 낮은 구속영역에서는 정비례 관계에 있음을 알 수 있으며 횡방향으로 발생하는 구속도는 실제 용접부에서 루트균열이나 토우균열을 일으키는 원인이 된다<sup>10)</sup>. 구조물 제작 시 발생하는 용접잔류응력은 구조물 자체에서 생성되는 잔류응력과 구속에

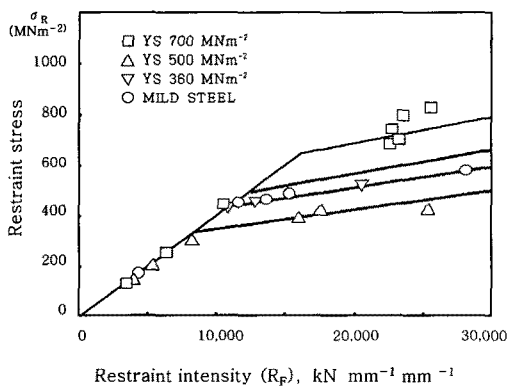


Fig. 4 Relation between reaction stress and tensile restraint

의한 반사응력(reaction stress)으로 구분되는데 용접 부가 두꺼울수록 작용하는 응력도 증가하게 된다. 맞대기 용접부에서 잔류응력은 다음 식에서 추정 가능하다<sup>10)</sup>.

$$\Delta\sigma = \alpha \times \Delta T \times E$$

여기서,  $\Delta\sigma$  : stress 변화  
 $\alpha$  : 열팽창계수  
 $\Delta T$  : 온도변화  
 $E$  : 탄성계수

즉 응력의 변화가 크고 열팽창 계수가 클수록 잔류응력도 증가하게 되며 특히 용접부가 후판인 경우 온도변화가 크게 되므로 잔류응력도 그만큼 증가하게 된다.

잔류응력 측정방법으로는

- 1) 절단법(cutting method)
- 2) Hole drilling법
- 3) X-ray 회절법 등이 있으며

절단법은 strain gage 주위를 절단하여 응력을 해방시키고 그때 발생하는 절단부 위의 탄성변형을 gage로 측정하는 방법이다. 이와 같은 절단법은 재료를 파손시키고 절단부위의 평균응력만 측정 되어지는 단점이 있지만 측정이 간편하고 정확도가 뛰어나므로 폭넓게 이용되고 있다.

Hole drilling법은 잔류응력을 측정하고자 하는 부위에 gage를 부착하고 gage에 작은 구멍을 뚫어 잔류응력을 측정하는 방법으로 측정장비가 간편하고 손상부위는 보수가 쉽지만 측정에 숙련도가 요구되는 단점이 있다.

X-ray 회절법은 재료의 결정(crystal)이 응력에 의한 strain을 받을 경우 X-ray 회절상의 위치가 이동되는 원리를 이용한 비파괴적인 잔류응력 측정법으로 계측이 간단하고 정량적으로 측정이 가능한 장점이 있는 반면, 표면층의 응력만 측정되어지는 단점도 있다.

용접부의 횡균열은 용접선 길이 방향의 잔류응력( $\sigma_x$ )에 따라 결정된다. Fig. 5는 홀드릴링법으로 용접부 표면에서 용접선 길이 방향의 잔류응력( $\sigma_x$ ) 분포이다<sup>11)</sup>. 같은 규격의 용접 시험편 2개를 제작하여 용접 전류 및 전압은 동일하게 유지하고 예열 및 층간온도만 변화시켰다. 그림에서와 같이 예열/층간온도를 120°C로 유지하여 용접한 시험편에서 잔류응력값이 예열/층간온도를 30°C 미만으로 유지한 후 용접한 시험편보다 모든 측정지점에서 낮은 응력값을 보이고 있다. 즉 예열은 용접부의 냉각속도를 느리게 하여 변태응력 및 열응력을 감소시킬 수 있다.

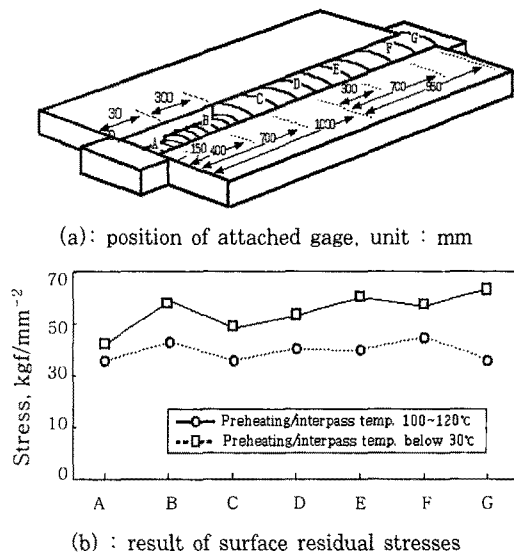


Fig. 5 Distributions of surface residual stress for ox direction in deposited metal

### 3. 맺 음 말

저온균열인 평균열 발생은 경화조직, 확산성수소량 및 잔류응력에 따라 결정된다. 즉 평균열의 주요 인자 인 잔류응력은 용접부의 두께가 두꺼워질수록 구속도가 클수록 증가하는 경향을 나타낸다. 용접 전 충분한 예열을 통하여 용접부의 냉각속도를 느리게 함으로서 잔류응력을 최소화 시킬 수 있다.

### 참 고 문 헌

- H. W. Lee, S.W. Kang, The relationship between residual stresses and transverse weld cracks in thick steel plate, American Welding Society, Welding Journal, 225-230, 2003
- C. D. Beachem, A new Model for Hydrogen-Assisted Cracking, Metal-lurgical Transactions, Vol. 3, 437~451, Feb. 1972
- N. Bailey and M.D. Wright, Weldability of High Strength Steels, Welding and Metal Fabrication, 38 9~396, 1993
- JIS Z3158-1966, Method of Y-groove Cracking Test, Japan Standards Association, 1966
- H. Suzuki and H. Nakamura, Effect of external Restraint on Root Cracking in High Strength Steels by TRC Testing, IIW Doc. IX 371-63, 1963
- H. Granjon, Met. Constr. Br. Welding Journal, Vol. 11, 509~515, 1969
- 嚴東錫, 熔接工學, 文運堂, pp. 224~228, 1994
- O. Odegard, G. M. Evans and N. Christensen, Met. Constr. Br. Welding Journal, Vol. 3(2), 47~49, 1971
- M. Watanabe and K. Satoh, Japan Welding Society, Vol. 33, 446~457, 1964
- S. Matsui, T. Terasaki and M. Sakaguchi, Journal of Japan Society, 49~55, 1983.(1)
- H. W. Lee, S.W. Kang and D.S. Um, A study on transverse weld cracks in thick steel plate with the FCAW process, American Welding Society, Welding Journal, 503-510, 1998



- 이해우(李海雨)
- 1963년생
- 동아대학교 신소재공학과
- 용접균열, 용접불량 원인규명
- e-mail : hwlee@dau.ac.kr



- 강성원(康聖原)
- 1946년생
- 부산대학교 조선해양공학과
- 용접강도, 용접부 파로 손상해석
- e-mail : swkang@pusan.ac.kr



- 이동진(李桐鎔)
- 1981년생
- 동아대학교 대학원 금속공학과
- 용접아금, 용접균열
- e-mail : dongjin-lee@hotmail.com