

후판 용접부의 횡균열 발생 방지에 관한 연구(II)

정 호 신* · 강 성 원**
(99년 5월 12일 접수)

A Study on Prevention of Weld Transverse Crack for Thick Plate(II)

H. S. Jeong* · S. W. Kang**

Key Words : Diffusible Hydrogen Content(확산성 수소 함유량), Weld Metal Transverse Crack(용접금속 횡균열), CTS Test(CTS 시험), Transverse Crack Sensitivity of Fillet Weld(필렛 용접부 횡균열 감수성), Thermal Severity Number(열적 구속도 지수)

Abstract

Welding is a widely applicable and reliable process and is mainly adopted for fabricating heavy structures. Recently, weld metal transverse cracks in butt and fillet weld joint is a serious problem, and they must be eliminated for improving weld joint reliability.

The weld metal transverse crack susceptibility of butt and fillet joint was carried out by cantilever type tensile crack testing jig and CTS test.

In this view of point, this study investigated the potential factors for weld metal transverse crack.

The main results obtained were as follows;

1. The content of diffusible hydrogen in weld metal played an important role for weld metal transverse cracks.
2. From cantilever type tensile crack tests, it was pointed out that the higher the diffusible hydrogen content and tensile restraint, the more susceptible to weld metal transverse cracking.
3. The TSN(thermal severity number) and diffusible hydrogen were important factors for determining weld metal transverse cracks in fillet weld joints.

* 정회원, 부경대학교

** 종신회원, 부산대학교

1. 서 론

철강재료의 용접시에 발생하는 저온균열은 용접 시공상 매우 중요한 문제로서 이의 방지 대책이 널리 연구되어왔다. 이와 같은 용접열영향부의 저온 균열 발생 방지와 용접부의 인성 향상이라는 측면에서 탄소 함유량을 대폭 줄이고 또 경화능을 높이는 합금원소 함유량을 규제하게 되어 용접 열영향부의 경도값이 많이 완화되게 되었다. 이러한 결과 강재의 강도가 저하하게 되지만 이러한 강도를 보상하기 위하여 TMCP법에 의해 강재를 제조하므로써 강도가 저하되는 단점을 줄일 수 있게 되었다. 이와 같은 측면에서 최근의 선급용 및 해양구조용의 각종 강재의 경우에는 용접열영향부의 경화에 기인하는 저온균열은 상당히 효과적으로 방지되고 또한 예열온도도 낮출 수 있게 되었다. 그러나 이에 따라 현장에서의 용접시공중에는 종래와 달리 확산성 수소에 관한 규제가 엄격하지 못한 결과가 초래되고 있고, 이에 따라 종래와는 다른 형태의 균열, 즉 용접금속중에 발생하는 횡균열이 문제가 되고 있다. 특히 최근의 공학적인 환경의 변화에 따라 각종 구조물이 대형화, 거대화됨에 따라 사용되는 강재의 두께가 두꺼워지고 있고 이에 따라 용접시공중에 용접부에는 큰 구속이 작용하게 된다. 이와 같은 상황에서 용접 시공 중에 용접금속에는 각종의 결함이 발생되고 있지만 그에 관한 원인은 아직 잘 밝혀져 있지 않다. 이와 같은 균열이나 결함을 방지하기 위하여 용접재료의 선정, 예열 및 후열처리온도, 확산성 수소 함유량, 이음부의 구속도 등의 각종 인자가 용접성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 절실한 실정이다.

후판 용접시에는 판의 두께가 두껍기 때문에 용접 이음부의 구속도가 매우 크고 또 두께 방향의 이방성이 매우 커지므로 다양한 용접 시공상의 문제가 발생되고 있고 이러한 경향은 더욱 심화될 것이다. 특히 각종 설비가 급속하게 대형화됨에 따라 그 구조 부재는 한층 더 대형화되고 그에 따라 품

질의 균일성이나 소재의 치수 정밀도 저하, 용접 균열의 발생, 피로 강도의 저하와 같은 문제가 더욱 더 심각하게 대두될 것으로 사료된다. 또 후판에 대한 용접의 개념이 defect free, maintenance free 의 완전한 용접 이음으로 바뀌고 있기 때문에 후판의 용접 시공시에는 용접 품질의 향상과 용접 공정의 엄격한 관리가 요구될 것이다. 따라서 후판을 용접할 경우에는 균열 발생에 의해 공기의 지연, 원가 상승, 신뢰도 저하와 같은 문제점이 많이 발생하고 있을 뿐 아니라 특히 용접시에 발생하는 microfissure나 microcrack과 같은 미세한 균열이 존재할 경우에는 일일이 비파괴검사에 의해 검출할 수 없는 상황에 있다. 이러한 현미경적인 미세한 균열이 존재하면 반복 하중의 작용에 의해 이러한 균열이 성장하여 결국에는 용접 구조물 전체가 취성파괴에 이르게 되어 대형사고를 유발할 우려가 있기 때문에 미세한 횡균열 발생 방지 대책의 확립이 매우 중요한 상황이다.

이러한 측면에서 본 연구에서는 맞대기 용접부 및 필렛 용접부에 발생하는 횡균열 감수성을 조사하고 이 횡균열 발생에 미치는 각종 인자의 영향을 규명하여 횡균열 발생의 주요한 원인과 방지 대책의 정립을 목표로 하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 강재는 선급용의 두께 50mm 의 강재로서 Table 1과 같은 화학조성을 갖는 재료이다. 이 강판을 SAW 용접한 후 기계 가공에 의해 소정의 치수로 가공한 뒤 SAW 용접금속에 잔류되어 있는 수소를 제거하기 위하여 400℃에서 2시간 이상 수소 제거 처리하였다. 실험에 사용한 모재의 화학성분과 기계적인 특성을 Table 1에 나타낸다.

또한 CTS 시험에 사용한 강판의 두께는 20, 30, 50mm로서 강판의 두께를 변화시킴으로써 열적 구

Table 1 Chemical Composition and Mechanical Properties of Base and Weld Metal

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	T.S	Y.P.	El.
Base metal	0.09	0.38	1.35	0.015	0.005	0.03	0.03	0.02	0.002	52.8	42.0	31.0

Table 2 The size, test condition and controlled thermal severity number of CTS test specimen

No. of specimen	Size, mm	Thickness, mm	Cooling cond.	D.H.C. level, ml/100g	T.S.N	
					Bithermal	Trithermal
c-1	75x75	20	air cooled	3.4	6.4	9.6
c-2	75x75	20	air cooled	6.5	6.4	9.6
c-3	75x75	20	air cooled	10.2	6.4	9.6
c-4	75x75	20	rapid cooled	3.4	6.4	9.6
c-5	75x75	20	rapid cooled	6.5	6.4	9.6
c-6	75x75	20	rapid cooled	10.2	6.4	9.6
c-7	75x75	30	air cooled	3.4	9.6	14.4
c-8	75x75	30	air cooled	6.5	9.6	14.4
c-9	75x75	30	air cooled	10.2	9.6	14.4
c-10	75x75	30	rapid cooled	3.4	9.6	14.4
c-11	75x75	30	rapid cooled	6.5	9.6	14.4
c-12	75x75	30	rapid cooled	10.2	9.6	14.4
c-13	75x75	50	air cooled	3.4	16.0	24.0
c-14	75x75	50	air cooled	6.5	16.0	24.0
c-15	75x75	50	air cooled	10.2	16.0	24.0
c-16	75x75	50	rapid cooled	3.4	16.0	24.0
c-17	75x75	50	rapid cooled	6.5	16.0	24.0
c-18	75x75	50	rapid cooled	10.2	16.0	24.0
c-19	130x130	20	air cooled	3.4	6.4	9.6
c-20	130x130	20	air cooled	6.5	6.4	9.6
c-21	130x130	20	air cooled	10.2	6.4	9.6
c-22	130x130	20	rapid cooled	3.4	6.4	9.6
c-23	130x130	20	rapid cooled	6.5	6.4	9.6
c-24	130x130	20	rapid cooled	10.2	6.4	9.6
c-25	130x130	30	air cooled	3.4	9.6	14.4
c-26	130x130	30	air cooled	6.5	9.6	14.4
c-27	130x130	30	air cooled	10.2	9.6	14.4
c-28	130x130	30	rapid cooled	3.4	9.6	14.4
c-29	130x130	30	rapid cooled	6.5	9.6	14.4
c-30	130x130	30	rapid cooled	10.2	9.6	14.4
c-31	130x130	50	air cooled	3.4	16.0	14.0
c-32	130x130	50	air cooled	6.5	16.0	24.0
c-33	130x130	50	air cooled	10.2	16.0	24.0
c-34	130x130	50	rapid cooled	3.4	16.0	24.0
c-35	130x130	50	rapid cooled	6.5	16.0	24.0
c-36	130x130	50	rapid cooled	10.2	16.0	24.0

속도를 변화시켰다.

황균열 재현을 위한 시험재료는 두께 50mm의 강판을 용접 groove 각도 70° 로 홈 가공하여 SAW 용접하였고, 이 용접재를 두께 방향으로 슬라이스하여 밀링 가공하여 황균열 감수성 조사용의 시험편으로 하였다. 황균열 시험편의 두께는 가능한 한 용접 잔류응력을 배제하기 위하여 최종적으로 두께 3mm로 하였다.

이렇게 하여 만든 용접금속을 포함하는 시험편을 서브머지드 아크 용접시에 잔류할 수 있는 용접부중의 확산성 수소를 제거하기 위하여 진공로 중에서 400°C에서 2시간 가열하여 용접에 기인하는 수소를 제거하여 균열 시험에 사용하였다. 용접금속의 황균열 발생 특성을 조사하기 위하여 외팔보식의 횡형 인장형 황균열 시험 장치를 자체 제작하여 맞대기 용접부의 균열 감수성을 조사함과 아울러 CTS 시험을 통하여 펠렛 용접부에 발생하는 황균열 감수성을 조사하였다.

2.2 확산성 수소 함유량

확산성 수소는 용접부의 각종 균열 발생 원인이 되기 때문에 황균열에 미치는 확산성 수소의 영향을 검토하기 위하여 확산성 수소 함유량과 황균열 감수성 사이의 상관관계를 조사, 검토하기로 하였다.

용접구조용 강재의 탄소 함유량 저하에 따른 용접금속부의 균열 발생에는 확산성수소가 큰 영향을 끼칠 수 있기 때문에 황균열 감수성 시험에는 확산성 수소 함유량을 3.4ml/100g, 6.3ml/100g 및 10.2ml/100g의 3단계로 변화시켰다.

확산성 수소 함유량은 KS 및 일본의 및 WES 1003-1984에 규정되어 있는 글리세린법에 의한 용착금속의 확산성 수소 측정법에 의거하여 측정하였다. 확산성 수소 함유량 측정시에는 규격에 규정되어 있는 크기의 시험편을 예열하지 않은 상태에서 시험편 표면을 알코홀로 탈지하여 표면에 부착되어 있는 각종 유기물을 제거한 후 용접전류 230A, 용접전압 29V, 용접속도 25 cm/min의 조건으로 용접하여 용접 종료와 더불어 0°C의 빙수 중에 급랭하여 용접 종료 30초 후에 확산성 수소 측정 장치의 포집기내에 시험편을 장입하였다.

용접은 예열하지 않고 상온에서 실시하였으며

용접 비드의 길이는 약 170mm로 하였고 시험재 양쪽의 엔드 탭은 용접 길이가 각각 약 35mm가 되도록 용접하였다. 글리세린 욕조는 45°C로 항온 유지하고 72시간 경과한 후에 수소 포집기에 포집된 수소량을 측정하였다.

2.3 용접금속의 황균열 감수성 시험

용접금속의 황균열 시험시에는 자체적으로 설계, 제작한 외팔보식 횡형 인장형 황균열 시험 장치 및 controlled thermal severity test¹⁻⁵⁾ 등을 채택하여 맞대기 용접부 및 펠렛부 용접금속의 황균열에 미치는 확산성 수소 함유량의 영향과 열적 구속도 및 구속 변형률 등의 영향을 종합적으로 평가하고자 하였다.

펠렛 용접부 용접금속의 CTS 시험시에는 탄산가스와 수소 가스의 혼합비를 조정하여 용접금속 중에 잔류하는 수소의 함유량을 변화시켰다. 또한 자체 제작한 외팔보식 횡형 인장형 황균열 시험시에는 Ar가스와 수소 혼합 가스를 사용하여 확산성 수소 함유량을 변화시켰다.

용접부의 황균열 감수성에는 구속응력과 확산성 수소 함유량이 큰 영향을 미친다. 이러한 측면에서 용접부에 존재하는 확산성 수소 함유량과 구속 응력을 변화시켜 황균열 감수성에 대한 실험을 실시하였다.

또한 균열 시험시에는 SAW용접금속이 시험편의 중앙에 위치하도록 하였으며 이 시험편에 수소를 첨가하기 위한 방법으로 TIG 용접을 채용하였다. TIG 용접시에는 Ar가스와 수소 가스의 혼합가스를 사용하였고 이 혼합 가스의 혼합비를 조절하여 용접부의 확산성 수소 함유량을 조절하였다.

용접 방법은 용접용 시험편을 바이스에 고정된 후 TIG 자동 용접하고 용접 종료 직후 이 시험편을 빙수 중에 급랭하고 시험편이 완전히 냉각된 후 황균열 시험 장치에 세트한 후 용접 종료 30초 이내에 외팔보형 인장 균열 시험장치에 시험편을 장착하였다. 균열의 발생 여부는 용접 종료후 48시간 경과한 후의 균열 발생 유무를 현미경과 확대기로 조사하여 판정하였다.

한편 현재 시판되고 있는 TRC나 RRC, Implant 시험기 등은 시험기의 가격이 고가인 관계로 장치

비가 많이 드는 반면 상기한 바와 같은 외팔보식 횡형 균열시험 장치 및 CTS시험은 이러한 단점을 개선하여 신속하고 간편하게 횡균열 감수성을 평가하기 위한 방안이다. 이들 장치의 특징은 소형의 시험편을 써서 균열 감수성을 쉽게 평가할 수 있을 뿐 아니라 균열 발생을 관찰하기 쉽게 고안, 제작하였다는 점이다.

한편 외팔보식 횡형 인장형 균열 시험의 경우에는 Fig. 1과 같이 loading arm으로 변위를 부가하여 지렛대의 원리에 의해 시험편에 응력이 작용하도록 하여, 시험편에 부가되는 응력값을 조절하여 응력, 확산성 수소량과 균열 감수성과의 관계를 구할 수 있게 고안된 것이다.

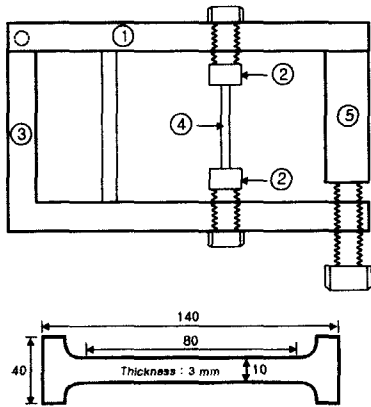


Fig. 1 Cantilever-type crack testing apparatus and shape, dimension of crack test specimen ① movable axis, ② chuck, ③ frame, ④ specimen, ⑤ loading arm

2.4 CTS(Controlled Thermal Severity) 시험

CTS시험은 영국의 British Welding Research Association에서 개발된 시험법으로서 시험에 특별한 설비가 필요하지 않을 뿐 아니라 시험편의 크기도 크지 않기 때문에 필렛 용접시의 용접열영향부의 경화에 기인하는 균열 감수성의 조사를 통하여 실제의 현장 적용을 위한 용접조건 설정에 경제적으로 매우 유력한 방법이다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 종래의 열영향부의 균열 감수성 조사에 사용된 이 시험 방법을 용접금속의 횡균열 감수

성의 시험에 적용하기로 하였다.

CTS 시험편의 상부판은 Fig. 2와 같이 가로, 세로 각각 75mm인 판과 130mm의 두 종류이며 판의 두께는 각각 20, 30, 50mm이다. 이 상부판의 중앙부에 직경 14mm의 구멍을 가공하였다.

하부판의 형상과 크기는 Fig. 3과 같이 가로, 세로의 길이가 각각 100×180mm인 판과 170×300mm의 두 가지로서 이 하부판의 경우도 두께를 각각 20, 30, 50mm로 하여 열적 구속도, TSN(thermal severity number)을 변화시켰다.

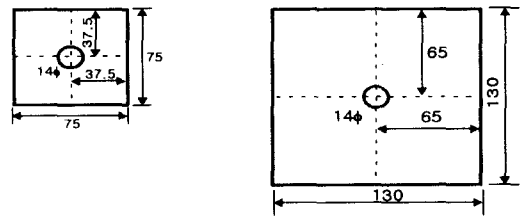


Fig. 2 Shape and dimension of upper plate

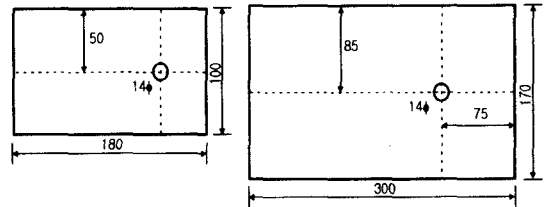


Fig. 3 Shape and dimension of lower plate

이와 같은 CTS 시험시의 소재 및 확산성 수소 함유량을 표 2에 나타낸다. 이와 같이 CTS 시험의 경우에는 판의 두께에 따라 열적 구속도를 조절할 수 있고, TSN은 Bithermal의 경우에는 6.4~16.0, Trithermal의 경우에는 9.6~24.0의 범위이었다.

이와 같은 상부판과 하부판의 맞댐면은 열전도를 원활하게 하기 위하여 기계가공하여 시험재 표면에 존재하는 스케일을 모두 제거하였다. 그 후 볼트로 상부판과 하부판을 밀착시켜 고정된 후, 구속용접(anchor welding)하였다. 본 시험에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 상부판과 하부판을 탄산 가스 아크 용접에 의해 최소 5층 이상 다층 용접하여 구속용접(anchor weld)한 후 상온까지 충분히 냉각시

킨 후 Bithermal부를 용접하였다. Bithermal부의 용접이 끝난 후 역시 상온까지 냉각시킨 후 Trithermal부를 용접하였다. 또 용접 중의 냉각속도의 영향을 조사하기 위하여 용접후 공랭한 경우와 CTS시험편 하부판의 일단을 수중에 침지하여 용접하여 급랭시킨 경우의 두 가지로 변화시켰다.

시험 용접부인 Bithermal부와 Trithermal부의 용접시에는 용접전압 24V, 용접전류 240A, 용접속도 120mm/min의 조건으로 용접하였다.

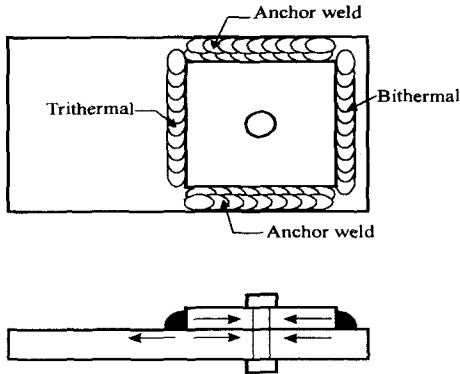


Fig. 4 CTS testing method (position of anchor weld, bithermal, and trithermal welding)

CTS시험에 의한 열적 구속도는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 용접과정 중의 열적 구속도가 Bithermal부는 두 방향으로, Trithermal부는 세 방향으로 열전도가 일어나게 하여 열적 구속도에 변화가 생기게 되는 것이다.

CTS 시험에서의 열적 구속도는 아래의 식에 의해 구하였다.

$$NB=4(t+b)/25 \quad (1)$$

$$NT=4(t+2b)/25 \quad (2)$$

로 주어지며 이 식에서 NB와 NT는 각각 Bithermal 및 Trithermal에 대한 열적 구속도의 값이며, t와 b는 각각 상부판과 하부판의 두께이다.

CTS시험 종료 후 48시간 경과한 뒤 용접금속의 균열 유무를 판정하기 위하여 용접 비드부를 기계 절단하여 초음파 탐상에 의해 균열 발생 여부를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 후판의 용접성에 미치는 확산성 수소 함유량

수소가 금속재료에 미치는 영향에 대해서는 많은 이론^{6,7)}이 발표되고 있고, 확산성 수소가 존재할 경우에는 금속재료가 취약하게 된다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 특히 확산성 수소에 의한 delayed cracking으로 대표되는 용접열영향부의 균열은 각종 용접구조물의 사용 성능을 현저하게 손상시키는 결과를 초래하게 된다.

이러한 균열의 발생 방지대책으로 그 동안 예열과 후열, 강재의 화학조성, 구속도, 확산성 수소 함유량 등을 고려하여 균열 방지를 위한 대책이 수립되어 있다. 그러나 이러한 연구는 탄소 함유량이 적은 용접구조용 고장력강에 집중되어 많은 연구 결과가 얻어져 있다. 그러나 후판이나 극후판의 경우, 이음부의 구속도가 매우 높고 또한 두께 방향의 이방성에 기인하는 두께 방향의 연성의 저하 등에 따라 후판의 경우에는 다양한 용접균열이 발생되고 있으나 실제의 용접 시공시에 적용할 수 있는 뚜렷한 대안이 확립되어 있지 않다.

또한 최근에는 각종 합금 원소의 탄소 당량이 과대 평가된 측면이 있기 때문에 탄소 당량식(Ceq)이 아니라 균열 감수성 지수(Pcm)에 의해 평가하거나 화학성분 이외에 구속도, 확산성 수소량 등을 종합적으로 고려한 Pw 값에 의해 평가하는 것이 합리적이라는 것이 일반적인 추세가 되었다.

그러나 고장력강의 경우, 화학성분, 제조 조건, 판 두께, 구속도, 확산성 수소량 등 야금학적 인자와 역학적 인자가 복합적으로 작용하여 용접시 또는 용접 후에 균열이 발생하기 때문에 고장력강에 의해 얻어진 용접시공 조건을 일률적으로 후판과 극후판에 그대로 적용하는 것은 무의미한 것이다. 특히 최근의 용접구조물은 더욱 더 대형화되고 있으며 이에 따라 종래의 Ceq나 Pcm 또는 Pw에 의한 예열 및 후열처리 조건의 설정 자체가 큰 의미를 갖지 못한다. 왜냐하면 후판의 경우, 용접 대상재 자체의 두께가 매우 두꺼워서 이음부의 구속도가 현저하게 커지고 있으며, 특히 경화되기 쉽기 때문에 용접 열사이클의 영향으로 경화조직이 생성되며, 특히 용접 금속부는 화학성분의 편석도가

매우 높아 다양한 용접성의 문제가 발생될 수 있다.

철강재료 용접부의 수소 원자 농도는 장소에 따라 달라지며 원자는 희박한 방향으로 확산된다. 확산 방향 x 축에 직각인 단위면적을 단위시간에 통과하는 확산원자의 유량 J 는 실험에 의하면 농도 기울기에 정비례한다. 여기서 Fick의 제1법칙 $J = -Ddc/dx$ 라고 할 때 이 비례상수 D 는 확산계수로서 물질의 재질과 농도에 의해 결정되는 정수로서 일반적으로 $D = D_0 e^{-Q/RT}$ 이며 여기서 D_0 , Q 는 물질 상수, R 은 가스 정수(1.98cal/mol), $T = 273 + \theta$ (θ °C)는 절대온도이며 Q 는 확산의 활성화 에너지이다.



Fig. 5 Transverse crack in weld metal

Fig. 5는 외팔보식 횡형 인장형 횡균열 시험시에 발생한 균열로서 균열은 대체로 용접의 ripple선에 거의 수직방향으로 발생됨을 알 수 있다. 이에 대한 모식적인 기구는 전보⁸⁾에서 개략적인 mechanism을 설명하였지만 이와 같은 횡균열의 발생은 용접시의 확산성 수소가 용접에 의해 해리되고, 온도의 저하와 더불어 철강재료의 수소 고용도가 감소되고, 원자상의 수소가 분자상의 수소로 되어 철강재료 내부압력을 상승시키게 되므로써 발생하는 것으로 사료된다. 예를 들어 0.001% 정도의 수소량일 때 용융철중에서의 내부압력은 0.1~0.2 atm 정도이지만 응고시에는 약 1atm, 700°C에서 40atm, 500°C에서는 약 200atm으로 증가한다. 그리고 상온에서는 수천~수만 atm에 도달하며 변태응력이나 잔류응력 또는 구속응력과의 상호작용에 의해 강의 파괴강도 이상의 힘이 작용하여 균열 발생 원인이 될 수 있다.

또 원자상의 수소는 매우 확산하기 쉬우며, 상온에서도 강 중을 확산하여 전위나 공공과 같은 원자

적인 결함이나 화합물 또는 개재물과 같은 불연속부의 틈새 부분에 집적되어 분자상의 수소로 변환한다. 이와 같은 틈새에 집적된 분자상 수소는 확산되기 어렵고, 압력을 상승시켜 균열을 발생시키게 된다. 또 이러한 확산성 수소는 전위와 같은 격자결합이나 비금속개재물 이외에 결정립계나 조직적으로 불연속한 부분에도 집적하게 된다. 이와 같은 확산성 수소를 함유한 강은 연성이 현저히 낮아지게 되며 이러한 현상을 강의 수소취화(hydrogen embrittlement)라고 하며 강의 횡균열과 밀접한 관련을 갖는다.

특히 확산성 수소는 용접부의 각종 결함을 생성하는 결정적인 역할을 하고 있음이 많이 알려져 있다. 확산성 수소는 재료 내부에 국부적으로 수소의 분압을 높일 뿐 아니라 구속도가 크거나 잔류응력이 클 경우에는 이러한 역학적 인자와 복합적으로 작용하여 hair crack, fish eye와 같은 결함 생성의 원인이 되기도 한다. 또한 확산성 수소는 시간의 경과와 더불어 재료 내부를 확산하여 고농도의 수소 영역을 형성하여 지연균열을 발생시키는 원인이 되기도 한다. 따라서 용접부의 수소 농도는 가능한 최소화하여야 한다. 이러한 지연균열은 확산성 수소 농도가 높거나 용접부에 구속응력이 크게 작용할 경우에는 지연균열 감수성이 매우 커지기 때문에 이의 근본적인 방지 대책은 용접부에 존재하는 확산성 수소 함유량을 줄여야 할 것으로 생각된다.

Fig. 6에는 확산성 수소 함유량을 각각 3.4ml/100g, 6.3ml/100g 및 10.2ml/100g으로 변화시키고 변형률을 0.029~0.21%로 변화시킨 경우의 외팔보식 횡형 인장형 횡균열시험 장치에 의한 균열 시험 결과를 나타낸다.

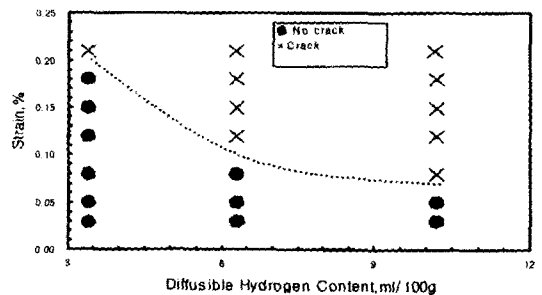


Fig. 6 Transverse crack testing results by cantilever type tensile crack testing jig

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이와 같은 평균열 감수성에는 확산성 수소 함유량과 용접시의 구속도가 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 즉 확산성 수소 함유량이 많을수록, 인장구속도가 클수록 용접금속의 평균열 감수성이 커짐을 알 수 있다.

특히 후판을 용접할 경우에는 압연 집합조직의 존재에 따라 판 두께 방향의 이방성이 매우 크고, 두께가 두꺼움에 기인하는 구속 응력의 증대에 따라 용접 중 또는 냉각시에 수축 스트레인이 작용하게 되므로 이는 중요한 균열 발생 원인으로 작용할 수 있기 때문에 후판의 용접시에는 특히 확산성수소 함유량의 제어가 필수적인 전제조건이 됨을 증명해주는 것이다. 특히 후판을 SAW와 같은 대입열 용접을 채용할 경우에는 용접부의 조직이 조대화되어 한층 더 균열 발생 가능성이 높아질 것이다. 따라서 후판 용접부의 평균열 발생을 방지하기 위해서는 강재의 화학조성, 후판의 두께에 따른 구속 응력, 확산성 수소량, 용접재료의 화학성분, 용접 process 등을 종합적으로 검토하여 용접 균열 감수성을 낮추어야 할 것으로 사료된다.

특히 후판 구조물은 대형인 경우가 많기 때문에 용접시의 냉각속도가 빠르고 이에 따라 용접부의 확산성 수소가 대기중으로 방출되기 어려워지게 되므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 냉각속도를 완만하게 하기 위해서는 예열하는 것도 대책이 될 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 측면에서 후판과 같이 용접시에 큰 구속응력이 작용하는 용접부의 경우에는 가능한 한 확산성 수소 함유량이 적은 용접재료를 사용하는 것이 매우 중요한 균열 발생 방지 대책이 될 수 있을 것이다.

또한 이 그림으로부터 평균열에는 구속 응력이 큰 영향을 끼침을 알 수 있고 이는 용접균열에 여러 가지의 인자가 영향을 끼칠 뿐 만 아니라 또한 이들 인자가 상호작용을 일으키기 때문에 균열의 방지를 위해서는 이들 인자를 종합적으로 검토하여야 함을 의미하는 것으로 사료된다. 특히 최근에는 구조물이 대형화, 거대화되고 있기 때문에 구속력의 증가가 용접균열 방지측면에서 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 대형구조물에서는 경화능이 적고 연성이 좋은 재료를 사용할 필요가 있을 것이다.

3.2 Controlled Thermal Severity(CTS) 시험 결과

Fig. 7에는 상부판의 크기가 130×130mm인 시험편의 용접후 공랭한 경우의 Bithermal부의 균열 발생 상황을 나타낸다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 열적구속도(TSN)가 16으로 크고 확산성 수소 함유량이 10.2ml/100g으로 높은 경우에는 균열이 발생함을 알 수 있다. 그러나 이보다 열적 구속도가 낮고 확산성 수소 함유량이 적을 경우에는 전혀 균열이 발생되지 않음을 알 수 있기 때문에 평균열에는 확산성 수소 함유량과 더불어 구속도가 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

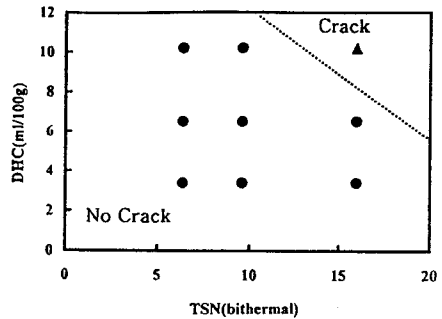


Fig. 7 Result of CTS test for large specimen under air cooled condition

Fig. 8에는 상부판의 크기가 130×130mm인 시험편을 용접중 하부판의 일단을 수냉하여 급랭시킨 경우의 Bithermal부의 CTS 시험 결과를 나타낸다. 이 경우에는 냉각속도가 빨라짐에 따라 열적 구속도가 16인 경우, 확산성 수소 함유량이 6.5ml/100g 이상이 되면 균열이 발생되었고 이에 따라 냉각속도가 빨라지면 더욱 더 균열 발생 감수성이 커짐을 알 수 있다.

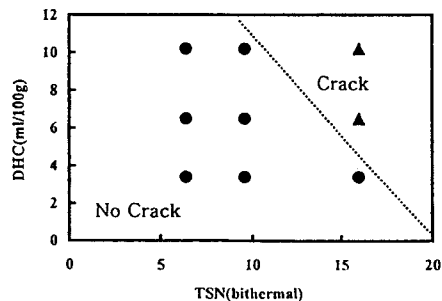


Fig. 8 Result of CTS test for large specimen under rapid cooled condition

Fig. 9에는 상부판의 크기가 75×75mm인 CTS 시험편의 Bithermal부의 공랭한 경우의 시험 결과를 나타낸다. 이 시험 결과 열적 구속도는 동일하더라도 시험편의 길이가 짧기 때문에 구속도가 커진 관계로 확산성 수소 함유량이 10.2ml/100g이고 열적 구속도가 9.6인 경우에도 균열이 발생한다.

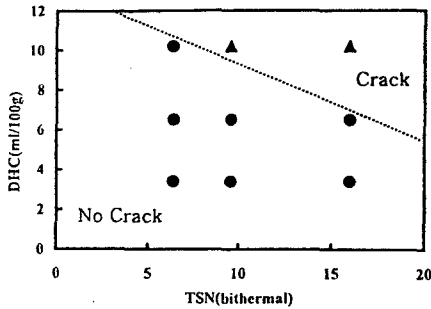


Fig. 9 Result of CTS test for medium size specimen under air cooled condition

Fig. 10에는 시험편 상부판의 크기가 75×75mm인 경우의 Bithermal부의 수랭한 경우에 대한 균열 시험 결과를 나타낸다. 이 경우에도 공랭한 경우에 비해 균열 감수성이 크고 확산성 수소 함유량이 많고 열적 구속도가 클수록 균열이 발생되기 쉬운 결과를 나타내고 있다.

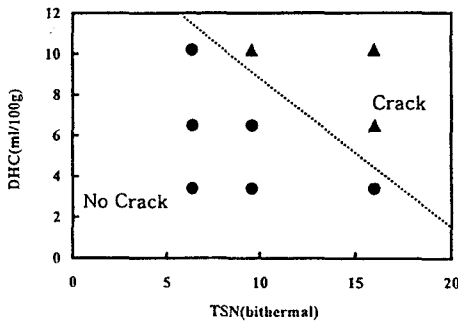


Fig. 10 Result of CTS test for medium size specimen under rapid cooled condition

Fig. 11에는 시험편 상부판의 크기가 130×130mm이고 용접후 공랭한 경우의 Trithermal부의 CTS 시험 결과를 나타낸다. 이 경우에는 Bithermal 부에 비해 열적 구속도가 커지기 때문에 Fig. 9에서 점선으로 표시한 경계 영역을 중심으로 저 구속

도, 저 확산성 수소 영역으로 균열에 민감한 영역이 더 커짐을 알 수 있다.

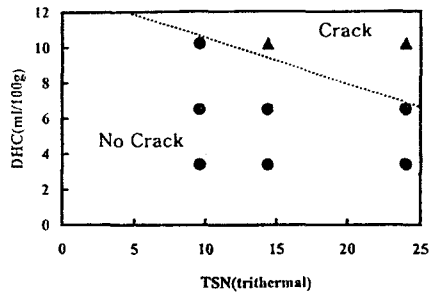


Fig. 11 Result of CTS test for large specimen under air cooled condition

Fig. 12에는 시험편 상부판의 크기가 130×130mm이며 용접 중 일단을 수랭한 경우의 Trithermal부의 균열 시험 결과를 나타낸 것으로 냉각속도가 빨라질수록 확산성 수소 함유량이 적어도 균열이 발생됨을 알 수 있다.

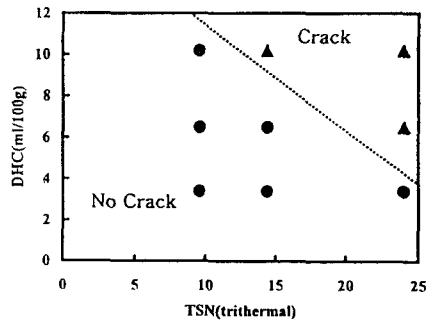


Fig. 12 Result of CTS test for large specimen under rapid cooled condition

Fig. 13에는 시험편 상부판의 크기가 75×75mm인 경우의 Trithermal부에 대한 시험 결과로서 TSN 14.4, 확산성 수소 함유량 10.2ml/100g인 경우와 TSN이 24, 확산성 수소 함유량 10.2ml/100g일 경우에 균열이 발생하고 있다.

Fig. 14에는 시험편 상부판의 크기가 75×75mm이며 용접중 일단을 수랭한 경우의 Trithermal부의 균열 시험 결과를 나타내고 있다. 이 경우에도 이미 설명한 바와 같이 다른 경우와 동일한 경향을 나타내었으며 확산성 수소 함유량이 많고 열적 구속도가

클수록 균열이 발생되기 쉬움을 알 수 있다.

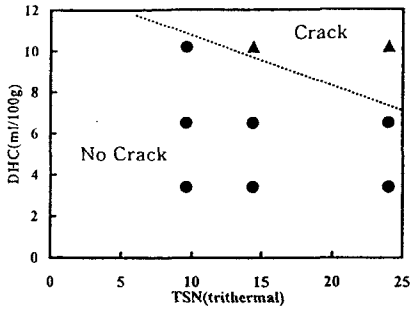


Fig. 13 Result of CTS test for medium size specimen under air cooled condition

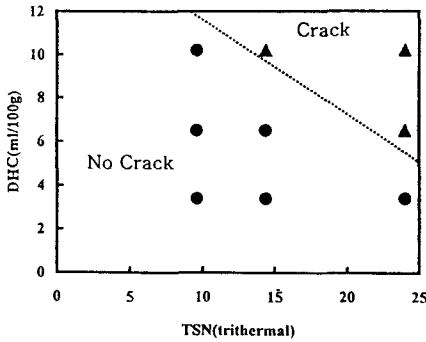


Fig. 14 Result of CTS test for medium size specimen under rapid cooled condition

이상과 같은 CTS 시험 결과를 종합하면 열적 구속도가 커지고, 확산성 수소 함유량이 많을수록 균열이 발생될 수 있는 영역이 넓어짐을 알 수 있다. 즉 확산성 수소 함유량이 증가하고 열적 구속도인 TSN 값이 클수록 균열에 민감함을 알 수 있다.

따라서 용접시에 발생하는 용접금속의 평균열의 발생을 방지하기 위해서는 가능한 한 확산성 수소 함유량을 줄이고 설계 조건을 검토하여 구속도가 작아지도록 하는 것이 예방 대책이 될 수 있음을 알 수 있다. TRC, RRC 및 Implant 시험법 등 용접부의 각종 균열 시험에 사용되고 있는 현재의 각종 시험법은 시험편의 크기가 크고 형상이 복잡할 뿐 아니라 시험편의 가공과 시험에 많은 시간과 노력과 경비를 필요로 하고 있을 뿐 아니라 장치의 가격이 매우 고가인 경우가 많다. 그러나 본 연구에서 채용한 CTS 시험의 경우에는 별다른 시험장치

가 필요하지 않고 시험편의 형상도 간단하기 때문에 균열 감수성 시험에 효율적인 방법임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

용접금속의 평균열 발생을 방지하기 위하여 수행한 일련의 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접금속에 잔류하는 확산성 수소는 용접 평균열의 주원인으로 작용한다. 따라서 용접금속부의 평균열의 발생 방지뿐만 아니라 용접성 향상 측면에서는 반드시 확산성 수소 함유량을 최소화하여야 할 것이다.
- 2) 외팔보식 횡형 인장형 평균열 시험 장치에 의한 평균열 감수성 시험 결과, 용접금속의 평균열은 확산성 수소 함유량과 구속응력의 크기에 크게 의존함을 알 수 있었다. 즉 확산성 수소 함유량이 많을수록 평균열 감수성이 커지는 경향이었으며, 또한 구속도의 증가에 따라 평균열 감수성이 커지기 때문에 평균열 발생을 방지하기 위해서는 역학적인 인자인 이음부의 구속도나 잔류응력 등이 작아지도록 하여야 함을 알 수 있었다.
- 3) CTS 시험 결과, 열적 구속도가 커질수록 평균열이 발생되기 쉬워짐을 알 수 있었고, 또한 확산성 수소 함유량이 많을수록 평균열 감수성이 커지는 경향이였다. 따라서 펠렛 용접부의 용접금속의 평균열을 방지하기 위해서는 이음부의 구속도와 용접부의 잔류응력과 같은 역학적인 인자를 낮춤과 아울러 확산성수소 함유량을 줄이는 것이 매우 중요함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단으로부터 연구비를 지원받아 수행한 연구과제번호 KOSEF 95-2-09-01-02-2로서 한국과학재단의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Stern, I. L., R. Quattrone, "A Multiple Test Approach to the Prediction of Weldment Cracking", Weld. J. Vol. 46-5, pp.203s~216 - s, 1967
- 2) Granjon, H., "Report on the Use of the Controlled Thermal Severity(CTS) Test in Different Laboratories", British Weld. J., pp.3-9, 1963
- 3) Bailey, N., "Establishment of Safe Welding Procedures for Steels", Weld. J., Vol. 51-4, pp.169-s~177 - s, 1972
- 4) Boniszewski, T., "CTS Weldability Tests of $\frac{1}{2}\%$ Mo-B Experimental Steels", British Weld. J., pp.593~612, 1965
- 5) Cottrell, C.L.M., "Controlled Thermal Severity Cracking Test Simulates Practical Welded Joints", Welding Research Council, Weld. J., Vol. 32-6, pp.257-s~272-s, 1953
- 6) Vaughan, H. G. et al, "Hydrogen Embrittlement of Steel and its Relation to Weld Metal Cracking", Brit. Weld. J., pp.40-61, 1957.2
- 7) Beachem, C.D., "A New Model for Hydrogen - Assisted Cracking (Hydrogen Embrittlement)", Metal. Trans., Vol. 3(1972-2), pp.437~451, 1972.2
- 8) 정호신, 엄동석, 이해우, "후판용접부의 횡균열 발생방지에 관한 연구(I)", 한국해양공학회지, Vol. 13, No.3, pp.49-56, 1999