

HSLA-100강 및 HY-100강의 응력제거처리 균열에 관한 연구
A Study on the Stress Relief Cracking of HSLA-100
and HY-100 Steels

朴 太遠*, 沈 仁玉*, 金 英宇*, 姜 晶允**

* 국방과학연구소 ** 부산대학교 금속공학과

Abstract

A study was made to examine the characteristics of base metal and stress relief cracking(SRC) of heat affected zone(HAZ) for HY-100 and Cu-bearing HSLA-100 steels. The Gleeble thermal/mechanical simulator was used to simulate the SRC/HAZ. The details of mechanical properties of base plate and SRC tested specimens were studied. The specimens were aged at 650°C for HSLA-100 steel and at 660°C for HY-100 steel and thermal cycled from 1350°C to 25°C with a cooling time of $\Delta t_{800^\circ\text{C}/500^\circ\text{C}}=21\text{sec}$. corresponds to the heat input of 30kJ/cm.

The thermal cycled specimens were stressed to a predetermined level of 248~600MPa and then reheated to the stress relief temperatures of 570~620°C. The time to failure(t_f) at a given stress level was used as a measure of SRC susceptibility. The strength, elongation and impact toughness of base plate were greater in HSLA-100 steel than in HY-100 steel. The time to failure was decreased with increasing temperature and/or stress. HSLA-100 steel was more susceptible to stress relief cracking than HY-100 steel under same conditions. It is thought to be resulted from the precipitation of ϵ -Cu phase by dynamic self diffusion of solute atoms. Therefore, greater strain concentration at grain boundary of HSLA-100 steel results in the increased SRC susceptibility.

1. 서 론

Cu를 함유한 저합금 고장력(high strength low alloy, HSLA)강은 HY-100강을 대체하여 용접성을 향상시킬 목적으로 개발된 강이다. 이 강은 SRC민감도가 큰 것으로 보고되고 있다. 즉, HAZ생성시 용해되었던 ϵ -Cu상이 SRC시험중에 재석출하여 결정입내가 강화되어, 입계 응력집중이 일어나 입계 파괴가 용이해져 파단 시간과 변형율이 감소되는 것으로 알려져 있다.

Cu를 함유한 HSLA-100강 및 HY-100강의 기계적 특성 및 용접 열영향부의 SRC민감도 등에 대해서는 단편적으로 보고되고 있고, ϵ -Cu상이 SRC시험중에 재석출하여 SRC민감도에 크게 영향을 미치는 것으로 제안되고 있지만, 실제 SRC시험시의 열이력에 따른 석출물의 거동 등에 대해서는 상세히 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 HSLA-100강과 HY-100강에 대해 모재와 용접 열영향부의 특성 및 용접 열영향부에 대해 SRC민감도를 조사하고, HSLA-100강에 대해 각 열cycle 단계 별로 ϵ -Cu상의 거동을 시차주사열분석법으로 조사하여 SRC민감도에 미치는 ϵ -Cu상의 영향을 조사하고자 하였다.

2. 시험재 및 실험 방법

2.1 시험재

본 실험에서 사용한 HSLA-100강과 HY-100강의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다. 시험재는 진공유도용해로 제작한 잉고트를 13mm로 압연한 후 900℃에서 오스테나이트(γ)처리하였으며, 그후 HSLA-100강은 630, 650, 670℃에서, HY-100강은 620, 640, 650, 660℃에서 각각 1시간 동안 열처리하여 공냉하였다.

2.2 실험 방법

모재와 열영향부의 경도는 미소 비커스 경도계를 이용하여 측정하였다. 시효한 모재에 대해 압연 방향의 인장과 충격 특성을 조사하였다. 650℃에서 시효한 HSLA-100강과 660℃에서 시효한 HY-100강에 대해 SRC민감도를 측정하는 시험의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 재현 조건은 140℃/sec.로 1350℃까지 가열하여 5초간 유지한 후 냉각하였다. 800℃에서 500℃구간의 냉각 시간은 25mm 두께의 판을 30kJ/cm의 용접 입열량으로 GMA용접할 때의 냉각 시간에 해당하는 21초로 제어하였다. SRC민감도는 재현된 HAZ시험편에 상온에서 30초 동안 일정 하중을 가한 후, 30초 동안에 시험 온도로 시편을 가열하여 파단되는 시간을 측정하여 평가하였다. 시험 온도는 570, 600, 620℃의 세 조건이며, 응력은 248~600MPa의 범위에서 변화시켰다. 그리고 SRC/HAZ시험전,후의 석출물 거동을 조사하기 위해 시차주사열분석(differential scanning calorimetry, DSC)을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

HSLA-100강과 HY-100강의 시효 온도에 따른 강도와 연신율의 변화를 Fig. 2의 (a), (b)에 각각 나타내었다. 인장강도와 항복강도 모두 HSLA-100강이 HY-100강보다 높은 값을 나타내며 온도가 증가할수록 감소한다. 그리고 (b)에서 보는 바와 같이 연신율도 모든 온도에서 HSLA-100강이 HY-100강보다 더 높다. HY-100강의 탄소(C)량이 HSLA-100강에 비해 많음에도 불구하고 강도가 낮은 것은 HSLA-100강에 첨가된 Cu로 인하여 ϵ -Cu상이 석출하여 강도 증가에 기여하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 1의 SRC시험 모식도에서 응력을 가하기 전의 상태인 용접 열영향부(A.W.)와 시효 처리만 한 모재(B.M.)에 대해 경도 측정 및 충격 시험한 결과를 Fig. 3의 (a), (b)에 각각 나타내었다. (a)에 나타낸 바와 같이 모재의 경도 값은 HSLA-100강이 Hv 282로써 HY-100강의 Hv 260보다 약간 높다. 열영향부의 경도값은 HSLA-100강과 HY-100강이 각각 Hv 322과 Hv 430로서 HY-100강의 용접경화 정도가 훨씬 크다. (b)는 같은 조건에 대해 -50℃에서의 충격 흡수에너지를 비교한 것이다. (a)에서 열영향부의 경도가 높았던 HY-100강이 HSLA-100강보다 충격 인성이 낮다. 모재에 비해 열영향부의 충격 인성이 저하한 것은 열 cycle재현 시험에 의해 생성된 γ 결정립의 조대화가 가장 큰 원인인 것으로 판단된다.

Fig. 4의 (a), (b) 및 (c)는 각각 570℃, 600℃ 및 620℃에서 SRC시험한 결과이다. 시험 온도가 증가할수록 낮은 응력에서 파단되거나 파단 시간이 감소하며, 같은 응력에서는 HSLA-100강이 HY-100강보다 파단 시간이 짧아 거의 모든 범위에서 HSLA-100강의 SRC민감도가 큼을 알 수 있다.

Cu와 관련된 석출물을 조사하기 위해 각 열cycle 단계별로 시차주사열분석을 행하였다. Fig. 5는 그 결과로써 (a)는 900℃에서 1시간 동안 γ 처리한 후 수냉한 시편, (b)는 수냉 후

650℃, 1시간 시효한 시편, (c)는 650℃, 1시간 시효한 시편을 1350℃까지 급열후 냉각한 시편, 그리고 (d)는 SRC시험 완료후 파단면 근처에서 채취한 시편에 대해 열분석한 결과이다. (a)곡선에는 280℃와 500℃부근에서 2개의 발열반응이 나타나고, 시효한 (b)곡선에는 이 발열반응이 나타나지 않으며, 재현 열영향부인 (c)곡선에는 (a)와 같은 곡선을 나타냈다. 그리고 SRC 시험 후인 (d)곡선에는 이 발열반응이 다시 관찰되지 않았다.

(a)곡선의 280℃부근에서 나타나는 작은 발열반응은 기지와 정합인 bcc구조의 Cu-clusters생성에 의한 것이며, 500℃부근에서의 발열반응은 fcc구조인 ε-Cu상의 생성에 기인한 것이다. 시효처리한 후 측정된 (b)곡선에 발열반응이 나타나지 않는 것은 시효처리에 의해 이미 상이 석출되었기 때문이다. (c)곡선에서 발열반응이 다시 나타난 것은 1350℃로 가열시 석출상이 재고용되었기 때문에 그 후에 수행된 열분석측정 가열 과정에서 Cu-clusters 및 ε-Cu상이 재석출하여 발열반응을 나타내는 것으로 판단된다. (d)는 시효처리한 (b)와 같은 곡선을 나타낸다. 이것은 SRC처리중에 Cu-clusters 및 ε-Cu상이 이미 석출되었음을 의미한다. 그 결과 HSLA-100강이 HY-100강보다 상대적인 결정입내 강화가 커져 입계응력집중이 발생함으로써 SRC민감도가 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

1. 모재의 인장강도, 항복강도, 연신율은 HSLA-100강이 HY-100강보다 더욱 높다. 용접 열영향부의 경화 정도는 HSLA-100강이 HY-100강보다 낮고, 충격인성은 HSLA-100강이 HY-100강보다 높다.
2. 570℃, 600℃, 620℃에서 SRC시험시 응력의 증가에 따라 HSLA-100강이 HY-100강보다 파단 시간이 감소하며 SRC민감도가 크다. 이것은 HSLA-100강에 생성된 Cu석출물에 기인된 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) A.Dhooge, A.Vinckier : Reheating cracking-Review of recent studies(1984-1990), Welding in the World, Vol.30. No.3/4, (1992), pp.44~71.
- 2) 後藤明信 : SR害の發生機構とその對策, 日本溶接學會誌, 第61권, 第6號, (1992), pp.462~472.
- 3) J.F.Lancaster : Metallurgy of welding, George allen and unwin (1980), p.156.
- 4) J.P.Balaguer, Z.Wang, E.F.Nippes : Stress-Relief Cracking of a Copper Containing HSLA Steel, Welding Research Supplement, April, (1989), pp.121s~131s.

Table 1 Chemical compositions of HSLA-100 and HY-100 steels used. (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb	V	S-Al	Fe
HSLA-100	0.038	0.30	0.93	0.006	0.008	3.67	0.65	1.52	0.40	0.031	-	0.031	Bal.
HY-100	0.17	0.22	0.25	0.016	0.005	3.0	1.5	-	0.39	-	0.02	0.045	Bal.

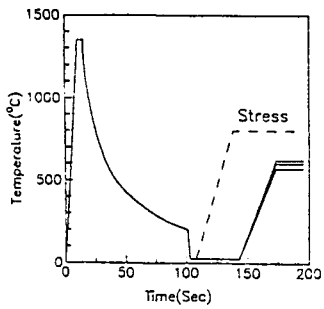


Fig. 1 Schematic representation of simulated HAZ/SRC test used.

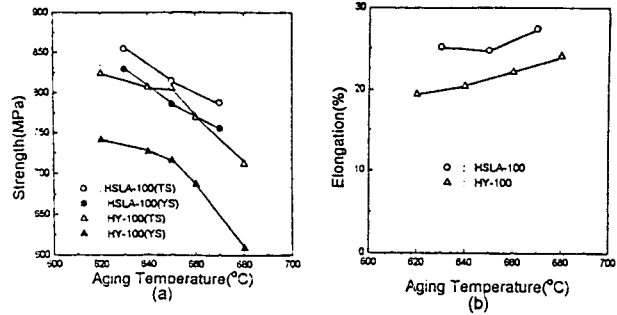


Fig. 2 Variation of strength(a) and elongation(b) with aging time of HSLA-100 and HY-100 steels.

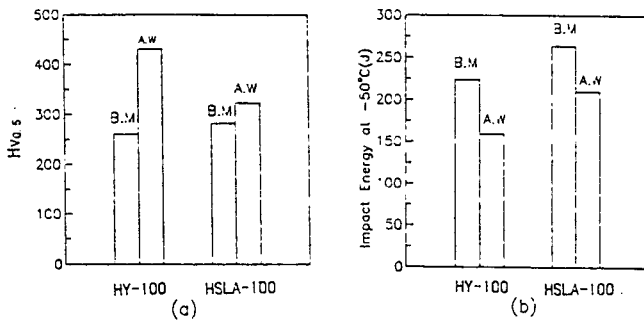


Fig. 3 Changes of hardness(a) and impact energies(b) in base metal and as-welded state of HSLA-100 and HY-100 steels.

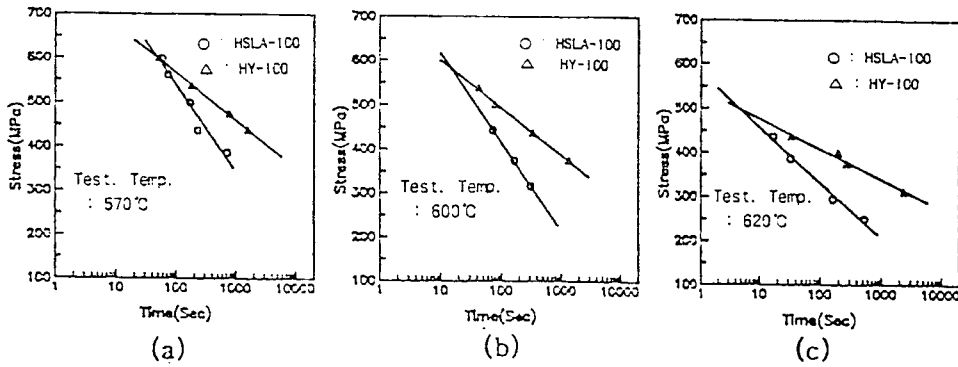


Fig. 4 Relationship of stress and rupture time in SRC test of HSLA-100 and HY-100 steels. (a) 570°C (b) 600°C (c) 620°C

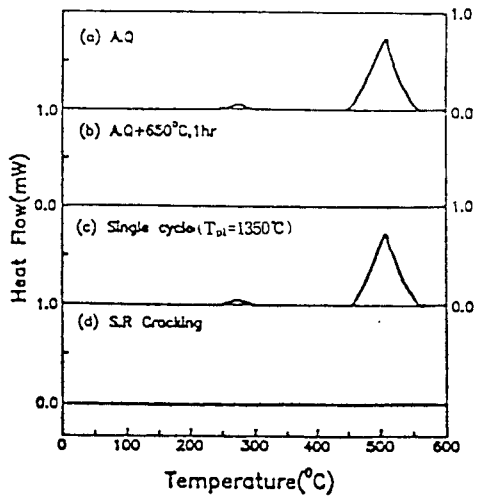


Fig. 5 DSC curves with heat-treatment.