

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

용접된 316LN 스테인리스 강의 피로특성에 미치는 용접방법의 영향

Fatigue Properties of Type 316LN Stainless Steel Welded with Different Welding Process

김대환, 이현승, 한창희, 류우석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

용접부의 피로수명을 평가하기 위하여 용접방법과 용접봉을 변화시키면서 피로수명을 측정하였다. 용접방법을 SAW (Submerged Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), SMAW (Shielded Metal Arc Welding), 용접봉을 308L과 316L로 변화시켰다. 용접시편의 항복강도는 모재에 비해 증가하였고, 최대인장강도는 거의 비슷하였다. 용접시편의 연신률은 모재에 비해 감소하였다. 항복강도는 GTAW가, 연신률은 SAW가 가장 우수하였다. 용접부의 피로수명이 모재에 비해 크게 감소하였다. 피로수명은 상온과 600℃에서는 SAW가 300℃에서는 SMAW가 우수하였다. 308L보다는 316L 용접봉의 특성이 우수하였다.

Abstract

Tensile properties and fatigue life were measured by the change of welding process and welding wire. Welding methods were changed with SAW (Submerged Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Welding wires were type 308L and 316L stainless steel. Yield strength of weldment was higher and elongation of weldment was lower than that of base metal.

UTS of weldment was almost same as that of base metal. Yield strength of GTAW and elongation of SAW were better than those of other welding process. Fatigue life of weldment was lower than that of base metal. Fatigue life of SAW was the best at RT and 600°C but fatigue life of SMAW was the best at 300°C. Type 316L welding wire was the better than type 308L welding wire.

1. 서론

경수로의 노내구조물과 배관, 액체금속로의 압력용기 등과 같은 오스테나이트 스테인리스 강 구조물은 용접에 의해서 구성되는데 오스테나이트 스테인리스 강은 용접성이 양호한 것으로 알려져 있으나 고온균열 감수성이 높은 문제점이 있다. 용접부에서 발생하는 고온균열은 용접이 끝나는 시점에서 발생하여 고온 저주기 피로수명을 현저히 감소시키므로 용접부의 피로특성이 원자력 발전소 구조물의 수명을 제한하는 중요한 인자가 된다. 용접부의 고온균열 감수성에 영향을 미치는 인자는 용접부에 존재하는 페라이트 양인데 용접부에 페라이트가 전혀 없으면 용접부 조직이 조대해지고 입계편석이 심해져 오히려 고온균열 감수성이 증가하게 되고 페라이트 량이 지나치게 많아지면 기계적 특성과 부식 특성을 저하시키는 것으로 알려져 있다[1-4]. 이러한 페라이트 거동은 용접부의 조성, 페라이트 함량과 형태, 사용온도와 시간 등에 따라서 많은 차이를 보이는 것으로 알려져 있으므로[5-7] 본 연구에서는 용접부내의 페라이트가 용접부의 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용접방법, 용접봉, 모재 등을 변화시키면서 용접된 316LN 스테인리스강으로 온도변화에 따른 저주기 피로수명을 평가하여 모재에 비해서 수명이 감소하는 원인을 페라이트의 관점에서 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2. 1. 용접시편 제작

실험에 사용된 Type 316LN 스테인리스강과 용접재의 화학조성을 표 1에 나타내었다. 모재 시편은 1100°C에서 1시간 용체화 처리하여 수냉하였으며 압연방향이 시편의 길이방향이 되도록 채취하였고, 용접시편은 압연방향에 수직인 방향으로 용접하였으며 압연방향에 용접부가 수직으로 용접된 시편에 대하여 가로방향의 시편을 채취하였다.

용접시편의 용접방법에 따른 용접조건을 표 2에 나타내었다. 6C14 스테인리스강은 피복 아크 용접(Shielded Metal Arc Welding, SMAW) 방법과 보호가스로 Ar 가스를 사용하여 가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) 방법으로 용접하였고, 6C15 스테인리스강은 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding, SAW) 방법과 보호가스로 Ar과 N₂의 혼합가스를 사용하여 GTAW 방법으로 용접하였으며, 6N34 스테인

리스강은 SAW 방법으로 용접하였다.

2.2. 실험조건

인장시험

상온 ~ 700℃의 공기중 분위기에서 변형속도 $2 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 의 변위 제어로 Instron 4505를 사용하여 수행하였다. 고온 인장 시편의 형상은 평행부 길이가 25mm이고 직경이 4mm인 봉상 시편을 사용하였고 용접시편의 경우 용접부가 평행부의 중앙에 위치하도록 제작하였다.

저주기 피로시험

상온 ~ 600℃, 공기중, 전체변형범위 0.8% ~ 1.5%, 변형속도 $2 \times 10^{-3}/\text{sec}$, 완전역전 삼각파의 조건으로 시편에 Extensometer를 직접 부착하여 변형률 제어로 Instron 8502를 사용하여 수행하였다. 저주기 피로 시편의 형상은 평행부 길이가 8mm이고 직경이 7mm인 봉상 시편을 사용하였으며 용접시편의 경우 용접부가 평행부에 위치하도록 제작하였다. 피로수명은 포화 응력의 75%되는 사이클로 정의하였다. 모든 시험은 공기 중에서 수행하였으며 시험기간 중 온도편차를 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내로 제어하였고 온도의 균일함을 얻기 위하여 시험온도에서 1시간 유지한 후 시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 인장특성

용접시편의 항복강도가 모재에 비해 약 15~25% 증가하였으나 최대 인장강도 값은 오히려 모재에 비하여 4~10% 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 연신률의 경우 모재에 비해 용접시편이 약 40~65% 정도 감소함을 보였다. 가공경화지수(N)의 경우 용접시편에 비해 모재의 값이 크게 나타났기 때문에 이것이 최대인장강도의 증가와 관련이 있는 것으로 판단된다. 용접방법에 따라서 항복강도의 경우 $\text{GTAW} > \text{SMAW} > \text{GTAW+N} > \text{SAW}$, 연신율은 $\text{SAW} > \text{SMAW} > \text{GTAW} > \text{GTAW+N}$ 의 순으로 증가하는 경향을 나타내었지만 최대인장강도는 용접방법에 따라서 거의 변화가 없는 경향을 나타내었다.

3.2. 피로특성

용접방법에 의한 피로수명 평가

용접시편의 파단은 온도와 변형범위와는 관계없이 용접부에서 발생하였다. 모재와 용접시편의 피로수명을 비교할 때 용접에 의해서 피로수명은 용접방법에 따라서 약간의 차이는 있지만 상온에서는 70%, 600℃에서는 50% 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 피

로강도는 용접에 의해서 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 용접방법에 따라서 피로수명이 차이가 나는데 대체적으로 SAW 용접방법이 GTAW과 SMAW 보다 피로수명이 증가하는 경향을 나타내었다.

용접부의 상 변화

각 온도에서 저주기 피로시험 후 용접부에서 측정된 페라이트 함량을 측정하였다. 용접방법에 따라서는 316L 용접봉을 사용한 SAW가 308L 용접봉을 사용한 GTAW와 SMAW보다 페라이트 함량이 감소하였다.

상온에서 피로시험한 경우 변형범위가 증가하면 페라이트 함량이 증가하지만 600℃에서는 거의 일정한 경향을 나타내었고 600℃보다는 상온에서 페라이트 함량이 증가하였다. 이와 같이 피로시험에 의해서 페라이트 함량이 증가하는 것은 소성유기 마르텐사이트가 발생하였기 때문으로 판단되고 600℃에서 페라이트 함량의 변화가 없는 것은 600℃는 소성유기 마르텐사이트가 발생하는 온도보다 높은 온도이기 때문이다. 델타페라이트 및 소성유기 마르텐사이트는 저주기 피로수명을 감소시키는 것으로 알려져 있으므로 SAW가 GTAW와 SMAW보다 피로수명이 증가하는 결과와 페라이트 함량의 변화와 일치하는 경향을 나타낸다. 600℃에서는 소성유기 마르텐사이트가 발생하지 않지만 피로수명을 감소시키는 시그마 상이 발생 할 수 있는 온도이기 때문에 용접부에서 발생한 상의 변화가 피로수명에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

용접방법을 다르게하여 용접된 316LN 스테인리스 강으로 인장시험과 저주기 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용접에 의해서 항복강도는 증가하고, 연신율은 감소하지만, 최대인장강도는 거의 일정하였다.
2. 항복강도에는 GTAW가 연신율에는 SAW가 우수한 특성을 나타내었고, 최대인장강도는 용접방법에 따라서 큰 차이가 없었다.
3. 용접에 의해서 저주기 피로수명은 감소하였다.
4. SAW 용접방법이 대체적으로 우수한 피로특성을 나타내었다.
5. 316L 용접봉이 308L 용접봉보다 우수한 특성을 나타내었다.
6. 용접부의 소성유기 마르텐사이트 함량이 감소하면 저주기 피로수명은 증가하였다.

후 기

연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 중장기사업중 고온강도 평가 및 신재료 기술개발 과제에서 수행한 결과의 일부분입니다.

참 고 문 헌

1. D.T. Llewellyn, Steels: Metallurgy and Applications, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992, 253.
2. Y.P. Lin, G.T. DFinlan, J.W. Steeds, Welding Metallurgy of Structural Steels, 1987, 531.
3. S.R. Keown and R.G. Thomas, Metals Sci., 15, 1981, 386
4. J.K. Lai and J.R. Haigh, Weld. J., Jan. 1979, 1s.
5. A.A. Tavassoli, A. Bisson, and P. Soulat, Metals Sci., 18, 1984, 346.
6. M.J. Cieslak, A.M. Ritter, and W.F. Savage, Weld. J., Jan., 1982, 1s.
7. A.M. Riter, M.J. Cieslak, and W.F. Savage, Metall. Trans., 14, 1983, 37.

Table 1. Chemical composition of base metal and welding wire.

Mater.	Spec. ID	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	B
Base metal	6C14	0.034	0.47	1.72	0.023	0.001	18.09	11.5	2.71	0.15	0.0023
	6C15	0.022	0.53	0.57	0.02	0.001	17.69	10.6	2.61	0.11	-
	6N34	0.022	0.7	1.01	0.029	0.005	17.15	12.3	2.35	0.10	0.003
Weld metal	E308L	0.03	0.60	1.4	0.018	0.008	20.4	9.9	-	-	-
	ER308L	0.02	0.32	1.9	0.018	0.008	20.6	10.2	-	-	-
	ER316L	0.02	0.39	1.87	0.018	0.008	18.6	11.8	2.2	-	-

Table 2. Welding condition for each welding process

Welding process	Weld metal	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Welding pass	Rod diameter (mm)
SMAW	E308L	110-123	18-20	12-13	68th	4.0
GTAW	ER308L	110-115	13-14	9-10	68th	2.4
SAW	ER316L	450-550	32-34	40	2th	4.0
GTAW+N	ER316L	110-115	13-14	9-10	68th	2.4

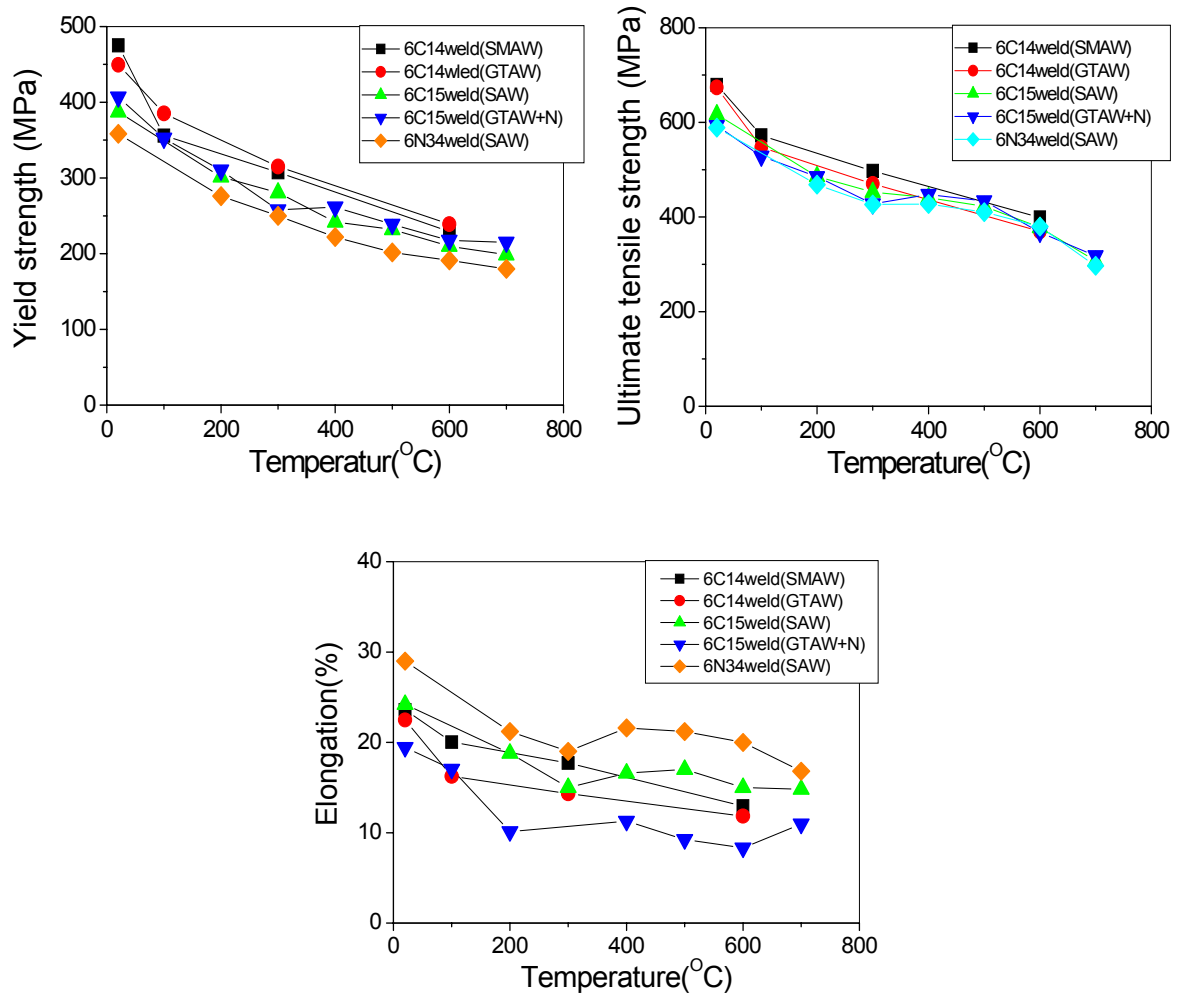


Fig. 1. Tensile properties with welding process for type 316LN stainless steel.

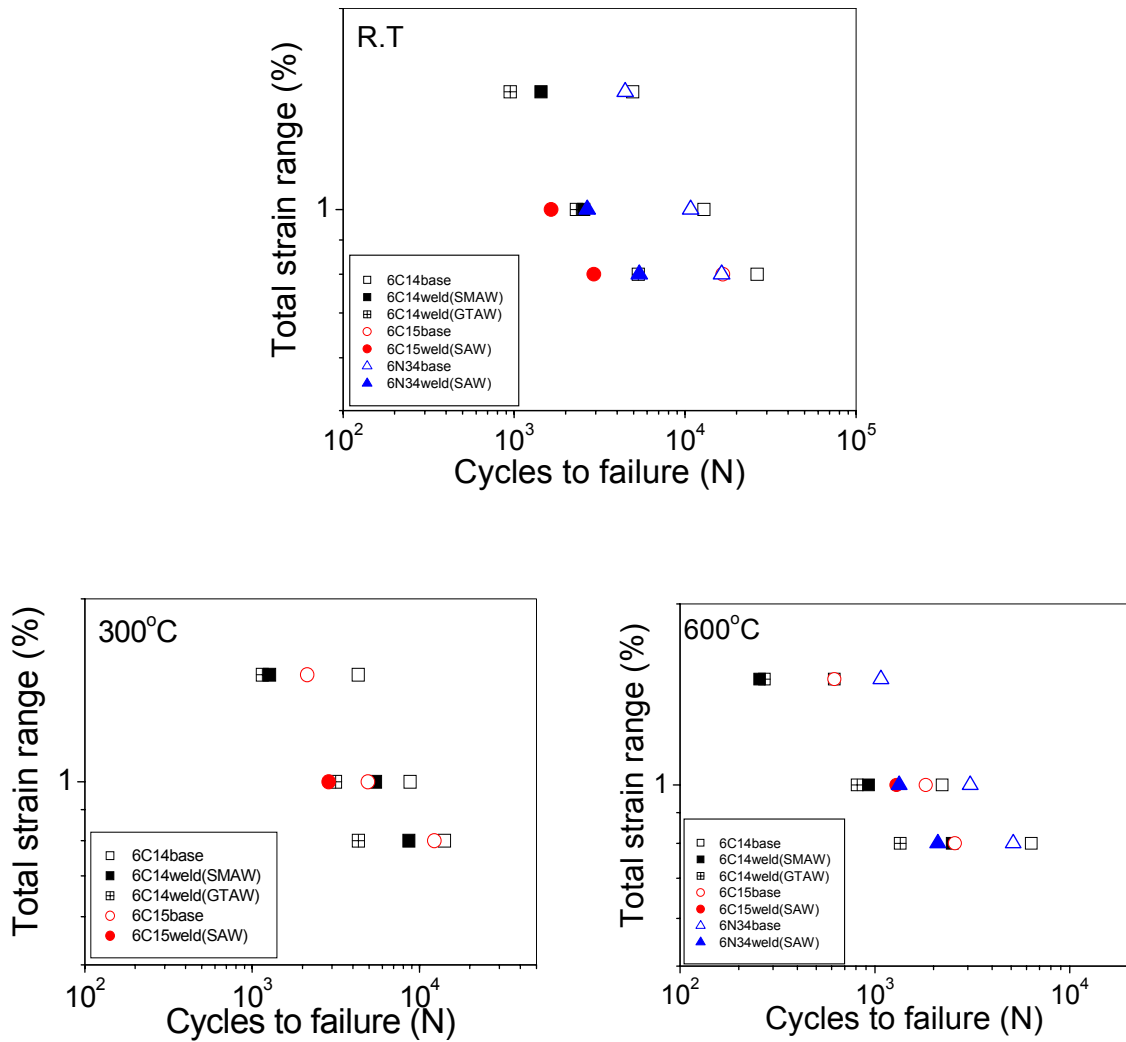


Fig. 2. Low cycle fatigue life with welding process for type 316LN stainless steel.

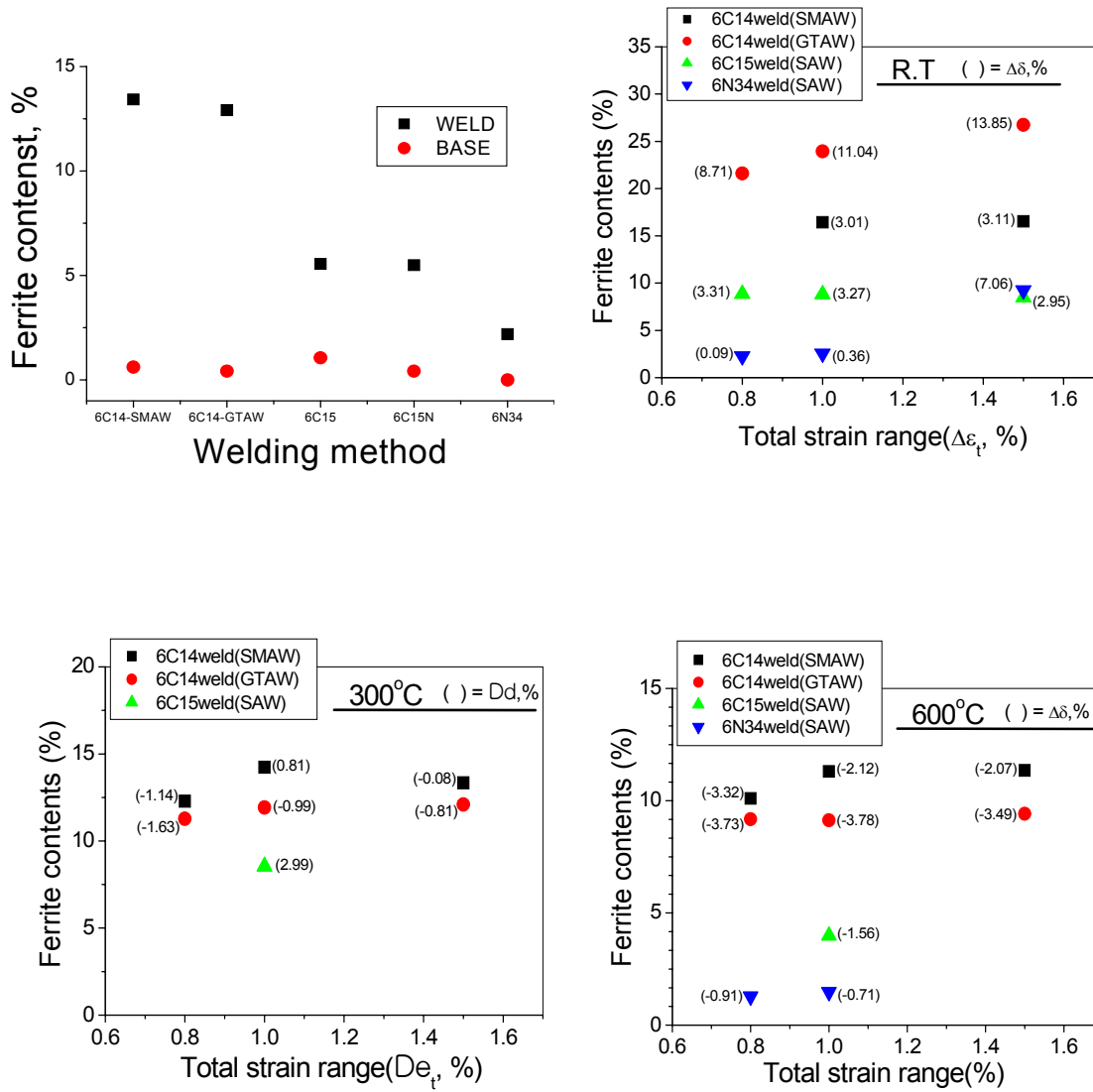


Fig. 3. Ferrite content with welding process after low cycle fatigue test for type 316LN stainless steel.