

오스테나이트계 스테인레스강 용접부의 DELTA-FERRITE 생성인자

문 영 훈* · 허 성 도*

1. 서 론

발전설비 및 화학설비 등 양호한 강도와 내식성을 요하는 부위에 오스테나이트계 스테인레스강(Austenitic Stainless Steel)의 이용이 크게 증가하고 있으며, 이러한 오스테나이트계 스테인레스강 용접에 관한 연구도 최근 많이 행해지고 있다.¹⁻¹³⁾

본 연구는 오스테나이트계 스테인레스강의 용접물성을 크게 좌우하는 δ -페라이트에 관한 것으로서, δ -페라이트가 용접부의 조직¹⁻⁵⁾ 및 물리적⁶⁻⁸⁾ 성질에 미치는 영향을 고려하여 δ -페라이트의 생성에 관한 여러 인자를 중점적으로 고찰하였다. 용착부에 δ -페라이트가 존재하게 되면 용접시 열간균열이 크게 감소한다. Brooks와 Williams¹⁾는 BCC조직인 δ -페라이트가 P·S 등의 해로운 원소를 고용함으로써, 입계에 편석될 수 있는 P·S의 양을 줄여주어 열간균열이 감소한다고 하였고, Rollason과 Bystram²⁾은 δ -페라이트 생성에 따른 상경계(Phase Boundary)의 증가가 상대적으로 단위계면당 편석되는 불순물 농도를 감소시켜 열간균열이 감소된다고 하였다. 또한 δ -페라이트의 낮은 열팽창계수가 열간균열을 야기시키는 수축응력을 감소시켜 열간균열이 방지된다는 등 많은 이론⁶⁻⁹⁾들이 δ -페라이트의 열간균열 방지이유로서 설명되고 있다. 이 이외에도 δ -페라이트는 다층용접시 전층 비이드(Bead)의 열영향부를 따라 형성되는 Fissure⁴⁾의 방지에도 결정적 역할을 하는 등 많은 영향을 미친다. 그러나 δ -페라이트는 고온에서(550~900°C) 시그마(Sigma)상⁵⁾으로 변태되어 심한 물성저하를 초래하고, 내부식성을 감소시키므로, δ -페라이트

의 영향을 정확하게 고려해 주어야만 건전한 용접부 및 요구물성치를 얻을 수 있게 된다.

여기에서는 이러한 δ -페라이트 생성에 영향을 미치는 주요인자를 실험을 통하여 고찰함으로써, 오스테나이트계 스테인레스강 용접부 δ -페라이트의 제어에 관한 정량·정성적 근거를 제시하고자 하였다.

2. 오스테나이트계 스테인레스강 용접부의 δ -페라이트

δ -페라이트는 구조가 BCC로서 오스테나이트(FCC 구조)와는 기계적 화학적 성질에서 많은 차이¹⁾를 보인다.

용접시 형성되는 δ -페라이트의 함량은 5~15% 정도인데 이러한 δ -페라이트의 함량 및 형상은 함유 원소 성분 및 용접변수(전류·전압·속도) 등에 의해 결정된다. 용접시 생성되는 δ -페라이트는 용접시 빠른 냉각속도로 인한 비평형(non-equilibrium) 응고조직으로서, 오스테나이트 기지(matrix)에 미세하게 분포한다. 준안정상이므로 열이 가해지면 합금원소의 확산이 활성화되어 함량 및 형상이 변하게 되며, 생성 δ -페라이트는 그 형상에 따라 Vermicular, Lathy, Globular¹⁰⁾ 등으로 분류한다.

용착부는 가열과 냉각의 복잡한 열사이클로 인해 여러형상의 δ -페라이트가 공존하는 경우가 대부분이지만, 대개 Vermicular와 Lathy의 비율이 높은 것이 일반적이다.^{1,10,12)}

이러한 δ -페라이트는 Schaeffler나 Delong Diagram에 의해 함량을 예측할 수 있으며, 최근에는 Mössba-

* 정회원, 창원. 한국중공업(주) 용접기술부(KHIC)

회절법,¹¹⁾ 자기(Magnetic)측정법¹²⁾ 등을 이용한 측정값으로 δ -페라이트함량을 결정하는 것이 일반적 추세이다.

3. δ -페라이트의 생성기구

오스테나이트계 스테인레스강 용접시 형성되는 δ -페라이트의 변태과정은 다음의 상변태도에 의해 설명되어 진다(Fig. 1)

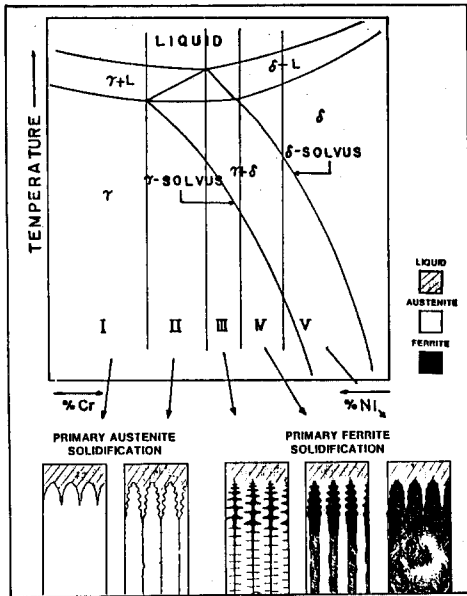


Fig. 1. Fe-Cr-Ni Pseudo phase diagram of austenitic stainless steel

용접부의 변태는 비평형응고(Non-equilibrium Solidification)이므로, 상변태도상의 온도조성과 실제 용접부의 변태사이에는 많은 차이가 존재한다. 위 Fig. 1의 변태과정을 (Cr-당량/Ni-당량)에 의해 5가지로 분류하여 각각의 변태과정을 아래에 나타내었다.

- (I) : 용착금속은 오스테나이트로 완전화 응고하고 더 이상의 변태가 일어나지 않는다. (Cr-당량/Ni-당량이 작다)
- (II) : 오스테나이트가 먼저 형성되면서 δ -페라이트가 잔류액상으로부터 조성적 과냉에 의해 형성된다. (Eutectic Ferrite)
- (III) : δ -페라이트가 먼저 형성되면서 오스테나이트가 잔류액상으로부터 형성 된다. 형성된 δ -페라이트가 고온영역을 냉각해 내려오는 동안

오스테나이트로 빠른 변태를 일으켜 최종조직의 δ -페라이트 함량은 높지않다.

- (IV) : 'III'과 비슷하나 형성된 δ -페라이트가 냉각해 내려오는 동안 오스테나이트로 충분히 변태하지 못해 δ -페라이트 함량이 높다.
- (V) : 용착금속이 δ -페라이트로 완전히 응고한 후 오스테나이트가 고상변태(solid state transformation)에 의해 석출한다.

위의 5가지 분류를 최초 변태를 일으키는 상에 따라, (I) (II)를 primary 오스테나이트응고, (III)(IV) (V)를 primary 페라이트응고로 분류하는데, 일반적으로 primary 페라이트응고를 거친 용접부의 물성이 primary 오스테나이트 응고의 경우보다 우수한 것이 일반적 경향이다.^{10,12)}

4. δ -페라이트 형성에 영향을 미치는 인자에 관한 실험적고찰

Test시편 시험용접부의 δ -페라이트 함량측정은 상대적인 비교의 정확성을 기하기 위해 Ferritescope를 사용하였으며, 본 실험에 사용한 Ferritescope는 독일 Fisher사의 Ferrite-Gehaltmesser 2.05였다.

Ferritescope는 δ -페라이트의 magnetic permeability로부터 함량을 측정하는 장치이므로, 측정시 오차를 줄이기 위해 측정부위의 조도(roughness)를 연마지 #1000정도로 유지한 후 WRC의 calibration standard¹³⁾에 근거해서 δ -페라이트의 함량을 측정하였다. 정확하고 객관적인 시험치를 얻을수 있도록 많은 시행을 행하였으며, 측정값의 최대·최소·평균값을 구하였다.

각 시험용접 조건은 각 test특성별로 적정시험조건을 선정하였기 때문에, 각 단락별로 용접조건을 표기하여 두었다.

4.1. 화학조성의 영향

화학조성과 δ -페라이트 생성 정도의 상관관계를 알아보기 위해 시험용접부의 성분분석 결과를 δ -페라이트 함량과 비교해 보았다.

Table. 1에서 (Cr-당량/Ni-당량)의 변화에 δ -페라이트 함량이 크게 의존함을 알 수 있으며, (Cr-당량/Ni-당량)이 증가할수록 δ -페라이트 함량이 증가하였다. Ferritescope로 측정된 페라이트 함량치와 Diagram에서 계산된 함량사이에는 다소의 차이가 생기는데, 이러한 차이는 열 history가 복잡할수록 더욱 커

Table 1. Influence of chemical composition on ferrite content.

용착금속	Chemical Analysis (%)									Ferrite (%)		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	N	Cr량/Ni량	A*	B*	C*
316L	0.023	0.81	0.94	18.07	12.77	2.4	—	0.064	1.557	5.5%	5%	3.8%
347	0.042	0.54	1.25	19.57	10.54	0.16	0.36	0.05	1.667	6.3%	6%	4.13%
308	0.036	0.51	1.41	16.86	10.53	0.055	—	0.03	1.679	6.4%	6.2%	6.32%
309	0.041	0.94	1.24	2.35	12.85	0.05	—	0.054	1.698	11.4%	13.3%	9.3%
309MoL	0.022	0.87	1.19	22.6	13.8	2.46	—	0.059	1.748	13%	15%	14.57%

용접조건: ϕ 3.2 SMAW, Bead on Plate 80-120(A), 21-24(V), 8-9in/Min. DCRP

* A: Calculated Ferrite % (Schaeffler Diagram) B: Calculated Ferrite % (Delong Diagram)

C: Measured Ferrite % (Fisher's Ferritescope)

질 것으로 예상할 수 있다. 이것은 열history의 변화에 따른 화학조성의 변화는 무시할 수 있지만 열history에 민감한 δ -페라이트의 함량과 형상은 큰 폭으로 변할 수 있으므로, 화학조성만으로 예측되는 Diagram의 값은 실제값과 차이가 나게 된다.

합금원소는 용착부 δ -페라이트 생성에 일차적으로 영향을 미치며 특히 페라이트 형성원소인 Cr, Mo와 오스테나이트 형성원소인 Ni, C, N의 균형이 최종 조직의 δ -페라이트 함량을 좌우한다고 볼 수 있다.

4.2. 냉각속도의 영향

용접시 냉각속도 변화에 따른 용접미세조직변화 및 δ -페라이트 함량변화를 알아보기 위해 냉각속도들

Table 2. Influences of cooling rate on ferrite content.

냉각구분	시험방법	평균 Ferrite함량	
		308L	316L
급냉	용접후 1000°C부근에서 물속 분사	7.0%	4.5%
공냉	일반 용접	6.1%	4.1%
서냉	600°C후열, 400°C후열	4.3%	4.0%

용접조건: ϕ 1.2, GTAW 180-250(A), 12-16(V), 12-14in/Min., DCSP.

변수로 δ -페라이트 함량변화를 관찰하였다. (Table. 2) 냉각속도에 따른 δ -페라이트 함량변화는 $\delta/7$ 의 변태

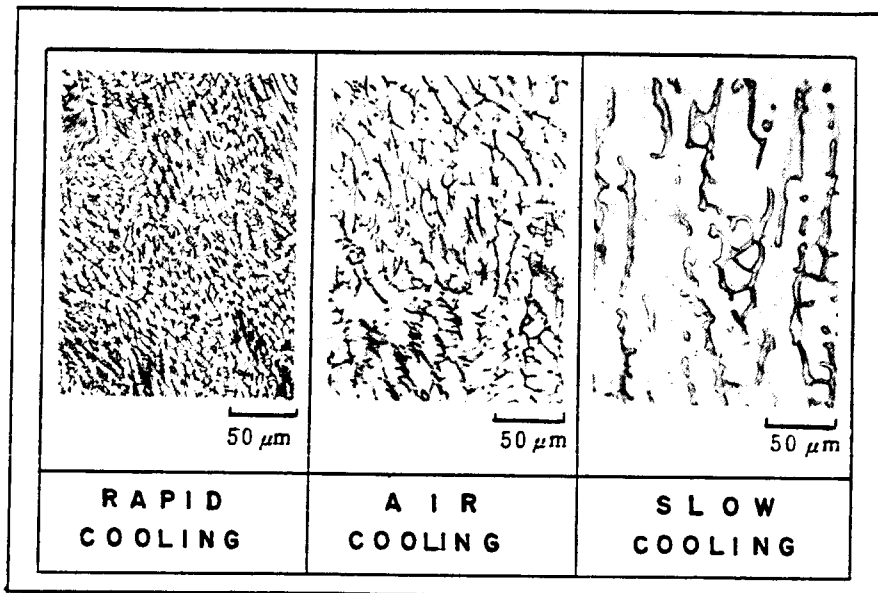


Photo 1. Microstructure changes at various cooling rate (308L)

속도(kinetics)에 관련되며, 이 변태속도는 합금원소의 확산에 크게 의존한다. 즉, 냉각속도가 클 경우에는 수지상정(dendrite)의 거리가 좁아지고, 미세해지며, 변태를 위한 합금원소의 확산거리가 감소하므로, δ -페라이트의 오스테나이트변태가 용이해진다. 반면, 빠른 냉각속도로 인해 고온유지시간이 상대적으로 줄어들어 확산을 충분히 일으킬수 없게 되므로 이러한 상반되는 두 인자가 동시에 작용해서 변태가 일어나게 된다. Table. 2에서 냉각속도가 빠를수록 δ -페라이트 함량이 증가하는 것으로 보아, 일단 형성된 primary페라이트가 오스테나이트로 변태(고용)하는데는, 확산이 일어날수 있는 온도에서의 유지시간이 더욱 중요한 인자로 작용함을 알 수 있으며, photo. 1.의 냉각속도에 따른 미세조직 변화도 이러한 사실을 뒷받침해 주고 있다.

4.3. 입열량의 변화

'4.2'에서 δ -페라이트 생성기구를 보면 합금원소의 확산이 δ -페라이트 생성과 고용에 큰 역할을 함을 알수 있다.

일반적으로 입열량이 증가할수록 냉각속도가 줄어들어 고온유지시간이 상대적으로 길어진다. 따라서 입열량의 차이가 δ -페라이트 함량에 미치는 영향을 알아봄으로써, 냉각속도 및 그외 다른 인자의 영향을 간접적으로 고찰해 보았다.

Table. 3.에 시험용접 조건을 나타내었고, 각 조건별 δ -페라이트 함량변화를 Fig. 2.에 나타내었다.

Table 3. The welding parameter and calculated heat input.

입열조건	Process	용접봉 직경	전류 (A)	전압 (V)	속도 (in/Min)	입열량 (KJ/in)
I	SMAM	ϕ 2.6	70	20-24	8-9	12.1
II	SMAM	ϕ 3.2	105	21-24	8-7	18.1
III	SMAW	ϕ 4.0	135	21-25	8-9	23.3
IV	FCAM	ϕ 1.2	220	28	9-10	50
V	FCAW	ϕ 1.6	250	30	9-10	50
VI	FCAW	ϕ 1.6	280	32	9-10	59.7

Fig. 2.에서 저입열용접인 SMAW의 경우에는 입열량이 증가함에 따라 δ -페라이트 함량이 증가하는 반면, 대입열용접인 FCAW의 경우에는 입열량 변화에 덜 민감하며, 입열량이 증가함에 따라 감소하는 경

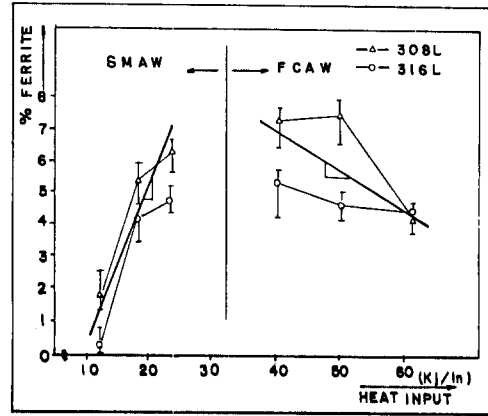


Fig. 2. Relationship between ferrite content and heat input

향을 보인다.

정성적으로 용착부 δ -페라이트 함량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

최종페라이트함량

= 생성페라이트(A) - γ 로 변태한페라이트(B)

위식의 (A)항과 (B)항은 primary 페라이트 변태양생 및 냉각속도에 크게 의존한다고 볼 수 있으며, 본 실험의 결과로 볼때, 입열량 변화가 저입열용접의 경우에는 (A)항에 크게 영향을 주는 반면, 대입열용접의 경우에는 (B)에 크게 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. 즉 SMAW 'I'의 저입열용접시 308L, 316L 공히 δ -페라이트 함량이 매우 낮은데, 이것은 저입열용접의 빠른 냉각으로 인해, primary 페라이트 생성을 일으킬 수 있는 한계냉각속도를 초과한 결과로 (A가 크게 감소) 생각되며 입열이 충분히 증가할때 페라이트 함량이 크게 증가한다는 사실이 이를 뒷받침한다. 반면 FCAW는 대입열용접이므로 일단 형성된 primary페라이트의 오스테나이트 변태(B)가 더욱 크게 영향을 미쳐, 입열량 증가에 따라 δ -페라이트가 감소하는 경향을 보였다. 여러 실험 결과, 저입열용접(SMAW, GTAW)은 입열이 클수록 δ -페라이트함량이 증가하는 경향을 보였으며, 대입열용접(SAW, FCAW)은 입열이 증가할수록 δ -페라이트 함량이 감소하는 경향을 보였다.

4.4. 열처리의 영향

오스테나이트계 스테인레스강 용착부는 Fig. 1.에서 알 수 있듯이, γ -solvus이하의 온도에서 유지될 경우 δ -페라이트의 변태가 확산에 의해 촉진되어 δ -페라

이트 함량이 감소한다. 또한 δ -페라이트의 변태시 시그마(σ)상의 석출을 수반하는 경우가 있으며, 500~707°C영역에서 오스테나이트의 탄소고용도 감소에 의한 잉여탄소가 Cr과 입계탄화물을 형성하여 물성을 저하시키기도 한다.

Table. 4.에 각 열처리 조건에 따른 용접부 δ -페라이트 함량변화를 나타내었다. γ -solvus이하인 650°C에서 한시간 동안 유지할 경우, Tale. 4.에서 볼 수 있듯이 As-weld상태보다 δ -페라이트 함량이 크게 감소한다. γ -solvus 이상인 1,050°C에서 한시간 동안 유지한 경우, 모재에서는 용체화에 의해 조직이 균

질해지며, 용착부에서는 용착부 δ -페라이트가 분해되어 함량이 거의 0%에 가까워졌다. 309Mo나 309MoL과 같이 Cr-당량(페라이트 형성 potential)이 큰 경우에는 예외적으로 상온에서 δ -페라이트가 잔류하였다. γ -solvus이상의 온도에서 어떠한 냉각과정을 거쳐도 δ -페라이트 함량이 영향을 받지 않음은 용착부 δ -페라이트의 변태가 비가역적(irreversible)이고 δ -페라이트가 에너지적으로 불안정한상임을 말해 준다.

4.5. 다층용접의 영향

다층용접(multi-pass)의 경우, 계속되는 비이드(bead)에 의한 열사이클로 인해 먼저 응고된 용착부의 δ -페라이트가 변하게 된다. photo. 2에 먼저 용착된 용착부의 미세조직이 pass가 진행됨에 따라 변하는 양상을 나타내었다.

Photo. 2.에 먼저 형성된 Lathy+Vermicular 형상이 Vermicular+Globular형상으로 열사이클에 의해 변해가는 과정이 잘 나타나 있으며 Fig. 3.에 열영향으로 인한 δ -페라이트 함량의 감소경향을 나타내었다.

따라서 다층용접부의 Root부가 Cap부보다 페라이트 함량이 낮은것이 일반적이다.

Table 4. Weld metal ferrite content at various heat treatment.

용착금속	열 처리 조건			
	As-Weld	650°C 1Hr. 공냉	1050°C 1Hr. 공냉	1050°C 1Hr. 수냉
308	6.5%	5.1%	0%	0%
308L	5.5%	4.0%	0%	0%
309	8.7%	3.0%	0%	0%
309L	7.1%	3.8%	0%	0%
309Mo	25%	14%	11.4%	12%
309MoL	14%	9.6%	1.8%	1.3%

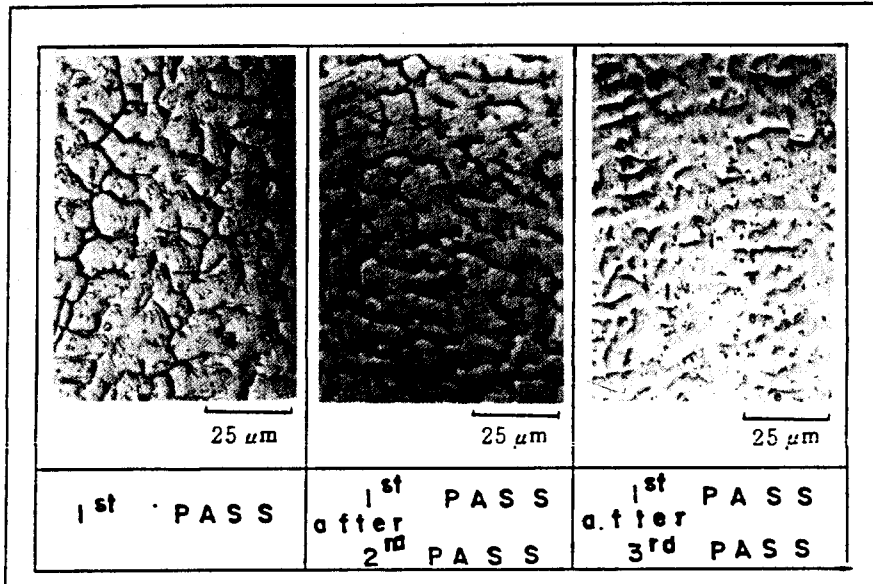


Photo 2. Microstructure changes at thermal cycle exposures (308L)

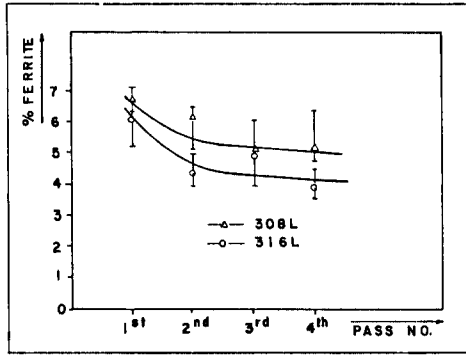


Fig. 3. Variation in root pass ferrite with subsequent pass in weld

4.6. Dilution의 영향

오스테나이트계 스테인레스강 용접시 모재와의 Dilution 정도는 용접 process에 따라 다른데, SAW의 경우 모재와의 dilution은 65% 정도 (GMAW도 비슷), SMAW는 50%, GTAW는 40~50% 정도로 알려져 있다.

모재의 페라이트형성 potential(Cr-당량)이, undilute 된 용착부보다 클 경우에는 용착부페라이트 함량이 dilution에 의해 증가할 것이고, 작을 경우에는 감소할 것이다. Fig. 4.에 시험용접에 의해 구한 δ-페라이트 함량분포를 도식적(schematic)으로 나타내었다.

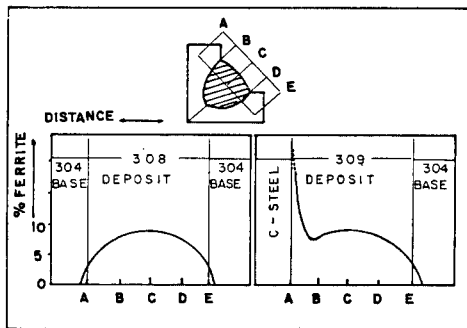


Fig. 4. Schematic drawing of ferrite content variation by dilution.

위 Fig. 4.의 그림에서 모재의 페라이트 potential의 대소에 따라 용착부 페라이트의 분포상태가 변함을 잘 알 수 있다.

Cladding과 같은 이중재질 용접시 이러한 dilution에

의한 δ-페라이트 함량의 변화는 물성유지를 위해 반드시 고려해 주어야한다.

5. 결 론

오스테나이트계 스테인레스강 용접부의 δ-페라이트 생성인자에 관한 위의 시험결과로부터 아래의 결론을 얻을수 있다.

- (1) 오스테나이트계 스테인레스강 용접부의 δ-페라이트는 에너지적으로 불안정한 상으로서, 오스테나이트로의 변화가 비가역적(irreversible)이다.
- (2) δ-페라이트의 생성 및 변화에는 합금원소의 확산이 반드시 수반되며, 최종 δ-페라이트 함량은 정성적으로 다음과 같이 표시된다.
페라이트함량 = primary 페라이트 - 변화한 페라이트
- (3) δ-페라이트 생성에 일차적으로 영향을 미치는 인자는 화학조성(Cr-당량/Ni-당량)이며, primary변태양상 및 냉각속도에도 크게 의존한다.
- (4) 용착부 δ-페라이트는 대개 Vermicular와 Lathy의 혼합조직으로 존재하며, 열영향을 받을수록 에너지적으로 안정한 Globular 형상으로 변해간다.

6. 참 고 문 헌

- 1) J.A. Brooks, A.W. Thompson, J.C. Williams "A fundamental study of the beneficial effects of delta ferrite in reducing weld cracking" Welding Journal Vol.63 No.3(1984) PP71-S to 83-S.
- 2) E.C.Rollalson, M.C.T. Bystram "Hot cracking of austenitic welds with special reference to 18/13/1 Cr-Ni-Nb alloy" Journal of Iron and Steel Institute Vol. 169 (1951) PP347 to 352.
- 3) A.John, Sedriks "Corrosion of stainless steel" John Wiley & Sones New York (1979).
- 4) C.D. Lundin, C.P.D Chou "Hazard HAZ" region of austenitic stainless steel welds" Welding Journal Vol. 64 No.4 (1985) PP113-S to 118-S.
- 5) M.O. Malone "Sigma and 885°F Embrittlement of Chromium-Nickel Stainless steel weld metals" Welding Journal Vol. 46 No. 6 PP241-S to 253-S
- 6) C.D. Lundin, C.P.D. Chou "Hot cracking of

- austenitic stainless steel weld metals" *Welding Journal* Vol.59 No.8 (1980) PP226-S to 232-S
- 7) F.C. Hull "Effect of delta-ferrite [on the hot cracking of stainless steel" *Welding Journal* Vol. 46 No.9 (1967) PP193-S to 203-S
- 8) F.C. Hull "Effect of alloying Additions on hot cracking of austenitic Chromium-Nickel stainless steel" *Trans, ASTM* Vol.60 (1960) PP667 to 690.
- 9) 문영훈·남수우 "The static and cyclic creep behaviors of base and longitudinally welded AISI 304L Stainless steel" *대한금속학회지* Vol. 28 No.8(1985) PP794 to 801.
- 10) T.Takalo, N.Suutala, T.Moisio "Ferritic-Austenitic Solidification mode in austenitic stainless steel welds" *Met. Trans.* Vol. 11A, May(1980) PP717 to 725.
- 11) L.J. Schawartzendruber, L.H. Bennett, E.A. Schoefer, W.T. DeLong, H.C. Campbell "Mössbauer-Effect examination of ferrite in stainless steel welds and castings" *Welding Journal* Vol.53 No.1 (1974) PP1-S to 10-S
- 12) W.T. DeLong "Ferrite in austenitic stainless steel weld metal" *Welding Journal* Vol.53 No.7 (1974) PP273-S to 286-S
- 13) W.T. DeLong "Calibration procedure for instruments to measure the delta-ferrite content of austenitic stainless steel weld metal" *Welding-Journal* Vol.52 No.2(1973) PP69-S to 72-S.