

오스테나이트계 스테인레스강의 육성 용접부에서 고온균열 감수성에 미치는 용접입열의 영향

김 대 영* · 김 희 진*

Effect of Heat Input on Hot Cracking Susceptibility in the Austenitic Stainless Steel Overlay

D. Y. Kim, H. J. Kim

Key Words : Stainless Steel(스테인레스강), Overlaying(육성-용접), Hot Crack(고온균열),
 δ -Ferrite(델타 페라이트), Heat Input(용접입열)

Abstract

The effect of heat input on the content of residual δ -ferrite and the hot cracking susceptibility in the austenitic stainless steel overlaid on the carbon steel was studied in the range of heat input from 7.5 to 15.1 KJ/cm. Present study shows that residual δ -ferrite content in the overlay is mainly determined by the dilution of the base metal (carbon steel) which is in turn affected by heat input, i. e. the amount of dilution decreases as heat input increases. Accordingly, higher heat input results in a substantial increase in Cr equivalent but a little increase in Ni equivalent due to the less dilution of carbon from base metal. This fact can explain the result obtained in this study, i. e. the higher content of δ -ferrite in the weld deposit made with higher heat input. This in turn causes more resistant overlaying weld metal to hot cracking.

서 론

Austenitic 스테인레스강은 내식성, 내산화성이 우수하고 구조물의 안정성 및 저온이나 고온 또는 고압하에서 강도와 인성이 다른 재료에 비해 뛰어나므로, 석유 및 화학 plant, 그리고 증기 발전장치 등에 널리 사용된다.

이러한 austenitic 스테인레스강의 용접부는 austenite상이 면심입방 격자구조(FCC)를 가지고 있으므로 체심입방 격자구조(BCC)인 ferrite 상보다 수소의 고

용도가 높아서 저온 균열의 발생 위험성은 거의 없으나, 수지상 입계에 편석물을 쉽게 형성하는 S나 P, Si 등의 불순물에 대한 고용도가 낮기 때문에 고온 균열에 대한 저항성이 극히 취약하다.

Fig. 1은 실제 용접구조물에서 E309L 용가재를 사용하여 flux-cored arc 용접한 304L clad강과 탄소강의 T-joint 용접부에 발생한 고온 균열의 한 예를 보여주고 있으며, 이와 같은 균열을 인위적으로 파단시킨 후 그 파면을 주사전자 현미경(SEM)을 이용하여 고배율로 조사하면 Fig. 2와 같은 고온균열의 전

* 현대중공업(주) 용접기술연구소

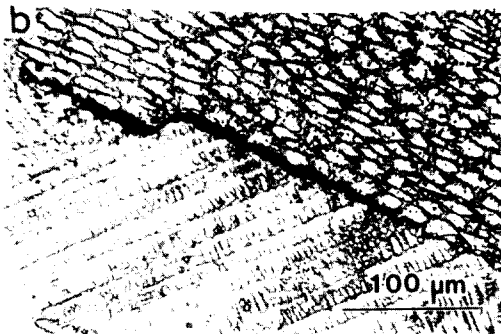
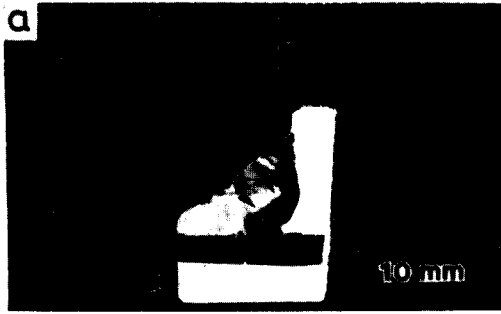


Fig. 1. Hot cracks occurred in the austenitic stainless steel weld metal in the joint of carbon steel and stainless clad steel (a), and their detail microstructure taken at the cracked region.

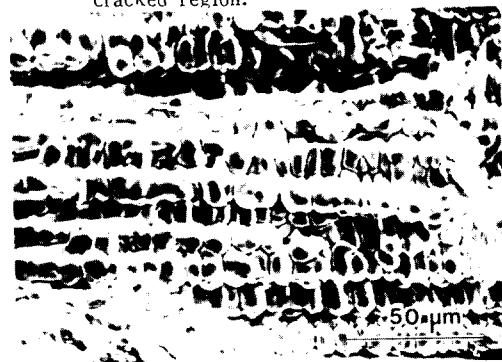


Fig. 2. SEM fractographs of hot crack.

형적인 파면조직인 corn 형태의 수지상 arm 부위를 쉽게 관찰할 수 있다. 이러한 고온균열은 응고 도중에 생긴 응고균열(solidification crack)과 다음 pass의 열영향부(HAZ)에 주로 발생하는 액화균열(liquidation crack)로 크게 나눌 수 있는데, 그 발생기구는 수지상 입체를 따라 발달하는 취약한 상(액상 포함)에 용접응력(열응력, 수축응력, 구속응력)에 의한 과잉변위가 인가되어 균열이 발생하게 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 고온균열의 방지책으로는 1) 미세조직의 제어에 의해 취약한 상의 형성을 억제하거

나, 2) 용접후 용착금속의 응고시 발생하는 인장응력을 극소화하는 두가지 측면을 고려할 수 있겠으나, 실질적인 측면에서 용접응력의 제어는 매우 어렵기 때문에 미세조직을 제어하는 방법이 보다 효율적일 것으로 생각된다.

Austenitic 스테인레스강의 용접부에서 미세조직을 제어하여 고온균열을 방지하기 위해서는 용접금속에 소량(3-8%)의 ferrite상을 형성시켜 줌으로써 가능하다고 알려져 있으며(1), 용착금속 내에 이러한 ferrite상을 만들어 주는 방법으로는 용접후에 ferrite를 많이 함유하도록 설계된 용가재를 사용하거나 또는 용접조건을 변화시키는 방법 등이 있다. 한편 조절가능한 용접조건으로는 용접전류, 속도, weaving 여부, 그리고 shielding gas의 선택 등이 있다.

일반적으로 austenitic 스테인레스강을 내부식용으로 사용하는 경우에 구조물 전체를 solid 스테인레스강으로 제작하는 것은 원가절감의 측면에서 바람직하지 못하므로 대개는 부식분위기에 노출되는 표면부는 스테인레스강으로 그 이외의 부분은 값이 싼 탄소강으로 구성되는 clad강이나 육성용접한 강을 사용하게 된다. 그러나 육성용접의 경우 용착금속의 화학조성은 탄소강의 회석에 의해 크게 변화할 수 있으므로 그 미세조직중 특히 고온균열에 대한 저항성을 향상시키는 것으로 보고되어 있는 ferrite 양의 변화도를 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 탄소강/스테인레스강의 육성용접시에 초층의 이중접합 재료로 쓰이는 E309L 용가재를 사용하여 용접속도를 변수로 하여 입열량을 변화시키면서 탄소강 위에 육성용접을 했을 때, 고온균열에 대한 저항성을 높여주는 ferrite상의 거동을 밝히고자 하였다.

2. 실험방법

실험에 사용한 모재는 두께 25mm의 ASTM A516 Gr. 70 강재로서 인장강도가 70ksi인 탄소강이었으며, 용가재는 직경 1.2mm의 E309L wire이었다. 본 연구에 사용된 모재와 용가재의 화학조성을 Table 1에 나타냈다.

용접은 flux cored arc용접 process를 적용하여 직류 역극성(DCEP)으로 CO₂ 보호가스(shielding gas)를 25l/min의 유속으로 흘러 주면서 실시했다. 입열량을 변화시키기 위해 Table 2에 나타낸 바와 같이 전류와 전압을 각각 220A, 30V로 고정시킨 다음에

Table 1. The chemical compositions in weight percent of base metal and filler metal.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
B.M. (A516-70)	0.18	0.21	1.07	0.014	0.004	—	—	—
F.M. (E309OL)	0.03	0.75	1.89	0.030	0.004	11.4	11.3	23.1

Table 2. Welding condition for the austenitic stainless steel overlay.

Voltage (V)	Current(A)	Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/cm)
30	220	52.5	7.5
		40.5	9.8
		31.1	12.7
		26.2	15.1

용접속도를 네단계로 변화시켜 육성용접 시편을 제작했다. 용접 후 육성 용접부에서 잔류 ferrite의 양은 자기 유도 원리를 응용한 ferrite scope로써 측정하였으며, 매 측정 부위에서 10회씩 측정하여 그 평균값을 취하였다. 그리고 육성 용접부에서 고온균열 감수성은 Vareststraint 시험방법을 이용하여 평가하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 입열량에 따른 ferrite량의 변화

용접 입열이 서로 다른 네개의 시편에 대해서 Fig. 3에 삽입된 그림과 같은 시편의 단면에서 스테인레스강 육성 용접부의 표면으로부터 2mm 지점에서 ferrite 양을 측정해 본 결과 Fig.3에서 보는 바와 같이 용접입열이 증가함에 따라 점차로 육성 용접부의 ferrite양도 증가하는 경향을 보았다. 즉 저입열인 7.5KJ/cm의 경우 ferrite양은 0.22%이었으며 입열이 커짐에 따라 ferrite양은 점차로 많아져서 고입열인 15.1KJ/cm에서는 4.4%로 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 E309L용접 재료의 전용착금속의 ferrite 양은 약 10% 이상이였다.

입열의 변화에 따른 용착금속의 미세조직을 광학현미경으로 살펴본 결과, 저입열(7.5KJ/cm)인 경우에는 Fig. 4.a에서 볼 수 있듯이 ferrite가 거의 없는 주조조직인 cell structure를, 그리고 고입열(15.1KJ/cm)인 경우는 Fig. 4.b와 같이 skeletal ferrite가 수지상 입계를 따라 연속적으로 발달한 조직을 관찰할 수 있다. 이와 같이 고입열의 용착금속내에 존재하

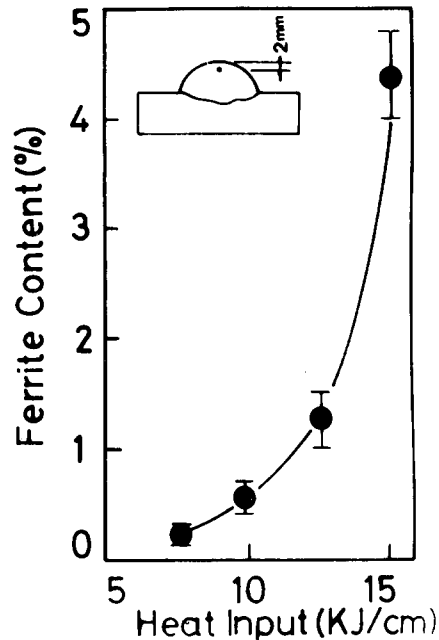


Fig. 3. The variation of ferrite contents in the austenitic stainless steel weld deposit made on the carbon steel using various welding heat inputs.

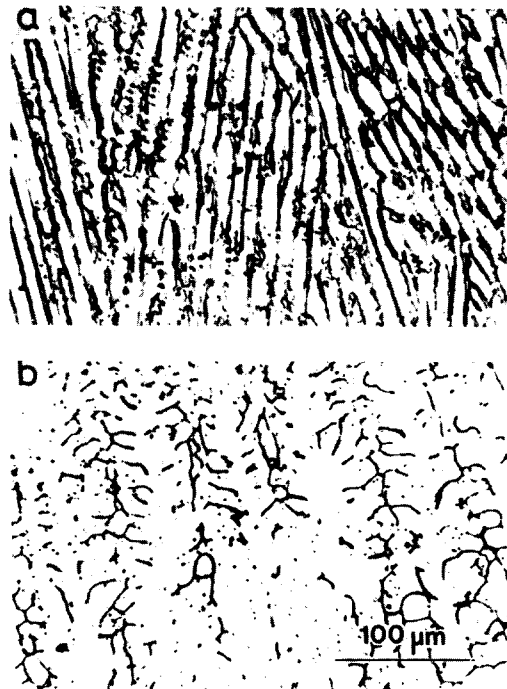


Fig. 4. Microstructure of the austenitic stainless steel overlays welded with(a) low(7.5KJ/cm) and (b) high welding heat input(15.1KJ/cm).

는 skeletal ferrite는 ferrite/austenite 계면에서의 낮은 계면에너지로 말미암아 수지상 입계에 저용점 액막이 형성되는 것을 억제하므로 용착금속의 고온 균열에 대한 저항성을 높여주는 역할을 한다. 이상에서 살펴본 바와 같이, 용접입열이 클수록 ferrite 양은 증가하고 그 결과 고온균열에 대한 저항성이 높은 미세조직을 가진 용착금속을 얻을 수 있다.

3.2 Ferrite양을 결정하는 인자

Austenitic 스테인레스강의 용착금속내의 ferrite는 용착금속의 화학조성이나 열 이력(thermal history)에 의해 그 양이 결정된다고 할 수 있다.

먼저 화학조성이 일정한 경우 열 이력이 ferrite양에 미치는 영향을 살펴보면 냉각속도가 느릴수록 확산 지배 상변태인 ferrite→austenite 상변태가 일어날 수 있는 반응기간이 길어져서 상변태가 용이하게 되어 용착금속내의 ferrite양은 감소하게 된다. 따라서 화학조성이 일정할 때 용접입열이 증가하게 되면 냉각속도가 늦어지게 되므로 용착금속의 ferrite양은 감소하겠지만 Fig. 3에서 보여주는 본 실험의 결과는 그와는 반대의 경향을 나타내었다. 이 같은 경향은 육성용접부에서 열이력, 즉 냉각속도의 영향이 무시할 수 있을 정도로 작든가 아니면 화학조성의 변화가 상당히 크기 때문에 열이력의 영향이 상대적으로 무시할 수 있을 정도로 저하되었기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

따라서 용착금속의 ferrite양을 결정하는 또 다른 인자인 화학조성에 대하여 검토해 보기 위하여 화학 조성을 지배하는 모재(탄소강)의 회석율의 변화를 입열량의 변화에 따라 관찰해 본 결과 Fig. 5와 같은 graph를 얻을 수 있었다. 회석율은 전체 용착금속의 면적에 대해 회석된 모재의 면적의 백분율로서 구했으며 입열량에 따른 그 변화양상은 ferrite 함량과는 반대 양상으로 관계를 보인다. 즉 용접입열이 커짐에 따라 모재의 회석은 점차로 줄어드는 양상을 보인다. 이와 같은 경향은 Fig. 6의 macro조직에서 보는 바와 같이 용접 입열이 증가함에 따라 용입의 깊이는 점차로 얕아지고 bead의 폭은 넓어지는 것으로부터 설명될 수 있으며, 그와 같은 회석율의 변화는 용착금속의 화학조성에 영향을 미치게 된다.

이러한 양상으로 모재의 회석정도가 변할 때 육성 용접부의 화학조성을 살펴보면 Table 3과 같이 입열량이 증가함에 따라 용착금속의 Ni 및 Cr의 함량은 증가하게 된다. 특히 모재로부터의 탄소의 회석이

입열량에 따라 점차적으로 감소하기 때문에 Ni 당량의 증가폭은 Cr 당량의 증가폭보다 둔화된 양상을 보인다. 이것은 Fig. 7의 Delong diagram으로부터 확연히 할 수 있는데, 입열량이 감소함에 따라 육성용

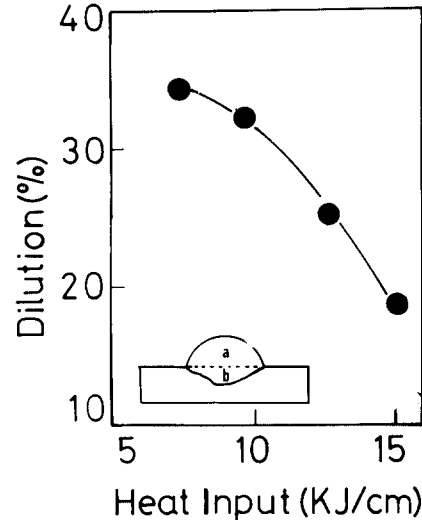


Fig. 5. The change of the carbon steel dilution as a function of the welding heat input.

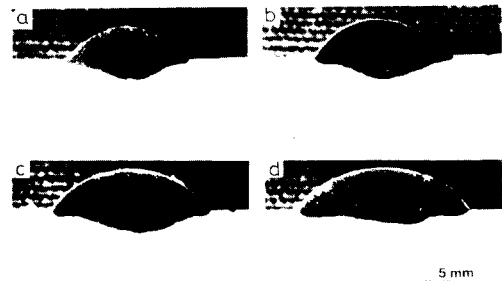


Fig. 6. Macrostructure of the austenitic stainless steel overlays deposited with various welding heat inputs.

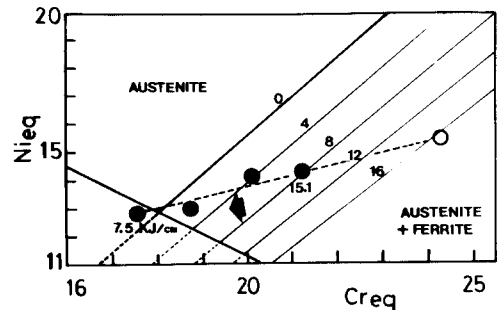


Fig. 7. Delong diagram showing the change of the ferrite contents with decreasing heat input.

Table 3. The chemical compositions in weight percent of the austenitic stainless steel overlay deposited with various welding heat inputs.

Heat Input (KJ/cm)	C	Si	Mn	N	Ni	Cr	Mo	Creq	Nieq
7.5	0.10	0.66	1.64	0.044	7.86	16.5	0.12	17.61	13.00
9.8	0.09	0.69	1.69	0.045	8.68	17.6	0.12	18.76	13.07
12.7	0.08	0.72	1.69	0.051	9.50	18.9	0.12	20.10	14.29
15.1	0.07	0.66	1.53	0.055	9.96	20.1	0.13	21.22	14.48

$$\text{Creq} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1.5\text{Si} + 0.5\text{Nb}, \quad \text{Nieq} = \text{Ni} + 0.5\text{Mn} + 30\text{C} + 30\text{N}, \quad \text{Nb:trace}, \text{S:0.004}, \text{P:0.027} - 0.030$$

착금속의 조성은 화살표 방향으로 이동하게 되므로 ferrite의 양은 감소하게 된다.

즉 입열량이 감소하면 모재의 희석이 증가하게 되므로 용착금속의 ferrite 양은 감소하는 경향을 보인다.

이와 같이 육성 용착금속의 조성을 이용하여 DeLong diagram으로부터 유추한 ferrite 양은 실용접부에서의 측정치의 그것과 변화경향은 일치하나 그 절대값은 상당한 차이를 보여주고 있다. 이를 보다 쉽게 이해하기 위해 ferrite scope로 측정된 ferrite양 (Fig. 3)과 DeLong diagram으로부터 구한 ferrite양 Fig. 5을 비교해서 희석율의 함수로 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이러한 차이를 명확히 설명하기 위해서는 보다 깊이 있는 연구를 수행해야 하겠으나, 본 실험에서는 일지된 경향만으로 충분하였으므로 이에 대한 연구는 생략하였다. 단지 Brooks 등에 의하면 용착금속내에 존재하는 S나 P 등의 원소들이 CrS나 CrP₃를 형성하여 ferrite former인 Cr의

양을 줄여주므로 δ -ferrite양의 감소를 유발하게 되어 화학조성으로부터 얻은 값과 실측치에 차이가 발생하게 된다고 보고한 바 있음을 첨언한다(2).

3.3 ferrite 양과 고온균열 감수성

이상에서 살펴본 바와 같이 용접조건 특히 용접입열의 변화에 따라 용착금속내의 ferrite양이 변할 때 (Fig. 3) 용착금속의 고온균열 감수성을 Vrestraint 시험방법을 통해 발생된 총 균열길이를써 평가하였다. Fig. 9은 Vrestraint 시험장치의 개략적인 개념도를 보여준다. 이때 부가된 변형률(e)은 근사적으로 $e = t/R$ (t : 시험편의 두께, R : Block의 곡률반경)로 계산되고, 용착금속에서 발생된 총 균열길이를 각각 용접입열과 용착금속의 ferrite양의 함수로 나타내면 Fig. 10. a, b와 같다. 즉 총 균열길이는 용접입열량이 증가함에 따라 그리고 용착금속 내의 ferrite양이 증

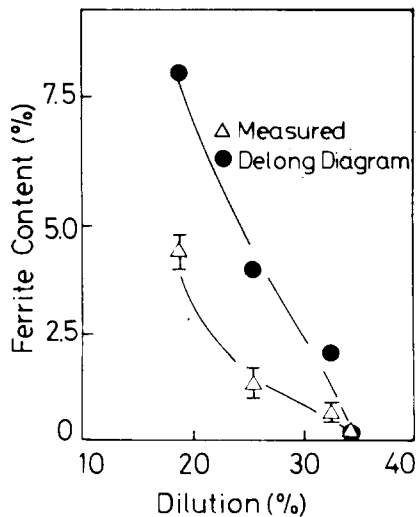


Fig. 8. The relationship between ferrite contents and dilution of the base metal.

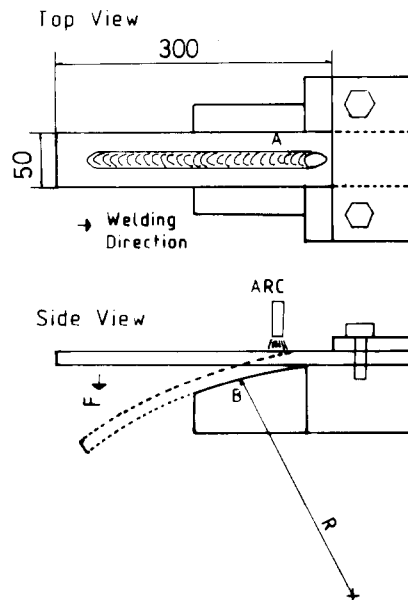


Fig. 9. Schematic diagram for Vrestraint test jig.

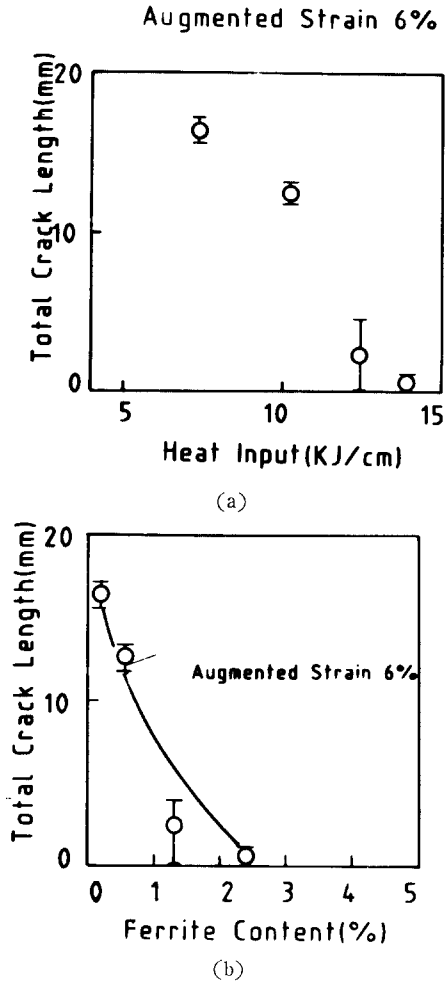


Fig. 10. The variation of total crack length as a function of (a) heat input and (b) ferrite content.

가함에 따라 급격하게 감소하는 것을 쉽게 알 수 있고, 부가 변형률이 6%일 때 ferrite양이 2.5% 이상이면 거의 균열발생이 일어나지 않는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11은 Varestraint 시험에 의해 발생된 균열 주위의 미세조직 사진으로 균열발생 및 진전이 구조 austenite cell 경계를 따라 고온균열의 전형적인 양상으로 나타난 것을 보여준다. 이 균열을 확대시켜 그 파면을 SEM으로 관찰하면 역시 수지상의 corn type 고온균열 파면이 관찰된다(Fig. 12).

3.4 Multipass 1 Layer 육성용접부에서의 적용

지금까지는 1 pass-1 layer의 경우에 관해서 살펴

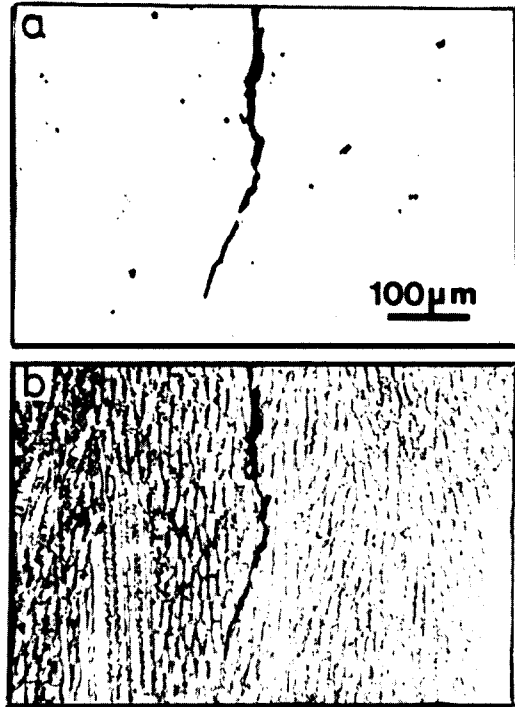


Fig. 11. Optical microstructure showing a crack propagated through cell boundary after Varestraint test.

보았는데, 실제용접 구조물에서 여러 pass로 overlay 했을 경우 용착금속의 ferrite양이 변화하는 경향을 조사해 보기 위해 6 pass-1 layer 육성용접을 Fig. 13에 삽입한 그림과 같이 실시하였다. 이러한 육성 용접시험을 네가지 입열조건에 따라 만들고, 각각의 용착금속에서 측정된 ferrite양을 Fig. 13에 나타냈다. 입열량 및 pass수가 증가함에 따라 육성 용접부에서의 ferrite양도 많아지게 되는데 이것은 위에서 설명한 바와 같이 모재인 탄소강의 회석이 점차로 감소하기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 그리고 여러 pass로 육성용접을 할 때, 입열량에 관계없이 2번째 pass부터는 모재뿐만 아니라 선형 pass의 용착금속이 회석되므로 상대적으로 모재의 회석이 줄어들게 된다. 그러므로 비록 낮은 입열(7.5KJ/cm)에서도 pass수가 증가하기 되면 용착금속의 ferrite양은 적정량 이상으로 증가하게 된다.

따라서 실구조물의 실제 육성용접시에는, 탄소강의 회석이 많아 고온균열에 민감한 조직이 형성될 가능성이 높은 첫번째 pass에서는 되도록 입열을 높게 해서 용접함으로써 고온균열에 대한 저항성이 높은 양호한 육성 용접부를 얻을 수 있을 것이다.

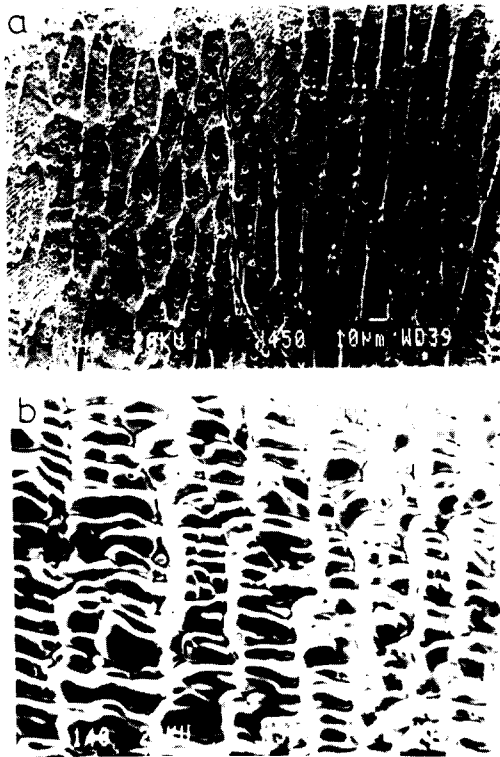


Fig. 12. SEM fractograph of a hot crack formed in the Varestraint test specimen.

4. 결 론

Austenitic 스테인레스강의 육성 용접부에서 고온 균열감수성에 미치는 용접입열의 영향에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Austenitic 스테인레스강의 육성 용접부에서 ferrite양은 입열량의 증가(용접속도의 감소)에 따라 증가하게 되며 이것은 입열량의 증가에 따른 탄소강 회석률의 감소에 기인한다.
- 2) E309 육성 용접부에서 고온균열을 방지하기 위

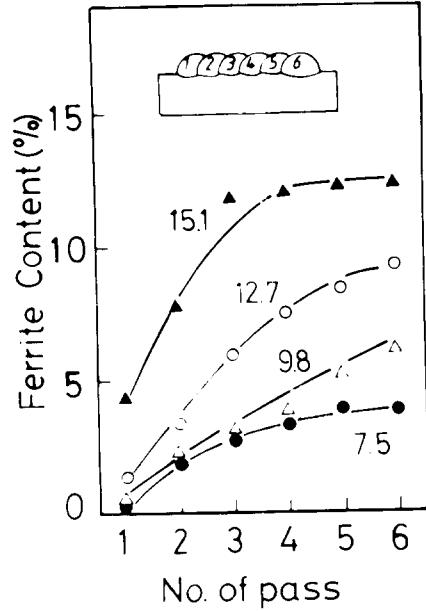


Fig. 13. The variation of ferrite content in the multi pass austenitic stainless steel overlay with the number of welding pass and the change of welding heat input.

해서는 2.5% 이상의 ferrite양이 필요하므로 그 이상의 ferrite양을 가지는 용접입열이 요구된다.

- 3) 실제 육성용접시 첫번째 pass에서는 모재의 회석이 최대가 되어 ferrite content가 매우 낮아지게 되므로 이 부위에서 고온균열에 저항성을 가지는 적정량의 ferrite를 얻기 위해서는 보다 높은 입열로 용접하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- 1) C. D Lundin et al., "Ferrite-Fissuring Relationship in Austenitic Stainless Steel Weld Metal", *Welding J.*, vol. 54(8), (1975)241-S.
- 2) J. A. Brooks et al., "Variations in Weld Ferrite Content Due to P and S", *Welding J.*, vol. 62(8), (1983)220-S.