

## Ti 산화물강의 용접열영향부에서 Acicular Ferrite의 형성에 관한 연구

원형민 · 김용덕 · 하현승 · 김준기 · 김선진 · 강계명\*

한양대학교 재료공학과

\*서울산업대학교 재료공학과

### A Study on the Formation of Acicular Ferrite in HAZ of Ti-Oxide Steel

Hyung-Min Won, Yong-Deog Kim, Hyun-Seung Ha, Jun-Ki Kim, Seon-Jin Kim and Kae-Myung Kang\*

Dept. of Materials Engineering, Hanyang University

\*Dept. of Materials Engineering, Seoul National Polytechnic University

**초 록** 용접부 인성을 향상시키기 위해 Ti 산화물을 첨가한 Ti 산화물강에 대하여 용접시 최고가열온도와 냉각속도의 변화가 용접열영향부의 미세조직에 미치는 영향을 조사하였다. 용접열영향부의 인성향상에 기여하는 acicular ferrite는 1400℃ 이상의 최고가열온도와  $\Delta t_{400-500}$ 가 40초 보다 빠른 냉각속도에서 활발히 생성되었다. 오스테나이트 결정립내에서 개재물로부터 핵생성된 일차 acicular ferrite의 생성량은 전체 acicular ferrite의 약 20% 정도로 적었으며 대부분의 acicular ferrite는 일차 acicular ferrite로부터 생성된 이차 acicular ferrite인 것으로 나타났다. 이차 acicular ferrite는 plate 사이에 Fe<sub>3</sub>C층이 존재하는 것으로 보아 확산기구에 의해 생성되는 것으로 생각된다. 개재물은 TiO, TiO<sub>2</sub>, TiN, MnS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO(galaxite) 등으로 구성된 복합상이었으며 개재물이 일차 acicular ferrite의 핵생성 site로 작용하기 위해서는 약 1 $\mu$ m이상의 크기가 효과적인 것으로 나타났다. Ti 산화물과 TiN는 직접적인 acicular ferrite의 핵생성 site로 작용하기보다는 MnS, galaxite 등의 석출 site로 작용하여 개재물의 크기를 증가시킴으로써 acicular ferrite의 생성을 촉진시키는 것으로 생각된다.

**Abstract** The effects of maximum heating temperature and cooling rate on the microstructure of HAZ of the Ti oxide steel were investigated. Acicular ferrite, known to improve HAZ toughness, was formed vigorously at the maximum heating temperature above 1400℃ and at the cooling rate faster than  $\Delta t_{400-500}$  40sec. It was found that the amount of primary acicular ferrite, nucleated directly from inclusions in prior austenite grains, was only about 20% and that the most of the acicular ferrite was secondary acicular ferrite which is known to be nucleated from primary acicular ferrite plate. The secondary acicular ferrite contained Fe<sub>3</sub>C layers between ferrite plates. Thus, it was considered that the diffusion mechanism was involved in the growth of secondary acicular ferrite. Inclusions were the mixture of TiO, TiO<sub>2</sub>, TiN, MnS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO(galaxite) compounds and the effective size of inclusions for nucleating primary acicular ferrite was found to be larger than about 1 $\mu$ m. TiO, TiO<sub>2</sub>, or TiN were considered to contribute to the formation of primary acicular ferrite mainly not by acting directly as nucleation sites for the primary acicular ferrite but by acting as precipitation sites for MnS or galaxite.

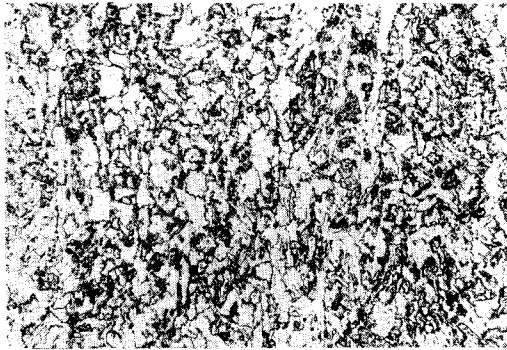
### 1. 서 론

Acicular ferrite (AF)는 저탄소강의 용접시 오스테나이트의 상변태로 생성되는 상으로 조대한 오스테나이트 결정립내에 미세한 결정립을 형성하여 오스테나이트 결정립의 조대화

에 의한 용접열영향부의 인성저하를 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>1,2)</sup>. AF는 오스테나이트 결정립내에서 개재물로부터 생성된 일차 AF와 일차 AF plate로부터 생성된 이차 AF로 구성되며, bainite나 ferrite side plate와 유사한 형태를 갖지만 오스테나이트 결정립계

Table 1. Chemical composition of Ti oxide steel.

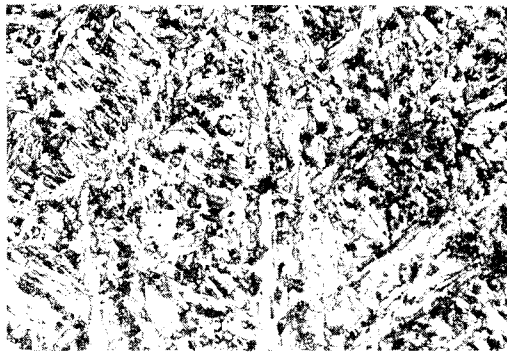
(wt.%)													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	total N	total O
0.0853	0.1768	1.5927	0.0064	0.0036	0.2747	0.3945	0.0057	0.0115	0.0053	0.0139	0.0161	0.0022	0.0012



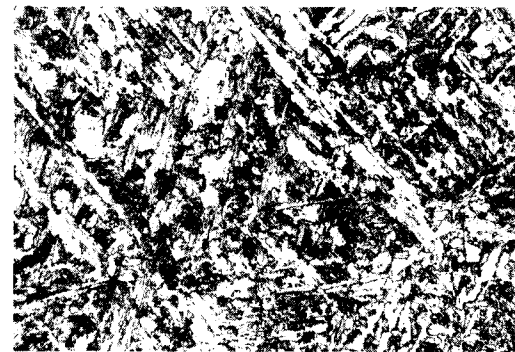
(a) As received



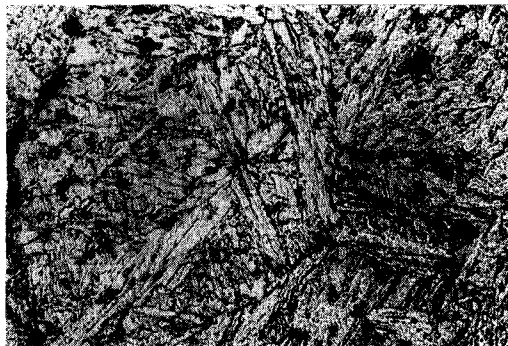
(b) 1300°C 20sec



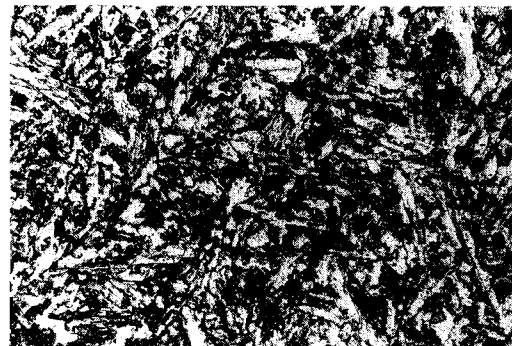
(c) 1400°C 10sec



(d) 1400°C 20sec



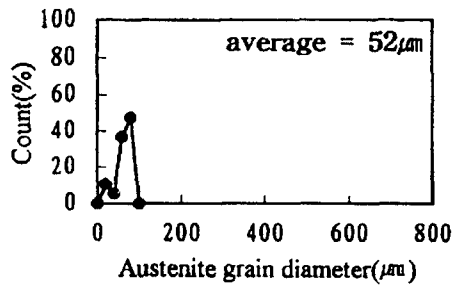
(e) 1400°C 40sec



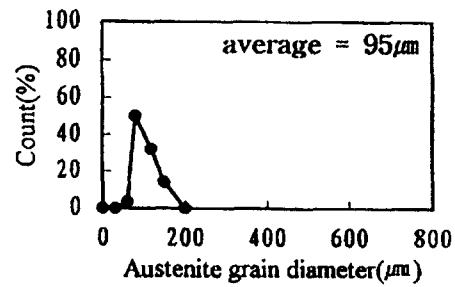
(f) 1450°C 20sec


  
20 $\mu$ m

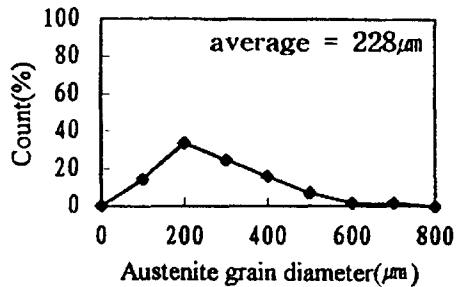
Fig. 1. Optical micrographs of as-received specimen and HAZ of the specimens after weld simulations at various conditions.



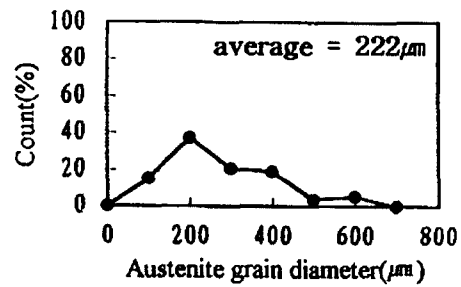
(a) As-received



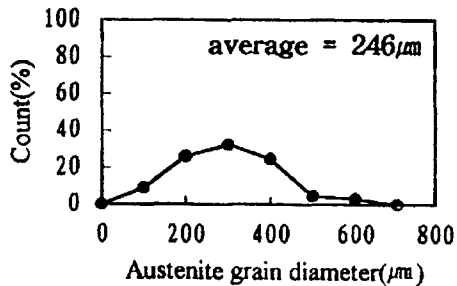
(b) 1300°C 20sec



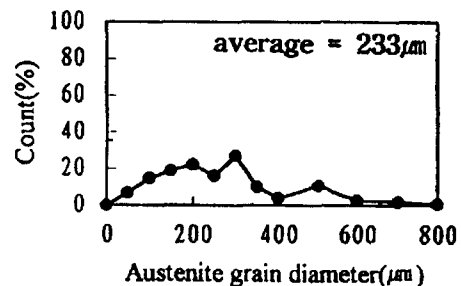
(c) 1400°C 10sec



(d) 1400°C 20sec



(e) 1400°C 40sec



(f) 1450°C 20sec

Fig. 2. Size distributions of prior austenite grains of as-received specimen and HAZ of the specimens after weld simulations at various conditions.

아닌 결정립내에서 생성되는 특징이 있다<sup>3~5)</sup>.

AF의 생성에 영향을 미치는 인자로는 오스테나이트 결정립크기, 냉각속도(또는 페라이트 생성온도), 경화능, 개재물의 크기 등이 있다<sup>6~10)</sup>. 오스테나이트 결정립크기가 크고 냉각속도가 빠른 경우에 AF의 생성이 활발하고, AF의 생성온도가 높을수록 AF plate의 크기가 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>10)</sup>. 한편 AF의 생성에 대하여 개재물이 AF를 생성시키는 확률은 냉각속도나 오스테나이트 결정립크기에 의해서는 별다른 영향을 받지 않고 개재물의 크기에 의해 영향을 받는데, 개재물이 AF의 핵

생성 site로 작용하기 위해서는 0.4~0.6 $\mu\text{m}$ 정도 이상의 크기가 필요한 것으로 보고되어 있다<sup>10)</sup>. AF의 생성핵으로 작용하는 개재물은 Ti로 생각되는 Ti-rich 화합물, galaxite( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}$ ), copper sulfide, MnS, silica와 Al-rich 화합물 등의 여러 상으로 구성된 복합화합물로 알려져 있다<sup>11)</sup>. 개재물을 이루는 상의 종류나 평균조성은 AF 생성량과 무관하며, 개재물과 인접 AF 결정립간에 epitaxial관계가 없는 것으로 보아 개재물들은 AF의 형성에 대하여 단순한 inert substrate로 작용하는 것으로 생각되고 있다<sup>11)</sup>.

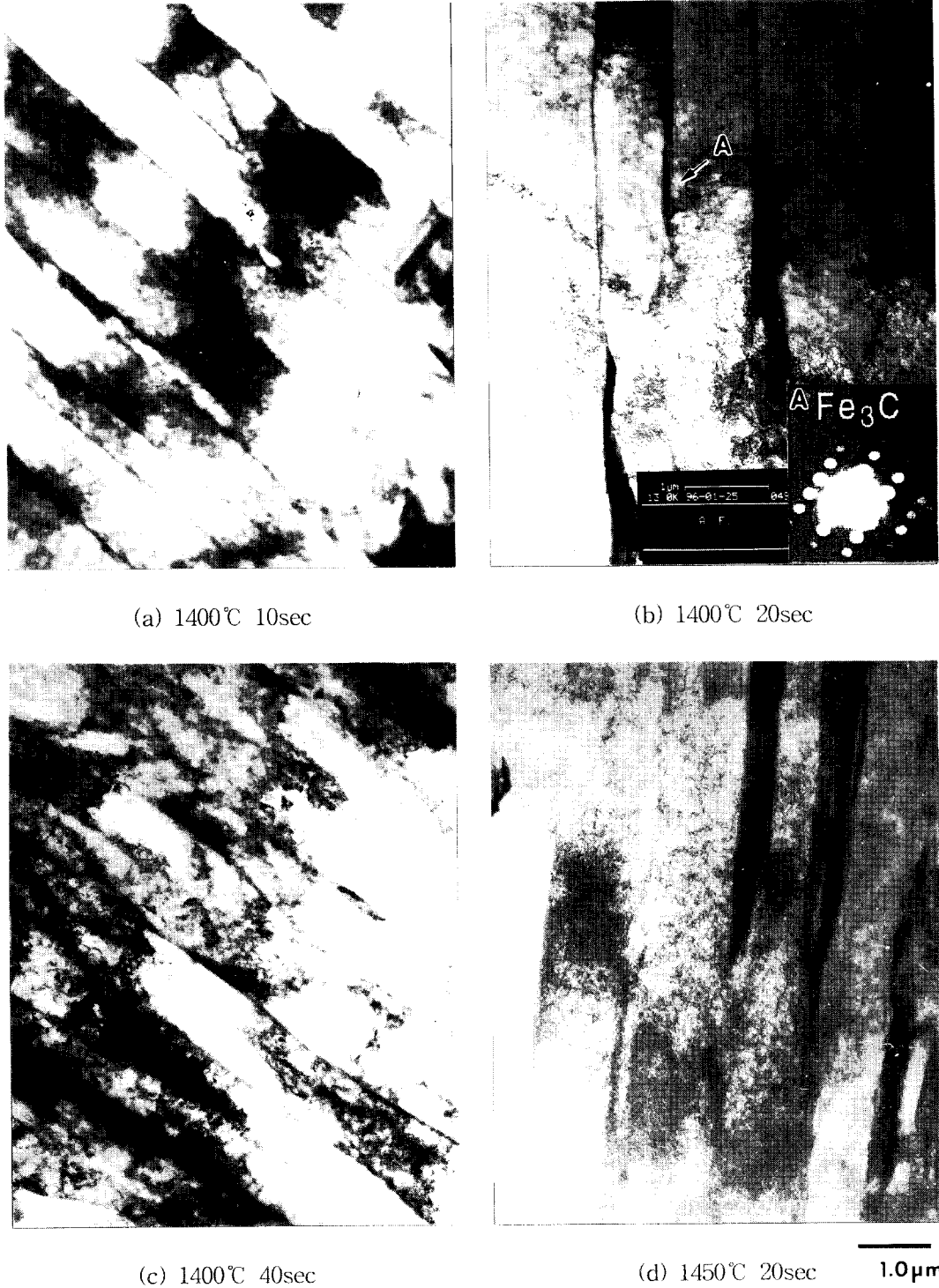


Fig. 3. TEM micrographs of secondary acicular ferrite in HAZ of specimens after weld simulations at various conditions.

AF의 성장기구에 대해서는 아직까지 확실히 밝혀지지 않고 있다. AF 변태가 bainite변태와

비슷하고 기지와 의 계면이 step을 이루는 것으로부터 AF의 성장이 확산기구에 의한다는 연



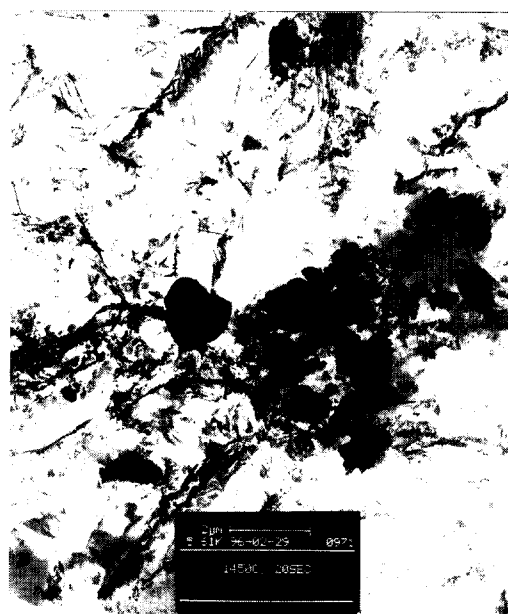
(a) 1400°C 10sec



(b) 1400°C 20sec



(c) 1400°C 40sec



(d) 1450°C 20sec

Fig. 4. Carbon extraction replica TEM micrographs of inclusions in HAZ of specimens after weld simulations at various conditions.

구결과도 있으며<sup>3)</sup>, step이 없는 lens 형태의 계면을 이루는 무확산기구에 의한 것이라는 연구 결과도 있다<sup>12)</sup>. 이차 AF는 일차 AF plate로부터 핵생성되는 것으로 생각되고 있으나 일

차 AF의 성장기구에 대해서는 많은 연구가 이루어진 반면에 이차 AF의 성장기구에 대한 연구는 거의 없는 상태이다.

용접열영향부의 인성향상을 목적으로 개발

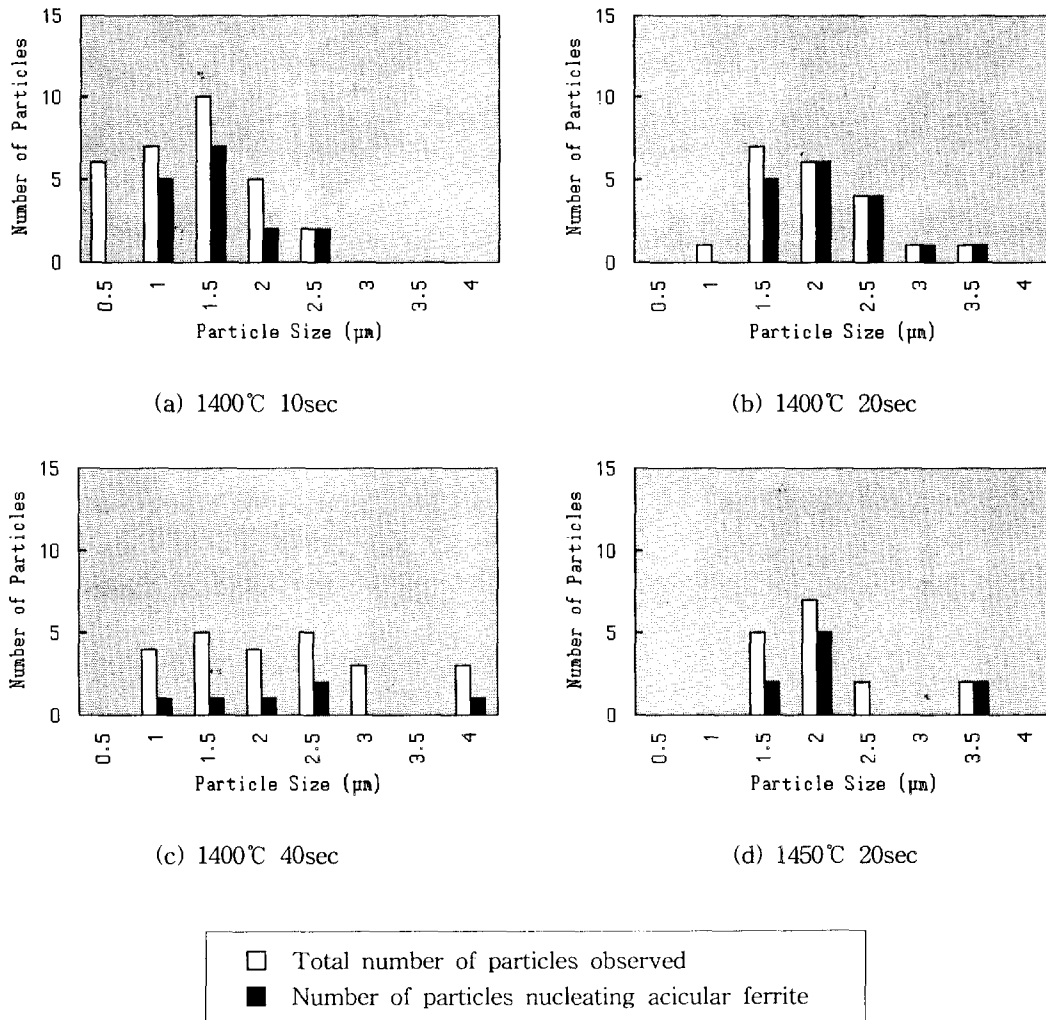


Fig. 5. Size distributions of inclusions and its role for AF formation in HAZ of specimens after weld simulations at various conditions.

된 Ti 산화물강은 저탄소강에 AF의 생성핵으로 작용하기 위한 Ti 산화물을 첨가한 강으로, Ti 산화물의 첨가는 AF의 생성량을 증가시키는 것으로 보고되고 있다<sup>14,15</sup>. 그러나 첨가된 Ti 산화물이 형성하는 개재물의 종류 및 크기나 이들이 AF의 생성에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 부족한 상태이다. 본 연구에서는 이러한 Ti 산화물강에 대한 용접열영향부를 모사열처리하여 용접시의 최고가열온도와 냉각속도, 이에 따른 오스테나이트 결정립 크기와 개재물의 종류 및 크기 등의 변화가 AF의 생성에 미치는 영향을 분석하고 AF의 생성기구에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시험재는 Ti 산화물을 첨가한 강으로, 원소분광법으로 측정된 시편의 조성을 Table.1에 나타내었다. 대입열용접의 모사는  $10 \times 10 \times 50$ mm 시편의 중심의 폭 12mm에 대하여 MTCS(Metallurgical Thermal Cycle Simulator)장치를 이용하여 열처리하였다. 최고가열 온도 1300, 1400, 1450°C까지 승온속도 135°C/sec로 가열하여 5초간 유지한 후 800°C까지 33°C/sec의 냉각속도로 냉각하였다. 800~500°C 영역의 냉각속도( $A_{500-800}$ )는 20초로 하였으며, 최고가열온도 1400°C에 대해서는 냉각속

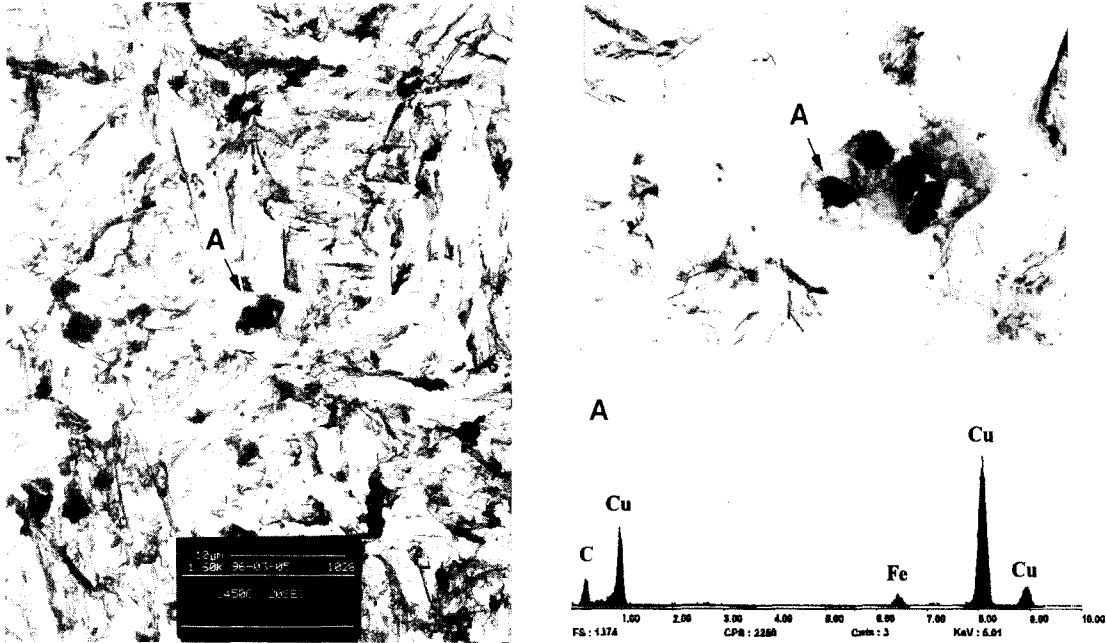


Fig. 6. Result of EDS analysis of an inclusion in HAZ of the specimen after the weld simulation.(max temperature 1450°C,  $\Delta t_{500-500} = 20\text{sec}$ )

도가 AF의 생성에 미치는 영향을 조사하기 위해 10, 20, 40초로 냉각하였다.

AF와 오스테나이트 결정립크기 등의 미세조직은 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였다. 시편은 picric acid를 포화시킨 methanol 100ml에 3g zinc chloride, 0.08g cupric chloride를 첨가한 용액을 사용하여 상온에서 초음파로 교반하면서 에칭하였다. 오스테나이트 결정립크기의 분포와 평균은 120개 이상의 결정립에 대하여 image analyzer를 이용하여 측정하였다. AF의 생성기구를 조사하기 위한 TEM 시편은 twin jet polisher를 이용하여 thin foil로 제작하였으며 사용된 전해액은 10% perchloric acid, 90% acetic acid로 상온에서 90mA의 전류를 가해주었다.

개재물이 AF의 생성에 미치는 영향은 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였으며 EDS로 개재물의 성분을 분석하였다. 개재물의 종류와 모사열처리에 따른 상변화를 관찰하기 위해 모사열처리한 시편을 전해추출하여 X-선 회절시험을 하였다. X-선 회절시험을 위한 추출시료는 10% 2, 4-pentadecione, 1% tetramethylammonium chloride, 89% methanol이며 300mA/cm<sup>2</sup>에서 12시간동안 추출한 후 원

심분리하여 준비하였다. 또한 최고가열온도가 개재물의 분포 및 크기 변화에 미치는 영향과 이에 따른 개재물이 AF의 생성에 미치는 영향을 분석하기 위해 carbon extraction replica 시편을 제작하여 25개 이상의 개재물을 STEM으로 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

용접모사에 따른 acicular ferrite(AF)의 생성

MTCS장치를 이용하여 용접열영향부를 모사한 시편의 광학현미경 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다. AF는 동일한 시험재에 대한 연구 결과<sup>10)</sup>에서와 같이 최고가열온도가 1400°C 이상인 경우에서 생성되었으며, 1400°C에서 냉각속도가 10~20초인 범위인 경우에 가장 활발히 생성되었다. AF의 생성에 영향을 미치는 것으로 알려진 오스테나이트 결정립크기(AGS)를 각각의 조건에 대하여 120개 이상의 결정립으로부터 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 최고가열온도 1300°C인 경우의 평균 AGS는 95 $\mu\text{m}$ 로, 1300°C에서 AF가 생성되지 않은 것은 Babaro 등<sup>10)</sup>이 제시한 AF의 생성을 위한 최소 AGS인 110 $\mu\text{m}$ 까지 오스테나이트 결

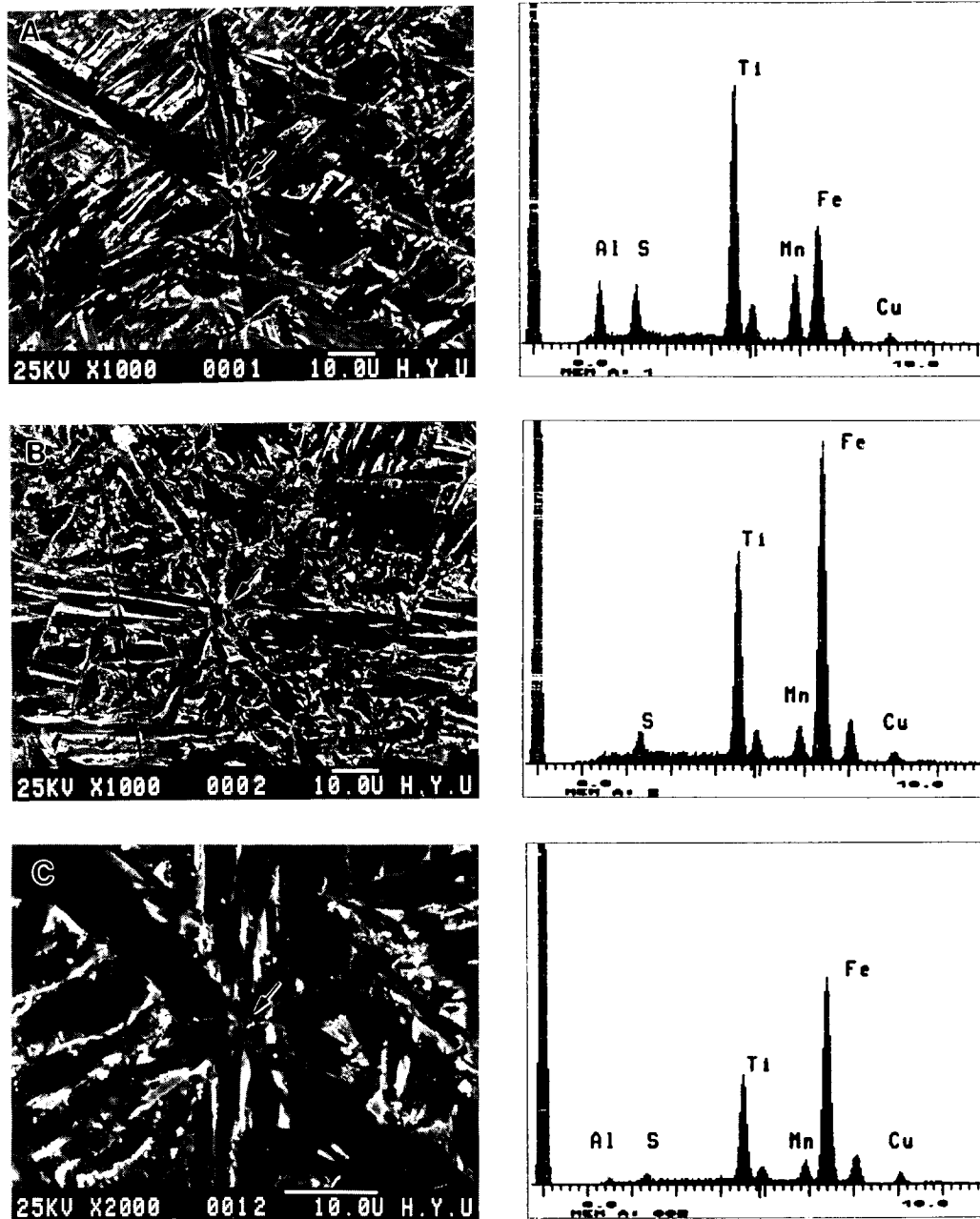


Fig. 7. SEM micrographs and results of EDS analysis of inclusions in HAZ of the specimen after the weld simulation. (max temperature 1400°C,  $\Delta t_{cooling} = 10$ sec)

정립이 조대화되지 못했기 때문으로 생각된다. 평균 AGS가 냉각속도에 관계없이 200 $\mu$ m 이상인 1400°C의 경우에는 Fig. 1에서 보여지는 바와같이 10, 20초의 냉각속도에서 AF의 생성이 활발하지만, 냉각속도 40초에서 AF의 생성이 둔화되는 것을 알 수 있다. 이는 AF 생성이 유리한 냉각속도가 존재한다는 사실과

일치하는 것으로 비교적 빠른 냉각속도인 20초 정도에서 AF의 생성이 가장 활발한 것으로 생각된다. 한편 최고가열온도 1450°C에서는  $\delta$ -ferrite가 출현하여 미세한 오스테나이트 결정립이 생성되는 것으로 보고된 바가 있으나<sup>10)</sup> 본 연구에서는 미세한 오스테나이트 결정립은 발견되지 않았으며 200 $\mu$ m 정도의 조



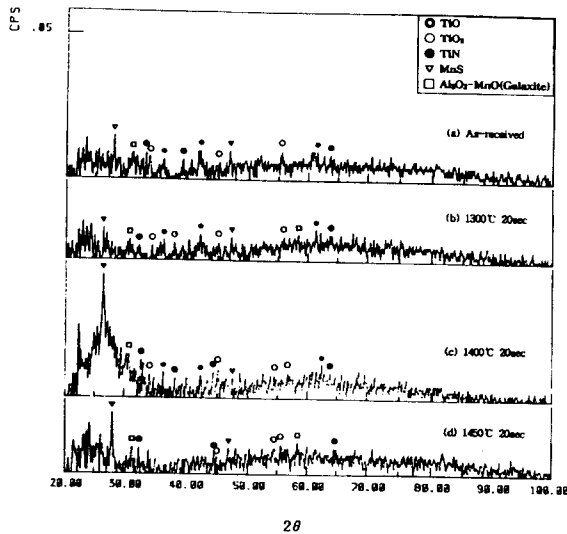


Fig. 8. XRD patterns of extraction residues of as-received specimen and HAZ of specimens after weld simulations at various conditions.

대한 AGS를 가져 AF의 생성이 비교적 활발한 것으로 나타났다.

#### Acicular ferrite(AF)의 생성기구

Fig. 1에서 AF는 개재물로부터 핵생성되어 방사형으로 성장한 일차 AF와 이로부터 생성된 것으로 보여지는 이차 AF로 구성된 것을 볼 수 있다. 일차 AF는 일반적으로 개재물로부터 핵생성되어 무확산변태기구로 성장하며 용접열영향부의 인성향상에 크게 기여하는 것으로 생각되고 있다<sup>11)</sup>. 그러나 각각의 시편에서 일차 AF와 이차 AF의 생성비율은 약 20:80 정도로 이차 AF의 비율이 매우 큰 것으로 나타났으며, 전체 AF에 대한 이차 AF의 비율은 1400°C에서 10~40초 냉각속도 범위에서 냉각속도가 빠를수록, 20초의 냉각속도에 대하여 1450°C보다는 1400°C의 보다 낮은 최고가열온도에서 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 이차 AF의 많은 생성량은 일차 AF에 비해 용접열영향부 인성에 보다 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다.

이차 AF에 대한 Fig. 3의 TEM사진을 보면 ferrite plate의 폭이 냉각속도에 관계없이 약 1 μm 정도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 3(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 Fe<sub>3</sub>C가 ferrite plate 사이에서 얇은 층으로 존재하고 있는데 이는 ferrite plate의 성장과 동시에 carbon

의 확산이 동반되는 것으로 생각할 수 있다. 오스테나이트에서 carbon의 확산거리  $x \propto \sqrt{Dt}$ 를 평균온도 650°C로 가정하여 냉각속도 10, 20, 40초에 대해 계산한 결과 각각 0.9, 1.2, 1.7 μm로 나타났는데, 이는 각각의 냉각속도에서 ferrite plate의 평균 폭이 1 μm 정도인 것과 비교하여 볼 때, 시편이 냉각되는 동안 Fe<sub>3</sub>C가 carbon의 확산에 의해 ferrite plate와 평행하게 성장할 수 있는 충분한 확산거리이다. 또한 0.08wt.%C에 대하여 pearlite변태를 가정하여 계산한 Fe<sub>3</sub>C layer의 폭은 ferrite plate의 약 1/8로, Fig. 3에서 관찰되는 Fe<sub>3</sub>C의 두께와 대략 일치하고 있다. 따라서 이차 AF의 성장기구는 pearlite변태와 유사한 확산기구에 의한 것으로 생각된다.

일차 acicular ferrite(AF)의 생성에 미치는 개재물의 영향

Fig. 4와 같은 개재물의 carbon extraction replica TEM사진으로부터 25개 이상의 개재물을 대상으로 측정한다. 개재물의 크기에 따른 관찰된 개재물의 개수와 이들중 AF를 생성시킨 개재물의 개수를 Fig. 5에 나타내었다. 비록 관찰된 개수가 적어 확률적인 신뢰도는 적으나 AF의 생성이 활발했던 것으로 나타난 1400°C 10초와 20초의 경우 각각 1 μm 정도(0.75~1.25 μm)와 1.5 μm(1.25~1.75 μm) 정도 크기의 개재물에서 AF가 생성되며 AF가 거의 생성되지 않았던 1400°C 40초에서는 개재물의 크기에 관계없이 AF가 거의 생성되지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 AF의 생성에 필요한 개재물의 크기가 0.4~0.6 μm 정도라는 Babaro 등<sup>14)</sup>의 연구와 비교적 일치하는 결과로 개재물이 AF를 생성시키기 위해서는 약 1 μm 정도 이상의 크기가 효과적인 것으로 생각된다.

한편 Fig. 5-d)의 1450°C 경우에는 1 μm 이상의 크기를 갖는 개재물이 발견되는 경우가 적었고 대부분 Fig. 6과 같이 평균적으로 0.6 μm 정도의 크기를 갖는 작은 개재물들이 집합체를 이루어 존재하는 양상을 보였다. 이러한 0.6 μm 정도의 크기를 갖는 개재물은 EDS분석 결과 Cu가 주성분인 것으로 나타났으며 이들은 1400°C까지 개재물내에 존재하던 Cu가 1450°C의 고온에서 기지에 고용되었다가 냉각시 석출되면서 재생성된 것으로 생각된다. Cu가 주성분인 0.6 μm 정도의 개재물은 Fig. 6에서와 같이

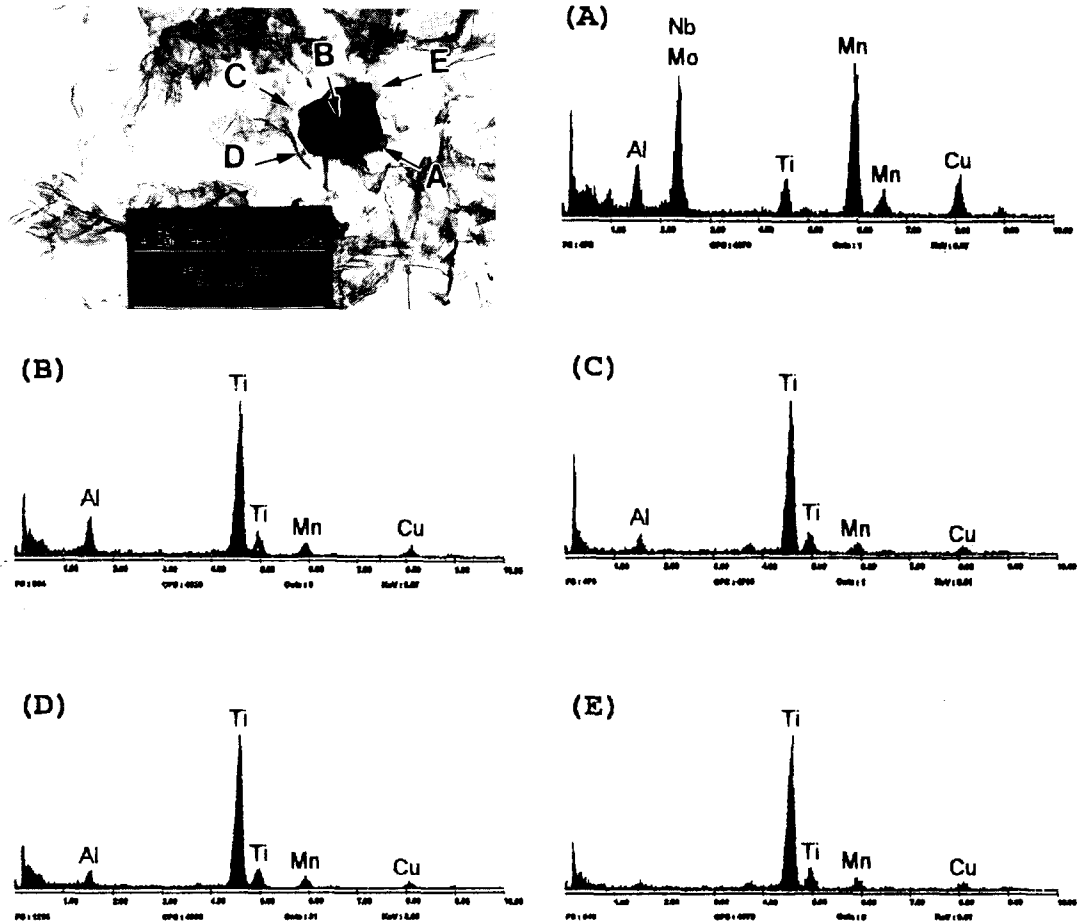


Fig. 9. Results of EDS analysis of an inclusion in HAZ of the specimen after the weld simulation.(max temperature 1450°C,  $\Delta t_{500-1400} = 20\text{sec}$ )

직접적으로 AF를 생성시키지는 않지만 집합체를 이루어 AF의 생성 중심부에 존재하는 것으로 보아 AF의 생성에 간접적으로 기여하는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 대표적으로 1400°C 10초 시편에서 개재물과 이로부터 생성된 AF를 SEM으로 관찰한 결과이다. 1400°C와 1450°C에 대하여 핵생성 site로 작용하는 개재물들은 EDS 분석결과 Ti, Mn, Al, S 등의 원소를 포함하는 것으로 나타났으며 Ti은 모든 개재물에서 검출되었다. 용접열영향부 모사열처리시 최고가열온도에 따른 개재물의 상변화를 관찰하기 위해 전해추출한 추출잔류물의 X-선회절패턴을 Fig. 8에 나타내었다. 초기 시편의 경우 TiO, TiO<sub>2</sub>, TiN, MnS, galaxite 등의 여러 상이 존재하고 있었으며 최고가열온도 1400°C까지

도 이러한 상들이 존재하였으나 1450°C에서는 TiN의 회절 peak가 사라지는 것을 볼 수 있다. Ti 산화물이 1450°C에서도 안정하게 존재하는 반면에 TiN은 용해되어 사라지는 것은 Homma 등<sup>11)</sup>의 연구결과와 같이 1450°C에서 TiN의 고용도가 Ti 산화물에 비해 비교적 크기 때문으로 생각된다. TiN은 Ti 산화물과 같이 AF를 생성시키는 개재물로 알려져 있으나<sup>11)</sup> 1450°C의 최고가열온도에서는 더 이상 AF의 핵생성 site로 작용할 수 없는 것으로 생각된다.

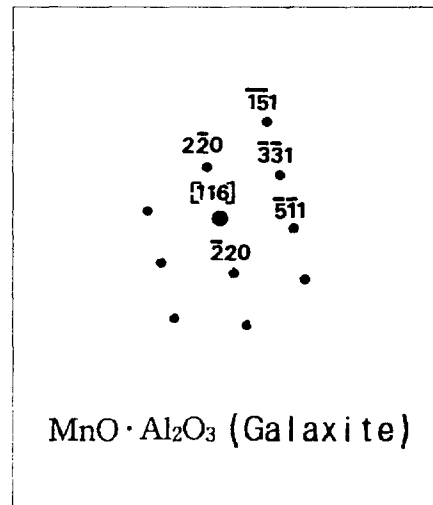
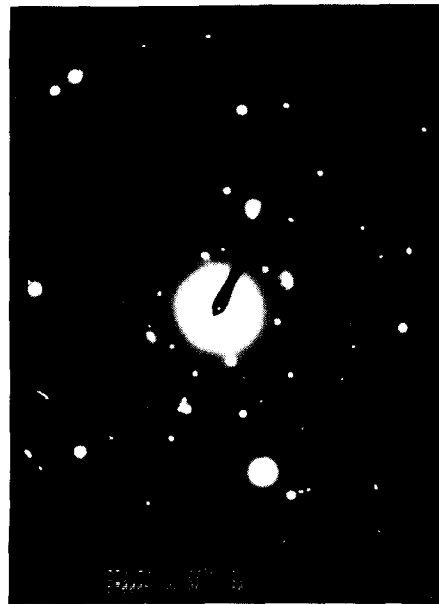
Fig. 9는 1450°C 시편의 extraction replica에서 관찰된 개재물의 여러 부위에 대한 EDS분석 결과로, 각 부위마다 서로 다른 조성을 보이고 있다. 이는 개재물이 TiO, TiO<sub>2</sub>, TiN, MnS, galaxite 등의 상으로 이루어진, 혼합비가 일정치 않은 복합화합물임을 나타낸다. 또한 Fig. 6



(a) Bright field image



(b) Dark field image



$MnO \cdot Al_2O_3$  (Galaxite)

(c) SAD pattern of (b)

Fig. 10. TEM micrographs and SAD pattern of an inclusion in HAZ of the specimen after the weld simulation.(max temperature 1450°C,  $\Delta t_{\text{cool}} : 20\text{sec}$ )

과 같은 EDS 분석에서 Ti 원소만이 모든 개재물에서 검출된 것은  $TiO$ ,  $TiO_2$  또는  $TiN$ 가 생성했으므로 작용하고 그 표면에  $MnS$ 나 galaxite

등이 석출되어 개재물을 형성한다는 Babaro 등<sup>10)</sup>의 연구결과와 일치되고 있다. Fig. 10은 1450°C 시편에서 개재물과 이로부터 생성된 일

차 AF를 관찰한 TEM사진으로 AF를 생성시킨 개재물의 가장자리는 회절패턴 분석결과 galaxite로 확인되었다. 이는 Babaro등<sup>10)</sup>의 관찰과 같이 첨가된 Ti 산화물 또는 TiN가 직접적인 AF의 핵생성 site로 작용하기보다는 MnS, galaxite 등의 석출 site로 작용하여 AF의 생성에 유리한 크기로 개재물을 성장시키는 역할을 하여 AF의 생성량을 증가시키는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

1) 오스테나이트 결정립내의 개재물로부터 핵생성된 일차 acicular ferrite의 생성량은 전체 acicular ferrite에서 약 20% 정도로 적고, 일차 acicular ferrite로부터 생성된 이차 acicular ferrite의 생성량이 80% 정도로 매우 큰 것으로 나타났다. 이차 acicular ferrite plate 사이에 Fe<sub>3</sub>C층이 존재하는 것으로 보아 이차 acicular ferrite는 확산기구에 의해 성장하는 것으로 생각된다.

2) 개재물은 TiO, TiO<sub>2</sub>, TiN, MnS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO(Galaxite) 등의 여러 상으로 구성되어 있었으며 개재물이 일차 acicular ferrite의 핵생성 site로 작용하기 위해서는 약 1 $\mu$ m이상의 크기가 효과적인 것으로 나타났다. Ti 산화물과 TiN는 직접적인 acicular ferrite의 핵생성 site로 작용하기보다는 MnS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO 등의 석출 site로 작용하여 개재물의 크기를 증가시킴으로써 acicular ferrite의 생성을 촉진시키는 것으로 생각된다.

3) 최고가열온도 1450°C에서는 1400°C와는 달리 TiN가 용해되어 acicular ferrite의 형성에 기여하지 못할 것으로 생각되며, Cu가 주성분인 개재물의 집합체가 상당량 석출되어 간접적으로 acicular ferrite의 생성에 기여함으로써 많은 양의 acicular ferrite가 생성된 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 포항제철 기술연구소와 1995년도 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. D.J. Abson, R.E. Dolby and P.H. M. Hart :

Proc. of Int. Conf. on Trends in steels and consumables for welding, London, 1978. The Welding Institute, Abington, Cambridge, England (1978) p.75

2. S. Ohkita et al. : Conf. proc. Joint Australian Welding and Testing Conference, Perth, Oct. (1984) p.271
3. R.A. Ricks, P.R. Howell and G.S. Barritte : J. Mat. Sci. **17** (1982) p.732
4. H. Homma, S. Ohkita, S. Matsuda and K. Yamamoto : Welding Research Supplement Oct. (1987) p.301
5. P.R. Howell, R.A. Ricks and P.W.K. Honeycombe : J. Mat. Sci. **15** (1980) p.376
5. A.G. Glover, J.T. McGrath, M.J. Tinkler and G.C. Weatherly : Weld. J. **56** (1977) p.267
7. S. Hoekstra, M.A. Munnigschmidt-van der berg and D. Denouden : Met. Constr. **18** (1986) p.771
8. M. Ferrante and R.A. Farrar : J. Mat. Sci. **17** (1982) p.3293
9. S. Lui and D.L. Olson : Weld. Res. Suppl. **6** (1986) p.139
10. F.J. Babaro, P. Krauklis and K.E. Eastering : Mat. Sci. and Tech. **5** (1989) p.1057
11. J.M. Dowling, J.M. Corbett and H.W. Kerr : Met. Trans. A **17A** (1986) p.1611
12. M. Strangwood and H.K.D.H. Bhadeshia : Proc. Int. Conf. on Advances in Welding Science and Technology, Gatlinburg TN, 1986, ASM INTERNATIONAL, Metal Park, OH. (1986) p.209
13. S. Ohkita, M. Wakabayashi, H. Homma, K. Yamamoto and S. Matsuda : Nippon Steel Technical Report No.37 April (1988) p.10
14. S. Ohkita, M. Wakabayashi, H. Homma, K. Yamamoto and S. Matsuda : 製鐵研究 第 327號 (1987) p.9
15. 장래웅 외 : "Ti 산화물을 이용한 50kg급 대입열 용접용강 개발 ( I )" 산업과학기술연구소 보고서 POSCO 2079A (1993)