

## 용접 저온균열 감수성에 미치는 중심 편석의 영향

安玲鎬\* · 李鐘鳳\* · 張來雄\* · 蘇文燮\*\*

### Effects of Center Segregation on Weld Cold Cracking Susceptibility

Y. H. AHN\*, J. B. LEE\* R. W. CHANG\* and M. S. SO\*\*

**Key words** : High Strength Steel(고장력강), Segregation(편석), Segregated Particle(편석립), Hardness(경도), Synthetic HAZ(재현열영향부), White Band(백색대), Cold Cracking Susceptibility(저온 균열감 수성)

#### Abstract

Correlation between microstructural features and segregation of elements (Si, Mn, P and S) near the mid of thickness in the base metal and the synthetic HAZ was investigated. Furthermore, the relationship between the degree of center segregation and weld cold cracking susceptibility in the thickness direction was also conducted by evaluating the effect of P concentration on the critical applied stress.

The results obtained are as follows :

- 1) Pearlite band, containing the MnS type inclusion and a locally transformed structure with a higher hardness, was observed in the center segregation region.
- 2) By the weld thermal cycle, center segregation region was transformed to the white band which had a higher hardness than that of base metal due to a greater hardenability of concentrated Mn, P etc..
- 3) Weld cold cracking susceptibility in the thickness direction was mainly dependent on the concentration of impurity elements rather than on the number of the segregated particles near the mid of thickness.
- 4) During welding, the higher concentrated region was easily changed into white band. Therefore, it could be predicted that the initiation and propagation of a cold crack would be promoted by increasing the restraint stress and hydrogen content.

\* 정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

\*\* 비회원, 포항종합제철(주) 품질관리부

## 1. 서 론

연속주조법은 제조공정의 특성상 응고말기에 C, Mn, P 및 S 등의 용질성분이 slab 중심부에 편석되며, 이러한 중심편석대는 압연 후에도 판두께 중심부에 잔존함으로써 강재의 품질 저하 요인이 될 수 있다고 알려져 있다<sup>1)</sup>.

이러한 중심편석대는 기지조직에 비하여 탄소당량이 높기 때문에 강재의 용접시 균열 감수성이 증가하며<sup>2)</sup>, 실제로 강재의 용접, 가스 절단시 및 대입열 용접부의 굽힘시험시 균열의 발생등이 보고되고 있다<sup>3-5)</sup>. 그러나 중심편석대가 잔존하는 경우일지라도 편석대의 형태 및 분포등에 따라 용접부의 성능저하에 미치는 영향이 상이할 것으로 예상되며, 또 이러한 편석대에 있어서의 균열 발생 및 전파기구 등에 대한 연구도 미흡한 실정이다.

근년 국내는 물론 일본을 비롯한 선진국의 경우도 강의 제조시 연속주조법의 적용이 확대되고 있고, 일부 고급강에 대해서는 전자교반장치의 활용 및 냉각속도의 조절 등에 의해 편석대를 저감시키기 위한 노력을 계속하고 있다. 그러나 이러한 편석 저감책을 일반강을 포함한 전생산 강종에 확대 적용하는 것은 생산성, 경제성등의 측면에서 논란의 여지가 많음으로, 편석대의 완전 배제에는 다소 시간이 필요하리라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 편석대가 존재하는 경우, 조직, 경도 및 편석립의 분포 특성등을 조사하고, 또한 편석대에 따른 판두께 방향의 용접 저온균열 감수성의 변화를 조사함으로써, 이들 인자간의 상관성에 대하여 검토코자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험재

시험재는 두께 80mm의 인장강도 50 kgf/mm<sup>2</sup>급

Table 1 Chemical composition of materials used

Material	Thickness (mm)	Chemical composition(wt.%)					Remarks
		C	Si	Mn	P	S	
A	80	0.16	0.42	1.43	0.016	0.008	KS
B		0.16	0.43	1.42	0.017	0.008	SWS50

용접구조용 고장력강(KS SWS50)으로서 중심편석의 정도가 상이한 두강종을 사용하였으며, 이들 시험재의 화학성분은 Table 1에 나타났다.

### 2.2 중심편석대의 분석

MA(Mapping Analyzer)를 사용하여, 편석대를 형성하는 편석립의 농도 분포 및 중심편석도등을 측정하였다. 중심편석대의 정량 분석시 주된 편석원소인 C, Si, Mn, P 및 S 중 어느 한가지 원소의 편석도를 측정하면 다른 원소의 편석도를 추정하는 것이 가능하고, 특히 편석원소중 P의 농도 측정이 가장 유효한 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 따라서 본 연구에서는 편석대의 분석을 위하여 대상원소를 P로 국한하였으며, 분석조건은 80<sup>t</sup> × 80<sup>t</sup> mm 크기의 시험편을 가속전압 20kV, 시료전류 150 $\mu$ A로 실시했다. 이때 beam직경은 200 $\mu$ m, 주사면적은 2 × 4 mm<sup>2</sup>이고, 측정시간 및 측정수는 각각 10ms 및 16 × 10<sup>4</sup>으로 하였다.

MA를 사용하여 검토한 편석립은, 편의상 임의의 측정부위의 P농도인 [Pi]와 시험편 전체의 평균 P농도인 [Po]와의 비가 [Pi]/[Po] ≥ 3인 semi-macro 편석립을 대상으로 하였다. 또 편석립의 농도 분포는 상기한 80<sup>t</sup> × 80<sup>t</sup> mm 크기의 시험편에 존재하는 편석립들의 농도를 편의상 6 구간으로 크게 구분하여 각 농도 구간에 해당하는 편석립의 수를 측정하여 평가하였다. 한편 중심편석도는 판두께 중심부에 존재하는 편석원소들의 농화로서, P를 예로 들면 시험편 두께 중심부 평균 P농도인 [Pt]와 시험편 전체의 평균 P농도인 [Po]와의 비인 [Pt]/[Po]로써 정의, 평가하였다.

한편 EPMA를 사용하여 중심편석대에 일부 존재하고 있는 변태조직에서의 Si, Mn, P 및 S 등의 농도 분포도 조사했다. EPMA분석은 가속전압 20kV, 시료전류 10nA의 조건으로 실시했다.

### 2.3 저온균열시험

중심편석대의 잔존시 용접 저온균열 감수성은 고주파 가열장치를 이용한 재현용접부의 파단 한계응력으로 하였다. Fig. 1은 시험편의 형상을 나타낸 것으로, 먼저 80mm 두께의 시험재 두께방향 양면과 직경 20mm의 JIS S45C재를 마찰압접했다. 그후 기계적인 노치의 가공없이 판두께 방향에 불균일하게 존재하는 중심편석대가 노치 역할을 할 수 있도록 편석대가 시험편의 중심에 위치하게 시험편을 기계 가공하였다. 재현 용접 열cycle은 두께 20mm 강재의 SMAW 표준 용접조건인 입열량 17 kJ/cm에 상당하는 조건 즉, 최고가열온도는 1350°C, 800°C에서 500°C까지의 냉각시간( $\Delta t_{800/500}$ )은 10sec로 하였으며, 1350°C

까지의 가열시간인 20sec동안 수소를 취입하여 분위기를 일정하게 유지하였다. 구속하중은 시험편이 상온으로 냉각된 후 즉시 부가하였으며, 시험시 균열이 발생하지 않는 파단시간의 기준은 편의상 7,200 sec(2시간)으로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 조직 및 경도분포

##### 3.1.1 모재

Photo. 1은 모재의 판두께 중심부근에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. 시험재 모두 기지조직은 ferrite와 pearlite의 혼합조직이며, 특히 두께 중심부근

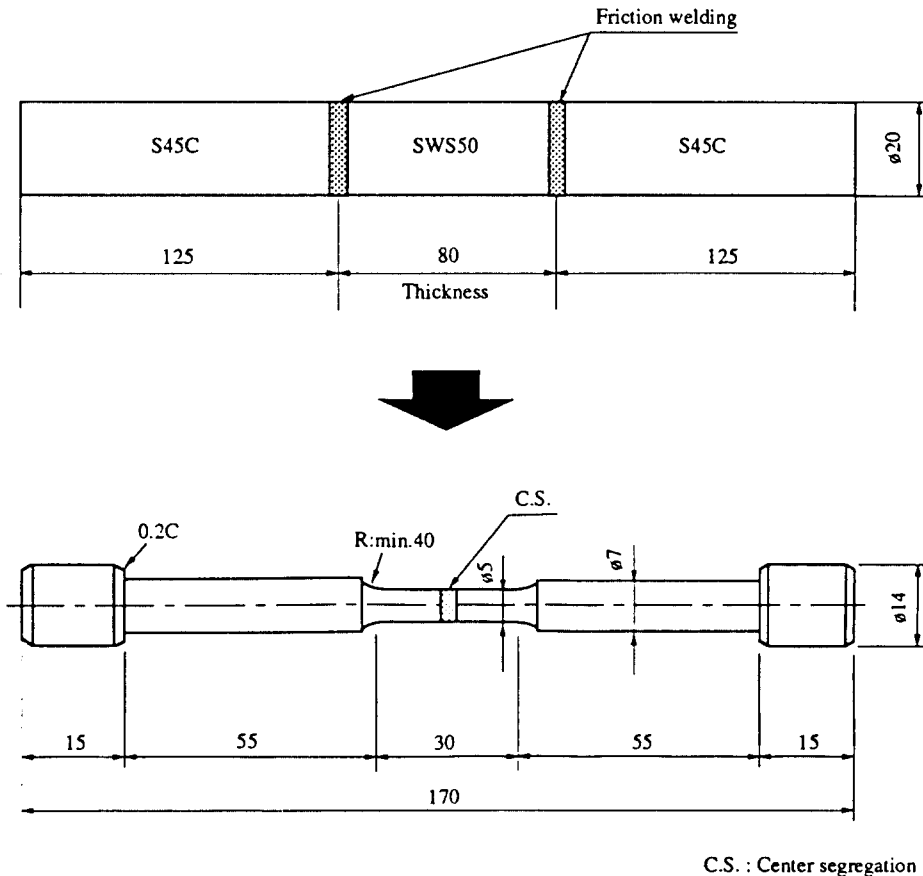


Fig. 1 Shape and dimension of specimen for synthetic HAZ cold cracking test

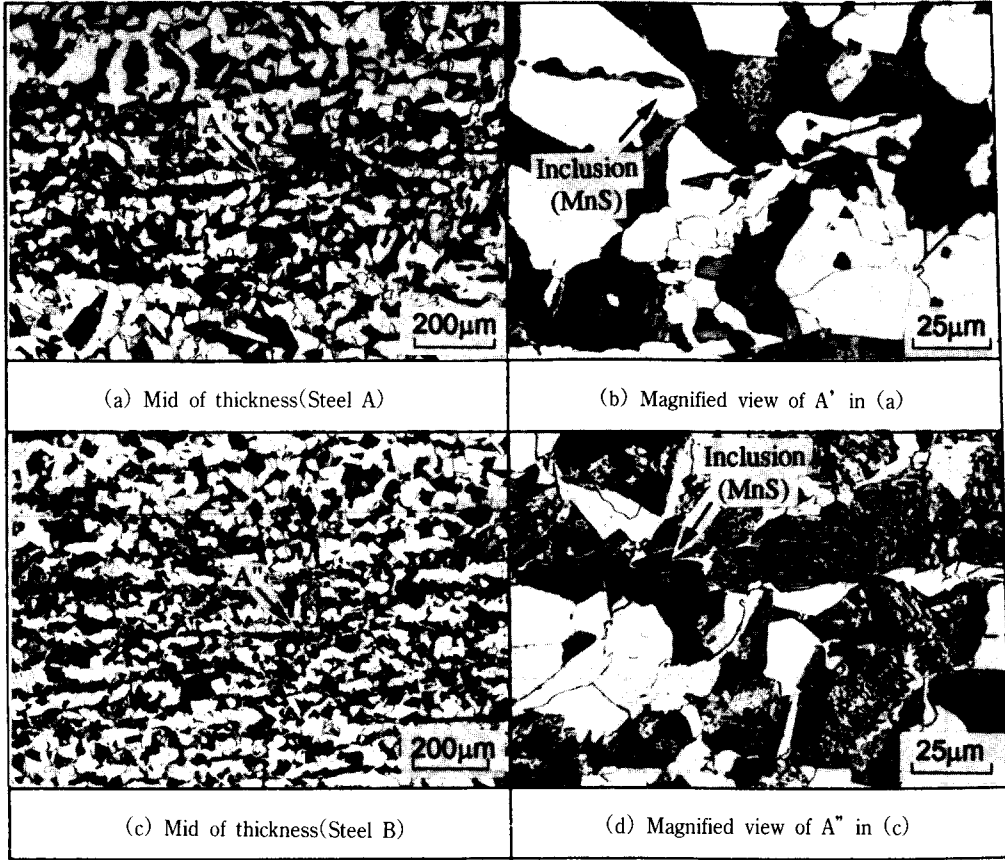


Photo. 1 Microstructures of the base metal near the mid of thickness

에는 pearlite band가 존재함을 알 수 있다. 이러한 band내에는 (b) 및 (d)에서 볼 수 있는 바와 같이, 주로 MnS계의 비금속 개재물과 함께 기지조직과는 상이한 이상조직(변태조직)이 국부적으로 관찰되었으며, 이러한 변태조직은 A재에 비해 B재에 특히 많이 분포되고 있음을 확인할 수 있다. 후술하지만 이와 같은 변태조직의 분포 차이는 재현 용접부의 저온균열 감수성 평가시 한계응력 및 data의 편차 정도에 큰 영향을 미친다.

Fig. 2는 판두께 중심부근의 경도 분포를 나타낸 것으로, 두 시험재 모두 기지조직에서는 170 ~ 180 Hv 정도의 경도 분포를 보이고 있다. 그러나 중심편 석대에서는 A재 300 Hv, B재 370 Hv 정도로서, B재의 편석대가 A재에 비하여 70 정도 높은 경도값을 나타내고 있다. 한편 Photo. 2는 국부적으로 존재하는 전형적인 변태조직(T)과 ferrite(F), pearlite(P) 조직 및 각 부위에 대한 경도값을 압흔과 함께 나타낸

것으로, 변태조직의 경도값이 400 Hv 정도로서 ferrite 180 Hv, pearlite 230 Hv 정도에 비해 매우 높음을 알

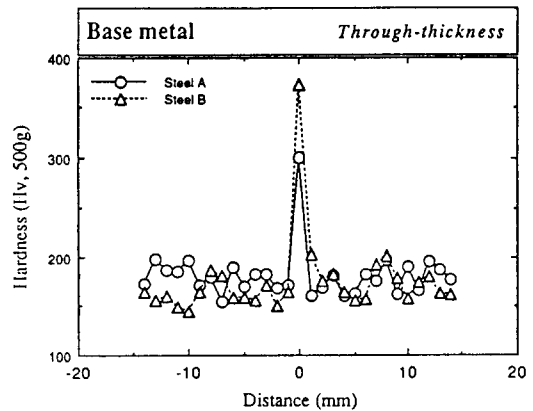


Fig. 2 Hardness distribution of the base metal in the through-thickness direction

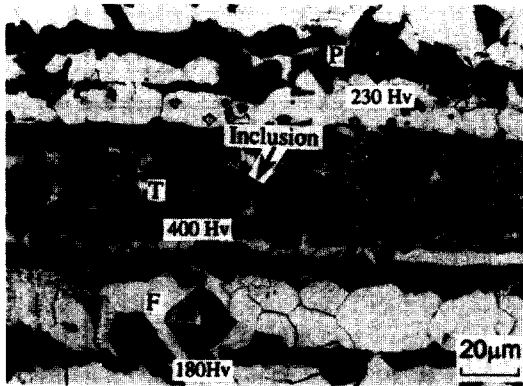


Photo. 2 Typical microstructure of ferrite(F), pearlite (P) and transformed structure(T) near the mid of thickness

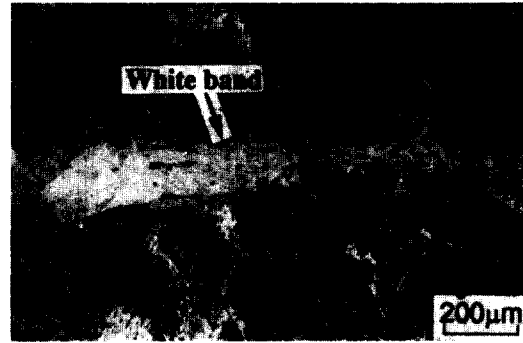
수 있다.

이상과 같은 조직관찰 및 경도 분포 결과로부터, pearlite band내에 존재하는 변태조직은 martensite 및 bainite등과 같은 저온변태조직이라고 생각된다.

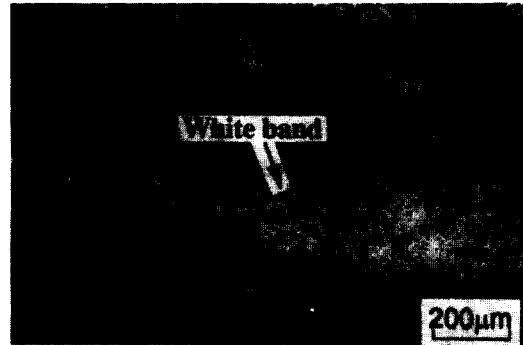
### 3.1.2 재현 용접부

Photo. 3은 판두께 중심부근에 대한 재현 용접부의 조직을 나타낸 것으로, 두 시험재 모두 급열, 급냉의 열 cycle에 의해 모재와 상이한 martensite와 bainite의 혼합조직으로 되어 있음을 알 수 있다. 특히 이러한 용접부에는 기지조직에 비해 회계 관찰되는 영역인 백색대<sup>7)</sup>가 국부적으로 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 백색대는 전술한 편석대에 비해 소량이지만, 그 위치는 시험편의 중심부근에서 발생하고 있어 모재에서의 편석대 위치와 일치하며, 또 경도값도 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 약 440 Hv 이상으로서 기지조직의 380~400Hv정도에 비해 현저히 높은 값을 보이고 있다.

Fig. 4는 이러한 고경도의 백색대에 대한 EPMA 분석 결과로서, 일반적인 편석원소로 알려져 있는 Si, Mn, P 및 S를 대상으로 하였다. 백색대에는 주로 P 및 Mn과 함께 소량의 Si이 농화되어 있으나 S의 농화는 확인할 수 없었다. 이러한 P 및 Mn의 농화는 이들 원소가 다른 편석원소들에 비해 담금질 효과가 매우 크기 때문에<sup>1)</sup>, 용접시 급냉에 의해 백색대의 경도가 현저하게 상승한 원인이 된 것으로 판단된다. 한편 거의 동일한 특성을 갖는 P 및 S의 농화정도가 상이한 것은, S의 경우 MnS와 같은 비금속재물의



(a) Steel A



(b) Steel B

Photo. 3 Microstructures of the synthetic HAZ near the mid of thickness

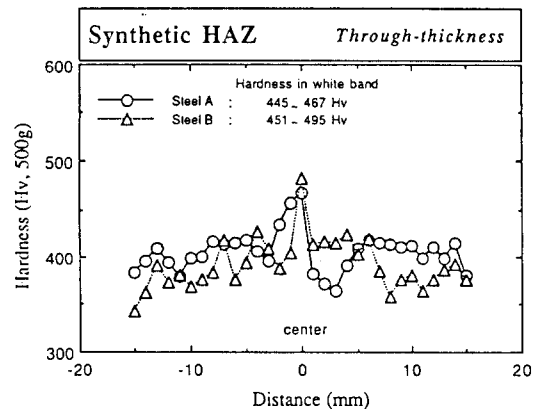


Fig. 3 Hardness distribution of the synthetic HAZ in the through-thickness direction

생성이 용이하고, 또 S의 함량이 P의 1/2정도의 소량이라는 점등에 기인한 것이라 생각된다.

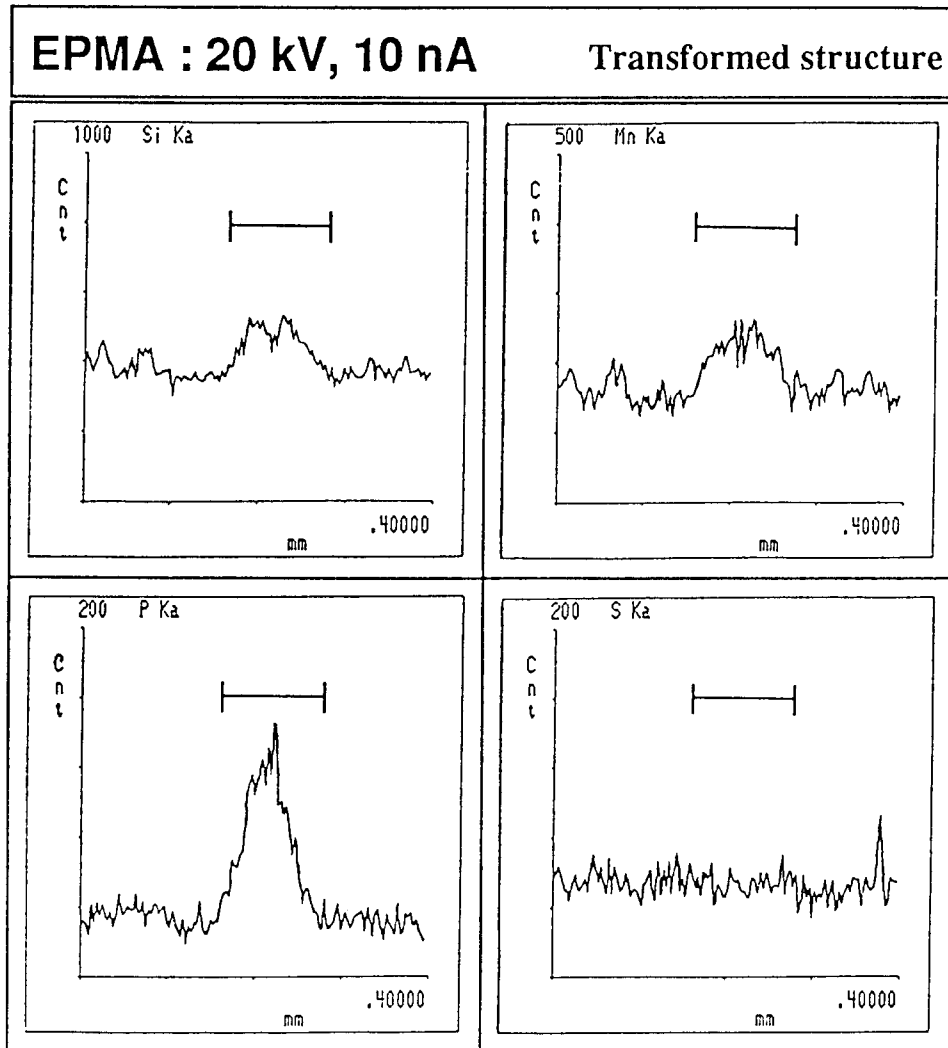


Fig. 4 Change in Si, Mn, P and S concentration in the transformed structure by EPMA

이상의 결과로부터, 모재 판두께 중심부근의 편석대는 용접시 국부적인 P 및 Mn의 농화와 이들 원소의 담금질 효과에 의하여 고경화조직인 백색대로 변태된 것으로 생각되지만, 백색대로 변태되기 위한 편석원소들의 한계농도 및 임계냉각 속도 등 아직 불명확한 점이 많다. 따라서 이들 인자에 포함하는 변태기구에 대해서는 향후 상세히 검토할 예정이다.

### 3.2 용접 저온 균열 감수성

Fig. 5는 판두께 방향의 재현 용접부에 대한 저온

균열 시험 결과를 나타낸 것이다. 두 시험재 모두 data의 편차가 있으며, 특히 B재의 경우 A재에 비해 그 편차정도가 크다. 이것은 기계적인 노치를 가공하지 않은 시험편의 형상과도 관계있으며, 이미 Photo. 1에 나타냈던 바와 같이 B재의 경우 노치 역할을 하는 비금속 개재물 및 변태조직의 분포가 A재에 비해 많기 때문인 것으로 판단된다. 시험결과로부터 명확히 알 수 있는 바와 같이, 동일한 부가하중에서의 파단시간은 전 하중 범위에서 A재가 B재에 비해 장시간 측임을 알 수 있다. 또 균열발생 한계응력도 A재가  $40 \text{ kgf/mm}^2$  정도로서 B재의 15

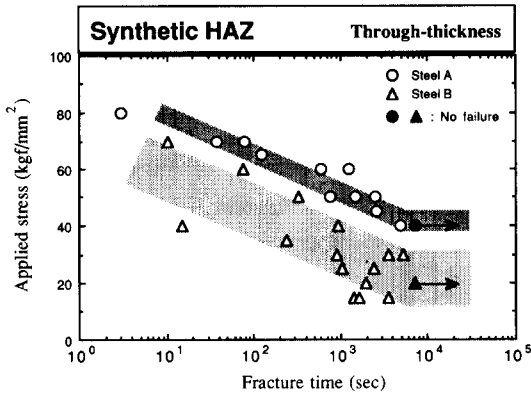
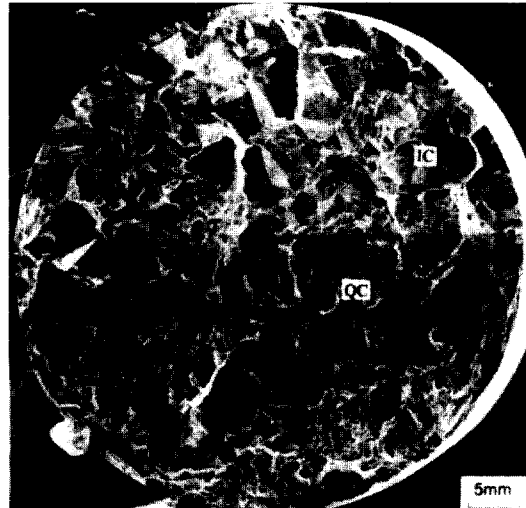


Fig. 5 Cold cracking susceptibility of the synthetic HAZ in the through-thickness direction

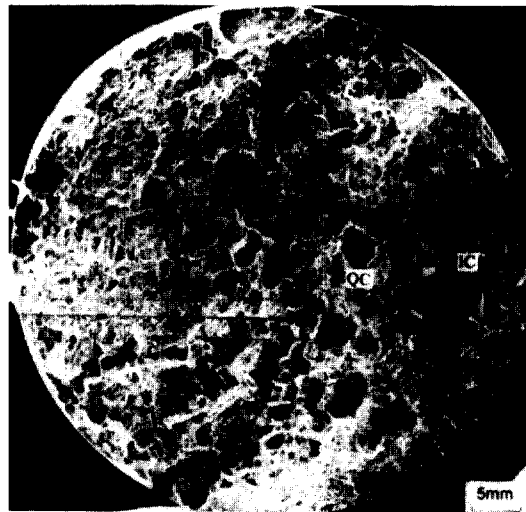
kgf/mm<sup>2</sup>정도에 비하여 2배 이상 높은 값을 보이고 있다.

이와같이 B재가 A재에 비해 균열 감수성이 증가하는 원인을 검토하기 위해 먼저 파면을 관찰했다. Photo. 4는 40 kgf/mm<sup>2</sup>의 동일 응력하에서 파단시간이 각각 4,950sec 및 938sec로서 상이한 시험재 A 및 B의 macro파면을 나타낸 것이다. 두시험재 모두 파면은 입계파면(IC), 입내파괴인 수소 의벽개파면(QC) 및 연성파괴인 dimple파면으로 구성되어 있다. 그러나 비교적 단시간에 파단된 B재의 경우는 입계파면율이 낮고 dimple형태가 많은 반면, 장시간에 파단된 A재는 입계파면율이 높고 dimple형태가 적다. 또 입계파면의 경우 A재가 B재에 비해 파면단위가 크다. Photo. 5는 상기한 두 시험재의 IC 및 QC부를 확대한 것으로, 시험재 모두 IC부는 전형적인 수소에 의한 입계파괴의 형태를 보이지만, B재가 A재에 비해 입계파면의 평활도가 낮다. 한편 QC부는 수소 의벽개파면의 형태로서, 일부 dimple파면이 혼재되어 있고 연신된 MnS계 개재물과 2차 균열도 볼 수 있다. 또 B재가 A재에 비해 dimple 파면율이 높으며 개재물도 비교적 크고 많음을 알 수 있다.

한편, 전술한 고경화조직인 백색대는 용접시 확산성 수소 및 구속응력 때문에 저온균열의 발생 site가 될 가능성이 높을 것으로 생각된다. Photo. 6은 구속하중을 가하지 않고 용접 열cycle만을 부여한 경우 균열이 발생된 예를 나타낸 것이다. 균열은 경화조직인 백색대 내부에서 발생하여 연신된 MnS계 개재물을 따라서 전파하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 백색대의 영향은 일반적으로 구속하중의 부가에 따라



(a) Steel A Applied stress : 40kgf/mm<sup>2</sup>  
Fracture time : 4,950sec



(b) Steel B Applied stress : 40kgf/mm<sup>2</sup>  
Fracture time : 938sec

Photo. 4 Macro fractographs after weld cold cracking test in the synthetic HAZ

증대될 것으로 예상된다. Fig. 6은 50 kgf/mm<sup>2</sup>의 구속하중에서 2,607sec만에 파단된 A재 파면의 단면조직 및 경도 분포를 나타낸 것이다. 단면조직으로부터 백색대의 직접관찰은 곤란했지만, 동일한 열cycle을 부여한 경우 백색대의 경도값이 약 440Hv이상인 사실로부터 파단면상에 많은 백색대가 존재하고 있음을 쉽게 유추할 수 있다.

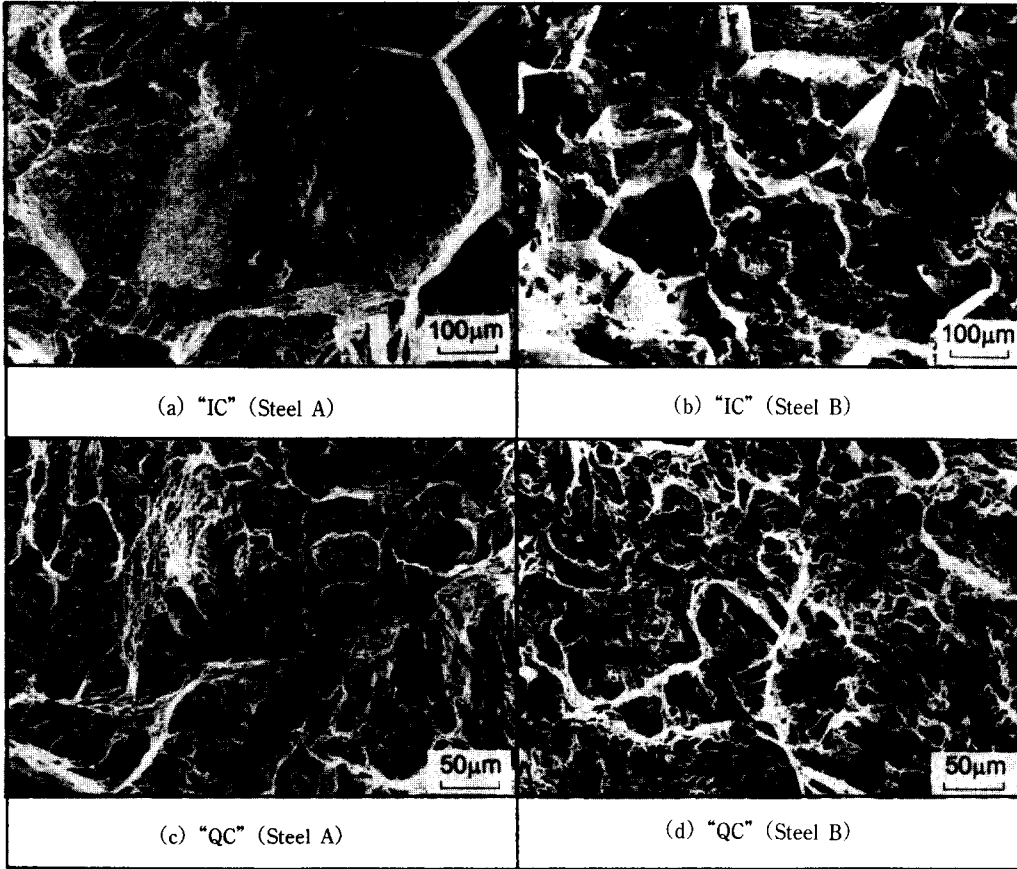


Photo. 5 Typical fractographs of "IC" and "QC" in Photo. 4

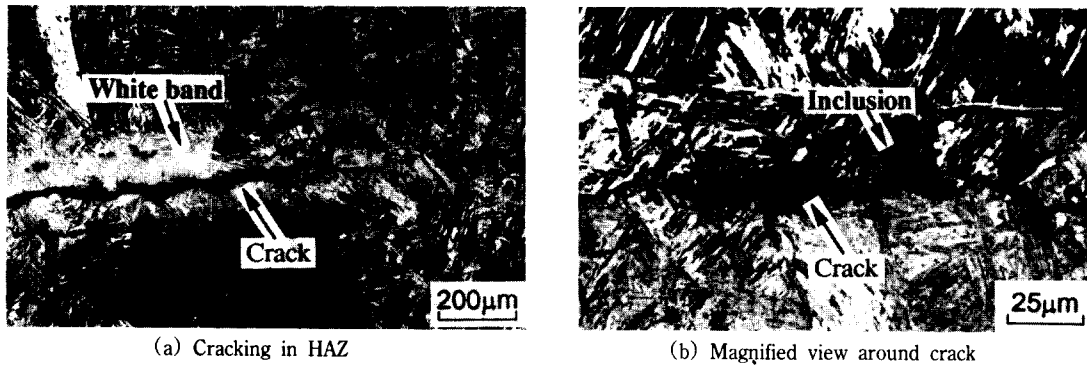


Photo. 6 Cracking in the white band of the synthetic HAZ without applied stress



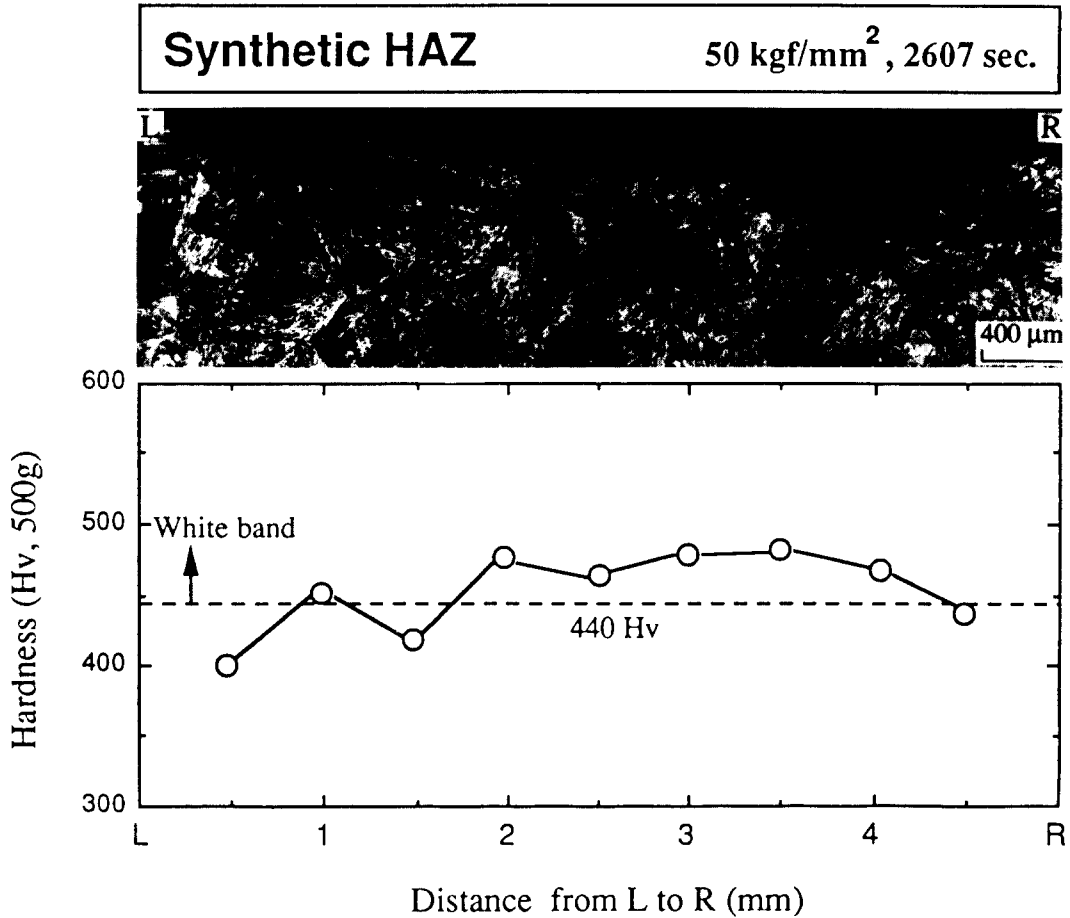


Fig. 6 Microstructure and hardness distribution in vertical cross section of fracture surface

이상의 결과로부터 중심편석대가 존재하는 경우, 용접 저온균열은 주로 편석대가 존재하는 백색대에서 발생되어 비금속개재물을 따라 전파하며, 비금속개재물도 그 발생 기점이 될 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 균열의 발생 및 전파과정에서 일반적으로 저온균열의 발생에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 수소 및 구속응력도 주요 인자로 작용할 것으로 생각된다.

### 3.3 편석립의 분포 특성

Fig. 7은 P를 대상으로 한 농도구간별 semi-macro 편석립의 수를 나타낸 것이다. 시험재 모두 편석립의 대부분은 농도가 0.07 wt.%미만인 I 또는 II 구간에

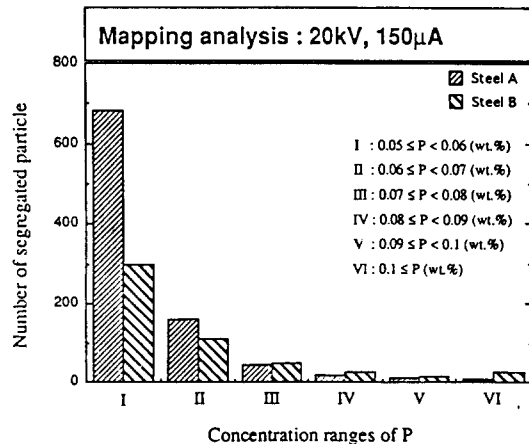


Fig. 7 Distribution of the number of segregated particle in the various concentration range

속해 있으나, 0.07 wt.% 이상인 III~IV 구간에 속하는 고농도의 편석립도 일부 존재하고 있음을 알 수 있다. 편석립의 수는 A재가 B재에 비해 많고 특히 A재의 경우 농도가 0.06wt.% 미만인 I 구간의 편석립이 대부분을 차지하고 있다. 그러나 B재의 경우는 A재에 비해 고농도 구간인 0.07wt.% 이상(III~IV)에 속하는 편석립이 비교적 많이 존재하고 있으며, 특히 0.1wt.% 이상인 VI 구간에 속하는 편석립도 다수 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 판두께 중심부근에서의 농화정도를 나타내는 중심편석도의 경우, A재 및 B재가 각각 1.4 및 1.6 정도로서 B재가 A재에 비해 판두께 중심부근에서의 농화정도가 다소 높았다.

이상과 같은 편석립의 분포 특성으로 볼 때 semi-macro 편석립의 수는 A재가 B재에 비해 많지만, B재가 A재에 비해 고농도의 편석립이 많이 존재하고 중심편석도도 높다. 따라서 판두께 중심부근에서의 편석원소의 농화정도는 B재가 A재에 비해 높을 것으로 판단되며, 전술한 바와 같이 B재의 변태조직의 분포 및 중심편석대에서의 농화정도가 A재에 비해 높은 것은 이러한 편석원소의 농화정도가 상이함에 기인한 것으로 생각된다. 또한 B재가 A재에 비해 균열 발생 한계응력이 현저히 저하하는 것은, 중심편석대에 형성되는 편석립들의 농화정도가 높아지면 보다 경한 중심편석대가 형성되며, 이러한 중심편석대는 용접 열cycle에 의해 경한 백색대로 변태되고, 확산성 수소 및 구속응력등의 복합작용으로 균열의 발생 및 전파가 촉진되기 때문이라 생각된다.

#### 4. 결 론

인장강도 50 kg/mm<sup>2</sup>급 고장력강의 판두께 중심부의 조직, 정도 및 편석립의 분포 특성등을 조사하고, 용접 저온 균열감수성을 평가함으로써 편석대의 영향에 대해 검토하였으며, 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 판두께 중심부에 존재하는 편석대는 ferrite-

pearlite 인 기지조직과는 다른 pearlite band로 나타나며, band내에는 MnS계 개재물 및 국부적으로 고경화 영역인 변태조직이 존재한다.

- 2) 용접 열 cycle에 의하여 중심편석대는 백색대로 변화하며, 백색대는 편석 원소인 Mn 및 P 등의 담금질효과때문에 기지조직에 비하여 높은 경도값을 나타낸다.

- 3) 저온 균열감수성은 편석립의 수보다 편석원소의 농화정도인 중심편석도에 주로 의존된다.

- 4) 용접시 중심편석도가 높을수록 경한 백색대로 쉽게 변화하며, 수소 및 구속응력의 증가에 따라 균열의 발생 및 전파가 촉진되는 것으로 생각된다.

#### 參考文獻

- 1) 白岩俊籃 他：連續鑄造材의 中心偏析 および 鋼塊材의 偏析と 異常組織, 鐵と鋼, Vol.64, No.3 (1978), pp.47~55
- 2) H. J. Kim et al : Advances in Welding Science and Technology, TWR'86 (1986), pp.661~667
- 3) 深川宗光 他：制御壓延材의 溶接割れ 感受性に 關する 一考察, 石川島播磨 技報, Vol.23, No.4 (1983), pp.356~362
- 4) 南雲道彦 他：厚板材質に 對する 連續鑄片의 熱間壓延의 冶金的意義, 製鐵 研究, No.309 (1982), pp.140~148
- 5) 井上尚志 他：極厚高張力鋼의 HAZ 橫割れについて, 溶接學會論文集, Vol.2, No.2 (1984), pp.141~145
- 6) M.Kawamoto et al : Advanced Continuous Casting Process for High-Carbon Steel, Wire Journal, No.7 (1977), pp.64~70
- 7) 菊田米籃 他：連續鑄造過程を 經た TMCP鋼의 溶接低溫割れに 及す板厚中央 偏析의 影響, 溶接學會論文集, Vol.2, No.3 (1984), pp.23~29