

論 文

大韓熔接學會誌  
第3卷 第2號 1985年 11月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 3, No. 2, Nov., 1985

鋼 熔 接 熱 影 響 部 脆 化 域 的 熱 變 形 脆 化 에 關 한 研 究

鄭世喜\* · 金台永\* · 林載奎\*

A Study on Hot Straining Embrittlement of Subcritical HAZ in Steel Weldments

by

S. H. Chung\* · T. Y. Kim\* · J. K. Lim\*

Abstract

The fracture toughness of subcritical HAZ in the hot strained weldments of two structural steels(SB 41 and SA 537) has been investigated by COD test method and metallurgical study.

The obtained results are summarized as follows;

1. The hot straining embrittlement of subcritical HAZ depends on the hot straining amounts of notch tip, and the transition temperature( $T_{1t}$ ) increases with the accumulated hot straining amounts( $\sum|\delta_t|$ ).
2. The fracture toughness of subcritical HAZ depends on materials and microstructure. The transition temperature( $T_{1t}$ ) of subcritical HAZ in SB 41 is almost same as that of parent material, however in SA 537 the temperature is higher than that of parent and lower than that of transformed HAZ.
3. The subcritical HAZ in SA 537 shows a higher toughness at small amounts of hot straining ( $\sum|\delta_t| < 0.3\text{mm}$ ).

1. 緒 論

一般的으로 鋼材를 어떤 온도범위에서 變形시키면 動的 變形時效(dynamic strain aging) 効果에 의해서 材質이 脆化되고 있음은 종래부터 알려져 있는 사실이다. 鋼材, 특히 高張力鋼의 熔接施工에 있어서는 용접부의 靱性確保를 위하여 熔接入熱을 制限하고 있으며, 또 구조물의 판두께가 두꺼워지는 경향이어서 多層熔接은 필연적인 시공법으로 되고있다.

이런경우 용접부에는 熔質原子 濃도가 높아지며, 多層熔接에 의한 熱變形 cycle 이 反復됨으로써 熔接部는

脆化될 가능성이 높아지고 있기 때문에, 鋼 構造物에 있어서 熔接熱影響部(HAZ)의 熱變形脆化(hot straining embrittlement; HSE) 현상은 多層熔接에서 중대한 문제로 되고있다.<sup>1,2)</sup>

특히 多層熔接部에는 熔込不足, 熔接크랙을 포함한 熔接缺陷을 내포할 가능성이 많아서, 이러한 熔接缺陷 先端부근에는 熔接熱變形으로 인한 局部的인 塑性變形은 고려되어야 한다.

따라서 鋼材의 熱變形脆化를 다룸에 있어서는 종래에 연구되어 왔던 여러 因子들과 더불어 上述한 局部的인 塑性變形도 하나의 因子로서 다루어져야 할 것이다.

이러한 관점에서 著者등은 앞서의 연구에서 크랙先端

\* 全北大學校 工科學, 正회원

에서의 塑性變形의 舉動에 注目하여, 熱變形의 累積이 熔接部の 破壊靱性에 어떻게 작용하는가를 軟鋼과 高張力鋼의 母材와 HAZ 粗大組織 그리고 熔着金屬을 대상으로 하여 고찰하였다.<sup>3,4,5)</sup>

여기서 熱變形으로 인한 塑性域의 형성은 組織의 靱性を 低下시키며, 脆化의 정도는 變形量의 累積과 더불어 증가해간다. 또한 鋼材의 熱變形脆化는 材質 및 組織依存성을 갖고 있음을 밝혔다.

그런데 鋼 熔接熱影響部는 A<sub>1</sub>變態點 이상으로 가열된 變質 HAZ(transformed HAZ)와 A<sub>1</sub>變態點이하로(750°C~200°C) 가열된 脆化域(subcritical HAZ)로 구분할 수가 있다. 이 脆化域은 組織의 으로는 거의 變化한 흔적이 없으나, 熱應力과 微視的인 析出에 의해서 材料의 성질은 temper 脆化 등으로 劣化되고 있어서, 熱變形脆化를 다음에 있어서는 이 組織에 대한것도 고려되어야 함이 요구되고 있다.<sup>6)</sup>

따라서 本 연구에서는 軟鋼(SB41)과 低溫用鋼인 50 kg/mm<sup>2</sup>급 高張力鋼(SA537, class 1, ASTM)을 대상으로 subcritical HAZ에 注目하여 熱變形脆化의 舉動을 고려하여 이를 變質 HAZ의 脆化學動과 비교 검토하였다.

## 2. 實驗材 및 實驗方法

### 2.1 材料 및 熔接

實驗에 사용한 材料는 市販되는 板 두께 25mm의 SB 41鋼과 板 두께 38mm인 50kg/mm<sup>2</sup> 高張力鋼인 SA537 class 1, ASTM鋼으로서 그 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 1과 같다. 준비된 두 鋼板은 熔接을 위해서

Fig. 1과 같이 두께 25mm, 폭 150mm 길이 400mm의 작은 板으로 절단 하였으며, 그 표면에 V字형 홈을 壓延방향과 直角으로 기계가공 하였다.

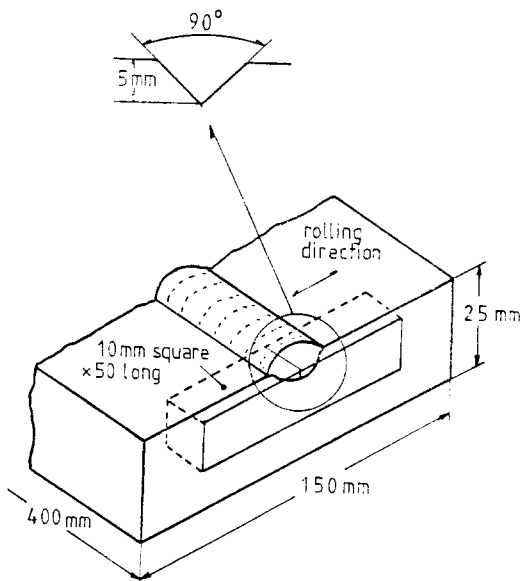


Fig. 1. Extraction of specimen from welded block

용접은 板에 가공한 홈 위를 따라 잠호용접기(submerged arc welder)를 써서 1층으로 자동용접되었으며, 용접조건은 Table 2와 같다. 용접에 사용된 心線과 후락스는 AWS F76-EH14급이었다.

Table 1. Chemical compositions(wt. %) and mechanical properties

Materials	chemical compositions(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SB 41	0.22	0.26	0.81	0.012	0.013	—	—	—	—
SA 537	0.18	0.35	1.31	0.017	0.007	0.01	0.02	0.01	Tr
	mechanical properties								
	yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )			tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )			elongation (%)		
SB 41	31.5			47.2			44		
SA 537	36.5			55.4			31		

Table 2. Welding conditions

Materials	heat input (KJ/cm)	current (A)	voltage (V)	welding speed (cm/mm)	wire dia (mm)	preheating temp. (°C)
SB 41	30	450	33	30	4	100
SA 537	30	500	30	30	4	150

(Flux/wire: AWS F76-EH14)

2.2 試驗片

破壞靱性 試驗 등 각종 實驗에 사용될 시험편은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 용접된 小板으로 부터 절단한 후에 양 측면을 研磨廢蝕시키고 노치(notch) 設定位置의 微視組織을 확인한 다음, 치수가 10×10×55mm인 Charpy 표준시험 크기로 가공하였다. 이 때 노치의 위치는 그 先端이 HAZ와 母材의 중간쯤인 脆化域(subcritical HAZ, embrittled zone)에 위치하도록 하였다. 여기서 취화역은 용접시 A<sub>1</sub>變態點이하까지 가열되어 熱應力 및 析出 등에 의해서 脆화된 영역으로, 위치의 확인은 Fig. 2에서와 같이 용접부에 대한 微小硬度를 測定하여 A<sub>1</sub>變態點을 지나 약간 硬化된 곳으로 정하였다.

노치의 가공은 두께 0.14mm인 切斷板을 사용하여, 용접선과 直角방향이고 노치 진행방향이 板 두께

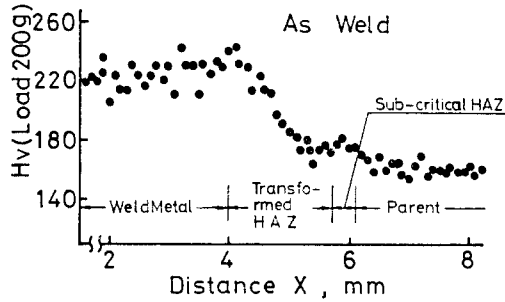


Fig. 2. Distribution of microhardness

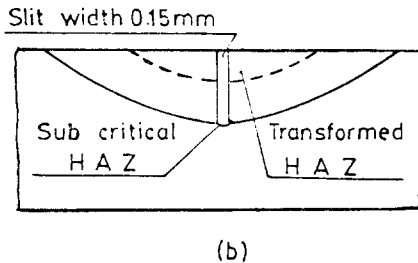
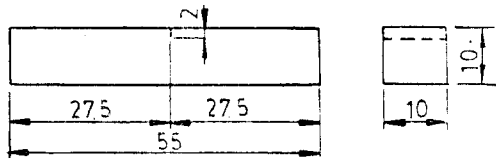


Fig. 3. Specimen dimension for COD test and schematic illustration of slit location

방향(ASTM, L-S型)과 같게 깊이 2mm의 slit가공을 하였다. 지금까지의 연구결과에 따르면 노치 先端 위치가 용접부의 破壞靱性に 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에, 노치가공에 있어서는 특별히 주의하였다.

Fig. 3은 노치의 가공 위치를 설명하는 그림이다.

2.3 熱變形

상술한 바와 같은 과정에 의해서 준비된 母材와 용접 시험편은 열변형 굽힘장치에 의해서 노치선단에 열변형이 주어졌다. 열변형 과정은 Fig. 4에서 설명하는 바와 같이, 먼저 3점굽힘에 의해서 노치선단에 소정의 開口變形  $\delta_1$ 를 준다음(a, b도), 시험편을 상하로 反轉시켜(c도) 그림에서와 같이 4점굽힘 하중으로 시험편 중심축이 水平이 될 때까지 複元시켰다. 이 때 變形時의

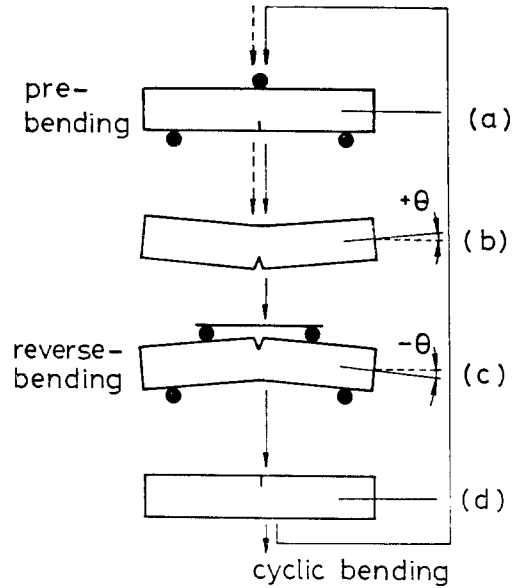


Fig. 4. Hot straining process of bending specimen

분위기 온도는 본 실험에 사용한 재료에 있어서 가장 脆弱한 熱變形溫度인 250°C<sup>7)</sup>로 정하였으며, 하중속도는 0.2mm/min이었다.

한편, 노치선단에서의 變形量測定은 後述한 크랙開口變位(crack opening displacement; COD)測定法<sup>8)</sup>을 응용하였다.

본 실험에서 熱變形量은 Fig. 4에 도시한 변형과정을 1 cycle로 하여 인장과 압축과정에서 일어난 變位量 2 $\delta_1$ 에 cycle 회수를 곱한 값으로 하였으며, 이 값을 累積開口變位量(accumulated COD)이라 칭하고  $\Sigma|\delta_1|$ 라 표시하기로 한다.

Table 3. Straining conditions.

Specimen	Displacement $\delta t(mm)$	Number of loading cycle $N$	Accumulated displacement $(mm)$ $\sum \delta t  =  \delta t  \times 2N$
Parent	0	0	0
Transformed HAZ	※ $\pm 0.1$	1	0.2
Subcritical HAZ	$\pm 0.05$	3	0.3
HAZ	$\pm 0.1$	3	0.6

※ (+) Positive load  
(-) Negative load

Table 3은 열변형조건을 나타낸 것으로, 表중의  $\delta_t$ 에서 앞에 붙은±의 기호는 열변형 과정에서의 굽힘과 複元(Fig. 4참조)의 뜻을 표시한 것이다.

2.4 破壞靱性試驗

熱變形을 받은 각종 시험편은  $-175^{\circ}C$ 에서  $-25^{\circ}C$ 사이의 온도 범위에서 영국규격 BS 5767-79에 따라 3점 굽힘 COD(crack opening displacement) 파괴인성시험을 실시하였다.

3. 實驗結果 및 考察

Fig. 5는 SB 41鋼의 母材와 變質 HAZ 조직에서 熔融線에 인접한 粗大組織(앞으로 熔融線이라 칭한다)과 脆化域에 대해서 실시한 COD 破壞靱性시험의 결과이다. COD 溫度依存曲線은 熔融線의 경우가 가장 저온측에 위치하고 있으며, 脆化域, 母材의 순으로 고온측으로 옮겨지고 있다. 따라서 HAZ域의 粗大組織과 脆

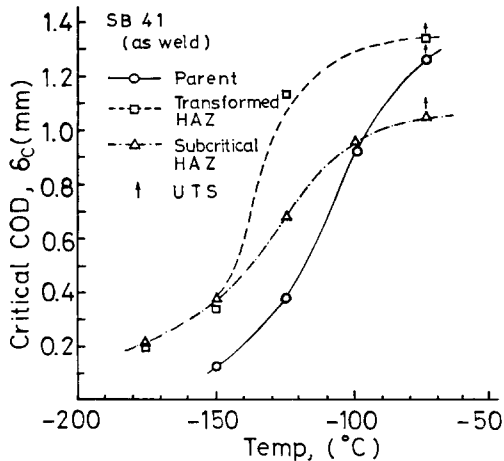


Fig. 5. Relation between critical COD and temperature(SB 41, as weld)

化域의 파괴인성은 모재에 비하여 향상된 것으로 나타나고 있다.

이러한 결과는 용접시 入熱量의 크기에 따라서는 용접재의 인성이 모재의 그것보다 클 수도 있다는 종래의 보고<sup>9)</sup>를 확인해 주고 있다.

용접된 상태에서 이와 같은 파괴인성치를 갖는 subcritical HAZ 조직에 열변형을 가한 후 COD 파괴인성시험을 행하면 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 누적열변형의 총량이 증가함에 따라 온도의존곡선은 고온측으로 이동하고 있다. 같은 재료에서의 母材와 HAZ 조직에서의 COD 측정결과<sup>9)</sup>와 동일한 경향을 나타내는 것으로 열변형이 조직을 脆化시키고 있음을 보여주고 있다.

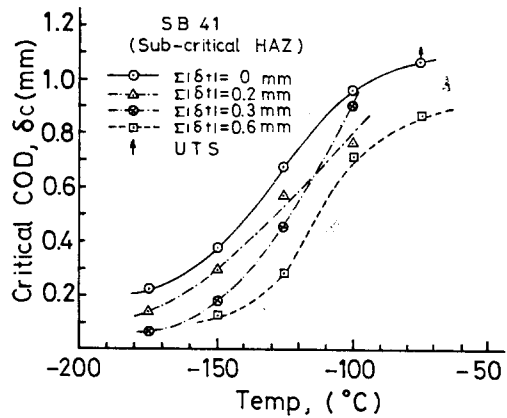


Fig. 6. Relation between critical COD and temperature(SB 41, subcritical HAZ)

Fig. 7은 앞과 동일한 방법에 의해서 구하여진 SA 537鋼의 용접부의 각 조직에 대한 COD파괴인성 시험 결과이다. 연강에 있어서와는 달리 母材의 온도의존곡선이 가장 저온측에 위치하고 있어서 인성이 가장 좋으며, 다음이 脆化域이고 熔融線의 온도의존곡선이 가장 고온측에 있어서 용접시공으로 인하여 그만큼 인성이

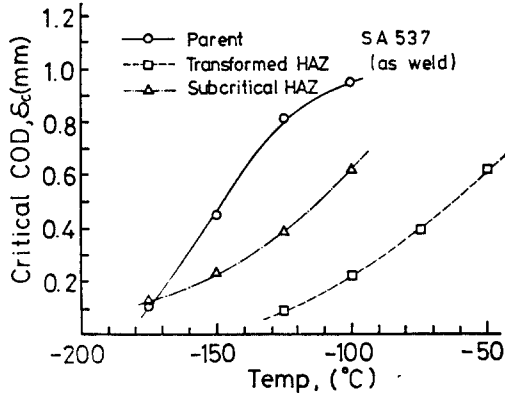


Fig. 7. Relation between critical COD and temperature(SA 537, as weld)

낮아지고 있음을 볼 수 있으며, 이것은 SB 41 鋼과는 다른 결과이다.

subcritical HAZ 조직에 대해서 누적된 열변형량과 파괴인성과의 관계를 살펴보면 Fig. 8과 같다. 이 역시 연강의 경우에서와 마찬가지로 누적 열변형량이 많아지면 COD의 온도의존곡선은 고온측으로 이동하고 있어서, 열변형은 재료의 파괴인성을 크게 저하시키고 있음을 말해주고 있다.

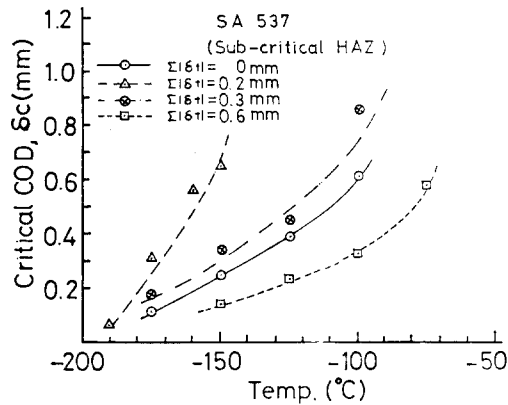
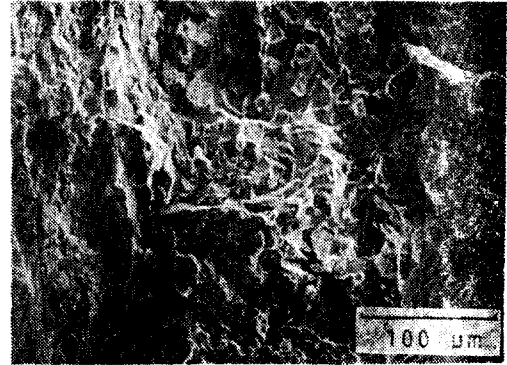
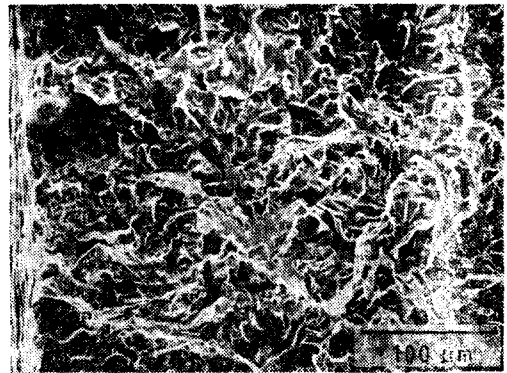


Fig. 8. Relation between critical COD and temperature(SA 537, subcritical HAZ)

Photo. 1은 굽힘과단시험이 끝난 각종시험편의 파단면을 走査形 전자현미경으로 살펴본 한 예이다. 限界開口變位  $\delta_c = 0.2 \sim 0.3mm$ 의 범위에서는 脆性破面과 延性破面이 混合하여 存在하고 있으며,  $\delta_c < 0.2mm$ 에서는 전부 脆性破面으로 되어 있다. 따라서 COD시험에서 靱性評價의 한 方法으로 각 COD곡선에서 脆性破面이 시작된다고 보는  $\delta_c = 0.25mm$ 에서의 온도를 延一脆



SB41 Subcritical HAZ  
-175°C  $\Sigma|\delta_i| = 0.2mm$   $\delta_c = 0.32mm$



SA537 Subcritical HAZ  
-150°C  $\Sigma|\delta_i| = 0mm$   $\delta_c = 0.24mm$

Photo 1. Scanning electron micrographs

性遷移溫度(transition temperature;  $T_{tr}$ )라고 정의<sup>10)</sup>하면, 이  $T_{tr}$ 의 값으로 조직의 취화정도를 평가할 수가 있다.

이에 따라 위의 각종 COD 선도에서 친이온도  $T_{tr}$ 값을 實測하면 Fig. 9, 10과 같으며, 이들 선도를 보면 재질과 조직에 따라 각기  $T_{tr}$ 값을 달리하고 있어서 열 변형에 의한 脆化는 재질과 조직에 의존하고 있음을 알 수 있다. 이들 선도에는 각 組織에 대한 熱變形脆化의 感受性を 비교하기 위하여 이미 보고된 母材와 熔融線에 인접한 粗粒域에 대한 결과<sup>5)</sup>를 並記하였다. 이들 관계를 두 재료별로 살펴본다.

Fig. 9는 SB41鋼의 경우로 이를보면 as weld 상태에서 母材에 比하여 친이온도  $T_{tr}$ 이 約 30° 저온측으로 내려가 있어서 熔接熱로 인하여 조직의 靱성이 향상된 것으로 되어 있음은 앞서 記述한 바와 같으며  $\Sigma|\delta_i|$ 가 0.2mm보다 작은 범위에서의  $T_{tr}$ 의 변화는 그렇게 크

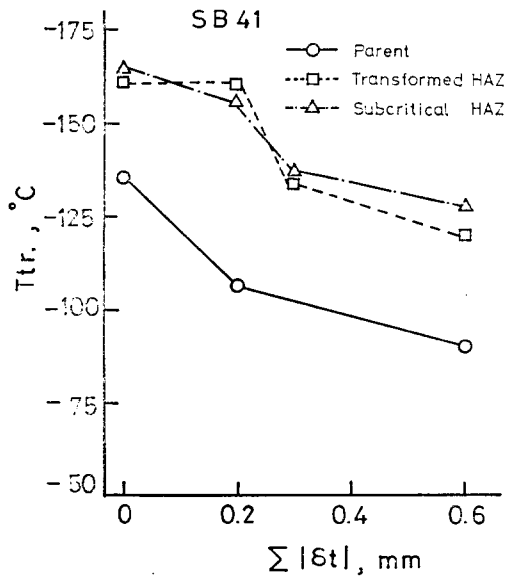


Fig. 9. Relation between transition temperature and accumulated COD(SB 41)

지 않으나 0.2mm를 지나 0.3mm사이에서 급격히 고온측으로 상승하고 있어서  $\Sigma|\delta_t|$ 가 0.2mm 이상의 熱變形은 組織을 크게 脆化시키고 있음을 볼 수가 있다.

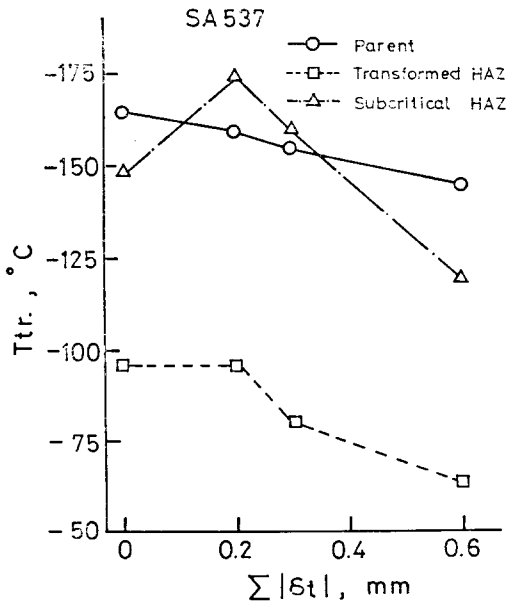


Fig. 10. Relation between transition temperature and accumulated COD(SA 537)

특히  $\Sigma|\delta_t|=0.6mm$ 에서는 母材의 處女材보다도  $T_{tr}$ 값이 고온측에 있어서 0.6mm 이상의 큰 熱變形은 組織의 靱性確保의 면에서 문제가 있다. 한편 變質된 HAZ, 즉 熔融線에 接한 粗大組織과 비교해 보면 그림에서 알 수 있듯이 큰 差를 볼 수가 없다.

SA537 鋼에서  $T_{tr}$ 과  $\Sigma|\delta_t|$ 의 관계는 Fig. 10과 같다. as weld 상태에서는 母材보다 약 15° 고온측으로 粗粒域에서 보다는 약 50° 저온측에 있어서 母材보다는 脆化되고 있으나 粗粒域보다는 상당히 큰 靱性を 갖고 있음을 알 수가 있다. 그러나 熱變形量  $\Sigma|\delta_t|$ 가 증가함에 따라 점차적으로 靱性が 저하하는 SB41 鋼의 경우와는 달리 0.2mm의 熱變形에서 靱性が 갑자기 좋아져서  $T_{tr}$ 값이 母材보다 저온에 있으며, 이로부터 다시  $\Sigma|\delta_t|$ 터량의 증대와 더불어  $T_{tr}$ 값이 母材보다 고온측으로 상승하고 있어서 組織은 다시 脆化되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이  $\Sigma|\delta_t|=0.2mm$ 에서 일시적으로 靱性が 향상되는 현상은 이 재료의 특성으로 熱變形으로 인한 加工硬化와 저온 tempering 効果의 상관관계라고 생각할 수 있다.

以上の 관찰을 통해서 볼 때 脆化域의 熱變形脆化의 정도는 變質된 HAZ 즉 粗粒域보다는 못하나 母材보다는 脆化되는 舉動을 보이고 있다.

또한 累積 熱變形量에 대한 脆化의 感受性は 母材나 熔融線의 粗粒域의 경우와 같은 경향을 보이고 있어서 施工에서 큰 熱變形量이 예견되는 경우는 주의할 것을 일 필요가 있다고 본다.

#### 4. 結 論

軟鋼(SB41)과 高張力鋼(SA537, class 1)의 熔接熱影響部에서 脆化域(subcritical HAZ)을 대상으로 熔接熱變形이 이들 組織의 脆化에 미치는 영향을 COD파괴인성시험 및 金屬學的 觀察를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) subcritical HAZ 組織의 熱變形脆化는 變質域에서와 마찬가지로 노치先端에서의 熱變形量에 의존하며, 累積熱變形量  $\Sigma|\delta_t|$ 의 증가에 따라 遷移溫度  $T_{tr}$ 의 값은 고온측으로 상승한다.

2) subcritical 組織의 파괴인성은 材料와 組織에 대한 의존성이 있으며, 軟鋼의 경우 母材와 비슷하고 高張力鋼은 母材와 粗大組織의 중간에 있다.

3) 高張力鋼의 subcritical HAZ 組織은  $\Sigma|\delta_t|<0.3mm$ 의 적은 熱變形量에서는 일시적으로 파괴인성이 향상된다.

謝 辭

本 研究는 82, 83年度 한국과학재단의 연구비 지원에 의한 연구의 一部로 재단에 심심한 감사를 드리며, 實驗을 도와준 全州工專大 柳堡永君과 鄭熙敦君에게도 감사를 드리는 바입니다.

參 考 文 獻

1. F. M. Burdekin, British Welding Journal, Vol. 14(1967), p. 81
2. 安藤柱, 日本溶接學會誌, Vol. 48, No. 5(1979), p. 55
3. 金台永, 林載奎, 鄭世喜, 大韓溶接學會誌, 第2卷,

- 第1號(1984), p. 41.
4. 鄭世喜 外 4人, 全北大論文集, 自然科學篇, 第26集, (1984), p. 127
5. 鄭世喜, 金台永, 林載奎, 大韓溶接學會誌, 第3卷, 第1號(1985), p. 22
6. R. E. Dolby, Metallurgy, (1971), p. 997.
7. 金洙鏞, 全北大 大學院 碩士學位論文(1982)
8. B. S. 5767-79, Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing (1979)
9. E. Banks, Welding Journal, Vol. 53 (1974), p. 299
10. C. L. Formby, et al, International Journal of Fracture Mechanics, Vol. 6(1970), p. 91
11. 鄭世喜, 金台永, 林載奎, 韓國科學財團 研究結果報告書(1983)



—근사치 결정(Rounding Values)—

어떤 숫자를 자릿수를 줄여서 표시할 때는 다음 절차를 따라야 한다.

- (1) 버리려는 수의 첫자리 수가 5보다 작을 때는 남아 있을 수의 끝자리 수는 변하지 않는다.  
 보기) 3.463 25를 4자리 수로 줄이면 3.463이 되고 3자리 수로 줄이면 3.46이 된다.
- (2) 버리려는 수의 첫자리 수가 5보다 크거나 또는 5인데 그 뒤에 0이 아닌 수가 있으면 남아 있을 수의 끝자리 수는 하나 증가시킨다.  
 보기) 8.376 52를 4자리 수로 줄이면 8.377이 되고 3자리 수로 줄이면 8.38이 된다.
- (3) 버리려는 수의 첫자리 수가 정확히 5이거나, 그 뒤에 0만 있으면 남아 있을 수의 끝자리 수는 그 숫자가 홀수이면 1이 증가하고 짝수이면 변하지 않는다.  
 보기) 4.365를 3자리로 줄이면 4.63이 되고, 4.355를 3자리로 줄이면 4.36이 된다.