

論 文

大韓熔接學會誌
第3卷第1號 1985年5月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 3, No. 1, May, 1985

라멜라 테어 發生感受성에 미치는 非金屬介在物の 影響

方 國 守* · 李 鍾 鳳*

Effect of Non-Metallic Inclusion on Susceptibility to Lamellar Tearing

by

K. S. Bang*, J. B. Lee*

Abstract

Lamellar tearing susceptibility and through-thickness tensile ductility have been investigated in 40kg/mm² and 50kg/mm² class tensile strength steel plates in terms of cleanliness of non-metallic inclusion and welding condition.

The plate which had 0.01% cleanliness of A-type inclusion (MnS) had 61% of the reduction of area in the through-thickness direction and did not show lamellar tearing.

Lamellar tearing susceptibility decreased with increasing the preheat and interpass temperature. The plate which had 0.04% cleanliness of A-type inclusion did not show lamellar tearing under the condition of 75°C of preheat and interpass temperature.

1. 緒 論

최근 高層建築, 海洋構造物 등과 같은 熔接構造物의 大型化 및 設計의 多樣化에 따라 鋼板 두께 方向에 커다란 拘束應力이 作用하는 熔接構造物이 많이 나타나게 되었는데 이러한 構造物에 있어서는 鋼板表面에 平行한 層狀의 龜裂, 즉 라멜라 테어(Lamellar tear)가 發生하기 쉬워 큰 問題로 되고 있다.¹⁾

이러한 라멜라 테어의 發生要因으로는 鋼板中에 存在하는 非金屬介在物(以下 介在物), 熔接에 의한 板 두께 方向의 收縮應力, 水素脆性 등 여러 가지를 생각할 수 있는데²⁾ 鋼材 材質上의 問題로서는 鋼板中의 介在物에 對한 對策이 必要하다.

本 研究에서는 sulfur 含量의 低下, 그리고 Ca 添加

가 各各 介在物의 分布와 形狀에 미치는 效果를 比較 調査하여 이러한 效果에 의한 鋼材의 耐 라멜라 테어 性 向上 및 衝擊靱性の 異方性 改善에 對하여 檢討하였으므로 實際 熔接作業時의 熔接條件에 따른 라멜라 테어 感受性도 아울러 檢討하였다.

2. 實驗方法

2.1 試驗材

試驗材는 引張強度 40kg/mm² 級 및 50kg/mm² 級 鋼들로서 Table 1에 化學成分 및 機械的 性質을 나타내었다. 各 級의 鋼板은 라멜라 테어 感受性과 密接한 關聯이 있다고 생각되는 sulfur 含量을 3水準 變化시켰으며 특히 steel C와 F에는 介在物 形狀 變化에 의한 效果를 同時에 調査하기 위하여 Ca를 添加하였다.

* 浦項綜合製鐵(株) 技術研究所
厚板研究室, 鄭희원

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of steels

Steel	Thick-ness (mm)	Chemical comp. (wt. %)									Mechanical prop.			Ceq*	Remarks
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Nb	V	Ca	Y.P (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	El. (%)		
A	30	0.165	0.26	0.74	0.017	0.022	0.01				31	45.7	31	0.30	40kg/mm ² grade mild steels
B	25	0.133	0.24	0.82	0.015	0.007	0.01			29	45	30	0.28		
C	25	0.120	0.24	0.78	0.015	0.005			37ppm	29.3	44.5	30.8	0.26		
D	25	0.138	0.41	1.36	0.014	0.010	0.01	0.03			36	55	27	0.38	50kg/mm ² grade high strength steels
E	25	0.152	0.42	1.42	0.014	0.007	0.02	0.056		37	56	27	0.41		
F	25	0.155	0.43	1.50	0.014	0.005			48ppm	40.7	56.7	26.6	0.42		

* Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + Mo/4 + V/14 (%)

2.2 板 두께 方向 引張試驗

라멜라 테어 感受性에 對한 鋼材 評價基準의 하나인 板 두께 方向 斷面收縮率을 調查하기 위하여 各 試驗材에 對하여 板 두께 方向 引張試驗을 行하였다. 試驗片의 採取方法과 形狀을 Fig. 1에 나타내었으며 摩擦接 그대로의 狀態에서 引張試驗을 行하였다.

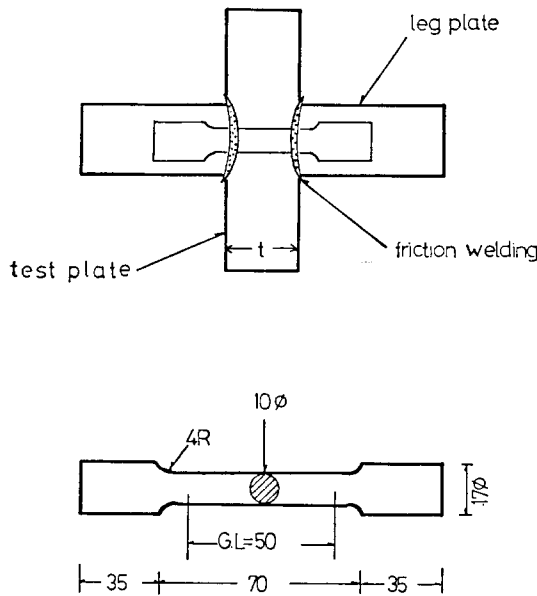


Fig. 1. Configuration and extraction of through-thickness tensile test specimen.

2.3 Cranfield type 熔接龜裂試驗

實際 熔接에 의한 라멜라 테어 發生 狀況을 調查하기 위하여 라멜라 테어 再現試驗의 하나인 Cranfield 試驗을 行하였다. Fig. 2에 試驗片의 形狀을, Fig. 3에 crack 觀察用 試驗片의 採取方法 및 crack ratio의 算定方法을 나타내었다. crack 檢查는 熔接終了後 24時

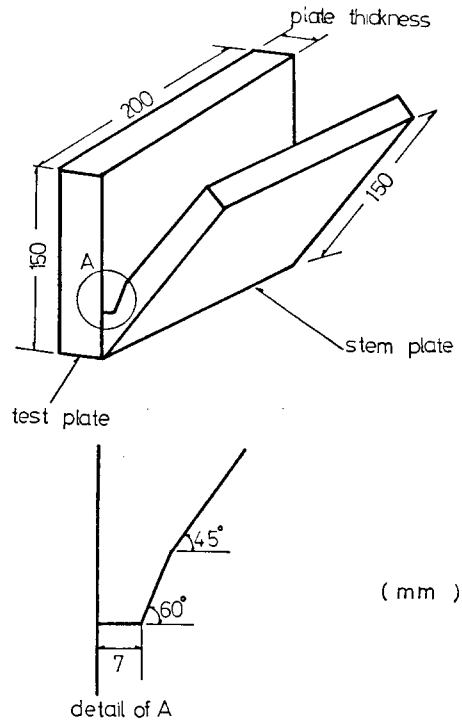


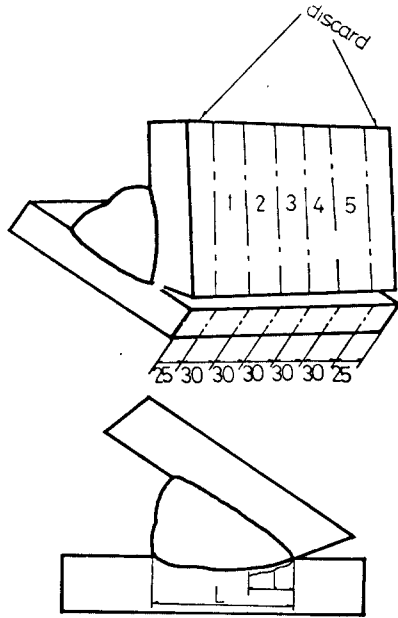
Fig. 2. Specimen of Cranfield test.

間 放置한 다음 Fig. 3의 要領으로 試驗片을 5斷面 分割한 後 各 斷面에 對하여 研磨하여 光學顯微鏡을 使用하여 行하였다.

試驗片의 熔接은 40g/mm² 級 軟鋼에 對해서는 일메나이트스와 低水素系熔接棒을 使用하였고, 50kg/mm² 級 高張力鋼에 對해서는 低水素系熔接棒을 使用하여 豫熱 · pass間 溫度를 3水準 變化시켜 被覆 arc 熔接을 行하였다. Table 2에 熔着金屬의 化學成分과 機械的 性質을, Table 3에 熔接條件을 各各 나타내었다.

Table 2. Chemical compositions and mechanical properties of weld metals

Designation	Type	Chemical comp. (wt. %)					Mechanical prop.		
		C	Si	Mn	P	S	Y. P (kg/mm ²)	T. S (kg/mm ²)	El. (%)
KS E 4301	Ilmenite	0.08	0.08	0.53	0.015	0.011	41.2	46.1	32.0
KS E 4316	Low Hydrogen	0.07	0.48	0.78	0.012	0.010	46.4	54.7	33.6
KS E 5016	Low Hydrogen	0.08	0.53	0.98	0.014	0.010	48.2	57.3	32.6



$$\text{Crack ratio} = \frac{1}{5} \times \frac{\sum L_i}{L} \times 100(\%)$$

Fig. 3. Measurement of crack ratio.

Table 3. Welding condition

Electrode	KSE 4301(4φ)	For 40kg/mm ² grade steels
	KSE 4316(4φ)	
	KSE 5016(4φ)	For 50kg/mm ² grade steels
Current	170-180 A	
Voltage	22-24 V	
Welding Speed	15cm/min.	
Heat Input	17-18KJ/cm	
Preheating and Interpass Temp.	Room Temp., 75°C, 150°C	
Deposition Sequence		

3. 實驗結果 및 考察

3.1 介在物 清淨度 및 形狀變化

一般으로 鋼板中에 存在하는 介在物은 壓延에 의하여 길게 늘어난 MnS 등의 A type 介在物, cluster 狀으로 点列한 Al₂O₃ 등의 B type 介在物 그리고 球狀으로 分散된 一般酸化物の C type 介在物로 大別할 수 있으며³⁾ 이중 특히 A type 介在物의 量 및 分布가 라멜라 테어의 發生에 가장 큰 影響을 미친다고 알려져 있다.⁴⁾ Fig. 4에 各 試驗材의 介在物 清淨도를 type別로 나타내었다. 40kg/mm² 級 및 50kg/mm² 級 兩 鋼種 모두 sulfur 含量이 低下함에 따라 清淨도가 向上됨을 알 수 있으며 특히 A type 介在物의 清淨도가 大幅 向上되고 있다. 이중 Ca 添加材의 境遇는 A type 介在物은 거의 보이지 않고 대부분 C type 介在物만 보여져 Ca 添加에 의한 介在物 形狀變化 效果가 뚜렷하게 確認되고 있다.

Photo. 1에 Steel A, Photo. 2에 Steel C의 대표

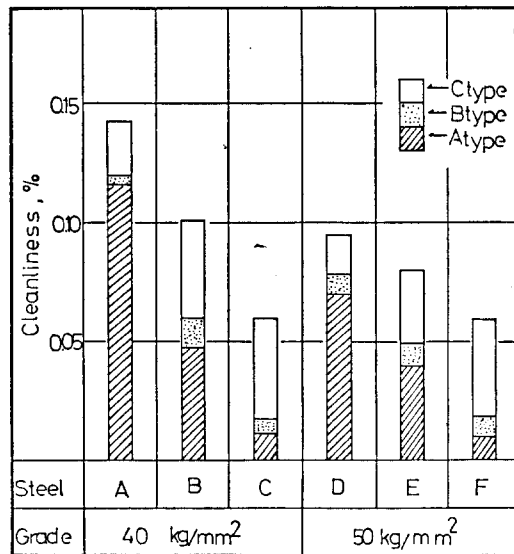
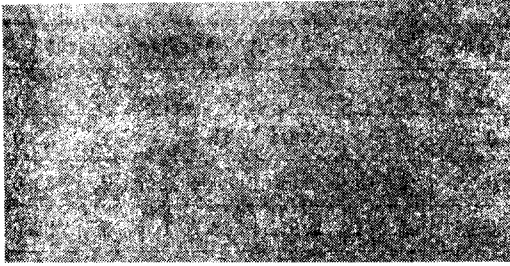
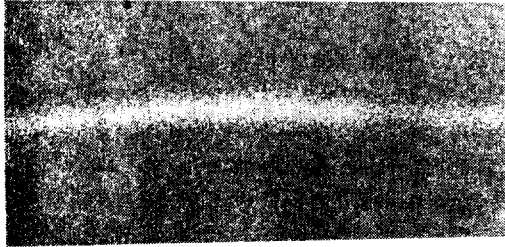


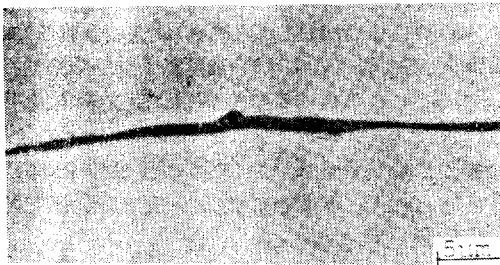
Fig. 4. Results of non-metallic inclusion test.



SE



Mn



S

Photo. 1. X-ray microanalysis of inclusion in steel A



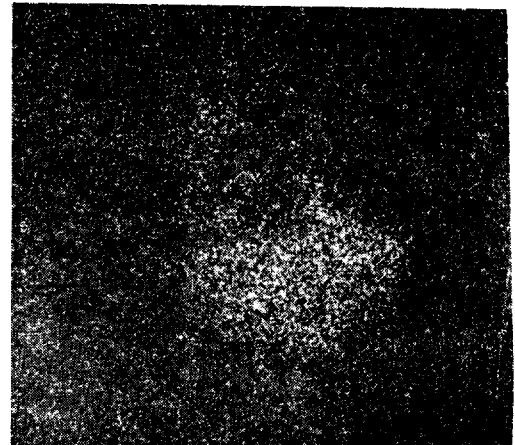
SE



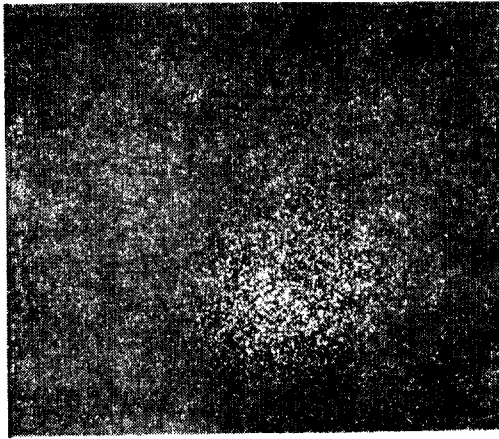
Ca



Al



O



S

Photo. 2. X-ray microanalysis of inclusion in steel C.

적인 介在物の EPMA 分析結果를 各各 나타내었다. Steel A에서는 壓延方向으로 길게 늘어난 MnS 系 介在物이었고 Steel C에서는 球形의 Ca-Al-O-S 系인 Ca 系 複合介在物이었다.

3.2 介在物과 라멜라 테어 感受性과의 關係

3.2.1 板 두께 方向 特性

Fig. 5에 各 試驗材에 對한 板 두께 方向 引張試驗의 結果를 A type 介在物の 清淨度와 斷面收縮率(RAz) 과의 關係로 나타내었다. A type 介在物이 減少함에 따라 RAz가 增加하여 Ca 添加에 의하여 A type 介在物の 清淨도가 0.01% 程度로 向上된 Steel C와 F에서는 各各 62% 및 61%라는 높은 값을 나타내었다. 이러한

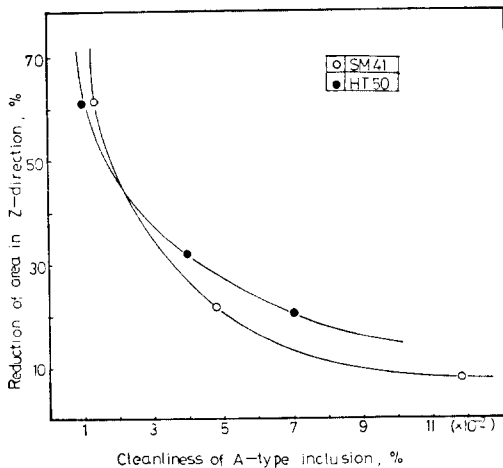


Fig. 5. Relation between cleanliness of A-type inclusion and reduction of area in Z-direction.

介在物과 RAz와의 關係는 一般적으로 介在物の 形狀, 크기, 分散狀態 및 介在物과 母地間의 接合狀態 등과 關聯이 있다고 알려져 있다. Neuber에 의하면⁵⁾ 外部應力이 σ_a 이고 그 外部應力에 대하여 길이 2r인 介在物이 鋼板中에 存在한다면 最大應力集中率, α 는 다음 式으로 表示된다.

$$\alpha = (\sigma_{max}/\sigma_a) = 2(r/\rho)^{1/2}$$

σ_{max} : 最大集中應力

σ_a : 外部應力

2r: 介在物の 長徑

ρ : 介在物先端의 曲率半徑

위의 境遇 應力の 集中에 의한 塑性舉動은 完全히 무시되었기 때문에 이 應力集中에 의한 鋼의 破壞에 미치는 介在物の 影響을 完全히 說明했다고는 할 수 없지만 定性的으로는 應力에 대하여 直角方向으로 긴 介在物の 境遇나 先端이 예리한 介在物の 境遇(A type 介在物)가 比較的 작은 球形의 介在物이 分散하여 있는 境遇보다 crack이 發生하기 쉬워 최종 破斷의 時期를 앞당겨 結果的으로 斷面收縮率의 減少에 連結된다고 생각되어진다.

Photo. 3에는 RAz가 7.7%인 Steel A와 62%인 Steel C의 板 두께 方向 引張試驗片의 破面에 대한 走査電子

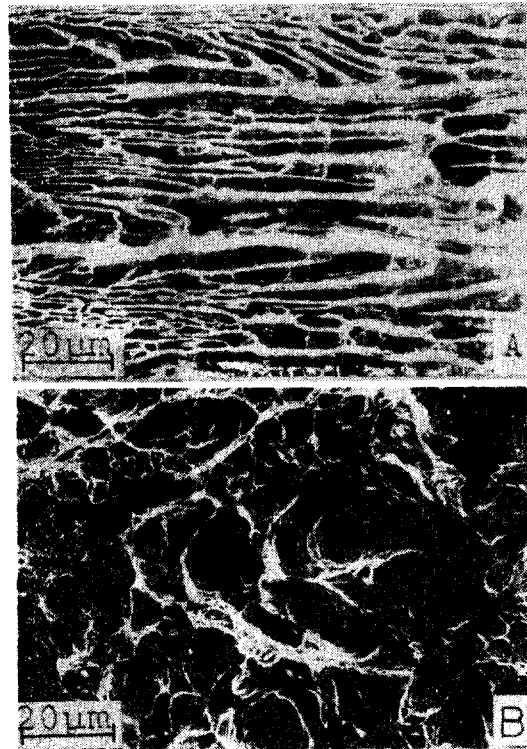


Photo. 3. Fracture surface of steel A (A) and steel C (B).

顯微鏡 사진을 나타내었다. Steel A에서는 壓延方向으로 길게 늘어난 介在物이 보여지며 Steel C에서는 延性破面の 特徵인 dimple과 그 底部에 球形의 介在物이 보여지고 있다.

3.2.2 Cranfield 試驗結果

라멜라 테어 再現試驗 方法中 Cranfield 試驗은 試驗方法이 比較的 簡單하고 試驗精度도 높아 널리 採用되고 있지만 아직까지 試驗片의 形狀, 칫수 등 試驗方法이 統一되어 있지 않다. 本 試驗에서는 川崎製鐵의 覆並禎一 등에 의하여 提案된⁶⁾ 試驗法을 採擇하여 라멜라 테어 感受性評價를 行하였다. Fig. 6에 試驗結果인 균열비(crack ratio)를 A type 介在物의 淸淨度에 따라 나타내었다. 熔接條件으로는 40kg/mm²級 鋼에는 KS E 4316熔接棒을, 50kg/mm²級 鋼에는 E 5016熔接棒을 各各 使用하여 豫熱·Pass間溫度를 常溫으로 熔接하였다. 그림에서 보는 바와 같이 兩 鋼種 모두 A type 介在物이 低下함에 따라 균열비(crack ratio)가 減少하며 Ca添加에 의하여 A type 介在物의 淸淨도가 0.01% 程度로 向上된 steel C나 steel F에서는 균열(crack)이 發生하지 않았다.

Photo. 4에 steel A에서 發生한 代表的인 균열 사진을 나타내었다. 균열은 熔接 bond 部로부터 始作하여 熔接熱影響部를 따라 傳播하고 있음을 알 수 있으며 라멜라 테어의 形態上的 가장 큰 特徵인 階段狀의 모습을 明確하게 나타내고 있다. 이러한 라멜라 테어의 發生은 熔接 後 收縮應力에 의한 介在物과 母地 사이의 開口(decohesion)로 板 表面과 平行한 terrace 部가 생기게 계속하여 剪斷力에 의해 wall部가 생겨 이들 terrace 部가 連結된 것이라고 생각된다. 하지만 一般적으로 terrace部가 介在物보다 훨씬 크고 또 熔接材料의 水素量이나 豫熱溫度 등에 따라 라멜라 테어 發生率이 顯著하게 다른 境遇가 많아 라멜라 테어가 단순히 介在物이 剝離하여 생기는 것이라고는 보기 어렵고 熔接時 混入되는 水素의 存在도 커다란 作用을 한다고 생각되어진다.

photo. 5 (A)에는 低倍率의 라멜라 테어 破面을 나타내었는데 典型的인 terrace and wall 樣相을 나타내

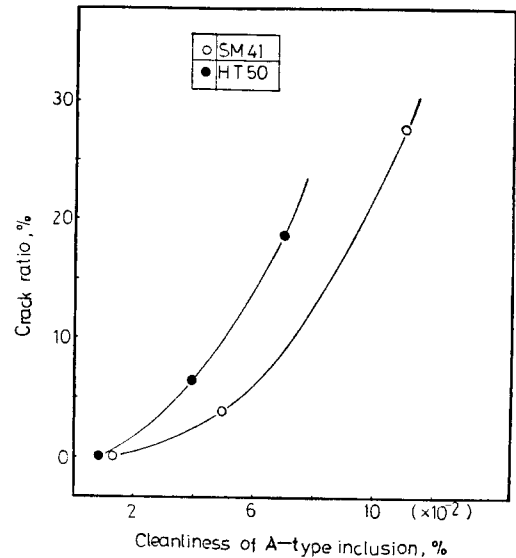


Fig. 6. Relation between cleanliness of A-type inclusion and crack ratio.

고 있음을 알 수 있으며 terrace 部를 擴大한 사진을 (B)에 나타내었다. 壓延方向으로 길게 늘어난 介在物과 이것으로부터 剝離한 平坦한 面(異相界面剝離)으로 되어 있음을 알 수 있다.

3.3 熔接條件과 라멜라 테어 感受性과의 關係

Fig. 7 및 Fig. 8에 40kg/mm²級과 50kg/mm²級 鋼에 대하여 熔接棒과 豫熱·pass間溫度에 따르는 Cranfield 試驗에 있어서의 균열비를 各各 나타내었다. 兩 鋼種 모두 豫熱·pass間溫度가 上昇함에 따라 균열 發生率이 減少하며, 특히 40kg/mm²級 鋼에서는 低水素系熔接棒을 使用한 境遇가 일메나이트系 熔接棒을 使用한 境遇보다 全 溫度範圍에서 균열 發生率이 낮다. Ca添加材인 steel C와 F에서는 豫熱를 行하지 않아도 균열이 發生하지 않아 優秀한 耐 라멜라 테어性을 나타내고 있으며 A type 介在物의 淸淨도가 0.04% 程度인 steel B와 E는 75°C의 豫熱로 균열이 發生하지 않았다. 以上の 實驗結果 低水素熔接棒의 使用 및 豫熱·pass間溫度의 上昇에 의하여 균열 發生率이 減少하여 라멜라

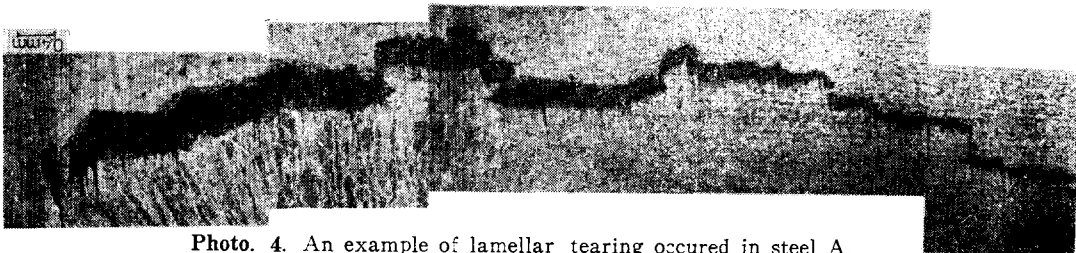


Photo. 4. An example of lamellar tearing occurred in steel A.

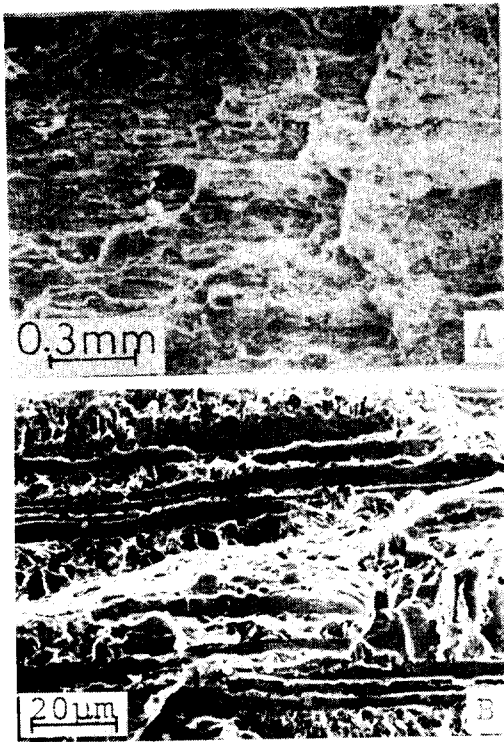


Photo. 5. Fracture surface of lamellar tearing

테어 發生防止에 熔接金屬의 擴散性水素量 低減의 效果가 큰을 確認할 수 있었다. 多層熔接時의 擴散性水素의 舉動은 아직 明確하지 않지만 過度한 塑性 strain을 蓄積하고 있는 root部에 水素가 擴散하여 介在物周圍에 있다고 생각되는 欠陷에 集積한 水素가 $2H \rightarrow H_2$ 로 됨에 따라 壓力이 增加되어 균열이 發生된다고 한다.” 따라서 豫熱·pass間溫度의 上昇에 의하여 root部의 塑性 strain 量을 低下시키며 水素의 擴散을 促進시켜 均열 發生率이 低下된다고 생각되어진다.

3.4 介在物 球狀化에 따른 衝擊靱性 異方性的 改善

介在物의 球狀化에 의한 衝擊靱性 異方性的 改善效果를 調査하기 위하여 壓延方向(L) 및 壓延直角方向(T)의 V notch 試驗片에 대한 Charpy 衝擊試驗을 行하였다. Fig. 9 및 Fig. 10에 試驗結果를 各各 나타내었다. 兩 鋼種 모두 Ca 添加에 의하여 介在物을 球狀化시킨 境遇가 全 試驗溫度 區間에서 衝擊値가 向上되었는데 특히 壓延直角方向의 衝擊値가 크게 向上되었다. 이 結果 Ca 添加材의 衝擊靱性的 異方性(T/L)은 크게 向上되어 通常材의 0.5程度에 대하여 約 0.9程度로 改善되었다. Gurland에 의하여⁸⁾ 介在物이 含有되어 있

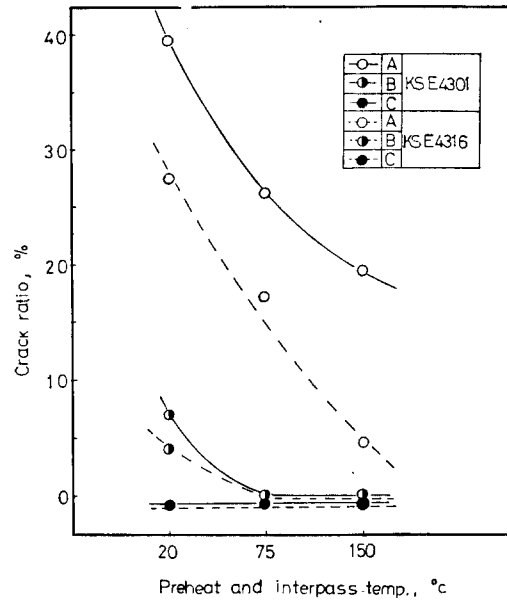


Fig. 7. Relation of preheat and interpass temp. to crack ratio. (40kg/mm² grade steels)

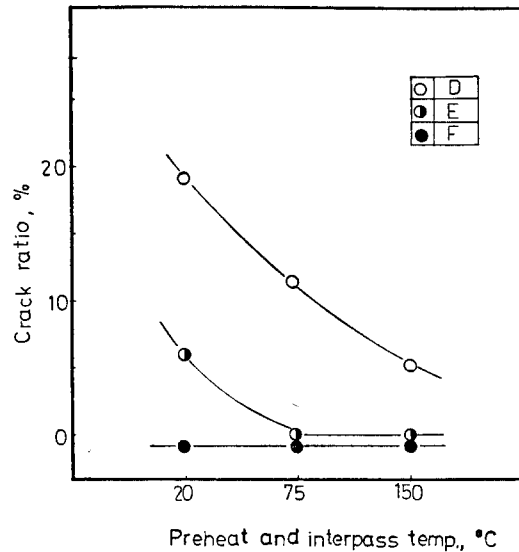


Fig. 8. Relation of preheat and interpass temp. to crack ratio. (50kg/mm² grade steels)

는 鋼材의 延伸破斷伸率, ϵ_R 에 대하여 다음과 같은 關係式이 成立한다고 한다.

$$\epsilon_R = k(1-f)/f$$

k : 比例定數

f : 介在物의 面積率

즉, 延伸破斷伸率과 介在物의 面積率과는 雙曲線的인

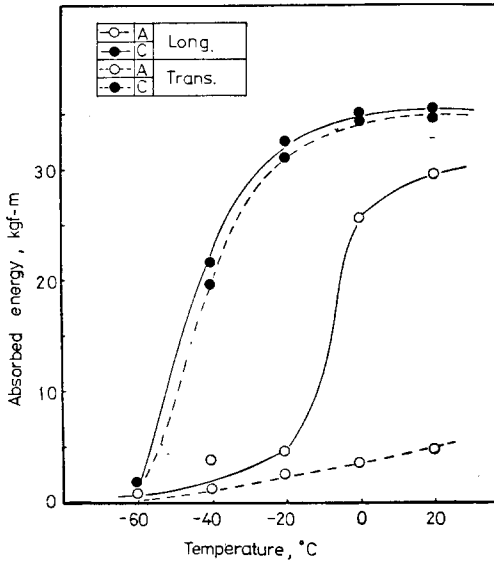


Fig. 9. Results of Charpy impact test in longitudinal and transverse directions. (40kg/mm² grade steels)

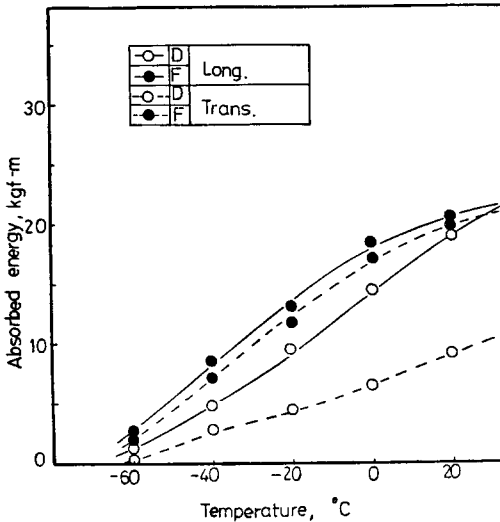


Fig. 10. Results of Charpy impact test in longitudinal and transverse directions. (50kg/mm² grade steels)

關係를 갖고 있다. 이境遇 衝擊値와 延伸破斷伸率을 같다고 생각하면 介在物의 減少에 따라 衝擊値가 向上된다고 생각되어진다. 하지만 Ca添加에 의해 介在物의 量이 減少하고, 그 減少量에 따라 衝擊値가 向上된다고 해도 Ca添加材의 壓延直角方向의 衝擊値는 通常材의 그것보다 훨씬 높다. 이것은 介在物 量의 低減效果 이외에 다른 要素, 즉 Ca添加材의 基本的인 變化

인 介在物의 球狀化와 크게 關係있음을 나타낸다고 생각된다.

4. 結 論

引張強度 40kg/mm²級 및 50kg/mm²級 鋼들을 使用하여 介在物 清淨度와 熔接條件에 따르는 板 두께 方向 特性 및 라멜라 테어 感受性を 調査한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 板 두께 方向 斷面收縮率은 壓延方向으로 延伸된 介在物(A type介在物)이 減少함에 따라 增加하여 A type介在物의 清淨도가 0.01%인 鋼에서는 斷面收縮率 이 60%의 높은 값을 나타내었다.

2) 라멜라 테어 再現試驗(Crarfield 試驗)에서 均열 發生은 A type介在物의 減少에 따라 低下하여 A type 介在物의 清淨도가 0.01%인 鋼에서는 均열이 發生하지 않았다.

3) 豫熱·pass 溫度의 上昇 및 低水素系熔接棒의 使用에 의하여 均열 發生은 低下하여 A type介在物의 清淨도가 0.04%인 鋼은 75°C의 豫熱로 均열 發生을 阻止시킬 수 있었다.

4) Ca添加에 의한 介在物의 球狀化에 의하여 壓延直角方向의 衝擊靱性が 大幅 向上되어 衝擊靱性の 異方性 이 거의 消失되었다.

參 考 文 獻

- 1) D.M. Nicholls, *Lamellar tearing in hot rolled steel*, Brit. Weld. J., Mar. (1968), pp. 103~112
- 2) 金澤 外, 라멜라테아發生要因について, 溶接學會誌, 45(2), (1976), pp. 40~47.
- 3) JIS G 0555
- 4) G. C. M. Farrar, "Inclusion and susceptibility to lamellar tearing of welded structural steels", weld. J., Aug. (1974), 321 S~331 S
- 5) Neuber(磯邊 譯), 切欠應力論(1944), pp. 6.
- 6) 榎並 外, "라멜라테아感受性の低い50kg/mm²級鋼板의 製造", 川崎製鐵技報, Vol. 8, No. 3, (1976), pp. 24~35.
- 7) 西尾 外, "大脚長すみ肉熔接部に發生するラメラテイヤリングについて", 溶接學會誌, 41 (5), (1972), pp. 112~120.
- 8) J. Gurland et al, *Trans. ASM*, Vol. 56, (1963), pp. 442.