

研究論文

大韓熔接學會誌
第7卷第3號 1989年 9月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 7, No. 3, Sep., 1989

小型 펀치 試驗에 의한 鋼熔接部の 破壞強度 評價에 관한 研究 I

유대영* · 정세희** · 임재규**
정희돈*** · 玉川欣治**** · 高橋秀明*****

A Study on Fracture Strength Evaluation of Steel Welded Joint by Small Punch Test I

D.Y. Lyu*, S.H. Chung**, J.K. Lim**,
H.D.Jung***, K.Tamakawa****, H.Takahashi*****

Key Words : SP Test (小型 펀치 試驗), SP Energy, DBTT (延性-脆性遷移溫度), Δ DBTT (延性-脆性遷移溫度差), Uppershelf Energy, Lowershelf Energy

Abstract

It was reported that the toughness for welded region was influenced by various factors such as the gradient for prior austenite grain size, the variation of microhardness and the characteristic microstructure depending on a distance from the fusion boundary.

Therefore, in order to evaluate the fracture strength of the weldment in which the microstructures change continuously, it is important to assess the peculiar strength of each microstructure in welded region.

It was known that the small punch(SP)test technique which was originally developed to study the irradiation damage effect for the structures of nuclear power plant was also useful to investigate the strength evaluation of nonhomogeneous materials.

In this paper, by means of a small punch test technique the possibility of evaluating strength of parent and welded region in SS41 and SM53B steels was investigated.

The obtained results are summerized as follows :

- 1) The small punch test which showed markedly the ductile-brittle transition behavior in this

* 정희원, 전주공업전문대학

** 정희원, 전북대학교 공과대학

*** 산업과학기술연구소 용접연구 센터

**** 東北大學 工學部

experiment may be applied to evaluation for the fracture strength of welded region.

- 2) It was shown that the ductile-brittle transition regime lied in Region III(plastic membrane stretching region) of the flow characteristics observed in SP test.
- 3) The SP test technique which shows a more precipitous energy change transition behavior than the other test technique is able to estimate the more precise transition temperature.
- 4) It could be seen that in comparison with the structure of parent the structure of weld HAZ in SS41 steel was improved while it in SM53B steel was deteriorated.

1. 序 論

용접구조물의 용접熱影響部(HAZ)는 용접熱履歷의 相異와 용접時의 周邊與件에 따라 매우 複雜하고 多樣한 組織이 形成되어 硬度 및 靱性等 機械的 性質이 變化한다.

뿐만아니라 용접時에 發生된 3軸性的 不均一한 殘留應力과 水素의 吸收는 組織의 不連續性등과 複合的으로 作用하여, HAZ의 破壞靱性を 低下시키는 요인으로 되고 있다^{1,2)}.

따라서 母材와 함께 용접金屬 및 HAZ의 正確한 破壞强度 評價는 용접구조물의 安全性 評價에 있어서 重要な 課題로 提起되어 왔으며, 특히 壓力容器用 低合金鋼의 경우에는 용접부의 각 組織에 대한 引張試驗, Charpy試驗, NDT試驗등을 施行할 것을 義務로 規定하고 있다³⁾.

從來 鋼熔接部の 破壞靱性 評價法으로서는 廣幅試驗이나 +字型熔接試驗(cross welded test), 二重引張試驗등이 行하여져왔다⁴⁾. 그러나 용접熱影響部 組織의 경우 融合境界로 부터의 거리에 따른 粒度勾配와 微視構成要素의 混合比率의 變化하는 등 微視組織의 勾配가 形成될 뿐 아니라⁵⁾ 용접部에서의 破壞는 이러한 微細組織들에 의해서 크게 影響을 받고 있음이 알려졌다⁶⁾.

따라서 용접부의 破壞强度를 正確하게 評價하기 위해서는 連續的으로 變化하는 용접部 各 微細組織에 대한 固有한 强度和 靱性を 正確하게 評價하는 것이 重要な 問題로 대두되고 있다.

最近 核融合爐의 第1壁 候補材料의 開發을 위해 整備된 SP(small punch)試驗法⁷⁾은 金屬材料의 破壞靱성에 關聯하는 特性인 遷移溫度 및 彈塑性破壞靱性等을 決定하는 所謂 bulge試驗으로, 中性子照射脆化研究등에서와 같이 試驗片 採取量이 극히 적은 體積으로 制限되는 경우는 물론, 複合材料

및 코팅材料의 强度評價를 위해 使用되고 있으며, 그 이외에도 組織이 不均一한 경우의 材料평가에 應用될 可能性도 있음이 알려져 있다⁸⁾. 그러나 現在 이 方法에 의한 試驗data는 적은 狀態일 뿐만 아니라, 특히 前述한 바와 같이 不均一한 組織을 갖는 용접部를 對象으로 한 研究는 거의 行하여 지지 않은 實情이다. 따라서 本稿에서는 SS41, SM53B鋼의 母材및 HAZ 組織을 對象으로 SP試驗 및 破面觀察을 行하여 SP試驗法의 용접部에서의 適用可能性을 具體的으로 檢討하고자 한다.

2. 試驗方法

實驗에 使用된 鋼材의 化學成分과 室溫에서의 機械的 性質 그리고 용접條件은 Table 1과 같다.

용접組織의 試驗片을 製作하기 위하여 板두께 25mm의 鋼板을 200×350mm의 小型으로 切斷한 후 壓延方向과 直角으로 길이 20mm의 45°톱날형 홈을 機械加工하였다. 加工된 용접開先部는 아세톤으로 洗滌한 後 200°C로 豫熱한 다음 서브머지드아크熔接機를 使用 용접을 施行하였으며, 용접部 斷面모양은 Fig.1과 같다.

Fig.2는 母材 및 HAZ 組織에 대한 靱性評價를 위한 SP試驗片의 採取方式를 表示한 그림이다.

먼저 용접블록 斷面の 微細組織을 觀察하여 測定 위치를 確認하고, 10×10mm의 斷面을 갖는 角棒으로 機械加工한 후, 이를 다시 약 10×10×0.7~0.8mm로 切斷하였다.

切斷된 試驗片은 #1200 emery paper를 使用 10×10×0.5mm의 크기로 研磨하였으며, SP試驗用 지그(Fig. 3)의 下部다이어와 접촉하는 側은 알루미늄 研磨劑를 使用하여 鏡面研磨하였다.

이러한 順序로 준비된 各 SP試驗片은 强度評價를 위하여 SP試驗에 提供되었다. 이때에 試驗片

Table 1 Chemical compositions, mechanical properties and welding condition

(a) chemical compositions									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	V	sol-Al
SS41	0.19	0.06	0.64	0.012	0.014				
SM	0.15	0.37	1.39	0.02	0.08	0.16	0.15	0.037	0.03

(b) mechanical properties			
	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_r (%)
SS41	260	423	42.4
SM53B	370	530	26.7

(c) welding conditions(submerged arc welding)					
heat input (KJ/cm)	preheating (°C)	current (A)	voltage (V)	welding speed (cm/min.)	wire dia. (mm)
30	200	700	35	49	4.0

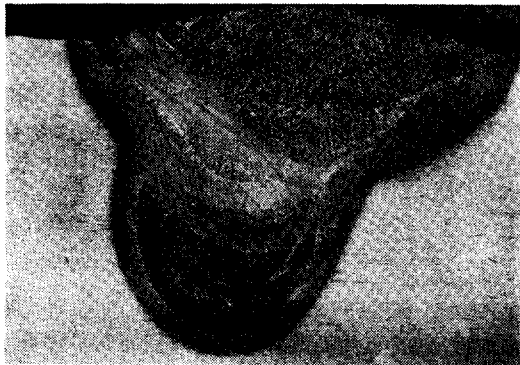


Fig.1 Macroetched photograph of multipass weldment

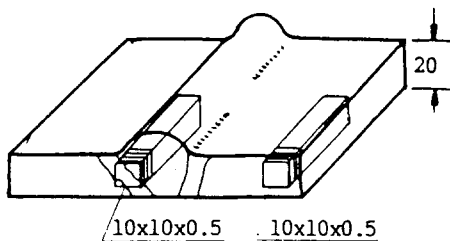


Fig.2 Extraction of small punch specimens for SM53B and SS41 steels

고정부의 응력상태의 불균일성을 제거하기 위하여 시험편지그의 상부와 하부다이에 4개의 볼트가 균일한 힘을 가할 수 있도록 토크렌치를 사용하여 체결하였다.

SP시험은 Instron 만능 시험기를 사용하였으며, 펀치先端에 HRC62-67의 경도를 갖는 강구를

를介시켜 시험편의 상면에 크로스헤드의 속도 0.2mm/min. 으로 荷重을 加하였다.

실험溫度는 液體질소를 使用하여 -196°C-0°C의 範圍로 하였다.

시험終了후 破面觀察은 走査電子顯微鏡(SEM)을 使用하였다.

한편 破壞靱性を 評價하는 基準으로서 SP에너지(E_{SP})를 구하였으며, 이는 破壞發生點까지의 所要에너지로서 荷重變位曲線 아래의 面積으로 定義하였다⁷⁾.

이러한 SP에너지와 그 試驗溫度를 plot한 曲線으로 부터 延性-脆性遷移溫度(ductile brittle transition temperature; DBTT)를 구하였으며, 이는 破面觀察과 함께 uppershef와 lowershef에너지

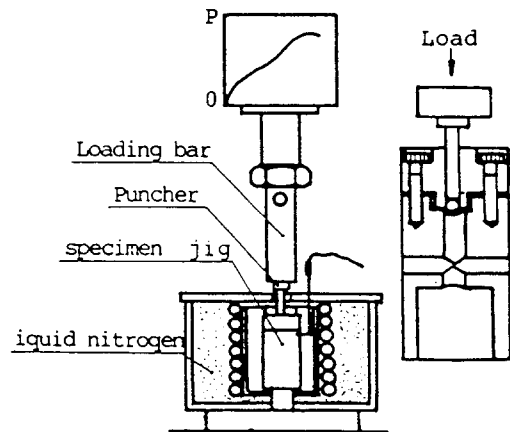


Fig.3 Schematic illustration for experimental apparatus and specimen jig in SP test

의 平均값의 溫度로서 구하였다.

Fig. 3에 SP試驗에 使用된 裝置와 SP試驗用 試 그의 모양을 圖示하였다.

3. 試驗結果 및 考察

熔接構造物의 HAZ에 있어서는 熔接熱에 의한 微細組織의 變化, 三軸性殘留應力, 熔接後 熱處理 脆化 등이 熔接部 健全性 確保에 크게 影響을 미치고 있어서 이들 組織에 대한 正確한 破壞靱性의 評價는 대단히 重要하다. 따라서 본 實驗에서는 日本原子力研究所에서 推薦하고 있는 SP試驗方法⁷⁾에 따라 延性-脆性遷移溫度를 구함으로써 SS41과 SM53B鋼의 母材 및 HAZ의 靱性을 檢討하였다.

Fig. 4는 SP試驗에서 얻은 典型的인 荷重-變位 曲線과 試驗片의 破壞過程을 나타낸 것이다. 荷重-變位 曲線은 試驗片의 變形段階에 따라서 I : 彈性 荷重領域, II : 塑性 荷重領域, III : 塑性膜伸張 (bulging) 領域, IV : 塑性不安定領域의 4段階로 구분되어진다⁹⁾.

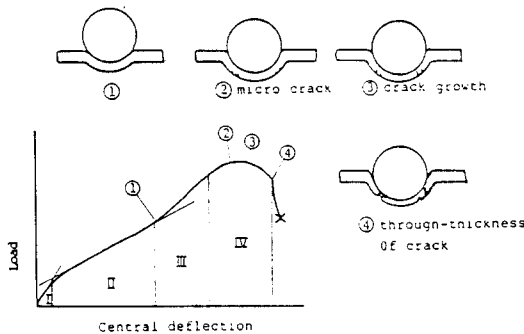


Fig.4 Schematic illustration of deformation characteristics and fracture process

한 例로 SS41과 SM53B 鋼의 HAZ 및 母材組織을 對象으로 同一組織, 同一試驗溫度에서 實驗한 2本씩의 試驗片에 대한 荷重-變位曲線의 舉動을 Fig. 5에 圖示하였으며, Fig. 6은 그들 組織中 代表的으로 SS41강 母材 組織의 0°C ~ -196°C의 試驗溫度 變化에 따른 荷重-變位 曲線의 舉動을 나타낸 것이다.

우선 Fig. 5로 부터 作用荷重 對 SP試驗片의 中央變位의 關係에 있어서 SP試驗의 實驗의 再現性이 잘 나타나고 있음을 確認할 수 있다.

Fig. 5, 6에서 알 수 있는 바와 같이 -100°C 以上의 比較的 높은 溫度에서 試驗片의 變形舉動은 彈性 荷重, 塑性 荷重, 塑性膜伸張, 塑性不安定領域의 4領域으로 구분되어지는 SP試驗의 材料流動特性이 잘 나타나 있으며, 作用荷重은 微小크랙이 發生하는 最大荷重에 도달한 後에는 서서히 減少하여 微小크랙이 成長해가는 延性的 破壞舉動을 나타내고 있다. 그러나 試驗溫度가 -172°C 및 -196°C 등 低溫側에서는 SP試驗의 流動特性중 彈性 領域과 塑性 荷重領域에 해당하는 舉動이 주로 나타나 있으며 最大荷重에서 作用荷重이 急減하며 微小크랙이 成長後 곧바로 試驗片 두께를 貫通하는 脆性的 破壞舉動을 보이고 있다. 또한 上記 두 曲線으로부터 SP試驗溫度의 低下에 따라 破壞點은 塑性 不安定領域에서 彈性領域으로 移動하고 있음을 알 수 있다. 또한 SS41鋼의 HAZ 및 SM53B鋼의 母材와 HAZ 두 組織에 대해서도 Fig. 6과 類似한 曲線을 얻을 수 있었다. 따라서 이들 荷重-變位曲線으로 부터 SP에너지의 溫度依

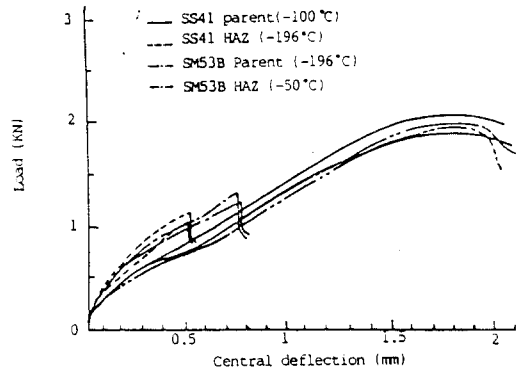


Fig.5 Load-central deflection curves for SS41 and SM53B steels

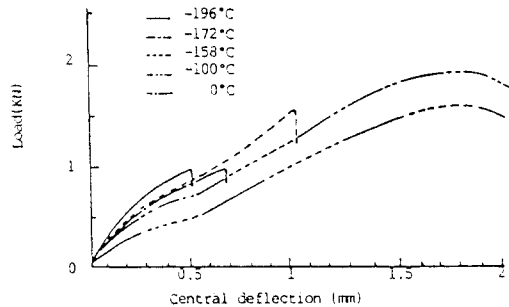


Fig.6 Load-central deflection curves for SS41 parent structure at various test temperatures

存性を期待할 수 있다. Fig. 7은 SS41鋼 母材組織에 있어서 SP破壞傳播에너지와 試驗溫度와의 관계 및 巨視的 破面과 微視的 破面の 寫眞을 함께 圖示한 것이다. 試驗溫度의 增加에 따라 SP破壞에너지는 uppershell까지 增加하며 破壞樣相 또한 變化하고 있어서 SP試驗은 明確한 延性-脆性 遷移舉動을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7의 uppershell에너지 값과 lowershell에너지 값은 각각 Fig. 6의 高溫側에서의 荷重-變位曲線과 低溫側에서의 荷重-變位曲線에 對應하는 것으로서 그들의 破壞發生領域이 Fig. 4의 塑性不安定領域 및 塑性縮힘領域에 相當함을 알 수 있다.

또한 Fig. 7의 uppershell에너지와 lowershell에너지값의 사이에 있는 遷移溫度구역에서의 에너지값(例를 들면 Fig. 6의 158°C의 경우)은 破壞發生領域이 塑性膜伸張領域에 相當하고 있다. 따라서 이들 線圖로 부터 SS41鋼 母材의 경우 延性-脆性 遷移溫度는 -172°C ~ -150°C의 溫度範圍에 存在함이 推定되어 진다.

여기서 SP에너지의 溫度依存曲線을 從來의 CVN 및 3점굽힘 COD 破壞靱性試驗^{5),10),11),13)}으로 부터 얻는 에너지溫度依存曲線에 比較하여보면 遷移舉動의 勾配가 커서 延性-脆性 遷移가 顯著히 좁은 溫度區域에서 일어나고 있음을 볼 수가 있다.

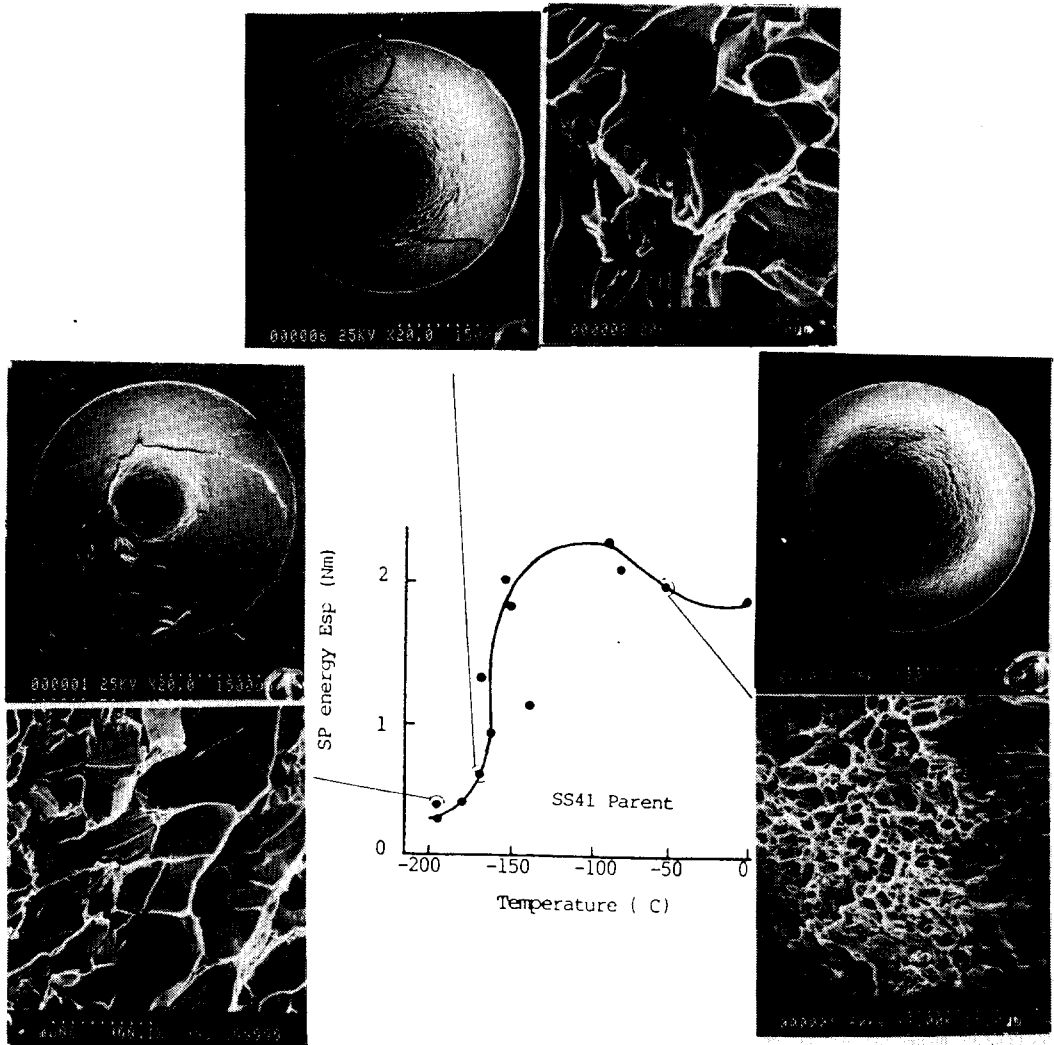


Fig.7 SP energy transition behavior and fractured appearances for SS41 parent structure (× 20, ×2000)

이는 前述하였듯이 SP試驗에서 延性-脆性遷移가 材料流動特性中 塑性膜伸張領域(Fig.4)에서 發生함에 基因한다. 즉 이러한 塑性膜伸張領域은 SP試驗 特有的 塑性流動舉動으로서 變位の 增加에 따른 荷重의 增加가 일어나는데 이러한 領域에서는 塑性伸張을 위하여 펀치先端과 試驗片의 接觸面積이 增加한다. 따라서 SP시험편의 膜應力이 적어도 一定值 以上으로 維持되기 위해서는 急激한 荷重의 增加가 必要로 되어지기 때문이다.

따라서 SP시험은 從來의 試驗法보다 좁은 溫度範圍에서 延性-脆性 遷移舉動을 評價할 수 있어서

보다 精度있는 遷移溫度(DBTT)를 推定할 수 있다는 점에서도 有利하다 할 수 있다. 한편 SP試驗片의 破壞樣相을 살펴보면 Fig.7의 SEM寫眞에서 볼 수 있듯이 -196°C 의 低溫에서는 試驗片의 半球 頂點에서 약간 떨어진 位置에서 放射狀으로 脆性的인 破壞를 하고 있음에 대하여, 溫度가 增加함에 따라 破壞는 半球形으로 塑性流動한 後 半球頂點에서 멀리 떨어진 板두께 살의 減少가 顯著한 部位에서 圓돌레方向으로 生成하는 균열成長에 의해 延性的으로 破壞를 하고 있다. 여기에서 -196°C 의 低溫에서도 SP試驗片의 破壞起點의 位置

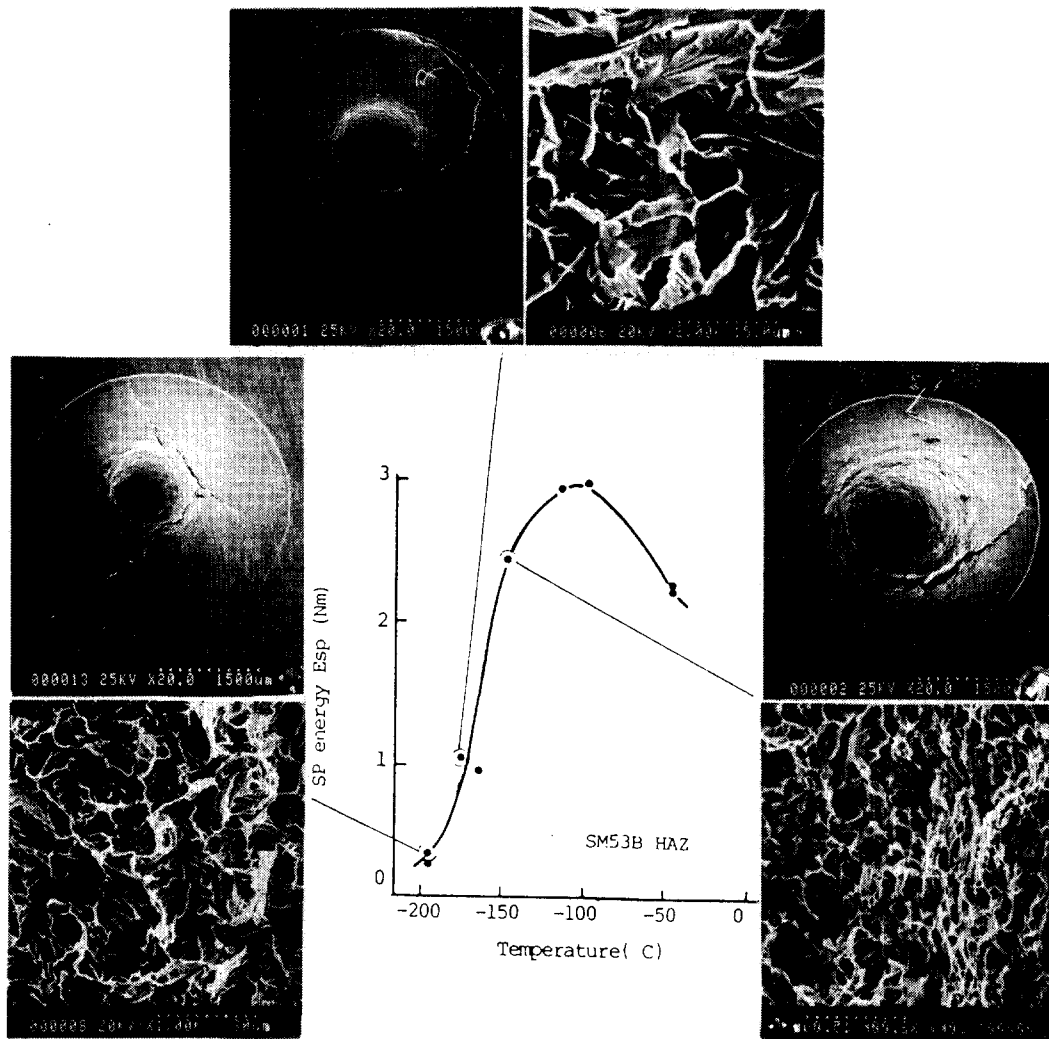


Fig.8 SP energy transition behavior and fractured appearances for SM53B HAZ structure ($\times 20$, $\times 3000$)

가 半球頂點으로 부터 偏位하는 것은 Fig. 5, 6에서도 알 수 있는 바와 같이 試驗片의 破壞가 Fig. 4의 塑性굽힘領域에서 發生하기 때문이며, 이러한 偏位量 즉 破壞發生時의 領域구분(Fig. 4)은 破壞起點部の 組織에 依存한다고 생각된다.

이들 破壞樣相은 SEM에 의한 破面寫眞으로 부터 더욱 분명히 觀察되었다. 試驗溫度 -196°C 및 -165°C 에 있어서는 典型的인 壁開破面을 보이고 있으나 -60°C 에 있어서는 延性 dimple을 보이고 있다. 따라서 이들 破面觀察와 SP에너지의 溫度依存曲線으로 부터 延性-脆性 遷移溫度를 구하면 SS41鋼 母材組織의 경우 약 -157°C 라 할 수 있다. 따라서 이 觀察結果를 앞서의 SP에너지의 溫度依存曲線의 觀察結果와 比較 檢討 할때 앞으로 SP試驗에서 延性-脆性 遷移溫度를 uppershell와 lowershell에너지의 平均値로 定義하더라도 그 값이 충분히 만족할만한 것임을 確認할 수가 있다.

Fig. 8에 SM53B鋼 HAZ組織에 대한 SP破壞에너지와 試驗溫度와의 關係 및 破斷面의 寫眞을 함께 圖示하였는데 SS41鋼 母材 組織의 境遇와 類似한 舉動을 보이고 있다.

이러한 方法에 의하여 SS41鋼의 HAZ 組織 및 SM53B鋼의 두 組織에 대해서도 SP試驗을 施行하였다. 그들 各 組織에 대한 SP에너지 溫度依存曲線을 比較하면 Fig. 9와 같다. SM53B鋼의 두 組織에 대한 SP에너지 溫度依存曲線은 SS41鋼 두 組織의 SP에너지 溫度依存曲線에 比하여 全體的으로 低溫側에 位置하고 있어서 SM53B鋼의 靱성은 SS41鋼의 그것에 比하여 靱을 알 수 있다.

또한 各 鋼의 punch 先端部에 位置하는 組織의 延性-脆性 遷移舉動을 比較하면 SM53B鋼은 HAZ 組織이 母材에 比하여 脆化하나 SS41鋼은 母材에 比해 HAZ 組織이 약간 改善되어짐을 보이고 있다. 이러한 結果는, 一般的으로 HAZ는 熔接過程中 加熱에 의한 組織의 粗粒化등으로 인하여 母材에 比해 機械的 性質이 脆化한다고 알려져 있음에도 SS41鋼의 HAZ는 熔接入熱量等에 의해 母材의 그것보다 改善될 수도 있다는 從來의 報告^{10,11,12)}를 本 實驗에서도 確認해주고 있다.

이제 이들 各 組織의 母材에 對比한 改善 및 脆化의 程度를 評價하기 위하여 前述한 바와 같이 破面觀察와 함께 SP에너지 遷移曲線으로 부터 구한 延性-脆性 遷移溫度 및 延性-脆性 遷移溫度差

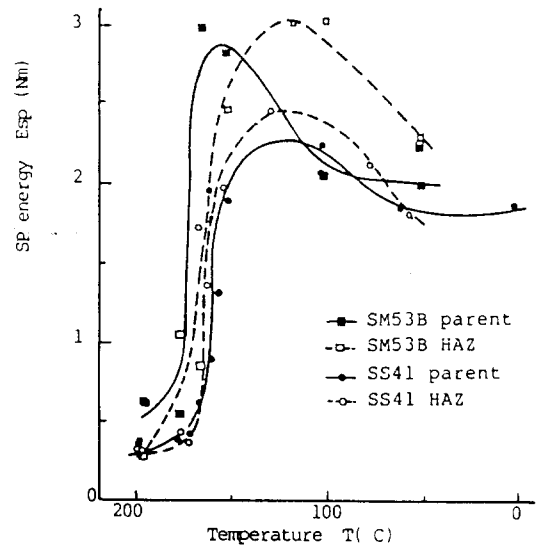


Fig.9 Comparison of SP energy transition curves obtained from parent and HAZ in SS41 and SM53B steels

를 구하여 Table 2에 나타내었다. 이때에 延性-脆性 遷移溫度差(shift of ductile - brittle transition temperature; Δ DBTT)는 各 鋼의 母材에 對比한 것으로 HAZ組織의 延性-脆性 遷移溫도와 母材의 그것과의 差로써 定義하였다.

母材에 對比한 HAZ組織의 改善 및 脆化의 程度를 評價할 수 있는 Table 2로부터 SS41鋼의 HAZ 組織에 있어서 改善의 程度는 SM53B鋼의 脆化의 程度에 比하여 적음을 알 수 있다.

지금까지의 考察로 부터 SP試驗法은 母材는 물론 微小領域에서 組織이 連續的으로 變化하는 熔接部の 各 組織에 대해서도 強度評價가 可能함을 살펴 볼 수가 있었다. 따라서 이러한 SP試驗法을 導入한다면 熔接部 組織에 대한 從來의 實驗方法 즉 CVN 이나 COD값과도 對應시킬 수가 있다고 판단되어 SP試驗값으로 부터 그들 값을 推定함도

Table 2 Transition temperatures and shift of transition temperatures

steel	structure	DBTT (°C)	Δ DBTT (°C)
SS41	parent	-157	-
	HAZ	-163	-6
SM53B	parent	-170	-
	HAZ	-160	+10

可能하리라 생각된다. 또한 시험의 간편성과 實機部材로 부터의 試驗片 採取可能性이란 점으로 부터도 本 試驗方法은 實用성이 크다 하겠다.

4. 結 論

SS41鋼과 SM53B鋼의 母材 및 熔接部の 組織을 對象으로 SP試驗 및 破面觀察을 통하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) SP試驗은 SP에너지의 明確한 溫度遷移舉動으로 부터 熔接部の 強度評價에 適用시킬 수 있다.

2) 延性-脆性遷移溫度는 SP試驗片的 變形特性中 塑性膜伸張域에 位置한다.

3) SP試驗의 延性-脆性遷移는 좁은 溫度域에서 舉動하므로 보다 精度있는 遷移溫度를 評價할 수 있다.

4) SS41鋼의 HAZ는 母材組織에 比하여 改善($\Delta DBTT = -6^{\circ}C$)되어지나, SM53B鋼의 HAZ組織은 脆化($\Delta DBTT = 10^{\circ}C$)되어진다.

後 記

本 研究는 韓日 大學間 共同研究(日本文部省料研費: 62045004)의 一部로 研究費를 支援해 주신 日本文部省 當局에 感謝한다.

參考文獻

- 1) F.M Burdeki : Initiation of brittle fracture in structural steel, *Welding Journal*, Vol. 12, (1967), pp.647-659.
- 2) J. Kameda, H.Takahashi and M.Suzuki : Residual stress relief and local embrittlement

- of welded HAZ in reactor pressure vessel steel, IIW. Doc. No. X-800-76 and Doc. No. N-1002-76(1976).
- 3) ASTM E185 - 79 : Standard practice for conducting surveillance test for light-water cooled nuclear power reactor vessels. (1979).
- 4) 鈴木春義, 田村 博 : 溶接 金屬學, 産報出版, (1980), p.129.
- 5) S.H. Chung, H.Takahashi and M.Suzuki : Microstructural gradient in HAZ and its influence upon toe HAZ fracture toughness, *welding in the World*(1978), p.248.
- 6) 鈴木春義, 田村 博 : 溶接金屬學, 産報出版 (1980), p.140.
- 7) JAERI-memo 62-192 : 小型판치(SP)試驗法(案), 日本原子力研究所, (1987).
- 8) 高橋秀明, 壓子哲雄, 盧友紹, 齊藤喜久 : 耐熱構造部材 材質經年脆化とその非破壞診斷技術に關する研究, 東北大學工學部 材料強度研究施設, (1986), p.112.
- 9) M.P. Manahan et al : Miniaturized disk bend test technique development and application, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 103 and 104, (1981) pp.1545~1550.
- 10) 金台永 : 鋼材熔接熱影響部の 熱變形 脆化에 關한 研究, 全北大學校 大學院 博士學位論文, 1983.
- 11) 柳岱永 : 熱變形이 軟鋼 熔接熱脆化域의 破壞勤性に 미치는 影響, 全北大學校 大學院 碩士學位論文, 1983.
- 12) E.Banks : Toughness properties of HAZ structures in structural steel, *Welding Journal*, Vol.53, (1974), p.299.
- 13) J.M. Baik, J.Kameda and O.Buck : ASTM STP 888, (1986), pp. 92-111.