

輕水爐壓力容器에 關한 最近話題

— 壓力容器鋼材의 現況과 性能 —

1. 序 言

原子爐壓力容器用 鋼材는 현재 100만kW급 PWR의 경우 그 두께가 250mm 정도의 超厚鋼材임에도 불구하고 安全性的의 觀點에서 一般構造用 鋼에 비해 대단히 우수한 材料特性이 요구된다. 따라서 製造技術에는 最先端의 技術이 사용되며 또 높은 재료특성을 확보하기 위해서 새로 開發된 技術도 적지 않다.

壓力容器用 鋼材의 재료특성을 확보하기 위하여 製造上 특히 주의할 점은 다음과 같다.

(1) 中性子照射脆化를 촉진시키는 P, Cu 등의 不純物元素를 極力 적게 한다. 또한 鋼材의 韌性を 阻害하는 S量에 대해서도 低減을 도모한다.

(2) 強度와 韌性이라는 相反되는 特性을 만족시키기 위해 合金元素를 대단히 좁은 범위에서 컨트롤한다.

(3) 水素性 欠陷의 原因이 되는 H와 介在物을 생기게 하는 O의 가스성분을 문제가 발생되지 않을 낮은 레벨까지 除去한다.

(4) 鋼材의 내부품질을 확보하기 위해서 大型 鋼塊中の 介在物, 偏析의 低減을 도모한다.

(5) 鋼塊를 충분히 加工하여 용접결함의 원인이 되는 자그(鋼塊中에 발생하는 收縮性 氣孔)를 壓着한다.

(6) 엄격해지는 韌性要求를 만족시키기 위해서 최적의 化學成分系를 발견한다.

이와 같은 觀點에 따라서 製造設備, 技術의

革新 등을 도모하여 왔다.

2. 原材料의 嚴選

壓力容器用 鋼板의 韌性を 높이고 中性子照射脆化를 방지하기 위해서는 P, Cu, S 등의 불순물 원소를 極力 低減시키는 것이 필요하다. 특히, 中性子照射脆化를 가장 촉진시키는 Cu의 경우 精練工程에서는 거의 제거할 수 없기 때문에 原材料에서 부터 混入을 막는 것이 유일한 對策이다.

이를 위해서 電氣爐를 사용할 때는 특히 불순물 원소가 적은 스크랩을 사용하도록 배려하고 있으며 轉爐를 사용할 경우에는 純度가 높은 溶鐵(高爐를 통해서 鐵鑛石을 환원하여 얻어진 鐵)을 사용하여 製鋼을 한다.

3. 溶 製 法

超厚鋼大型鋼板 또는 그 두께가 500mm급인 極厚鍛造材에서도 재료규격에 규정된 化學成分의 범위에서 最適化學成分을 구하여 강도와 韌性이 우수한 調質組織을 얻을 必要가 있다.

原子爐壓力容器用 材料의 溶製에서는

(1) 照射脆化對策으로 P와 Cu의 低減,

(2) Under Clad Cracking(UCC) 과 再熱갈라짐 感受性を 낮추기 위한 As, Sb, Sn의 低減,

(3) 韌性を 向上시키기 위한 S의 低減, C의 規制, 結晶粒微細화를 위한 Al, N의 관리,

(4) 강도의 확보 및 強度-靱性의 밸런스, 再熱 갈라짐 感受性 輕減을 위한 각종 첨가원소의 규제,

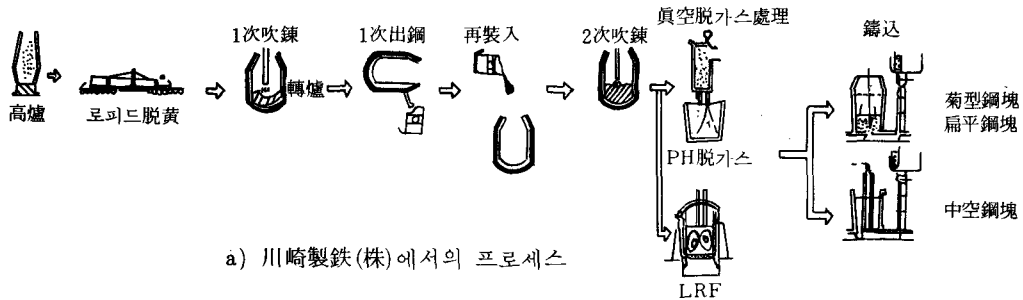
(5) 내부품질 향상을 위한 O의 低減과 비금속 介在物의 제거, H의 低減

등 많은 점을 고려하여 좁은 범위에서 成分

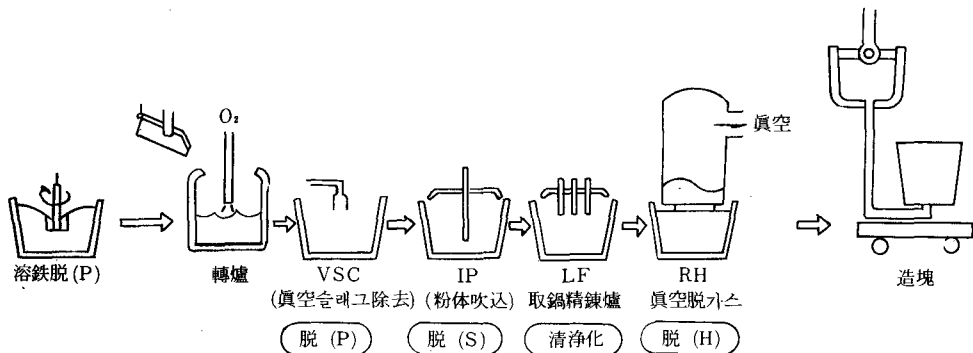
을 제어함으로서 有害한 元素를 低減할 必要가 있다.

이를 위해서는 종래와 같은 電氣爐 또는 轉爐 單體의 프로세스로는 불충분하여 轉爐 또는 電氣爐 다음에 LF (Ladle Furnace, 取鍋精練爐) 등을 포함하는 2次精練프로세스가 開發되고 있다.

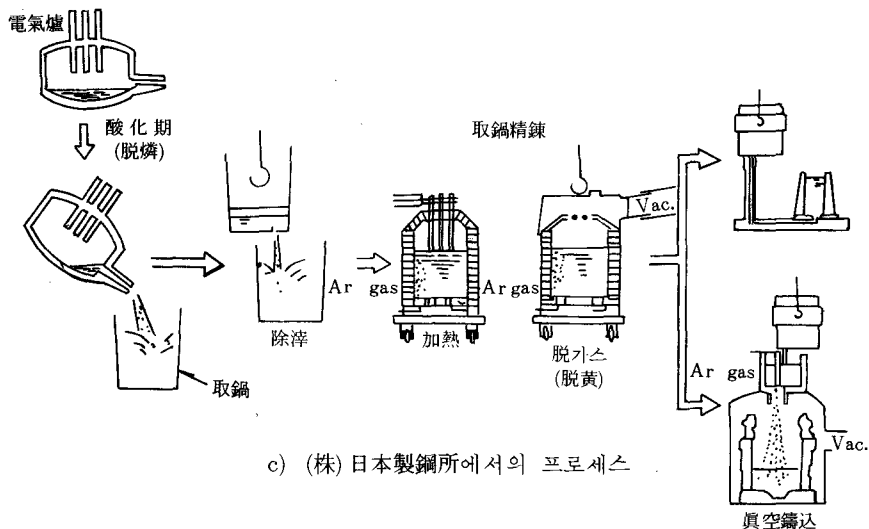
〈그림 1〉 製鋼프로세스



a) 川崎製鐵(株)에서의 프로세스



b) 新日本製鐵(株) 名古屋製鐵所, NSR 프로세스



c) (株) 日本製鋼所에서의 프로세스

그림1 (a), (b), (c)에 電氣爐 및 轉爐를 포함한 2次精鍊프로세스의 예를 나타내었다. 이와 같은 2次精鍊프로세스는 合金元素의 제어에 有效한 외에 有害불순물원소인 P와 S의 低減에도 대단히 효과적이다. 따라서 현재는 2次精鍊 프로세스의 능력에 의해서 合金元素레벨의 콘트롤精度와 불순물원소량이 결정되며 轉爐와 電氣爐라는 溶製法の 차이에 의한 材料特性의 차이는 생기지 않는다.

表1에 美國과 日本製 原子爐用 鋼材의 化學組成의 比較를 나타내었다.

4. 脫 가 스

溶鋼中の H와 O는 溶鋼의 鑄造, 凝固過程에서 水素性 欠陷을 야기시키거나 介在物이 되어서 최종 제품인 鋼材의 材質을 손상시키는 요인이 된다. 따라서 이들 가스成分도 溶鋼中에서 極力 제거할 필요가 있으며, 이를 위해 脫가스장치가 사용된다.

轉爐의 경우에는 일반적으로 RH脫 가스장치가 사용된다(그림 2). 環流用 아르곤가스의 大量吹込과 環流管徑의 增大에 의해 脫가스處理中 脫水素能力이 향상되었는데, 그 예를 그림 3에 나타내었다.

한편, 電氣爐에서의 脫가스處理의 예를 그림 1 (C)에 나타내었는데 轉爐와 거의 같이 O와 H를 低減시킬 수 있다.

5. 造 塊

壓力容器用 鋼材는 板두께가 160~250mm로 두껍고 單一重量도 크기 때문에 使用하는 鋼

塊도 100톤을 넘는 巨大한 것이 必要하다. 일반적으로 鋼塊는 大型化될수록 凝固速度가 늦어져서 偏析(化學組成이 고르지 못함)이 커진다.

또한, 介在物(산화물이나 황화물로서 鋼板中에 殘存하면 결함의 원인이 된다)의 浮上分離도 중요한 문제이다. 이들 문제에 대해 大型의 偏平鋼塊를 사용함으로써 偏析對策과 함께 上廣化에 의해 介在物의 浮上을 도모하고 있다.

최근에는 壓力容器的 胴部에 있는 용접선을 줄여서 稼動中檢査(ISI)의 단축, 신뢰성 향상을 도모할 목적으로 鍛鋼製一體링을 사용하는 경우가 늘고 있으며 大型中空鋼塊가 開發되어 一體셸링의 제조에 사용되게 되었다.

보다 大型인 500톤급의 鑄込에서는 材料의 균질성을 확보하기 위해서 研究가 거듭되고 있다. 大型鋼塊에서의 多히이트鑄込法(MP法)이 그 예이다. MP法은 그림4에서와 같이 複數의 電氣爐와 保持爐를 活用하여 500톤급의 鑄込을 가능하게 하는 방법으로서 각 히이트의 溫度와

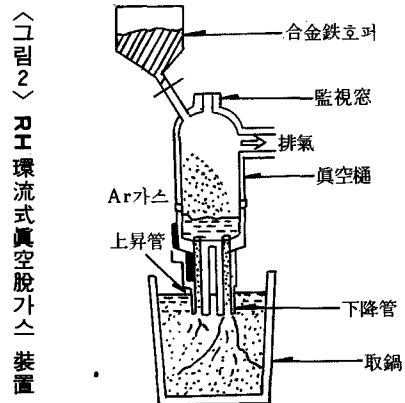
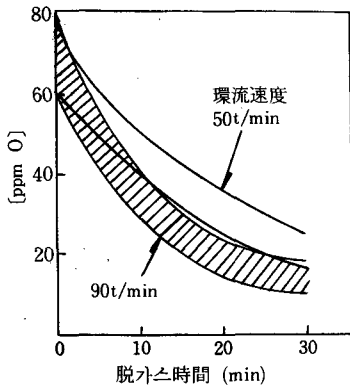


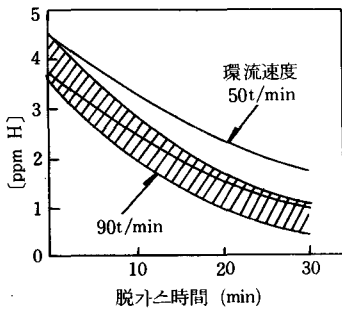
表 1
製壓力容器用 鋼板의 化學組成比較

種 類	板 厚 (mm)	化 學 組 成 (wt. %)								
			C	Mn	P	S	Si	Ni	Mo	Cu
日 本 材	≈ 163	\bar{x}	0.17	1.46	0.005	0.003	0.26	0.67	0.57	0.03
		σ	0.01	0.02	0.001	0.001	0.01	0.01	0.01	0.01
美 國 材	152~ 305	\bar{x}	0.22	1.35	0.011	0.016	0.20	0.52	0.50	-
		σ	0.01	0.03	0.001	0.003	0.02	0.04	0.03	-

〈그림 3〉 RH 脱가스處理에 의한 O 低減化一例



a) RH脱가스에 의한 O 含有量の變化



b) PH脱가스에 의한 H 含有量の變化

化學組成을 콘트롤함으로서 大型鋼塊内部의 偏析을 輕減시킬 수 있으며, 특히 C의 偏析을 極力 적게 함으로서 기계적 성질의 均일성이 확보된다.

6. 加工成型

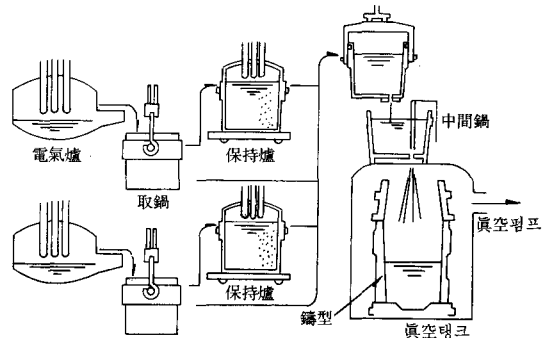
原子爐壓力容器鋼材의 熱間加工에는 壓延과 鍛造가 있다. 本稿에서는 鋼板과 鍛造材로 분류하여 이들의 現況을 소개한다.

(1) 鋼板

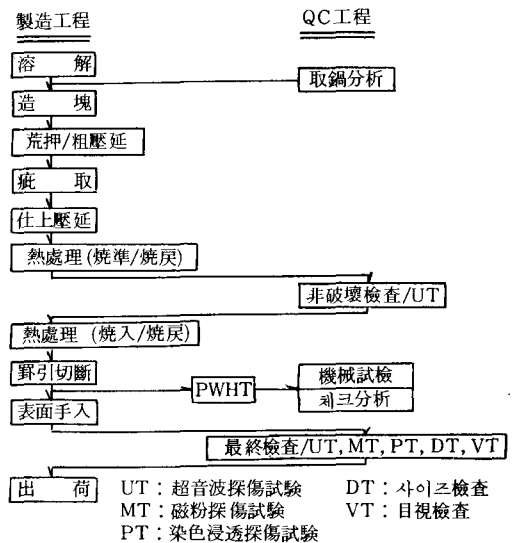
大型超厚鋼板의 경우는 그림 5에 표시되어 있는 제조공정과 같이 먼저 鍛造에 의해서 鋼塊内部에 발생하는 자그를 壓着시킴과 동시에 大型鋼塊에 발생하는 1次凝固組織을 부순 後에 壓延한다.

壓延에서는 재료의 縱方向(Longitudinal)과 橫方向(Transverse)의 壓延比를 同等에 가깝게 하기 위해서 交叉壓延을 하는 例도 있다.

〈그림 4〉 大型鋼塊의 多히이트 鑄込法 ((株)日本製鋼所)



〈그림 5〉 原子爐用鋼板製造工程



그 適用例를 그림 6에 나타내었다. 交叉壓延을 하였을 경우의 縱, 橫方向 衝擊特性을 나타내었는데 異方性이 작고 交叉壓延의 效果가 크다는 것을 알 수 있다.

또한, 최근에는 壓力容器用 鋼板의 결함원인의 하나로 鋼塊자그가 未壓着된 채로 殘存하는 것을 들 수 있는데, 이 對策으로 다음 두가지 技術이 開發되어 사용되고 있다.

(a) 特殊鍛造法: 이 方法은 予備鍛鍊時에 上下非對稱의 金數를 사용함으로서 그림 7의 원리에 의해서 板두께의 중심까지 충분히 加工 效果를 줄 수 있는 것으로 FM (Forging Pro-

cess Free from Mannesman Effect) 鍛造法이라고 부른다.

(b) 累積高形狀比壓延: 鍛造와 비교하였을 경우 壓延法의 유일한 결점은 板두께가 두꺼우면 板두께의 중심까지 加工效果가 미치지 어렵다는 것이다. 그 이유는 그림 8 에서와 같이 板두께에 비해서 壓延能力이 작으면 板두께의 중심에 引張應力域이 생겨서, 이 부분에 존재하는 孪晶이 壓着되기 어렵기 때문이다.

이 對策으로 大徑롤러의 사용과 壓延能力의 강화에 의해 形狀比를 크게 하는 것이 有效하다는 것을 알아내어 形狀比를 연속적으로 크게 취하는 累積高形狀比壓延을 실시하고 있다. 또한, 이 목적을 위해서 롤러徑, 壓延能力이 다 같이 최대급인 粗壓延機를 설치하고 있다.

以上の結果, 현재는 壓延法만으로도 内部品質이 우수한 輕水爐用 鋼板을 제조하는 것이 가능하다.

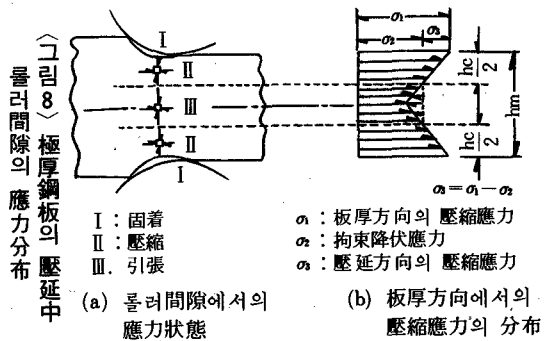
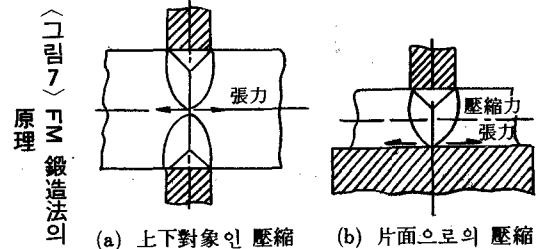
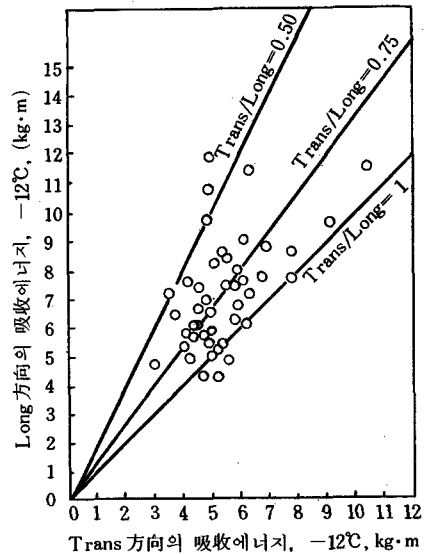
(2) 鍛造材

發電用 原子爐의 大型化에 따라서 압력용기의 품질과 신뢰성의 향상 및 ISI의 간략화 観点에서 鋼板용접구조와 대체하여 鍛鋼品을 사용하는 경향이 커지고 있다. 즉, 셸이나 돔은 鍛鋼品을 사용함으로써 一体化가 되어 容器的 용접선을 감소시킬 수 있다.

鍛鋼品은 鋼塊를 대형프레스로 鍛鍊하여 제작되는데 플렌지와 셸은 鋼塊를 穿孔한 다음에 소정의 사이즈로 마무리된다. 셸에 대해서는 中空鋼塊의 적용, 프레스에 의한 大型링의 제조 등 새로운 제조기술이 개발되고 있다. 돔은 鋼塊에서 부터 円形의 블랭크材로 만들어, 이것에 上下型을 사용해서 成型된다.

500톤급 大型厚두께鍛造材의 경우는 1만톤급 프레스에 의해서 熱間加工을 한다. 그림 9 에 鍛造品의 제조공정을 나타내었는데, 그림 중의 鍛鍊工程이 여기에 해당된다. 鍛鍊工程에서는 鋼板의 경우와 같이 鑄造組織의 파괴

(그림 6) SA 533, Gr. B 極厚鋼板(150-240mm)의 橫方向과 縱方向의 2mmV 살피衝擊値의 比較



와 内部의 孪晶壓着 등 内部性狀의 향상외에 所要의 形狀으로 마무리한다는 중요한 역할이 있다. 部材의 大型化, 一体化는 熱間加工技術과 製鋼塊技術의 발전에 의한 것이다.

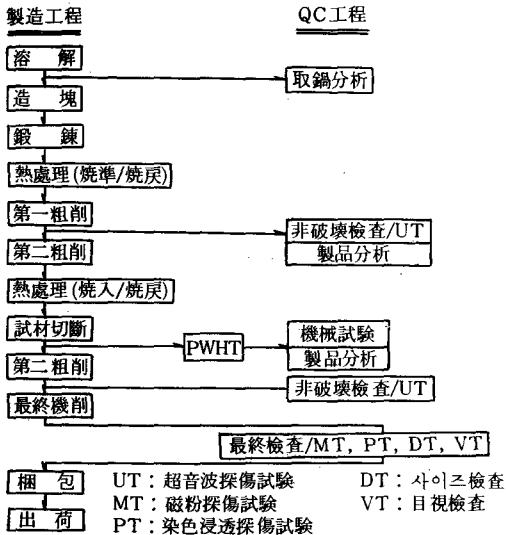
또한, 그림 10과 같이 鍛造比는 기계적 성질

에 영향을 주며, 기계적 성질의 확보를 위해 所定の 鍛造比가 必要하다.

7. 熱處理

鋼板, 鍛造品 모두 燒均, 燒戻熱處理後 所

(그림 9) 原子爐用大型鍛鋼品製造工程



정의 강도와 韌性を 부여하기 위해서 調質處理 (燒入, 燒戻) 가 실시된다. 超厚鋼材는 燒入時 냉각속도가 極히 늦어진다. 따라서 燒入效果를 높이기 위해서 燒入水槽中에서 攪拌을 하여 냉각속도를 빠르게 하는 노력이 기울여지고 있다.

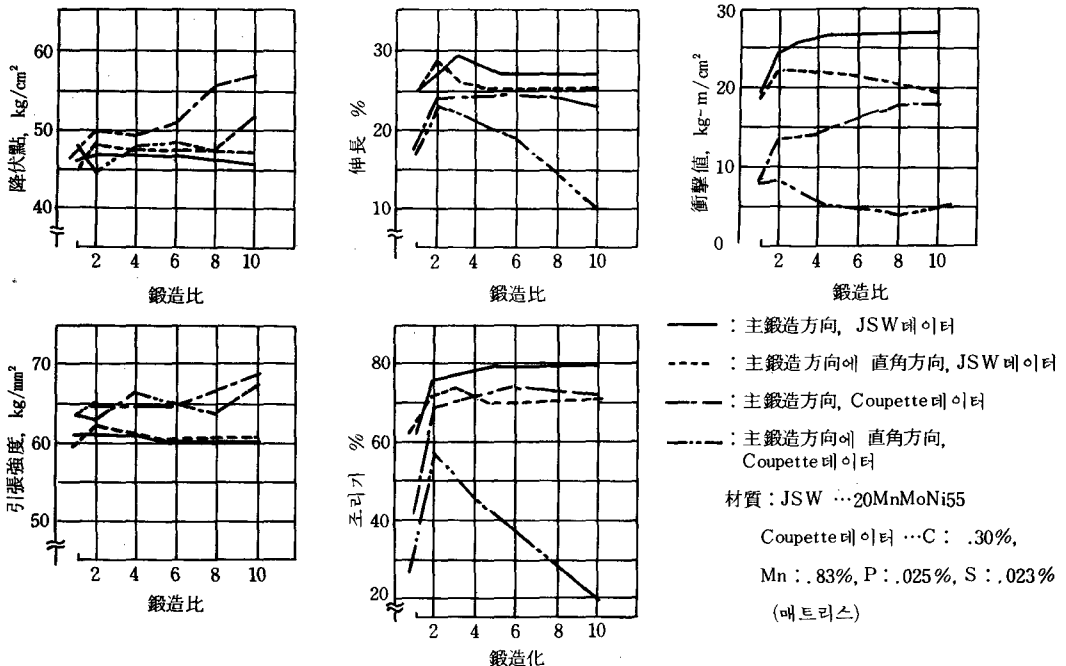
8. 溶接材料의 變遷

輕水爐壓力容器的 용접시공에는 submerged 아크용접 (潛弧溶接), 被覆아크용접, MIG 용접, TIG 용접 등이 일반적으로 사용되고 있으며, 그 외에 壓力容器內面에서의 高温高壓水에 대한 耐蝕性を 확보하기 위해서 스테인레스鋼을 두겹게 붙여서 용접하는 방법으로 밴드아크용접이 있다.

용접재료에 관해서는 1970년경 부터 여러가지의 性能改善이 行하여졌는데 특히, 中性子照射脆化感受性이 현저하게 개선되었다.

이와 같이 용접재료의 中性子照射脆化感受性이 개선된 것은 여러가지의 개량이 이루어

(그림 10) 鍛造比와 材料의 異方性

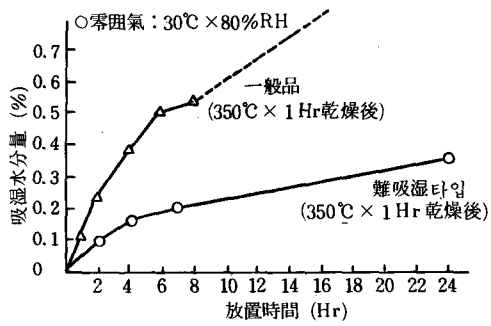


(表2) 溶接金屬
成分에 관한
比較例 (S A 5 3
用)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
從來品	0.09	0.36	1.88	0.019	0.013	0.13	0.65	0.05	0.48
現在品	0.08	0.32	1.20	0.008	0.003	0.04	0.89	0.06	0.50

(溶接法: submerged arc 溶接)

(그림11) 被覆아크 溶接棒의 吸濕特性 比較



진 결과인데 그중에서도,

(1) 용접금속중의 각 성분 또는 불순물과 靱性과의 관계에 대한 연구가 진행되었으며, 照射를 받기 前의 靱性이 상당히 개선되었다는 점,

(2) 용접재료의 素材인 와이어, 플럭스는 이들에 포함되는 P, Cu 등 照射脆化感受性を 촉진시키는 성분을 최소한으로 하는 溶解上 혹은 製造技術上의 연구가 이루어졌다는 것.

以上 두가지 점의 효과가 크다.

表2는 용접금속성분에 대해서 從來品과 現在品の 比較예를 나타낸 것이다. 現在品은 從來品에 비해 P, S, Cu 등의 불순물이 극히 적어지고 있다.

Cu에 관해서는 종래의 와이어에서는 녹을 방지하고 通電을 쉽게 하기 위하여 와이어 表面에 Cu를 鍍金하였으며, 이로 인하여 용접금속중 Cu의 함유량이 높아졌었는데 현재는 鍍金이 안된 와이어를 일반적으로 사용하고 있다. 鍍金을 안하여도 通電性, 녹 등을 고려한 表面處理가 실시되어 녹 등에 의한 용접상의 결함이 발생되지 않도록 배려되어 있다.

또한 최근의 용접재료는 기계성능 이외에도 여러가지의 연구가 수행되고 있다. 예를 들면, 그림11은 被覆아크용접봉에 대해서 일반품과 難吸濕타입과의 吸濕特性을 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 최근의 被覆아크용접봉은 그 플럭스에 연구를 집중시켜서 대기중의 수분을 吸濕하기 어렵게 하였다. 이와 같은 타입의 被覆아크용접봉을 사용함으로써 용접금속중의 水素量을 低減시킬 수 있어, 低溫균열에 대해서 매우 安全하게 되었다.

9. 溶接施工法과 溶接材料의 現況

壓力容器와 같이 두께가 두꺼운 대형구조물에 적용되는 용접시공법으로 종래에는 2~4패스로 1層을 완성하는 비교적 넓은 開先幅을 사용하는 submerged arc 용접이 가장 일반적이었으나, 최근에는 용접능률의 향상을 도모하기 위하여 1패스 1層 완성의 狹開先溶接施工法이 submerged arc 및 MIG 용접에 대해서 開發되어 實用化되고 있다.

그림12는 종래의 submerged arc 용접과 최근의 狹開先溶接에서의 開先斷面積을 판두께와 관계에서 비교한 것이다. 이 그림에서 狹開先의 submerged arc 및 MIG 용접은 溶着量을 종래 용접의 경우 보다 대폭 低減시킬 수 있어서 용접능률을 비약적으로 향상시킬 수 있다. 한편, 壓力容器內面의 스테인레스鋼 밴드아크 용접에 대해서는 高能率化라는 관점에서 電極사이즈가 廣幅化되고 있다.

(1) 두꺼운 材料 溶接用 狹開先溶接法

경수로의 압력용기 등 두꺼운 板의 용접능률 및 용접금속의 強度와 靱性を 더욱 향상시킬 목

적으로 최근에 각종 狹開先溶接方法이 검토되어 實用化되고 있다. 「狹開先」의 定義로는 板두께 200mm까지 開先幅 120mm以下, 그 이상은 開先幅 30mm以下인 것으로 하고 있다.

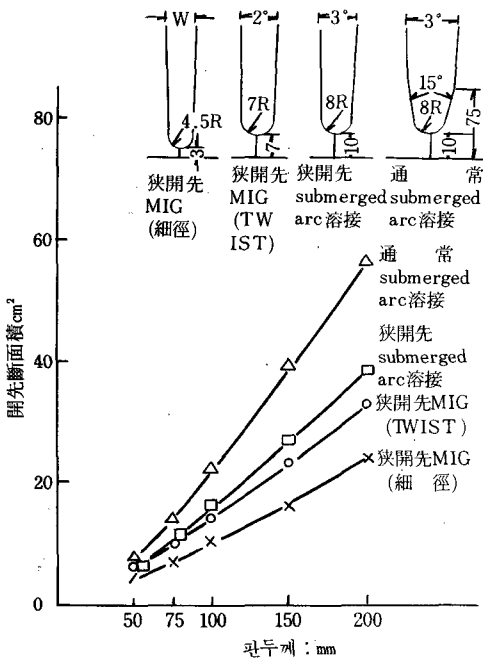
이중에서 대표적인 狹開先溶接法에는 狹開先 submerged arc 용접법과 狹開先 MIG 용접법이 있다. submerged arc 용접으로 多層의 두꺼운 용접을 할 경우 지금까지 2~4 패스/1層 완

성이 일반적이었다. 이것은 開先幅이 좁아지면 특히 용접후 슬러그가 剝離되기 어렵기 때문에 實施工이 곤란하므로 행하여졌던 積層方法 이었다.

狹開先 submerged arc 용접은 용접후의 슬러그 그 剝離性이 우수한 플럭스를 새로 개발함으로써 이 기술적 문제점을 해결한 것이다. 이로써 submerged arc 용접으로도 1패스 1層의 완성이 가능해졌으며 그 결과 고능률이면서 또한 고성능의 용접시공을 할 수 있게 되었다.

表3에 SA533 BC1.1鋼에 대해 實用되고 있는 狹開先 submerged arc 용접조건을 나타내었다. 용접시공후 이들 용접금속의 化學成分은 表2의 現在品과 거의 같으며 P, S, Cu와 같은 불순물이 매우 적어졌다. 한편, 狹開先 MIG 용접법은 狹開先溶接方法中에서 가장 實績이 많으며 수 많은 용접구조물의 시공에 사용되고 있다.

〈그림12〉 開先斷面積의 比較



〈表3〉 submerged arc 溶接施工條件

	A	B	C	D
開先形狀				
余熱 및 패스 間溫度 (°C)	155~193 160~230	150~250	150~250	150~200
溶接電流 (A)	450~650	550~650	550~650	550~650
아크電壓 (V)	27~28	32~40	26~30	26~30
溶接速度 (cm/min)	28~30	25~30	25~30	25~35

開先形狀	실드가스	溶接施工條件				
		溶接條件	피크電壓 (V)	베이스電壓 (V)	펄스 (cycle / min)	와이어오실레이션
	Ar+20% CO ₂	DC-RP 270~290 ^a -29~30 ^v -23cm/min	52~54	30~31	100	65~75 cycle

〈表5〉 狹開先 MIG의 化學成分 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Co	V
(wt%)	0.078	0.24	1.16	0.008	0.004	0.02	0.98	0.33	0.03	<0.002

表 6 < 用狹開先 MIG 溶接金屬性能의例 >

溶接後熱處理 (°C × h)	引張性質 (室溫)				샐피衝擊性質 (kgf·m)				
	0.2% 耐力 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	伸張 (%)	조리기 (%)	-51°C	-29°C	-12°C	+10°C	RT _{NDT} (°C)
635 × 26	53.4	61.5	28	75	1.96	5.59	10.58	15.53	-53
					2.52	6.05	8.15	15.25	
					3.20	7.33	8.11	15.86	
					(2.56)	(6.32)	(8.95)	(15.55)	

그림 13 < 밴드마크 溶接法의 概略 >

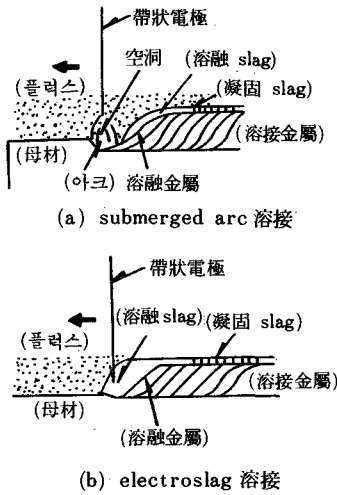


그림 14 < 狹開先 submerged arc 溶接金屬 및 그 母材의 強度特性 >

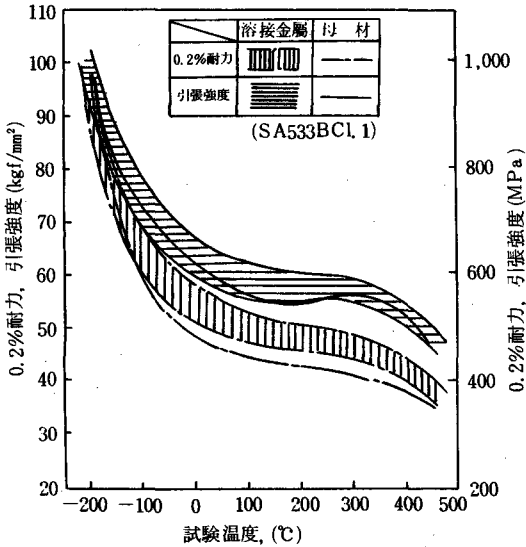


表4~6은 細徑와이어를 사용한 狹開先 MIG 溶接의 경우에 대해 각각의 용접조건과 그 용접금속의 기계적 성질의 예이다. 이들에서도 狹

그림 15 < 狹開先 submerged arc 溶接繼手の 샐피 衝擊特性 >

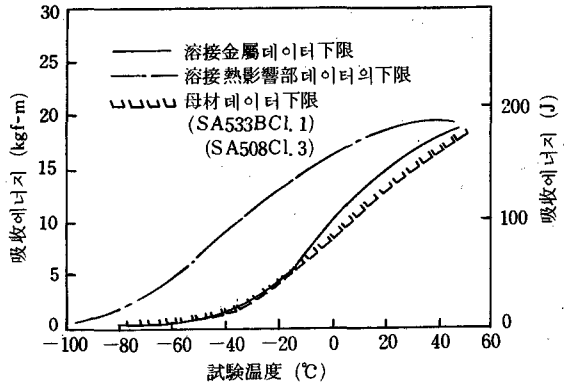
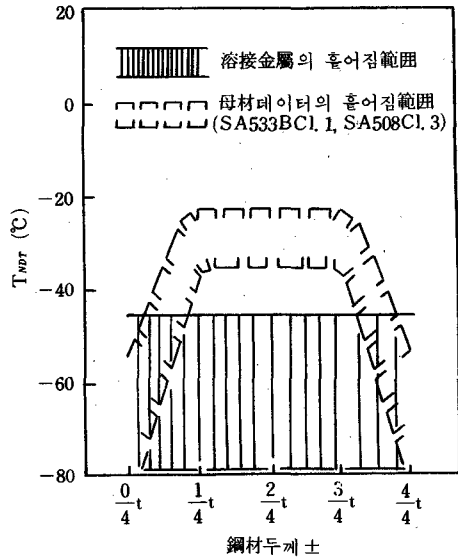
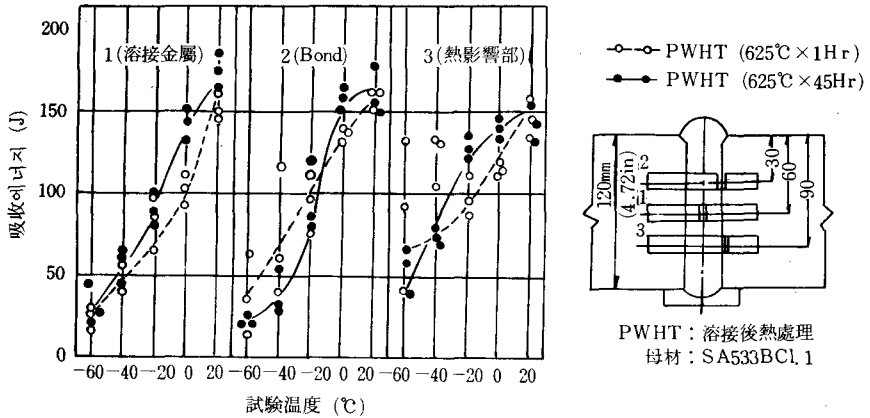


그림 16 < 狹開先 submerged arc 溶接金屬 및 그 母材의 無延性遷移溫度 (NDT)의 板두께 方向 分布 >



開先 submerged arc 용접의 경우와 마찬가지로 P, S, Cu 등의 불순물 원소 함유량이 매우 적고 또 引張, 샐피관련 온도 (RT_{NDT}) 등 기계

〈그림 17〉 狹開先 MIG (Twist arc) 溶接部の 살피衝擊特性



적 성질도 母材와 동등 이상의 수준에 있다고 할 수 있다.

그외에 최근에는 蒸氣發生器 등에 ASME S A533BC1.2 鋼의 적용도 실용화되고 있으며 이를 위한 각종 용접재료도 이미 개발되어 사용되고 있다.

(2) 스테인레스鋼 밴드아크溶接法

原子爐壓力容器内部는 고온고압수의 환경에 있으며 内壁에는 스테인레스鋼이 두겹게 용접되어서 耐蝕性이 유지되고 있다. 이를 위한 용접방법으로는 노즐部 등 일부에는 TIG, MIG, 被覆아크용접이 행하여지나 壓力容器의 대부분을 占하는 胴部에는 고능률인 밴드아크용접이 사용되고 있다.

밴드아크용접으로는 從來 submerged arc 용접이 사용되어 왔으나, 최근에는 electro-slag 용접에 의한 시공이 많이 채택되게 되었다. 그림13에 밴드아크용접법의 개략을 나타내었다.

이 밴드아크용접시공법은 보다 고능률화라는 관점에서, 사용되는 電極사이즈가 50mm→75mm→150mm로 廣幅化되고 있다.

10. 壓力容器鋼母材 및 溶接繼手の 性能

그림14는 狹開先 submerged arc 용접금속과 그 母材(SA533BC1.1)의 低温 및 高温引張 데이터로서 0.2%耐力 및 引張의 정도를 비교하

여 나타낸 것이다. 또한 비교를 간단히 하기 위해서 용접금속의 경우에는 흠어지는 범위를 표시하였고, 母材의 경우에는 평균으로 표시하였다. 이 그림에서 용접금속은 母材와 동등 이상의 強度를 갖고 있음이 명백하다.

그림15는 狹開先 submerged arc 溶接繼手の 살피吸收에너지遷移曲線을 나타내고 있다. 試驗片의 채취는 용접금속, 열영향부 및 母材 세 곳에서 하였으며 遷移曲線으로는 각각의 데이터의 下限을 채택하였다. 이로 부터 용접금속은 母材와 거의 동등하거나 혹은 그 이상의 靱性이 있음을 알 수 있다.

그림16은 狹開先 submerged arc 용접금속과 그 母材의 無延性遷移溫度(Nil Ductility Transition Temperature, NDT)의 板두께방향분포이다. 母材의 表面부근에서는 NDT가 低温側에 있어서 양호한 靱性을 나타내고 있으나, 表面에서 부터 板두께内部로 1/4 이상 들어간 부분에서는 용접금속의 NDT가 오히려 낮아 靱性이 좋아지고 있다.

한편 그림17은 狹開先MIG (Twist아크의 例) 溶接部の 살피충격특성을 표시한 것이다. 試驗片은 용접금속 외에 Bond 및 열영향부에서도 채취하였다. 이들 데이터에 의해 용접금속의 靱性은 狹開先 submerged arc 용접의 경우와 같은 정도임을 알 수 있다.