

# TMCP 강재와 그 용접부의 강도특성

김 영 식

한국해양대학 선박기계공학과 교수



●1944년생  
●용접분야를 전공하였으며, 용접구조물의 강도와 파괴 등에 관한 연구에 관여하고 있으며, 용사법에 의한 고강도 내식성 피막의 소재 개발에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

TMCP(thermo-mechanical control process) 강재는 제어압연과 제어냉각공정을 併用하여 제조된 강재로서 最近들어 선박이나 海洋構造物用 素材로서 각광을 받고 있다.

TMCP는 슬래브의 加熱과 熱間壓延 및 冷却工程을 단지 形成工程으로서만이 아니고 加工, 熱處理, 工程으로서 有効하게 이용하여, 基地조직을 微細化함과 아울러, 鋼의 強度, 靱性の 向上을 달성하고자 하는 프로세스이다. 따라서 TMCP 鋼은 종래의 高強度鋼과 는 달리 製造工程에서 高強度, 強靱化가 달성되기 때문에 同一強度 레벨의 종래의 鋼에 비해 炭素當量( $C_{eq}$ )을 낮게 유지할 수 있다.

따라서 TMCP 高張力 鋼板은 小入熱 熔接에 대한 耐龜裂性이나 大入熱 용접에 대한 熱影響部(HAZ)의 靱性등의 見地에서 熔接性(weldability)이 탁월한 것이 特徵이며, 또한 脆性 破壞의 見地에서도 우수한 特性을 나타낸다.

그러나 이 鋼材는 炭素當量이 낮기 때문에 大入熱 熔接을 實施하면, 熱影響部가 약간 軟化하는 현상이 일어난다. 따라서 TMCP 高張力 鋼板을 有効하게 利用하기 위해서는 實構造物으로서의 사용특성에 대한 確認檢討가 必要하다.

본 글에서는 現在 實用化되고 있는 50kg/mm<sup>2</sup>급 高張力 鋼材로서, 제어압연과 加速冷却 效果를 가미시켜 製造되는 水冷型의 TMCP 鋼材를 中心으로 母材 및 熔接部에 대한 各種 特性을 종래의 압연 鋼材와 비교 考察하고 이 鋼材의 有効利用에 대해서 서술하고자 한다.

## 2. TMCP鋼 母材의 特性

종래의 압연강판과 TMCP鋼板의 압연프로세스를 模式的으로 表示하면 그림 1과 같다.

이 工程에 나타난 바와 같이 TMCP 鋼板은 종래 압연 鋼板의 압연 온도보다 再結晶溫度 下限界域, Ar3 變態點 直上の 未再結晶 溫度域 및 Ar3 變態點 直下の 오스테나이트-페라이트 二相 共存域에서 精確한 압연온도 制御로 압연을 行하는 것이다. TMCP 鋼材는 非水冷(Non AcC)型和 압연종료 직후에 加速冷却을 行하는 水冷(AcC)型으로 大別된다.

이상과 같은 압연 工程의 特性으로 인해 TMCP方法은 비교적 낮은 炭素當量으로 所要의 強도와 靱성을 갖는 高張力 鋼板의 製造가 可能하게 된다. 그림 2는 종래의 노말라이징 鋼材와 TMCP鋼材에 대해 炭素當量과 強도와 의 關係를 나타낸 것이다.

이 그림에서 500MPa級 鋼의 製造에 있어서 途中水冷 정지형의 TMCP鋼材에서는 炭素當

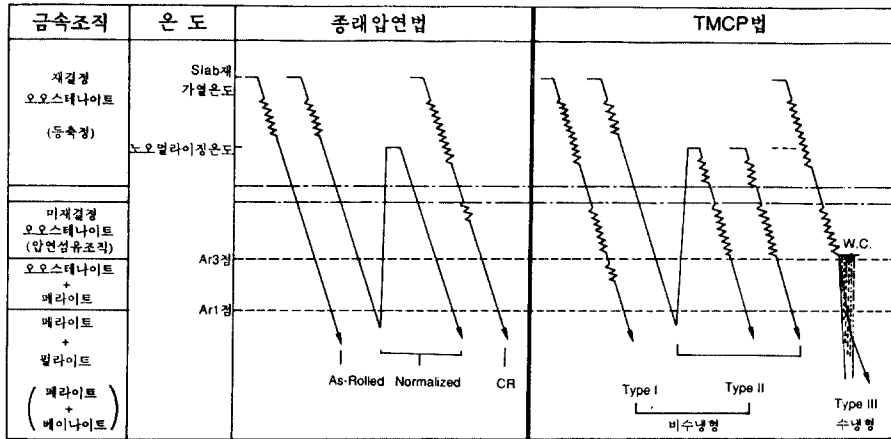


그림 1 강의 압연과정

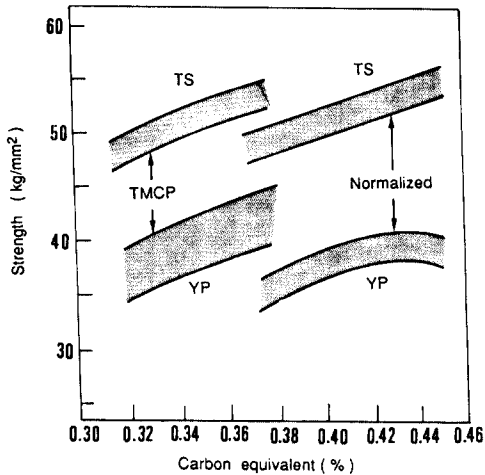


그림 2 탄소당량과 강도와의 관계

량을 0.04~0.08% 낮게 할 수 있고, 상온가까이까지 수냉하는 경우에는 동일레벨의 강도를 얻는데 0.25%가까이까지 탄소당량을 낮출 수가 있다.

이러한 TMCP강재의 압연공정 및 탄소당량 상의 특성으로 인한 장점과 문제점을 종래의 강재와 비교하여 정리하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

또한 TMCP 고장력 강재는 동일강도 레벨의 종래의 강재에 비해破壊靱성이 크다. 그

림 3은 수냉형의 TMCP 강재에 대한 온도 따른 限界 COD값의 變化를 나타낸 것이다. 從來의 강재의 경우에 비하여 큰 限界 COD값을 보이고 있다.

그 밖에도, TMCP 高張力鋼板은, 脆性龜裂 전과 停止性能이 우수한 것이 特徵이다.

船體用 TMCP HT50 鋼板 母材 L方向에 대해서 실시한 均열 전과부 幅 500mm의 標準溫度句配型 二重 인장試驗에 의해 구한 均열 停止靱性 값  $K_{ca}$ 와 溫度와의 關係를 그림 4에 나타내었다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 TMCP HT50鋼板은 수냉형(AcC型) 鋼板의 일부를 제외하고는 노말라이징 處理를 行한 종래의 압연 鋼板보다도 脆性均열 전과정지 性能이 매우 우수하다. 이와같이 TMCP강재에 있어서 均열 전과정지 性能이 우수한 것은 소위 separation에 起因한 것으로 추정되고 있다. 따라서 이러한 특성으로 인해 TMCP강재는 crack arrestor로서 有效하게 이용될 수 있다.

### 3. 대입열 용접부의 軟化和 強度特性

실제 조선소등에서 응용되고 있는 용접법으로는 피복아크 용접(SMAW), CO<sub>2</sub> 半自動

표 1 TMCP 鋼의 특성 및 施工上의 利得과 問題點

製 法	特 性	施工上의 利得과 問題點
低炭素當量 ( $C_{eq}$ )	長點 (1) 熔接低溫 均열 발생 감소성의 低下	① 熔接에 열 溫도의 低下 또는 不要 ② 非低水素系 熔接棒의 採用 ③ Short bead 制限의 緩和
	(2) 急冷熱 사이클에 대한 靱性劣化의 減少	① 線上加熱 조건의 緩和
	短點 (1) 大入熱 熔接時의 HAZ의 軟化	① 大入熱 熔接의 制限 ② $C_{eq}$ 의 下限值 설정
	(2) 母材의 dilution에 의한 熔接金屬의 強度低下	① 自動熔接 flux, wire 成分中의 合金成分의 增加 ② $C_{eq}$ 下限值의  설정
制御壓延과 急 冷	長點 靱性の 向上	大入熱 熔接의 入熱制限의 緩和
	短點 鋼板內部 應力의 偏在	가스절단, 熔接時의 변형 발생과 그  교정
	綜合的 特性 熔接성과 靱性의 向上에 의한 母材의  기본 性能 向上	高張力鋼 熔接部의 실질적 性能向上에 의한  안전성  증대

용접, 서브머지드아크 兩面용접, 일렉트로 슬래그용접, 일렉트로 가스 용접등이 이용되고 있다. 이들 용접법의 入熱량을 板두께와의 關係로 나타내면 그림 5와 같다. 大入熱 용접법 으로서는 일렉트로 슬래그 용접, 일렉트로 가

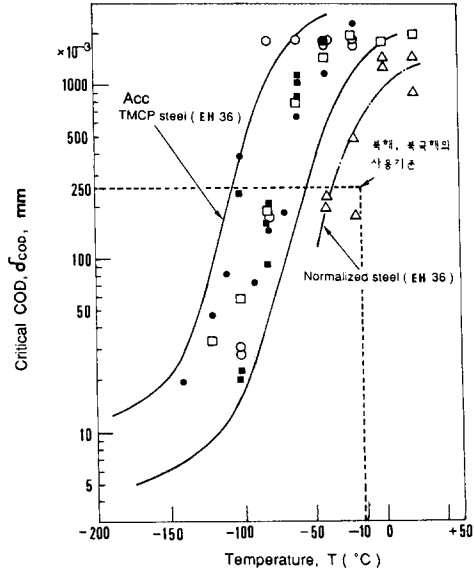


그림 3 TMCP강 모재의 COD시험결과

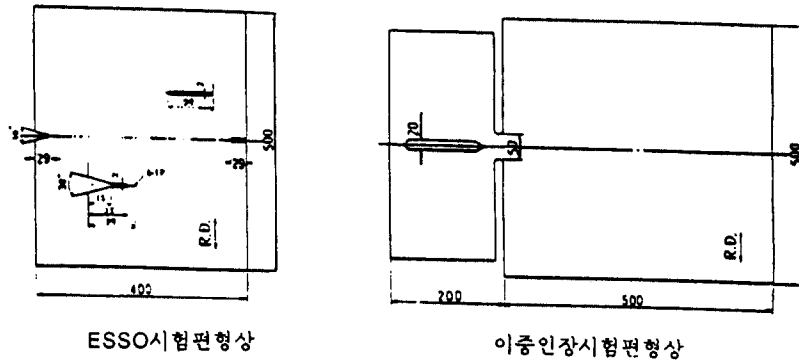
스 용접이 代表的인 方法이다.

TMCP 高張力 鋼板은 낮은  $C_{eq}$ 값 때문에 大入熱용접법을 적용하면 HAZ部에 軟化域이 생겨 이음부의 強度低下가 문제로 된다.

그림 6은 TMCP 鋼 熔接部의 인장강도를 試驗片 幅을 變化시켜 가며 求한 結果를 정리하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 板幅 30mm인 시험편에는 이음부의 強度는 50kg/mm<sup>2</sup>(항복점 36kg/mm<sup>2</sup>級 HT50 鋼板에 대한 最低強度)에 못미치지만, W/t가 8이상으로 되면 이음매의 強度는 50kg/mm<sup>2</sup>를 만족한다는 것이 밝혀지고 있다. 즉  $C_{eq}$ (IACS)값이 0.25%의 TMCP AcC HT50鋼板 大入熱용접이음부에서는 HAZ의 軟化 정도가 크고, 板幅이 좁은 시험편에서는 規格值를 만족할 수 없으나, 板幅이 크게되면 規格值를 만족하게 된다.

#### 4. 大入熱 熔接이음부의 破壞靱性

船體用 TMCP HT50鋼板 대입열 용접이음부의 fusion line 部의 -20°C에 있어서의



강종	압연법	기호
HT 50 (t = 30 mm)	Non Acc (I)	○
	TMCP Non Acc (II)	□
	Acc	△
	Conventional steel	●

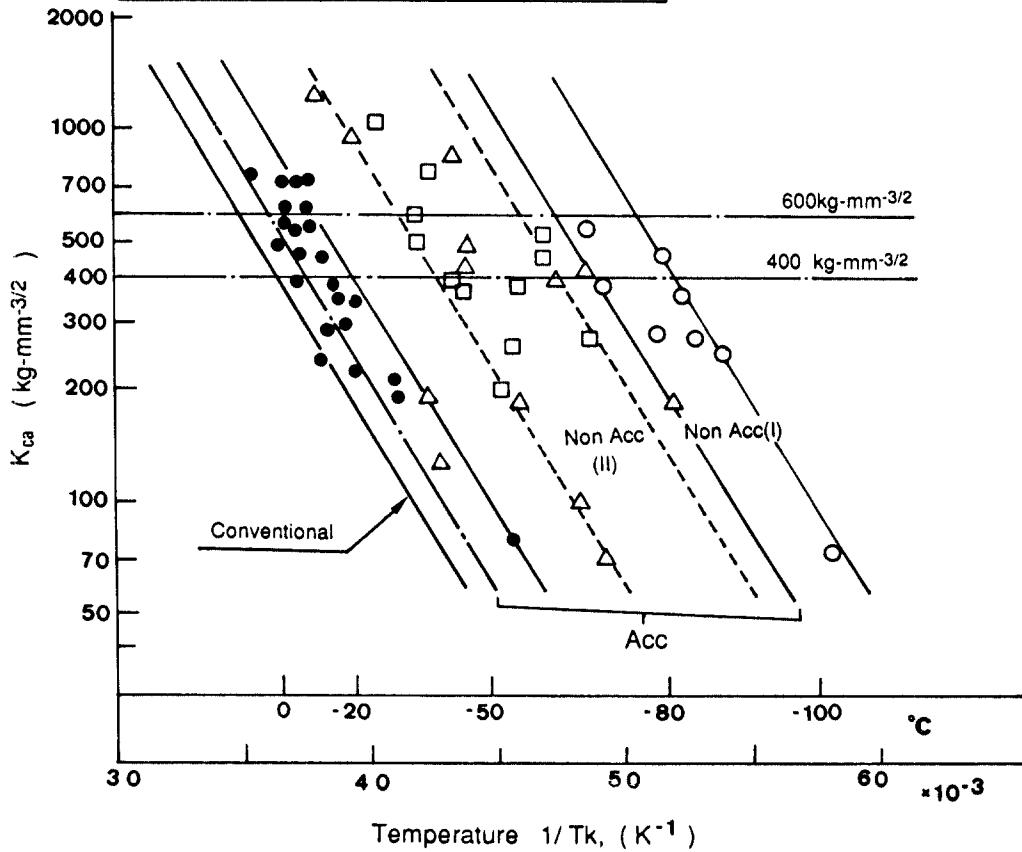


그림 4  $K_{ca}$  값과 온도와의 관계 (선체용 TMCPHT50강)

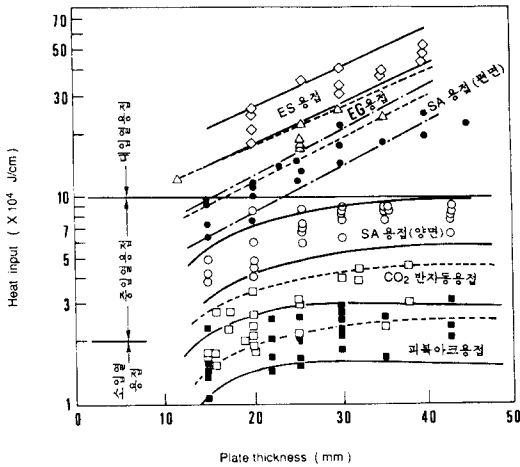


그림 5 용접입열과 판두께와의 관계

V-notch charpy 흡수 에너지( $vE_{-20}$ )와 용접入熱과의 관계를 그림 7에 나타내었다. Fusion line에서의  $vE_{-20}$ 값은 入熱이 增加함에 따라 低下하여, 150kJ/cm 以下の 入熱에서는 大入熱 용접 對策材(V, Nb, Ti 첨가)와 非對策材의 差는 그다지 크지 않다. 그러나 大入熱 영역에서는 EH鋼의 規格值( $vE_{-20} \geq 3.5 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{m}$ )를 安全하게 確保하기 위해서는 大入熱 용접용 對策材를 이용하는 것이 바람직하다.

또한 그림 8에는 從來 鋼을 포함해서 大入熱 熔接非對策材에 大入熱 熔接을 실시할 때의 fusion line部의 0°C에 있어서의 charpy값( $vE_0$ )

Ceq (%)	장표질거리		입열량 (KJ/cm)
	용접원그대로	Reinforcement 제거	
0.25	□	■	139
	△	▲	138
	○	●	480-533

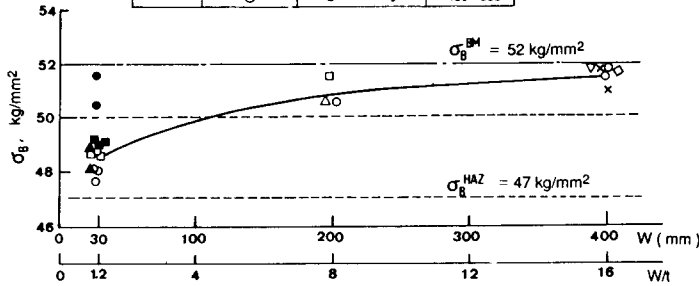
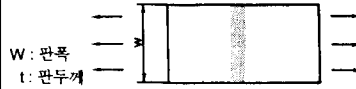


그림 6 TMCP강 용접부의 인장강도에 미치는 판폭의 영향

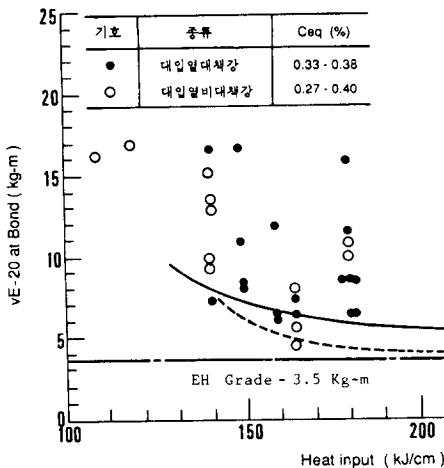


그림 7 TMCP강 대입열용접부 fusion line에서의  $vE_{-20}$ 과 입열량과의 관계

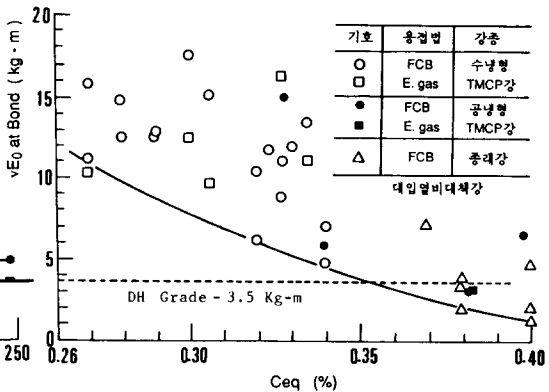


그림 8 대입열용접부 fusion line부에서의  $vE_0$ 와  $C_{eq}$ 와의 관계(대입열 비대책강)

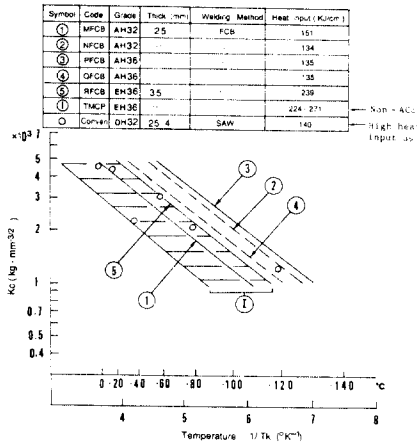


그림 9 대입열용접이음부의 중앙노치(판두께관통) 대형인장시험결과( $K_c$ 의 비교)

과  $C_{eq}$ 와의 關係를 나타내었다.  $C_{eq}$ 값이 높은 從來의 鋼은 DH鋼의 規格值( $vE_0 \geq 3.5 \text{kgf} \cdot \text{m}$ )를 만족하고 있지 않지만,  $C_{eq}$ 값을 低減시켜 가면  $vE_0$  값은 높게 되고, 加速冷却形 TMCP鋼材에서는 소위 大入熱 對策材가 아니라도 規格值를 만족하고 있다.

그림 9는 大入熱非對策 TMCP鋼의 大入熱 熔接部의 fusion line部에 있어서의 大形인장 시험에 의한 破壞靱性  $K_c$ 의 측정결과이다.

여기에는 從來의 大入熱對策 압연鋼(C.P.S)板에 대한  $K_c$ 값도 함께 表示되어 있는데, 이 結果에 의하면 供試 TMCP鋼 용접부는 從來 압연 鋼板의  $K_c$ 값과 거의 同等한 값을 보이고 있다. 따라서 供試水冷型의 TMCP 50kg/mm<sup>2</sup>급 高張力鋼(大入熱熔接非對策鋼)의 大入熱 용접이음매의 破壞靱性は, 大入熱 對策을 實施한 從來 壓延型 50kg/mm<sup>2</sup>급 高張力鋼과 같은 용접이음매의 破壞靱性和 거의 等價라고 하는 것이 判명되고 있다.

### 5. 熔接이음部의 疲勞強度

TMCP AcC 高張力鋼板은, 從來의 압연鋼板과 비교하여 일반적으로 낮은  $C_{eq}$ 값을 갖기

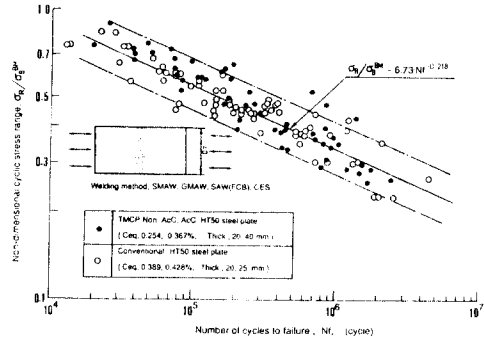


그림 10  $S-Nf(\sigma_R/\sigma_B^{BM} - Nf)$ 선도(HT50 강판, 맞대기용접이음)

때문에, 그 大入熱용접이음부의 HAZ가 軟化하는 것은 前述한 바와 같다. 이러한 HAZ部 軟化가 용접이음부의 피로강도에 미치는 影響에 대해서 記述하고자 한다.

TMCP Non AcC·AcC HT50鋼板과 종래의 압연 HT50 鋼板의 맞대기 용접이음부의 平均 시험편(시험편 幅 40mm 또는 50mm)에 의한 室溫大氣中에서의 引張片振疲勞 시험結果( $R=0$ 를 包含)를 그림 10에 나타내었다. 이 그림의 從軸은 공칭응력범위( $\sigma_R$ )를 모재의 인장강도( $\sigma_B^{B.M}$ )로 나눈 무차원 응력범위( $\sigma_R/\sigma_B^{B.M}$ )이다. 이 그림에 표시한 바와 같이, 열 影響部가 거의 軟化를 일으키지 않는 從來의 압연 HT50 鋼板의 이음부이나 軟化가 일어나는 TMCP AcC HT50 鋼板의 大入熱용접부나 같은 범위內的 데이터 散亂을 표시하고 있어서, 피로강도면에서 차이가 나타나지 않는다.

그림 11은 AcC TMCP 鋼材( $C_{eq}=0.33$ )에 대해 서브머지드아크 용접(H.I.: 94kJ/cm)시의 용접부의 변형率 制御型 저 사이클피로 시험 결과로서 모재와 용접부의 破斷壽命基準 低사이클 피로수명 곡선을 나타내고 있다. 이 실험 결과에 의하면 용접부의 경우 軟化현상으로 因해 母材의 破斷壽命에 비해 최고 1/3.5로 低下하고 있음을 보이고 있다.

또한 이 그림 중에 本 實驗에서 얻어진 TMCP 鋼材의 最適疲勞曲線(母材의 均열 발

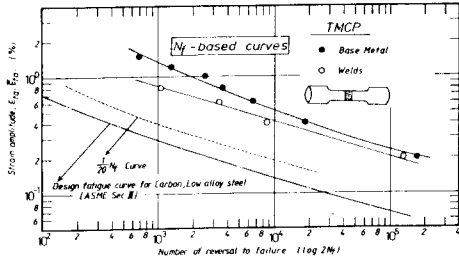


그림 11 TMCP강 모재 및 용접부의 저사이클 피로수명의 비교

생기준 低사이클 疲勞壽命曲線의 1/20Nc 설계 疲勞曲線 (design fatigue curve)과 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III에서 인장강도 540MPa 以下の 鋼材에 대하여 적용되는 設計疲勞曲線을 함께 나타내었다.

이 그림에서 알 수 있는 바와같이 AcC TMCP 鋼材의 경우, HAZ部의 軟化로 인해 低사이클 피로수명은 母材에 비해 낮아지나, ASME 設計疲勞曲線보다 1/20Nc 最適疲勞設計曲線은 상당히 上方에 位置하고 있음을 나타내고 있어 TMCP 鋼材의 HAZ部 軟化가 低사이클 피로수명에 별반 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

다음에, TMCP Non AcC, AcC HT50 鋼材 大入熱 용접이음부 HAZ部에 따른 實溫大氣中에서의 疲勞균열 전과 試驗결과를 그림 12에 나타내었다. 또한 試驗에 이용한 試驗片은 HAZ部에 貫通 노치를 가공한 중앙노치材 평활시험편(試驗片 幅100mm 또는 140mm)이다. 이 그림에는 從來 압연 HT50 鋼材의 HAZ部에 따른 피로균열전과시험(시험편 幅100mm 또는 200mm)의 결과도 함께 표시되어 있다. 이 결과에 의하면, 모든 용접이음부분에서 HAZ部에 따른 疲勞균열 전과특성은 거의 같은 범위內에 들어있어 별로 차이가 없음을 보이고 있다.

즉 피로 설계적인 견지에서 보면, TMCP Non AcC, AcC HT50 鋼板 용접이음부의 HAZ部에 따른 疲勞 균열 전과특성은, 從來의

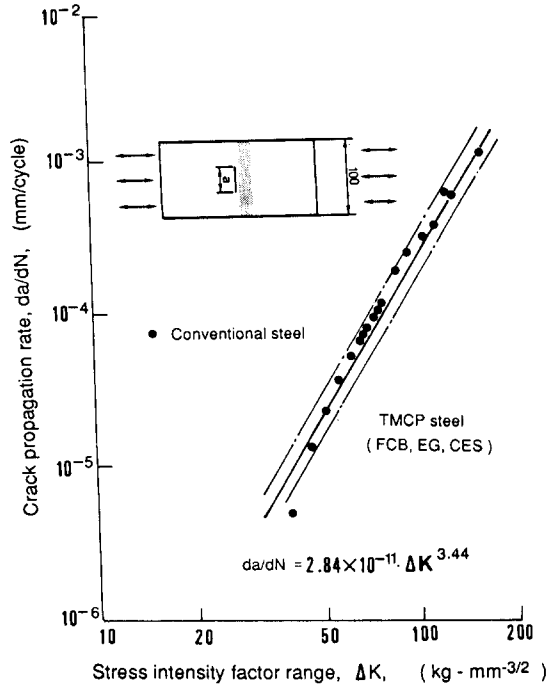


그림 12 da/dN-K 선도 (HT50강판, 맞대기용 접열영향부)

압연 HT50 鋼板 용접이음부의 HAZ에 따른 疲勞균열 전과특성과 同等한 정도라고 판단된다.

## 6. TMCP 鋼材의 有効利用

### 6.1 造船用 鋼板

TMCP 鋼板의 上述한 특징으로 인해 造船用 鋼板으로 利用時 從來의 鋼에 비해 갖는 利得으로서는, ① 용접예열의 省略, ② 非低水素系 용접봉의 채용, ③ short bead 制限의 완화등을 들 수 있다.

특히 TMCP 鋼板은 crack arrest性이 우수하여 crack arrestor로서의 有効利用이 검토되고 있다.

船體 構造를 비롯한 大型용접구조물의 crack arrestor에 요구되는 靱性에 關해서는, 高速으로 전파하는 균열에 대한 動的 해석기술

이 確立되지 않으면 정확히 論할 수 없다. 그러나 靜的이기는 하지만 實構造物에서의 脆性波高例의 逆解析 結果로부터, 均열전과部 幅 400~500mm 정도의 시험편에 의해 求한  $K_{ca}$  값이 實構造物의 使用溫度에서

$$K_{ca} \geq 600 \text{kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2 \quad (1)$$

을 만족하면, crack arrestor는 有効하다고 생각되고 있다. 또한 大型 試驗片에 의한 脆性均열전과 停止試驗結果에 의하면

$$K_{ca} \geq 400 \text{kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2 \quad (2)$$

을 만족하면 crack arrestor는 有効하다는 實驗結果도 報告되고 있다.

이러한 觀點에서 보면 TMCP 鋼材는 그림 4에서 나타난 바와 같이 이 조건을 충분히 만족하기 때문에 crack arrestor로서 有効하게 利用할 수 있음을 알 수 있다.

### 6.2 海洋構造物, 氷海선박등의 低溫構造用鋼

低溫域에서 사용되는 海洋구조물, 氷海船舶등과 같은 高度의 品質을 要求하는 구조물에 용접열영향부의 硬化성이 작고 低溫靱성이 우수한 特性을 갖는 TMCP鋼이 활용되어가고 있다.

북해, 북극해와 같은 寒冷地 海洋구조물에 필요한 性能의 一例를 들면 다음과 같다.

(1) 우수한 低溫靱性, 특히 용접이음부에 대한 破壞靱性값(-10℃에서 COD값이 0.25mm 이상)

(2) 용접低溫均열이나 有害한 결함의 防止

(3) Lamellar tear防止를 위한 母材판두께 방향특성(판두께방향 引張試驗의 단면수축률이 20%以上, 鋼材中の S함량 0.007%以上)

(4) 使用중의 水素誘起에 의한 응력부식균열 방지를 위해 용접부의 最高硬度的 制限(Hv ≤ 300)

前述한 바와 같이 TMCP鋼의 低炭素當量, 低  $P_{cm}$ 化에 의해, 上記 4項目的 조건을 만족하고 있는 것이 지금까지의 TMCP鋼에 대한

實驗結果 밝혀지고 있다.

특히 使用중의 水素誘起로 인한 응력부식균열을 방지하기 위해 海洋構造物에서는 HAZ의 最高硬도를 규제하는 경우가 많다. 汚染海水中에는 유화수소가 어느정도의 농도로 존재하기 때문에, 유화수소 均열이 硬化된 용접토우(toe)부로부터 發生하는 경우가 있다. 따라서 탄소당량을 억제한 TMCP鋼에서는 예열없이도 HAZ부의 最高硬도를 300Hv이하로 할수있어서 종래의 압연鋼材에 비해 매우낮게 유지할수 있다.

이와같이 寒冷地用 海洋構造物에 TMCP鋼을 이용한다는 것은, 이 鋼材가 갖는 特性으로 인해 매우 효과적이라고 할 수 있다.

### 6.3 라인 파이프用 鋼

파인 파이프用 鋼의 제조에 TMCP기술을 적용하게 되면, 性能向上이나 원가面에서 큰 利得이 있다. TMCP鋼材의 低 C化, 低  $C_{eq}$ 化에 起因해서 HAZ 靱성이나 現地の 圓周 용접성이 크게 개선되기 때문이다.

低 C化的 또다른 利點은 中心偏析이 경감된다는 사실이다. 실험결과에 의하면 탄소량이 0.05% 以下이면 Mn이나 P의 中心偏析이 크게 경감되어 耐水素誘起龜裂性이 크게 개선되기 때문에 NACE 환경(유화수소포화 5% NaCl-0.5%  $\text{CH}_3\text{COOH}$ 수용액)에서도 HIC(hydrogen induced cracking)이 발생치 않는 API grade 5LX-60이나 70鋼이 開發되어 있다.

### 6.4 기타 低溫用 鋼

LPG탱크 등의 低溫用鋼에 TMCP기술을 적용하는 것은 均열 微細粒조직이 얻어지기 때문에 脆性均열 전과정지 特性의 비약적인 向上을 가져온다.

## 7. 맺 음 말

水冷型的 50kg/mm<sup>2</sup>級 TMCP 高張力 鋼材



를 중심으로, 이 鋼材 母材의 기계적 특성 및 용접부의 각종 사용특성에 관해 從來의 압연製法에 의한 同一強度레벨의 高張力鋼板과 비교하여 考察하고 이 鋼材의 有効利用에 대하여 설명하였다.

TMCP 高張力 鋼板은 탄소당량이 낮고 結晶粒 微細化가 달성되기 때문에 破壞靱性이나, 용접부의 耐脆化, 耐熔接균열성 面에서 탁월한 특징을 가지나 용접조립시 용접열사이클로 인한 軟化현상 때문에 용접부의 사용특성이 문제로 될수 있다.

그러나 용접조건이나, 鋼板의 強度, 化學成分의 配慮, 선택에 따라 實用上 별로 문제가 되지 않음이 確認하고 있다.

이와같은 특징으로 인해 TMCP鋼은 造船用 素材뿐만아니고, 북해, 북극해와 같은 寒冷氷 海域의 가혹한 환경에서 작동되는 海洋構造物 用이나 라인 파이프用 素材로서도 그 活用이 확대되어 갈 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- (1) 小溝, 1986, 鐵鋼新素材, TMCP 鋼의熔接部割わ感含性, 日本熔接學會誌, Vol.55 No.3
- (2) 1984, 日本造船研究協會, 第193研究部會: 新製法による50キ口級 高張力鋼の有効利用に關係研究.
- (3) 失島多田 外, 1986, "TMCP(新制御壓延)型 高張力鋼板の船舶", 海洋構造物の有効利用, 三菱重工技報 Vol. 23, No. 4.
- (4) 1985, 日本造船研究協會, 第198研究部會, 總合報告書.
- (5) 한명수, 1989, TMCP鋼材 및 그 熔接部の低사이클疲勞特性에 관한 研究, 韓國海洋大學 工學碩士學位論文, 1989.
- (6) 河野, 村山外, 1986, "鐵鋼新素材, TMCP鋼熔接部の使用性能", 日本熔接學會誌, Vol.55, No.6.
- (7) 井上, 多田, 平田 外, 1984, 新制御壓延(TMCP)型50キ口級高張力鋼熔接繼手部の疲勞強度とその評價, 西部造船學會會報 第67號.
- (8) 김영식, 한명수, 여옥중, 1988, "가속냉각형 TMCP鋼材의 저사이클 피로특성에 관한 연구," 대한용접학회 1988年度 추계학술발표 개요집.
- (9) Kanazawa, T., Machida, S. and Yajima, H. et al., 1973, "Study on Brittle Crack Arrestor," Selected Paper, J. Soc. Nav. Archit, Japan, Vol. 11.
- (10) 失島, 三野, 1982, "船舶の脆性龜裂事故の解析例", 日本造船學會, 熔接研究委員會 第一分科資料 1-550-82.
- (11) 1985, 日本造船研究協會 第193研究部會, 新製法による50キ口級 高張力鋼の有効利用に關する研究, 總會報告書, 日本造船研究協會 報告 第100號.

