

# TMCP 高張力鋼 熔接部の 疲勞破壞 特性에 關한 研究<sup>1)</sup>

김영식\* · 노재충\*\* · 김윤혜\*\*\* · 한명수\*\*\*

## A Study on the Fatigue Fracture Characteristics of TMCP High Tensile Strength Steel Welds

Y. S. Kim, J. C. Rho, Y. H. Kim, M. S. Han

### Abstract

TMCP steel manufactured by controlled rolling followed by accelerated cooling process is known to have extra-ordinary mechanical properties such as tensile strength and toughness. However, there is much uncertainty about the fatigue fracture characteristics of this steel.

In this paper, the fatigue fracture behaviour of the TMCP steel in base metal and weldment were inspected through the Dynamic Implant test method. Those results were quantitatively compared with those of the ordinary normalized steel of same strength level. Moreover, the effect of the diffusible hydrogen included in the welded part on the fatigue fracture behaviour were made clear.

As the experimental results, the fatigue fracture characteristics of the TMCP steel in case of base metal proved out to be superior to that of the normalized steel.

However, the TMCP steel weldment including the diffusible hydrogen appeared to have inferior fatigue characteristics compared with the same conditioned normalized steel weldment.

### 1. 序 言

TMCP(Thermo-mechanical controlled process)鋼材는 壓延溫度와 패스 스케줄(pass schedule)을 엄격히 制御하고 壓延後 바로 急冷시키는 방법으로 직접 담금질의 효과를 가미시켜 高張力, 強靱化를 도모한 鋼材로서 최근에 이르러 造船, 海洋構造物 등의 部材로서 그 수요가

급증하고 있다. 이 鋼材는 오스테나이트의 未再結晶 領域에서 최종壓延 과정을 거침으로서 오스테나이트가 再結晶되지 않고 바로 페라이트로 변태되게 하여 미세한 페라이트 組織을 얻고 壓延後 바로 水冷하는 공정을 거쳐 기지組織을 페라이트·베이나이트 組織化함으로서 이제까지 주로 熔接用 鋼材로서 사용되어 왔던 as-rolled 材나 normalized 鋼材에 비해 높은 強度와 우수

1) 1987 추계 학술대회 발표논문

\* 正會員, 韓國海洋大學

\*\* Lloyd船級協會

\*\*\* 韓國海洋大學 大學院

한 靱性을 지닌 鋼材이다.<sup>1,2)</sup>

그러나 이러한 鋼材를 熔接 構造物로 組立時는 과도한 熱싸이클로 因해 복잡한 冶金學的 및 力學的 現象의 變化가 초래되어 母材가 지닌 각종 特性이 劣化될 可能性이 있기 때문에 構造物의 安全性 확보를 위해 熔接部에 대한 각종 特性의 定量的인 평가가 이루어져야 한다.

이제까지 熔接用 鋼材로서 주로 사용되어져 왔던 as-rolled 材나 normalized 鋼材의 경우에는 熔接部의 靜的 또는 動的 特性에 대한 多數의 研究가 이루어져 이에 대한 충분한 데이터가 축적되어 있는 상태이나, 본 研究에서 밝히고자 하는 TMCP 鋼材에 대해서는 熔接部의 각종 特性, 특히 이 鋼材가 극히 최근에 이르러 개발된 것이기 때문에 動的 荷重下에서의 疲勞 特性에 대한 研究는 거의 이루어지고 있지 않은 실정이다. 따라서 본 研究에서는 TMCP 鋼 熔接部에 대한 動的 荷重 조건 下에서의 疲勞 特性을 同級인 normalized 鋼材와 比較·考察하였다. 그리고 熔接部에 擴散性 水素가 殘留되어 있는 상태를 再現하여 이러한 擴散性 水素가 熔接 熱影響部의 疲勞破壞에 미치는 影響을 研究하였다.

## 2. 實驗재료 및 實驗方法

### 2.1 實驗材料 및 試驗片의 形態

本 實驗에 사용된 試驗材로서는 50kg/mm<sup>2</sup>級 TMCP 鋼材이며 比較材로서 同級인 normalized 鋼材를 이용하였다. 여기서 TMCP 鋼材는 Ar<sub>3</sub> 直上의 溫度範圍까지 制御壓延工程을 계속한 후 water spray에 의한 加速冷却을 연속적으로 실행

시하여 製造된 鋼材이다.

Table 1에 이와 같은 TMCP 鋼材와 在來의 normamlized 鋼材의 化學的 成分과 Ceq, Pcm 및 機械的 性質을 보인다. 또한 Fig. 1에 試驗片의 形狀과 이 試驗片을 삽입하여 試驗片 上端部에 熔接 熱影響部를 再現하기 위해 이용된 母板의 形狀을 보인다. 試驗片은 45mm 板 두께의 中央에서 壓延方向과 平行하게 채취하였으며 圓周노치의 위치는 예비 實驗을 통해 熔接 熱影響部에 오도록 하였다.

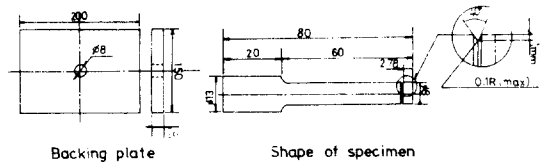


Fig. 1. Schematic diagram of test components.

### 2.2 實驗方法

Fig. 2에 임플란트 試驗方法을 疲勞試驗에 적용하기 위한 試驗片 고정양식, 荷重附加 방식의 概要를 보인다.<sup>3)</sup> 圓周 노치를 갖는 圓形 試驗片을 母板에 2mm리 加工해 둔 구멍에 삽입한 후 試驗片 上端部에 熔接비드가 통과하도록 bead-

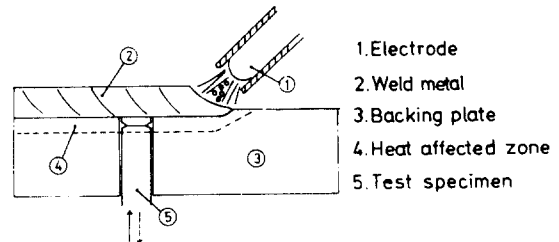


Fig. 2. Schematic illustration of welding and method of tests.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of test material.

Materials	Chemical compositions (wt. %)												Mechanical properties			
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Al	Ti	Nb	N	Ceq	Pcm	Y. S. (kg/mm <sup>2</sup> )	T. S. (kg/mm <sup>2</sup> )	El(%)
TMCP	0.08	0.29	1.40	0.008	0.002	—	—	0.035	0.007	0.014	0.0038	0.325	0.160	49.9	56.9	25.0
Normalized	0.13	0.40	1.43	0.019	0.001	0.30	0.23	0.065	0.017	0.021	0.0032	0.391	0.234	36.9	54.5	30.0

$$Ceq = C + \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{24}Si + \frac{1}{40}Ni + \frac{1}{5}Cr + \frac{1}{4}Mo + \frac{1}{14}V(\%)$$

$$Pcm = C + \frac{1}{30}Si + \frac{1}{20}Mn + \frac{1}{20}Cu + \frac{1}{60}Ni + \frac{1}{20}Cr + \frac{1}{15}Mo + \frac{1}{10}V + 5B(\%)$$

on-plate 熔接을 實施한다. 이때 熔接에 受반된 熔接 熱사이클로 인해 試驗片 上端部에 熔接 熱影響部가 再現되며 熔接棒 被服劑에 흡착된 水分이나 공기중의 水分속에 포함되어 있는 分子相의 水素가 熔接過程中 原子相의 水素로 熱解離하여 熔接金屬으로 흡수된다.<sup>4)</sup>

이와 같이 임플란트 試驗片의 上端部에 熔接 熱影響部와 擴散性 水素條件을 再現한 후 疲勞荷重을 附加함으로써 실제 熔接 熱影響部の 疲勞破壞特性을 評價할 수 있다.<sup>5)</sup>

Fig. 3은 임플란트 試驗片에 疲勞荷重을 附加하기 위해 本 研究室에서 考案·製作한 動的 임플란트 試驗機(Dynamic Implant tester)의 概要를 보인 것이다. 편심륜 ⑧을 회전시켜 연결봉 ②의 右側 끝端部에 上下 운동을 유발시켜, 이러한 上下 운동이 Load Cell을 거쳐 試驗片에 傳達되도록 함으로서 임플란트 試驗片에 片振引張 反復荷重이 작용하도록 하였다.

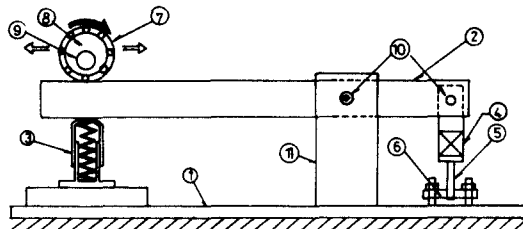


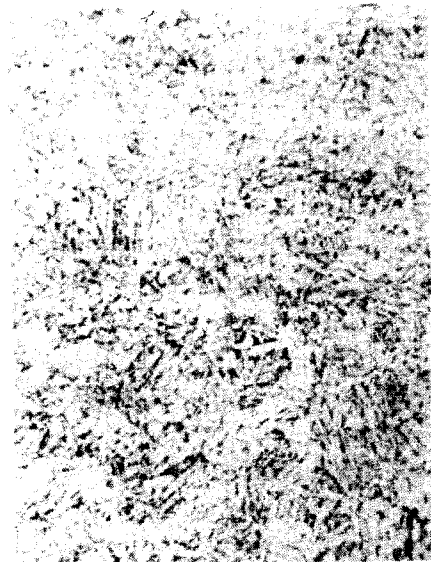
Fig. 3. Schematic diagram of Dynamic Implant tester.

또한 熔接部에 混入되는 擴散性 水素條件은 水素포집장치를 이용한 예비 實驗을 통해 實在 熔接時 나타날 수 있는 條件으로 24.6cc/100gr 과 5.2cc/100gr으로 엄격히 制御하여 水素量의 變化에 따른 疲勞特性의 變化를 조사하였다.<sup>5)</sup>

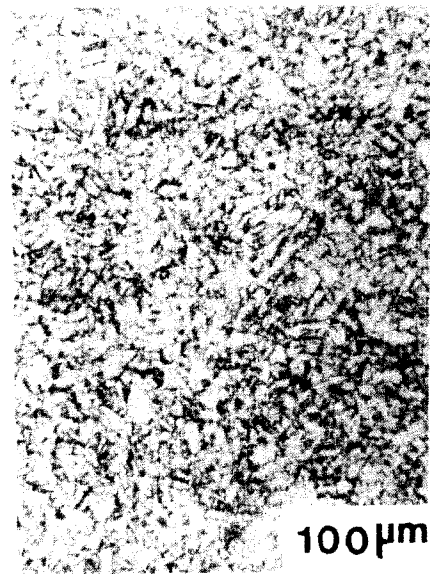
### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 TMCP鋼 熔接部の 組織과 機械的 特性變化

Photo. 1은 TMCP鋼 熔接 熱影響部와 同級인



(a) Normalized



(b) TMCP

Photo. 1 Microstructure of the heat affected zone in weldment.

normalized 鋼材 熔接 熱影響部の 組織을 比較한 것이다. 이에 依하면 normalized鋼 熔接 熱影響部는 針狀形의 粗大한 ferrite組織이 형성되어 있으나 accelerated cooling 처리한 TMCP 鋼 熔接 熱影響部는 미세한 equiaxed ferrite가 생성되어 있음을 관찰할 수 있다. 이와같이 TMCP 鋼材가 미세한 組織을 갖는 이유로는 製造工程

의 특성으로 母材 자체가 normalized 鋼材에 비해 미세한 組織을 갖고 있기 때문에 同一한 熔接 熱사이클을 받았을 때 미세한 熱影響部 組織이 나타난다고 생각되며, 이러한 미세組織 생성이 또한 높은 熔接 熱影響部 靱성에 기여할 것으로 思料된다.

Fig. 4는 TMCP 鋼材와 比較材인 normalized 鋼材의 熔接部 硬度分布를 나타낸 것이다. 이에 依하면 normalized 鋼材의 경우에는 熔接 熱影響部(HAZ)에서 硬化현상이 뚜렷이 나타나나 TMCP 鋼材의 경우에는 母材나 熱影響部에서 거의 같은 값을 보이고 있다. 이것은 normalized 鋼材의 경우에는 熔接 熱사이클에 의한 quenching 효과가 작용하나 TMCP 鋼材의 경우에는 제조공정중의 accelerated cooling 효과가 熔接 熱사이클에 의해 영향을 받지 않기 때문인 것으로 思料된다. 즉 TMCP 鋼材의 경우에는 熔接時 급냉의 熱사이클이 製造工程中的 accelerated cooling 속도 보다 완만하기 때문에 硬度分布의 變化를 야기하지 않는다고 思料된다.

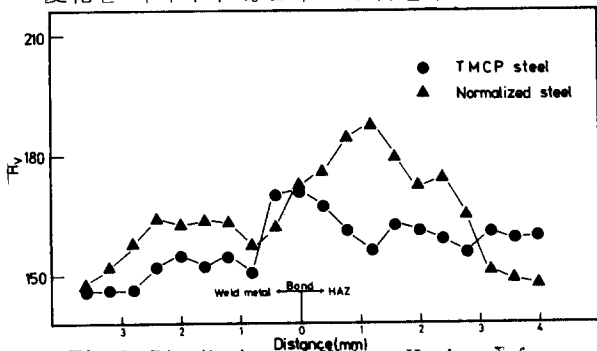


Fig. 4. Distributions of Vickers Hardness of welds.

### 3.2 TMCP鋼 熔接 熱影響部の 疲勞 破壞 特性

Fig. 5는 TMCP 鋼材와 比較材인 normalized 鋼材에 대해 母材와 熔接 熱影響部에 있어 疲勞 試驗時 反復應力과 破斷까지의 反復횟수와 關係를 나타내는 S-N曲線이다. 여기서 熔接 熱影響部の 疲勞 試驗은 熔接時에 混入된 擴散性水素의 영향을 가능한 限 제거하기 위해, 熔接實施後 48시간 放置함으로써 熔接部로부터 대기중으로 水素가 충분히 放出되도록 한 후 反復荷重을

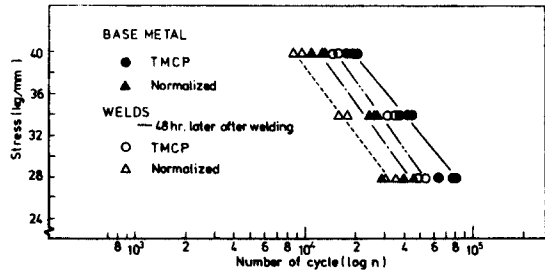


Fig. 5. Cyclic stress vs. number of cycle results of the base metal and welds. (loading rate: 170cpm)

加하여 疲勞 試驗을 行한 結果이다.

이에 依하면 TMCP 鋼 母材의 경우는 同級인 normalized 鋼 母材에 비해 우수한 疲勞 特性을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 熔接 熱影響部의 경우에 있어서도 TMCP 鋼材의 경우가 normalized 鋼材의 경우보다 同一應力 레벨(level)에서의 破斷 壽命이 긴 것을 알 수 있다. 이와같은 효과는 制御壓延과 加速冷却 효과를 가미시켜 製造된 TMCP 鋼材의 結晶粒 微細化 현상에 기인한 것으로 思料되며 高强度, 高靱성에 추가되는 TMCP 鋼材의 또 다른 우수한 特性이라 할 수 있다.

또한 Fig. 5의 結果에 依하면 TMCP 鋼材와 normalized 鋼材 다 같이 熔接 熱影響部の 疲勞 破斷 壽命이 母材의 그것에 비해 짧게 나타남을 알 수 있다. 一般적으로 板材試驗片을 이용하여 疲勞균열 傳播試驗을 行한 結果에 依하면 熔接 熱影響部の 疲勞균열 전파속도가 母材의 경우에 比하여 낮게 나타나고 있다.<sup>6,7)</sup> 따라서 本實驗 結果와 相反된 현상을 보이나, 이것은 板材實驗의 경우 균열 先端에서 熔接에 의한 압축 殘留應力이 作用하나, 本實驗의 경우는 試驗片 크기가 작기 때문에 熔接 殘留應力 효과는 나타나지 않고 단지 熔接 熱사이클 효과에 의한 組織變化만이 수반되기 때문인 것으로 思料된다.

### 3.3 TMCP鋼 熔接部の 疲勞 特性에 미치는 擴散性 水素의 影響

Fig. 6은 TMCP 鋼材에 대해 水素함량을 熔着 金屬 100gr當 5.2cc와 24.6cc로 制御하여 疲勞 試驗을 行하였을 때 應力과 破斷까지의 壽命과

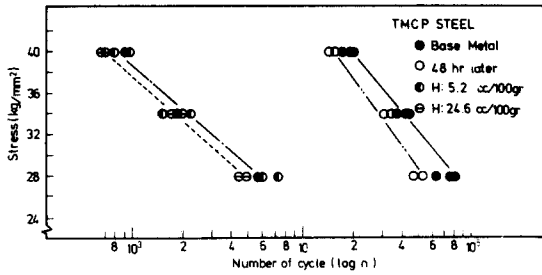


Fig. 6. Cyclic stress vs. number of cycle results with the change of diffusible hydrogen quantities in TMCP steel. (loading rate: 170cpm, A symbol H, stands for the diffusible hydrogen quantities existing in welds per weld metal 100gr.)

의 關係를 나타낸 것이다. 이 結果에 依하면 熔接 熱影響部의 疲勞破斷 壽命은 擴散性 水素에 의해 크게 減縮된다는 事實을 알 수 있다. 그리고 本 實驗 범위內의 水素含量 變化에 따라서는 疲勞破斷 壽命이 크게 影響을 받지 않는다는 것 을 알 수 있다.

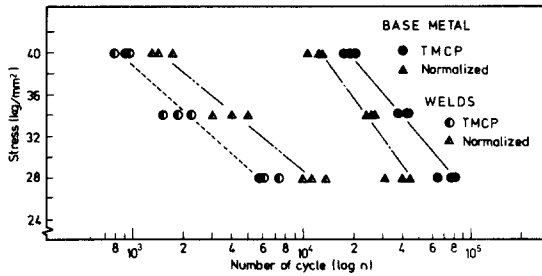
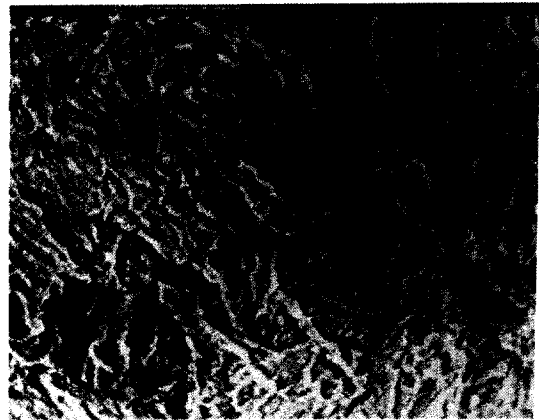


Fig. 7. Cyclic stress vs. number of cycle result of base metals and welds. (loading rate: 170cpm, diffusible hydrogen quantities: 5.2cc/100gr.)

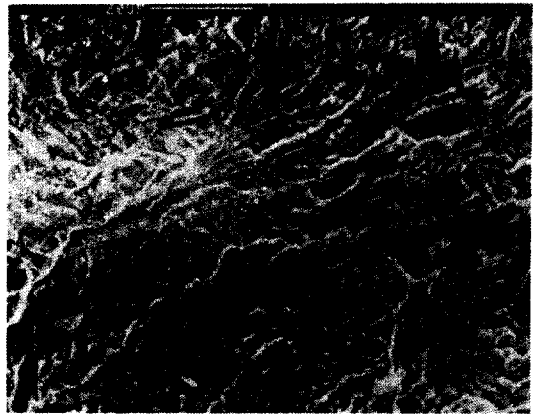
Fig. 7은 TMCP 鋼材와 normalized 鋼材에 대해 水素含量 5.2cc/100gr으로 하여 疲勞試驗을 行하였을 경우의 S-N曲線을 나타낸 것이다. 母材의 경우에 있어서 一定應力에서의 破斷壽命은 TMCP 鋼材의 경우가 더 길게 나타나 있으나 水素含量이 5.2cc/100gr 存在하였을 경우의 熔接 熱影響部에서는 TMCP 鋼材의 경우가 疲勞破斷 壽命이 짧게 나타나 있음을 보이고 있다. 이것은 TMCP 鋼材의 경우에는 未再結晶 領域에서 최종압연 과정을 거치게 되기 때문에 그 熔接 熱影響部에 水素가 集積할 수 있는 轉立場이 normalized 鋼材에 비해 많게 되기 때문인 것

로 思料된다.<sup>8)</sup>

Photo. 2는 TMCP 鋼材에 대해 熔接部の 殘留 擴散性 水素量이 5.2cc/100gr과 24.6cc/100gr인 조건에서 疲勞破斷시킨 破斷面의 주사형 전자 현미경 사진으로 破斷面上에는 水素에 의한 疑壁開 破面(quasi-cleavage fracture surface)과 스트라이에이션(striation)이 混在된 상태로 나타나 있음을 알 수 있다. 따라서 水素가 內在된 조건에서 疲勞試驗을 行할 경우 이와 같이 水素에 의한 疑壁開 破壞기구에 의해 均열進展이 촉진되기 때문에 Fig. 6, Fig. 7에서와 같이 疲勞破斷 壽命이 減縮되고 있음을 알 수 있다. 또한 擴散性水素量의 變化에 의한 疑壁開 破面과 스트라이에이션의 混在 비율은 거의 差異가 나타나지 않음을 보이고 있다.



H: 5.2cc/100gr



H: 24.6cc/100gr

Photo. 2. Fatigue fractographs of TMCP steel weldment including diffusible hydrogen.

#### 4. 結 論

強度나 靱性面에서 기존의 normalized 鋼材에 비해 비교적 우수한 TMCP 鋼材에 대해, 擴散性 水素를 內在시킨 熔接 熱影響部를 再現한 動的 임플란트 試驗法을 통해 熔接 熱影響部의 疲勞 試驗을 實施한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. TMCP 鋼 熔接 熱影響部에는 normalized 鋼材에 비해 더욱 미세한 等軸晶의 페라이트 組織이 나타난다.

2. TMCP 鋼材의 母材 및 擴散性 水素를 충분히 제거한 熔接 熱影響部에 있어서의 疲勞特性은 normalized 鋼材의 경우에 비하여 우수하다.

3. 擴散性 水素를 內在한 熔接 熱影響部에 있어서는 TMCP 鋼材의 경우가 normalized 鋼材의 경우보다 그 疲勞破斷 壽命이 짧게 나타난다.

4. 擴散性 水素가 內在된 TMCP 鋼 熔接部の 疲勞破面은 疑壁開 破面과 스트라이에이션이 混在된 상태로 나타난다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 日本鐵鋼協會, 鐵鋼技術의 進歩, 鐵と鋼, Vol. 71, No. 3, p. 567(1985).
- 2) 김희진, TMCP 강 의 개발 및 적용, 大韓熔接學會誌, Vol. 4, No.2, p.2(1986).
- 3) H. Granjon, The Implant Method for Studying the Weldability of High Strength Steels, Metal Const. Vol. 1, p.509(1969).
- 4) 松井, 大熊, インプラント試驗の原理と溶接割れへの應用, 日本溶接學會誌, Vol. 44, No.9, p.18(1957).
- 5) 金永植, 具滋永, 高張力鋼 아크 용접본드부의 疲勞特性에 미치는 擴散性 水素의 영향에 관한 研究, 大韓機械學會 論文集, Vol. 10, No. 6, p.830(1986).
- 6) S.J. Maddox, Assessing the Significance of Flaws in Welds Subject to Fatigue, Welding Journal, Vol. 53, No.9(1974).
- 7) Rolfe, Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice-Hall, Inc. p.253 (1981).
- 8) 日本溶接學會, 鐵鋼溶接部の破面寫眞集, 黒木出版p.70(1982).