

# 造船用 鋼 材의 特性

金 商 周  
 〈서울大學校 教授〉

## 〈目 次〉

1. 序 論
2. 造船用 鋼材의 種類
3. 軟鋼의 特性
4. 高張力鋼의 特性
5. 맺음말

### 1. 序 論

船舶은 일반적으로 人員과 物資를 運送하는 것을 主目的으로 建造되므로 造船用 材料는 船舶의 用途와 각 구조요소마다 다른 사용환경과 外力 등을 고려하여 그 상황에 가장 알맞는 材料를 선택하는 것이 선박 建造에 있어서의 經濟性和 建造된 船舶의 安全性을 보장하는데 필수적이다. 造船 材料의 선택시에 고려해야 할 因子들을 표-1에 제시 하였다.

造船業이 값싼 노동력에 의한 단순한 기술의 조립형 船舶建造에서 技術集約의이고 부가가치가 높은 船舶의 建造로 전환되어 감에 따라 海洋探査船, 高速輸送船, 自動化船, 軍艦, 潛水艇 등의 特殊 目的船의 設計 및 建造技術의 확보가 필요하다. 이러한 船舶들은 使用環境 變化에 대한 適應力이 필요하기 때문에 用途에 따라 材料의 物性要求值가 엄격하여 경제성과 신뢰성을 동시에 만족하는 材料를 選定하는 것은

필수적이다. 또 液化天然가스, 化學物質, 放

### Table 1. Considerations Entering into Material Selection

Physical/Chemical Properties	Chemical Composition, Density Damping Characteristics, Thermal Conductivity Electrical Conductivity, Magnetic Permeability
Mechanical Properties	Yield Strength, Tensile Strength Modulus of Elasticity, Modulus of Rigidity Poisson's Ratio, Fatigue Strength Creep Resistance, Notch Toughness Abrasion Resistance
Susceptibility to Degradation	General Corrosion, Pitting Corrosion Crevice Corrosion, Galvanic Corrosion Stress Corrosion, Cavitation Corrosion Hydrpgen Embrittlement
Ease of Fabrication	Weldability, Machinability, Repairability
Miscellaneous Trade-Off Considerations	Material Cost, Weight to Strength Ratio Availability of Material Labor Cost, Availability of Skilled Labor Special Maintenance Requirements

射性 元素 等 새로운 貨物의 出現과 海洋環境 問題에 대한 關心 增大에 따른 船舶 安全性의 강화에 대응할 수 있는 재료는 각 船舶에 따라 運用環境에 적합하도록 선정하여야만 한다. 결국 조선용 재료의 선택은 經濟性 뿐만 아니라 船舶의 성능 等 여러 影響을 考慮해 결정하는 광범위한 문제이다.

일반적인 商用船舶의 경우에는 각 船級協會의 規定에 따라 使用材料를 선택하면 되지만 새로운 使用環境 즉 高溫이나 極低溫, 酸化性 霧圍氣 等에 맞도록 開發되어온 材料나 위에 언급한 특수 목적선용 材料 등은 실제 환경에서 사용된 역사가 짧아 材料의 長期 信賴性에 대한 資料蓄積이 이루어지지 않아서 船級協會의 規定에도 실려 있지 않은 경우가 많다. 그러므로 材料 工學의 發展에 따라 새로 개발된 素材나 알려진 성질은 우수하지만 사용 實績이 많지 않은 소재를 造船用으로 利用하려면 그 소재의 특성을 잘 파악하고 있어야 最善의 적용이 가능하므로 본 解說에서는 船舶設計者들이 새로운 材料를 이해하는데 필요한 금속학적 지식을 記述하고자 한다.

## 2. 造船用 鋼材의 種類

造船用 鋼材는 선급협회에 따라 조금씩 분류법이 다르지만 대개 壓延 鋼材, 鑄造品 및 鍛造品, 鋼管 等으로 크게 나뉘어지며 다시 船體 橫造用 鋼材, 보일러 및 壓力容器用 鋼材, 低溫用 鋼材, 스테인리스 鋼材, 기타 機械類 및 部品類, 艤裝品 等に 쓰이는 鋼材로 세분된다. 鋼管은 熱交換器用 및 壓力 配管用, 低溫用, 헤더용, 스테인리스 강관으로 구분되며 이음매 없는 것과 용접된 것으로 구분하기도 한다. 低溫用 材料는 주로 液化가스 運搬船의 탱크나 그 주위의 船體構造 혹은 低溫 露出 場所에 사용되는데 炭素, Si, Mn을 主成分으로 한 軟鋼이나 더 낮은 온도(-70°C 이하)에서 사용하는 것은 Ni을 2~9% 첨가한 합금鋼이 사용된다. 低溫用 탱크나 耐蝕性容器로 쓰는 스테인리스 鋼材는 주로 Ni, Cr을 主合金元素로 한 오스테나이트系 스테인리스鋼을 사용한다.

저온용 재료와 스테인리스 재료를 제외한 나머지는 거의가 필요 強度에 따라 탄소 함량과 Mn함량을 調節한 軟鋼이나 Cu, Cr, Mo, Ni 等

Table 2. Various Steel Grades for Ship and other Structural Applications

	등급(Grade)	탈 산 방법	열 처 리	항복강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	충격 시험치	
						(°C)	(J)
연 강	A	SK or K	-	24이상	41~50	-	27
	B	SK or K	-				
	C	K and FG	N or CR			-10	
	D	K and FG	N or CR			-40	
고장력강(1)	RA32	SK or K	N or CR	32이상	48~60	0	31
	RD32	K and FG	N or CR			-20	31
	RE32	K and FG	N or CR			-40	31
	RA36	SK or K	N or CR	36이상	50~63	0	34
	RD36	K and FG	N or CR			-20	34
	RE36	K and FG	N or CR			-40	34
조질고장력강	RA46	K and FG	Q and T	46이상	60~71.5	0	47
	RD46	K and FG	Q and T			-20	47
	RE46	K and FG	Q and T			-40	47

(1) : 한국선급의 분류기호를 따랐음, Lloyd 규정에는 항복강도 34kgf/mm<sup>2</sup>급의 고장력강도 있음

SK : semi killed, K : killed, FG : fine grain treated,

N : Normalizing, CR : Controlled Rolled, Q : Quenching, T : Tempering

을 少量含有한 低合金鋼을 사용하며 高強度가 필요한 곳에는 高張力鋼이 사용된다. 따라서 본 解說에서는 船體用 및 기타 構造用으로 가장 많이 사용되는 탄소강이나 소량의 합금원소를 첨가한 低合金鋼과 그보다 높은 강도를 가진 高張力鋼(higher tensile steel : HT steel)을 중심으로 그 종류와 특성을 살펴본다.

보통 船級協會(Ship Classification Societies)에서 船體構造用 鋼材(Hull structural steel)로 규정하고 있는 鋼材들은 引張強度가 41~50kgf/mm<sup>2</sup>급인 軟鋼과 引張強度가 50kgf/mm<sup>2</sup> 이상인 高張力鋼으로 크게 구별되며 이중 高張力鋼은 降伏強度에 따라 32kgf/mm<sup>2</sup>급과 36kgf/mm<sup>2</sup>급으로 나눈다. 선급협회에 따라서는 34kgf/mm<sup>2</sup>급의 高張力鋼이나 46kgf/mm<sup>2</sup>급의 調質高張力鋼을 포함시키기도 한다. 또한 船體構造用 鋼材들은 衝擊韌性 요구치에 따라 보다 細分되는데 軟鋼은 A, B, D, E급으로 高張力鋼은 A, D, E급으로 區分된다. 표-2는 이와같은 분류방법에 따라 표시된 각 鋼材의 종류와 특성을 나타낸 것이다.

### 3. 軟鋼(mild steel)의 特性

船體 構造用 鋼材는 탄소를 0.2% 정도 품고 Mn을 소량 배합한 보통강의 壓延鋼材이며 引張強度 40~50kgf/mm<sup>2</sup>급 정도의 軟鋼이다. 이 鋼材에는 형상이나 용도에 따라서 많은 종류가 있으며 품질면에서도 림드(rimmed)강으로부터 킬드(killed)강에 이르기까지 여러 等級의 것이 사용되고 있다. 강의 韌性(toughness)은 塑性加工 및 熱處理에 의해 개선할 수가 있는데 이때 그효과에 크게 영향을 미치는 것이 炭素含量이다. 탄소함량에 의해 정해지는 성질은 合金元素의 첨가에 의해서도 그대로 繼承되므로 먼저 탄소강의 특성을 파악한 후에 이들에 첨가되는 合金元素의 효과를 이해하는 것이 合金鋼의 성질을 體系의으로 파악할 수 있다고 하겠다.

#### 3.1 炭素鋼의 性質

炭素鋼의 性質은 그 性分과 熱處理 및 加工

狀態에 따라 크게 달라지나 표준상태에서는 탄소량의 증가에 따라 彈性係數, 比重, 팽창係數, 열전도도는 감소하고 比熱, 電氣抵抗은 증가한다. 탄소강의 기계적 성질은 탄소량의 증대에 따라(1% C까지) 硬度和 引張強度는 거의 직선적으로 증가하나 延伸率 및 衝擊値는 감소한다.

온도가 높아짐에 따라 탄소강의 탄성계수, 탄성한계, 항복점 등은 감소하며 引張強度는 200~300℃까지는 증가하지만 더 높은 온도에서는 감소하며 연신율은 引張強度와 반대의 현상을 보인다.

온도가 0℃ 以下の 低溫으로 내려감에 따라서 항복점, 인장강도, 경도, 피로한도, 탄성계수, 열전도도, 전기전도도는 증가하고 연신율, 단면수축율, 충격값, 열팽창 계수, 비열은 감소한다. 탄소강의 低溫 脆性은 P, S의 함유량이 높을수록 현저하며 특히 O<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>의 함량이 높을 때는 低溫 脆性이 현저하고 延性-脆性 遷移溫度가 높아지게 된다.

Mn은 脫酸劑로 첨가되며 특히 低炭素鋼에서는 低溫脆性의 천이온도를 低下시키므로 Mn함유량을 높이는 것이 좋다. 그러므로 延性-脆性 천이온도가 특별히 낮은 것이 요구되는 船體 外板用에는 Mn함량을 높이고 Al에 의해 강제탈산을 한 킬드鋼을 사용한다.

炭素鋼에 Al을 첨가하면 탈산과 동시에 N을 AlN으로 固定시키고 結晶粒을 微細화 시켜 저온취성의 천이온도를 저하시킨다. 따라서 킬드강이 림드강보다 저온취성에 대한 천이온도가 낮다.

熔接은 일반적으로 疲勞強度를 저하시키고 용접부의 내부결함이나 비금속재물은 應力集中의 원인이 되며 동시에 열의 영향을 받은 부분이 硬化되어 노치 敏感性을 증가시킨다.

탄소량이 높으면 용접시 열영향으로 열을 받은 열 영향 부분에 퀀칭경화 현상으로 취약해지고 용접적업도 힘들게 된다. 低炭素鋼은 용접시의 열영향에 의한 경화가 적기 때문에 충분히 탈가스가 되고 不純物이 적은 低炭素鋼일수록 용접성이 良好하다.

### 3.2 合金元素의 影響

탄소강 중에 존재하는 원소중 중요한 공통원소인 Mn, Si, S, P 등이다.

#### 1) Mn의 영향

Mn은 페라이트에 固溶되고 일부는 S와 結合하여 MnS로 존재한다. 強度와 硬化能을 증가시키며 韌性を 改善한다.

#### 2) Si

주로 脫酸劑로 첨가되어 페라이트에 고용해서 경도, 탄성한계, 引張強度를 높이고 연신 및 충격치를 감소시킨다. 低炭素鋼에서는 冷間加工性を 해친다.

#### 3) P

低炭素鋼의 경도와 강도는 다소 증가시키고 切削性を 개선시키기도 하지만 연신이 줄고 常溫脆성이 일어나므로 충격값을 저하시킨다.

#### 4) S

MnS로 존재하지 않으면 FeS를 形成하여 주로 粒界에 분포되어 강도, 연신, 충격값을 감소시킨다. FeS는 融點이 낮으므로 高溫에서 脆성을 일으키기 쉽다.

## 4. 高張力鋼의 特性

2次 大戰 후 製造成術의 進歩와 使用者 측의 설계면에서의 合理化와 요청에 따라 이러한 鋼材 構造材料에 대하여 더욱 강하고 安全性, 加工性 등이 우수한 製成의 연구개발되어 이른바 高張力鋼이 발달하게 되었다. 高張力鋼의 용도는 토목, 건축, 조선, 화학설비, 압력용기, 압력관, 각종 산업기계, 차량 등 많은 분야에 걸쳐서 관재, 관재, 봉재 등의 모양으로 사용되고 있으나 그 대부분은 용접구조용이다.

高張力鋼이란 引張強度(50kgf/mm<sup>2</sup> 이상), 降伏強度(32kgf/mm<sup>2</sup> 이상), 인성, 용접성 등의 부가 가치를 종래의 鋼보다 높은 鋼이라 말할 수 있다. 이 高張力鋼은 크게 非調質型과 調質型으로 나눈다.

#### 1) 非調質型 高張力鋼

열간壓延한 그대로 또는 노르말라이징(normalizing) 혹은 노르말라이징한 후 템퍼링(tempering)하여 만든 것이며 특수한 것을 제

외하면 引張強度 70kgf/mm<sup>2</sup> 이하이고 Si-Mn을 主體로 한 것(HT 50급)이 가장 많이 쓰인다. 이 鋼은 열처리 工程이 적어 생산량이 많고 값이 싸며 降伏比가 낮고 加工성이 좋은 점 등의 長點은 있으나 강도를 높이기 위해서는 많은 合金元素가 필요하거나 탄소량이 높아져서 용접성이 나빠지는 短點이 있다.

#### 2) 調質型 高張力鋼

퀵칭, 템퍼링 등의 調質處理를 하여 강도를 높인 鋼이며 Si-Mn계의 HT 50을 퀵칭, 템퍼링한 60kgf/mm<sup>2</sup> 급으로부터 多種少量의 合金元素를 첨가한 HT 80 혹은 HT 100급까지의 高張力鋼이 실용화되고 있다. 調質高張力鋼의 특징은 調質에 의하여 강도를 높일 수 있으므로 非調質鋼에 비하여 C量이나 合金元素를 낮게 할 수 있어 용접성이 좋고 微細한 組織이므로 韌性도 우수하다. 그러나 열처리에 큰 설비가 필요하고 工程數도 많아지며, 또한 열처리나 용접과 같은 工作이 자유롭지 않은 등의 문제점이 있다.

이상과 같이 非調質鋼과 調質鋼 사이에는 장단점이 있으나 실제 수요면에서는 예컨대 대형 pipe line용 강관, 열간가공을 필요로 하는 조선용 및 기타의 용도, 자동차 등에 요구되는 薄板의 高張力鋼 등의 새로운 수요가 非調質鋼의 개발연구에 새로운 자극을 주고 있다.

여기에서는 종래의 高張力鋼 製造成術로부터 새로운 制御壓延(controlled rolling) 기술을 포함한 非調質高張力鋼 개발의 기술적 動向에 대하여 기술하고자 한다.

### 4.1 非調質高張力鋼製造의 金屬學的 要因

非調質鋼의 상태에서 높은 강도와 韌性, 가공성을 구비한 高張力鋼을 만들기 위한 금속학적 요인들을 표-3에 나타내었다. 표-3의 각항에 대하여 더욱 구체적으로 製造成術을 설명한다.

#### 4.1.1 合金元素添加에 의한 軟鋼의 固溶強化

非調質高張力鋼의 개발과정에서 가장 오래된 방법이며 용접성을 고려하여 C, P 등에 의한 강화를 피하고 주로 置換形 固溶元素를 첨가하여 鋼을 강화하는 방법이다. 즉 鋼의 페라이트

-펄라이트 組織을 그대로 두고 값싼 合金원소인 Mn, Si등을 첨가하여 고용강화한다. Mn이나 Si는 탄산원소이므로 킬드 鋼으로 제조된다. Mn, Si 외에도 치환형 고용원소로서 Cu, Ni, Cr, Mo 등도 소량 첨가하여 강도를 60kgf/mm<sup>2</sup> 정도로 올리는 경우도 많다.

이와같은 置換形 合金元素에 의하여 鋼이 강화되는 이유로는 다음과 같은 요인들이 있다.

① 합금원소가 페라이트상(相)에 치환형으로 고용하여 기지(matrix)가 강화된다.

② 합금원소를 첨가함으로써 탄소량은 적어도, 펄라이트량이 많아져서 강화된다.

③ 합금원소(Mn, Ni, Cu, Cr)를 첨가하면 오스테나이트-페라이트변태점이 낮아져서 組織이 微細化되어 強度와 韌性이 향상된다.

이상과 같이 치환형 고용원소의 첨가로 강도와 인성이 다소 증가하기는 하나 이와 같은 非調質高張力鋼은 組織이 역시 페라이트-펄라이트이므로 合金性分의 효과가 충분히 발휘되지 못하고 따라서 강도에 비하여 합금성분이 높고 용접성도 不良한 결점이 있다. 또한 킬드鋼이므로 제품의 實收率이 낮고 이에 따라 값도 비싸지는 결점이 있다.

항복응력은 결정립 크기에 의존하며 펄라이트는 降伏強度에는 기여하지 않으므로 合金性分을 낮게 하여 降伏強度를 올리기 위해서는 펄라이트 대신에 석출물을 微細하게 分散시키고 결정립을 微細化하는 것이 중요하다.

Table 3. The strengthening mechanisms applied in HSLA steels

strengthening mechanisms :	1. grain refinement 2. precipitation 3. dislocation substructure 4. solid solution hardening 5. strain aging
their production can entail :	1. microalloying(alloying with small amounts of stong carbide and nitride-forming elements) 2. controlled rolling 3. controlled cooling 4. inclusion shape control

#### 4.1.2. 微量合金元素添加에 의한 結晶粒의 微細化

近來에 와서 非調質高張力鋼의 발전을 가져온 것은 페라이트 微粒化 處理와 炭窒化物에 의한 析出強化의 利用이다.

Al은 탈산제로서 첨가되나 또한 Al의 窒化物의 微量析出에 의한 결정립의 微細化에 의하여 강도와 인성을 개선할 수 있다. Al은 오스테나이트의 2次 再結晶抑制 효과가 있을 뿐만 아니라 AlN의 析出에 의하여 기지중의 N이 固定됨으로써 인성의 향상이 이루어진다.

한편 Nb, V, Ti 등의 炭窒化物形成 強化元素가 結晶粒 微細化에 이용되면서부터 非調質高張力鋼은 새로운 발전을 이루게 되었다. 이러한 원소는 보통 C, N과 같이 오스테나이트 중에 미량고용하거나 석출하며 이와같은 고용 또는 析出하는 탄질화물의 존재는 오스테나이트 結晶粒의 再結晶成長을 抑制하는 능력이 있다. 결정립미세화효과는 Al과 같으나 Nb, V는 미량이어도 좋고 탈산능력이 없으므로 세미-킬드鋼, 립드鋼의 量産도 가능한 점이 Al과 다르다. 실용상 Nb, V등의 탄질화물의 微粒效果는 뒤에 설명하는 制御壓延技術과 밀접한 관계가 있다.

#### 4.1.3. 微量 合金元素 添加에 의한 析出強化

위에서 말한 Nb, V, Ti 등의 鋼에의 固溶度는 溫度에 따라 다르며 高溫에서는 오스테나이트 중에 상당히 固溶된 것을 얻을 수 있으나 이것을 冷却하면 오스테나이트-페라이트 變態後 페라이트 中の 고용도가 극히 낮아지므로 過飽和狀態가 되어 連續 冷却 중에 微細析出 현상과 강화가 일어난다. 즉 Nb(C, N), VN, V<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 등이 페라이트 중에 2차원적 晶合 析出을 하게되며 析出의 초기 단계에서 정합변형에 의한 현저한 강화현상을 나타낸다. 그러나 晶合 析出의 효과가 큰 반면에 韌性의 低下로 顯著하다.

Cu를 페라이트구역의 고용한도 이상으로 첨가하여 고용강화 외에 析出강화의 효과를 얻을 수 있다. Cu의 時效強化 현상은 V중에 비하여 조절하기 쉬우며 현재도 강도를 60kgf/mm<sup>2</sup> 급 이상으로 올리는 수단으로 이용되고 있다.

#### 4.2. 制御壓延에 의한 強靱性

최근에는 非調質계 高張力鋼의 품질의 향상을 성분이나 제강기술에만 의존하지 않고 壓延作業條件에 따른 현저한 영향을 이용하게 되었다. 즉 制御壓延(controlled rolling)이라 하여 加熱條件, 壓延時의 壓下量과 溫度, 時間의 配置, 그 후의 冷却 等を 管理制御하여 금속학적 및 경제적으로 제품을 강인화하는 加工熱處理(thermomechanical treatment)를 이용한다.

制御壓延의 目的은 결정립을 微細化하여 事後熱處理 없이 熱間 壓延만으로 강도와 인성을 증진시키는데 있다. 制御壓延의 금속학적 의미는 강의 품질을 지배하는 合金性分, 熱處理, 加工 等を 종전과 같이 각각 독립하여 취급하는 것이 아니고 複合的으로 취급하여 이들의 相乘效果를 생산현장의 壓延作業에서 실현한 점에 있다.

최근의 制御壓延은 다음과 같은 工程으로 이루어진 전체기술을 의미한다.

##### ① 化學組成的의 適節한 選定

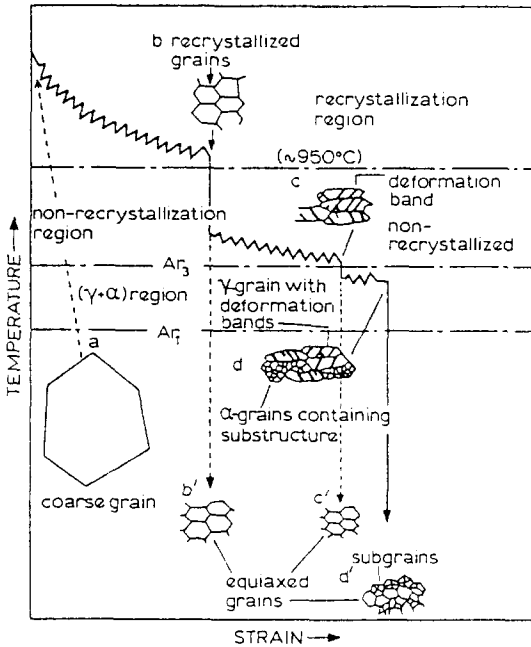


Fig.1 Schematic illustration of three stages of controlled rolling process and change in microstructure with deformation in each stage.

② 작고 均一한 오스테나이트 結晶粒을 얻기 위한 適當한 slab 加熱溫度 選擇

③ 오스테나이트 再結晶領域에서의 變形

④ Ar<sub>3</sub>(冷却時 오스테나이트→페라이트 變태 시작온도) 이상의 재결정 되지 않는 낮은 온도 영역에서의 변형

⑤ 오스테나이트-페라이트( $\gamma + \alpha$ ) 共存領域에서의 변형

⑥ 冷却速度 制御

그림 1은 위의 변형과정을 모식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 각 단계에서 상온까지 그대로 冷却한 경우이고 실선의 과정이 制御壓延 工程으로 최종압연온도가 높을수록 組織이 粗大함을 알 수 있다. 壓延은 보통 다음의 세단계로 구성된다. 먼저 재결정영역에서 壓延하여 재결정 粒子크기를 감소시킨다. 이어 재결정이 일어나지 않는 영역에서 壓延하여 오스테나이트 결정립에 변형띠가 생긴 組織이 생기며 오스테나이트-페라이트 공존영역에서의 최종 壓延으로 이 변형띠와 오스테나이트 結晶粒界에서 페라이트가 核生成하여 微細한 최종 組織이 얻어진다.

制御壓延技術과 結合하여 開發되어 온 高張力鋼 중 대표적인 몇가지를 다음에 소개한다.

#### 4.3. 페라이트-펄라이트 구조의 低合金 高張力鋼

대표적인 低合金 高張力 鋼材로 制御壓延을 이용하여 연연 상태에서 이組織을 얻을 수 있다.

페라이트-펄라이트 組織을 가진 低炭素鋼의 강화를 위한 要素는 표-3에 나타난 것과 같이 粒子크기의 微細化, 固溶強化, C나 N에 의한 分散強化, 펄라이트의 量이다. 粒子크기가 微細하면 항복점을 增加시키고 충격저항을 改善시킨다. 고용경화는 주된 강화요소는 아니고 오히려 충격저항에 대한 逆效果를 가져온다. 分散強化도 항복점을 높이지만 충격저항의 감소를 가져오고 펄라이트의 양은 引張強度에 주된 영향을 주나 항복강도에의 영향은 無視할 수 있다.

탄소량을 증가시키면 펄라이트 양이 증가하여 충격에너지와 항복강도를 감소시키며 펄라이트의 탄소두께와 콜로니(colony) 크기는 강

도와 천이온도에 크게 영향을 미친다. 페라이트 粒子를 微細化 시키는 것이 중요하므로 舊 오스테나이트(prior austenite) 粒子크기를 微細화하고 制御壓延 技術을 사용한다. 또 合金 元素를 첨가하여 變태온도를 저하시켜 粒子를 微細化 하는데 變태온도 감소는 페라이트에서 轉位密度를 증가시키며, 降伏強度와 충격천이온도의 증가를 나타내게 한다.

熔接性은 熱影響部(Heat Affected Zone)에서의 마르텐사이트 시작 온도(Ms)와 마르텐사이트 경도에 영향을 받는데 너무 낮은 Ms온도와 너무 높은 경도는 용접성을 해친다.

탄소는 延性を 낮추고 加工硬化 速度를 증가시키므로 가공성을 해치며 非金屬 介在物인 S도 가능한한 낮게 해야 용접시의 파열등을 방지할 수 있다. C, P등은 강화 효과는 있으나 용접성을 나쁘게 하므로 Mn을 첨가하여 鋼을 강화시킨다. 즉 페라이트-펄라이트組織은 그대로 두고 Mn을 첨가하여 고용 경화시킨다. 특히 0.15~0.2% C, 1.2~1.4% Mn을 포함한 鋼은 強度와 韌성이 좋고 좋은 強化機構를 갖는다. 탄소함량을 줄이는 것은 인성, 용접성, 가공성에서 좋고, 鋼의 성질은 變태온도에 많은 영향을 받으므로 C, Mn량을 조절한다. Mn을 첨가하면 結晶粒子 크기가 微細해져 강화되며, 충격천이 온도에 영향을 주지 않고 항복응력을 올리는 고용경화 효과를 갖는다. Cu는 析出硬化를 增進시키므로 有用하다.

보통 制御壓延에 있어서 가장 작은 재결정 오스테나이트粒子 크기를 얻기위해 마지막 制御壓延온도에 적합한 양의 변형을 해야한다. 만약 마지막 制御壓延 온도를 낮게하고 강한 制御壓延 變形을 가하면 오스테나이트가 재결정되지 않았어도 微細 페라이트粒子가 얻어진다.

#### 4.4. 板材 性質 改善에의 制御壓延 適用

해양 구조물, 조선용 강재, 파이프 라인 등에 적용하기 위한 판재로 高強度, 高韌성과 좋은 용접성이 요구된다. 특히 極地方에서 사용하기 위한 鋼材는 높은 충격 흡수 에너지와 낮은 延性-脆性 천이온도가 필요하므로 이런 要求를 滿足시키기 위한 접근 방법으로 다음과 같은

組織을 설계하게 되었다.

1) 低炭素 펄라이트 減少鋼, 針狀페라이트鋼 非調質高張力鋼의 용접성, 가공성을 좋게 하기 위하여 탄소량을 낮게하여 펄라이트량을 적게 한 펄라이트 감소강(pearlite reduced steel) 혹은 펄라이트 排除鋼(pearlite free steel)이 연구 개발되고 있으며 여기에 강도의 저하를 보충하기 위하여 Nb, V에 의한 析出強化와 制御壓延技術에 의한 微粒強化가 적극적으로 이용되고 있다. 低炭素 含量과 制御壓延 그리고 오스테나이트 微細化 元素 첨가의 組合으로 펄라이트가 감소된 多角形 페라이트鋼이 만들어진 다. 이러한 鋼組織은 주로 低炭素 中Mn, 低Mo 鋼에서 볼 수 있다.

#### 2) 低炭素 베이나이트鋼

퀀칭-템퍼링강인 低炭素 高 Mn강은 퀀칭에 의해 針狀 페라이트구조가 생기고 템퍼링에 의해 좋은 강도를 나타낸다. 이 鋼材는 微量 合金化에 의해 결정립이 미세화되고 Nb, V의 分散強化가 일어나나 템퍼링으로 탄화물이 생기면 韌성이 감소하여 좋지 않다. 또 이 강은 퀀칭-템퍼링 설비 비용, 탄소감소에 의한 合金 함량의 증가 등의 經濟的인 問題도 있다.

위와같은 短點을 克服하고, 空氣中 冷却으로 베이나이트 구조를 형성시킴으로써 적은 탄소량과 탄소當量에 따른 좋은 熔接性和 成形성을 가지면서 部品크기에 따른 성질변화가 작은 引張強度 60~120kgf/mm<sup>2</sup>級の 鋼을 제조하는 것이 低炭素 베이나이트강의 개발목적이다. 또한 강도를 유지하면서 충격인성이 높아야 하므로 多角形 페라이트로의 變태가 지연되어 충분히 베이나이트變태가 일어나고 마르텐사이트강화 없이 넓은 冷却速度 범위에서 베이나이트가 형성되어야 원하는 微細組織을 얻을 수 있다.

최근에는 低炭素 함량으로 충격성질을 개선할 수 있는 針狀 베이나이트 구조에 관한 연구가 활발하며 적절한 合金元素들의 組合과 壓延 溫度로 결정립을 微細化하고 析出強化된 베이 나이트구조를 만들려고 하고 있다.

#### 4.5. TMCP 鋼

制御壓延 후 판재를 加速 冷却시키면 저온脆

性的減退없이 강도가 증가한다는 제안은 진작 있었으나 대량생산되는 鋼에서는 품질의 안정성과 균일성이 요구되기 때문에 실제 생산라인에 加速冷却이 실용화된 것은 1980년대 초에 일본에서 처음 OLAC라는 이름으로 TMCP鋼이 생산되고 부터이다. 國內에서도 이 TMCP강이 浦項製鐵에서 개발 생산되고 있어 조선용 鋼材로써 기존 高張力鋼의 代替材로서 사용이 漸增하고 있다.

TMCP란 Thermo-Mechanical Controlled Process의 略字로서 노르말라이징 등의 열처리에 相應하는 기계적 성질을 후속 열처리 工程 없이 壓延 상태에서 얻고자 개발된 일종의 制御壓延工程이다. 그림-2는 페라이트 粒子微細化 기구를 도식적으로 나타낸 것이다. 오스테나이트 재결정온도 아래에서의 변형은 오스테나이트 조직의 불균일성 즉 유효 결정립계, 변형띠 등을 증가시키므로 페라이트의 불균일 核生成자리가 많아진다. 오스테나이트-페라이트 변태시작 온도는 微細合金화와 加速冷却에 의해 낮아지고 이와 아울러 加速冷却과 制御壓延에 의해서 페라이트가 오스테나이트내에서 核生成할 수 있는 자리는 많아지므로 페라이트 核이 많이 발생하게 된다. 변태온도가 낮아지거나 페라이트 핵생성이 많아짐에 의해 페라이트 成長速度가 減少하게 되므로 페라이트는 微細하게 된다.

따라서 加速冷却을 制御壓延工程에 적용하면 오스테나이트-페라이트 변태온도가 낮아지고 변형이 적어도 핵생성자리가 많아지므로 페라이트 결정립 미세화 효과가 좋다.

그림-3에 TMCP鋼 제조工程을 도식적으로 나타내었다. 그림-3에서 보면 조업변수는 加速冷却 始作溫度( $T_s$ ), 冷却速度, 加速冷却 終了溫度( $T_f$ ) 등이 있다.  $T_s$ 는  $Ar_3$ 보다는 높아야

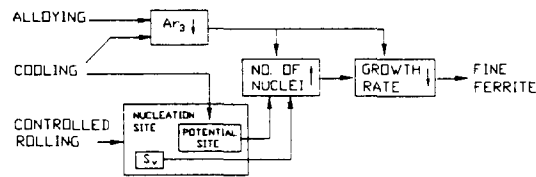


Fig.2 Schematic diagram to illustrate various mechanism of ferrite grain refinement.  $S_v$ : effective grain boundary area per unit volume.

加速冷却 效果가 높다고 한다. 그러므로 최종 압연을  $Ar_3$ 보다 낮은 온도에서 하는 강화 에어 압연(intensified controlled rolling : ICR)과는 兩立할 수 없다.

冷却速度는 合金系에 따라 달라지는데 延性-脆性遷移溫度(DBTT)를 해치지 않고 최대 강도를 얻을 수 있고 동시에 冷却 速度의 차이로 생기는 두께 방향의 성질변화가 최소인 最適條件을 찾아 조업한다. 보통 冷却速度가 증가함에 따라 페라이트 결정립크기는 감소하고 베이나이트 組織 分率이 커지며 降伏強度와 引張強度도 증가한다. 원하는 微細組織과 성질을 얻기 위한 최적 냉각속도는 대개  $5 \sim 15^\circ C/sec$  정도이다.  $T_f$ 는  $450^\circ C$  이하이면 저온변태생물이 많아져 강도는 증가해도 延性-脆性 천이온도를 해치게 되므로 실제 조업에서는  $500^\circ C$  이상으로 한다. 또한 그림에서 펄라이트 배제강(pearlite free steel : PFS)과 같은 低炭素鋼에서는 냉각속도와  $T_f$ 의 제한이 어느정도 완화됨을 알 수 있다.

低炭素 베이나이트鋼이나 변태강화강에 加速冷却을 적용하여 성질을 개선할 수 있는데 이로는 베이나이트 경화와 다각형 페라이트 생성 억제, 다른 방법으로 제조된 강에 비해 같은 정도의 강도에서 상대적으로 작은 탄소당량을 들 수 있다. 따라서 制御壓延과 加速冷却으로 제조되는 TMCP강은 합금비용의 감소, 기계적 성질의 증대, 탄소당량의 감소 등의 잇점 때문에 조선용 鋼材로도 그 수요가 늘어나고

기존의 鋼材는 주로 合金원소의 첨가로 강도를 증가시키므로 고강도강일수록 合金원소의 첨가량이 많아져 탄소당량이 높아지므로 용접

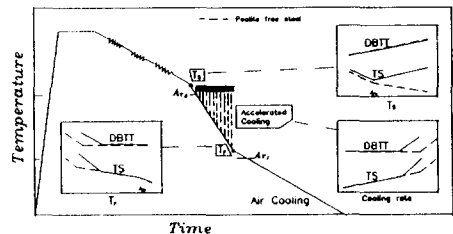


Fig.3 Schematic representation of the effect of processing variables in accelerated cooling. DBTT : ductile to brittle transition temperature, TS : tensile strength



Table 4. Representative range of Carbon Equivalent of 50kgf/mm<sup>2</sup> tensile strength grade plates according to processing routes

Processing route	CE(IIW)*
Normalizing	0.38~0.42
Controlled Rolling	0.34~0.38
Accelerated Cooling(TMCP)	0.30~0.36

$$* : CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cu+Ni)}{15} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5}$$

성이 떨어지게 된다. 그러나 TMCP鋼은 강도上昇이 加速冷却으로 야기되는 基地組織의 強化로 일어나므로 鋼材의 강도는 加速冷却과정의 冷却속도에 크게 의존한다. 따라서 合金원소 첨가가 적은 鋼材이더라도 加速冷却工程으로 높은 강도를 얻을 수 있기 때문에 고강도이면서 탄소당량이 낮은 鋼材의 생산이 가능하다. 50kgf/mm<sup>2</sup>급 高張力鋼의 경우 製造工程에 따라 탄소당량을 비교하면 표-4와 같다. 작은 탄소 당량을 갖는 鋼材는 硬化能이 감소하므로 적은 熱入力 용접으로도 冷間龜裂의 발생을 일으키지 않으므로 豫熱없는 용접작업을 가능하게 한다. 또한 큰 入熱 용접시에도 결정립이 조대화된 열 영향부(HAZ)의 인성이 개선된다. TMCP 鋼은 2次 相의 형태가 기존 高張力鋼의 취약한 띠모양으로 분포된 펄라이트에서 組織內에 균일하게 분포된 베이나이트 組織으로 바뀌어 延性이 좋아지고 충격흡수에너지가 높아진다. 또한 加速 冷却工程으로 제조한 鋼은 같은 炭素 當量일 때 기존의 高張力鋼보다 降伏強度가 높고 비슷한 引張強度에서는 延性-脆性 천이온도가 더 낮다.

## 5. 맺음말

以上에서 살펴본 바와 같이 鐵鋼工業의 發展에 따라 高強度 高品質의 鋼材가 계속 開發되고 있으므로 造船用 鋼材는 材料費, 加工費 및 強도와 重量比 등을 고려하여 가장 좋은 材料를 선택하여야 한다. 高張力鋼을 사용할 경우는 船體所要 鋼材量의 減少, 船體中量減少에 따른 運用費用의 節減, 載貨重量의 增大 등의 利點이 있는 反面 鋼材價格이 비싸고 熔接 시 公관리가 까다로우며, 판두께가 얇아지게 되어

腐蝕 및 좌굴(buckling)강도에 대한 고려가 필요한 등의 短點도 있다.

실제로 船舶建造에 적용되는 主鋼材는 時代的 要求 및 設計能力에 따라 변화되어 왔다. 석유과동 이후 선박의 輕量化로 燃料費를 節減하려는 시도에서 비롯된 高張力鋼의 사용은 軟鋼에 비해 점차 그 비율이 늘어 1988년에는 國內 造船 4社의 全體 使用 鋼材의 55%에 이르고 있다. 이러한 고장력강 사용 추세는 선박의 輕量化를 위해 계속될 것으로 예상되며 장차 降伏強度가 더 높은 鋼材의 要求가 커지면 從來의 高張力鋼은 強度增加에 相應하는 炭素 當量의 증가로 인한 生産性 減少를 克服하기 위해 점차 TMCP강으로 代替되어 가리라고 생각된다.

조선용 강재를 선박의 사용목적에 맞도록 선택하는 일은 강재 특성에 대한 情報 缺이는 不可能한 일이고 또 最近에 開發된 鋼들은 船級協會의 規定制定과 技術的 評價조차 未洽하므로 鋼材 生産者와 使用者는 보다 많은 研究와 檢討를 상호 보완적으로 수행하여 만들어진 선박의 성능대 가격 比를 높이는 데 主力해야 할 것이다.

## 參 考 文 獻

1. 韓國 船級; 船級 및 鋼船 規則, 1987
2. American Bureau of Shipping; Steel Vessels: Rules for Building and Classing, 1988
3. Lloyd's Register of Shipping; Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, 1984
4. 梁勳永, 金水泳; 金屬材料學, 文運堂, 1975
5. 大韓金屬學會; 鐵鋼材料, 탐출판사, 1981
6. W.C.Leslie; The Physical Metallurgy of Steels, McGraw Hill Co., 1982. 192
7. F.B.Pickering; Proceedings Microalloying 75, Union Carbide Corp., New York, 1977
8. T. Tanaka; International Metals Review, No.4(1981), p.185
9. I. Kozasu; Nippon Kokan Technical Report, 1985, p.15
10. 김희진; 技術現代, Vol.9(1989) No.2, p.2