

경두 열처리 레일의 제조공정과 장래의 전망

Manufacturing Process and Future Prospects of Head Hardened Heat-treated Rails

정우현*

Chung, Woo-Hyun,

이정민**

Lee, Jeung-Min,

김창희***

Kim, Chang-Hoe

ABSTRACT

The manufacturing processes of the head hardened rails and the principles of the heat treatment for carbon steels are introduced in this paper. To get the good wear resistance of the rail, many kinds of microstructure had been developed for the rail head hardening.

One of these is the tempered martensitic structure, which is very hard but brittle because of Quenching-Tempering Process. Another is the fine pearlitic structure by Slack Quenching.

Now Bainitic structure steels are emerging as a potential new material to replace eutectoid pearlitic steels for rail. The main reason of this change is due to the limitation of pearlitic microstructure with regard to mechanical properties and wear resistances of railway rails.

1. 서론

일반적으로 강(Steel)이란 철(Fe)과 탄소(C)와의 합금으로서, 레일강은 철(Fe)을 주성분으로 소량의 탄소(C), 규소(Si), 망간(Mn), 인(P), 황(S) 및 기타의 미량 원소로 구성되어 있으며, 열처리시 중요한 역할을 하는 탄소 함량이 0.60wt% 이상의 고탄소강(High Carbon Steel)에 속한다. 그러나, 강의 성질을 개선하기 위하여 1종 또는 2종 이상의 미량의 합금원소들-크롬(Cr), 몰리브덴(Mo), 바나듐(V) 등-이 첨가된 경우 합금강(Alloy Steel)으로 분류한다.

철도 궤도에 사용되는 레일강(Rail Steel)의 특성은 기본적으로 레일 소재의 화학성분에 의해 결정된다. 그리고 열처리에 의해서 이들의 내부 조직이 다양하게 변화되고, 이때 생성된 내부 조직에 의해서 후차적으로 레일강재의 성질이 결정되므로, 열처리(Heat Treatment)란 금속 내부의 미세조직(Microstructure)을 변화시켜 강재에 요구되는 강도(Strength)와 인성(Toughness) 및 경도(Hardness)등을 향상시키기 위해 행하는 가열 및 냉각의 복합조작 이라고 정의할 수 있다.

근래에 철도 수송량의 증가와 더불어, 차량의 고속운행과 통과하중의 증가 및 운행횟수가 빈번해짐에 따라 차륜과 직접 접촉되는 레일의 주행면에 대한 마모 손상이 심하게 되고 차량의 반복하중에 의한 피로가 누적되고 국부적인 변형이 야기되어 레일 주행면이 손상되고 급기야는 치명적인 파단의 기점이 된다. 특히 급격한 커브 노선의 경우, 마모도는 더 심하게 되어 보수 유지에 많은 비용이 소요되며, 편마모로 인한 내구 수명도 단축되어 교체 주기가 점점 더 짧아지고 있다.

* 강원산업(주) 기술부, 부장, 정회원

** 강원산업(주) 기술부, 과장, 비회원

*** 강원산업(주) 철강사업부, 상무이사, 정회원

따라서 열처리 레일의 제조 목적은 부설되는 레일이 상기의 운행조건에 적합하게 사용될 수 있도록, 적절한 열처리 공정을 통하여 소재 내부의 미세 조직을 변화시켜 강도와 인성 그리고 경도 등이 우수한 조직으로 만들어 레일의 내마모성과 피로성을 증대시켜 내구수명을 향상, 부설중의 안정성과 경제성에 기여하는 데 있다.

열처리 레일의 종류는 레일의 화학성분 및 물성에 따라서 구분 되기도 하지만, 일반적으로 열처리된 레일의 부위에 따라 크게 다음과 같이 분류할 수 있다.

1. 단두부 열처리 레일(End Hardened Rail)
2. 경두 열처리 레일(Head Hardened Rail)

상기의 단두부 열처리 레일은, 레일들의 연결시 용접을 하지 않고 이음매판(Fish Plate)과 보울트 구멍(Bolt Hole)을 이용하여 연결할 경우, 레일간의 틈새 간격(Expansion Space)이 있는 이음매 부위가 차륜에 의한 심한 마모에 대한 대처 방안으로 레일의 한 쪽 또는 양 끝단부의 레일 두부를 종방향으로 일정 부분만 경화한 것으로 보통 경화층의 깊이는 표면에 소 약 20mm이며 여기서부터 열처리 효과가 점차 감소하여 약 95mm정도 떨어진 곳에서의 경화효과는 소멸되어 진다.

경두 열처리 레일은 현재 널리 사용되는 레일로써 문자 그대로 차륜과 직접 접촉하여 마모가 심한 레일의 두부(Rail Head)만을 전장에 걸쳐 열처리하여 경화시킨 것으로 보통 경화층의 깊이는 20mm이상이다.

이밖에도 레일의 전단면 전체를 경화시킨 전단부 레일(Full Hardened Rail)이 있으나, 본 고에서는 일반적으로 널리 쓰이고 있는 경두 열처리레일 제조공정에 대하여 먼저 야금학적인 측면에서 열처리 원리를 소개한 후, 열처리 하기 전의 레일 원래 조직인 조대한 펄라이트로부터 여러 가지의 열처리 공정에 의해 생성되는 내부 미세 조직들, 즉

- 1) 고 탄소계의 템퍼드 마르텐사이트(Tempered Martensite) 조직
- 2) 고 탄소계의 미세 펄라이트(Fine Pearlite) 조직
- 3) 저탄소계의 베이나이트(Bainite) 조직 또는

저탄소계의 침상의 템퍼드 마르텐사이트(Lath Tempered Martensite). 조직

들을 중심으로 이들 제조공정의 변천에 대하여 열처리의 기본 원리와 함께 고찰한 다음, 향후의 새로운 전망에 대하여 철도업계 관계자들에게 간략하게 소개 하고자 한다.

2 열처리의 기본 원리

열처리의 기본 개념은 철(Fe)과 탄소(C)등의 화합물로 구성된 강재의 내부조직을 다음과 같은 열처리 기본 변수들의 적절한 조합에 의해 우리가 원하는 강도 및 경도를 가진 새로운 내부조직으로 변화시키는 것이다.

- 첫 째, 함유된 탄소량을 비롯한 화학성분
- 둘 째, 가열온도의 범위 및 가열 유지 시간
- 셋 째, 냉각방법 및 냉각속도

이러한 변수들을 결정해 주기 위한 기본 지침들로 다음과 같은 자료들이 있는 데, 이들을 통해 열처리 공정에서의 상변태(Phase Transformation) 제어의 참고자료로 널리 활용되고 있다.

- 1) Fe-C (Fe₃C) 평형 상태도 (Equilibrium Phase Diagram)
- 2) 항온 변태도 (Isothermal Transformation Diagram 또는 Time-Temperature-Transformation Diagram)
- 3) 연속냉각 변태도 (Continuous Cooling Transformation Diagram)

2.1 Fe-Fe₃C 평형상태도 (Equilibrium Phase Diagram)

평형 상태도란 여러 가지 조성의 합금에 대한 용융상태로부터 상온에 이르기 까지 평형 상태에서의 상태 변화를 간단히 나타낸 것이다. 즉 합금의 상태를 탄소 성분 비율과 온도에 따른 상태에 따라 도시한 그림으로서, 횡축에는 탄소의 조성(wt%), 종축에는 온도(°C)로서 표시하고 있다. 실제로 강에 다른 합금원소가 첨가된다거나 또는 비평형 조직을 고찰할 경우, 한계성이 있으나, 레일 강재에서 일어나는 상변화에 대한 기초자료로서 매우 중요한 역할을 한다.

레일강은 탄소함량에 따라서 기계적 성질이 현저하게 변화된다. 표1에서와 같이 탄소량이 0%에서 0,8%로 증가함에 따라 항복강도가 4배 이상 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 고온상태하에서 강을 서냉할 경우, 약 6,67wt%의 탄소를 함유한 금속간화합물인 시멘타이트(Cementite, Fe₃C) 또는 Carbide라고 불리는 철탄화물의 양이 증가되기 때문에 강도 및 경도가 향상된다.

표 1. 탄소량에 따른 항복강도의 변화

탄소량(wt%)	항복강도(psi)	연신율(%)
0%	15,000	62
0,2%	32,000	35
0,8%	65,000	14

또한 동일한 탄소량을 함유할 지라도 열처리시 냉각방법에 따라서 그 기계적 성질이 냉각속도에 따라서 강도 및 경도가 증가하는 이유는 열처리에 의하여 그 금속의 내부조직이 변하기 때문인데, 이와 같이 탄소량과 열처리 방법의 적절한 조합으로서 필요한 강도와 경도를 얻을 수 있다.

그림1.에 실제 열처리시의 중요한 지침의 하나인 Fe-Fe₃C 상태도가 나와 있는데, 여기서 나타나는 고체 상태의 조직은 상기의 시멘타이트 조직 이외에 다음과 같은 상들을 현미경을 통해 관찰할 수 있다.

2.1.1 오스테나이트(Austenite) 조직

이 조직은 γ 철에 탄소가 고용되어 있는 형태로서 FCC(면심입방격자)구조로써 탄소의 고용도가 약 1,147°C에서 2,06%로 최대이며, 온도가 내려 감에 따라 723°C에서 약 0,8%가 된다.

2.1.2 페라이트(Ferrite) 조직

반면에 α 철에 탄소가 고용된 BCC(체심입방격자)구조의 고용체를 α 페라이트 또는 단순히 페라이트라고 부르며 최대 탄소 고용도는 723°C에서 약 0,02%로써 매우 작은 양이 고용된다.

2.1.3 시멘타이트(Cementite) 조직

철과 탄소의 화합물로 화학식은 Fe_3C 이다. 이 조직은 고용체라기 보다는 금속간 화합물로서 약 6.67wt%의 탄소를 함유하고 있으며 결정구조는 사방정(Orthorhombic)이고, 매우 단단하다.

2.1.4 펄라이트(Pearlite) 조직

고온에 있는 오스테나이트 조직을 냉각할 때에, 공석변태로 생긴 페라이트와 시멘타이트가 상호교대로 겹쳐서 층상구조로 구성된 혼합조직으로서 그 형태가 진주(Pearl)조개 껍질과 비슷하여 붙여진 명칭이다. 공석강(0.8%C) 펄라이트 조직에 나타나는 페라이트와 시멘타이트의 면적비율은 약 7 : 1 정도가 된다.

펄라이트 조직의 중요한 특징은 두 상간의 층간 간격(Inter Lamellar Spacing)은 냉각속도가 느릴수록 넓어져서 조대한 펄라이트(coarse Pearlite)조직이 생성되고, 냉각속도가 빠를수록 좁고 가늘게 되어 미세한 펄라이트(fine Pearlite)조직으로 변태되어 강의 기계적 성질 및 경도가 높다.

2.2 항온변태 곡선 (Isothermal Transformation or Time-Temperature-Transformation Diagram)

항온 변태곡선이란 강을 변태온도 구역이상의 온도로 가열하여, 단상의 오스테나이트 조직으로 변태시킨 후(Austenitizing), 어느 특정 변태온도 이하에서 일정 시간을 유지시켜 가면서 관찰된 온도에서의 시간 경과에 따른 오스테나이트 조직의 지속적인 변태를 나타낸 곡선이다.

그림2.에 공석강(0.8%C)의 전형적인 항온변태 곡선이 나타나 있다. 여기에 2 개의 C 자 형상을 가진 곡선들이 있는데, 왼쪽은 펄라이트 조직의 변태 개시선, 오른쪽은 변태 완료선이다. 또한 550°C 부근의 온도에서 변태가 가장 먼저 시작되는 왼쪽으로 돌출해 있는 부분이 Nose이다. 이 곡선을 IT 곡선 또는 TTT 곡선이라고 부르며 형상에 따라 C 곡선 또는 S 곡선이라고 한다.

일반적으로 Nose온도 보다 높은 구역에서 항온 변태시 펄라이트가 형성되고, 그 아래로부터 마르텐사이트가 생성되는 550~250°C 범위에서 등온변태되면 베이나이트(Banite)조직이 생긴다.

베이나이트 조직은 펄라이트 조직과 마찬가지로 페라이트와 시멘타이트로 이루어져 있으나, 펄라이트가 층상의 혼합조직인데 비하여 약 550 ~ 350°C의 범위에서 형성된 상부 베이나이트(upper Banite)는 페라이트 주위에 시멘타이트가 석출되어 있는 깃털상의 조직이며, 350 ~ 250°C의 범위에서 형성된 하부 베이나이트(lower Banite)에서는 페라이트내에 시멘타이트가 석출된 침상의 형태이다. 이들을 얼핏 보면 마르텐사이트가 템퍼링되어 생성된 조직과 유사하다.

마르텐사이트(Martensite)조직은 오스테나이트가 급냉시 M_s 점이하 온도에서 무확산 변태한 조직으로 탄소가 과잉 강제 고용된 α 고용체 조직이다. 결정구조면에서 보면 FCC의 오스테나이트가 BCC의 페라이트의 변태도중에 정지되어 생긴 정방형의 격자로서 현미경 조직상으로는 마상 또는 날카로운 침상 조직이다. 매우 단단하지만, 충격에 취약하여 급냉(Quenching) 열처리후에 인성을 부여해 주기 위해 템퍼링(Tempering)처리를 하는데, 이에 따라 경도와 강도가 저하한다. 이때 생성된 조직을 템퍼드 마르텐사이트 (Tempered Martensite)조직이라고 부른다.

이와 같이 오스테나이트와 α 페라이트의 탄소 고용도 차이에 근거하여 레일의 두부를 경화 열처리 할 수 있다.

2.3 연속냉각 변태곡선(Continuous Cooling Transformation Curve)

대부분의 열처리 작업시 항온변태에 의해 강을 열처리하기도 하지만, 일반적으로 오스테나이트 영역의 온도에서 상온까지 연속적으로 냉각 변태시켜서 열처리한다.

그림2.에 CCT 곡선이라고 명명된 연속냉각 변태곡선에 따라 오스테나이트화 온도로부터 여러 가지의 일정한 속도로 냉각시켰을 때 각각의 냉각조건에 따라 생성된 다양한 변태조직을 나타내었다. 이 곡선은 강의 화학성분에 의해 일차적으로 결정되지만 냉각방법에 따라 여러 형태로 정해지므로 실제 조업에 직접 적용하지는 못하나, 열처리 수행시 매우 귀중한 자료가 된다. 또한 이들 곡선은 공석탄소강의 경우, 항온 변태곡선과 비교해 볼 때, 약간 오른 쪽으로 그리고 하부 방향으로 곡선이 이동된다. 그리고 연속냉각에 의해서는 베이나이트 변태가 일어날 수 없다. 따라서, 베이나이트 조직을 얻기 위해서는 공석강을 Ms 생성 온도와 Nose 온도사이로 급랭시킨 다음, 항온변태시키는 수 밖에 없다. 그러나, 합금강에서는 첨가된 합금원소에 의하여 연속냉각 변태곡선이 오른 쪽으로 이동되어 연속냉각에 의해서도 베이나이트 조직을 얻을 수 있다.

3. 경두 열처리 레일의 제조공정의 변천

3.1 과거와 현재의 경두 열처리레일 제조공정

열처리 레일의 제조공정은 먼저 압연용 소재(Bloom)를 가열해 준 다음, 압연 직후의 성형된 레일의 자체 함유열을 이용하여 냉각해주는 IN-LINE 열처리 공정과 일단 레일을 생산한 다음 이를 재가열한 후 열처리하는 OFF-LINE 공정으로 대분할 수 있는데, 전자는 일본, 미국, 캐나다, 오스트리아등에서 운용되며 후자는 한국, 중국, 독일, 프랑스에서 운용하고 있다.

표 2에 그간의 경두 레일의 열처리 방식의 변천을 요약 하였는데, 초창기에는 소재 레일을 가열하여 단상의 오스테나이트 조직으로 만든 다음, 레일 전체를 물을 냉매로 하여 수냉(Water Quenching)하는 방식이었으나, 그 후, 두부만을 물 또는 기타 액체를 사용하여 퀘칭하여 마르텐사이트 조직으로 만든 후, 이를 다시 템퍼링하는 방법을 사용하는 퀘칭-템퍼링방식을 채택한 바 있다. 이 때 생성된 조직은 템퍼드 마르텐사이트 조직이었다.

그 후, 근래에 들어 냉각속도가 비교적 작은 불완전한 퀘칭방식의 슬랙(Slack) 퀘칭에 의하여 레일 두부의 경화층조직 전체에 미세한 펄라이트만이 생성되도록 하여 기존의 조직보다 강도와 경도가 우수한 내마모성이 향상된 경두 열처리 레일을 제조하고 있다.

이를 퀘칭-템퍼링 방식과 비교해 보면 가열온도와 냉각온도 구간은 강의 화학성분에 따라 미리 결정되므로 크게 차이가 나지 않지만, 서냉시에는 퀘칭효과가 약하므로 이를 보상하기 위해 탄소함량이 약 0,10% 정도 높인다. 따라서 현재의 공정은 CCT 곡선에 근거하여 냉각방법을 적절히 조정하여 미세한 펄라이트 조직만으로 KS사양에 규정된 강도와 경도의 레일을 제조한다.

슬랙퀘칭의 냉각매체로서 물보다는 냉각속도가 작은 압축공기(Compressed Air)가 주로 사용되나 제조원가 절감을 위해 열처리 공정중의 핵심인 오스테나이트→펄라이트 변태 구간만 냉각시키고, 그 후에는 냉각능이 비교적 높은 물 또는 물과 공기의 혼합분사체인 Air Mist를 사용한다.

또한 열처리중에 생기는 내부 응력 즉, 가열시의 레일 두부의 팽창 및 조직변화에 따른 체적변화와 레일 저부의 열변화에 따른 Stress 발생을 최소화하여 열처리 직후에 레일이 전장에 걸쳐서 심하게 휘지 않도록 적절히 조절, 잔류응력의 발생을 최소화하는 공정이 현장에서 활용되고 있다.

표 2. 경두 열처리 레일 제조 공정의 변천(50KgN, 60Kg급 레일 기준)

	열처리 방식	조직	화 학 성 분		기계적 성질		경 도								
			구분	범 위			표 면	단 면 경화층							
보통 레일	현 재	조대 P.	C	0,63/0,75	인장강도 (N/mm ²)	연신율 (%)	브리넬 경도 (HBN)	-							
			Si	0,15/0,30											
			Mn	0,70/1,10											
			P	0,030 이하											
			S	0,025 이하	800이상	10 이상	235 이상								
경두	과 템퍼링 (QST)	T.M.	일반 레일과 동일		규정 없음		HSC 47/53	표면→내부로 완만 감소 Max. HV 410							
							HBN 321/375								
열처리	현 재	슬랙 퀴칭 (SQ)	미세 P.	HH 340 HH370		종류	인장강도 (N/mm ²)	연신율 (%)	HSC (HBN)	HV 정도					
				C	0,72/0,82					0,72/0,82	A점 B점				
				Si	0,10/0,55					0,10/0,65	11mm 16mm				
				Mn	0,70/1,10					0,80/1,20					
				P	0,030이하					0,030이하	HH 1,080	8이상	47/53 (321/375)	311	311
				S	0,020이하					0,020이하	HH 340	이상	49/56 (331/388)	이상	이상
				Cr	0,20이하					0,25이하	HH 1,130	8이상		331	331
V	0,030이하	0,030이하	HH 370	이상		이상	이상								
레일	미 태 합금강	B. 또는 Lath T.M.	저탄소계(0,1~0,5%C) 미세 합금강 (Cr, Mo, V, Ti, Ni 첨가)		인장강도(N/mm ²) 1,100 ~ 1,800		-	HV 350/450 (HBN 331/425)							

3.2 경두 열처리레일 제조공정의 장래 전망

현재 사용하고 있는 펄라이트 강의 강도와 경도를 더 높이기 위해서는 강종의 함유 탄소량을 더 많게 하여 조직상의 층상간격을 더 좁혀야 하는데, 야금학적 측면에서 볼 때 강도가 증가함에 따라 인성 및 용접성이 저하되는 한계성이 있다. 따라서 미국을 중심으로 여러나라에서 실험실 차원으로 저탄소계의 베이나이트 조직이 개발되어, 실험중 인데, 고탄소계의 펄라이트에 비해 강도와 충격인성과 경도의 우수함이 판명됨에 따라 미래의 새로운 레일강으로 부상되리라 본다.

그러나, 아직 실용화되기에는 이 조직에 대한 정확한 물성 파악과 변태에 필요한 제조설비의 개발 및 합금원소 첨가로 인한 제조원가 절감방안이 필요하므로 실제 상용화를 위해 향후 최소한 10년 이상의 시간이 필요하다고 본다. 현재 일본 NKK의 개발품은 미국에서, THYSSEN은 노르웨이에 현지 부설하여 TEST중이다. 그러나, 분기기 궤도에 사용되는 고탄소계의 Mn-Crossing (Frog) 주강품의 대체재로 저탄소계인 베이나이트가 80년대부터 개발되어 인성 및 특히 용접성이 우수하여 영국에서 약 1,000여곳에서 부설되고, 런던 지하철에도 사용될 계획이다.

이와 함께 초창기의 고탄소계 템퍼드 마르텐사이트 조직을 약 0,50% 이하의 탄소가 함유된 저탄소계 조직으로 바꾸려는 연구도 진행중이며, 신일본제철(NSC)과 소련에서는 이와 반대로 탄소 함량이 매우 높은 과공석강(0,90%C 이상)계의 내마모성이 강한 저렴한 강재 개발을 수행중 이다.

4. 결론

본 고에서는 경부 열처리 레일의 조직을 중심으로 열처리의 기본 원리와 그 간의 제조과정의 변천을 간단히 소개하였다. 현재 철도청에서 추진하고 있는 재래선의 고속화 사업과 화물운송용 철도차량의 운용확대 및 향후 2,020년 까지의 장기 철도망구축에 따른 대책사업에 일부 동참하는 제조업체의 입장에서 열처리 레일에 대해 고찰해본 내용이다. 따라서 산업체에서도 철도궤도의 중요 요소의 하나인 레일의 품질개선을 위하여 새로운 레일강재의 개발과 연구에 철도 관련 연구 기관과 함께 노력해야 할 것이다. 향후 기회가 주어지면 철도 관련지를 통하여 전반적인 레일의 품질분석을 중심으로 기술보고 및 연구논문 발표에 참여하여 한국철도산업의 발전에 일조를 담당 할 예정이다.

참고문헌

1. KS 핸드북 철강II(1997), 한국표준협회.
2. 철강용어사전(1997), 한국철강신문.
3. 이종득(1990), "철도공학", 노해출판사.
4. 홍영환(1996), "강의 열처리 실무", 기전출판사.
5. Iron & Steel Society(1998), "Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceedings", Vol. 39, pp 989 - 1,070.
6. 교통개발연구원, 철도기술연구원(1998), "21세기 철도 발전전략과 장기철도망구축", (철도청).
7. 한상욱역(1981), "금속 현미경 조직해설(열처리 조직)", 도서출판 무궁화.

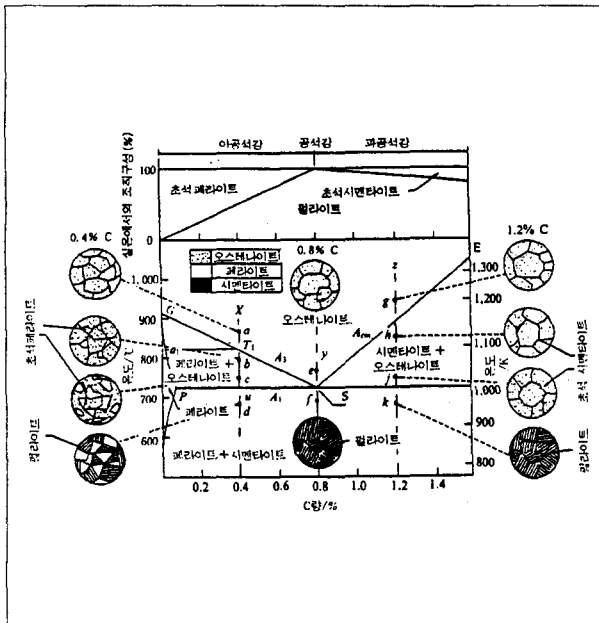


그림1. Fe - Fe₃C 평형 상태도와 변태 조직도

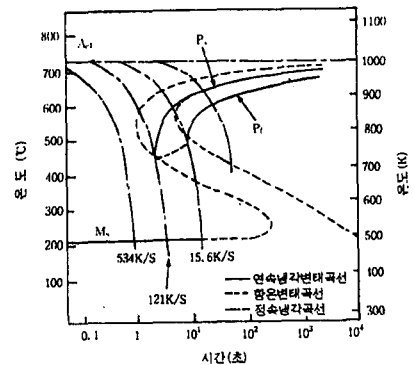


그림2. 공석강의 항온 변태곡선 및 연속냉각 변태곡선



그림3. 경두 레일의 두부에서 관찰된 레일강의 조직 사진
 (조대 필라이트, 마르텐사이트, 템퍼드 마르텐사이트, 미세 필라이트, 베이나이트).