

技術解説

경화능 계산

정 결 체

한국기계연구소 산업기술 전문 교육원(구 FIC) 열처리 도급과

1. 서 론

1) 경화능이란

경화능이란 영어로 Hardenability, 일본에서는 焼入性, 순 우리말로로는 담금질성이라고 하며, 강을 적절한 온도로 가열후 급냉하여 경화시키고자할 때 외부 및 내부가 경화될 수 있는 정도를 말하며, 이는 질량효과(Mass effect)라는, 강재 크기가 클 때 경도가 저하하는 현상이 발생하기 때문에 필요성이 강조되고, 이러한 현상은 구조용강에서 가장 중요하므로 타강종보다도 구조용 강에서 매우 중요하다.

2) 경화능에 영향을 주는 요인

경화능에 영향을 주는 요인은 크게 강재 내부요인과 외부요인으로 나눌 수 있으며 내부요인은 함유 탄소량, Austenite Grain Size, Alloying Elements 이며, 외부요인은 냉각제의 종류, 강재의 크기, 강재의 형상, 강재의 표면상태 등으로 냉각제의 종류는 그 온도, 교반, 농도 등을 수치적으로 표현한 Severity of Quench(급냉도)에 의하여 설명되고 있으며 기타 강재 내부결함 등도 영향을 준다.

3) 냉각속도에 따른 조직변태

강은 C, Si, Mn, P, S 의 5대 기본성분을 함유하고 있으며 이 중에서 탄소가 미치는 영향이 가장 커서 우리는 Fe-C diagram 을 항상 이용하고 있으며 이 Fe-C diagram 은 열처리의 가장 기초가 된다.

그림 1은 강의 냉각속도에 따른 조직의 변화를 도시적으로 나타낸 것이며 Fe-C diagram 은 이중 표준 조직이라 할 수 있는 공냉 또는 더욱 냉각속도가 느린 서냉의 경우에는 적용이 가능하지만 공냉 이상의 급냉인 경우에는 적용이 힘들다.

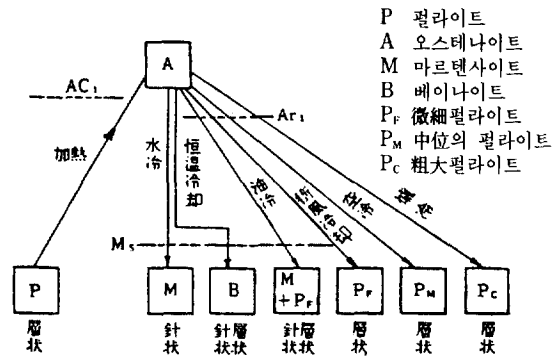


그림 1. 鋼의 냉각에 따른 組織의 변화

4) 급냉시의 변태

鐵에서의 炭素는 Fe₃C 라는 단단한 化合物로 되어 그 크기 및 분포에 따라 기계적성질에 많은 영향을 미치며, 熱處理에서 急冷時 鐵鋼에서만 나타나는 炭素를 과포화한 Martensite란 매우 단단한 조직을 얻어 材料를 강화하는데 중요한 역할을 하고 있다.

이러한 Martensite는 炭素를 과포화한 격자이므로 硬化시엔 炭素가 필요하며, 담금질에서 얻을 수 있는 最高硬度는 탄소량에 의해 결정된다. 그림 2는 이를 나타낸 그림으로 0.6%에서 最高硬度에 도달하며 대략의 계산식은 다음과 같다.

$$\text{최고경도 HRC} \approx 30 + 50 \times \%C$$

$$\text{임계경도 (50%M) HRC} \approx 24 + 40 \times \%C$$

서두에서 말한 경화능이란 이러한 급냉시의 변태에서 경도를 얻을 수 있는 가능성, 즉 강의 급냉으로 얻는 경도는 탄화물 형성 합금원소를 다량으로 함유하지 않은 대부분의 구조용 강에서는 Martensite를 얻을 수 있는 가능성이라고 말할 수 있으며, 그 원인에 의하여 탄

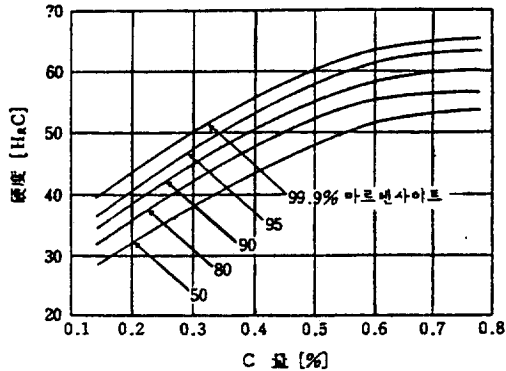


그림 2. 각기 마르텐사이트량의 組織의 경도와 C 量の 關係

소의 확산을 방해하는 성질, 즉 Pearlite 변태를 지연시키는 성질이 클수록 경화능이 크다고 할 수 있다.

S 곡선에서 Pearlite 변태가 가장 빨리 일어나는 곳을 Nose 라 부르고 급냉에 의하여 Martensite 를 얻고자 할 때는 이 구역을 통과하지 않으면 안되므로 이를 임계구역이라 한다. 즉 이 임계구역의 크기는 Martensite 를 얻기 위한 용이성(경화능)을 나타낸다.

5) 질량효과와 경화능

열처리에서 얻을 수 있는 경도는 탄소량에 의하여 결정되지만, 실제로는 熱處理時 강재의 크기에 따라 열처리 효과 즉 경도가 다르게 나타나며 大形材일수록 경도가 낮다. 이 현상은 탄소강에서 심하며 表面과 중심부와의 차이도 크다. 이와같은 점은 合金元素의 첨가에 의하여 개선될 수 있으며 이때 담금질성이 좋아졌다고 한다. 담금질성을 증가시키는 정도는 대략 다음과 같다.

$$Mn > Mo > Cr > Si > Ni$$

KS 및 JIS의 熱處理에 대한 경도 및 기계적 성질은 이러한 質量效果를 감안하여 다음과 같이 기준을 정하였다.

일반강재 : ϕ 25 또는 25[□], 200 l

공구강재 : ϕ 15 또는 15[□], 200 l

그림 3, 4는 각각 SAE 1045 강과 SAE 6140 강에 대하여 수냉시 환봉직경에 따른 단면 경도분포를 도시한 것으로서 그림과 같이 表面과 内部, 또 직경에 따른 硬度的 차이는 합금강보다 炭素鋼에서 심한 것을 알 수 있으며 이는 탄소강의 담금질성이 나쁘기 때문이다.

담금질성은 합금원소의 첨가, 炭素量的 증가, 입자의

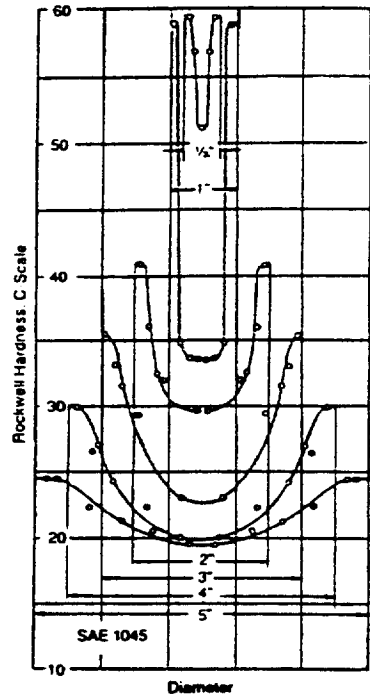


그림 3. SAE 1045 강 환봉의 수냉시 규격별 경도분포

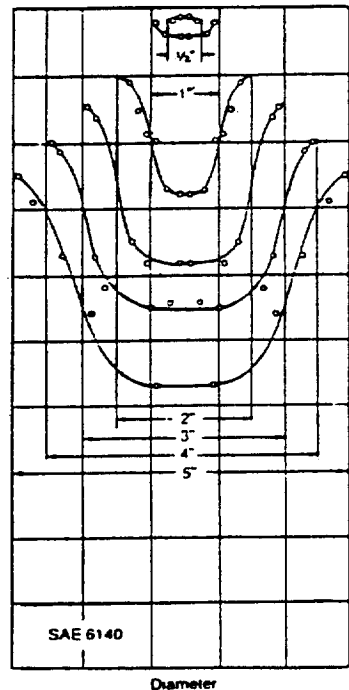


그림 4. SAE 6140 강 환봉의 수냉시 규격별 경도분포

化學成分 [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
	0.41	0.27	0.66	0.024	0.012	0.10	0.04	0.07	-

오스테나이트化條件 : 850°C × 10 min

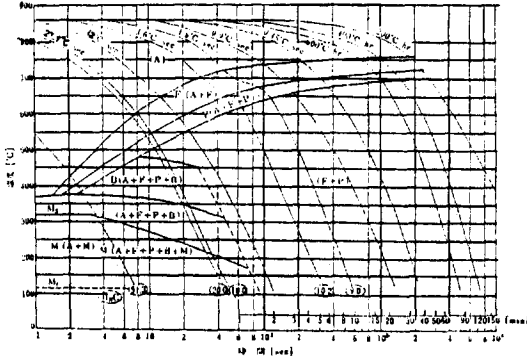


그림 5. S40C의 連續 冷却變態曲線圖

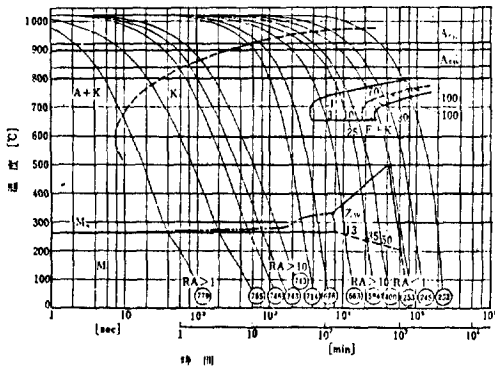


그림 6. SKD6의 C.C.T. 曲線

조대화에 따라 향상되며 실제 熱處理 時에는 냉각제의 冷却能力에 따라서도 硬度의 차이가 있어 소정의 기계적 성질을 얻기 위해서는 담금질성 및 냉각방법에 대하여 충분히 검토되어야 한다.

합금원소 첨가에 의한 이러한 효과는 상태도 및 S 곡선에도 여러가지 양상으로 나타나며 열처리시에는 강종별 S 곡선 및 CCT 곡선을 이용하여 결과를 예측할 수 있다.

그림 5는 SM 40C의 CCT 곡선이고 그림 6은 STD 6의 CCT 곡선으로 경화능의 차이를 잘 알 수 있다.

2. 경화능 계산

상기한 바와 같이 경화능을 관리할 필요가 있으며 경화능을 관리하기 위해서는 수량화시키는 것이 선결 과제로서 경화능을 시험적 또는 이론적으로 수량화 시키기 위한 시도는 매우 다양하게 추진되었다.

현재까지 그 시험적 방법으로는 Penetration-Fracture Test, Penetratin diagram, Cone Test, Wuerfel bomb, McMullan 췌기시험, Shepherd P-V Test 공냉시험, Jominy Test 등 여러가지 방안이 제시 되었으나, 이중 그 재현성 및 방법의 표준성, 용이성이 뛰어난 Jominy Test 가 가장 많이 사용되고 있다.

1) Jominy Test

그림 7은 Jominy 시험장치 및 시험편에 대한 설명이고 그림 8은 결과표시 방법이며 그림 9는 이러한 방법에 의하여 경화능을 보충한 경화능 보증 구조용강의 Hardenability Band 를 보여준다.

그러나 합금원소를 많이 함유하고 있어 공기중에서 냉각하여도 Martensite 를 얻을 수 있는 공구강등은 이러한 방법으로는 경화능을 측정할 수 없어 그림 10 과 같이, Ni 을 32% 정도 함유한 상온에서도 Austenite 조성을 갖는 강을 크기 6 inch ϕ × 6 inch 로 하고 중앙부에 총길이 7 inch, 돌출부 길이 4 inch 의 중간에 $\phi \frac{7}{8}$ inch 나사를 내어 끼울 수 있도록 Hole 을 낸 공냉시험법을 이용하고 있다.

이러한 공냉시험법도 직경 6 inch 이상의 공냉강재에는 적용이 불가하여 그러한 경우에는 보다 느린 냉각속도로 냉각될 수 있도록 설계된 Furnace 내에서 냉각시켜 경화능을 측정하고 있다.

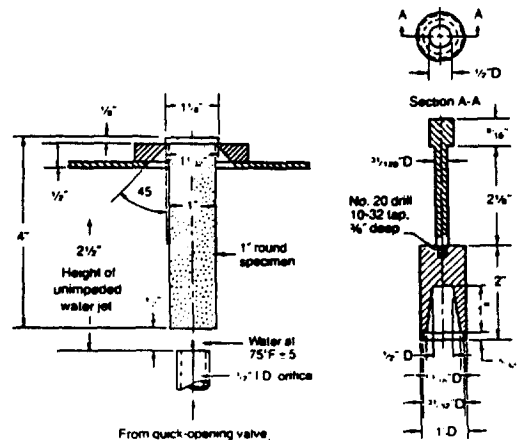


그림 7. 경화능 시험을 위한 끝 담금질 죠미니시험편

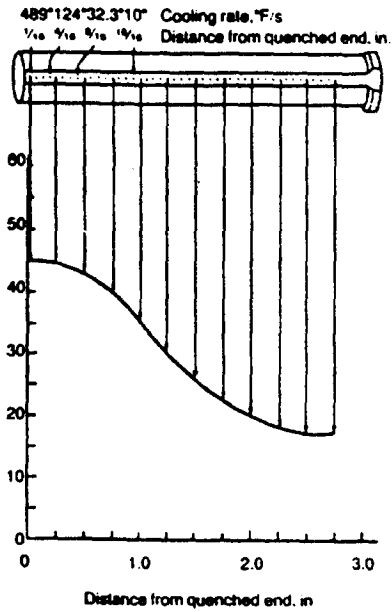


그림 8. 끝 담금질 죠미니 시편의 경도치 도시방법

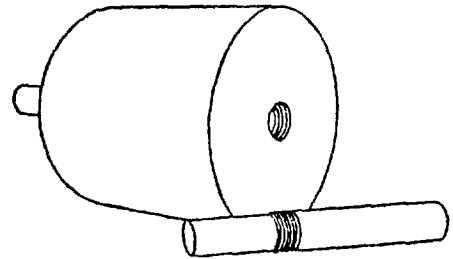
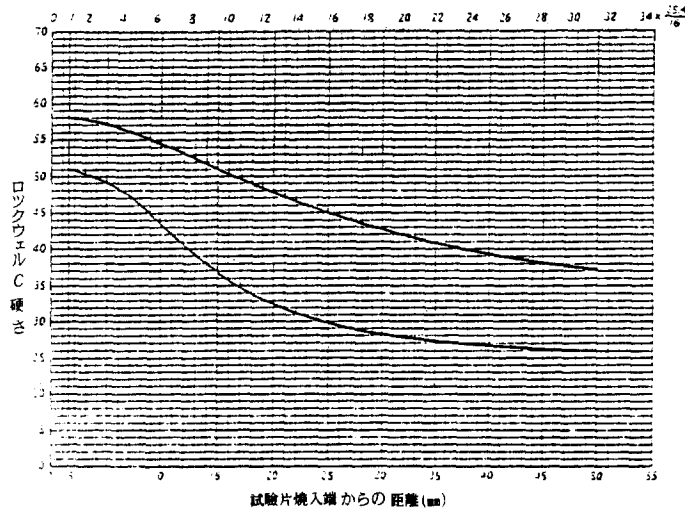


그림 10. 空間硬化試驗의 試料外觀²⁰⁾



焼入端からの距離とその硬さ													熱處理溫度 °C				
mm 硬さ H _R C	1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50	焼ならし	焼入れ
上限	58	58	57	56	55	54	53	51	48	45	43	41	39	38	37	870	845
下限	51	50	49	47	45	42	39	37	32	30	28	27	27	26	26		

그림 9. SCM 435 H (SCM 3 H)

2) 경화능 계산법

① 용어의 정의

- D_0 : Unhardened Diameter, 즉 Martensite 가 50% 미만으로 경화되지 않은 중심부의 직경
- D_c : Critical Diameter, 즉 중심부까지 50% Martensite 로 경화될 수 있는 최대직경
- D_i : Ideal Diameter, 즉 이상적인 급냉일 경우의 D_c
- H : 급냉도를 나타내는 기호로 이상적인 경우 $H = \infty$
- IH : 담금질 최고 정도 (수냉단 정도)
- DH : 위치별 정도

② D_i 의 계산

① 입도 및 합금성분에 의한 적산법

$$D_i = D_0 \cdot f_{Si} \cdot f_{Mn} \dots \dots \dots (i)$$

(i)식에서와 같이 D_0 (입도에 의한 효과)에 f_{Si} (Si 첨가에 의한 증가효과지수)등을 적산하여 D_i 를 계산한다. 그림 11은 입도에 대한 효과를 나타내고, 그림 12는 각 합금원소의 첨가에 의한 증가효과 지수를 나타낸다.

② ASTM 법

ASTM A-255-67에 의한 방법으로 표 1과 같이 입도 및 각 합금 성분에 대한 지수를 더하여 도표를 이용한다.

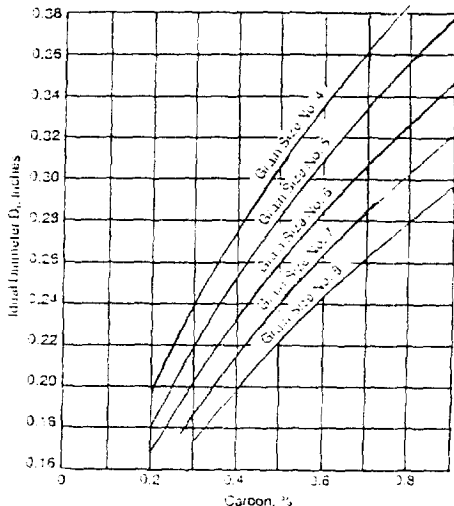


그림 11. 탄소강에서 탄소함량과 오스테나이트 입도에 따른 이상직경 (D_i)

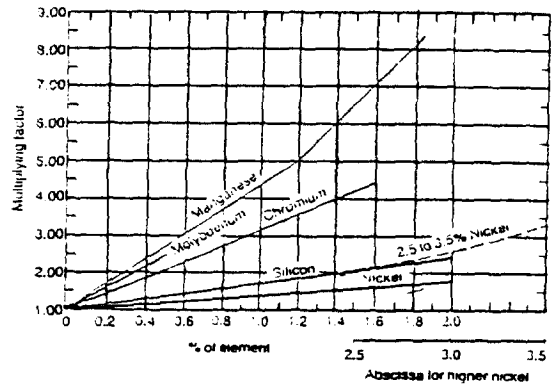


그림 12. 합금강에서 합금원소 함량에 따른 배가치수

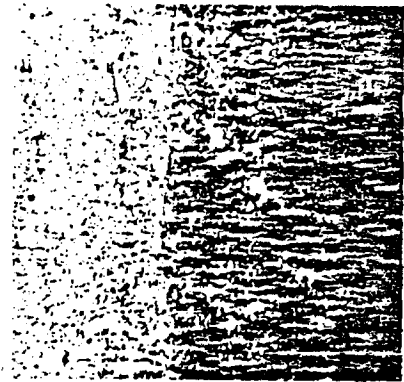


그림 13. 담금질된 강에서 경화부와 소재부의 Martensite에서 Pearlite로의 천이지역 (遷移地域)

③ D_c 의 계산

① 현미경법(부식법), 경도법

그림 13과 같이 부식후 명암이 교차되는 지점 또는 경도측정시 경도가 급격히 변하는 변곡점이 50% Martensite 조직인 D_c 지점인 것을 이용하여 D_c 산출

표 1. 경화능 계산용

표의 사용방법		원소(%)	수 치	수 표
강의 C%와 결정입도에 대해서는 수표 III, 합금원소에 대해서는 수표 I 및 II로부터 각각 해당하는 숫자를 구해서 이들을 합하고 수표 IV로부터 D ₁ (인치)로 환산한다. (예) AISI 8740 강의 D ₁ 는 4.35인치로 된다. (결정입도 7)		0.40 C	0.329	III
		0.85 Mn	0.584	I
		0.30 Si	0.083	I
		0.55 Ni	0.079	I
		0.50 Cr	0.318	I
		0.25 Mo	0.244	I
		0.010 P	0.011	II
		0.030 S	-0.009	II
		계	1.639	
			D ₁ 4.35 인치	IV

수표 I 主合金元素

(%)	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	(%)	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	(%)	Mn	Si	Ni	Cr
0.01	0.014	0.003	0.002	0.009	0.013	0.56	0.457	0.144	0.081	0.344	0.428	1.22	0.710	0.268	0.159	0.561
0.02	0.028	0.006	0.003	0.018	0.025	0.57	0.462	0.146	0.082	0.349	0.433	1.24	0.718	0.271	0.161	0.566
0.03	0.041	0.009	0.005	0.027	0.037	0.58	0.467	0.148	0.084	0.353	0.438	1.26	0.725	0.275	0.164	0.571
0.04	0.054	0.012	0.006	0.036	0.049	0.59	0.472	0.150	0.085	0.357	0.442	1.28	0.733	0.278	0.166	0.576
0.05	0.067	0.015	0.008	0.045	0.061	0.60	0.477	0.152	0.086	0.361	0.447	1.30	0.741	0.281	0.168	0.581
0.06	0.079	0.018	0.009	0.053	0.072	0.61	0.482	0.154	0.087	0.365	0.452	1.32	0.749	0.284	0.170	0.586
0.07	0.091	0.021	0.011	0.061	0.083	0.62	0.487	0.157	0.088	0.369	0.456	1.34	0.757	0.287	0.172	0.590
0.08	0.103	0.024	0.012	0.069	0.094	0.63	0.492	0.159	0.090	0.373	0.461	1.36	0.765	0.290	0.175	0.595
0.09	0.114	0.027	0.014	0.077	0.104	0.64	0.496	0.161	0.091	0.377	0.465	1.38	0.772	0.294	0.177	0.600
0.10	0.125	0.029	0.015	0.085	0.114	0.65	0.501	0.163	0.092	0.381	0.470	1.40	0.780	0.297	0.179	0.605
0.11	0.136	0.032	0.017	0.093	0.124	0.66	0.505	0.165	0.094	0.385	0.474	1.42	0.787	0.300	0.181	0.609
0.12	0.146	0.035	0.019	0.101	0.134	0.67	0.510	0.167	0.095	0.389	0.479	1.44	0.794	0.303	0.183	0.614
0.13	0.156	0.038	0.020	0.108	0.143	0.68	0.514	0.169	0.096	0.393	0.483	1.46	0.801	0.306	0.185	0.618
0.14	0.166	0.041	0.022	0.115	0.152	0.69	0.519	0.171	0.097	0.396	0.487	1.48	0.808	0.309	0.187	0.623
0.15	0.176	0.043	0.023	0.122	0.161	0.70	0.523	0.173	0.099	0.400	0.491	1.50	0.815	0.312	0.190	0.627
0.16	0.186	0.046	0.024	0.129	0.170	0.71	0.527	0.175	0.100	0.404	0.496	1.52	0.822	0.315	0.193	0.632
0.17	0.195	0.049	0.026	0.136	0.179	0.72	0.531	0.177	0.101	0.407	0.500	1.54	0.828	0.318	0.196	0.636
0.18	0.204	0.052	0.028	0.143	0.188	0.73	0.536	0.179	0.102	0.411	0.504	1.56	0.835	0.321	0.198	0.641
0.19	0.213	0.054	0.029	0.149	0.196	0.74	0.540	0.181	0.104	0.415	0.508	1.58	0.841	0.323	0.200	0.645
0.20	0.222	0.057	0.030	0.156	0.204	0.75	0.544	0.183	0.105	0.418	0.512	1.60	0.848	0.326	0.203	0.650
0.21	0.231	0.060	0.032	0.163	0.212	0.76	0.548	0.185	0.106	0.422	0.516	1.62	0.854	0.329	0.205	0.653
0.22	0.239	0.062	0.033	0.169	0.220	0.77	0.552	0.187	0.107	0.425	0.520	1.64	0.860	0.332	0.208	0.657
0.23	0.247	0.064	0.035	0.175	0.228	0.78	0.556	0.189	0.109	0.429	0.524	1.66	0.866	0.335	0.210	0.661
0.24	0.255	0.067	0.037	0.181	0.236	0.79	0.560	0.191	0.110	0.432	0.528	1.68	0.872	0.338	0.212	0.665
0.25	0.263	0.070	0.038	0.187	0.244	0.80	0.564	0.193	0.111	0.436	0.531	1.70	0.878	0.340	0.215	0.670
0.26	0.271	0.073	0.040	0.193	0.251	0.81	0.568	0.195	0.112	0.439	0.535	1.72	0.884	0.343	0.217	0.673
0.27	0.279	0.075	0.041	0.199	0.258	0.82	0.572	0.197	0.113	0.443	0.539	1.74	0.890	0.346	0.219	...
0.28	0.287	0.078	0.042	0.205	0.265	0.83	0.576	0.199	0.114	0.446	0.543	1.76	0.896	0.349	0.222	...
0.29	0.294	0.080	0.044	0.211	0.272	0.84	0.580	0.201	0.116	0.449	0.547	1.78	0.902	0.351	0.225	...
0.30	0.301	0.083	0.045	0.217	0.279	0.85	0.584	0.203	0.117	0.453	0.550	1.80	0.908	0.354	0.228	...
0.31	0.308	0.085	0.047	0.222	0.286	0.86	0.588	0.206	0.118	0.456	0.554	1.82	0.914	0.357	0.231	...
0.32	0.315	0.088	0.048	0.228	0.293	0.87	0.592	0.207	0.120	0.459	0.558	1.84	0.920	0.359	0.234	...
0.33	0.322	0.090	0.049	0.234	0.299	0.88	0.596	0.208	0.121	0.462	0.561	1.86	0.925	0.362	0.237	...
0.34	0.329	0.093	0.051	0.239	0.306	0.89	0.599	0.210	0.122	0.466	0.565	1.88	0.930	0.365	0.240	...
0.35	0.336	0.095	0.052	0.244	0.312	0.90	0.602	0.212	0.123	0.469	0.568	1.90	0.936	0.367	0.243	...
0.36	0.343	0.098	0.053	0.249	0.318	0.91	0.606	0.214	0.124	0.472		1.92	0.941	0.370	0.245	...
0.37	0.349	0.100	0.055	0.255	0.324	0.92	0.609	0.216	0.125	0.475		1.94	0.946	0.373	0.246	...
0.38	0.355	0.102	0.057	0.260	0.330	0.93	0.613	0.218	0.126	0.478		1.96	0.951	0.375	0.247	...
0.39	0.362	0.105	0.058	0.265	0.336	0.94	0.616	0.220	0.128	0.481		1.98	0.955	0.378	0.249	...
0.40	0.368	0.107	0.059	0.270	0.342	0.95	0.620	0.221	0.129	0.485		2.00	0.960	0.381	0.250	...
0.41	0.374	0.110	0.061	0.275	0.348	0.96	0.623	0.223	0.130	0.488		2.10	...	...	0.262	...
0.42	0.380	0.112	0.062	0.280	0.354	0.97	0.627	0.225	0.131	0.491		2.20	...	...	0.275	...
0.43	0.386	0.114	0.063	0.285	0.360	0.98	0.630	0.227	0.132	0.494		2.30	...	...	0.288	...
0.44	0.392	0.117	0.064	0.290	0.365	0.99	0.633	0.229	0.134	0.497		2.40	...	...	0.303	...
0.45	0.398	0.119	0.066	0.295	0.371	1.00	0.637	0.230	0.135	0.500		2.50	...	...	0.318	...
0.46	0.404	0.121	0.067	0.300	0.377	1.02	0.643	0.234	0.137	0.506		2.60	...	...	0.333	...
0.47	0.409	0.124	0.069	0.304	0.382	1.04	0.650	0.238	0.139	0.511		2.70	...	...	0.351	...
0.48	0.415	0.126	0.070	0.309	0.387	1.06	0.656	0.241	0.142	0.517		2.80	...	...	0.369	...
0.49	0.420	0.128	0.072	0.313	0.393	1.08	0.662	0.245	0.144	0.522		2.90	...	...	0.387	...
0.50	0.426	0.130	0.073	0.318	0.398	1.10	0.669	0.248	0.146	0.528		3.00	...	...	0.405	...
0.51	0.431	0.133	0.074	0.323	0.403	1.12	0.675	0.251	0.148	0.534						
0.52	0.437	0.135	0.076	0.327	0.408	1.14	0.681	0.255	0.150	0.539						
0.53	0.442	0.137	0.077	0.331	0.413	1.16	0.687	0.258	0.153	0.545						
0.54	0.447	0.139	0.078	0.336	0.418	1.18	0.694	0.262	0.155	0.550						
0.55	0.452	0.141	0.079	0.340	0.423	1.20	0.702	0.265	0.157	0.555						

수표 (ASTM A 255-67)

수표 II 微小合金元素

(%)	V	P	S	Al	Ti	(%)	V	P	S	Al	Ti
0.01	0.061	0.011	-0.003	0.006	-0.008	0.09	0.111	0.092	0.027	0.049	-0.081
0.02	0.097	0.022	-0.006	0.012	-0.018	0.10	0.097	0.101	0.032	0.054	-0.092
0.03	0.137	0.033	-0.009	0.017	-0.025	0.11	0.086	...	...	0.059	-0.099
0.04	0.146	0.044	-0.011	0.022	-0.034	0.12	0.072	...	...	0.064	-0.112
0.05	0.146	0.054	-0.014	0.028	-0.043	0.13	0.061	...	...	0.069	-0.123
0.06	0.140	0.064	-0.018	0.033	-0.053	0.14	0.037	...	...	0.074	-0.134
0.07	0.137	0.073	-0.020	0.039	-0.062	0.15	0.025	...	...	0.079	-0.146
0.08	0.124	0.083	-0.024	0.044	-0.072						

수표 IV D₁ 換算

합계	D ₁ (인치)	합계	D ₁ (인치)
0.740	0.55	1.550	3.55
0.778	0.60	1.556	3.60
0.813	0.65	1.562	3.65
0.845	0.70	1.568	3.70
0.875	0.75	1.574	3.75
0.903	0.80	1.580	3.80
0.929	0.85	1.585	3.85
0.954	0.90	1.591	3.90
0.978	0.95	1.597	3.95
1.000	1.00	1.602	4.00
1.021	1.05	1.607	4.05
1.041	1.10	1.613	4.10
1.060	1.15	1.618	4.15
1.079	1.20	1.623	4.20
1.097	1.25	1.628	4.25
1.114	1.30	1.633	4.30
1.130	1.35	1.638	4.35
1.146	1.40	1.643	4.40
1.161	1.45	1.648	4.45
1.176	1.50	1.653	4.50
1.190	1.55	1.658	4.55
1.204	1.60	1.663	4.60
1.217	1.65	1.667	4.65
1.230	1.70	1.672	4.70
1.243	1.75	1.677	4.75
1.255	1.80	1.681	4.80
1.267	1.85	1.686	4.85
1.279	1.90	1.690	4.90
1.290	1.95	1.695	4.95
1.301	2.00	1.699	5.00
1.312	2.05	1.703	5.05
1.322	2.10	1.708	5.10
1.332	2.15	1.712	5.15
1.342	2.20	1.716	5.20
1.352	2.25	1.720	5.25
1.362	2.30	1.724	5.30
1.371	2.35	1.728	5.35
1.380	2.40	1.732	5.40
1.389	2.45	1.736	5.45
1.398	2.50	1.740	5.50
1.407	2.55	1.744	5.55
1.415	2.60	1.748	5.60
1.423	2.65	1.752	5.65
1.431	2.70	1.756	5.70
1.439	2.75	1.760	5.75
1.447	2.80	1.763	5.80
1.455	2.85	1.767	5.85
1.462	2.90	1.771	5.90
1.470	2.95	1.775	5.95
1.477	3.00	1.778	6.00
1.484	3.05	1.785	6.10
1.491	3.10	1.792	6.20
1.498	3.15	1.799	6.30
1.505	3.20	1.806	6.40
1.512	3.25	1.813	6.50
1.519	3.30	1.820	6.60
1.525	3.35	1.826	6.70
1.531	3.40	1.833	6.80
1.538	3.45	1.839	6.90
1.544	3.50	1.845	7.00

수표 III C%—結晶粒度

(%)	결정입도				(%)	결정입도			
	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8		No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
0.01	...	...	...	...	0.46	0.428	0.392	0.358	0.325
0.02	...	...	...	...	0.47	0.433	0.397	0.362	0.330
0.03	...	...	...	...	0.48	0.438	0.402	0.366	0.334
0.04	...	...	...	...	0.49	0.443	0.407	0.372	0.338
0.05	...	...	...	...	0.50	0.448	0.412	0.377	0.343
0.06	...	...	...	...	0.51	0.452	0.417	0.382	0.348
0.07	0.021	...	...	...	0.52	0.456	0.422	0.387	0.352
0.08	0.050	0.012	...	...	0.53	0.461	0.427	0.391	0.356
0.09	0.076	0.038	0.005	...	0.54	0.465	0.431	0.396	0.360
0.10	0.101	0.062	0.029	...	0.55	0.469	0.435	0.400	0.364
0.11	0.120	0.084	0.052	0.017	0.56	0.473	0.439	0.404	0.367
0.12	0.138	0.103	0.071	0.037	0.57	0.477	0.443	0.408	0.371
0.13	0.155	0.121	0.088	0.056	0.58	0.481	0.447	0.412	0.375
0.14	0.170	0.136	0.104	0.070	0.59	0.485	0.450	0.416	0.378
0.15	0.184	0.150	0.119	0.084	0.60	0.489	0.454	0.419	0.382
0.16	0.198	0.164	0.133	0.097	0.61	0.493	0.458	0.423	0.386
0.17	0.211	0.176	0.146	0.110	0.62	0.497	0.461	0.427	0.389
0.18	0.224	0.188	0.158	0.122	0.63	0.500	0.464	0.430	0.393
0.19	0.236	0.199	0.169	0.134	0.64	0.504	0.467	0.433	0.396
0.20	0.247	0.210	0.179	0.146	0.65	0.507	0.470	0.436	0.400
0.21	0.258	0.221	0.188	0.156	0.66	0.510	0.473	0.439	0.403
0.22	0.268	0.231	0.198	0.166	0.67	0.513	0.476	0.442	0.407
0.23	0.278	0.241	0.208	0.176	0.68	0.517	0.479	0.446	0.410
0.24	0.288	0.250	0.217	0.184	0.69	0.520	0.482	0.449	0.413
0.25	0.297	0.260	0.225	0.193	0.70	0.523	0.485	0.452	0.415
0.26	0.306	0.269	0.233	0.201	0.71	0.526	0.488	0.455	0.418
0.27	0.314	0.277	0.241	0.209	0.72	0.530	0.491	0.458	0.422
0.28	0.322	0.285	0.250	0.216	0.73	0.533	0.494	0.461	0.425
0.29	0.330	0.292	0.259	0.223	0.74	0.536	0.497	0.464	0.428
0.30	0.337	0.299	0.267	0.230	0.75	0.539	0.500	0.467	0.431
0.31	0.343	0.306	0.274	0.238	0.76	0.542	0.502	0.470	0.433
0.32	0.350	0.313	0.281	0.246	0.77	0.544	0.505	0.473	0.436
0.33	0.356	0.320	0.288	0.253	0.78	0.547	0.508	0.476	0.439
0.34	0.362	0.327	0.295	0.260	0.79	0.549	0.511	0.479	0.441
0.35	0.368	0.333	0.301	0.266	0.80	0.551	0.513	0.481	0.444
0.36	0.374	0.339	0.306	0.272	0.81	0.554	0.516	0.484	0.447
0.37	0.380	0.345	0.312	0.278	0.82	0.556	0.519	0.487	0.450
0.38	0.386	0.351	0.318	0.284	0.83	0.559	0.521	0.490	0.453
0.39	0.393	0.357	0.324	0.290	0.84	0.561	0.524	0.492	0.456
0.40	0.398	0.362	0.329	0.296	0.85	0.563	0.526	0.494	0.458
0.41	0.403	0.368	0.334	0.301	0.86	0.566	0.529	0.497	0.461
0.42	0.408	0.373	0.339	0.306	0.87	0.568	0.531	0.500	0.464
0.43	0.413	0.378	0.344	0.310	0.88	0.571	0.534	0.502	0.467
0.44	0.418	0.383	0.349	0.315	0.89	0.573	0.537	0.504	0.469
0.45	0.423	0.387	0.351	0.320	0.90	0.574	0.539	0.507	0.471

㉑ D_1 및 H 상관도표에서 산출

D_1 및 H 를 알고 있을 때 그림 14 를 이용하여 산출

㉒ H 의 계산

측정하고자 하는 냉각제에서 열처리한 각종 직경의 환봉을 절단하여 D_1 측정(그림 15 참조)한 후 그림 16 과 같이 D 와 D_1/D 그래프를 그린다. 그림 16 에서 나타난

곡선을 그림 17 에 일치시켜 H 를 산출한다. 여기서 얻을 수 있는 H 는 냉각제의 종류, 교반정도, 온도 및 성분 에 따라 다르며 D_1 나 D_c 를 계산하기 위한 수치로써 이용된다.

이와 같은 방법으로 산출한 D_1 , D_c 및 H 를 이용하여 IH , DH 및 단면 경도분포를 계산할 수 있으나, 계산의 근거가 되는 Data 가 연구자마다 틀린 경우도 있고, 실제와 일치하기에는 다른 여러가지 변화요인들이 있어 매우 정확하다고는 볼 수 없다.

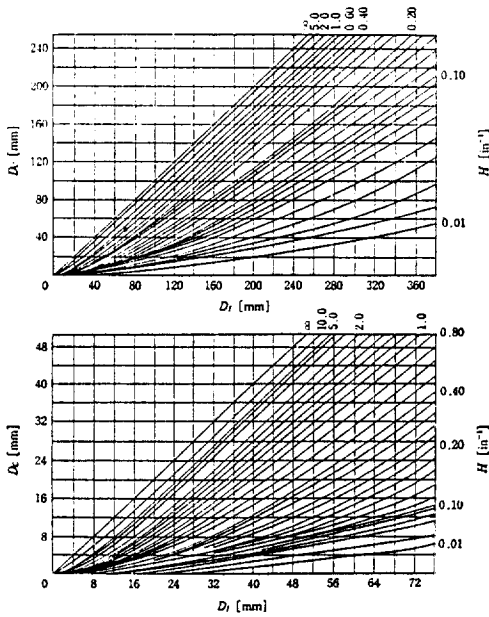


그림 14. D_1 - D_c - H 의 관계

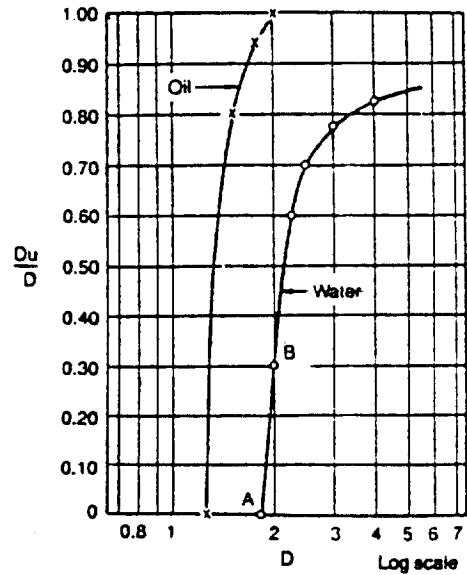


그림 16. SAE 3140 강의 유냉 및 수냉시 경화부와 미경화부의 비율

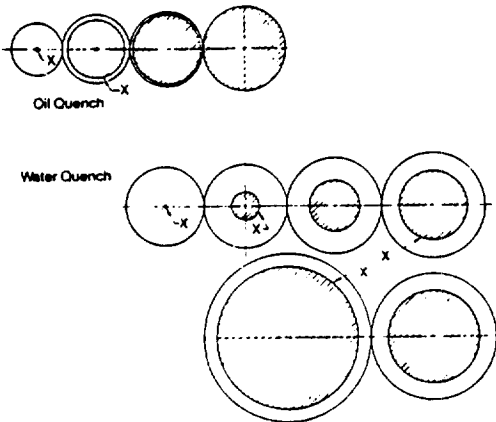


그림 15. SAE 3140 강의 규격별 유냉 및 수냉시의 경화부위 표시. 빗금친 부분이 미경화부

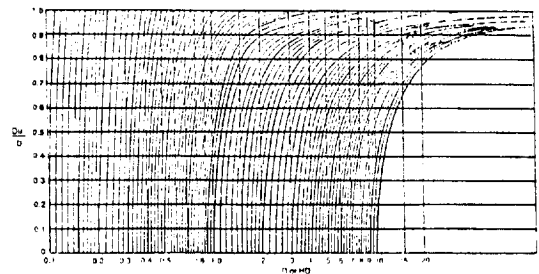


그림 17. 냉각제의 급냉도를 추정하기 위한 D_1/D 에 대한 D 또는 HP .

참고문헌

1. 열처리 기술편람-일본철강협회
2. 강의 열처리-일본철강협회
3. Principles of Heat Treatment of Steel-ASM
4. 알고 싶은 열처리-Nachi 열처리
5. 금속 재료학-김수영, 양훈영
6. 철강재료의 선택 Point-大和久重雄
7. Metal Handbook Vol.2-ASM