

技術解説

# 침탄공정의 이론설계 해설 Theoretical Design of Carburizing Process

한국기계연구소 김성완  
남기석

## 1. 경화깊이를 얻기 위한 제원설정

침탄열처리는 여러 요인에 의해 영향을 받기 때문에 이론적으로 완전히 기술하기 어렵다. 표 1의 SCM 415 강재를 예로들어 이론적인 침탄 열처리공정을 결정하는 방법을 기술하고자 한다. 이들 내용을 참고로 하여 현장실험을 통해 얻은 결과를 토대로 제품의 실제조업공정을 확립하여야 한다.

가. 유효경화깊이(ECD : HV550기준)의 탄소농도

ECD(effected case depth)에 영향을 미치는 주요인자는 가공 재료의 성분, 오스테나이트의 결정입도, 부품의 질량효과, 냉각매체의 냉각능(H-value) 등이다. 이들을 고려한 유효 경화깊이의 계산은 다음과 같다.

첫째, 표 2 및 1식으로부터 성분원소의 켈칭특성치합계를 구한다.

표 1. 강재 및 침탄요구조건

화학성분 (SCM 415)	C	Ci	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
	0.15	0.25	0.73	0.1	1.1	0.22	0.02	0.02
오스테나이트 결정입도	ASTM No.7 켈칭시의 냉각능			0.35in <sup>-1</sup>				
가공재의 크기	40×500L		유효경화깊이		2mm(HV550기준)			

$$\begin{aligned} \Sigma \log Mf &= \log Sif + \log Mnf + \log Nif + \log Crf \\ &+ \log Mof + \log Pof + \log Sof \dots\dots\dots (1) \\ &= 0.070 + 0.536 + 0.015 + 0.528 + 0.220 - 0.006 \\ &= 1.385 \end{aligned}$$

둘째, 표3으로부터 DIG을 구하면 오스테나이트 결정입도가 No.7이므로 DIG=0이다.

셋째,  $\Sigma \log Mf + DIG$ 을 구하면 1.385+0=1.385이다.

네째, 가공재료의 r/R을 그림 1 및 식 (2)로부터 구한다.

$$\frac{r}{R} = \frac{R - ECD}{R} = \frac{20 - 2}{20} = 0.9 \dots\dots\dots (2)$$

다섯째, 켈칭유의 H값(표4)이 0.35in<sup>-1</sup>, 환봉의 직경이 40mm,  $\frac{r}{R}$ 이 0.9인 경우 그림 2로부터 조미니거리(Jominy distance)는 12mm이다. 단, 냉각제의 H값이 불명료하면 표 4로부터 추정한다. 그리고 환봉이 아닌 경우는 그림 3을 참고하여 환산한다.

진술한 바와 같이  $\Sigma \log Mf + DIG = 1.385$ , JD=12mm 그리고 그림 4로부터 ECD가 2mm인 위치에서의 탄소농도는 0.36%임을 알 수 있다.

나. ECD를 얻기 위한 침탄시간

표 2. 합금원소의 퀴칭특성치  
(a) 주요합금원소의 퀴칭특성치 (logMf)

%	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	%	Mn	Si	Ni	Cr	Mn	%	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	0.006	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	0.000	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	0.763	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	0.506	0.163	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	0.025	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	0.036	0.175	0.228	0.78	0.556	0.189	0.109	0.429	0.524	1.66	0.866	0.335	0.210	0.651
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	0.70	0.878	0.340	0.215	0.670
0.26	0.271	0.073	0.040	0.193	0.251	0.81	0.563	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	-

%	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	%	Mn	Si	Ni	Cr	Mn	%	Mn	Si	Ni	Cr
0.34	0.329	0.093	0.061	0.239	0.306	0.89	0.599	0.210	0.122	0.466	0.563	1.88	0.930	0.365	0.240	-
0.35	0.336	0.095	0.062	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	0.063	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	0.065	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	0.067	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	0.106	0.068	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	0.069	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		0.50	-	-	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	0.125	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						

(b) 미량합금원소의 퀴칭특성치 (log Mf)

%	V	P	S	Al	Ti	%	V	P	S	Al	Ti	%	V	P	S	Al	Ti
0.01	0.061	0.011	-0.033	0.006	-0.006	0.06	0.140	0.064	-0.018	0.033	-0.053	0.11	0.066	-	-	0.059	-0.099
0.02	0.097	0.022	-0.036	0.012	-0.018	0.07	0.137	0.073	-0.020	0.039	-0.062	0.12	0.072	-	-	0.064	-0.112
0.03	0.137	0.034	-0.039	0.017	-0.025	0.08	0.124	0.083	-0.024	0.044	-0.072	0.13	0.061	-	-	0.069	-0.123
0.04	0.146	0.044	-0.041	0.022	-0.034	0.09	0.111	0.092	-0.027	0.049	-0.081	0.14	0.037	-	-	0.074	-0.134
0.05	0.146	0.054	-0.044	0.028	-0.043	0.10	0.097	0.101	-0.032	0.054	-0.092	0.15	0.025	-	-	0.079	-0.146

Harris에 의하면 침탄시 탄소포텐셜을 일정하게 유지 하면 탄소농도는 표면으로부터 심부까지 직선상으로 감소 소재의 탄소농도에 도달하는 것으로 알려졌다. 그러나 그림 5에 나타난 바와 같이 실험에 의한 곡선을 보

면 base부근에서 약 20%범위의 차이를 가져옴을 볼 수 있다.

이러한 결과를 기초로 한 예를 그림 6에 나타내었다. 종축의 C%는 침탄기의 탄소포텐셜이다. 그림 7에 의하

표 3. 오스테나이트 결정입도별 켈칭특성치(DIG)

오스테나이트결정입도	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
켈칭특성치	70	34	0	34

표 4. 켈칭냉각제의 냉각능(H-value, in<sup>-1</sup>)

표 반 정도	기름	물
약한 교반	0.2	0.5
중정도의 교반	0.35	-
강한 교반	0.5	1.0

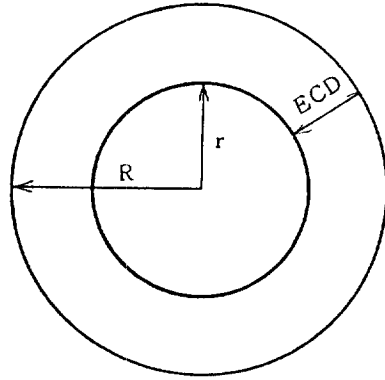


그림 1. 가공재료의 반경(R)과 유효침탄경화깊이 ECD

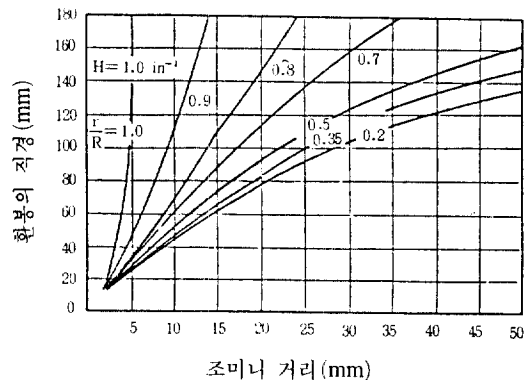
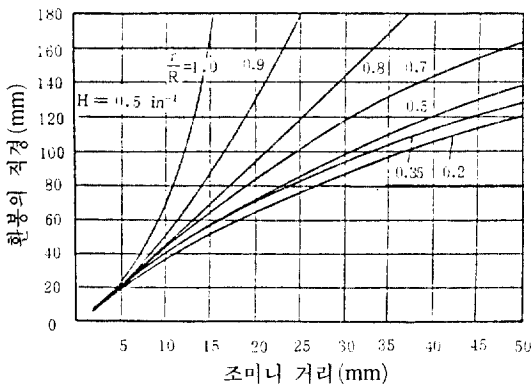
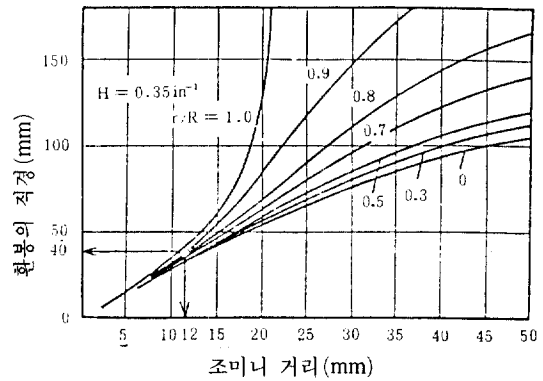
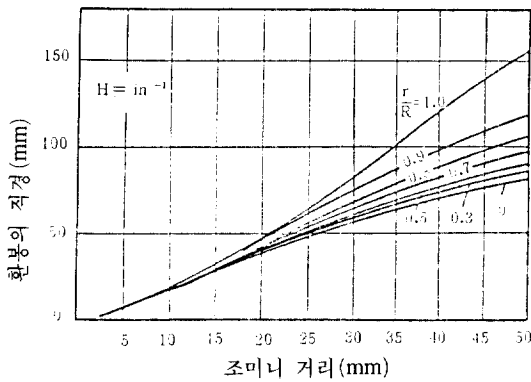


그림 2. H값 0.2, 0.35, 0.5 및 1.0in<sup>-1</sup>의 냉각설비에서 켈칭시 환봉 횡단면과 조미니 거리 관계

면 930°C에서 오스테나이트의 탄소고용한은 1.3%C이다. 침탄기의 C%는 침탄깊이, 경화층의 경도곡선, 분위기중의 sooting 및 경계성 등을 고려하여 결정한다. 침탄기의 C%가 높을수록 처리시간이 단축되어 경제적

이므로 여기에서는 1.3%C로 하였다.

침탄깊이를 나타내는 종축상에서 ECD가 2mm이고 유효 C%가 0.36인 교점 A와 횡축의 1.3%C인 곳을 직선으로 연장하면 가공재료의 탄소농도가 0.15%인 라인선

원형	육각	사각	장방형 또는 판
ER = T*	ER = 1.1 T	ER = 1.25 T	ER = 1.5 T
길이 L이 T보다 적을 때는, 단면은 두께 L의 판이라 생각한다.			

관(어떠한 단면이라도)

양단개방	일단 또는 양단이 반밀폐
ER=2T (주) L이 D보다 적을 경우는 두께 T판으로 생각한다. L이 T보다 적을 경우는 두께 L판으로 생각한다.	ER=2.5T D가 2.5inch보다 적을 경우 ER=3.5T D가 2.5inch보다 클 경우

\*ER은 : 상당상경 (equivalent round)

\*\*계산에는 큰 편을 사용한다.

그림 3. 간단한 형상단면의 상당직경

상의 B점과 만나게 되며 이때 침탄깊이는 2.45mm이다. 앞에 기술한 바와 같이 base부근의 경우 약 20%의 편차를 가져오므로 그의 1/2인 10%를 가산하면 전체 침탄깊이(TCD)는 다음과 같이 2.7mm가 된다.

$$TCD = 2.45 \times 1.1 = 2.7mm$$

전체 침탄깊이는 Harris에 의해 아래의 (3)식으로 표현되며, 이로부터 TCD를 얻기 위해 필요한 총 침탄시간 Tt는 (4)식과 같다.

$$TCD = K t^{0.647} \quad (930^{\circ}C \text{의 경우}) \dots (3)$$

$$Tt = \left( \frac{TCD}{0.647} \right)^2 = \left( \frac{2.7}{0.647} \right)^2 \dots (4)$$

≈ 17.4시간

그리고 침탄기의 소요시간(Tc)은 다음의 (5)식과 같으며, 6.4시간이 필요하다. 본 계산에서 확산기의 C%를

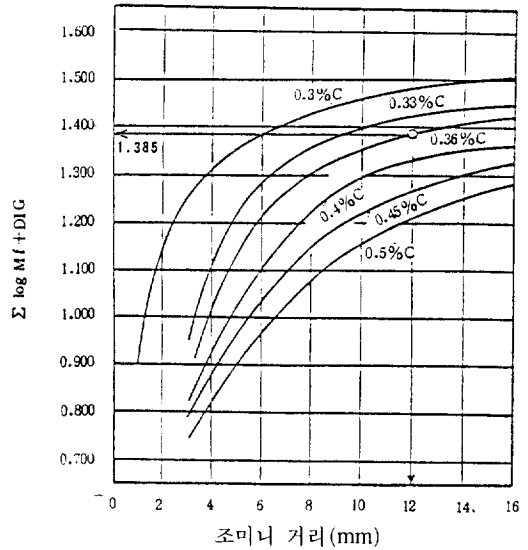


그림 4. JD와 ECD(HV 550)위치의 C% 관계

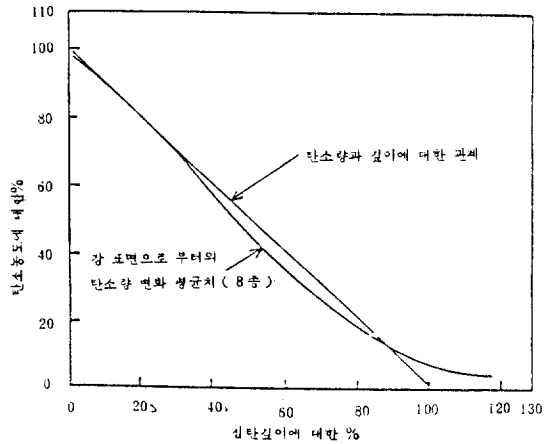


그림 5. 탄소농도에 대한 깊이의 표준곡선과 평균곡선

는 0.85로 하였다.

$$Tc = Tt \left( \frac{Ca - Co}{Cc - Co} \right)^2 = 17.4 \left( \frac{0.85 - 0.15}{1.3 - 0.15} \right)^2 \dots (5)$$

≈ 6.4시간

여기에서 Cd는 확산기 즉 가공제의 최종 표면탄소농도이며, Co는 소재자체의 탄소농도 그리고 Cc는 침탄기의 탄소농도이다. 한편 확산기의 시간을 Td라 하면 T = Tt - Tc = 11시간이다.

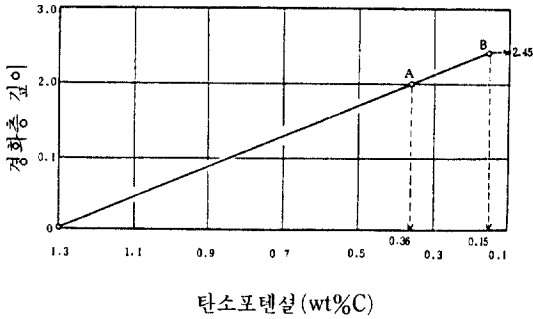


그림 6. C.P 1.3%한 침탄깊이 일례

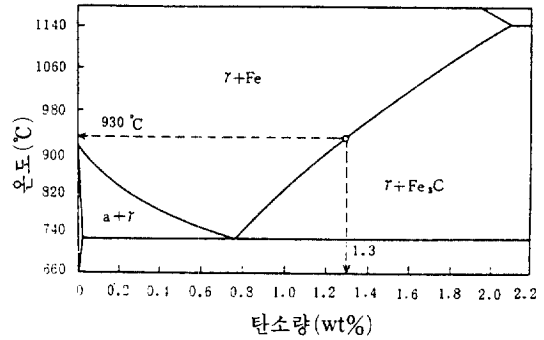


그림 7. Fe-C계 상태도 시간(sec)

2. 침탄 및 확산기의 분위기 조성

동일한 탄소포텐셜하의 침탄분위기에서도 강종에 따라 표면탄소 농도가 달라진다. 이러한 영향은 아래의 (6), (7)식 Correction factor에 의해 보정되며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\log C_f = 0.055Si\% - 0.013Mn\% - 0.040Cr\% + 0.014Ni\% - 0.013Mo\% \dots\dots\dots(6)$$

$$C_f \cdot C_m = C_p \dots\dots\dots(7)$$

여기에서  $C_f$ 는 보정계수,  $C_m$ 은 탄소농도,  $C_p$ 는 가스 침탄 분위기 중의 탄소포텐셜이다.

한편, 표면탄소농도에 크게 영향을 미치는 Cr과 Ni을 함유하는 강의 경우에는 다음의 (8) 및 (9)식이 사용된다.

$$C_x = C_o + 0.07Cr\% \dots\dots\dots(8)$$

$$C_x = C_o - 0.025Ni\% \dots\dots\dots(9)$$

여기에서  $C_x$ 는 x%Cr 또는 x%Ni강에 대한  $C_p$ 이며  $C_o$ 는 탄소강에 대한  $C_p$ 를 나타낸다.

위의 (8) 및 (9)식을 조합하면 아래의 (10), (11)식을 얻을 수 있으며, 침탄 및 확산기의  $C_p$ 설정치를 계산하면 다음과 같다.

$$C_x = C_o + (0.07Cr\% - 0.025Ni\%) \dots\dots\dots(10)$$

$$C_o = C_x - (0.07Cr\% - 0.025Ni\%) \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{침탄기의 } C_p = 1.3 - (0.07 \times 1.1 - 0.025 \times 0.1) = 1.23$$

$$\text{확산기의 } C_p = 0.85 - (0.07 \times 1.1 - 0.025 \times 0.1) = 0.78$$

3. 퀴칭가열온도 설정

퀴칭가열온도는 기본적으로 오스테나이트구역에서 설정하며, 페라이트가 공존하는 영역으로 가열하면 퀴칭시 가공재료의 심부조직차이에 의해 경도가 달라져 변형을 초래한다. 침탄한 다음 공냉하여 재가열퀴칭할 때의 가열온도는 다음 (12)식을 이용하여 계산한다.

$$Ac_3(^\circ C) = 908 - 233.7C\% + 30.49Si\% + 34.43Mn\% + 438.5P\% - 23Ni\% + 37.92V\% + 2(100C\% - 4 + 6Ni\%) \dots\dots\dots(12)$$

본 공정설계에서 예로 든 SCM415강재에 대한  $Ac_3(^\circ C)$ 을 계산하면 다음과 같다.

$$Ac_3(^\circ C) = 908 - 33.6 + 7.6 - 25.1 + 8.8 - 2.3 = 863.4^\circ C$$

침탄한 다음 퀴칭온도까지 노냉하여 그 온도에서 유지한 후 퀴칭하는 경우 퀴칭온도는 다음의 그림 8을 참고로 하여 결정한다.

냉각속도가 빠른 경우 일반적으로 과냉현상에 의해 퍼얼라이트변태의 개시온도가 낮아지고, 그 반대인 경우는 높아진다. 침탄온도로부터 노중에서 퀴칭온도까지 내려가는 시간과 그 온도에서의 유지시간을 합하여 1시간인 경우 3600초이므로 1시간에서의 PS점은 830°C이다. 그러나 퀴칭온도는 이보다 약간 높은 온도가 필요하며, 적정온도는 840°C이다.

퀴칭온도가 높으면 잔류오스테나이트가 많이 생성되고, 퀴칭조직인 마르텐사이트가 조대해져 변형이 증대하며, 퀴칭균열을 발생시킨다. 이와 반대로 낮으면 심부와의 조직차이가 크고, 강도가 불균일하며, 심부경도의 편차 및 변형이 일정하지 않게 된다.

따라서 적정 퀴칭온도를 설정하는 것이 대단히 중요하다.

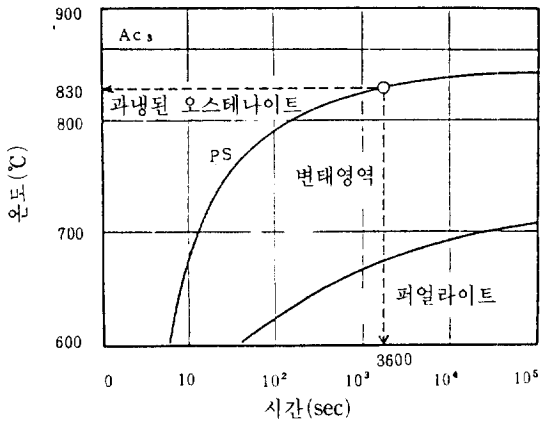


그림 8. SCM 415강의 CCT곡선의 PS선

4. 냉각과 잔류오스테나이트

퀀칭냉각조의 냉각능(H값)을 실측하여 그림 18과 같은 관계를 작성한다. H값을 실측하지 못한 경우에는 앞에 제시한 표 13을 참고로 하여 H값을 추정한다.

냉각할 때에 마르텐사이트변태 온도구역에서 급냉하면 퀀칭균열이나 변형이 크고 잔류오스테나이트( $\gamma_R$ )량은 감소한다. 그러나 그 구역에서 서냉하면 이러한 경향이 적어진다. 따라서 Ms점을 정확히 파악하고, Ms점이하에서 냉각속도 및 냉각제로부터의 추출온도를 적절하게 설정하는 것이 매우 중요하다.

Ms점의 계산식은 매우 큰 차이가 있으나, 신뢰성이 높은 다음의 (13)식이 많이 쓰이고 있다.

$$Ms(^\circ C) = 499 - 300C\% - 33Mn\% - 22Cr\% - 17Ni\% - 11Si\% - 11Mo\% - 250N\% \dots \dots \dots (13)$$

위의 식을 이용하여 침탄처리된 SCM 415강재에 대한 각 부위의 Ms점을 계산하면 다음과 같다.

가. 심부의 탄소농도는 0.15%C이므로 Ms( $^\circ C$ )점은 398.8 $^\circ C$ 이다.

나. 유효경화층부는 0.36%C이며, 이때 Ms( $^\circ C$ )점은 335.8 $^\circ C$ 이다.

다. 표면탄소농도는 0.85%C이며, 따라서 Ms( $^\circ C$ )점은 190 $^\circ C$ 이다.

한편 냉각정지온도(Tq)와 잔류오스테나이트( $\gamma_R$ )량의 관계식을 이용하여 냉각정지온도(Tq) 100 $^\circ C$ , 50 $^\circ C$  및 20 $^\circ C$ 에서 계산한  $\gamma_R$ 량은 각각, 37%, 21% 및 15%이다.

5. 침탄열처리 공정사양

전술한 결과를 토대로 하여 피처리물의 전체조건 및 열처리공정사양을 기술하면 표 5와 같다.

표 5. 침탄 열처리 공정사양

전 제 조 건		실 정 조 건	
항 목	사 양	항 목	사 양
강 종	SCM 415	침탄온도	930 $^\circ C$
화 학 성 분	표1참조	전체침탄시간	17.4hr(침탄 : 6.4, 확산 : 11)
오스 테 나 이 트 결 정 입 도	ASTM No.7	침탄기의 C.P	1.23%C (1.3%C)
가공재의크기및 형상	40 $\phi$ × 500L	확산기의 C.P	0.78%C (0.85%C)
퀀칭유의냉각능(H)	0.35in <sup>-1</sup>	퀀칭온도	840 $^\circ C$
유효경화 깊이	1.8~2.3mm	퀀칭온도 유지시간	30분
표면탄소농도목표	0.85%C	노냉시간	30분
잔류오스테나이트 허용량	15%	냉각정지 온도	20 $^\circ C$