

## 현장기술 초심자를 위한 열처리의 기초(제 2보) - 강의 종류와 켄칭 방법 -

정병호 · 김무길  
부경대학교 신소재공학부

### Heat Treatment of Steel for Beginners(2) -Evaluation of Continuous Cooling and Conditions of Quenching-

B. H. Jung and M. G. Kim

Div. of Material Science & Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

#### 3. 강의 종류와 켄칭 방법

##### 3.1 켄칭의 지배 인자와 켄칭성

일반적으로 강의 켄칭(燒入, Quenching, 담금질) 상태는 켄칭 정도, 켄칭시의 경화 깊이 및 이에 대응하는 현미경 조직에 의하여 판단된다. 충분히 켄칭된 강의 최고 경도는 탄소 함유량으로만 결정되나, 켄칭시의 경화 깊이는 주로 강 자체의 경화에 대한 용이성(켄칭성), 냉각제의 냉각능 및 강재의 치수 등 3가지 인자에 의하여 지배된다. 실용 부재에서는 켄칭시의 경화 깊이가 부재의 성능에 크게 영향을 미치므로 이러한 인자들을 정량적으로 파악하여 켄칭에 대한 경화 거동을 제어하는 것이 중요하다[1-3]. 본 기술 자료에서는 먼저 켄칭성의 정량적인 평가법(추정법)으로 잘 이용되고 있는 연속냉각변태선도(CCT 곡선도), 조미니 곡선(Jominy Curve)도 및 이상임계직경(理想臨界直徑) D1에 대하여 정리하였다.

##### 3.1.1 연속냉각변태선도(CCT 곡선도)

강을 오스테나이트로 상태에서 냉각하면 평형상태도에 나타나는 각각의 변태온도(평형상태도상의  $A_3$ 나  $A_{cm}$ ,  $A_1$  등)는 냉각속도의 증가에 따라 연속적으로 저하되어 변태개시에서 종료까지 어떤 구간을 가지게 된다. 또 평형상태에서 보이지 않는 베이나이트(Bainite) 변태가 나타나게 되며, 냉각속도가 더 증가하면 확산변태가 일어나지 않고 마르텐사이트 변태가 생긴다. 이러한 각 변태온도의 냉각속도에 대한 변화를 실험하지 않고 계산으로 구하여 시간과의 관계로 나타낸 것이 연속냉각변태선도(일반적으로

Continuous Cooling Transformation diagram의 첫자를 따서 CCT 곡선도라 부르기 때문에 이하 CCT 곡선도라 부름)이다. 그림 1[4]과 같이 고온의 금속재료를 동일한 속도로 냉각하는 것은 곤란하고, 또 냉각제가 다르면 강의 변태가 생기는 800~500°C에서의 냉각 거동도 크게 다르게 된다.

이러한 현상 때문에 로냉, 공냉, 유냉, 수냉 등의 냉각제를 바꾸어 냉각속도를 변화시켜도 유연한 CCT 곡선을 얻을 수 없다. 따라서 동일한 형태의 냉각곡선을 나타내도록 어느 1개의 변수를 바꾸어 냉각속도를 변화시키는 일련의 냉각곡선들에 의해 변태 개시점과 완료점을 구한 후 CCT 곡선도를 작성하는 것이 일반적이다[3,5]. 여기서 일련의 냉각속도 곡선들은 구체적으로 다음과 같은 방법에 의하여 얻어진다. ①직경이 다른 원주형 시험편을 일정한 방법으로 냉각(예를 들면 공냉)한다. 시험편 중심부의 냉

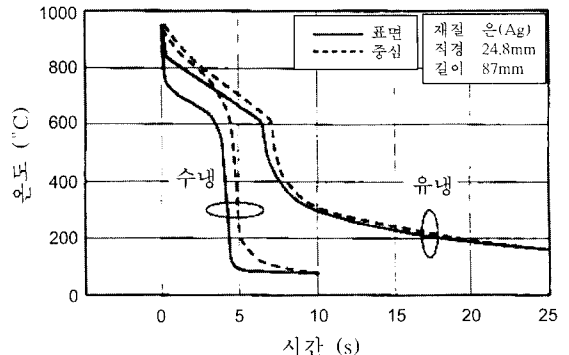


그림 1. 물과 기름에 침적한 은(Ag)의 냉각곡선.

각곡선은 속도가 다른 동일한 형상의 곡선으로 된다. ②동일한 시험편을 열용량이 크고 작은 서로 다른 로(爐)에서 로냉한다. 이 방법은 비교적 변태가 늦은 강의 CCT 곡선을 구할 때 유효하다. ③후술하는 죠미니 시험편의 냉각 끝단부로부터 각 위치에 대한 냉각곡선도 속도가 다른 동일 형상의 곡선이 된다 [5]. 또 변태온도는 각각의 냉각곡선에서 여러 가지 냉각시간을 부여한 후 시험편을 완전히 냉각시킬 때 얻어지는 조직을 관찰하거나 또는 열팽창 장치를 이용한 열팽창 수축곡선으로 구한다. CCT 곡선을 실험적으로 구하는 방법에는 Liedholm 법(죠미니 시험 이용)이나 Steven 법(열팽창 수축곡선을 이용) 등이 있다. 한편, 등온변태선도(TTT 곡선도, IT 곡선도, S 곡선도 등으로 부르고 있다)를 기초로 계산식에 의해 일정 냉각속도에 대한 CCT 곡선을 구할 수 있다(Grange-Kiefer 법). 이 방법에서 얻어지는 CCT 곡선도는 냉각속도를 제어하기 때문에 실제의 냉각속도로 얻어지는 CCT 곡선도와 잘 일치한다. 그러나 실제의 켈칭 처리는 일정한 냉각속도가 아니기 때문에 실험에서 구한 CCT 곡선도와는 상당한 차이가 있어 주의할 필요가 있다[6]. 그림 2[6]는 공석강(共析鋼)의 CCT 곡선도이다. 이 그림에서와 같이 CCT 곡선도에는 변태곡선과 같이 일련의 냉각곡선들을 나타내고 있다.

각각의 냉각곡선 아랫 부분에는 냉각 후의 경도 값을 나타내고 있다. 이 그림의 경우는 비커스 경도가 표시되어 있지만 로크웰 경도로 나타내는 경우도 있다. 각각의 냉각곡선에는 이것을 구하는 방법에 따라 냉각속도(일정 냉각속도의 경우)나 켈칭 끝단부

로부터의 거리(죠미니 시험편을 이용하여 구한 경우) 등이 표시되고 또 각각의 변태가 완료되는 점(냉각곡선과 변태곡선이 만나는 점)에는 이러한 변태가 발생한 정도를 %로 표시하는 경우도 있다. 여기서 그림 2의 공석강에 대한 연속냉각변태를 알아보자. 그림에는 아공석강(亞共析鋼)에서 볼 수 있는 베이나이트 변태영역(일반적으로 공석강이나 과공석강에서는 볼 수 없음)이 존재하며, 또 페라이트 석출(析出)도 약간 나타나고 있어 아공석강과 유사한 변태 거동을 보이고 있다. 변태곡선(變態曲線) 중의 P<sub>5</sub>는 퍼얼라이트 변태의 개시를 나타내며 P<sub>100</sub>는 퍼얼라이트 변태의 완료를 나타낸다. 이러한 2개의 곡선은 장시간 축에서 AC1(평형 상태에서의 공석변태 온도) 선을 볼 수 있다. 또 M<sub>5</sub>는 마르텐사이트 변태의 개시를, 그리고 M<sub>100</sub>는 마르텐사이트 변태의 완료를 나타내고 있다. 한편 M<sub>100</sub>는 참고 문헌에 표시하고 있지 않아 일점쇄선으로 표시 하였다. 그림 중의 ①과 같은 냉각곡선에 따라 냉각하면 P<sub>5</sub>와의 교점에서 오스테나이트로부터 페라이트가 7% 석출하고 P<sub>5</sub>에서 퍼얼라이트 변태가 개시된다. 그리고 나머지 93%의 오스테나이트 전부가 P에서 퍼얼라이트로 변태한다(여기서 나타내는 변태의 정도는 페라이트가 7%, 퍼얼라이트가 93%로 합계 100%가 되는 것에 주의). 그림 중의 ②와 같은 냉각곡선에 따라 냉각하면 M<sub>5</sub>에서 마르텐사이트 변태가 개시하고 M<sub>100</sub>에서 완료한다. ①과 ②사이의 변태 거동에 대하여 그림 3(a)에 간단히 요약하여 나타내었다. 일반적으로 공석강에는 베이나이트 변태가 나타나지 않기 때문에 이 그림에서는 베이나이트 변태가 생기지 않는 것으로 되어 있다. 그림 3(a) 중의 ③과 같은 냉각곡선에 따라 냉각하면 P<sub>5</sub>에서 퍼얼라이트 변태가 개시하고 점선과의 교점에서 퍼얼라이트 변태가 중단된다. 그 후 퍼얼라이트+오스테나이트 상태 그대로 냉각되어 M<sub>5</sub>에서 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태를 개시한다. ②의 냉각곡선은 마르텐사이트가 최초로 생기는 최소한의 속도로 하부(下部) 임계냉각속도라 부른다. ④의 냉각곡선은 마르텐사이트만 생기는 최소한의 냉각속도로 상부(上部) 임계냉각속도라 부르고 있다. 이와 같이 임계냉각속도가 적은(늦은) 편이 깊은 켈칭이 되기 때문에 켈칭성이 우수한 강이라 말하고 있다.

그림 3(a)의 CCT 곡선도를 근거로 횡축에 강의

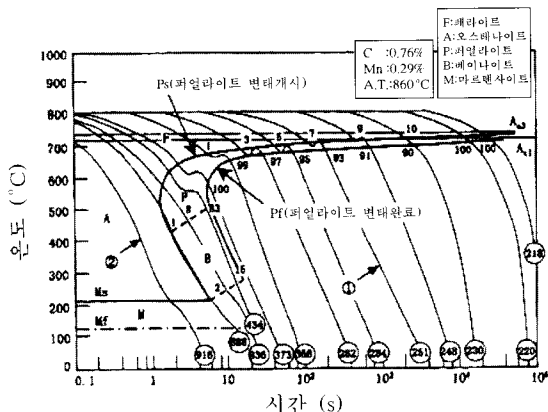


그림 2. 공석강(0.76% C)의 CCT 곡선도.

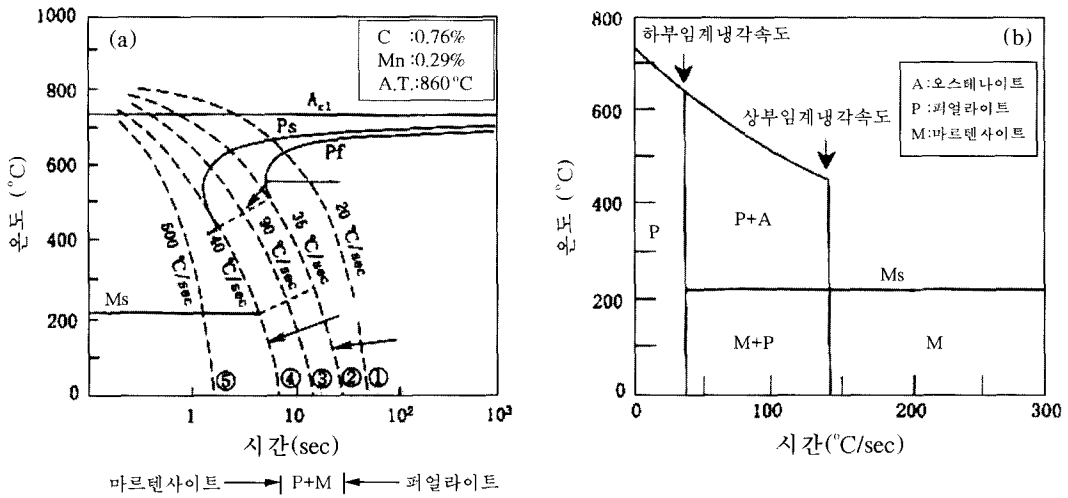


그림 3. 공석강의 CCT 곡선(a) 및 변태온도의 냉각속도 의존성(b).

변태가 생기는 800~500°C에서의 평균 냉각속도를, 그리고 종축을 온도로 하여 변태의 상태를 나타내면 그림 3(b)와 같이 퀴칭성을 평가할 때 이해하기 쉬운 그림이 된다. 또 CCT 곡선도로부터 퀴칭경도-냉각속도의 곡선도를 얻을 수 있어 퀴칭성은 경도와의 관계로 볼 수 있다. 여기서 횡축은 800~500°C에서의 평균 냉각속도, 그리고 종축은 CCT 곡선도에 나타내어지는 냉각 후의 경도이다.

그림 4는 S30C(탄소강), SCr430(크롬강), SCM430(크롬 몰리브덴강)에 대한 퀴칭경도-냉각속도의 곡선도이다[7]. 그림 중의 화살표는 개략적인 임계냉각속도를 나타낸다. 여기서 임계냉각속도는 후술하는 쇼미니 곡선도 및 이상임계적경 D1에 의한 퀴칭성의

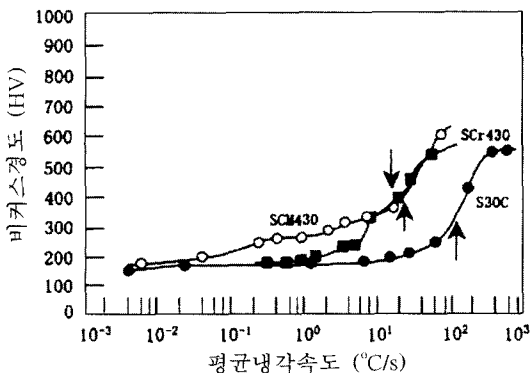


그림 4. 퀴칭 경도-냉각속도의 곡선도.

평가법과 같이 50%의 마르텐사이트가 되는 냉각속도를 채택하였다. 상부 임계냉각속도를 초과하면 경도는 거의 일정하게 된다. 그림에 표시한 것과 같이 탄소강은 합금강에 비하여 임계냉각속도가 커서 퀴칭성이 나쁜 것으로 알려져 있다. 그러나 역으로 SCM430은 퀴칭성이 우수하며 경도의 저하가 완만하다. 또한 이 그림은 후술하는 쇼미니 곡선도의 경향과 잘 일치한다. 이상 설명한 것이 CCT 곡선도로부터 퀴칭성을 예측하는 기본적인 사고 방법이며 후술하는 2개의 방법과 비교하면 CCT 곡선도는 변태 거동을 예측할 수 있는 점이 큰 특징이다. 그러나 이용하는 냉각곡선들이 변하면 CCT 곡선도도 변하기 때문에 정밀도가 높은 실제의 변태 거동을 예측하기 위해서는 실제의 냉각 거동에 대응하는 CCT 곡선도가 필요하다. CCT 곡선도를 만드는 것은 많은 노력이 필요하므로 기존의 자료는 비교적 적다. 따라서 기존 자료를 참고하여 변태 거동을 예측할 때에는 위와 같은 주의가 필요하다.

### 3.1.2 쇼미니 곡선도

퀴칭성을 종합적으로 평가하기 위해서는 앞 항의 CCT 곡선도를 작성하여 임계냉각속도를 구하는 것이 가장 정확한 방법이지만 CCT 곡선도를 작성하는 것은 어렵기 때문에 옛날부터 록크웰 인치법(S-A-C 법), 파면 검사법, P-F 법, U 곡선법 등의 여러 가지 퀴칭성 시험 방법이 사용되고 있지만 이 중에서

현재 가장 많이 공업적으로 사용되는 것으로 죠미니 식 끝단 켈칭 시험[9](여기서는 간단히 죠미니 시험이라 부름)이 있다. 죠미니 시험은 길이 100 mm의 원주형 시험편을 규정의 오스테나이트 구역 온도(켈칭 온도)로 가열하고 이의 끝단에 물을 분사하여 켈칭한 후, 길이 방향으로 경도 분포를 측정하여 켈칭성을 결정하는 것이다. 이것에 의하여 그림 5[1]와 같은 죠미니 곡선(켈칭성 곡선)이 얻어진다.

이 그림에서 연화(軟化)되는 변곡점(變曲點)은 약 50%의 마르텐사이트 조직으로 되며, 이 위치까지의 거리를 죠미니 거리, 그리고 이 때의 경도를 임계경도라 부른다. 죠미니 거리가 클수록 냉각속도가 낮아도 켈칭이 되는 것을 나타낸다(즉 켈칭성이 크다). 또 이러한 표준 죠미니 시험법은 켈칭 끝단에서부터 거의 경화되지 않는 강(극히 켈칭성이 낮은 강)이나 공냉해도 완전히 경화되는 강(극히 켈칭성이 높은 강)에는 적용될 수 없다. 이러한 경우에는 개량법을 이용할 필요가 있다[5-8]. 그림 6은 S40C, SCr440, SCM440의 죠미니 곡선도이다[1-8].

그림 중의 화살표는 각각의 죠미니 곡선에 대한 변곡점이다. 이 그림으로부터 탄소강은 합금강에 비하여 켈칭성이 나쁜 것으로 나타나 있다. 그러나 반대로 SCM430은 켈칭성이 우수하여 경도의 저하도 완만하다. 이 그림에서 화학 조성은 약간 다르지만 그림 4에 나타난 켈칭성 경향과는 잘 일치하고

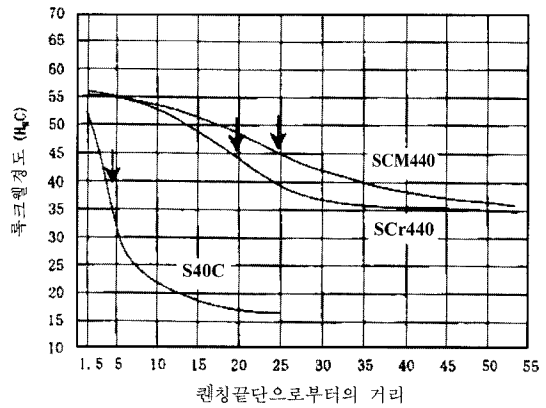


그림 6. 탄소강 및 합금강의 죠미니 곡선도.

있다. 이상이 죠미니 곡선도를 이용하여 켈칭성을 구하는 방법이다. JIS에서는 켈칭용의 구조용 강에 대하여 끝단 켈칭성을 보증하기 위하여 성분 외에 각 강종에 대한 죠미니 곡선의 상한과 하한을 규정하고 있다. 이러한 죠미니 값의 상한과 하한을 나타내는 곡선은 1개의 밴드(Band)를 나타내기 때문에 이것을 켈칭성 밴드(H Band)라 부르며 H 밴드가 규정되어 있는 강을 H 강[10]이라 부르고 있다[1].

### 3.1.3 이상임계직경 $D_1$

이상의 2가지는 실제로 강의 켈칭 변태 거동 또는 켈칭 경화 거동으로부터 켈칭성을 구하는 방법이다. 이에 대하여 켈칭성을 지배하는 탄소 함유량, 합금 원소량, 오스테나이트 결정입도의 3가지 인자로부터 계산에 의하여 켈칭성을 추정하는 방법이  $D_1$  법이다. 합금 원소나 탄화물이 전부 오스테나이트에 고용되고, 또 오스테나이트가 균일하다는 가정에서 될 수 있는 한 빠르게 냉각(이상적인 켈칭)할 때 중심부까지 켈칭 되는 최대 직경(기본적으로 50%의 마르텐사이트가 되는 직경)이 이상임계직경  $D_1$ (inch)이다[2,8].  $D_1$ 은 우선 그림 7(a)[2,8]을 이용하여 C%와 결정입도로부터 기본적인 켈칭성  $D_{1B}$ (Fe-C 합금의 켈칭성)를 구하고, 그림 7(b)[1,2,8]로부터 구한 각 주요 합금 원소의 켈칭성에 대한 인자를 곱하여 (1)식과 같이 구한다.

$$D_1 = D_{1B} \times f_{Mn} \times f_{Si} \times f_{Cr} \times f_{Mo} \times \dots \quad (1)$$

여기서  $D_{1B}$ 는 C%와 결정입도에 의하여 결정되는

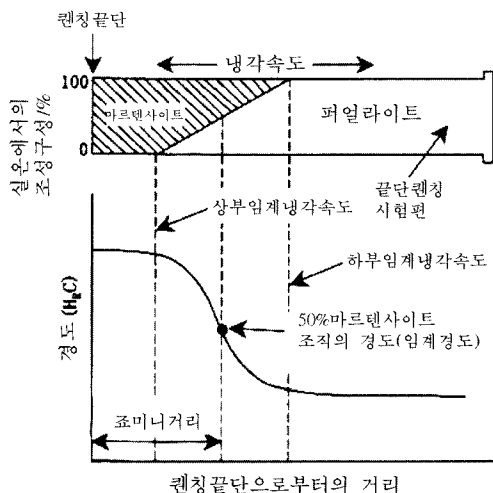


그림 5. 공석강의 죠미니 곡선과 변태 조직, 냉각속도의 관계 설명도.

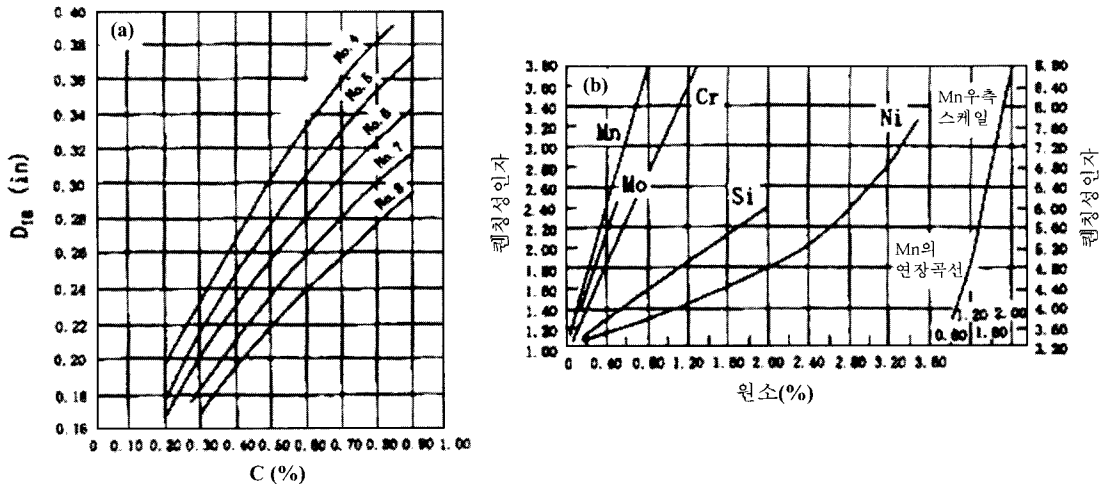


그림 7. D1B-C%-결정입도의 관계(a)와 합금 원소의 켈칭성 인자(b).

기본적인 켈칭성, 그리고  $f_{Mn}$ ,  $F_{Si}$ ...는 각각 Mn, Si...의 켈칭성 인자이다. 켈칭성 인자는 Grossman, Kramer, Boyd, Crafts 등의 그림에 나타나 있지만, 0.35~ 0.60%C의 기계구조용 강에 매우 적합한 그림 7(b)의 Grossman에 의한 것이 잘 이용되고 있다 [2,8]. 표 1[2.8]은 이상의 방법에서 구한 JIS 합금강의  $D_1$ 이다. 3.1.1 항의 그림 4에서 비교한 강종에 대해서 보면, S30C의  $D_1$ 은 17.50 mm, SCr430의  $D_1$ 은 57.50 mm, SCM430의  $D_1$ 은 97.50 mm이다. 이상이 이상임계직경  $D_1$ 을 이용하여 켈칭성을 구하는 방법이다. 여기서 설명한 방법은 이상임계직경  $D_1$ 을 곱셈 인자로 구한 것이지만 서로 합하여 구하는 방법도 있다[2,8].

### 3.2 냉각제의 냉각능

#### 3.2.1 냉각곡선과 냉각 기구

강의 열처리에서 냉각을 지배하는 요소는 열전도(강 부재의 내부에서 열이 전도되는 방법)와 열전달(부재 표면에서 주위로 열이 방출되는 속도)이다. 열전도를 지배하는 것은 부재 형상의 두께와 비열, 열전도율, 잠열의 물성 값 등이다. 한편 열전달을 지배하는 것은 냉각제의 냉각능(열전달율), 부재의 표면 온도와 냉각제의 온도 차이 및 부재의 표면적이다. 냉각제의 냉각능은 부재의 표면 온도나 냉각제의 온도, 교반의 강도 등에 의하여 영향을 받는다[4,11]. 또 부재의 재

표 1. JIS 합금강의 켈칭성( $D_1$ )

강종	$D_1$ (in)	$D_1$ (mm)	강종	$D_1$ (in)	$D_1$ (mm)
S30C	0.70	17.50	SNC415	1.30	32.50
S45C	0.85	21.25	SNC815	3.15	78.75
S50C	0.90	22.25	SNCM431	5.4	135.00
S55C	0.95	23.75	SNCM625	8.8	220.00
SCr430	2.3	57.50	SNCM630	> 17	> 425.00
SCr435	2.5	62.50	SNCM240	3.85	96.25
SCr440	2.6	65.00	SNCM7	4.1	102.50
SCr445	2.8	70.00	SNCM439	6.3	157.50
SCr415	1.6	40.00	SNCM447	6.8	170.00
SCr420	1.9	47.50	SNCM220	2.50	62.50
SCM432	3.3	82.50	SNCM415	2.45	61.25
SCM430	3.9	97.50	SNCM420	2.85	27.85
SCM435	4.2	105.00	SNCM616	18.6	465.00
SCM440	4.5	112.50	SMn438	1.46	36.50
SCM445	4.7	117.50	SMn443	1.56	39.00
SCM415	2.7	67.50	SMn420	0.95	23.75
SCM420	3.1	77.50	SMnC443	3.35	83.75
SCM421	3.5	87.50	SMnC420	2.05	51.25
SCM822	4.3	107.50	SACM645	5.6	140.00
SNC236	2.65	66.25			
SNC631	3.50	87.50			
SNC836	4.70	117.50			

비고 : (1) 화학 성분은 JIS 의 중간 값  
(2) 결정입도는 8

질에 의해서도 변화된다[12]. 냉각제의 냉각능은 냉각 곡선으로부터 알 수 있다. 냉각곡선은 냉각제의 종류(물, 기름, 수용성 켈칭제, 염욕, 금속욕, 가스 등)와 냉각제의 온도나 교반에 의해 크게 변화된다. 각각의 냉각곡선에는 몇 개의 굴곡부가 나타나 냉각속도에 변화가 생긴다. 이것은 각 단계에서의 냉각 기구가 다른 것을 의미한다. 강을 켈칭할 때에 임계냉각속도 이상의 냉각능을 가진 냉각제를 사용하기 위해서는 이러한 변화를 충분히 아는 것이 중요하다. 여기서는 냉각곡선에서 나타나는 각 냉각 기구와 이에 미치는 냉각 조건의 영향에 대하여 정리하고자 한다. 또한 냉각제의 냉각능을 구하기 위해서 시험편으로는 은봉(銀棒)이 잘 이용된다. 이것은 강을 시험편으로 하면 냉각곡선에서 냉각과정의 각 단계가 불명확하게 되나 은봉을 시험편으로 하면 냉각곡선의 각 단계가 명확하게 관찰되고 냉각제의 냉각 거동을 충분히 표현할 수 있기 때문이다. 은봉을 사용해도 냉각 과정과 기구는 거의 동일하게 진행된다. 그림 8은 그림 1의 수냉에 의한 표면의 냉각곡선에 각 단계의 열전달 기구를 덧붙인 것이다.

I은 표면에 증기막이 만들어 질 때까지의 초기 온도 강하(고액 접촉 단계)이다. 켈칭하는 순간에 고온으로 가열된 시험편은 매우 빠르게 냉각된다. 한편 주위의 물은 시험편의 열에 의하여 급속히 가열되어 비등점에 도달하면 냉각 기구는 다음 단계로 이동한다. 또한 냉각곡선을 실제로 측정하면 초기의 고액(固液) 접촉 단계가 명확하게 나타나지 않는 일이 많다. II는 표면을 증기막이 덮는 막의 비등, 즉 증기막 단계이다. 이 단계는 수증기를 통하여 열의 이동이 이루어진다. 기체의 열전도율은 매우 적기 때문에 냉각속도는 완만하게 된다. 시험편의 형상이나 표면상태 등에

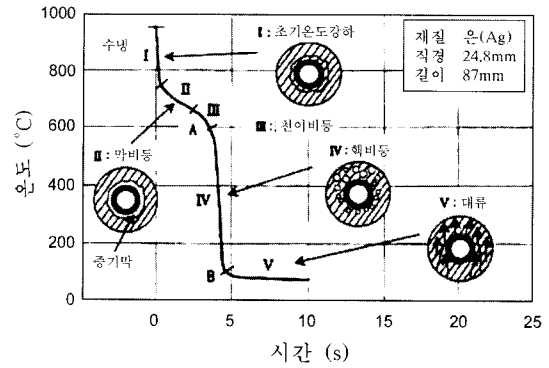


그림 8. 냉각곡선과 열전달 과정.

따라 이 단계가 없는 경우도 있다. III은 증기막이 부분적으로 절단되어 물의 접촉이 부분적으로 이루어지는 천이비등(II의 증기막 단계와 IV의 핵비등 단계의 천이 단계) 단계이다. 냉각제의 종류나 온도에 따라 천이 단계가 보이지 않는 경우도 있다(그림 1의 기름 냉각). IV는 물이 시험편에 직접 뿌려져 증발열을 탈취, 제거하는 핵비등(핵비등 단계) 단계이다. 표면 온도가 저하하여 수증기 막을 안정하게 유지시킬 수 없는 상태가 되면 수증기의 발생은 시험편의 표면(고액 계면)에서 일어나게 된다. 표면 근방은 기액(氣液) 혼합 상태가 되어 겉보기 점도가 저하하지만 비등에 의해 강제적인 교반이 이루어지고, 증발의 잠열에 의하여 냉각속도가 매우 빠르게 된다. V는 증발의 단계가 완료되고 물의 대류에 의한 열전달(대류 단계)이 되는 단계이다. 이와 같이 냉각은 몇 개의 단계를 거쳐 일어나는데 핵비등이 가장 냉각 효과가 크다. 그림 8 중의 A는 증기막 단계에서 핵비등 단계로 바뀌는 온도(특성 온도)이고 B는 핵비등 단계에서 대류 단계로 바뀌는 온도(대류 개시 온도)

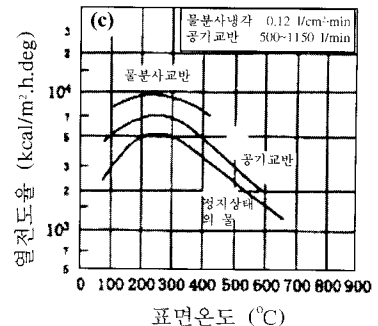
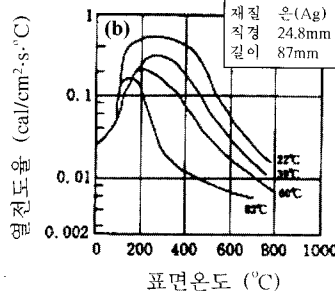
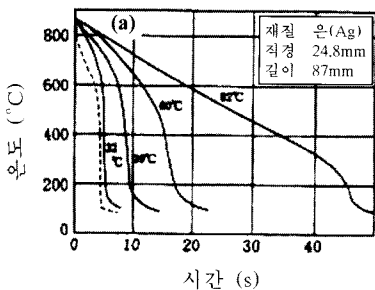


그림 9. 수냉시의 냉각곡선에 미치는 수온 및 교반의 영향.

이다. 켈칭에서는 A점이 높은(증기막 단계의 출현을 막고 빠르게 핵비등 단계로 들어감)편이 좋고, 또 B 점이 낮은 편이 좋다[4,11,13].

그림 9[4]는수냉시의 냉각곡선에 미치는 물의 온도 및 교반의 영향을 나타낸 것이다. 수온이 높으면 그림 9(a)와 같이 막비등 단계가 길어지기(특성 온도가 저하된다) 때문에 그림 9(b)와 같이 열전달율은 저하한다. 한편 교반을 하면 그림 9(c)와 같이 열전달율은 향상한다. 그림 9(b) 및 (c)에 나타난 것처럼 물의 냉각능은 시험편의 표면 온도 범위가 200~300°C 일 때 최대가 된다.

그림 10은 기름, 수용성 켈칭제 및 가스의 냉각 곡선에 미치는 냉각 조건의 영향을 나타낸 것이다. 그림 10(a)[13] 명확하지 않지만 기름 냉각에서는 시험편의 표면 온도가 400~500°C 근방에서 열전달율이 최대로 된다. 기름의 온도가 높게 되면 점도가 저하되기 때문에 대류의 효과가 향상되어 교반의 효과도 향상된다. 한편 시험편과의 온도 차이가 저하되면 겉보기 열용량이 저하되기 때문에 냉각능이 저하된다. 기름의 종류에 따라 다르지만 이러한 균형에 의하여 기름 온도는 100°C 전후에서 냉각능이 최대로 된다[4,11,13]. 수용성 켈칭제는 그림 10(b)와 같이 농도가 높고 액의 온도가 상승하면 막비등 단계가 길어진다.

그림 10(c)[15]는 φ40 강의 중심부에 대한 가스 냉각시의 냉각곡선이다. 기체는 가벼울수록 운동성이 높기 때문에 N<sub>2</sub>와 비교해 볼 때 He과 같이 가벼운 기체가 유리하다. 또한 가스의 열전도율은 가스 압력의 증가에 따라 증가하기 때문에 가스 압력이 높을수록 냉각속도가 높게 된다.

3.2.2 냉각제의 켈칭 급냉도 H 값

복잡하게 변화하는 냉각 거동을 근사적으로 뉴턴의

냉각 법칙에 따르는 것으로 하여 극히 단순화시키고, 켈칭 액의 냉각 능력을 정량적으로 취급한 것이 켈칭 급냉도 H 값이다. 강재를 켈칭 액 중에 켈칭 시켜 켈칭 순간부터 t초 후의 열 이동을 고려하면, 강의 중심부에서 표면부로 향하여 열이 흐르게 된다. 이 때 단위시간 내에 단위 면적당 표면 근방의 열 이동량 (dQ/dt)<sub>s</sub>는 식 (2)와 같이 표시된다.

$$(dQ/dt)_s = -k(dT/dx)_s \tag{2}$$

여기서 k는 강재의 열전도율, dT/dx는 강재의 두께(직경) 방향에 대한 온도구배이다. 또 강재의 표면으로부터 뉴턴의 냉각 법칙에 따라 열이 켈칭 액 중에 전달되는 경우를 고려하면 단위시간에 강재로부터 켈칭 액에 흘러 들어가는 열량 (dQ/dt)<sub>s</sub>는 양쪽의 온도 차이에 비례하기 때문에 식 (3)과 같이 표시된다.

$$(dQ/dt)_s = C(T_s - T_q) \tag{3}$$

여기서 C는 열전달율, T<sub>s</sub>는 강재의 표면 온도, T<sub>q</sub>는 켈칭 액의 온도이다. (2) 및 (3)식의 (dT/dt)<sub>s</sub> 값은 동일한 것으로 생각되기 때문에 식 (4)와 같이 되고,

$$(dT/dx)_s = -C/k(T_s - T_q) \tag{4}$$

표면부에서의 온도 구배는 강재의 표면 온도와 냉각제의 온도 차이에 비례하게 된다. 여기서 C/k = h로 하면 h는 열방산비(熱放散比)이다. h는 (길이)<sup>-1</sup>의 단위를 가지나 여기에 환봉의 반경 b를 곱한 값 hb는 무차원의 값이 된다. 실용적으로 반경보다 직경 D를 사용하는 것이 편리하기 때문에 hb = HD로 하여 H와 D가 사용되고 있다. 이 식을 H에 대하여 정리하면, H = (1/2)h = (1/2)(C/k)로 된다. 이러한 H를 켈칭 냉각시 켈칭 급냉도라 부르며 이에 의해 켈칭 액의 냉각능을 정량적으로 표시할 수 있다. H 값은 강의 열전도율이 포함되어 있기 때문에 엄밀히

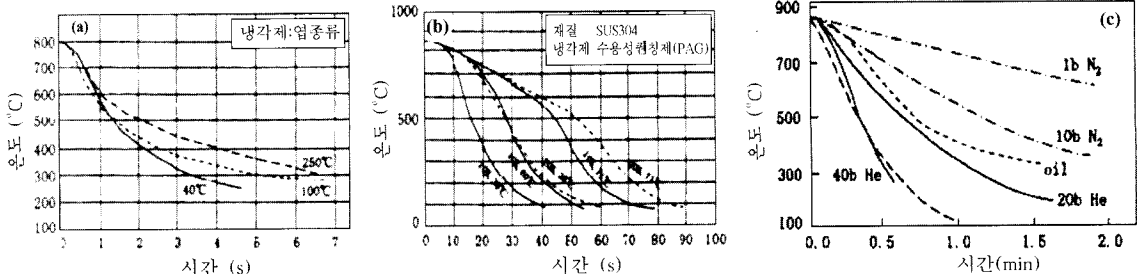


그림 10. 각종 냉각제의 냉각곡선.

표 2. 각종 퀴칭 냉각제의 냉각능(H 값(cm<sup>-1</sup>))

교반 정도	공기	기름 (油)	물	식염수	염욕 (240°C)
정지 상태	0.008	0.098~0.118	0.354~0.394	0.79	0.197~0.315
약간의 교반		0.118~0.138	0.394~0.433	0.79~0.87	
완만한 교반		0.138~0.157	0.472~0.512		
중간정도 교반		0.157~0.197	0.551~0.591		
강한 교반	0.020	0.197~0.315	0.630~0.787		
강렬한 교반		0.315~0.433	1.58	1.97	
조미니 분사			2.17		0.886

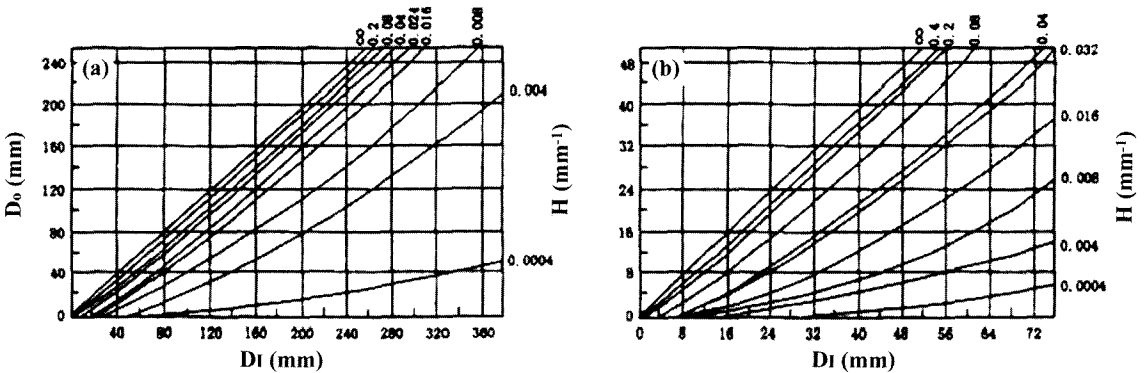


그림 11. 이상입계직경(D1)-입계직경(D0)-냉각능(H 값)의 관계.

말해 냉각능만 표시한 것은 아니지만, 탄소강이나 합금강에서는 열전도율이 거의 일정하기 때문에 H 값은 냉각능을 표시하는 양으로 취급해도 큰 문제는 없다. 냉각능 H 값은 냉각제의 종류에 따라 변화하는 것만은 아니고 교반에 의해서도 크게 변화한다 [1,16]. 표 2[1,5]는 각종 냉각제의 퀴칭 급냉도이다.

표 2에 나타난 바와 같이 공기, 기름, 물.....의 순서로 H 값이 크고, 냉각능은 크게 된다.

또 동일 냉각제에서도 정지 상태보다 교반하는 것이 냉각능이 크다.

### 3.3 퀴칭 경화인자의 상호 관계

퀴칭성-냉각능-치수의 퀴칭 경화인자에 대한 상호 관계를 알게 되면 강종과 냉각제로부터 퀴칭 경화 깊이의 추정이 가능하다. 이 관계를 나타낸 것이 그림 11[1,8]이다.

이 그림으로부터 이상입계직경 D1의 봉강을 냉각능 H의 냉각제로 퀴칭 하였을 때, 중심까지 경화되는 입계직경 D<sub>0</sub>를 알 수 있다.

\*이 글은 日本"熱處理"44(2), 2004년, pp. 76~82에 게재된 내용을 번역한 것임.

### 참고문헌

1. 熱處理技術便覽(初版 1刷), (社)日本熱處理技術協會(2000).
2. 大和久重雄: 熱處理, 15, p. 146(1975).
3. 梅本 實, 田村今男: 熱處理, 20, p. 317(1980).
4. 利岡青繼, 末松岩生: 熱處理, 19, p. 132(1979).
5. 金屬便覽(改訂 4版), (社)日本金屬學會, 丸善(1982).
6. 大和久重雄: S曲線, 日刊工業新聞社(1967).
7. 渡辺 敏: 熱處理, 19, p.155(1979).
8. 大和久重雄: 焼入性-求め方と活用-, 日刊工業新聞社(1979).
9. 鋼の焼入性試験方法, JIS G0561(1998).
10. 焼入性を保證した構造用鋼鋼材(H鋼)JIS G4052(1979).
11. 池内 清: 熱處理, 35, p.206(1995).
12. 時弘義雄, 福井 昂: 熱處理, 29, p. 212(1989).
13. 勝木 榮, 竹内榮一: 熱處理, 12, p. 388(1972).
14. 鳴海孝雄: 熱處理, 21, p. 82(1981).
15. 紀田兼昭: 熱處理, 37, p. 175(1977).
16. 金屬便覽(改訂 3版), (社)日本金屬學會, 丸善(1971).