

# 구상화 열처리 기술의 발전 동향

남원종

(국민대학교 신소재공학부)

## The Current Status of the Technology of Spheroidization Heat Treatment

Won Jong Nam

**Key Words** : Spheroidization, Controlled Rolling, Controlled Cooling, Cold Heading

### 1. 서론

냉간압조용 선재는 크게 탄소강과 합금강의 두 가지로 분류된다. 이에 따라 냉간압조용 제품의 제조공정도 탄소강과 합금강의 강종에 따라 달라지는데, 탄소강의 경우 일반적인 제조공정은 선재를 신선 가공한 후 구상화 처리, 제품성형 및 Q/T(quenching & tempering) 처리를 실시하며, 한편 합금강의 경우는 선재 상태에서 저온조직인 베이나이트나 마르텐사이트가 존재하는 경우 저온연화(low temperature annealing) 처리를 실시한 후 신선 가공, 구상화 처리, 제품성형, Q/T 처리를 실시하며 선재 상태에서 저온조직이 없는 경우는 탄소강과 제조공정 단계가 같다. 이러한 냉간압조용 공정은 과거 실시되던 열간 단조 및 절삭 공정보다 생산성 향상 및 경비 절감이 가능하여 적용 범위가 확대되는 가공 공정으로, 제품 성형을 위한 냉간압조용 빠른 속도의 많은 변형이 이루어지기 때문에 가공에 적합한 미세조직인 페라이트나 구상화된 조직을 만든 후 냉간압조를 실시한 후, 최종 제품의 사용 목적에 따라 강도를 부여하기 위하여 Q/T 처리를 실시한다. 따라서 제조공정을 크게 구분하면, 선경 조정을 위한 신선공정, 소재의 가공성을 높이기 위한 구상화 처리공정, 제품 성형을 위한 냉간 압조공정, 소재에 강도를 부여하기 위한 소입소려 공정의 4단계로 나누어

진다. 특히 제조 공정 중, 구상화 열처리 공정은 소요되는 열처리 시간이 장시간으로 구상화 열처리 시간을 단축하거나 구상화 열처리 공정을 생략하는 경우, 생산성의 향상 및 열처리 비용의 절감으로 제품 경쟁력을 높일 수 있다.

구상화 열처리 후의 소재의 물성은 구상화 처리 전 초기조직의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으며, 일본 제철소를 중심으로 탄소강 냉간압조용 선재의 구상화 시간 단축을 위한, 제어압연 및 제어냉각의 도입에 의한 선재 미세조직 제어를 위한 노력이 이미 오래 전부터 이루어져 왔다. 이와 동시에 제철소의 봉강 공장을 중심으로 선재의 열간 압연 직후 가열로에서의 짧은 시간 동안의 재가열 또는 장시간에 걸친 극서냉 적용에 의해, 공장에서 직접 구상화된 선재를 제조하는 시도가 진행되어, 실험실적 시험은 완료된 상태이며 일부 공장에서 적용시험을 실시한 바 있으나 현재 양산단계로까지는 발전되지 못한 상황이다. 이와 같이 일본에서는 계속적인 선재공장의 설비 개선으로 압연온도를 상당히 저하시킬 수 있는 제어압연의 방향으로 고급강의 압연기술이 정립되어 가는 추세이다.

### 2. 구상화 열처리 기구

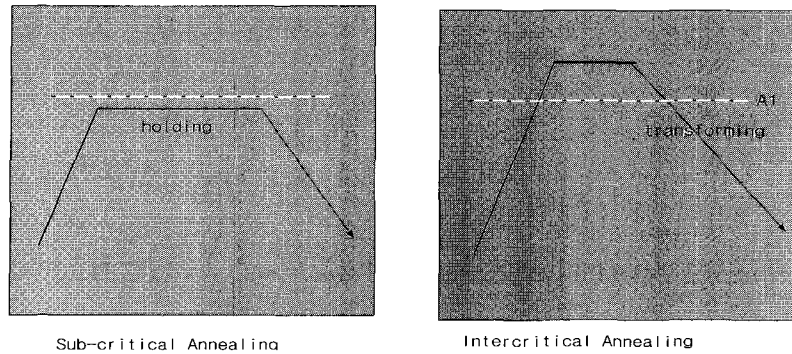


Fig. 1 The patterns of spheroidizing heat-treatments

구상화 열처리의 목적은, 소재를 냉간성형에 의해 제품을 제조시 가공성 향상을 위한 세멘타이트의 구형 입자화 및 균질한 입자 분포를 도모하고 또한 가공 다이의 수명을 향상시키기 위해 가공되는 소재의 경도를 가능한 한도 내에서 낮추는 2가지 목적으로 이용되고 있으며, 이외에도 부가적인 효과로 절삭가공이 필요한 경우 일반 페라이트+펄라이트 강보다 절삭성이 뛰어난 효과도 갖는다. 이러한 구상화 열처리는 Fig. 1에서와 같이 크게 2가지로 분류된다. 첫 번째 그림은 공석온도 이하에서 장시간 가열에 의해 구상화를 실시하는 것으로, 주로 열연 제품의 구상화 처리에 이용되고 있으며(subcritical annealing), 두 번째 그림은 공석온도와 오스테나이트화 온도 사이의 온도 영역에서 가열 후 극서냉에 의하여 구상화 조직을 얻는 방법이다.(intercritical annealing) 이외에도 반복가열 및 냉각에 의해 공석 온도의 직상과 직하 온도를 반복하여 구상화를 촉진시키는 방법으로 구상화 속도가 빠르나 온도 제어가 까다로와 일반 산업계에서는 별로 채택하고 있지 않은 방법이다.

### 2.1 공석온도 이하에서의 구상화

초기 조직이 펄라이트와 페라이트로 구성된 경우, 구상화 열처리 온도에서 구상화가 진행되는 과정은, 높은 온도에서의 확산에 의하여 주로 이루어지며 라멜라 세멘타이트의 결합 또는 끝 부분에서 주로 시작되며, 끝 부위와 옆의 평평한 계면과의 곡률 차이에 의한 탄소 농도 구배에 의해 라멜라 세멘타이트가 분절된 형태를 갖게되며, 이후 표면 에너지를 줄이기 위해 구형을 갖게 된다고 알려져 있다. 이와 같이 형성된 구형 입자는 Ostwald ripening과 유사한 과정을 거쳐 성장하게 되어 구상화

조직을 형성한다. 이러한 구상화 과정은 오스테나이트로 변태온도 직하에서 주로 관찰되어 소재의 기지조직이 페라이트와 펄라이트로부터 페라이트에 구상 세멘타이트가 존재하는 형태로 변화한다. 즉 초기 조직에서 페라이트로 존재하던 부분은 그대로 페라이트 형상으로 잔존하나, 펄라이트로 존재하던 부분은 페라이트와 구형 세멘타이트로 변화하여 존재하게 되므로, 전체 미세조직은 페라이트와 구형 세멘타이트로 구성된다.

구상화가 이루어지는 기구에 대해서는 많은 연구들이 발표되었는데, 대부분이 판상의 세멘타이트가 그 형태를 잃어가며 구형의 세멘타이트로 형성되는 과정에 대한 여러 이론들을 밝혀 왔으나, 그 이후의 성장 거동은 대부분의 보고서에서 Ostwald ripening의 형태로 성장하는 것으로 알려져 있다. 구형의 세멘타이트가 형성되는 과정은, 열처리 초기 단계에서 polygonization이 발생하는 페라이트의 회복 또는 재결정 과정에서 형성된 많은 아결정립계 또는 결정립계가 형성되고, 이에 따라 열적으로 불안정한 판상의 세멘타이트는 band 또는 ribbon의 형태로 분절되며, 분절된 세멘타이트는 표면 에너지 감소를 위해 구형으로 형상의 변화와 함께 Ostwald ripening 기구에 의해 성장하게 된다. 이와 같이 보고된 구상화 기구를 정리하면, (a) 첫째로 rod의 형태가 capillarity에 의해 도입된 perturbation에 의하여 불안정해지는 현상을 말하는 것으로 perturbation 파장의 길이와 rod의 형태 즉 길이와의 관계로 구상화가 진행되는 현상을 설명한 perturbation theory, (b) 변형 또는 변태에 의해 도입된 아결정립계 계면에 grain boundary groove가 형성되며 이러한 boundary groove는 계면에 curvature를 형성하고 이 curvature는 potential의 차이를 나타나게 된다. 이

러한 potential 의 차이는 원자의 이동을 야기시켜 groove 가 계속 성장하게 되고 이로 인하여 세멘타이트는 분절된 형태로 발전하게 되는 grain boundary groove model, (c) 라멜라 구조에서는 라멜라의 끝 부분이 존재하며 이 부분은 곡면의 형태를 가지므로 다른 부위에 비하여 에너지 적으로 불안정하므로 이 부위에서 구상화가 시작되는 fault migration theory의 3가지로 분류되며 관찰된 대부분의 경우가 이에 속한다.

구상화 형태를 갖는 입자의 성장 kinetics는 다음과 같이 설명되어 진다. 라멜라 형태의 판상 세멘타이트가 분절된 이후 계속되는 가열에 의해 구형 입자 성장에 의해 구상화 미세조직이 얻어진다. 즉 구상화 열처리는 구상화 입자 형성과 입자의 성장 2단계로 나누어진다. 이 입자의 성장 과정은 다음과 같이 설명된다. 널리 알려진 Gibbs - Thomson Eq.에 따르면 용질 원자의 농도는 입자 크기에 따라 변한다. 즉, 입자 크기에 따른 입자 주위의 용질원자의 농도는 다음의 식으로 표현된다.

$$C = C_0 (1 + 2\gamma/RTr_i)$$

여기에서  $C_0$ 는 소재 내의 평균 용질원자의 농도,  $\gamma$ 는 specific interfacial energy,  $r_i$ 는 입자 반경이다. 즉 작은 반경을 갖는 입자 주위의 용질원자 농도가 높게 된다. 이에 따라 용질 원자의 농도가 높은 부분에서 낮은 부분으로 용질원자의 이동이 진행됨에 따라 작은 입경을 갖는 소재는 점점 작아져서 마침내는 소멸하게 되며, 상대적으로 크기가 큰 입자는 성장을 계속하게 된다. 이와 같은 원리에 의한 입자성장은 원자의 확산기구에 의해 크게 영향을 받는데, 이러한 확산기구가 입자 성장에 기여하는 현상에 대해 많은 논문 들이 발표되었다.<sup>(1-10)</sup> 보고된 확산기구를 크게 분류해 보면, 체적확산에 의한 입자성장, 입계확산에 의한 입자성장 및 전위를 통한 원자의 확산에 의한 입자성장 등으로 분류된다. 일반적으로 체적확산은 다음의 식으로 표현되는데,

$$r^3 - r_0^3 = k_1(t-t_0)$$

$$k_1 = 8gDC_0V_m/9RT[r_m]$$

이는 입자의 성장이 시간의 1/3 승에 의해 지배됨을 보여주며, 여기에서  $r$ 은 입자반경,  $r_0$ 는  $t_0$ 에서의 입자반경,  $t_0$ 는 정상상태 시작시간,  $g$ 는 계면 에너지,  $D$ 는 확산계수,  $V_m$ 은 molar volume of carbides를 말한다. 한편 입

계확산 및 전위를 통한 원자의 확산 또한 유사한 식으로 표현되며 다음과 같다.

$$\text{입계확산 : } r^4 - r_0^4 = k_2(t-t_0)$$

$$k_2 = 8gDgbCoV_m/3GRT$$

$$\text{전위를 통한 확산 : } r^5 - r_0^5 = k_3(t-t_0)$$

$$k_3 = 0.311gDdCoV_m/2qN/pRT$$

입계 확산의 경우 식에 사용된 값들은,  $Dgb$ :입계확산 계수,  $d$ :입계의 두께,  $G$ :geometrical constant이며, 전위를 통한 확산의 경우 사용된 값들은  $Dd$ : 전위확산계수  $q$ :전위 단면적,  $N$ :탄화물에 걸쳐진 전위의 수 들이다.

일반적으로 체적 확산은 입자의 성장이 시간의 1/3 승에 의해 지배되며, 입계 확산은 시간의 1/4 승에 및 전위를 통한 원자의 확산은 시간의 1/5 승에 의해 지배된다. 한편 Lindsley와 Marder는 입자 성장에 상기 확산기구 중 하나만이 작용하는 것이 아니라 그중 성장환경에 따라 지배적인 확산기구가 있으나 여러 가지 확산기구가 조합되어 동시에 작용하여 입자성장에 기여한다고 보고하였다.

## 2.2 공석온도 이상에서의 구상화

공석온도 이상에서의 가열에 의한 구상화는 공석온도 이하에서의 구상화 방법과는 근본적으로 구상화 기구 및 kinetics 모든 면에서 다르다. 초기 조직이 펄라이트와 페라이트로 구성된 경우, 구상화가 진행되는 과정은 높은 온도에서의 펄라이트 부위 및 페라이트의 일부 부위가 이상 영역 가열시 오스테나이트로의 변태하며, 펄라이트가 존재하던 부위에 존재하는 오스테나이트 영역에 세멘타이트 입자가 완전히 용해되지 않고 일부 잔존하여 오스테나이트+잔류 세멘타이트의 형태를 유지한 후 서냉시 잔존 세멘타이트가 핵으로 작용하여 오스테나이트로부터 페라이트+펄라이트 변태가 아닌 페라이트와 잔존 세멘타이트 입자의 성장의 형태로 변태가 진행되며 변태 이후의 서냉시에는 이미 형성된 구형 입자가 Ostwald ripening과 유사한 과정을 거쳐 성장하게 되어 구상화 조직을 형성하게 된다.

일반적인 미세조직인 페라이트와 펄라이트로 구성된 소재를 이상 영역으로 가열하여 서냉에 의한 구상화 조직을 형성하는 것은 앞에서 설명된 바와 같이, 페라이트와 펄라이트가 공존하는 상태에서 Fig. 2의 (B)에 나타난

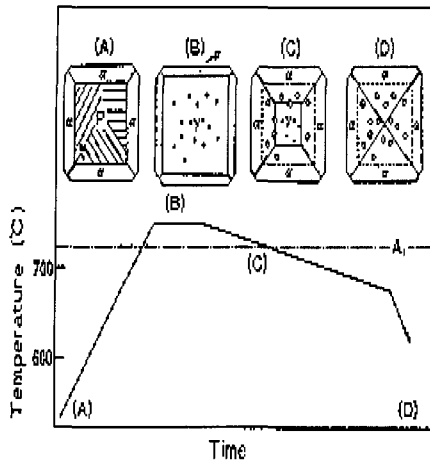


Fig. 2 The mechanism of spheroidization<sup>(11)</sup>

바와 같이 펄라이트 지역은 모두 오스테나이트로 변태하고 페라이트의 일부 지역 또한 오스테나이트로 변태하게 되므로, 가열온도에서 존재하는 상은 페라이트와 오스테나이트가 된다. 또한 이때 생성되는 오스테나이트는 펄라이트가 존재하던 영역 뿐 아니라 페라이트가 존재하던 지역의 일부를 포함하기 때문에 이 온도에서의 페라이트 분율은 초기 조직의 경우 보다 작게 되고, 펄라이트로부터 오스테나이트로 변태한 부위에 있어서는 모든 라멜라 세멘타이트가 용해되어 오스테나이트에 용융 상태로 존재하는 것이 아니라 일부 잔존하게 되어 구형의 세멘타이트로 잔류하게 된다. 따라서 이 때 생성된 오스테나이트에는 기존 펄라이트에서의 탄소량은 미치지 못하나 상당량의 탄소가 용융된 상태로 존재하게 된다. 이러한 미세조직이 Fig. 2의 (C) 단계에 이르게 되면, 오스테나이트가 다시 상온 조직으로 변태하게 되는데, 여기에서 주의 해야할 점은 오스테나이트가 다시 페라이트와 펄라이트로 변태하는 것이 아니라 모두 페라이트로 변태되면서 오스테나이트에 용융되어 있던 탄소는 펄라이트의 세멘타이트로 석출하기보다는 잔존되어 있던 세멘타이트 입자와 결합하여 세멘타이트 입자 크기의 성장에 기여하게 된다. 따라서 이 경우에 관찰되는 미세조직은 페라이트와 세멘타이트 입자로 구성된 구상화 미세조직이 형성된다. 다음 단계로 서냉으로 상온까지 내려오는 과정에서 상대적으로 크기가 작은 세멘타이트 입자는 소멸되고 크기가 큰 입자만 계속적으로 성장하는 Ostwald ripening에 의한 구상화 입자의 성장이 이루어진다.

이와 같은 구상화 기구를 검토해보면 최종 구상화 미세조직에 영향을 미치는 조업인자로는, 가열속도, 가열온도, 유지시간 및 냉각속도를 들 수 있으며, 따라서 소재의 종류 및 용도를 고려하여 최적의 구상화 조직에 유리한 제조조건과 경제성을 검토하여 최적의 구상화 열처리 조건을 얻기 위한 노력이 필요하다.

### 3. 구상화 촉진에 대한 연구

구상화 열처리 시간의 단축에 의한 에너지 및 cost 절감 효과를 높이기 위한 노력이 일본을 중심으로 지속적으로 연구되어 왔다.

Naito<sup>(12)</sup>가 1988년 중탄소강을 대상으로, 봉강 공장에서 사상압연 온도 800°C 이하에서의 제어압연한 결과, 구상화 단축이 가능하였다는 결과를 발표하였는데, 구상화 단축에 의한 열처리시 통상압연제에 비하여 가열 속도의 증가 및 유지시간의 감소의 적용은 가능하였으나 냉각속도는 10°C/h는 유지하는 조건에서 구상된 소재에서의 세멘타이트 장단축 비율의 감소 효과를 얻어 제어압연에 의한 구상화 단축용 소재의 제조 조건을 도출했다. 한편 Ochi 등에<sup>(13)</sup> 의해서, 망간 및 크롬 등이 함유된 강에서의 구상화 처리시 세멘타이트에서의 망간 및 크롬 등 합금성분이 농축되는 현상을 보고한 바 있다. 이후 Ochi 등<sup>(11),(13)</sup>은 중탄소강을 이상영역으로 가열하여 구상화하는 경우에 있어서는 구상화 기구를 규명하여 Fig. 2와 같은 구상화가 이루어지는 단계를 분류하였으며, 또한 오스테나이트 상태에서의 잔존하는 세멘타이트 입자의 개수를 측정하고 구상화 이후에 구상화된 미세조직에서 세멘타이트의 개수를 측정 비교하여 오스테나이트에 잔류한 세멘타이트가 이후 구상화 입자의 성장 site로 작용함을 보여 주었다. 또한 이들은 가열 후 냉각시의 세멘타이트 입자의 성장 기구로, 오스테나이트로부터 페라이트로의 변태 도중 오스테나이트와 페라이트의 입계에 존재하는 세멘타이트의 성장이 오스테나이트와 페라이트의 입계에서의 원자의 확산에 의해 이루어진다고 하였다. 한편 이상 영역에서의 가열 직후, 냉각속도에 따른 미세조직 변화에 대해서도 고찰한 바 있으며 그 내용은 다음과 같다. 냉각속도가 매우 느린 10°C/h의 경우 오스테나이트로부터 펄라이트 변태가 완료되는 온도가 구상화가 이루어질 수 있는 임계 온도인 695°C 보다 낮으므로 모

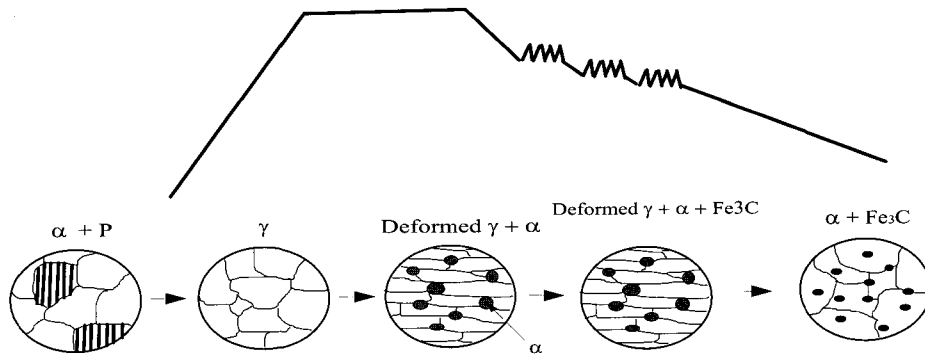


Fig. 3 Schematic of in-line spheroidization proposed by Aihara<sup>(21)</sup>

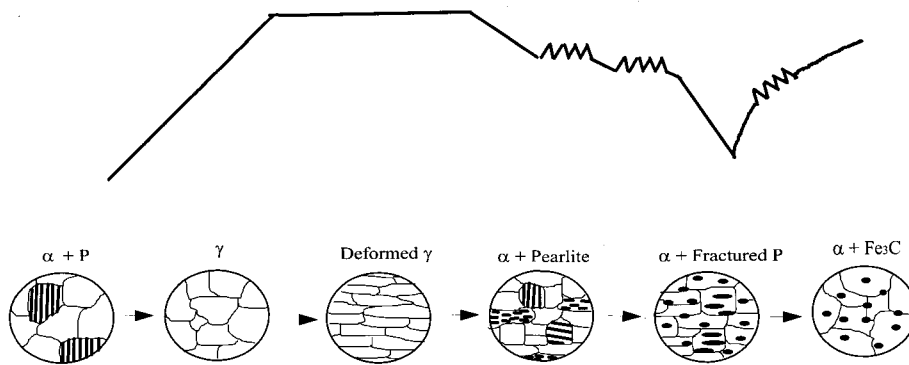


Fig. 4 Schematic of in-line spheroidization proposed by Ohshiro<sup>(22)</sup>

든 미세조직이 구상화 세멘타이트를 갖는 페라이트로 구성되어 있으나, 냉각속도가 60°C/h로 빨라지게 되면 펄라이트 변태 시작 온도로부터 구상화 임계 온도인 695°C 사이의 온도 구간에서는 구형 세멘타이트의 성장이 이루어지고, 695°C 이하에서 펄라이트 변태 종료 온도 사이의 온도 구간에서는 재생 펄라이트가 생성되어 미세조직 중에 구상 세멘타이트를 함유한 페라이트와 펄라이트가 혼재된 미세조직이 얻어진다고 하였다. Inoue 등은,<sup>(14-15)</sup> 중탄소강과 합금강의 구상화 열처리 패턴을 급속 가열 패턴으로 변경하여 구상화 처리 시간을 감소시키는 방법에 대한 연구를 실시한 결과, 합금성분에 따라 적정 가열 및 구상화 종료 온도 범위가 존재하며 이를 벗어나는 경우, 재생 펄라이트, 미용해 펄라이트 등이 잔존함을 보고하였으며, 중탄소강에 비하여 합금강의 경우 적용되는 온도 범위가 상승함을 보고하였다.

이상과 같은 지속적인 많은 연구 결과에 의한 바탕 위에, Kanetsuki 등에 의하여 제어 압연 및 제어 냉각과 같

은 제조조건과 미세조직, 구상화 조직 및 경도 등에 관련된 연구가 활발하게 진행되었으며 그 결과를 보고하였다.<sup>(16-20)</sup> 열간변형 온도 저하에 따라 페라이트 체적분율의 증가가 관찰되었고 페라이트의 형상 또한 구 오스테나이트의 입계를 따라 형성된 페라이트가 고온에서의 변형시 관찰되는 반면 변형 온도가 저하된 경우 괴상의 polygonal ferrite가 형성되었다. 특히 저온에서의 변형시 일반적으로 냉각속도의 증가에 따라 페라이트의 분율이 감소되는 경향과는 달리 냉각속도가 10°C/s인 경우가 가장 많은 페라이트 분율을 보였으며, 다시 냉각속도가 20°C/s로 증가한 경우 감소되는 경향을 나타내었다.

따라서 제어압연 온도 영역에서 압연 후 냉각시 통상 압연한 경우에 비하여, 페라이트 체적의 증가, 펄라이트 조직의 미세화를 그 특징으로 들었으며, 결과적으로 구상화 처리 시간의 단축 효과를 갖는 것으로 보고하였다.

특히 단축된 구상화 열처리시 재생 펄라이트의 생성을 억제하는데 주의를 기울여야 한다는 점을 강조하였다.

#### 4. In-Line 구상화 기술

상기 소개된 대부분의 연구 내용은 중탄소강 또는 중탄소 저합금강을 대상으로 제어압연에 의한 미세조직의 미세화에 따른 구상화 열처리 단축이 가능한 소재의 제조 조건 관련된 내용들이다. 이와 같은 구상화 시간을 단축할 수 있는 소재의 제조 이외에 압연온도를 극저온까지 감소시켜 압연하는 방법을 이용하여 압연 라인에서 구상화된 선재를 제조하는 방법의 개발이 1990년대를 전후하여 보고 되었다.

Fig. 3과 Fig. 4에 in-line 구상화가 가능한 제조 방법의 개념을 나타내었다. Fig. 3의 구상화 기구는 스미토모 금속의 Aihara에 의해 제안된 방법으로, 열간 선재 압연 시 압연 온도를 저하하여, 약 675°C 정도의 낮은 온도에서 60% 이상의 변형을 주는 방법으로, 이러한 경우의 미세조직은 그림에서와 같이 초기의 페라이트와 펄라이트로 구성된 미세조직으로부터 가열로에서 재가열시 오스테나이트로 변태하여 존재하며 그 이후 열간 압연시 계속적인 변형 및 동적 재결정으로 오스테나이트의 입자경의 감소가 진행되며 중간 사상 및 사상 압연과 같이 압연과정의 후단 부에서는 오스테나이트 미세결정 영역에서의 극심한 변형에 의해 오스테나이트의 변형대(deformation band)에서 페라이트의 석출이 이루어지고 따라서 농축된 탄소가 구형 세멘타이트로 페라이트와 오스테나이트의 입계에 생성하게 되는 것이 열간 압연과정에서 이루어지는 현상이다. 특히 마지막 사상 압연온도를 675°C 정도로 낮추는 것이 매우 중요한 점이다. 열간 압연 이후에는 석출된 세멘타이트의 성장이 필요하므로 세멘타이트 입자의 성장을 위해서 일반 구상화 열처리 정도의 보열 또는 극서냉이 필요하나, 소재의 사용 조건에 따라 냉각속도의 조절이 필요하다. 한편 Fig. 4는 Kobe steel에서 발표한 내용으로 열간 압연 도중 소재의 온도를 순간적으로 600°C 이하로 낮추어 펄라이트 변태가 일어나게 유도한 다음 다시 소재의 복열에 의해 675°C 정도의 온도로 상승하는 경우 그 온도에서 압연을 하여 펄라이트에서의 세멘타이트의 분절 효과와 같은 구상화 촉진 효과를 부여한 후 보열 또는 극서냉하는 방법이다. 미세조직 변화는, 초기의 페라이트와 펄라이트로 구성된 미세조직으로부터 가열로에서 재가열시 오스테나이트로 변태하여 존재하며 그 이후 열간 압연시 계속적인 변형 및 동적 재결정으로 오스테나이트의 입자경의 감소

가 진행되나, 중간에 급격한 수냉에 의해 소재온도를 낮추어 펄라이트에서는 다시 소재의 변태가 일어나게 유도한 이후, 다시 압연과정의 후단 부 복열에 의해 페라이트+펄라이트의 공존 온도 영역인 675°C 정도에서 압연하여 세멘타이트의 분절 및 기지조직인 페라이트에의 전위 도입 및 아결정립계 도입 등 구상화 촉진이 가능한 미세조직을 구성 또는 동시적인 구상화를 이룩하는 방법이다. 상기의 Fig. 3에 비하여 한결 원리는 단순하나 실제 현장설비에서 이와 같은 방법의 도입의 용이성에 대한 검토가 필요하다.

#### 5. 결 론

구상화 열처리 기술은 전통적으로 사용되고 있는 기술이나, 구상화 열처리에 소요되는 시간과 에너지를 감소시키기 위한 많은 방법들이 연구되어 왔다. 최근 선재 및 봉강 제조업체에서 제어압연 및 제어냉각에 의한 소재의 미세조직 제어를 통해 구상화 열처리 단축에 대한 연구가 다시 관심을 끌기 시작했으며, 한 단계 더 나아가 제조설비의 능력 확대를 위하여 과거 예상하지 못했던 낮은 압연온도에서의 강가공에 의한 in-line 구상화 기술의 실용가능성에 대한 검토가 이루어지고 있다. 이와 같이 과거에는 실험실적으로 가능했던 많은 기술들이 최근의 설비 발달로 실용화가 가능해지는 경향과 마찬가지로, 구상화 열처리의 단축 및 in-line 구상화의 실용가능성에 대한 적극적인 검토가 가까운 미래에 이루어질 것이며, 이에 따른 요소기술에 대한 연구가 활발해질 것으로 예상된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) I.M.Lifshitz and V.V.Slyozov, 1961, J. Phys. Chem. Solids, vol 19, p. 35.
- (2) C.Wagner, Z. Elektrochem., 1961, vol 65, p. 581.
- (3) R.W.Heckel and R.L.DeGregorio, 1965, Trans. AIME vol 233, p. 2001.
- (4) G.P.Airey, T.A.Hughes and R.F.Mehl, Trans. AIME, 1968, vol 242, p. 1853.
- (5) T.Mukherjee, W.E.Stumpf, C.M.Sellers and W. J. McG.Tegart, 1969, J. Iron and Steel Inst., May,

- p. 621.
- (6) K.M.Vedula and R.W.Heckel, *Met. Trans.*, 1970, vol 1, p. 9.
  - (7) R.T.DeHoff and C.V.Iswaran, *Met. Trans.*, 1982, vol 13A, p. 1389.
  - (8) S.K.Das, A.Biswas and R.N.Ghosh, *Acta Metall. Mater.*, 1993, vol 41, p. 777.
  - (9) A.J.Ardell, *Acta Metall.*, 1972, vol 20, p. 601.
  - (10) B.A.Lindsley and A.R.Marder, 1998, *Acta Mater.*, vol 46, p. 341.
  - (11) T.Ochi and Y.Koyasu, 1992, *Proceedings of Mechanical Working & Steel Processing*, vol. 29, St. Louis, p. 303.
  - (12) K.Naito, et al., 1988, *CAMP-ISIJ*, vol 1 p. 1877.
  - (13) T.Ochi, et al., 1991, *CAMP-ISIJ*, vol 4, p. 2406.
  - (14) T.Ochi, Y.Koyasu and T.Mori, 1992, *Proceedings of Heat & Surface '92*, Kyoto, Japan, p. 37.
  - (15) T.Inoue and T.Soshiroda, 1982, *Trans. ISIJ*, vol 22, B- p. 362.
  - (16) T.Inoue, T.Soshiroda, K.Kaneko and H.Tanaka, 1983, *Tetsu-to-Hagane*, vol 69, p. 82.
  - (17) Y.Kanetsuki, M.Katsumata and H.Sawada, 1989, *Tetsu-to-Hagane*, vol 75, p. 110.
  - (18) Y.Kanetsuki, M.Katsumata, M.Sato and F.Li, 1989, *Tetsu-to-Hagane*, vol 75, p. 122.
  - (19) Y.Kanetsuki, M.Katsumata and T.Inoue, 1990, *Tetsu-to-Hagane*, vol 76, p. 73.
  - (20) Y.Kanetsuki, M.Katsumata and H.Sawada, 1990, *Kobe Steel Engineering Reports*, vol 40, p. 73.
  - (21) K.Aihara, 1990, *The Sumitomo Search*, No.42, p. 1.
  - (22) T.Ohshiro, T.Ikeda, Y.Akutagawa and H.Sawada, 1988, *Proceedings of Physical Metallurgy of Thermomechanical Processing of Steels and Other Metals*, THERMEC-88, Tokyo, Japan, vol.1, p. 186.