

## 고망간 주강품의 열처리시 탄화물 석출방지를 위한 임계 냉각속도에 관한 연구

김정태 · 박시영 · 최정길 · 홍준표\*  
 한국생산기술연구원 주조공정개발팀  
 \*연세대학교 금속공학과

A Study on the critical cooling rate to avoid carbide precipitation in  
 austenitic manganese steels during quenching

Jeong-Tae Kim, Si-Young Kwahk, Jeong-Kil Choi, Chun-Pyo Hong\*  
 Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, Korea  
 \*Dept. of Metallurgical Eng., Yonsei University, Seoul, Korea

**ABSTRACT** The effect of cooling rate on carbide precipitation during quenching of austenitic manganese steel was investigated by optical microscopy, image analyzer and numerical analysis. A computer program based on the finite difference method for analyzing heat treatment processes was developed in order to evaluate cooling rates and the possibility of carbide precipitation during quenching. The area ratio of carbide precipitated in the austenite matrix was measured by the image analyzer, and used to determine the critical point of carbide precipitation. Temperature-dependent critical cooling rates at the critical points were calculated using the present simulation program. The calculated results showed a good agreement with the experimental ones.

**Key Words** : *Austenitic manganese steel, Quenching, Critical cooling rate, Carbide precipitation, Finite difference method*

### 1. 서론

고망간강은 헤드필드강이라고도 하는 0.9~1.4%C, 10~15%Mn 범위의 오스테나이트강으로 가공경화성이 우수하여 냉간 가공에 의해 내마모성이 풍부한 강인한 조직을 갖는다. 이 합금은 파쇄기, 분쇄기 등의 주요소재로서 내마모성이 요구되는 부품에 주로 사용되고 있다. 그러나 주조나 압연 등에 의해 성형된 고망간강의 조직은 입계에 탄화물이 석출하거나 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하여 경도가 매우 높고 인성과 낮은 연신율을 갖는다. 따라서 일반적으로 1000~1100°C의

온도로 가열한 후 수중에 급랭시키는 퀘칭 과정을 거쳐 균일한 오스테나이트조직을 만들어 사용하고 있다.<sup>1-4)</sup> 퀘칭작업 중 가열과정에서 입계에 석출상으로 존재하는 탄화물들은 기지에 재고용되고 임계냉각속도 이상의 빠른 속도로 수냉시키면 탄화물의 석출이 최대한 억제되어 적절한 인성을 갖는 조직이 얻어진다. 이전부터 고망간강에 대한 연구가 이루어져 열처리 작업시의 가열조건, 두께에 따른 냉각속도, 조성에 따른 기계적 성질의 변화 등에 대해 보고된 바 있다.<sup>3-5)</sup> 그러나 아직 퀘칭작업 시의 냉각조건에 따른 상의 거동과 임계냉각속도에 대한 연구들은 미미한 실

정이며 특히 주조품의 열처리시 탄화물 석출에 대한 예측은 없었다.

따라서 본 연구에서는 HMnSCr(KS규격)의 시편을 제작하고 이의 퀴칭작업시 냉각곡선과 열처리 조직간의 상관관계를 조사하여 탄화물 석출 방지를 위한 임계 냉각속도를 찾아내고 고망간강의 퀴칭과정을 해석할 수 있는 열처리 해석 프로그램을 개발하여 파쇄기용 부품 등의 열처리 과정을 수치해석으로 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 일반적인 파쇄기 부품의 두께를 대표할 수 있는 150mm×150mm×250mm의 직육면체 형상으로 결정하여 열처리시 표면으로부터의 거리에 따라 다양한 냉각속도를 나타내고 이에 따른 조직의 변화를 볼 수 있도록 하였다. 조성은 1.2%C-0.6%Si-13%Mn-1.8%Cr로 사형주조에 의하여 제조하였다. 시편의 주조시 망간의 손실을 방지하기 위하여 용해온도는 1500°C를 넘지 않도록 조절하였고 결정립의 조대화와 편석 등의 주조결함을 최소화하기 위하여 주입온도는 1450°C로 하였다.<sup>3, 6)</sup> 또한 가열과 냉각과정의 온도이력을 얻기 위하여 K-type 열전대를 시편의 중심부를 따라 3곳에 설치하였고 열처리 후 중심부를 따라 시편 전체의 조직을 관찰하여 조직과 냉각속도의 관계를 알아내도록 하였다. 해석결과와의 정확한 비교를 위하여 냉각시의 온도곡선을 측정하고 이를 해석결과와 비교하여 열전달 해석의 정확성에 대한 검증도 실시하였다. Fig. 1에 시편의 형상과 열전대의 위치를 나타내었다. 열전대와 시편과의 밀착을 위하여 주조시에 주형내의 해당하는 위치에 열전대를 삽입하였고 고온의 용탕으로부터 열전대를 보호하기 위하여 스테인리스 파이프를 사용하였다.

일반적으로 탄화물의 완전 고용을 위한 용체화 처리는 Acm보다 30~50°C이상의 온도에서 25mm 두께 당 1~2 시간을 유지시키며 가열속도는 공정

온도까지는 40°C/hr. 그 이상의 온도에서는 100°C/hr의 가열속도로 가열하게 된다.<sup>1, 3)</sup> 본 연구에서 채택한 열처리 가열조건을 Fig. 2에 나타내었고 총 21시간의 용체화 처리 후 교반이 없는 수조에서 상온까지 냉각하였다. 시편의 퀴칭시 시간의 경과에 따른 물의 온도변화를 측정하였으며 물의 비등양상도 함께 관찰하였다. 가열, 냉각 과정에서 3지점에 연결된 열전대는 recorder와 PC에 연결하여 각 지점의 온도를 측정하였다.

내마모성과 가공경화성이 큰 고망간강의 특성으로 조직관찰을 위한 시편의 가공에는 와이어 커팅기를 사용하여 가공시 열의 유입에 따른 조직의 변화나 가공경화를 방지하도록 하였다. 시편의 중심부를 따라 전체 면을 가로 50mm, 세로 30mm, 두께 20mm로 나누어 15개의 시편을 채취하였고 Fig. 1에 시편을 채취한 위치를 함께 표시하였다. 연마 후 3% nital 부식 후 광학현미경으로 50배, 100배로 조직을 관찰하였다. 열처리 후 조직 내의 탄화물 석출에 대한 평가를 위하여 모든 시편에 5mm 간격으로 눈금을 매기고 각 영역에 대하여 조직관찰과 영상분석기를 통한 탄화물의 분율을 측정을 병행하였다.

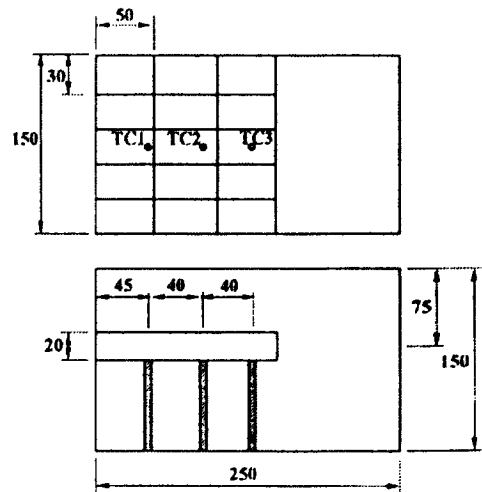


Fig 1. Geometrical drawing of the specimen and position of thermocouples.

### 3. 해석방법

열처리 과정을 해석하기 위하여 비정상 3차원 열전도 미분 방정식을 직접차분법을 사용하여 차분화하고 수치해석 프로그램을 작성하였다.<sup>7)</sup>

#### 3.1 열물성치의 온도의존 함수화

응고해석에서는 밀도, 비열, 열전도도 등의 열물성치들을 상수로 취급하면 응고시간이나 냉각속도 등을 정확하게 얻기는 어렵지만 최종응고부위의 예측에 의한 결함의 유무, 급탕 가능성을 해석하는데는 무리가 없고 해석에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있어 일반적으로 사용하는 방법으로 알려져 있다. 그러나 열처리 과정에서는 각 위치에서의 온도와 냉각속도의 미세한 차이가 조직의 변화를 수반할 수 있으므로 이의 정확한 해석을 위하여 일반적으로 응고해석에서 상수로 취급하던 밀도, 비열, 열전도도 등의 열물성치를 온도에 대한 함수로 정의하여 사용하였다. 해석에 사용한 열물성치는 ASTM A128 C 종의 열물성치<sup>8)</sup>를 사용하였고 Fig. 3에 밀도, 비열, 열전도도의 열물성치를 온도에 따른 2차 또는 3차 함수로 fitting한 결과를 나타내었다.

#### 3.2 경계조건의 시간의존 함수화

해석에 사용되는 물의 온도는 켈칭 실험시 측정된 데이터를 통하여 시간의 함수로 정의하였고

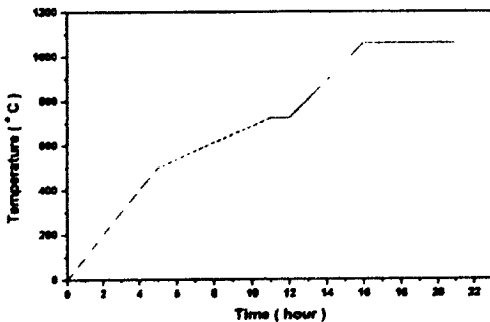
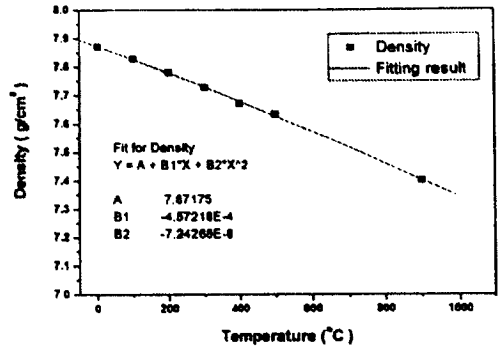
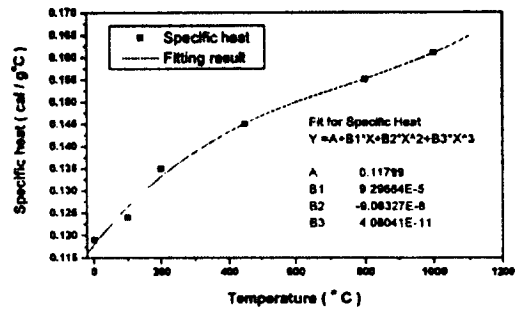


Fig 2. Heating condition for heat treatment.

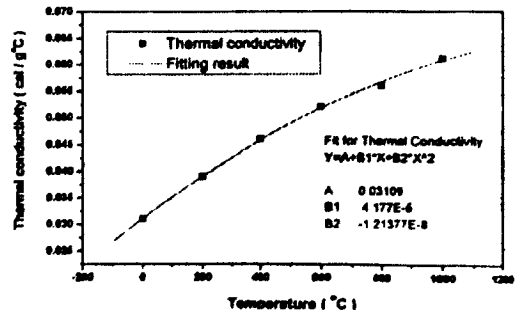
이를 함수화한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 냉매 내에서 켈칭을 행할 때 3단계의 냉각과정을 거치게 된다.<sup>5)</sup> Fig. 5의 A 단계는 증기막의 형성에 의한 단계로 막비동 단계라고도 하며 이 때에는 시편의 표면에 균일한 증기층이 형성되어 시편의 내부로부터 냉매를 비동시킬 만큼 충분



(a) Density



(b) Specific heat



(c) Thermal conductivity.

Fig3. Physical properties used in calculation.

한 열량이 공급되기 전까지 유지되며 이 구간에서는 증기막이 단열체로의 효과를 나타내어 아주 느린 냉각이 이루어지게 된다. 이 막비동 단계는 벤칭시 항상 나타나는 현상은 아니며 냉매의 온도가 비동점보다 훨씬 낮고 염욕과 같이 이온들이 존재하는 경우에는 전혀 관찰할 수도 없는 단계이다. B 단계는 핵비동 단계로 불리며 냉매가 기화하는데 필요한 열량을 시편의 표면에서 공급받아 아주 빠른 속도로 냉각이 이루어지게 된다. C 단계에서는 시편 표면이 냉매의 비동점보다 낮아진 단계로 냉매의 비동은 멈추고 냉매와 시편간의 전도와 대류만에 의한 냉각이 이루어지는 구간으로 대류냉각 단계라고도 한다.<sup>3,9)</sup>

이렇게 상이한 냉각과정을 해석 프로그램에 고려하기 위하여 본 연구에서는 열전달계수를 크게 3단계로 나누어 시간에 의한 함수로 고려하고자 하였고 각 단계에서 다음단계로의 천이시간은 냉각 실험시 육안에 의한 관찰을 통하여 결정하였다.

### 3.3 탄화물 석출 범위의 결정

시편의 냉각과정에서 탄화물 석출의 유무를 결정하는 임계냉각속도는 작은 범위의 온도 구역에서 결정되는 것이 아니며 냉각속도 또한 일정한 값을 유지하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 석출물의 유무를 결정하는 임계냉각속도를 상수가 아닌 넓은 온도 범위에 대한 값들로 선택하여 이 데이터를 임계냉각곡선으로 결정하고 프로그램 내에서 이 임계냉각곡선과 각 부분의 냉각속도를 비교하며 석출 가능성을 계산하고자 하였다. 열처리 후 시편의 조직을 관찰하여 탄화물이 석출하기 시작하는 지점을 결정하고 해석 프로그램을 통하여 이 지점에서의 온도이력을 저장하여 이 온도곡선을 임계냉각곡선으로 사용한다.

고망간강에서 탄화물의 석출시작온도는 탄소의 함량에 따라 달라지며 12% C의 경우에는 1000°C 정도가 되므로<sup>10)</sup> 임계냉각속도와 각 요소에서의 냉각속도 비교구간은 1000°C~250°C로 결정하였고 각 시간 간격에서 각 요소의 냉각속도가 임계냉각

곡선의 해당온도에서의 냉각속도보다 작은 횡수를 전체 시간 간격 수로 나누어 이를 탄화물이 석출될 확률로써 구하고자 하였다.

$$P_{carbide} = \frac{C}{N} \times 100$$

$P_{carbide}$  : 탄화물이 석출될 확률

$C$  :  $C_{critical}^T > C_{itk}^T$  인 횡수

$C_{critical}^T$  : T°C에서의 임계냉각속도

$C_{itk}^T$  : 요소 i, j, k의 T°C에서의 냉각속도

$N$  : 반복 횡수(1000°C~250°C)

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 열처리 전후의 조직 변화

Fig. 6에는 열처리 전후의 시편에 대한 광학현미경 조직사진을 나타내었다. Fig. 6(a)는 표면에서 4.5cm 지점의 열처리 전 조직사진으로 입계를 따라 석출된 탄화물들을 관찰할 수 있다. 사형구조에 의해 제조된 고망간 주물의 경우 표면부위에서도 느린 냉각속도의 영향으로 Fig. 6(a)와 같은 조직을 관찰할 수 있으며 중심부에서는 더욱 많은 양의 입계 탄화물을 관찰할 수 있다. Fig. 6(b), (c), (d)는 표면에서 각각 1cm, 4.5cm, 8.5cm 지점의 열처리 후 조직사진으로 Fig. 6(b)에서는 탄화물의 석출이 없는 균일한  $\gamma$ 조직을 관찰할 수 있으며 Fig. 6(c)에서는 미세한 입계탄화물을 Fig. 6(d)에서는 조대한 탄화물을 보여주고 있다.

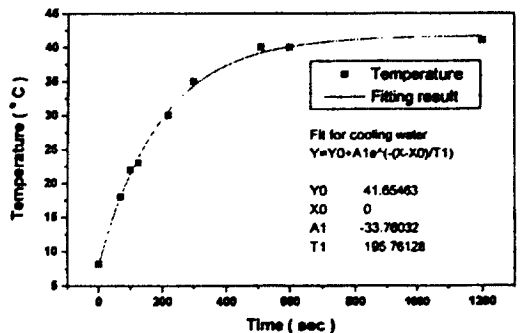


Fig 4. Temperature of water during quenching.

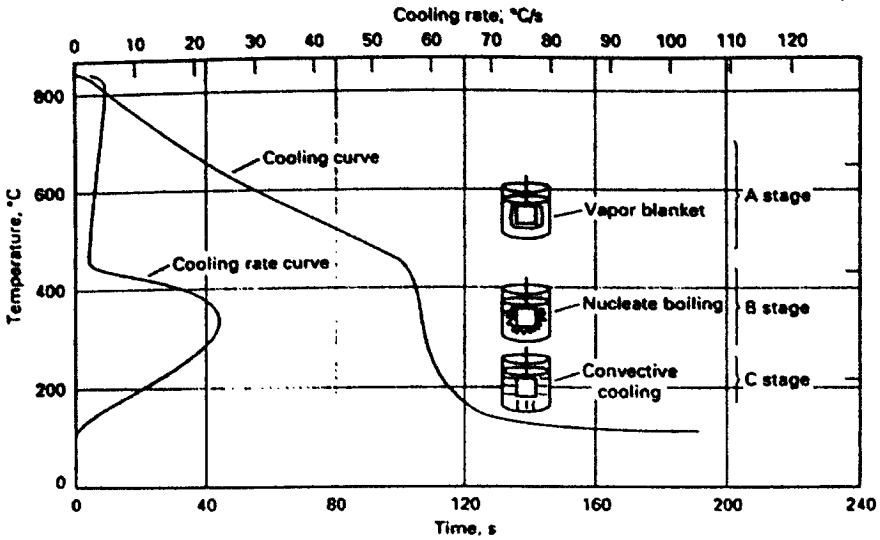


Fig 5. Cooling curve and cooling rate curve<sup>[4]</sup> at the center of a 25mm diameter probe quenched with 95°C water flowing at 15m/min.

#### 4.2 탄화물이 석출하는 천이 영역의 결정

탄화물이 석출하기 시작하는 지점에서의 냉각 속도를 임계냉각속도로 취하기 위하여 시편의 길이방향으로 중심부위를 따라 5mm 간격으로 분할하고 중심까지 각 영역에 대하여 영상분석기를 사용하여 탄화물의 분율을 측정하였다. 각 영역내의 임의의 지점에 대해 6회씩 탄화물의 분율을 측정하여 평균을 내었고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 탄화물의 분율은 시편의 가장자리에서 0에 가까운 값을 나타내다가 4.5cm 지점부터 급증하기 시작하여 중심부가 가장 높은 값을 나타내었고 대칭되는 양상을 보여주고 있다. 이는 표면으로부터의 깊이에 따른 냉각속도의 차이에 의한 현상이며 위치에 따라 탄화물 분율은 약간의 편차를 가지고 있으나 4.5cm 지점에서부터 탄화물의 석출량이 급증하는 뚜렷한 양상을 보여주고 있으며 조직의 관찰을 통해서도 이 지점이 탄화물 석출의 임계영역임을 확인할 수 있었다. 탄화물 석출영역 이전의 구역에서 1~2% 범위의 값을 나타내는 것은 임계에 석출된 탄화물이 아닌 입내의 석출물에 의한 영향이다.

#### 4.3 열전달계수의 결정

변화하는 3단계의 냉각과정을 고려하기 위하여 열전달계수를 상수가 아닌 시간에 의존하는 함수로 취급하고 각 단계의 시간을 실험을 통하여 관찰한 결과 핵비등 구간의 시작은 20초, 대류 냉각의 구간의 시작은 480초임을 알아내었다. 이 시간들을 기초로 하여 실험에서 얻은 3개소의 냉각곡선이 일치하도록 열전달계수를 바꾸어 가며 해석 프로그램을 수행한 결과 Fig. 8과 같은 열전달계수 값을 얻을 수 있었다. 20초 후 핵비등 구간에서 열전달계수는 가파르게 증가하다 100~200초 구역에서는 둔화되고 다시 증가하는 양상을 보여준다. 100~200초 구간에서 과도한 증기의 발생으로 액체가 표면을 계속적으로 적시기 어렵게 되어 열전달계수가 상대적으로 작아지는 구역이며 이는 실험 시에 증기가 제트나 기둥의 형태로 떨어져 나오는 현상으로 확인할 수 있었다.

Fig. 9에는 변화하는 열전달계수와 상수로의 열전달계수를 사용하여 해석을 했을 때 각각을 실험치와 비교한 결과를 나타내었다. Fig. 9(a)는 전체 온도구역에 걸쳐 냉각곡선이 일치함을 보여주고 Fig. 9(b)에서는 열전달계수를 상수(0.018)로 취급

Fig 6. Optical microstructures obtained from : (a) 4.5cm from the as-cast surface : (b), (c) and (d) 1cm, 4.5cm, and 8.5cm from the heat-treated surface.

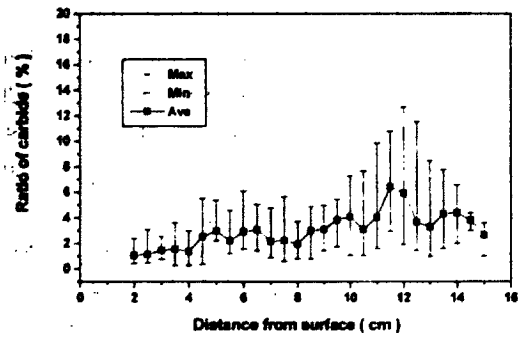


Fig 7. Carbide ratio as a function of distance from the surface.

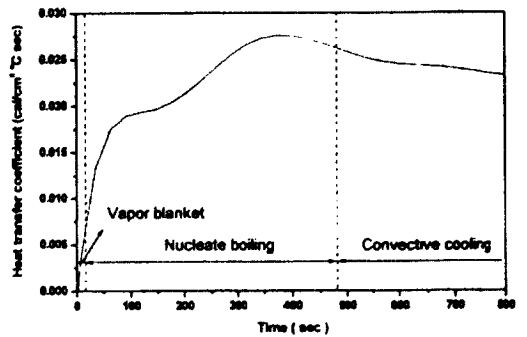
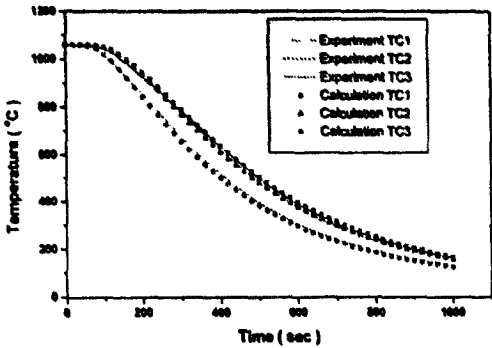
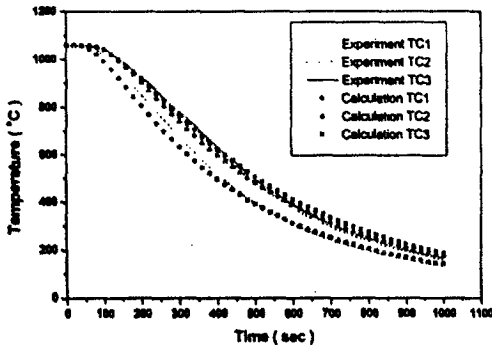


Fig 8. Heat transfer coefficient used in calculation.



(a) Variable heat transfer coefficient



(b) Constant heat transfer coefficient

Fig 9. Thermal histories at different locations.

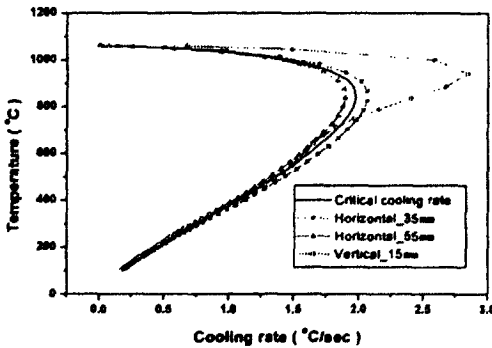


Fig 10. Cooling rate at different locations obtained from calculation.

한 결과로 전체의 온도구역에서 실험치와 상당한 차이를 나타내며 3 지점의 냉각곡선이 상이한 결과를 보여주고 있어 정확한 해석을 위해서는 Fig. 9(a)에서 사용된 열전달계수를 채택함이 타당함을 알 수 있다.

#### 4.4 탄화물 석출 범위의 예측

Fig. 10에는 해석에 의해 얻어진 여러 지점에서의 냉각속도를 나타내었다. 수평방향의 55mm 지점의 냉각속도는 전 구역에 걸쳐 임계 냉각곡선보다 작은 값을 나타내므로 탄화물이 석출할 확률은 100%라고 예측되고 수평방향 35mm 지점의 냉각속도는 55mm 지점과 반대로 전체 구역에 걸쳐 임계 냉각곡선보다 오른쪽에 위치하므로 탄화물이 석출될 확률은 0%로 예측할 수 있다. Vertical\_15mm는 세로 방향으로 15mm 지점에서의 냉각곡선을 나타내는데 거의 모든 구역에서 임계냉각곡선보다 큰 값을 나타내지만 750~650°C 구역에서 임계냉각곡선과 교차하며 더 작은 값을 나타내어 이때 탄화물이 석출될 수 있음이 예상된다. 이와 같은 방법으로 해석 프로그램 내에서는 전체의 요소에 대한 확률을 계산하였고 그 결과를 그래픽으로 출력하여 볼 수 있도록 하였다.

Fig. 11은 해석에 의한 탄화물 석출 확률과 실제 시편의 탄화물의 석출양상과 함께 나타낸 것이다. Fig. 11(a)는 15개 시편의 전체 영역에 대하여 5mm씩 분할하고 50배의 현미경으로 관찰하여 각 영역을 평가한 결과로 탄화물의 석출이 없이 균일한  $\gamma$ 조직, 미세한 탄화물이 석출하기 시작한 조직, 조대한 탄화물이 자라난 조직의 3영역으로 구분하였다. 이를 Fig. 11(b)의 해석결과와 비교하여 보면 전체적인 영역에서 탄화물의 석출 확률에 대한 예측이 잘 맞고 있음을 볼 수 있다. 프로그램에 의한 예측 결과 중 확률이 20%로 표시되는 지점들은 실험에서는 균일한  $\gamma$ 조직으로 판명된 조직으로 해석 결과에서 확률이 20%이하로 평가되는 부위는 균일한  $\gamma$ 구역으로 예측하여도 됨을 알 수 있다.

Fig 11. Carbide precipitation region.

## 5. 결론

본 연구에서는 HMnSC4종 고망간강의 퀴칭시 탄화물의 석출을 예측하기 위하여 150mm×150mm×250mm의 시편에 대한 열처리 실험을 하였고 해석에 필요한 데이터들로 온도의존 열물성치, 시간의존 열전달계수를 도입하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 선택한 직육면체 고망간강 시편의 표면으로부터 45mm 지점에서 탄화물이 석출하기 시작하는 것을 확인하였으며 이 지점에서 1000°C~250°C 범위의 냉각속도들을 온도에 따른 임계냉각속도로 결정하였고 이들을 임계냉각곡선으로 얻을 수 있었다.

2) 열처리 과정을 해석하기 위한 프로그램 내에서는 밀도, 비열, 열전도도의 3가지 열물성치를 온도 의존 함수로 취급하여야만 정확한 계산 결과를 얻을 수 있다.

3) 냉각수의 비등현상에 따른 열전달 계수를 시간의존 함수로 취급하여 실험으로부터 얻은 열전대의 온도곡선과 일치하는 냉각곡선을 계산해 내었고 이를 통해 본 연구에서 취급한 열물성치와 열전달 계수의 선택이 타당하다고 생각된다.

4) 완성된 열처리 해석 프로그램과 임계냉각곡선 데이터를 가지고 시편 전체에 대해 탄화물 석출 확률을 계산한 결과 시편의 탄화물 석출 양상과 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 열처리 해석 프로그램을 이용하면 고망간강의 퀴칭작업 시 탄화물의 석출 가능성을 예측할 수 있다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 에너지관리공단의 98에너지 절약기술 개발사업에 의해 수행된 연구결과의 일부이며 이에 감사드립니다.



### 참고문헌

- 1) 일본주강협회 편, 기전연구사 편집부 역 : 강의 열처리, 개정5판, 기전연구사, (1993) 447
- 2) 이상윤, 김한군 외, 강의 열처리, 원창출판사, (1997) 109
- 3) D. K. Subramanyam, A. E. Swansinger and H. S. Avery : Austenitic Manganese Steels, Metals Handbook Vol. 4, American Society of Metals, (1991) 822
- 4) H. S. Avery : Austenitic Manganese Steels, Metals Handbook Vol. 1, 8th ed., American Society of Metals, (1961) 835
- 5) C. E. Bates, G. E. Totten and R. L. Brennan : Quenching of Steel, ASM Handbook Vol. 1, (1994) 67
- 6) W. J. Jackson and M. W. Hubbard : Steelmaking for Steelfounders, Steel Castings Research and Trade Association, (1979) 106
- 7) 홍준표 : FDM, FEM 및 BEM에 의한 열전도 확산의 수치해석, 반도출판사, (1991) 45
- 8) F. P. Incropera and D. P. Dewitt : Introduction to Heat Transfer, 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc., (1990) 545
- 9) M. Schwalm and H. M. Tensi : Heat Mass Transfer Metallic Systems, Proceedings of Int. Cent. Heat Mass Transfer, Vol 45, (1981) 563
- 10) E. C. Bain, E. S. Davenport, and W. S. N. Waring : The Equilibrium Diagram of Iron-Manganese-Carbon Alloys of Commercial Purity, Trans. AIME, vol 100, (1932) 228