2006년도 춘계 학술발표대회 발표논문, 2006년 5월, 강원도 삼척

용접 열영향부 페라이트 변태 거동에 대한 석출물의 영향

(Transformation behavior for austenite to ferrite in the weld HAZ of precipitate containing steel)

문준오*, 김상훈*, 이창희*, 정홍철**, 이종봉**

* 한양대학교 신소재공학부

** 포스코 기술연구소 접합연구그룹

1. 서 론

사용 목적에 맞게 우수한 재질을 갖도록 제조된 철강 제품들은 일반적으로 사용 시, 용접공정을 거치며, 이러한 극심한 열사이클 중에 모재와는 전혀 다른 미세조직 및 기계적 성질을 갖게 된다. 특히 고상변태가 발생하는 용접 열영향부(Heat Affected Zone)의 경우, 구조물의 안정성을 떨어뜨리는 주요한 요인으로 인식되고 있다[1].

최근 고온에서 안정한 Carbonitride계 석출물을 이용한 초세립강 (Ultra Fine Grained Steel)의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 석출물들은 용접 중의 오스테나이트 결정립 성장을 억제시킴으로써 용접부의 미세한 결정립 형성에 영향을 미친다. 또한 이와 더불어 석출물들은 냉각중의 페라이트 변태에 대한 핵생성 사이트로 작용함으로써 냉각 중의 페라이트 변태를 촉진시킨다[2,3].

본 연구서는 용접 열영향부의 냉각 중 페라이트 변태에 대한 석출물의 영향을 살펴보기 위해 등온 변태 실험을 통하여 Avrami equation[4]을 작성하였으며, 이에 가산법칙을 적용함으로써 석출물을 포함하는 강재에 대한 연속 용접 열사이클 중의 페라이트 변태 모델을 작성하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용한 합금은 다음의 Table 1에 주어진 바와 같다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 페라이트 변태에 대한 석출물의 영향을 살펴보기 위하여 A시편과 달리 B시편에 Ti, N을 첨가함으로써 합금에 석출물이 존재하도록 하였다.

다음의 Fig. 1은 각 시편에 대한 등온 변태 실험을 위한 열사이클을 보여주고 있다. 열처리 재현을 위해 Dilatometer를 이용하였으며, 페라이트 변태 속도에 영향을 주는 오스테나이트 결정립 크기를 변화시키기 위해 1200℃에서 각 시편에 대해 0, 20, 200초 동안 등온 유지하였으며, 70℃/sec의 빠른 속도로 냉각 후, 대상 합금들의 페라이트 변태 온도 구간인 760~640℃에서 20℃간격을 두며 3000sec동안 등온 유지 후 퀜칭하였다.

표 1 Chemical compositions of experimental steel (wt%)

Alloys	C	Si	Mn	Ti	Nb	N	etc
A	0.1	0.14	1.60	-	-	-	-
B	0.09	0.12	1.48	0.019	-	0.013	P, S

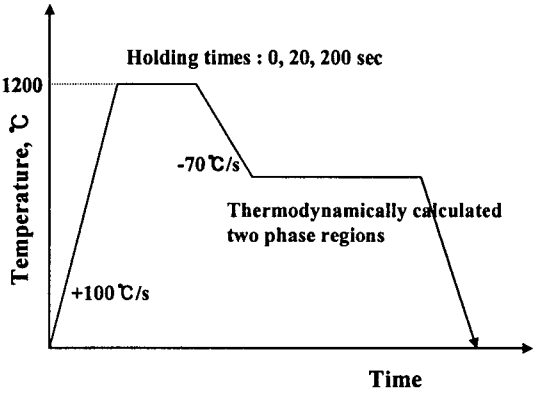

Fig. 1 Thermal cycle for isothermal transformation test

초기 모재 및 냉각 후 조직은 광학현미경을 통해 관찰하였으며, 시편 내의 석출물들은 Carbon replica technique을 이용하여 TEM을 통해 관찰하였다. 한편 결정립 및 석출물들의 크기는 Image analyzer를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 초기조직내의 석출물 분포

다음의 Fig, 2는 초기 모재에 존재하는 석출물을 보여주고 있다. TEM관찰 결과 A시편에는 석출물이 존재하지 않았으며, B시편의 경우 아래의 그림과 같이 TiN 석출물이 존재하였다.

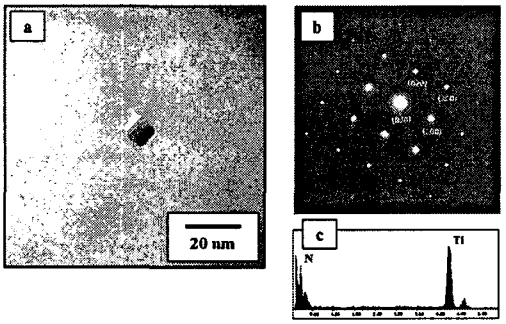

Fig. 2 TEM micrographs, TiN particle in steel B

3.2 오스테나이트 결정립 크기

냉각 중 변태에 영향을 미치는 인자 중의 하나로 오스테나이트 결정립 크기가 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 실험 열사이클에서 언급한 바와 같이 등온 변태실험에 앞서 1200℃에서 0, 20, 200초간 유지함으로써 페라이트 변태에 대한 Avrami equation의 작성에 있어서 오스테나이트 결정립 크기의 효과를 고려하고자 하였다.

다음의 Table 2는 각 시편에 대한 1200℃에서 등온 유지 후, 오스테나이트 결정립 크기(AGS)를 측정한 결과이다.

표 2 Austenite grain size (㎛) after isothermal test at 1200℃

Alloys	0 sec (AGS 1)	20 sec (AGS 2)	200sec (AGS 3)
A	88	159	368
B	16	25	51

Table 2에서 알 수 있듯이 TiN 석출물이 포함된 B시편의 경우가 석출물이 없는 경우에 비해 석출물에 의해 결정립 성장이 크게 억제되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 오스테나이트 결정립 크기의 차이는 냉각 중의 페라이트 변태에 대한 핵생성 사이트 밀도에 영향을 미친다. 즉, 결정립 크기가 작을수록 페라이트 핵생성을 위한 사이트가 증가하며, 이로 인해 변태 속도가 빨라질 것으로 판단된다.

3.3 페라이트 등온 변태 거동 분석

일반적으로 등온 변태에 대한 속도론적 모델로써 Avrami 방정식이 사용되고 있다. 본 연구에서는 합금원소의 영향과 초기 오스테나이트 결정립 크기의 영향을 포함하는 Avrami 방정식을 이용하여 페라이트 등온 변태 거동을 분석하였다. 이는 다음의 식(1)와 같이 나타낼 수 있다[4].

$$X = 1 - \exp\left(-\frac{K}{d_\gamma^m} t^n\right) \quad (1)$$

여기서, d_γ는 오스테나이트 결정립 크기를 나타내며, n과 m은 변태 모드와 핵생성 site에 의존하는 것으로 알려져 있다[4,5].

우선 등온 변태 실험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 식(1)에 대한 자연로그 값으로부터 lnln(1/(1−X)) vs nlnt의 형태의 그래프를 작성하고 이 때 그래프에 나타난 직선의 기울기를 통해 n값을 측정하였다. Fig. 3은 이러한 결과를 보여준다.

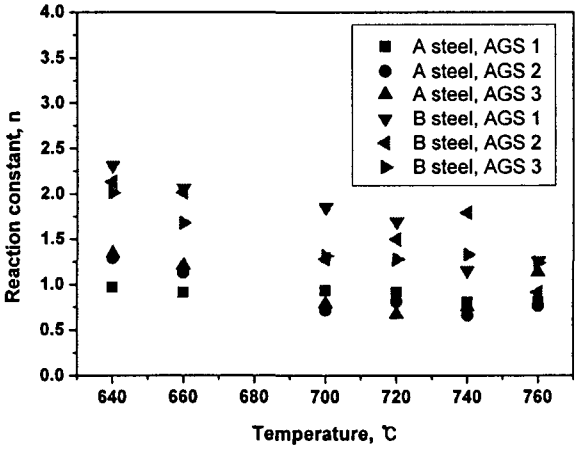

Fig. 3 Reaction constant (n) of each experimental steel

Fig. 3을 통해서 확인할 수 있듯이, 대부분의 결과에서 석출물이 포함된 B시편의 경우가 A시편에 비해 높은 n값을 보이고 있으며, AGS의 변화는 n값에 큰 영향을 미치지 않은 것을 알 수 있다. 또한 등온 유지 온도가 감소할수록 n값은 보다 높은 값을 갖는 것으로 관찰되었다. 한편

A, B시편에서 n값은 평균적으로 A시편의 경우 0.924, B시편의 경우 1.60으로 측정되었다. 일반적으로 n값은 변태모드에 영향을 받는다고 알려져 있다. 조직관찰 결과, 앞선 Fig. 3의 결과에서 석출물이 존재하는 경우 Intragranular ferrite가 생성되며, 낮은 온도일수록 Widmanstatten ferrite가 생성되어 보다 높은 n값을 보였으리라 판단된다.

한편, 오스테나이트 결정립 크기에 영향을 미치는 상수 m은 결정립 크기에 따른 실험데이터의 거동분석을 통해 $\ln d_\gamma$ vs $-n\ln t$ 형태의 그래프로 나타내어, 이때 얻어지는 직선의 기울기를 통해 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 t는 50%의 변태가 일어난 시간을 이용하였으며, 이때의 m값은 A시편의 경우, 평균 -0.578를 가졌다. 이는 오스테나이트 결정립이 커질수록 페라이트의 변태 속도가 늦어지는 것을 의미하며, 기존의 연구에 의해 얻어진 값과 유사함을 알 수 있었다. 하지만 석출물이 포함된 B시편의 경우, 이러한 그래프가 직선형태를 보이지 않았으며, 이는 오스테나이트 결정립크기가 증가할수록 변태가 느려지다가 어느 정도 이상의 결정립크기를 가질 때, 오히려 변태속도가 빨라짐을 의미하며, 이를 통해 B에 대한 AGS 3시편의 경우, Intragranular ferrite가 생성되어 변태가 빨라진 것으로 판단된다.

다음의 Fig. 4는 앞서 구한 n과 m 및 실험적으로 측정한 각 시편의 오스테나이트 결정립 크기로부터 도출한 Avrami equation을 이용해 720℃에서 등온 유지 시, A와 B시편의 변태 거동을 나타낸 것이다.

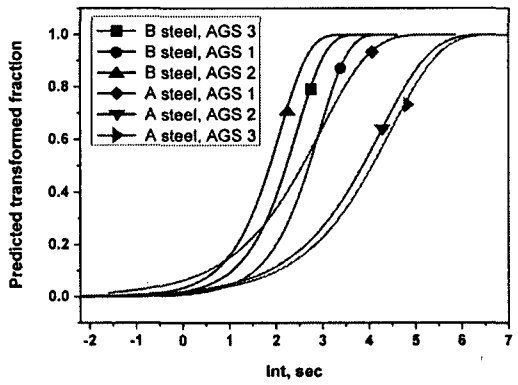

Fig. 4 Predicted transformed behavior at 720℃ by Avrami equation

그림을 통해서 확인할 수 있듯이, 석출물이 존재하는 B시편의 경우가, 상대적으로 낮은 AGS 및 보다 많은 분율 및 다양한 Intragranular ferrite의 생성으로 인해, A시편보다 변태가 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

또한 다음의 Fig. 5는 B시편의 640, 720℃에서의 변태 거동을 나타낸 것으로써 앞서 설명한 바와 같이 AGS가 증가할 수 변태가 느려지다가 AGS 3에 도달하면 Intragranular ferrite 변태의 증가로 인해 변태 속도가 빨라짐을 알 수 있다.

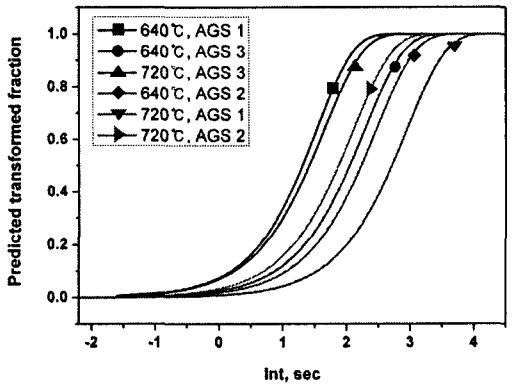

Fig. 5 Predicted transformed behavior of B steel at 720℃ and 640℃ by Avrami equation

4. 결 론

본 연구에서는 페라이트 변태 거동에 대한 석출물의 영향을 살펴보았다. 석출물이 모재 내에 존재하는 경우, 석출물에 의해 결정립 성장이 크게 억제되며, 이는 냉각 중 변태를 위한 핵생성 사이트 밀도를 증가시킴으로써 변태가 촉진되었다. 한편 석출물이 존재하는 경우, 상대적으로 보다 많은 분율 및 다양한 Intragranular ferrite의 생성으로 인해 변태가 촉진되었다.

후 기

본 연구는 포스코기술연구소의 재정적인 지원하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K. E. Easterling: Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, (1983)
2. ISIJ Int, Vol. 43 (2003), No. 7, pp. 1111-1113
3. ISIJ Int, Vol. 43 (2003), No. 10, pp. 1630-1639
4. J. W. Cahn: ACTA Metall, 4 (1956), pp. 449
5. M. Umemoto: Control and Prediction of structure and property, ISIJ, Tokyo, Japan, (1988), pp. 105