

## 저합금강의 베이나이트 등은 변태 거동 예측 모델링 Modeling for isothermal bainite transformation in low alloy steels

임 상호\*, 문 준오\*, 이 창희\* 윤 지현\*\*, 이 봉상\*\*

\* 한양대학교 재료공학과 신소재 하이브리드 프로세스 연구실

\*\* 한국원자력연구소, 원자력재료개발팀

### 1. 서 론

최근 구조용 강재의 제조 및 적용에 있어 기계적 성질 제어의 필요성이 증가하고 있으며, 이는 공정 중의 미세조직 변화의 예측을 필요로 한다. 이에 상변태 현상에 대한 다양한 모델이 제안되고 있으며, 특히 등은 변태 모델과 비 등은 과정을 미소의 등은구간의 합으로 가정한 가산법칙의 적용을 기본으로 하고 있다.

본 연구는 용접 열영향부(HAZ)의 재질 예측 모델 개발의 일부로서, 베이나이트 변태에 대한 TTT도 예측 모델 작성을 목표로 하고 있다. 이를 위해 베이나이트 변태 시작(Bainite-start, Bs) 온도를 계산하기 위한 열역학 모델과 베이나이트의 등은 변태 거동에 대한 속도론 모델을 작성하고자 하였다. 특히, 속도론 모델의 경우 저합금강 성분 범위의 합금 제조 및 등은 변태 거동 분석을 통해 식 (1)의 Avrami 식의 상수들의 온도 및 성분 의존성을 분석/정량화하였다.

$$\xi = 1 - \exp(-K \cdot t^{n_{av}}) \quad (1)$$

여기서,  $\xi$ 는 변태 분율,  $t$ 는 등은 유지 시간을 나타내며,  $K$ 와  $n$ 은 실험적으로 측정되는 상수이다.  $K$ 는 핵생성/성장 속도와 관련된 상수로서, 온도의 함수로 표현되며,  $n_{av}$ 는 변태 상의 형상, 핵생성 조건에 따르는 것으로 알려져 있다. 대부분의 경우,  $n_{av}$ 값의 이러한 야금학적 의미 및 미비한 온도 의존성으로 인해 온도에 무관한 상수로 취급되고 있다<sup>1,2)</sup>. 그러나,  $n_{av}$ 값의 상수화에 따른 등은 변태 거동의 재현성에 대한 영향은 고려되고 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 반응상수의 상수화에 따른 영향을 고려한 분석방법을 제시하고 이를 바탕으로 하여 속도론 모델을 작성하고자 하였다.

### 2. 실험방법

저합금강에 대한 속도론 모델 작성을 위해 진공유도용해방법을 이용하여 표 1의 합금을 제조하였으며, Dilatometer를 통해 등은 변태 거동을 측정하였다. 유도가열방법을 이용하여 1200℃의 온도로 시편을 가열하고, 60℃/s의 냉각 속도로 등은 변태 온도까지 냉각 후 600-2000초 동안 등은에서 유지하였다. 전자투과현미경(TEM) 관찰 결과 상부/하부 베이나이트의 존재를 확인하였다. 한편, 1200℃의 최고 온도 조건에서 합금에 상관없이 약 30-50 $\mu$ m의 초기 오스테나이트 결정립 크기를 보였다.

Table 1 Chemistries of experimental steels [wt%]

Alloys	C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si
A	0.089	0.933	1.984	0.965	0.499	0.237
B	0.188	0.497	1.997	1.919	0.491	0.256
C	0.187	0.975	3.934	0.010	0.489	0.244
D	0.190	1.469	0.009	0.984	0.500	0.245
E	0.289	0.510	3.998	0.960	0.499	0.252
F	0.295	0.974	0.005	1.949	0.492	0.243
G	0.276	1.409	1.938	0.011	0.498	0.241

### 3. 실험결과

#### 3.1 열역학 모델 및 Bs 온도

베이나이트 변태에 대한 기준 온도로서, Bs 온도가 먼저 결정되어야만 한다. 본 연구에서는, 일부 논란이 있지만, 베이나이트 변태의 표면 기복(surface relief) 및 불완전 변태(incomplete reaction) 현상에 대한 설명이 적절한 Bhadeshia<sup>3)</sup>의 정의를 이용하여 Bs 온도를 정의하였다. 이에 따른 Bs 온도는 다음의 핵생성/성장 조건의 동시 만족에 의해 결정된다.

$$|\Delta G_m| > |G_M| \quad (2)$$

$$|\Delta G^{r-a}| > G_s \quad (3)$$

$\Delta G_m$ 과  $\Delta G^{r-a}$ 는 각각 displacive(para평형) 핵생성에 대한 구동력과 무확산변태에 대한 구동력을 나타내며, 오스테나이트와 페라이트의 자유에너지를 관계로부터 계산될 수 있다. 이를 위해 유한회석용체모델<sup>4)</sup>을 이용하여 각 상의 자유에너지를 정의하고 평형 성분/구동력 계산 프로그램을 작성하였다. 한편,  $G_s$ 는 베이나이트 성장에 수반되는 변형에너지를 나타내며, 연구자에 따라 400-600J/mol<sup>3,6)</sup>의 값을 갖는다고 보고하고 있다.  $G_N$ 은 핵생성에 대한 임계 구동력으로서 문헌상의 실험(apparent) Bs 온도<sup>5)</sup>와 그 Bs 온도에서의 핵생성 구동력으로부터 식(4)의 관계를 얻었다.

$$G_N = 5.022T - 3585.731 \quad (4)$$

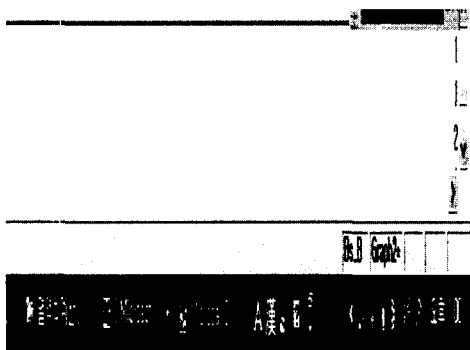


Fig. 1 Comparison of Bs temperatures and optimization of stored strain energy

그림 1은 식 (2)와 (3)의 조건과 표 1의 성분으로부터 계산된 Bs 온도와 측정된 Bs 온도의 관계를 보이고 있다. 초기 변형에너지를 400J/mol로 설정한 결과, 대부분의 강재는 측정 Bs온도에 근접한 반면, D와 F 강재의 경우 상당한 편차를 보임을 알 수 있다. 이에 식 (2), (3)의 Bs 결정 조건을 조사한 결과, D와 F 강재의 경우, 핵생성 조건보다는 성장조건에 의해 Bs 온도가 결정됨을 알 수 있었으며, 변형 에너지를 600J/mol로 재설정함으로써, 그 편차를 줄일 수 있었으며, 그 결과를 그림 1에 포함하였다.

### 3.2 속도론 모델

그림 2는 각 합금의 등은 변태 실험 결과 측정

된 반응상수 n을 보이고 있다. 온도에 따라 약간의 변화가 있으나, 뚜렷한 의존성은 보이지 않으며, 따라서 온도에 무관한 상수로 취급할 수 있다. 반면, 합금량에 따라 그 평균값이 증가하는 거동을 보이며, 이에 다음과 같은 성분의존 함수로 표현할 수 있었다.

$$n_{av} = 3.319X_c + 0.042X_{Mn} + 0.042X_{Ni} + 0.112X_{Cr} + 1.334 \quad (5)$$

여기서,  $X_i$ 는 각 합금량[wt%]을 나타낸다.

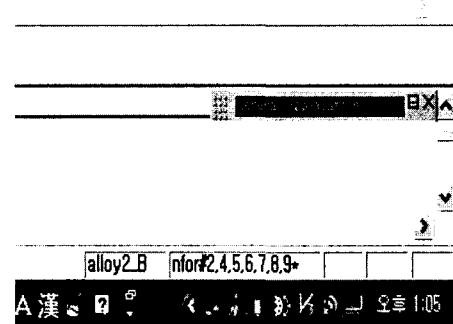


Fig. 2 Reaction constants for experimental steels

그림 3은 등은 변태 거동의 재현성에 대한 평균  $n_{av}$ 값의 영향을 나타낸 것으로 기호는 범례에 보이는 조건에서 실험적으로 측정된 거동을 나타내며, 점선으로 표시된 것이 각 합금에 대한 평균  $n_{av}$ 값과 실험적으로 측정된 K값을 이용하여 계산한 것이다. 주어진 온도에서 실제  $n_{av}$ 값에 비해 사용된 평균값이 작으며, 이에 따라 실제 변태 속도에 비해 상당히 느린 속도로 계산됨을 알 수 있다. 이는 용접공정과 같은 비등온 거동을 표현하기 위해 등은 모델과 가산법칙을 사용한다는 측면에서 매우 중요한 현상으로 생각된다. 따라서, 이러한 평균 n값의 사용에 따른 변태 속도의 영향을 보정할 필요가 있으며, 이는 다음과 같은 방법으로 수행될 수 있다.

식 (6)은 식 (1)의 Avrami 식을 재정리한 것으로서, 특정 변태 분율과 그에 도달한 시간 및 평균 n값으로부터 속도상수 K를 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$K = \frac{1}{t \xi^{n_{av}}} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\xi}\right) \quad (6)$$

다양한 변태 분율에 도달한 시간에 대해 거의 유사한 속도상수값을 보임을 확인할 수 있었으며, 따라서, 이러한 방법에 의한 속도상수가 전체 등은 거동을 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

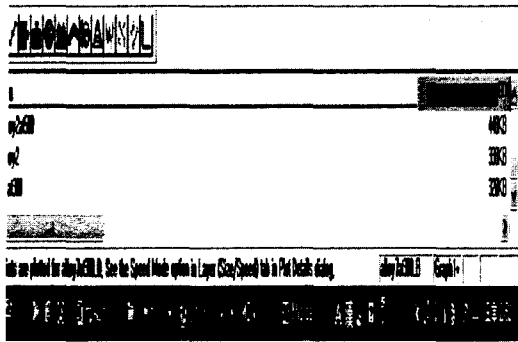


Fig. 3 Comparisons of transformation behaviors

이러한 속도상수에 대한 보정 결과를 그림 3에 실선으로 함께 나타내었으며, 매우 우수한 등온 거동의 재현성을 확인할 수 있다. 이러한 방법에 의해 각 합금에 대한 속도상수를 보정하였다. 이로부터 성분에 대한 의존성을 중회귀 분석하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다.

Table 2 Coefficients for  $\ln K=A+B_1T+B_2T^2$

	C	Mn	Ni	Cr	Constant
A	352.3299	389.6908	83.0556	163.394	-851.898
B <sub>1</sub>	-1.4812	-1.3278	-0.2615	-0.5059	2.9286
B <sub>2</sub>	0.0013	$8.94 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-4}$	$2.44 \times 10^{-4}$	-0.0020

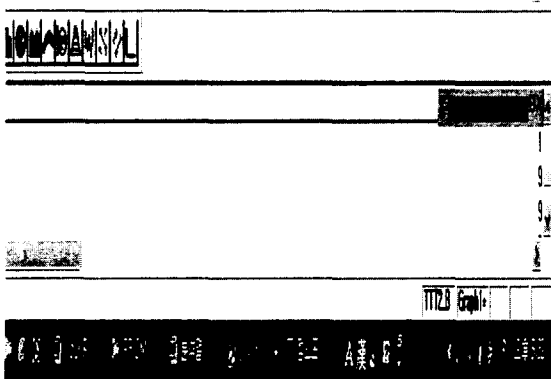


Fig. 4 Comparisons of TTT diagrams

그림 4는 위의 열역학모델과 속도론모델을 통해 주어진 합금의 성분에 대해 계산된 TTT도를 실험 TTT도와 비교하고 있다. A 강재의 경우, 변태 초기에서의 상당한 편차가 보이지만, 이는 시간 축을 로그로 표현한 결과이다. 반면, 느린 변태 속도를 보이는 E의 경우, 상당한 편차가 발생함을 알 수 있다. 이는 표 2에서와 같이 합금 성분에 대한 의존성의 중회귀분석에 있어서의 낮

은 상관계수(correlation coefficient)에 기인하는 것으로 보이며, 따라서, 이러한 편차를 줄이기 위해 속도상수의 형태에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

용접 열 영향부의 재질 예측 모델의 일부로서, 베이나이트 변태에 대한 TTT도 예측 모델을 작성하였다. Bs 온도를 계산하기 위해 페라이트와 오스테나이트의 자유에너지를 유한회석용체 모델로 정의하고 평형계산을 통해 핵생성 및 성장 구동력을 계산하고, Bhadeshia의 Bs 온도 결정 조건을 적용하였다. 한편 등온 변태 거동에 대한 속도론 모델 작성을 위해 저합금강 성분 범위의 합금 제조 및 등온 변태 실험을 수행하였다. 특히 Avrami 식의 반응상수의 영향을 고려한 분석 방법을 통해 속도상수 및 반응상수에 대한 성분/온도의존성을 함수화하였다.

#### 후 기

본 연구는 2003년 한국원자력연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. P.K. Agarwal and J.K. Brimacombe : Metall. Trans. B, 12B (1981), 121
2. M. Umemoto, K.Horiuchi and I. Tamura : Trans. ISIJ, 22 (1982), 854
3. H.K.D.H. Bhadeshia : Bainite in Steels (2nd Edition), IOM Communications Ltd., 2001
4. J. Miettinen : Ironmaking and Steelmaking, 23 (1996), 346
5. G.F. Vander Voort : Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels, ASM International, 1991
6. S. Nanba, M. Katsumata, T. Inoue, S. Nakajima, G. Anan, A. Hiramatsu, A. Moriya, T. Watanabe and M. Umemoto : CAMP-ISIJ, 3 (1990), 871