



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0136681

(43) 공개일자 2020년12월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 30/00 (2020.01) G06F 17/10 (2006.01)

(52) CPC특허분류
G06F 30/23 (2020.01)
C21D 11/00 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2019-0062532

(22) 출원일자 2019년05월28일

심사청구일자 2019년05월28일

(71) 출원인

경상대학교산학협력단

경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)

(72) 발명자

전만수

경상남도 사천시 정동면 여옥길 36 송보파인빌아파트 107동 1202호

미짬이라니

경상남도 진주시 진주대로 501 경상대학교 10동 315호

(74) 대리인

특허법인 태웅

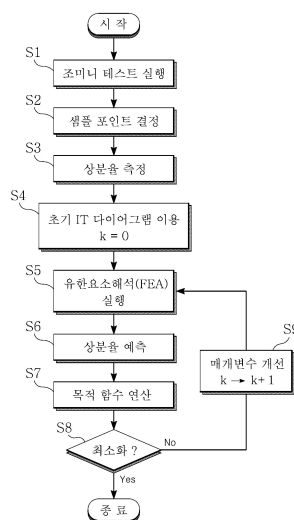
전체 청구항 수 : 총 4 항

(54) 발명의 명칭 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법

(57) 요약

본 발명은 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법에 관한 것이다.

본 발명은 조미니 테스트를 실행하는 제1 단계; 샘플 포인트를 결정하는 제2 단계; 상분율을 측정하는 제3 단계; 초기 IT 다이어그램을 이용하는 제4 단계; 유한요소 해석을 실행하는 제5 단계; 상기 상분율을 예측하는 제6 단계; 목적 함수를 연산하여 산출하는 제7 단계; 상기 제7 단계에서 산출된 값인 오차가 최소화인지 판단하여 최소 값이면 종료하는 제8 단계를 포함하는 것이다.

대표도 - 도1

(52) CPC특허분류

G06F 17/10 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	10081334
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술평가원
연구사업명	산업기술혁신사업
연구과제명	700℃이하 온간성형공법 활용 1100MPa급 항공용 Ti합금 체결부품 상용화기술 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	주식회사 진합
연구기간	2018.01.01 ~ 2018.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	P0006106
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술진흥원
연구사업명	광역협력권산업 지역주도형 기술개발사업
연구과제명	자동차 방향제어용 스테인레스 볼 스테어드 부품 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	(주) 대동
연구기간	2018.10.01 ~ 2019.09.30

명세서

청구범위

청구항 1

조미니 테스트를 실행하는 제1 단계;
 샘플 포인트를 결정하는 제2 단계;
 상분율을 측정하는 제3 단계;
 초기 IT 다이어그램을 이용하는 제4 단계;
 유한요소 해석을 실행하는 제5 단계;
 상기 상분율을 예측하는 제6 단계;
 목적 함수를 연산하여 산출하는 제7 단계;
 상기 제7 단계에서 산출된 값인 오차가 최소화인지 판단하여 최소값이면 종료하는 제8 단계;
 를 포함하는 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,
 상기 제8 단계에서 오차의 최소화가 이루어지지 않으면, 매개 변수를 변경하고 유한 요소 해석을 다시 실행하는 제9 단계를 포함하는 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법.

청구항 3

제1 항에 있어서,
 상기 제8 단계에서 최소화는,
 실험 IT 다이어그램에 의해 얻은 목표 상분율과 이론 IT 다이어그램을 이용하여 얻은 예측 상분율간의 오차를 최소화하는 것이고, 상기 오차는 다음 수학적 식 1의 목적 함수에 의해 산출되는 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법.

[수학적 식 1]

$$\psi_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_j (X_{j,tar(i)} - X_{j,pre(i)})^2}$$

여기서, , $X_{j,pre(i)}$ 와 W_j 는 각각 i 번째 샘플 포인트에서 유한 요소 해석에 의해 예측되는 j 번째 상분율 및 j 번째 상(phase)의 중량 인자이고, n 과 m 은 각각 샘플 포인트와 상의 갯수이다.

청구항 4

제1 항에 있어서,
 상기 초기 IT 다이어그램을 이용하는 제4 단계는,

다음 수학적 식 2,3에 의해 이론 IT 다이어그램을 최적으로 조정하는 단계인 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법.

[수학적 식 2]

$$Log(t') = aLog(t) + b$$

[수학적 식 3]

$$T' = T + c$$

여기서, a,b,c는 최적화시 설계 매개 변수, T 및 t는 변태되지 않은 시스템에서의 온도 및 시간, 매개 변수 T' 및 t'는 각각 변태후 온도 및 시간이다.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 자동차 중량을 줄이기 위한 노력은 엔지니어와 연구자가 부품의 강도를 향상시키고, 수명을 연장하도록 꾸준히 추진된다.

[0003] 또한, 완전히 결합된 기계 및 야금 문제를 처리할 수 있는 시뮬레이션 기술이 개발되었다. 그러나, 재료의 야금학적 특성은 여전히 충분히 고려되지 않았기 때문에 금속 형성 및 열처리 공정에 대한 실질적인 오차와 부정확한 야금학적 예측을 초래할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명은 금속 형성 및 열처리 공정에 대한 실질적인 오차와 부정확한 야금학적 예측을 개선하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0005] 본 발명의 해결 수단은, 조미니 테스트를 실행하는 제1 단계; 샘플 포인트를 결정하는 제2 단계; 상분율을 측정하는 제3 단계; 초기 IT 다이어그램을 이용하는 제4 단계; 유한요소 해석을 실행하는 제5 단계; 상기 상분율을 예측하는 제6 단계; 목적 함수를 연산하여 산출하는 제7 단계; 상기 제7 단계에서 산출된 값인 오차가 최소화인지 판단하여 최소값이면 종료하는 제8 단계를 포함하는 금속재의 등온 변태 다이어그램의 조정방법이 제공될 수 있다.

발명의 효과

[0006] 본 발명은 조미니 테스트를 이용하여 금속재의 IT 다이어그램을 조정하고, 최적화할 수 있다.

[0007] 본 발명은 유한 요소 최적화 과정을 기반으로 하며, 최적화 툴(tool)을 이용하여 샘플 포인트에서 목표 상분율과 해당 유한 요소 솔루션간의 오차(차이)를 반복하여 최소화할 수 있다.

[0008] 일례로 AISI 52100 베어링 스틸의 표준 조미니 테스트를 이용하여 본 발명의 조정 방법의 실현 가능성과 신뢰성을 확인할 수 있다.

[0009] 각 IT 다이어그램 곡선에 대한 세 가지 최적화 매개 변수는 수정된 키리달디 모델에 수학적으로 적용될 수 있다.

[0010] 이 최적화 매개 변수는 최적화 설계 변수로서, 수정된 키리달디 모델에서 얻은 곡선을 최적화 과정에서 초기 추측으로 이용하고, 오차를 최소화하여 실험 IT 다이어그램에 근접되게 할 수 있다.

- [0011] 최적화된 다이어그램과 문헌에서 보고된 실험 다이어그램 간에는 양호한 일치 가능성이 확인될 수 있다.
- [0012] 실험 IT 다이어그램, 수정된 키리달디 모델에서 얻은 IT 다이어그램 및 최적화된 모델에서 얻은 IT 다이어그램을 이용한 예측 상분율을 비교하고, 조정 또는 최적화 절차가 모델의 예측된 상분율의 정확도를 크게 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0013] 도 1은 본 발명에 따른 IT 다이어그램을 조정하기 위해 제시된 방법의 개념적 절차도이다.
- 도 2는 AISI 52100 강의 실험 IT 다이어그램과 수정된 키리달디 모델의 다이어그램이다.
- 도 3은 T-t 시스템에서 T'-t' 시스템으로 변환된 다이어그램이다.
- 도 4는 시편의 온도 측정을 위한 샘플 포인트를 나타낸 도면이다.
- 도 5는 샘플 포인트에서 측정 및 예측된 냉각 곡선을 나타낸 다이어그램이다.
- 도 6은 유한 요소 모델과 샘플 포인트를 나타낸 도면이다.
- 도 7은 반복 횟수의 함수로서 목적 함수의 변화를 나타낸 다이어그램이다.
- 도 8은 실험 IT 다이어그램과 수정된 키리달디 모델을 이용하여 최적화된 키리달디 모델의 다이어그램이다.
- 도 9a 내지 도 9d는 세 모델에 의해 예측된 상분율의 비교도이다.
- 도 10a 내지 도 10d는 수정된 키리달디 모델을 이용하여 예측된 상분율 다이어그램이다.
- 도 11은 실험 및 조정된 키리달디 모델을 이용하여 예측된 상분율 다이어그램이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0014] 금속재의 등온 변태(Isothermal Transformation; 이하 'IT'라 약칭함) 및 연속 냉각 변태(Continuous Cooling Transformation; CCT) 다이어그램은 금속재의 열처리 가공에 중요하다. 이러한 다이어그램을 결정하기 위해 많은 실험 작업을 수행하였다.
- [0015] IT 다이어그램은 급냉에 의해 생긴 과냉 오스테나이트의 변태를 시간과 온도로 나타내는 곡선으로서, 일정 온도로 떨어뜨린 후 시간을 길게 가지면서 상(phase)의 변화를 확인하는 것이다.
- [0016] 또한, IT 다이어그램은 금속재, 예를 들어 강재(steel)를 A1 변태점 이하의 항온에서 변태 개시 및 종료 시간을 구하고, 각 온도에서 변태 개시선과 종료선을 로그(log) 눈금으로 도시한 것이다.
- [0017] 평형 상태(equilibrium phase)의 경우, 온도를 떨어뜨리고 일정 시간이 지나면서 상(phase)이 형성되고, 따라서 실제 그 온도에서 나타날 수 있는 상의 시간의 변화에 따라 얼마의 양이 생기는지 가늠할 수 있는 척도중 하나가 IT 다이어그램이다.
- [0018] 이러한 IT 다이어그램은 다른 표현으로 TTT 선도(Time Temperature transformation diagram)라고 할 수 있다.
- [0019] 반대로 CCT 다이어그램은 냉각 속도(Temperature/sec)를 결정하고, 그 냉각 속도로 온도를 떨어뜨려갈 때 어떤 상이 형성되는지를 확인할 수 있다. 즉, CCT 다이어그램은 냉각 속도에 따른 비평형 상태(non-equilibrium phase)를 확인할 수 있다.
- [0020] 그러나, 광범위한 합금 규격 또는 조합은, 조성 변화의 민감성과 결정립 크기(grain size)에 대한 의존성이 결합되어 일반적으로 사용하기 위한 충분한 다이어그램을 만드는 것이 불가능하게 한다.
- [0021] 이 문제를 극복하기 위해 다양한 화학 성분을 갖는 다양한 철강에 대한 IT 다이어그램을 제공할 수 있는 모델을 개발하기 위한 많은 연구를 수행하였다.
- [0022] 조미니 엔드 담금질 테스트(Jominy end quench test)는 강재의 담금질성을 측정하는데 이용되는 가장 신뢰성 있는 방법 중 하나이다.
- [0023] 이러한 조미니 엔드 담금질 테스트는 오스테나이트화 온도까지 원통형 강재 시편을 가열한 다음, 한쪽 끝을 급냉시켜 마르텐사이트, 베이나이트, 페라이트, 펄라이트 및 오스테나이트를 포함하는 다양한 상으로 구성된 다양한 미세 조직을 형성하는 것으로 이루어질 수 있다.

- [0024] 조미니 테스트는 적절한 모델을 이용하여 IT 또는 CCT 곡선을 개발하는 데 매우 적합하다.
- [0025] 본 발명에서는 표준 조미니 테스트를 이용하여 유한 요소법과 최적화 방법을 결합하여 모델의 IT 다이어그램에 기초한 실험용 조미니 테스트 결과와 유한 요소 예측 간의 오차를 최소화하여 금속재(특히 강재)의 IT 다이어그램을 개선시키거나 최적화하는 것이다.
- [0026] 이하, 본 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용을 첨부된 예시 도면에 의거 상세하게 설명한다.
- [0027] [IT 다이어그램 조정 방법]
- [0028] 본 발명은 강재의 IT 다이어그램을 조정하는 새로운 방법으로서, 도 1 내지 도 11을 통해 설명하면 다음과 같다.
- [0029] 도 1은 본 발명의 IT 다이어그램을 조정하기 위해 제시된 방법의 개념적 절차도이다.
- [0030] 도 1을 참조하면, 본 발명의 IT 다이어그램 조정 방법은 대상물의 조미니 테스트를 실행하는 제1 단계(S1); 대상물의 샘플 포인트를 결정하는 제2 단계(S2); 상분율을 측정하는 제3 단계(S3); 초기 IT 다이어그램을 이용하는 제4 단계(S4); 유한요소 해석을 실행하는 제5 단계(S5); 유한 요소 해석에 의해 상분율을 예측하는 제6 단계(S6); 목적 함수를 연산하여 산출하는 제7 단계(S7); 상기 제7 단계에서 산출된 값인 오차가 최소화인지 판단하여 최소값이면 종료하는 제8 단계를 포함할 수 있다.
- [0031] 대상물은 강재(steel)가 될 수 있고, 제8 단계에서 최소화는 실험 및 산출된 IT 다이어그램을 이용하여 얻은 목표 상분율과 예측 상분율간의 오차를 최소화하는 것이다.
- [0032] 제8 단계에서 오차의 최소화가 이루어지지 않으면 다시 유한 요소 해석을 실행하여 상분율을 예측하고, 목적 함수를 산출하여 오차의 최소화를 진행하는 제9 단계(S9)를 포함할 수 있다.
- [0033] 제8 단계(S8)에서 제9 단계(S9)로 넘어가는 과정에서 매개 변수(parameter)를 개선(변경)하는 단계를 거치도록 할 수 있다.
- [0034] 유한 요소 최적화 방법은 각각 실험 및 연산된 IT 다이어그램을 이용하여 얻은 목표 상분율과 예측 상분율간의 오차를 최소화할 수 있다.
- [0035] 모델에 적용된 조정 매개 변수는 결정할 설계 변수(design variable)이다.
- [0036] 대상물로서, 예를 들어 AISI 52100 강재의 조미니 테스트는 본 발명에 따른 조정 방법의 실현 가능성과 신뢰성을 확인하는데 이용될 수 있다.
- [0037] 목표 상분율(target phase fraction)이라는 일부 샘플 포인트에서의 상분율에 대한 정보가 조미니 테스트 샘플의 평단면에서 얻어질 수 있다.
- [0038] 목표 포인트는 유한 요소 예측 및 IT 다이어그램 최적화를 위한 제어 포인트와 공유될 수 있다. i번째 샘플 포인트에서 측정된 j번째 상분율은 다음 수학적 1의 목적 함수에서 최소화 될 관련 목표 값 $X_{j,tar(i)}$ 으로 적용될 수 있다.

수학적 1

$$\psi_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_j (X_{j,tar(i)} - X_{j,pre(i)})^2}$$

- [0039]
- [0040] 여기서, $X_{j,pre(i)}$ 와 W_j 는 각각 i번째 샘플 포인트에서의 유한 요소 해석에 의해 예측되는 j번째 상분율과, j번째 상(phase)의 중량 인자에 의해 예측되는 j번째 상분율이다. n과 m은 각각 샘플 포인트와 상의 갯수이다.
- [0041] 따라서, 목적 함수 ψ_0 는 샘플 포인트에서 오차로 정의될 수 있다. 목표 상분율은 실험적 또는 이론적인 방식으로 결정될 수 있다.
- [0042] 도 1에 도시된 본 발명의 최적화 절차를 검증하기 위해, 실시 예로서, AISI 52100 강재의 수정된 키리달디

(Kiridaldy) 모델의 최적화된 IT 다이어그램을 얻을 수 있다.

- [0043] 실시 예에서의 목표 상분율은 실험적 IT 다이어그램을 이용한 유한 요소 예측으로부터 얻어질 수 있다. 주어진 화학 조성과 입자 크기에 대한 수정된 키리달디 모델과 IT 다이어그램의 수학적식은 이미 문헌으로부터 제공될 수 있다.
- [0044] 도 2는 AISI 52100 강재의 실험 IT 다이어그램과 수정된 키리달디 모델의 이론 IT 다이어그램을 비교하는 도면으로서, 도 2를 참조하면, 실험 IT 다이어그램과 수정된 키리달디 모델의 이론 IT 다이어그램을 비교하고, 각각 목표 IT 다이어그램과 초기 IT 다이어그램에 이용될 수 있다.
- [0045] 특히, 실험적 다이어그램과 이론적 다이어그램 사이에는 큰 차이가 있다. 최적으로 결정되는 일부 매개 변수를 이용하여 IT 다이어그램의 선도를 조정하려면, 다음과 같이 두 개의 변태 수학적식이 정의될 수 있다.

수학적식 2

$$\text{[0046]} \quad \text{Log}(t') = a\text{Log}(t) + b$$

수학적식 3

$$\text{[0047]} \quad T' = T + c$$

- [0048] 여기서, T 및 t는 변태되지 않은 시스템에서의 온도 및 시간이고, 매개 변수 T' 및 t'는 각각 변태후 온도 및 시간이며, 도 3에 도시된 조정된 곡선으로 나타낼 수 있다.
- [0049] 상수 a, b 및 c는 조정 매개 변수, 즉 최적화 문제의 소위 설계 매개 변수이고, 이론적인 IT 다이어그램을 최적으로 조정하는데 이용될 수 있다. IT 다이어그램의 각 곡선에 대해 조정 매개 변수가 얻어질 수 있다.
- [0050] 예를 들어, 도 3을 참조하면, 펄라이트 개시 곡선의 매개 변수는 a_{Ps} , b_{Ps} 및 c_{Ps} 이다. 따라서, 각 상에 대한 최적화 설계 매개 변수의 총 갯수는 개시 및 종료 곡선의 조정 매개 변수를 포함하여 여섯 개이다.
- [0051] 코이스틴-마르버거(Koistinen-Marburger)의 비확산 변태 모델은 마르텐사이트와 오스테나이트 상분율을 계산하는데 이용될 수 있다.
- [0052] 제이매프로(JMatPro) 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 얻은 마르텐사이트 개시 온도(M_s)는 참고 IT 다이어그램의 실험값과 잘 일치할 수 있다.
- [0053] 따라서, 최적화 문제는 다음과 같이 정의될 수 있다.
- [0054] 일부 부등식 또는 동등한 제약 조건에 따라 목적 함수 Ψ_0 를 최소화하는 설계 매개 변수를 결정할 수 있다.
- [0055] 초기 IT 다이어그램(수정된 키리달디 모델)을 최적화하기 위해 a, b 및 c의 초기 추측은 각각 1.0, 0.0 및 0.0으로 가정할 수 있다.
- [0056] 최적화 과정 동안, 핵심 아이디어는 각 상의 조정 매개 변수 즉, 설계 매개 변수를 수학적식 1에서 설명된 목적 함수로 목표 상분율에 가장 가까운 상분율을 예측하는 반복적인 방법으로 확인하는 것이다.
- [0057] 최적화 기법으로 GRSM (Global Response Surface Model)이 이용될 수 있다.
- [0058] [최적화된 열적 조건의 획득]
- [0059] AISI 52100 강재의 조미니 엔드-담금질 테스트는 열전달 해석에 큰 영향을 주는 열 조건을 최적으로 확인하기 위해 표준 ASTM A255에 따라 먼저 분석될 수 있다.
- [0060] 열점소성(thermoviscoplasticity)을 이론적 기반으로 하는 2,000 사변형 유한 요소를 가지는 축 대칭 유한 요소 모델이 이용될 수 있다.

[0061] 표 1은 강재의 화학적 조성비를 나타낸다. 도 4를 참조하면, 조미니 테스트에서 시편은 850℃의 오스테나이트화 온도로 가열된 다음, 물 분사에 의해 한쪽 끝에서 냉각될 수 있다.

[0062] 재료의 밀도는 7860 kg/m³에서 일정하다고 가정되었다. 본 발명에 이용된 강재의 열 용량 및 열 전도도는 제이 매트프로(JMatPro) 소프트웨어를 이용하여 다른 온도에서 얻었으며, 표 2에 요약되어 있다.

[0063] 시편의 실린더형 표면 및 상부 표면, 즉 자유 표면은 자연 대류 및 복사에 노출될 수 있다. 이러한 자유 표면을 통한 열 손실은 대류 및 복사를 고려하여 분석될 수 있다.

[0064] 이러한 자유 표면으로부터의 복사열 전달은 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 법칙을 이용하여 복사율이 0.7로 계산될 수 있다. 표면에서의 대류 열전달은 뉴턴의 냉각 법칙에 의해 설명될 수 있다

수학식 4

$$q_c = Ah(T_s - T_a)$$

[0065]

[0066] 여기서 A, h, T_s, T_a는 각각 표면적, 대류 열전달 계수, 표면 온도 및 주변 온도이다. 자유 표면의 매개 변수 h는 자연 대류에 대한 공식을 이용하여 계산될 수 있다.

[0067] 담금질된 바닥면의 대류 열전달 계수 h_q는 간단히 계산할 수 없다. 특히, h_q는 온도와 관련된 모든 예측에 결정적인 영향을 미치며, 표면 온도에 크게 좌우될 수 있다.

[0068] 따라서, 담금질된 바닥면의 최적화된 대류 열전달 계수는 실험에서 얻은 냉각 곡선과 특정 샘플 포인트에서의 예측 사이의 차이를 최소화, 즉, 최적화 문제를 해결함으로써 결정될 수 있다.

[0069] h_q는 온도에 좌우되고 최적으로 결정되는 샘플 온도에서 일련의 h_q값에 의해 선형적으로 보간된다고 가정할 수 있다.

[0070] 목적 함수는 다음 수학식 5와 같다.

수학식 5

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m (T_{j,\text{exp}(i)} - T_{j,\text{pre}(i)})^2}$$

[0071]

[0072] 여기서, T_{j,pre(i)}와 T_{j,exp(i)}는 각각 i번째 샘플 포인트와 냉각중 j번째 샘플링 시간의 예측 및 실험 온도이다.

[0073] 매개 변수 n 및 m은 각각 샘플 포인트의 갯수(도 4의 1 내지 5) 및 샘플링된 횟수이다.

[0074] 도 5를 참조하면, 최적화된 h_q값(표 3)을 이용하여 얻은 실험 온도 및 해당 예측치는 잘 일치한다. 측정된 온도와 예측된 온도의 최대 차이는 샘플 포인트 1과 2에서 약 50℃이다. 이 오차는 확산 상변태가 종료되는 300℃ 미만의 온도에서 산출될 수 있다.

표 1

[0075]

AISI 52100 강재의 조성비(wt%)					
C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
1.08	0.53	0.25	0.33	1.46	0.08
ASTM 그레인 사이즈(grain size) : 7.0					

표 2

AISI 52100 강재의 열 특성					
T(℃)	900	700	500	300	100
비열(J/gK)	0.60	0.93	0.68	0.56	0.47
열 전도도 (W/mK)	27.6	31.4	35.1	37.4	35.2

표 3

담금질된 끝단부에서의 최적 대류막 계수					
T(℃)	20	400	580	650	850
$h_f(W/m^2K)$	43.8	32.4	31.5	10.6	2.0

[IT 다이어그램의 최적화]

조미니 테스트는 강재의 기준(reference) IT 다이어그램을 이용하여 시뮬레이션하고, 상기 최적화된 열 조건을 이용하여 수학적 2 및 수학적 3에서 정의된 조정 매개 변수의 최적화를 위한 목표 상분율 값을 획득할 수 있다.

표 4는 도 6에 도시된 시편의 평단면에 있는 17개의 샘플 포인트에서 산출된 예측 상분율값을 나열한 것이다.

표 4

샘플 포인트의 좌표와 해당 위치의 예측 상분율						
샘플 포인트	x(mm)	y(mm)	오스테나이트 (%)	펄라이트(%)	베이나이트 (%)	마르텐사이트 (%)
1	11.4	1.5	5.5	0.0	0.0	94.5
2	11.6	3.1	5.5	0.0	0.0	94.5
3	11.5	5.0	5.5	0.0	0.0	94.5
4	11.6	7.2	5.5	0.0	0.0	94.5
5	11.5	9.0	5.5	0.0	0.0	94.5
6	11.4	11.1	5.5	0.0	0.1	94.4
7	11.3	12.9	5.5	0.0	0.3	94.2
8	11.3	13.4	5.5	0.0	0.4	94.2
9	11.7	15.4	5.5	0.0	0.7	93.8
10	11.7	20.1	5.4	0.3	1.4	92.9
11	11.7	25.3	5.3	1.0	1.8	91.9
12	11.7	30.0	5.3	2.7	1.4	90.7
13	11.3	35.7	5.1	7.3	0.8	86.9
14	11.3	45.2	3.7	33.0	0.1	63.2

15	11.3	50.4	2.1	61.3	0.1	36.5
16	11.3	55.1	0.6	89.2	0.0	10.2
17	11.3	60.3	0.0	99.5	0.0	0.4
평균	-	-	4.5	17.3	0.41	77.7

[0082] IT 곡선의 최적화, 즉 수학식 2 및 수학식 3에서 정의된 조정 매개 변수의 최적화 산출은 하이퍼스터디(HyperSTUDY) 최적화 툴(tool)을 이용하여 17개 샘플 포인트에서 실험과 예측 사이의 상분율 오차를 반복적으로 감소시킴으로써 실현될 수 있다.

[0083] 도 2를 참조하면, AISI 52100 강재의 경우, 펄라이트 및 베이나이트 개시 및 종료를 포함한 IT 다이어그램의 4개의 곡선을 최적으로 조정해야 한다.

[0084] 그러므로, 최적화 변수는 펄라이트 개시용 a_{Ps} , b_{Ps} , c_{Ps} , 펄라이트 종료용 a_{Pf} , b_{Pf} , c_{Pf} , 베이나이트 개시용 a_{Bs} , b_{Bs} , c_{Bs} 및 베이나이트 종료용 a_{Bf} , b_{Bf} , c_{Bf} 이다.

[0085] 조정 매개 변수의 제약 조건은 다음과 같이 지정될 수 있다.

수학식 6

$$0.1 \leq a \leq 5.0$$

수학식 7

$$-5.0 \leq b \leq 5.0$$

수학식 8

$$-30.0 \leq c \leq 30.0$$

[0089] 여기서 a 는 a_{Ps} , a_{Pf} , a_{Bs} 및 a_{Bf} 를 포함하고, b 는 b_{Ps} , b_{Pf} , b_{Bs} 및 b_{Bf} 를 포함하며, 그리고, c_{Ps} , c_{Pf} , c_{Bs} 및 c_{Bf} 를 포함한다.

[0090] 초기 추측은 모든 상에 대해 $a_0=1.0$, $b_0=0.0$, $c_0=0.0$ 이 사용될 수 있다. 이러한 초기 추측은 수정된 키리달디 모델로 동일한 IT 다이어그램을 제공하고, 다이어그램은 최적화, 즉 수학식 1에서 정의된 목적 함수의 최소화를 통해 실험 다이어그램에 근접한다.

[0091] 서로 다른 가중 인자를 갖는 최적화의 두 가지 케이스가 표 5에 주어진 바와 같이 수행될 수 있다.

[0092] 케이스 1에서 수학식 1의 모든 상(phase)에 동일한 가중 인자가 적용될 수 있다. 케이스 2에서, 베이나이트 및 오스테나이트와 같은 더 작은 분율을 갖는 상들에 대해 보다 중요한 중요성을 부여하기 위해, 표 4에 주어진 평균 상분율에 대해 가중 인자가 불균등하게 할당될 수 있다.

[0093] 2가지 케이스(케이스1,2)에 있어서, 최적화는 모두 펄라이트와 베이나이트에 대해 독립적으로 수행될 수 있다.

[0094] 도 7에서 수평축은 반복 횟수, 수직축은 목적 함수를 나타낸 것으로서, 약 350회 반복한 결과, 케이스 1과 케이스

스 2의 목적 함수 값은 각각 0.15와 0.21로 수렴한다.

[0095] 표 6에는 두 가지 케이스에 대해 최적화된 조정 매개 변수가 나열되어 있다.

[0096] 도 7은 케이스 1에서 베이나이트 곡선에 대한 목적 함수 값의 감소가 펄라이트와 비교하여 상당히 작아서 최적화가 베이나이트 곡선을 적절하게 조정할 수 없음을 나타낸다.

[0097] 반대로, 목적 함수 값은, 가중 인자가 적용되는 케이스 2에서 펄라이트 및 베이나이트를 최적화하는 동안 감소될 수 있다.

표 5

[0098]

최적화 케이스에서의 중량 분율				
최적화 케이스	W _{오스테나이트}	W _{펄라이트}	W _{베이나이트}	W _{마르텐사이트}
케이스 1	1.0	1.0	1.0	1.0
케이스 2	10.0	2.0	100.0	1.0

[0099]

표 6

[0100]

최적화 조정 매개 변수												
최적 케이스	펄라이트 개시			펄라이트 종료			베이나이트 개시			베이나이트 종료		
	a _{Ps}	b _{Ps}	c _{Ps}	a _{Pf}	b _{Pf}	c _{Pf}	a _{Bs}	b _{Bs}	c _{Bs}	a _{Bf}	b _{Bf}	c _{Bf}
케이스1	2.10	-2.84	3.1	2.58	-4.80	3.7	0.14	1.21	-5.1	0.81	0.48	-8.3
케이스2	2.08	-2.85	-1.3	2.58	-4.78	2.6	0.71	0.05	25.1	0.95	-0.17	-6.3

[0101] [결과 및 검토]

[0102] 도 8은 실험, 수정 키리달디 모델 및 최적화 모델(케이스 1 과 2)을 이용하여 얻은 IT 다이어그램을 보여준다.

[0103] 실험적 IT 다이어그램과 키리달디 모델에서 얻은 초기 IT 다이어그램에는 상당한 차이가 있다.

[0104] 최적화된 두가지 케이스에서 얻은 최적의 조정 매개 변수를 적용하면, 수정된 키리달디 모델이 개선되고, 실험과 모델 간의 차이가 상당히 감소될 수 있다.

[0105] 펄라이트 상변태의 개시 및 종료 곡선은 모두 케이스 1 및 2에서 얻은 최적화된 조정 매개 변수가 적용될 때, 실험적 IT 다이어그램의 관련 곡선과 잘 일치한다.

[0106] 2가지 케이스(케이스 1,2) 모두에서 베이나이트 곡선에 대한 실험과 모델의 차이점 또한 감소한다.

[0107] 그러나, 베이나이트의 실험 개시 및 종료 곡선과 케이스 1에서 얻어진 것과는 여전히 상당한 불일치가 존재한다.

[0108] 이러한 불일치는 다른 상, 특히 마르텐사이트와 비교하여 샘플 포인트에서 베이나이트의 작은 분율 때문이다. 샘플 포인트의 평균 베이나이트 분율은 0.41%로 다른 모든 상의 평균 분율보다 작다(표 4 참조).

[0109] 따라서, 최적화중 목적 함수는 펄라이트 개시 및 종료 곡선에 크게 영향을 받아 펄라이트 곡선을 보다 효율적으로 최적화할 수 있다.

[0110] 도 8을 참조하면, 케이스 2에서 얻은 최적화 모델은 목적 함수에 적용된 가중 인자로 인해 베이나이트와 펄라이트 변태에 대한 허용 가능한 곡선을 제공한다.

[0111] 도 9a 내지 도 9d는 실험 IT 다이어그램, 수정된 키리달디 모델 및 두 최적화 케이스를 이용하여 최적화된 IT 다이어그램을 이용하여 예측된 오스테나이트, 펄라이트, 베이나이트 및 마르텐사이트 분율의 분포를 보여준다.

[0112] 앞서 설명한 동일 유한 요소 모델이 모든 시뮬레이션에 적용되며, 시뮬레이션에 이용된 IT 다이어그램만

다르다.

- [0113] 최적화된 조정 매개 변수를 이용한 예측을 개선하는 것은 도 9의 질적인 방법으로 명확하게 나타낼 수 있다.
- [0114] 모든 상의 예측된 상분율의 분포는 실험적 IT 다이어그램을 이용하여 예측한 것과 유사하다. 그러나, 도 9c를 참조하면, 실험 IT 다이어그램, 최적화 케이스 1과 케이스 2가 각각 이용될 때, 예측된 베이나이트 분율의 최대 값은 각각 2.0%, 1.1% 및 1.8% 이다.
- [0115] 케이스 1의 베이나이트 분율의 분포는 실험적 IT 다이어그램과 정확하게 일치한다. 수정된 키리달디 모델을 이용한 예측은 실험적인 IT 다이어그램을 이용한 예측과 전혀 일치하지 않는다.
- [0116] 도 10a 내지 도 10d는 실험적 IT 다이어그램을 이용하여 예측된 상분율이, 수정되고 최적화된 키리달디 모델의 분수와 정량적으로 비교한 것을 나타낸 도면이다.
- [0117] 최적화된 키리달디 모델의 케이스 1에 의해 예측된 오스테나이트, 펄라이트 및 마르텐사이트 상의 R 제공 값은 각각 0.93, 0.96 및 0.92로서, 실험 데이터와 최적화된 키리달디 모델(케이스 1)간의 오차는 무시할 만한 수준이다.
- [0118] 베이나이트 상에 대한 R 제공 값은 0.41이며, 이는 1.0으로부터 매우 멀리 떨어져 있다. 그러나, 케이스 1에 의해 예측된 베이나이트 분율에 대한 데이터 포인트는 수정된 키리달디 모델과 비교하여 도 10c에서 덜 산재해 있다.
- [0119] 케이스 2에서 얻은 최적화된 키리달디 모델을 적용하여 오스테나이트, 펄라이트 및 마르텐사이트의 R 제공 값은 각각 0.93, 0.96, 0.96 및 0.92로 향상시켰다.
- [0120] 도 11을 참조하면, 최적화된 모델을 확실하게 평가하기 위해, 조미니 시험편의 평단면에 분포된 40개 샘플 포인트에서 상분율을 예측한다.
- [0121] 이 샘플 포인트는 모델 학습용 최적화에 이용된 샘플 포인트와 동일하지 않다(표 4). 따라서, 이 모델을 이용하여 모델의 신뢰성을 평가할 수 있다.
- [0122] 도 11은 케이스 1과 케이스 2에서 평균 R 제공 값이 각각 0.9982와 0.9994임을 보여준다.
- [0123] 두 값 모두 1.0에 매우 가깝기 때문에, 최적화된 모델이 모든 상의 상분율을 큰 확신을 가지고 예측할 수 있음을 보여준다. 그러나, 케이스 2에서 얻은 IT 다이어그램은 케이스 1에 비해 실험 IT 다이어그램에 더 가깝다.
- [0124] 케이스 2의 최적화된 모델은 베이나이트와 같은 작은 분율을 가지는 상에 대해서도 모든 상의 상분율을 올바르게 예측할 수 있음을 나타낸다.
- [0125] 베이나이트, 즉, 가중 인자와 균형을 이루는 목적 함수를 이용하여 최적화하면, 베이나이트 및 오스테나이트 분율이 작은 조미니 테스트 뿐만 아니라, 다른 열처리 공정에서도 신뢰할 수 있는 상분율을 예측할 수 있다.
- [0126] [결론]
- [0127] 본 발명의 IT 다이어그램 조정 방법은 유한 요소 솔루션을 이용하고, 지정된 샘플 포인트에서 측정된 상분율 및 최적화 기술을 포함한 실제 실험을 이용할 수 있다.
- [0128] 수정된 키리달디 모델에 정의된 조정 매개 변수는, 최적화 과정에서 설계 변수로 이용되고, 이것으로 샘플 포인트에서 목표 상분율과 예측된 상분율 사이의 목적 오차 함수를 최소화할 수 있다.
- [0129] 본 발명의 조정 방법으로 IT 다이어그램의 각 곡선에 대한 세 가지 조정 매개 변수를 얻을 수 있다.
- [0130] 본 발명의 조정 방법은 표준 조미니 테스트를 이용하여, 일반 강재에 대한 수정된 키리달디 모델을 조정할 수 있기 때문에, 실용적이며 실현 가능하다.
- [0131] 그 결과, 키리달디 모델은 최적화된 조정 매개 변수를 적용한 후, 상분율을 신뢰성있게 예측할 수 있음을 보여줄 수 있다.
- [0132] 그러나, 수정된 키리달디 모델에서 얻은 IT 다이어그램은 최적화에 대한 초기 추측을 제공한다.
- [0133] 조정 매개 변수를 최적화하면, 초기 추측을 실험 IT 다이어그램에 근접시킬 수 있다.
- [0134] 본 발명에 따르면, 조정된 모델 IT 다이어그램 및 실험적 IT 다이어그램을 이용하여 예측된 상분율 사이의 오차

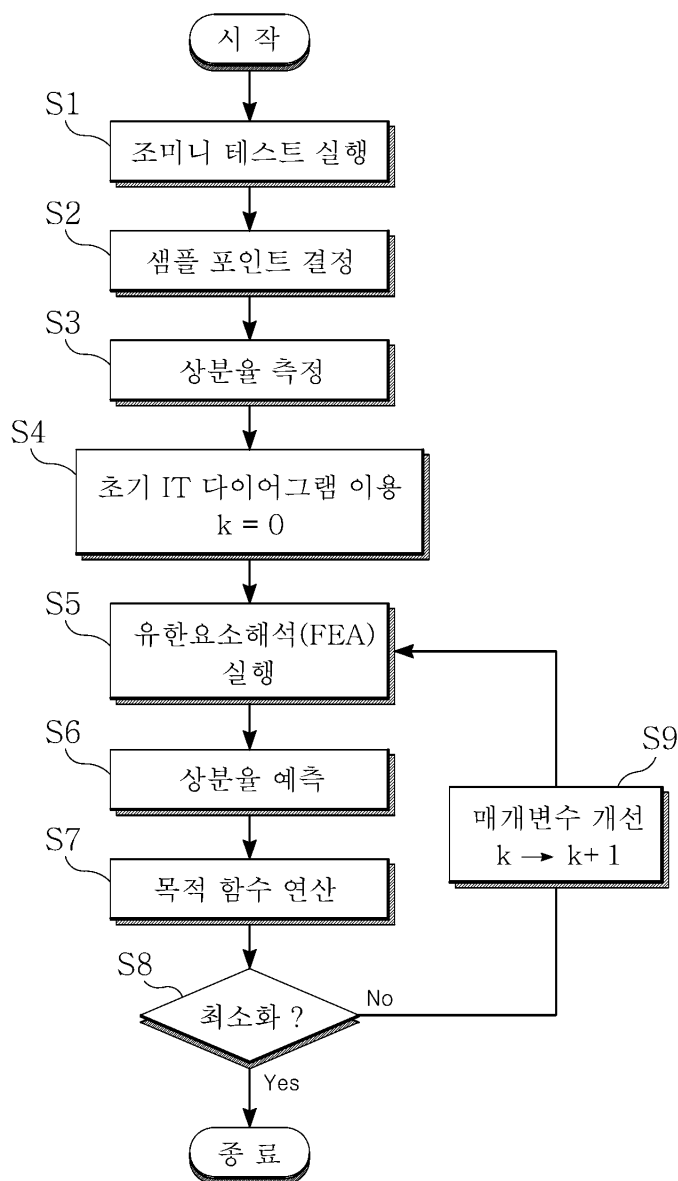
는 실제 이용시 충분히 작아질 수 있다.

부호의 설명

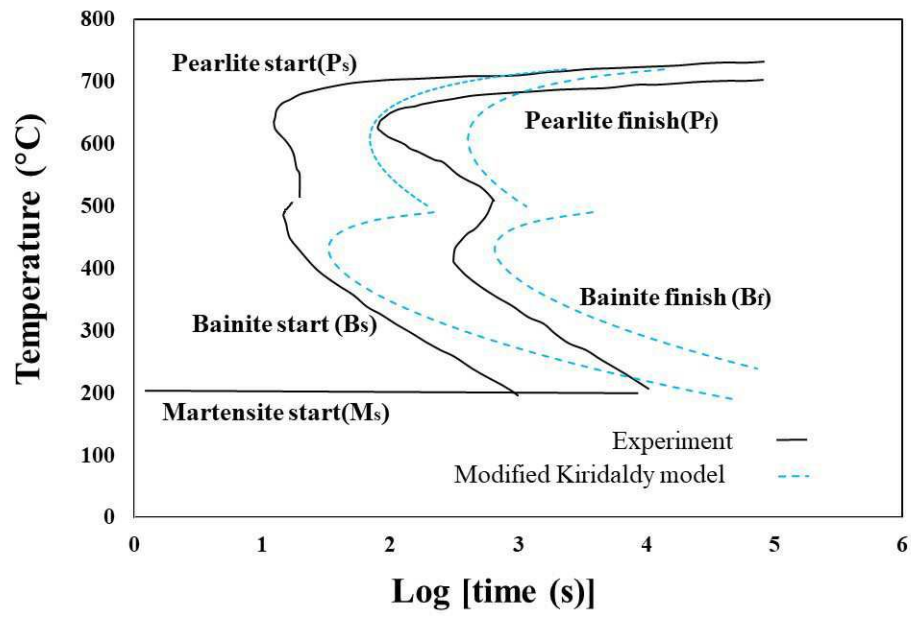
[0135] S1 : 제1 단계 S2 : 제2 단계
S3 : 제3 단계 S4 : 제4 단계
S5 : 제5 단계 S6 : 제6 단계
S7 : 제7 단계 S8 : 제8 단계
S9 : 제9 단계

도면

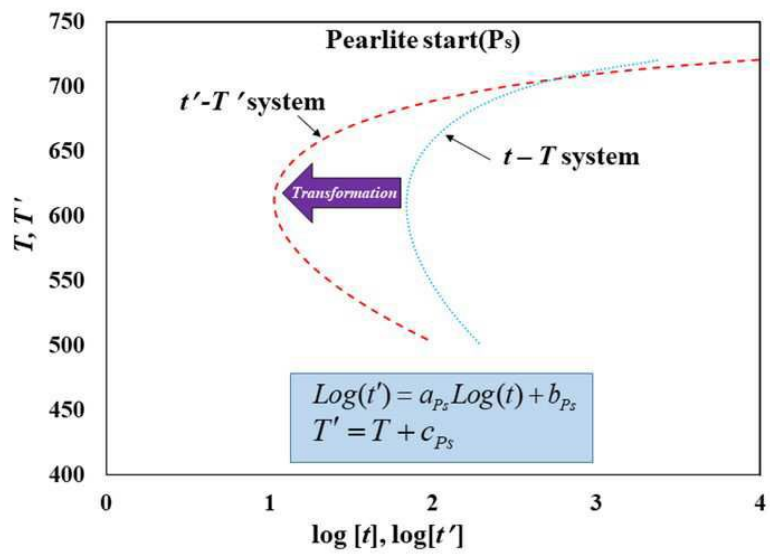
도면1



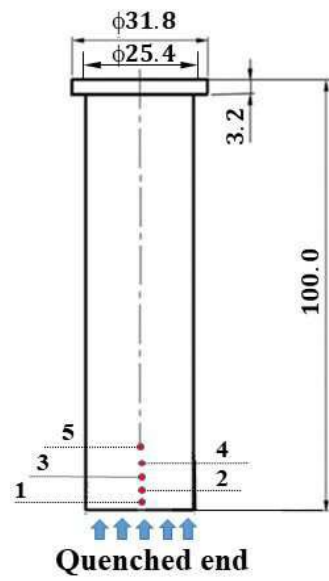
도면2



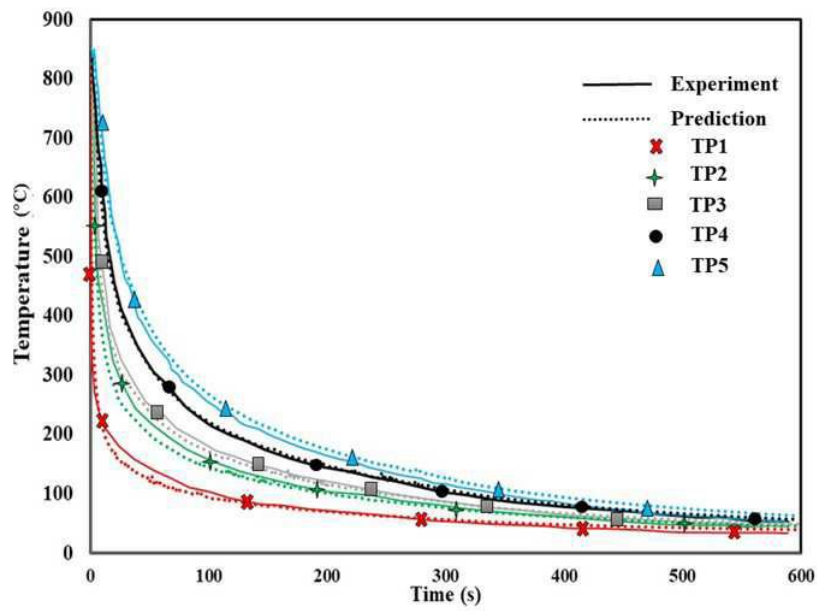
도면3



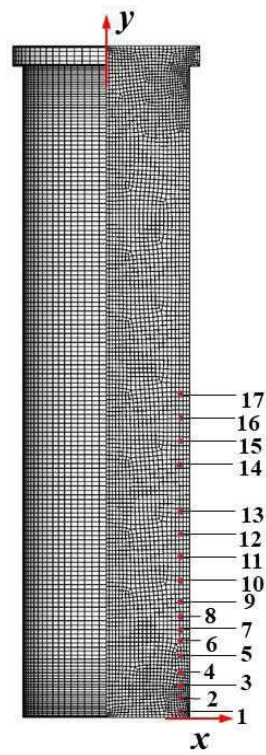
도면4



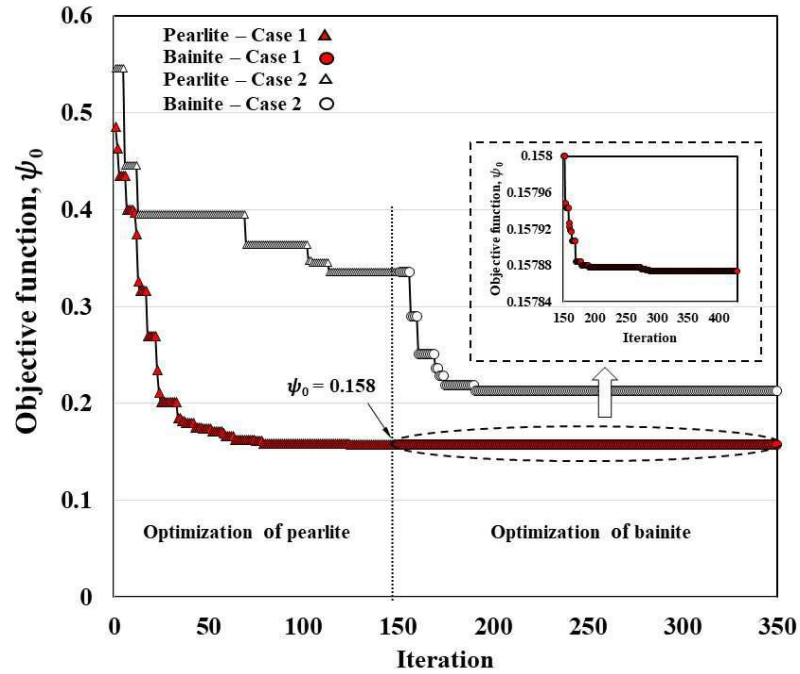
도면5



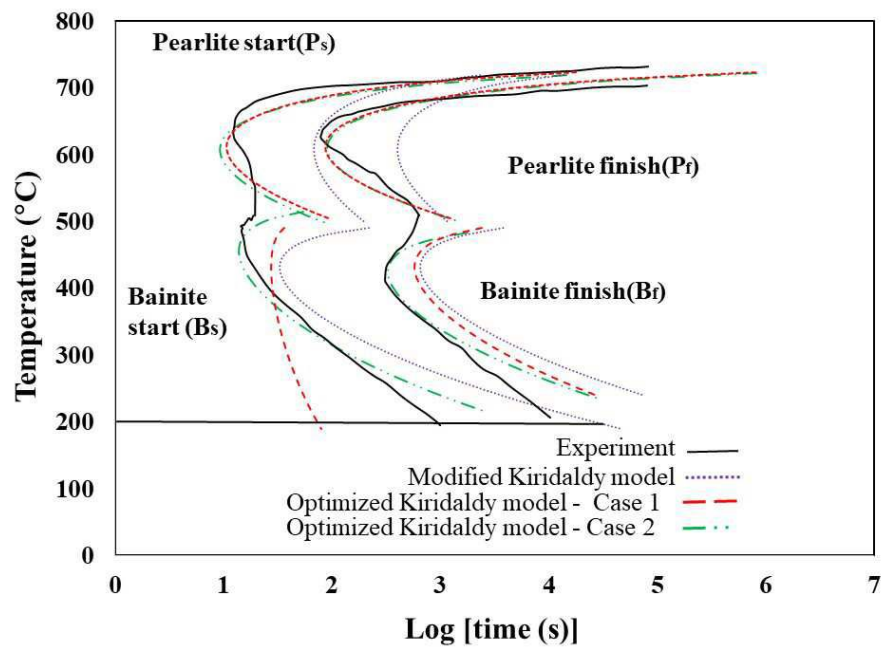
도면6



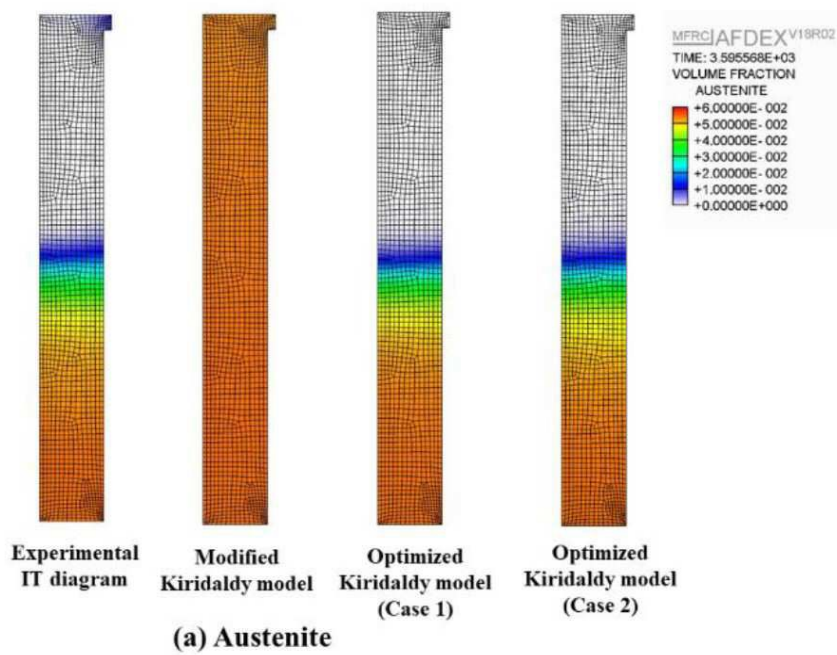
도면7



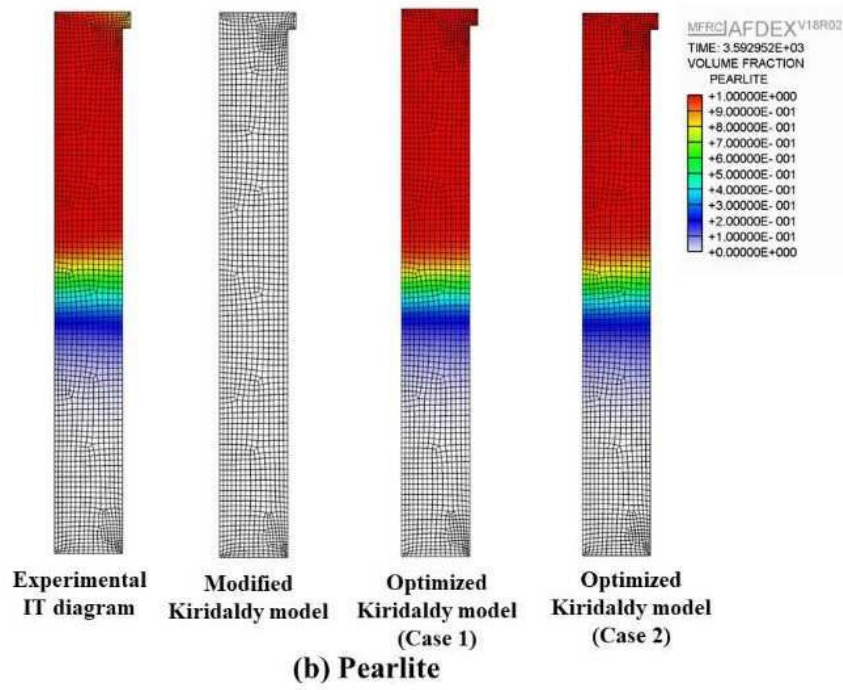
도면8



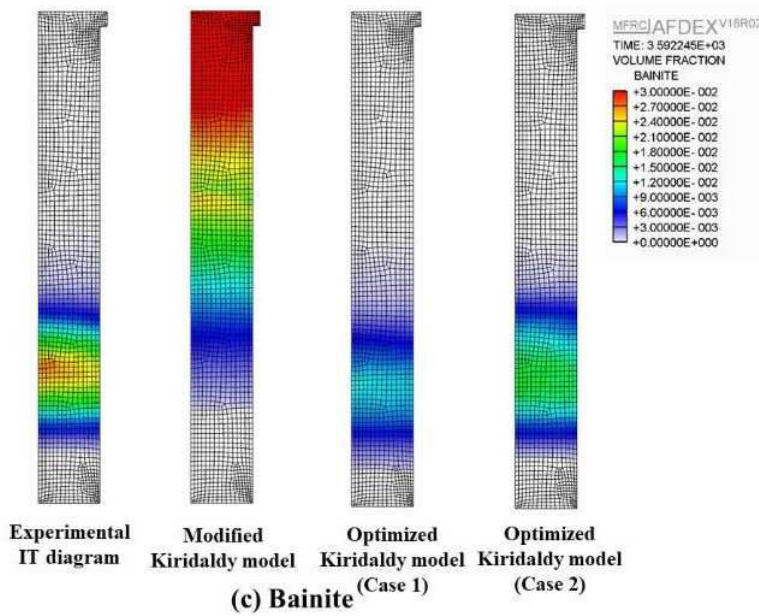
도면9a



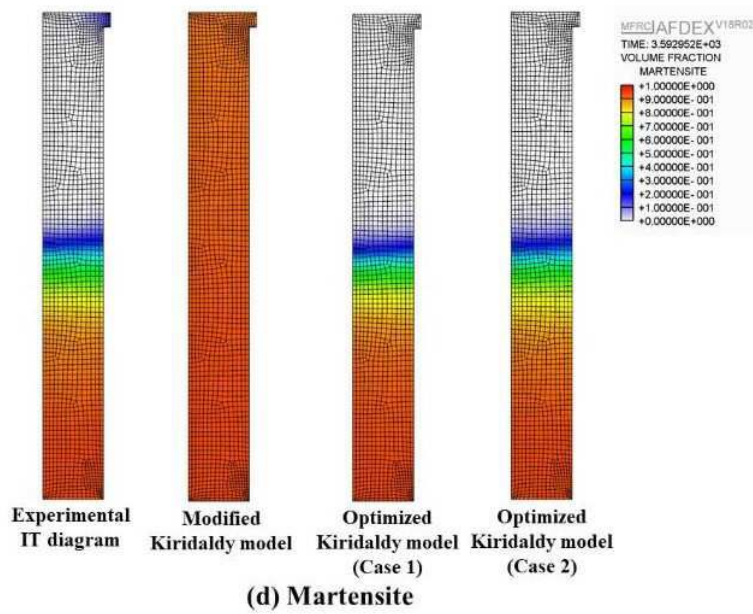
도면9b



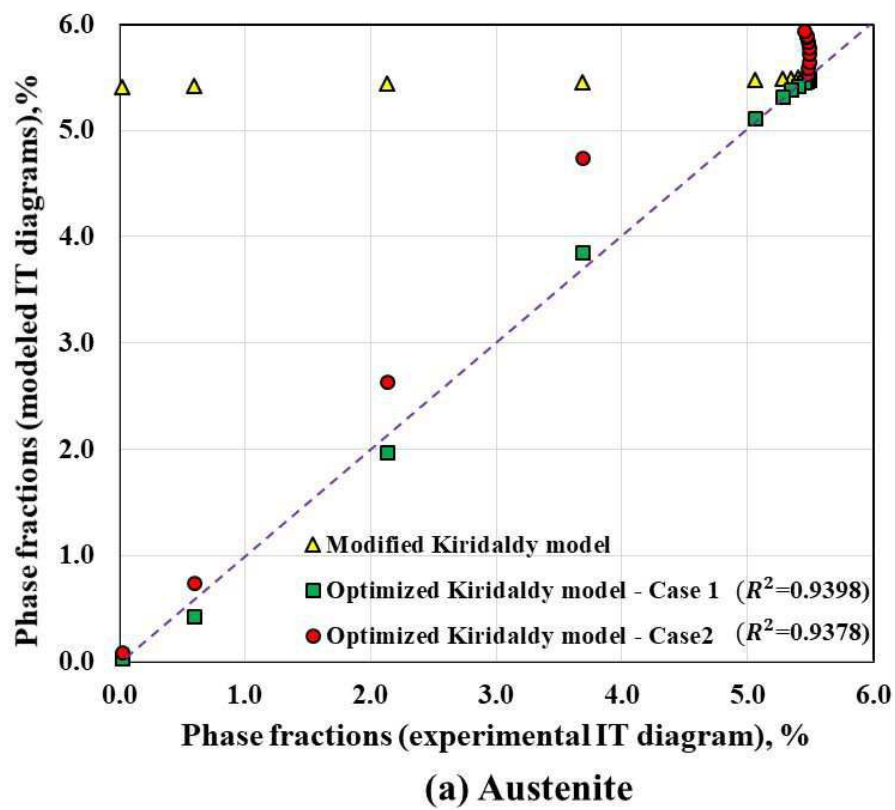
도면9c



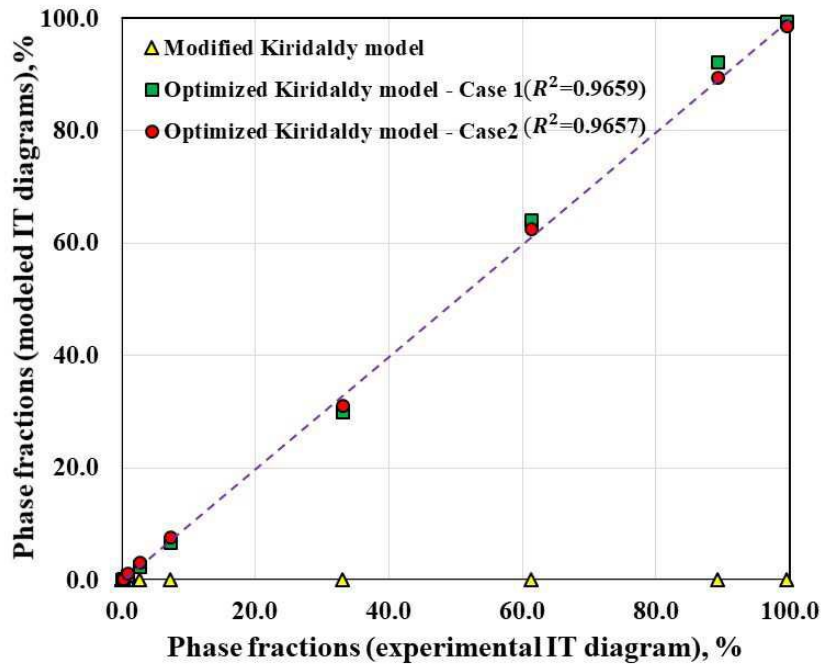
도면9d



도면10a

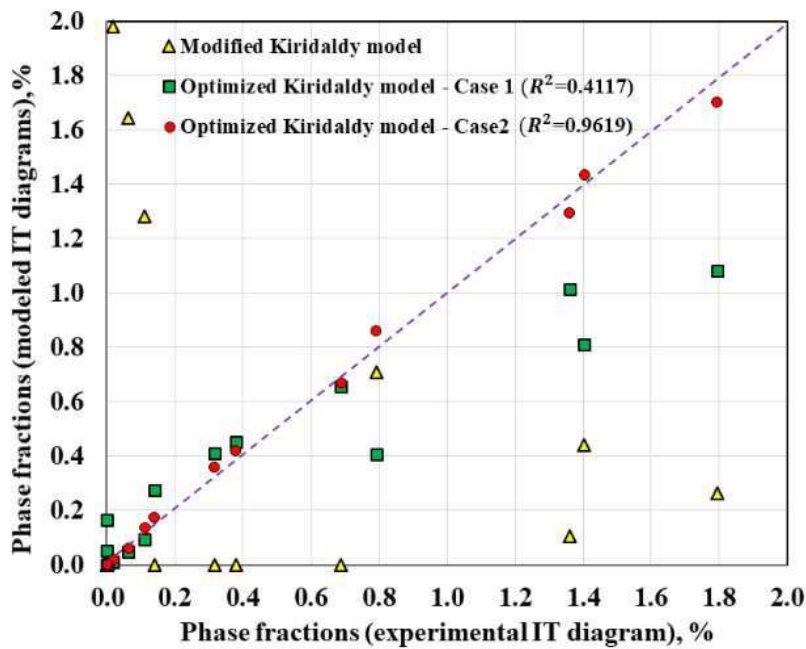


도면10b



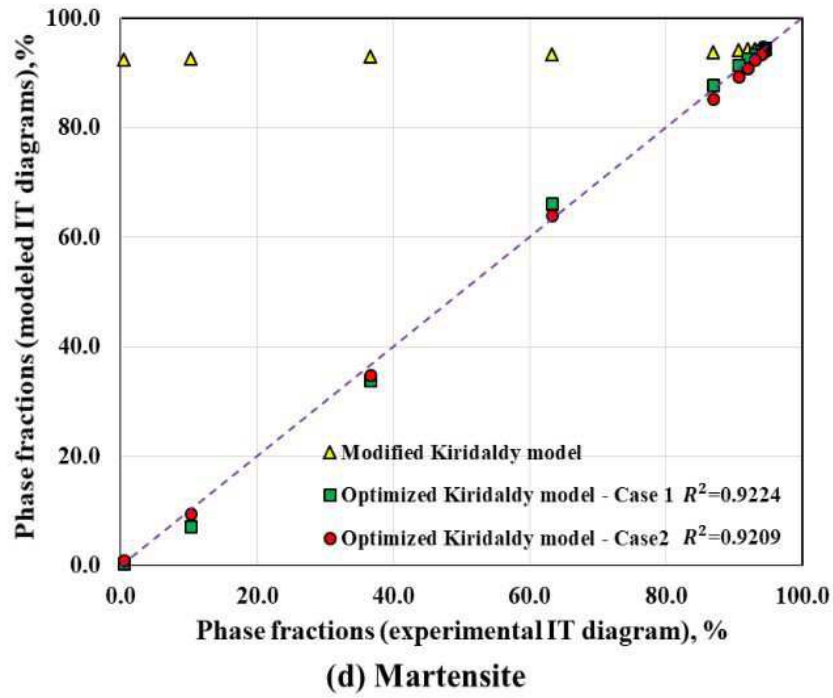
(b) Pearlite

도면10c



(c) Bainite

도면10d



도면11

