

'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자로 압력용기강의 인성 향상을 위한 열처리 공정 개발

김홍덕, 홍준화, 국일현
한국원자력연구소

안연상, 김길무
충남대학교

요 약

원자로 압력용기강의 품질 열처리인 퀴칭과 템퍼링 중간에 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상영역에서 열처리를 행함으로써 인성을 향상시키는 제조공정을 개발하였다. 710~740℃에서 4~8시간 동안 2상영역 열처리를 추가하면 기존 열처리 과정에 비하여 상온 충격인성이 크게 증가하였다. 상온 충격인성과 두께를 고려하여 결정한 최적 조건인 725℃에서 6시간 동안 2상영역 열처리를 하면 최대 흡수 에너지가 30~50% 증가하고, 천이 온도가 약 10℃ 감소하였다. 2상영역에서 형성된 침상 오스테나이트는 냉각 중에 하부 베이나이트 또는 마르텐사이트로 변태하여 템퍼드 베이나이트와 복합조직을 이루므로 균열진전을 억제하여 충격인성이 향상되었다. 2상영역 열처리 온도가 높거나 시간이 길면 오스테나이트의 체적 분율이 증가하거나 조대화가 일어나 균열진전억제 효과는 저하되었다.

1. 서 론

원자로 압력용기강은 가동 중에 중성자 조사로 인해 강도가 상승하고, 연성과 인성이 저하되는 중성자 조사취화 현상이 발생하므로, 제조과정에서 충분한 인성을 확보해야 한다. 원자로 압력용기강의 열처리는 노말라이징(normalizing)/템퍼링(tempering)의 예비 열처리와 퀴칭(quenching)/템퍼링의 품질 열처리로 이루어지며, 이에 따른 미세조직 양상은 강의 기계적 성질을 크게 좌우한다. 한편, 2상조직 강(dual-phase steel)의 제조에 이용되는 2상영역 열처리(intercritical heat treatment, IHT)를 9Ni 강[1], 로터용 강[2], 압력용기용강[3-5] 등에 응용하여 구조재료의 인성을 향상하려는 노력이 있다.

본 연구는 SA508-C1.3 강의 퀴칭 처리와 템퍼링 처리 중간에 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상영역에서 열처리를 행함으로써 원자로 압력용기강의 충격인성을 향상시키는 제조공정을 개발하고, 미세조직을 관찰함으로써 2상영역 열처리에 의한 인성향상의 원인을 밝히고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용한 재료는 한국중공업에서 원자로 압력용기강으로 제조된 SA508-C1.3 강으로 화학 조성은 표 1과 같다. Charpy V-notch 충격시편으로 가공하여 퀴칭 처리(880℃/6h)와 템퍼링 처리(660℃/10h)를 각각 하였다. 퀴칭 처리와 템퍼링 처리 중간에 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 온도영역인 700~820℃에서 1~9시간 동안 2상영역 열처리를 행하였다. 열처리된 시편은 상온에서 충격시험을 수행하여 최적 2상영역 열처리 조건을 결정하였으며, 이 최적조건에서 열처리한 재료에 대한 최대 흡수 에너지와 연성-취성 전이거동을 알아보기 위해 -80~80℃에서 충격시험을 수행하였으며, 3% nital 용액과 Lepera 용액(1% metabisulfite 수용액 + 4% picral 용액)을 이용하여 열처리조건에 따른 미세조직 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 최적 2상영역 열처리 조건 개발과 그 효과

그림 1은 퀴칭 처리와 템퍼링 처리 중간에 2상영역 열처리를 하는 경우, 각 2상영역 열처리온도에서 유지시간이 상온 충격인성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 2상영역 열처리온도가 700℃일 때에는 충격치가 거의 변화가 없지만, 710℃에서 4시간 이상, 720℃에서 2시간 이상, 730℃에서 1시간 이상 유지하면 2상영역 열처리를 하지 않은 기존 열처리조건(유지시간 0시간)에 비하여 충격인성이 크게 증가함을 볼 수 있다. 740℃와 750℃에서 1시간 유지하면 충격인성이 크게 증가하였으나 740℃에서 유지시간이 길어지면 인성이 약간 감소하였고, 750℃에서는 1시간 이후에 인성이 크게 감소하였다. 그리고 760℃에서 충격인성은 큰 변화가 없었다.

그림 2는 위 결과를 2상영역에서 유지시간에 대하여 다시 그린 것으로, 유지시간이 1시간일 때는 730~750℃에서, 2시간일 때는 720~740℃에서, 그리고 4시간과 8시간에서는 710~740℃에서 충격인성이 2상영역 열처리를 하지 않은 기존 열처리 과정에 비하여 크게 증가하였다.

이상의 결과로부터 2상영역 열처리를 하면 상온 충격인성이 매우 향상되며, 온도와 유지시간에 크게 의존함을 알 수 있다. 원자로 압력용기강은 각 열처리 단계에서 전체를 골고루 열처리하기 위하여 1인치 당 30분 이상 유지하도록 규정되어 있고[6], 두께는 약 250mm이므로 유지시간은 5시간 이상이어야 한다. 또 부위에 따라 온도편차가 있을 수 있으므로 인성을 향상할 수 있는 2상영역 열처리 온도구간은 가능한 한 넓은 것이 바람직하다. 따라서 710~740℃에서 4시간과 8시간 모두 충격인성이 300J 이상으로 향상되므로 최적 2상영역 열처리 조건은 중간인 725℃에서 6시간 유지로 결정하였다.

그림 3은 위에서 결정한 최적 2상영역 열처리 조건과 2상영역 열처리를 하지 않은 기존 열처리 조건의 연성-취성 전이 거동을 비교하기 위하여 -80~80℃에서 충격시험을 한 결과이다. (a)는 퀴칭 처리와 2상영역 열처리 후 냉각속도가 약 100℃/min이고, (b)는 실제 압력용기강 제조시 퀴칭 속도와 유사한 약 20℃/min로 냉각한 경우이다. 2상영역 열처리를 하면 충격치가 68J에 해당하는 온도가 두 경우 모두 약 10℃ 감소하고, 최대 흡수 에너지가 각각 33%, 58% 향상되었다.

3-2. 미세조직 변화와 충격인성 향상의 원인

2상영역 열처리에 의하여 인성이 향상되는 원인을 조사하기 위하여 미세조직을 관찰하였다. 그림 4(a)는 퀴칭 처리후 광학 현미경 사진으로 베이나이트 조직이다. (b)~(d)는 720℃에서 유지시간에 따른 조직변화 과정을 보여주는 것으로, 1시간 유지(충격인성이 241J)한 (b)에서 흰 부분이

검은 템퍼드 베이나이트 영역의 결정립계에 주로 형성되어 있는 것으로 보아 720℃에서 생성된 오스테나이트가 냉각 중에 베이나이트 또는 마르텐사이트로 변태하였음을 알 수 있다. 2시간 유지(343J)에서는 흰 영역의 양이 크게 증가하였으므로 2상영역에서 오스테나이트가 많이 생겼음을 알 수 있다. 4시간 유지(385J)에서는 흰 영역과 검은 영역이 골고루 섞여 있는 복합조직을 보이고 있다. (e)~(g)는 750℃에서 유지시간에 따른 조직사진으로 1시간(354J)에서 복합조직을 이루고 있으나 2시간(291J)에서 흰 영역의 크기가 커지고, 4시간(263J)에서는 둥근 모양이 많이 관찰되었다. 따라서 750℃에서 유지시간이 2시간 이상이면 오스테나이트의 조대화와 구상화가 일어나면서 복합조직의 양이 적어진다. (h)는 보다 높은 온도인 780℃에서 1시간(211J) 유지했을 때의 조직사진으로 흰 부분의 크기가 더욱 커지고 검은 영역과 분리되어 독립적으로 존재하고 있다.

충격시험과 조직관찰 결과로부터 충격인성은 2상영역 열처리 조건에 따른 미세조직의 분포에 크게 의존하는 것을 알 수 있다. 2상영역 열처리를 하면 가열 중에 생성 및 성장한 탄화물이 녹으면서 결정립계나 래스 경계에서 오스테나이트가 우선적으로 핵생성되어 침상으로 성장하고[7], 나머지 베이나이트는 템퍼링되어 템퍼드 베이나이트(tempered bainite)가 된다. 냉각 중에 침상 오스테나이트는 탄소 농도가 높아 경화능(hardenability)이 향상되므로 하부 베이나이트 또는 마르텐사이트로 변태한다. 2상영역 열처리에 의하여 침상의 하부 베이나이트/마르텐사이트와 템퍼드 베이나이트가 골고루 섞인 복합조직이 되면 균열 진전을 억제하는 유효 결정립 크기가 크게 감소하므로 충격인성은 향상된다. 그러나 2상영역 열처리 온도가 너무 높아서 오스테나이트 체적분율이 높아지면 합금원소가 희석되어 경화능이 떨어지므로 같은 냉각속도에서 덜 미세한 조직이 얻어진다. 그리고 침상 오스테나이트의 합체와 구상화가 일어나면 유효 결정립 크기가 다시 커지므로 균열 진전 억제 효과는 떨어진다. 한편, 2상영역에서 페라이트와 오스테나이트 사이에 침입형 합금원소인 탄소가 재분배되면 오스테나이트와 페라이트가 준 평형을 이루어 일정온도에서 오스테나이트 체적분율은 거의 포화된다. 따라서 유지시간이 길어지면 오스테나이트가 조대해져 충격인성이 떨어진다. 또 템퍼드 베이나이트 영역은 over-tempering으로 인한 연화가 일어나 인접한 베이나이트/마르텐사이트와 강도 차이가 커지므로 계면결합력이 떨어질 수 있다. 결론적으로 2상영역 열처리에 의하여 인성을 향상하려면 2상영역에서 오스테나이트가 침상을 유지하여 냉각 후에 하부 베이나이트/마르텐사이트로 변태하여 템퍼드 베이나이트 기지와 골고루 섞인 복합조직을 이루어야 한다.

4. 결 론

- (1) 원자로 압력용기강의 품질열처리 과정인 퀸칭과 템퍼링 사이에 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상영역에서 열처리를 행함으로써 인성을 향상시키는 제조공정을 개발하였다. 710~740℃에서 4~8시간 동안 2상영역 열처리를 하면 기존 열처리 과정에 비하여 상온 충격인성이 크게 향상되었다.
- (2) 상온 충격시험 결과와 두께를 고려하여 결정한 최적 조건인 725℃에서 6시간 동안 2상영역 열처리를 하면 최대 흡수 에너지가 30~50% 증가하고, 천이 온도가 약 10℃ 하강하였다.
- (3) 2상영역에서 형성된 침상 오스테나이트는 냉각 중에 하부 베이나이트 또는 마르텐사이트로 변태하여 템퍼드 베이나이트와 복합조직을 이루므로 균열진전을 억제하여 충격인성이 향상되었다. 2상영역 열처리 온도가 높거나 시간이 길면 오스테나이트의 체적 분율이 증가하거나 조대화가 일어나 균열진전억제 효과는 저하되었다.

본 연구는 과학기술처에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 원자력신소재개발-구조용강(원자로재료)분야과제에서 수행한 것임.

참고문헌

- [1] C.K. Syn, S. Jin, and J.W. Morris ; Metall. Trans. A, 7A (1976) 1827-1832
- [2] T. Wada and W.C. Hagel ; Metall. Trans. A, 7A (1976) 1419-1426
- [3] E.G. Nisebett ; J. Eng. Mater. & Technol. (Trans ASME), 100 (1978) 338-347
- [4] K.D. Haverkamp, K. Forch, K.-H. Piehl and W. Witte ; Nucl. Eng. & Design, 81 (1984) 207-217
- [5] T.A. Skamletz, W.W. Grimm ; "Advanced Technology of Heavy-Section Tube Sheets for Nuclear Power Generation", *Steel Forgings, ASTM STP 903*, E.G. Nisebett and A.S. Melilli, Eds., ASTM, Philadelphia, (1986) 410-424
- [6] ASTM A508/A508M-95, "Standard Specification for Quenched and Tempered Vacuum-Treated Carbon and Alloy Steel Forgings for Pressure Vessels"
- [7] 김인섭, 변택상 ; "복합조직강의 이상영역 소둔 후 냉각중 오스테나이트의 분해", 제 2회 상변태 심포지움, 대한금속학회, (1991) 181-188

Table 1. Chemical composition of the SA508-C1.3 steel

element	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Fe
wt. %	0.21	1.24	0.25	0.007	0.002	0.88	0.21	0.47	0.008	0.03	0.004	Bal.

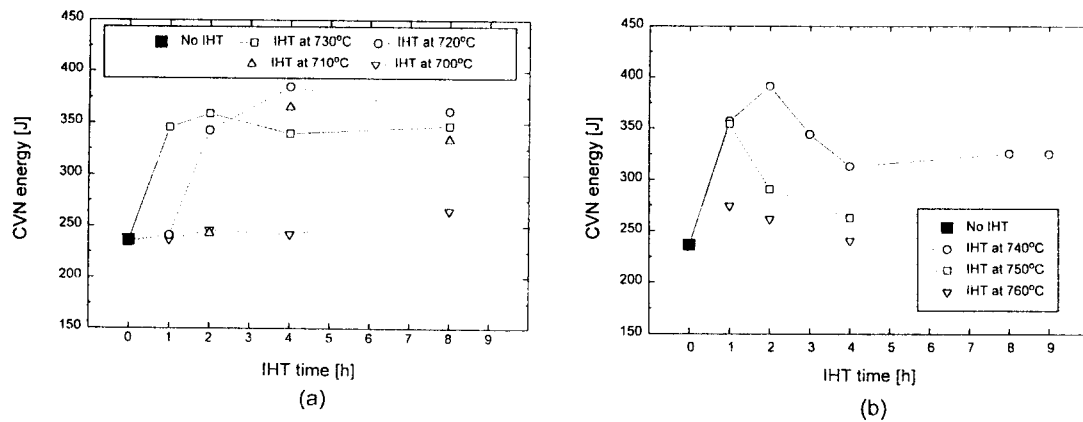


Fig. 1 Change of room temperature impact energy with IHT time as a function of IHT temperature

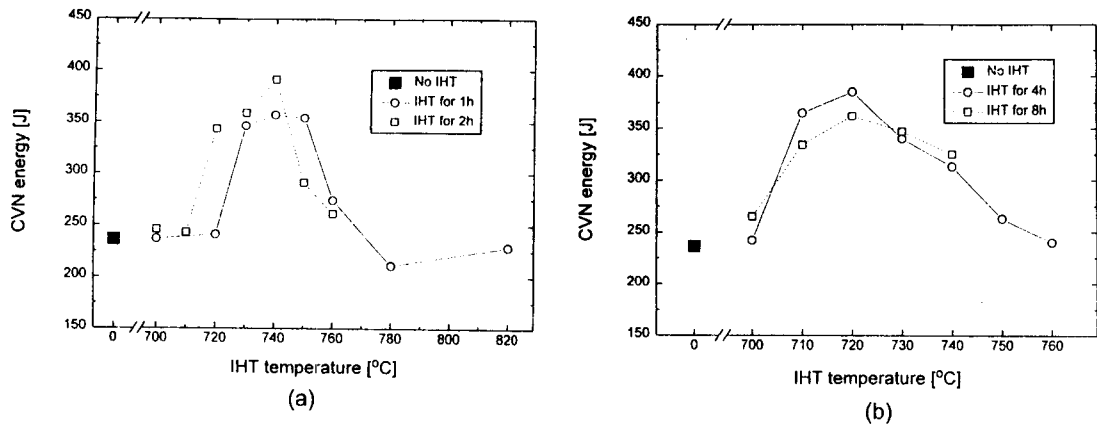


Fig. 2 Change of room temperature impact energy with IHT temperature as a function of IHT time

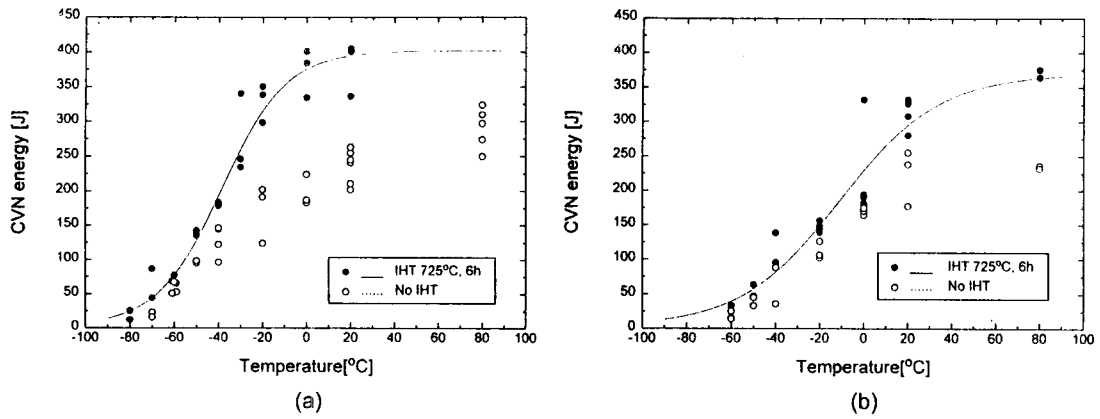
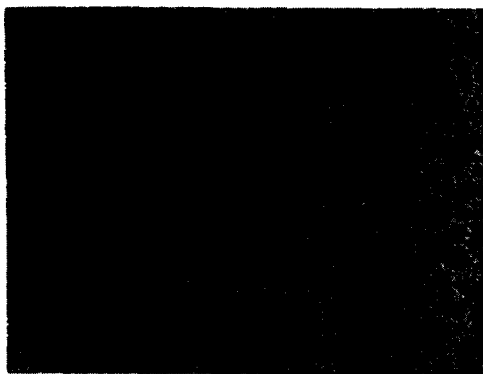


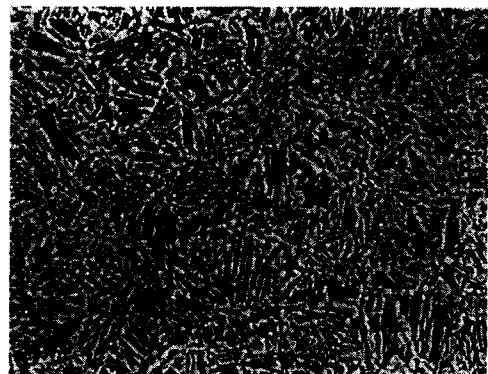
Fig. 3 Charpy transition curves for (a) cooling rates after quenching and IHT 100°C/min, and (b) 20°C/min.



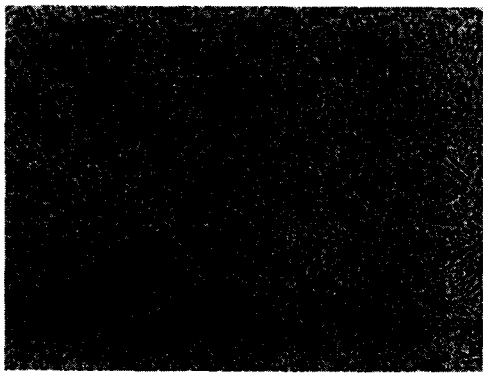
Fig. 4 Optical micrographs after (a) quenching, (b) IHT at 720°C for 1h, (c) for 2h, (d) for 4h, (e) IHT at 750°C for 1h, (f) for 2h, (g) for 4h, and (h) IHT at 780°C for 1h,



(c)



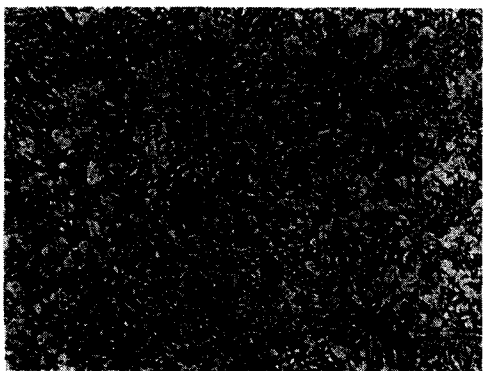
(d)



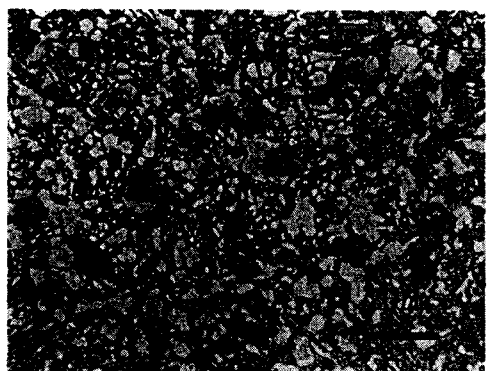
(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. 4 Continued.