

원자로 압력 용기 고성능화 신열처리 기술

홍 준 화

한국원자력연구소

원자력재료기술개발팀장



원자로 압력 용기는 원자력 발전소(이하 원전) 내부의 330°C 가량의 높은 온도, 150기압 이상의 높은 압력과 가동 기간중 $5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 이상의 가혹한 고속 중성자 조사(irradiation)를 이겨내야 하는 원전의 가장 핵심적인 내압 기기로 내구성과 장기적인 안전성이 절대적으로 요구되며 이의 성능은 원전 전체의 건전성과 수명을 결정한다.

원자로 압력 용기는 운전중에 부가되는 가혹한 방사선 환경으로 인

해 구성 재료의 인성(韌性, toughness) 또는 파괴 인성(재료가 파괴에 저항하는 질기고 강한 성질) 등 재료 성질이 지속적으로 저하되고 연성-취성 천이 온도의 상승과 같은 재료의 열화(劣化)[조사 취화 (照射脆化)]를 유발하므로 안전 운전의 확률적인 여유도를 낮추게 된다.

특히 연성-취성 천이 온도의 상승은 재료가 취성적으로 파괴되는 온도를 고온쪽으로 옮겨 가압 열충격에 따른 취성 파괴의 확률을 높일 뿐만 아니라, 가열-냉각시에 규정에 따른 온도-압력 안전 운전 조건의 결정을 어렵게 해서 실제적인 안전 운전의 여유도를 감소시킨다.

따라서 발전소의 안전성과 수명, 그리고 가동 효율의 향상 측면에서 원자로 압력 용기 재료의 성능은 매우 중요하다고 하겠다.

현재 한국 표준형 경수로(KSNP)를 비롯한 우리 나라 원자로 압력 용기의 안전 여유도는 국제적인 수준과 대등한 정도에 이르렀다고 볼 수

있으나, 보다 안전 여유도를 높이고 부대적인 가동 효율의 향상을 이루기 위해서는 원자로 압력 용기 재료 등의 고인성화 등을 통한 지속적인 고성능화가 필요하다.

더구나 원자로 압력 용기에 사용되는 재료는 또 다른 압력 용기에 해당하는 증기발생기 및 가압기 동체(shell) 그리고 냉각재 배관(RCS pipe) 등에도 광범위하게 사용되며 경수로 원전 1차 계통 내압 기기를 구성하는 가장 핵심 재료이므로 이의 개선은 파급 효과가 매우 크다고 할 수 있다.

특히 원자력 기기, 설비의 국내 생산 기술이 대표적인 원전 설비 생산 업체인 두산중공업(주)(구 한국중공업(주))를 중심으로 대부분 확보되었으므로 향후 원전 기기 해외 수출의 국제적인 경쟁에 있어서 우위를 점하기 위해서는 보다 고품질의 원자로 압력 용기 제조 기술 확보가 요구된다.

이에 따라 한국원자력연구소 원자

력재료기술개발팀에서는 원자력 중장기 과제의 일환으로 원전의 극한 환경에서도 장기간 안정적으로 견디어 낼 수 있는 우수한 원자력 재료를 개발하는 연구에 착수하여 고성능의 원자로 용기 재료를 만들 수 있는 새로운 열처리 제조 공정 기술을 개발하게 되었다.

일반적으로 압력 용기 재료는 용해 및 단조를 통한 합금 제조 후 적절한 가열과 냉각으로 이루어진 4단계 열처리 공정을 거치면서 높은 강도와 파괴에 대한 저항성을 갖게 된다. 금번 새로 개발되어 국내 및 미국 특허를 획득한 원자로 압력 용기 신열처리 공정 기술은 기존 열처리 공정 중 2단계와 3단계 사이에 별도의 새로운 열처리 공정을 한 단계 더 추가하고 후속 열처리 조건을 조절하여 재료의 미세 조직을 변화시킴으로써 인성 등의 재료 성질을 획기적으로 향상시키는 최첨단 기술이다.

새로운 열처리 기술의 핵심은 기존의 방법으로 2단계 열처리 공정을 거친 후 재열처리하는 기술로서 복합 재료의 성질을 갖게 되며 충격에 강하고 파괴에 대한 저항성이 우수하게 하는 등 안전성이 뛰어난 재료로 변하게 된다.

이러한 특징 때문에 신제조 공정 기술을 일명 '이상영역열처리(二相領域熱處理, intercrtitical heat treatment, IHT)' 기술이라고도 한

다.

따라서 본 연구 개발의 목표는 원자로 압력 용기 재료의 성능을 획기적으로 개선하기 위한 신제조 공정 개발이며, 세부적으로는 원자로 압력 용기의 연성-취성 천이 온도를 30°C 이상 개선할 신열처리 제조 공정 조건 확보와 신열처리 공정의 현장 제조 기술 확보이다.

이를 위한 연구 개발 내용 및 범위로는 압력 용기강의 고인성화를 위한 이상 영역 열처리 온도/시간 조건 확보, 최적 강도 및 파괴 인성을 위한 후속 텁퍼링 처리 조건 개발, 개발 모델 열처리 합금 제조 및 기계적·파괴적 특성 평가, 미세 조직 분석 등을 통한 신열처리에 따른 고인성화 원인 규명, 그리고 예비 시제품 제조 및 특성 평가이다.

본고에서는 원자로 압력 용기 재료의 고인성화를 위해 개발된 이상 영역 열처리(IHT)를 포함하는 신열처리 기술의 개발 과정을 소개하고, 이 신열처리 기술의 적용이 재료의 기계적·파괴적 특성 및 미세 조직 특성에 미치는 영향을 정리하였으며, 또한 이 기술의 현장 적용성과 기대 효과 및 향후 전망 등을 약술하였다.

고인성화 신열처리 제조 공정

대표적 원자로 압력 용기 재료는 ASME 코드에서 SA 508 Gr.

3(ASTM 규격은 A 508 Gr. 3)로 규격화된 급냉(quenching) 및 뜨임처리(tempering)된 단조재(forging)이다.

약 0.2% C의 탄소강에 Mn·Mo·Ni을 각각 약 1.2%, 0.5%, 0.8% 첨가하여 합금화한 Mn-Mo-Ni 계열의 저합금강이다. 본 재료는 우리 나라에서도 두산중공업(주)에 의해 국산화되어 1990년도 영광 3호기 원자로 용기에 공급된 이래, 동일 재료가 국내 원전의 원자로 압력 용기는 물론 증기발생기 및 가압기 동체(shell) 그리고 냉각재 배관(RCS pipe) 등에 사용되고 있는 등 경수로 원전 1차 계통 내압 기기를 구성하는 가장 핵심 재료이다.

본 연구 개발에서는 원자로 압력 용기 재료의 인성 개선을 위한 방법으로 이상 영역 열처리(IHT)를 이용하였다.

IHT는 강(steel)의 상변태 임계 온도인 A_{C1} 과 A_{C3} 사이의 두 개의 상(phase)이 공존하는 온도 영역(이상 영역)에서 일정 시간 유지 후 냉각시킴으로써 페라이트 기지에 소량의 마르텐사이트상을 분산시키는 열처리로, 이상(二相)의 부피 분율을 적절히 조절함으로써 높은 강도와 연성을 부여하는 것이다.

<표 1>은 규격에 따른 기존의 열처리 조건과 금번 개발한 신열처리(IHT) 조건과 절차이다. 먼저 ASME/ASTM 규격에 따라 현재 생

산 현장에서 행하는 열처리 조건으로 퀸칭(quenching, Q)과 템퍼링1(tempering1, T1), 그리고 용접후 열처리(PWHT)한 시편을 기준 공정(Conv. HT)으로 명명하였다.

IHT는 퀸칭과 템퍼링 사이에 여러 조건으로 추가하였다. 화학 성분으로부터 계산된 임계 온도 A_{C1} 과 A_{C3} 가 각각 703°C와 830°C이었으므로, 페라이트와 오스테나이트 2상이 공존할 것으로 기대되는 700°C ~820°C의 이상 영역 온도 구간에서 1~8시간 동안 열처리한 후 상온에서 충격 시험을 수행하여 최적 IHT(Opt. IHT) 조건을 결정하였다.

이 최적 IHT를 기준 공정의 퀸칭과 템퍼링 사이에 추가한 시편을 신공정1(New HT1)로, 최적 IHT 추가후 템퍼링 조건을 템퍼링1에서 템퍼링2(T2)와 템퍼링3(T3)으로 변경하여 열처리한 것을 각각 신공정2(New HT2)와 신공정3(New HT3)으로 명명하였다.

최적 IHT 조건을 결정하기 위해 다양한 조건에서 IHT를 추가한 후 상온 충격 시험을 수행하였다. <그림 1>은 퀸칭 처리와 템퍼링 처리 중간에 IHT를 하는 경우, 각 IHT 유지 시간에 대하여 IHT 온도에 따른 충격 인성의 변화를 나타낸 것이다. 기준 열처리 공정을 따라 열처리된 시편의 충격 에너지 값은 36J이었다. 반면 IHT를 추가한 경우에는 IHT 온도 증가에 따라 인성이 증가

하다가 다시 감소하는 경향을 보였다.

IHT 유지 시간이 1시간인 경우 700~720°C의 IHT 온도 구간에서는 충격 에너지 값이 기준 공정과 큰 차이가 없지만, 730~750°C의 온도 영역에서는 충격 에너지 값이 300J 이상으로 크게 증가한다. 그러나 760°C 이후부터는 다시 감소하기 시작하여 기준 공정과 유사한 값을 나타냈다.

유지 시간이 2시간인 경우에는 730~750°C에서, 그리고 4시간과 8시간의 유지 시간에는 710~740°C에서 IHT를 하지 않은 기준 공정에 비해 충격 인성이 300J 이상으로 크게 증가하였다.

ASTM/ASME 규정에서는 원자로 압력 용기강의 열처리 유지 시간을 두께 1인치당 30분 이상을 규정하고 있다. 따라서 두께가 10인치 정도인 원자로 압력 용기강의 열처리 유지 시간은 최소 5시간 이상이어야 하며, 부위별 온도 편차가 있을 수 있으므로 인성을 향상시키는 IHT 온도 구간은 가능한 넓어야 한다.

<그림 1>에서 알 수 있듯이 4~8시간을 유지 시간으로 하는 경우 인성이 향상되는 IHT 온도 범위가 710~740°C로 확장되었으므로, 최적 IHT 조건은 그 중간인 725°C/6시간으로 결정하였다.

신열처리 기술의 특성 (적용 효과) 및 현장 적용성

1. 기계적 특성에 미치는 신열처리 적용 효과

최적 IHT를 포함하는 신공정의 적용이 기계적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 충격 시험과 인장 시험을 수행하였다.

충격 에너지와 연성-취성 천이 거동을 비교하기 위하여 -80~290°C에서 충격 시험을 수행한 결과를 <그림 2>에 나타냈다.

최적 IHT를 추가한 신공정1의 충격 에너지가 IHT를 추가하지 않은 기준 공정보다 전 시험 온도에서 증가되었다.

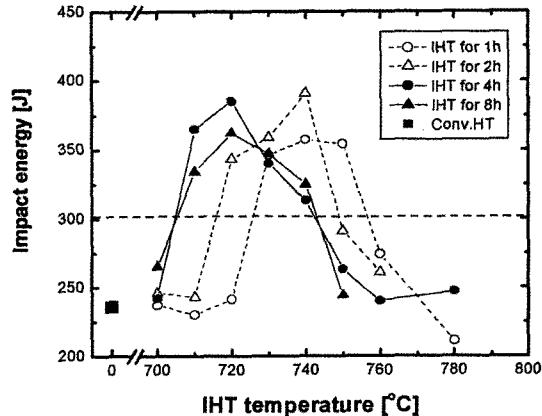
신공정1의 적용으로 상온 충격에너지와 최대 흡수 에너지(upper shelf energy, USE)가 각각 129J (58%), 38J (12%) 증가하고, 충격 에너지 값이 41J과 68J에 해당하는 기준 온도 T41J과 T68J이 각각 6°C, 9°C 감소하였다.

인장 특성의 경우, 최적 IHT를 추가한 신공정1의 적용으로 연성이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 최적 IHT를 추가함으로써 연신율(Elongation)과 단면 수축률(RA)은 4% (14%), 3% (4%)씩 증가하고, 항복 강도(YS)와 인장 강도(UTS)는 41MPa (9%), 29MPa (5%)씩 감소하였다.

최적 IHT를 추가하면 충격 인성

〈표 1〉 기존 및 신공정에서의 열처리 절차 및 조건

Heat treatment procedure	
Conv. HT = Q +	T1 + PWHT
New HT1 = Q + Opt. IHT + T1 + PWHT	
New HT2 = Q + Opt. IHT + T2 + PWHT	
New HT3 = Q + Opt. IHT + T3 + PWHT	
Heat treatment condition	
Q : quenching	(880°C/6h)
Opt. IHT : optimum IHT	(725°C/6h)
T1 : tempering1	(660°C/10h)
T2 : tempering2	(640°C/6h)
T3 : tempering3	(620°C/6h)
PWHT : post-weld heat treatment	(610°C/30h)



〈그림 1〉 이상 영역 열처리 온도 및 시간에 따른 충격 인성 변화

과 연성이 크게 향상된 반면에 강도가 약간 감소하였으므로 템퍼링 조건을 조정하여 강도 감소를 줄이고자 하였다.

템퍼링 처리는 빤창한 강에 인성을 부여하는 열처리로, 템퍼링 온도가 높을수록, 그리고 유지 시간이 길수록 강도는 낮아진다. 따라서 템퍼링 온도와 시간을 줄임으로써 강도를 높일 수 있다.

ASME 규격에서 템퍼링 처리는 650°C 이상에서 최대 두께에 대하여 1인치당 30분 이상 유지하도록 규정되어 있으나, 보완 조건에서 용접후 열처리를 하는 경우에 템퍼링 온도를 635°C까지 허용하고 있으므로 이를 고려하여 템퍼링 조건을 640°C/6시간(템퍼링2)으로 수정하였다.

또한 보다 더 큰 강도 증가를 위해

620°C/6시간(템퍼링3)의 템퍼링 조건도 역시 적용되었다. 용접후 열처리시 가장 높이 허용되는 온도가

620°C라는 점을 고려하여 이 템퍼링 온도를 최소 템퍼링 온도로 결정하였다.

최적 IHT 후 템퍼링 처리 조건을 640°C/6h 또는 620°C/6h으로 조정한 신공정2와 신공정3에 대하여 인장 시험과 충격 시험을 다시 수행하였다.

신공정1에 비하여 연성의 큰 변화 없이 항복 강도와 인장 강도가 각각 13MPa 향상되었고, 신공정3의 경우에는 기존 공정과 거의 동일한 수준으로 강도가 증가함을 알 수 있다.

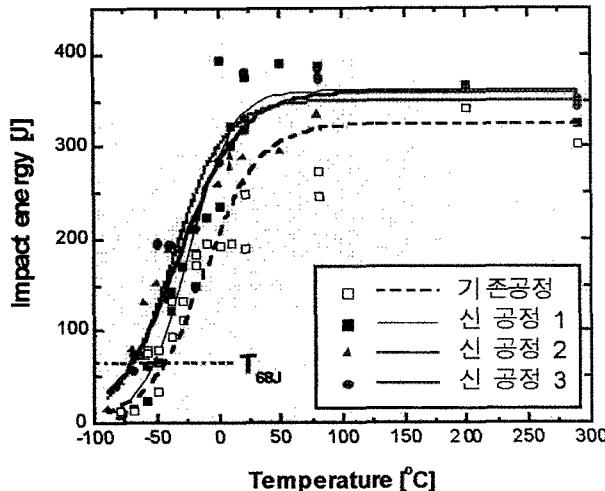
그리고 충격 시험 결과에서 볼 수 있는 것처럼 신공정2의 경우 상온 충격 에너지와 최대 흡수 에너지는 거의 그대로 유지하면서 천이 온도

T41J과 T68J이 22°C, 17°C 씩 추가로 감소하였으며, 신공정3의 경우에는 더 낮아지는 결과를 얻었다.

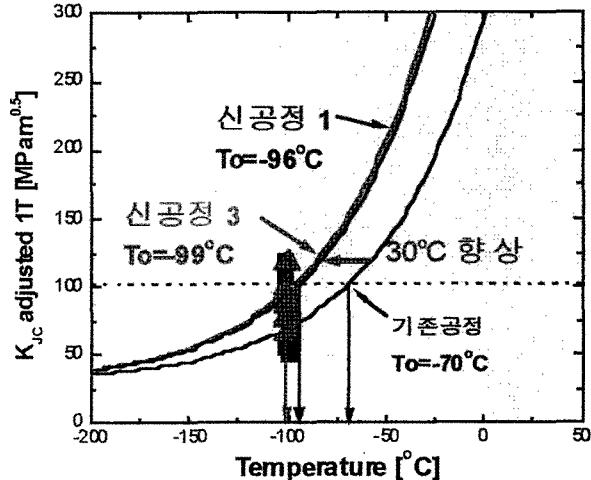
결과적으로 최적 IHT 추가 후 템퍼링 조건을 낮추면 IHT로 인해 저하된 강도가 기존 공정 수준으로 회복되며, 또한 충격 인성을 최대로 향상시킬 수 있다.

한편 파괴 인성(KIC, master curve) 및 파괴 저항성(J-R curve)에 미치는 이상 영역 열처리 적용 효과 시험 평가 결과, 기존 공정보다 약 30% 이상의 향상을 가져옴을 확인하였다.

〈그림 3〉은 파괴 인성치의 향상 정도를, 〈그림 4〉는 압력 용기 재료의 기계적·파괴적 특성 평가용 시험편들을 보여준다. 상세한 시험 자료는 관련 특허·논문·보고서 등을 참고하기 바란다.



〈그림 2〉 충격 인성에 미치는 신열처리 적용 효과



〈그림 3〉 파괴 인성에 미치는 신열처리 적용 효과

2. 신열처리 기술 적용에 따른 미세 조직 특성 변화

신공정 적용에 의한 미세 조직 특성 변화를 광학 현미경과 전자 현미경을 이용하여 관찰하였다. 〈그림 5〉(a)는 퀸칭 처리 후 광학 현미경 사진으로 전형적인 베이나이트 조직이다. 반면, (b)의 퀸칭과 IHT 후 미세 조직은 템퍼드 베이나이트(회색 상) 기지 내에 마르텐사이트(하얀 상)가 망상 형태로 고르게 분포하는 복합 조직이다.

2상 영역 온도로 가열중에 퀸칭 후에 생성되었던 막대 형태의 탄화물들은 탄소와 금속 원자들로 분해되고, 탄소 함량이 급속히 증가하는 결정립계와 래스 경계에 오스테나이트가 형성된다.

이 오스테나이트 내에는 탄소 고용도가 높아서 경화능이 향상되므로 이어지는 냉각 과정에서 마르텐사이트로 변태한다.

이 때 IHT 동안 그대로 유지되는 나머지 미변태 베이나이트는 IHT 후에 템퍼드 베이나이트가 된다.

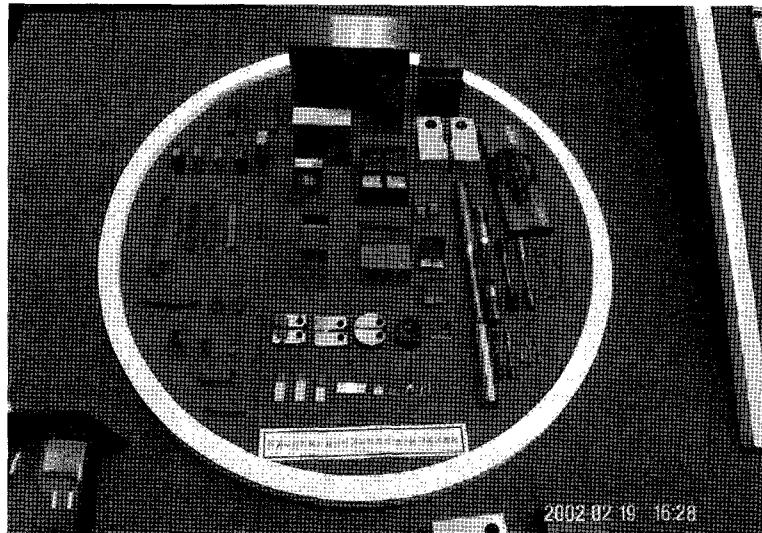
상분석기를 이용하여 측정한 오스테나이트(냉각후 마르텐사이트) 영역과 템퍼드 베이나이트 영역의 상분율이 각각 27%와 73%이었으므로, 오스테나이트의 탄소 농도를 계산한 결과 약 0.72%로 전체 평균 탄소 농도 0.21%에 비하여 크게 증가하였다.

템퍼드 베이나이트 영역의 경도는 233 Hv인데 비하여 마르滕사이트 영역은 454 Hv로 약 2배가 높음을

확인할 수 있었다.

〈그림 5〉(c) 와 (d)는 각각 (a) 와 (b)의 템퍼링 후 미세 조직이다. (c)는 기존 공정에 해당하는 템퍼드 베이나이트이고 (d)는 신공정에 해당되는 템퍼드 마르텐사이트와 더블 템퍼드 베이나이트의 복합 조직으로, 두 조직들의 비교로부터 신공정 적용으로 결정립 미세화 효과가 일어남을 알 수 있다.

〈그림 6〉은 주사 전자 현미경으로 관찰한 두 공정의 탄화물 분포 양상이다. (a)의 기존 공정의 경우에는 구오스테나이트 결정립계와 래스 경계의 특정 방향을 따라 긴 막대 형태의 탄화물들이 형성된 반면, (b)의 신공정의 경우에는 구형의 작은 탄화물들이 템퍼드 마르滕사이트 내



〈그림 4〉 기계적·파괴적 특성 평가용 시험편

부, 템퍼드 마르텐사이트와 템퍼드 베이나이트 상경계, 그리고 구오스 테나이트 결정립계에 상대적으로 균일하게 분포되어 있다.

또한 투과 전자 현미경을 이용하여 IHT에 따른 보다 자세한 미세 조직 변화를 관찰한 결과, IHT 후 조직은 폭이 약 $1\mu\text{m}$ 인 높은 전위 밀도를 갖는 미세한 마르텐사이트가 아결정립으로 이루어진 템퍼드 베이나이트 기지에 균일하게 분포된 복합 조직을 형성하고 있음을 확인하였다.

이 복합 조직을 템퍼링 처리한 조직은 템퍼링 과정에서 대부분 구형 인 탄화물들이 탄소가 고농축된 마르텐사이트 내부나 또는 마르텐사이트와 템퍼드 베이나이트 상경계에서 형성되어, 마르텐사이트는 높은 전

위 밀도의 작은 아결정립들과 미세한 구형 탄화물들로 이루어진 템퍼드 마르滕사이트가 되고, 템퍼드 베이나이트 기지는 전위가 아주 적은 커다란 아결정립으로 구성된 더블 템퍼드 베이나이트가 된다.

3. 신공정 적용에 의한 인성 향상 원인 분석

기존 및 신공정으로 제조한 시편에서의 미소 파괴 기구의 차이점을 조사하기 위하여, 각 열처리 공정별 -50°C 에서 충격 시험한 시편의 파면 아래 미세 조직을 주사 전자 현미경으로 관찰하였다.

파괴는 대부분 탄화물-기지 계면 분리나 긴 막대 형태 탄화물들의 균열에 의해 시작되는 것으로 확인되었다.

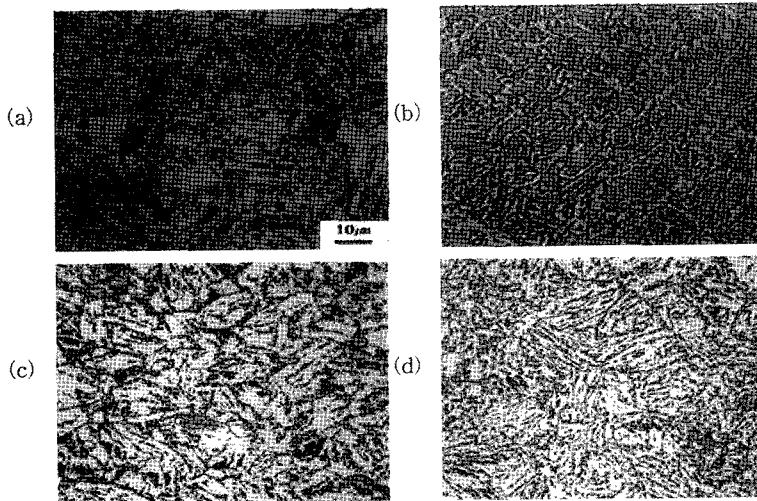
기존 공정의 경우에는 기공들이 긴 막대 형태 탄화물들 사이에서 우선적으로 핵생성하고 성장했는데, 이것은 긴 막대 형태 탄화물들이 특정 방향을 따라 정렬되어 있어서 국부적으로 응력과 변형의 집중을 증가시키기 때문이다.

그러나 신공정에서는 기공들이 상대적으로 고르게 분포한 구형의 탄화물들 주위에서 생성되고 성장한다. 신공정 적용으로 생성된 이러한 구형의 탄화물들과 이 탄화물들의 균일한 분포가 변형의 국부적 집중을 감소시키기 때문에 기공들의 생성과 성장을 지연시키는 것으로 판단된다.

한편 취성 파괴시에는 베이나이트 패켓(packet) 크기 또는 결정립 크기 미소 균열의 인접한 영역에 있는 기지로의 순간적인 전파가 취성 파괴에 대한 임계점으로 알려져 있다.

기존 공정에서는 구 오스테나이트와 패켓 크기로 제한되는 취성 균열의 유효 크기가 큰 것으로 관찰되는데 반해, 신공정의 경우 추가적으로 생겨난 고각입계(마르텐사이트와 베이나이트 상경계)에 의해 취성 균열이 제한되므로 유효 취성 균열의 크기가 작은 것을 알 수 있다.

유효 취성 균열이 작을수록 인접 기지로의 전파에 대한 응력 집중도 작아지며, 결과적으로 취성 파괴의 저항성도 커지게 된다. 위와 같은 이유로 인해 IHT를 추가한 신공정의



〈그림 5〉 열처리 단계에서의 미세 조직 변화

(a) 급냉 (b) 급냉 후 IHT 처리 (c) 급냉 후 뜨임 처리 (d) 급냉 후 IHT 및 뜨임 처리

인성이 크게 향상되는 것으로 생각된다.

IHT 후 텁퍼링 온도와 시간을 낮춘 신공정3의 경우 강도가 기존 공정 수준으로 회복되었는데, 이것은 텁퍼링 정도를 낮춤으로써 고용강화 효과가 상대적으로 증대되기 때문인 것으로 생각된다.

또한 신공정3에 의해 저온 인성이 추가로 향상되는 이유는 텁퍼링 온도와 시간을 낮춤으로써 탄화물 크기가 추가로 감소되어 저온에서의 균열 생성을 억제하는 효과를 주기 때문인 것으로 판단된다.

IHT 처리에 의한 인성 향상 요인을 종합하면 다음과 같다.

IHT로 인해 경질의 마르텐사이트와 연질의 텁퍼드 베이나이트 복합

조직이 형성되며, 결정립 미세화 효과와 더불어 탄화물의 구형화가 발생한다. 이러한 미세 조직적 특성 변화들이 기공의 생성과 균열 전파를 지연시킴으로써 인성을 향상시킨다.

또한 IHT 후 텁퍼링 온도와 시간을 낮춤으로써 탄화물 크기가 감소하고, 고용 강화 효과가 증대되어 저온 인성과 강도가 추가로 향상된다.

4. 신공정의 생산 현장 적용성 및 시제품 제조

원자로 압력 용기는 거대한 구조물이기 때문에 개발된 신열처리 기술을 실제 생산 라인에 적용하기 위해서는 열처리 시 두께 효과를 고려해야 한다.

거대한 구조물을 열처리할 경우

열처리 목표 온도에서 유지시 두께에 따른 온도 편차가 있을 수 있으므로 높은 인성치를 얻을 수 있는 IHT 온도 구간은 넓어야 한다.

〈그림 1〉에서 볼 수 있듯이, IHT를 추가하는 경우 710~740°C의 30°C 온도 범위에서 인성이 향상되었기 때문에 최적 IHT 온도인 725°C /6h에서 열처리를 하게 될 경우 ±15°C의 온도 편차 여유가 있다. 따라서 최적 IHT를 포함하는 신공정의 현장 적용은 가능할 것으로 예측된다.

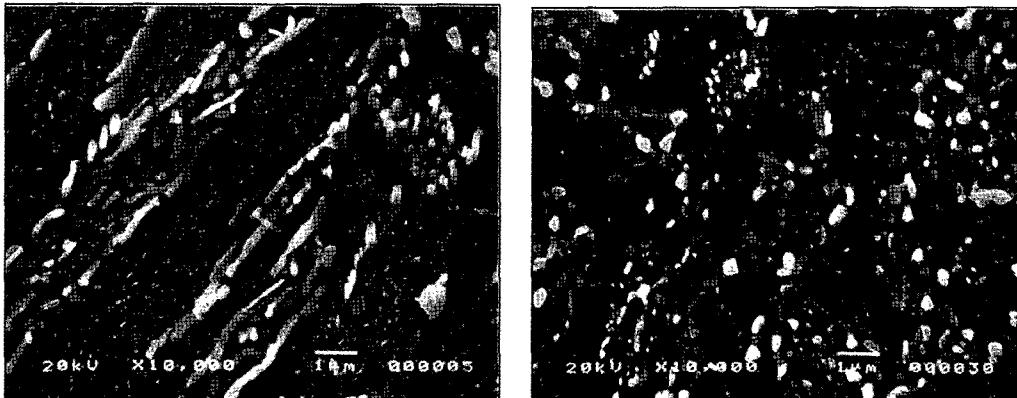
또한 압력 용기강과 같은 거대한 구조물 재료를 열처리할 경우 두께에 따른 냉각 속도의 변화가 있기 때문에 부위별로 기계적 특성 차이가 발생할 수 있다.

현재 생산되는 압력 용기의 표면부와 중심부의 냉각 속도는 각각 약 100°C/min와 20°C/min 정도인 것으로 알려져 있다.

따라서 냉각 속도를 100°C/min 와 20°C/min로 제어하여 열처리한 후 표면부와 중심부의 기계적 특성 변화를 검토해 보았다.

표면부의 천이 특성이 중심부보다 좋은 것으로 나타났으나, 신공정 적용에 의한 인성 향상 효과는 중심부와 표면부 모두에서 동일하게 유지되었다.

이러한 결과로 볼 때 신공정을 원자로 압력 용기강의 실제 생산 현장에 적용하는 데 큰 문제가 없을 것으로



〈그림 6〉 기존 공정 및 신열처리 공정 적용에 따른 미세 석출물 변화(좌측 : 기존 공정)

로 판단된다. 특히 신공정3의 경우 중심부에서도 기존 공정의 표면부보다 좋은 천이 특성을 갖고 있음을 확인하였으며, 인장 강도 또한 기존 공정의 강도 수준과 유사한 값을 갖기 때문에 실제 생산 현장 적용시 최대 효과를 얻기 위해서는 신공정3의 열처리 공정을 적용하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다.

이와 같은 실험실 규모의 연구 결과를 바탕으로, 원자력 기기의 대표적 국내 제조 업체인 두산중공업(주) 기술연구원(팀장 김정태 박사)에서 본 연구팀과 공동 협력하여 실제 생산라인을 통해 용해·단조 및 열처리 등을 통한 30톤 규모의 시제품을 제조하고 실증 시험하였다.

시제품 공동 평가 결과, 실험실 규모와 동일한 인성 향상 효과를 확인하였으며, 두께에 따른 냉각 속도 차이가 있을 경우에도 개선 효과가 동

일하게 나타남을 확인하여 실제 생산 공정 적용성이 우수함을 확증하였다.

〈그림 7〉은 기존 공정 및 신공정으로 제조한 시제품에서의 연성-취성 천이 온도 값을 비교하여 보여준다. 여기서 FATT(fracture appearance transition temperature)는 파면 양상으로부터 구한 천이 온도이며, T6&J은 충격치가 68J이 되는 온도이고, RTNDT는 기준 무연성 천이 온도이다. 신공정 적용시 RTNDT가 30F 이상 향상되는 등 인성이 약 30% 이상 향상되고 있음을 알 수 있다.

신열처리 기술의 특징 및 결과 요약

인성 향상을 위한 신열처리 기술의 특징 및 개발 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 원자로 압력 용기강에 대한 신열처리 공정을 성공적으로 개발하여, 기존의 원자로 압력 용기 소재보다 연성-취성 천이 온도가 약 30°C 정도 향상되고, 파괴 저항성도 약 30% 이상 개선되었다. 이는 약 20년 이상의 원자로 수명 연장 효과에 해당한다.

- 개발된 원자로 압력 용기에 대한 최적 이상 영역 신열처리 공정은 급냉 후 725°C에서 6시간 열처리를 가하며, 뒤이어 620°C에서 6시간동안 텁퍼링 처리하는 것이다.

- 신열처리 기술 적용에 따른 성능 향상 주된 원인은 이상 영역 열처리를 가하는 동안 재료가 각각 연하고 강한 두개의 다른 결정 조직이 동시에 존재하는 상태로 변화되어 마치 복합 재료와 같은 성질을 갖게 되며, 매우 미세한 구형의 석출물로 이루어진 미세 조직을 갖게 되기 때문

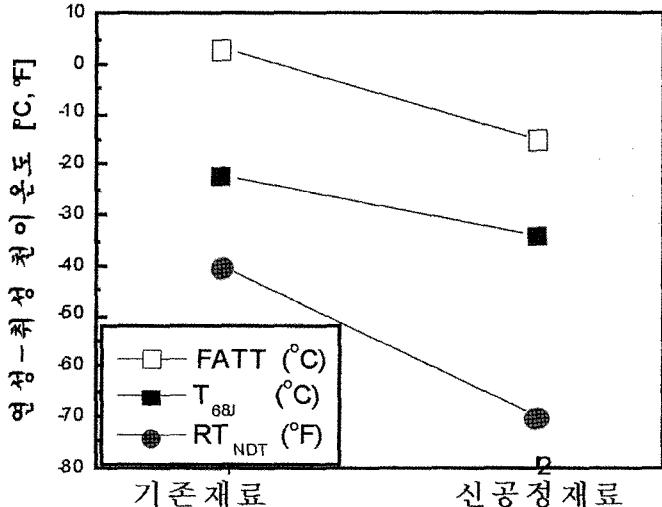
으로 규명되었다.

• 연구 개발 결과에 대해 국내 특허 등록(제0261664호 (2000. 4.20), 2상 영역 열처리를 이용한 고인성 SA508 GR.3강의 제조 방법)을 마쳤으며, 미국 특허(US Patent 6264770 B1 (2001.7.24), Intercritical Heat Treatment Process for Toughness Improvement of SA 508 GR.3 Steel)를 최근 획득하였다.

관련된 연구 논문으로 〈Nuclear Engineering and Design〉 (Vol.194 (1999) p.161~177) 등 SCI 저널에 3편 및 국제압력용기기술 학술대회(ICPVT) 등을 통해 20여편의 연구 논문을 게재 또는 발표하여 그 우수성을 인정 받았다.

• 개발된 신공정을 적용하여 두산중공업(주)의 실제 제품 생산 라인을 통해 용해·단조·열처리 등 30ton 규모의 예비 시제품을 제조하고 공동 평가한 결과, 실험실 규모와 동일한 향상 효과를 확인하였으며, 두께에 따른 냉각 속도 차이가 있을 경우에도 개선 효과가 동일하게 나타남을 확인하여 실제 생산 공정 적용성이 우수함을 확증하였다.

• 특히 개발된 신공정은 단지 열처리 조건만을 조절한 것이므로 이를 생산 현장에 적용할 때 제조 공정 설비의 증설이나 변경이 필요가 없어 산업체에 적용하기가 용이하다는 장점이 있다.



〈그림 7〉 신열처리 공정 적용에 따른 연성-취성 천이 온도 변화

기대 효과 및 향후 전망

개발된 신열처리 공정에 따라 제조된 원자로 압력 용기는 성능이 약 30% 이상 향상되어 수명이 기존 공정으로 제조한 것보다 약 20년 이상 향상되고 안전성에 있어서도 탁월해 향후 원자로 압력 용기 제조 및 개선에 획기적인 기여를 할 것으로 전망된다.

즉 개발된 기술을 적용할 경우 건설 예정인 국산 원자로의 품질 및 건전성을 향상시키고, 원자로의 장수명화를 기할 수 있으며, 안전 여유도를 높여 보다 효율적인 원전 안전 운전에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

또한 원전의 핵심 부품인 원자로 압력 용기의 고성능·고품질화 제조

기술을 개발·확보함으로써 향후 원전 기기 수출을 위한 세계적인 기술 경쟁력 면에서 일정 부분 우위를 확보하게 되고, 원전 설비 및 원자력 기술 수출에 새로운 전기를 마련하는 등 중요한 기여를 할 것으로 전망된다.

개발된 신열처리 기술은 원자로 압력 용기뿐만 아니라, 동일하거나 유사한 재료를 사용하는 중기발생기와 가압기의 동체(shell) 및 1차 계통 냉각재 배관 재료들에도 적용될 수 있어, 원전 기기/설비 구성 재료의 종합적인 고품질화를 지속적으로 이룰 수 있을 것으로 기대되며, 우수한 인성 등 파괴 특성이 요구되는 일반 산업 분야 소재에도 적용할 수 있어 커다란 파급 효과가 기대된다.

