2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험의 신뢰성 평가

An Evaluation of Reliability on the Ball Indentation Test for Aged Cast Stainless Steel

김 진 원
조선대학교 원자력공학과

요 약

주조 스테인리스강은 원전 가동온도 부근에서 장시간 사용에 따라 열화가 발생하며, 이러한 열화 현상은 이들 기기의 건전성을 저하시키는 주 원인으로 작용하고 있다. 따라서, 가동중 원전의 건전성 확보를 위해서는 이들 기기에 대한 정확한 열화 평가가 필요하다. 본 연구에서는 주조 스테인리스강의 열화 평가에 볼 압입시험의 적용성을 파악하기 위해서, 400°C 에서 3600 시간동안 열화시킨 4 종류의 주조 스테인리스강을 이용하여 볼 압입시험을 수행하였다. 실험 결과로부터 재료별 볼 압입시험 데이터의 분산과 볼 압입시험에서 측정된 인장물성치를 인장시험 결과와 비교함으로써 열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 결과의 신뢰성을 분석하였다. 또한, 평가식에 의해 예측된 열화 주조 스테인리스강의 물성치와 볼 압입시험의 결과를 비교하였다.

Abstract

Cast stainless steel (CSS) is thermally aged by a long term exposure in the range of nuclear power plant operating temperature, and the thermal aging in CSS is a cause of concern for the continued safe and reliable operation of these nuclear components. Therefore, an assessment of degradation in material properties of these components has been importantly considered. In this study the automated ball indentation (ABI) tests were performed on four cast stainless steels aged at 400°C for 3600hours, to investigate the applicability of ABI test to the assessment of aging degradation of cast stainless steels. Thus, the reliability of ABI test for aged CSS was analyzed by evaluating the scattering of data tested from each material and by comparing tensile properties obtained from ABI test and standard tensile test. Also, the tensile properties of aged CSS obtained from ABI test CSS were compared with those predicted by evaluation procedure developed on the basis of material database for aged CSS.

1. 서론

원자력발전소에서 주조 스테인리스강은 주냉각재 배관, 엘보우, 연결부, 펌프 케이싱 및 밸브 몸체 등 다양한 기기에 사용된다. 또한, 오스테나이트 스테인리스강의 용접부에서도 주조 스테인리스강과 유사한 미세조직을 갖는 재료가 생성된다. 주조 스테인리강은 오스테나이트 기지에 15~25% 정도의 δ-페라이트가 섞여있는 2 상 조직을 갖는다. 오스테나이트 조직내에 섞여있는 이들 페라이트는 재료의 기계적 강도와 용접성을 향상시키며, 응력부식균열에 대한 저항성을 높여 주는 것으로 알려져 있다[1]. 그러나, 이들 δ-페라이트는 주조 스테인리스강의 고온 사용에 따른 열취화를 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 주조 스테인리스강의 열취화는 열화온도에 따라 다양한 메커니즘에 의해 발생하는데, 원전 가동온도를 포함하는 250~450°C 부근에서는 주로 δ-페라이트의 스피노달 분해에 기인하며, 재료의 강도를 증가시키고 연성과 인성을 감소시켜 파괴에 대한 저항성을 감소시키는 것으로 보고되어 있다[2]. 따라서, 원전 가동 년 수가 증가됨에 따라 주조 스테인리스강으로 제작된 주요 기기들에서 열취화 현상은 운전중인 기기의 건전성 확보 관점에서 중요한 고려 사항으로 대두되고 있으며, 이들 기기에 대한 열화 평가는 원전의 수명연장, 주기적 안전성 평가, 그리고 가동중 원전 배관의 파단전누설 개념 적용 등에서 중요하게 고려되고 있다[2,3].

주조 스테인리스강의 열화 평가는 기기로부터 직접 재료를 채취하여 파괴적 방법인 표준시험 절차에 따라 시험할 때 가장 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나, 현실적으로 가동 중 원전 기기로부터 표준시험 방법에 필요한 량의 재료를 채취하는 것이 거의 불가능하다. 따라서, 대부분의 경우에는 동일 등급 재료의 가속 열화 데이터를 사용하거나, 이들 데이터에 기초한 평가식에 의한 간접적인 평가 방법이 적용되고 있다[4]. 그러나, 이러한 간접적 평가 방법은 가동 중 기기의 건전성 평가 결과에 불확실성을 증가시키는 요인이 되고 있다. 따라서, 가동 중인 원전 기기로부터 직접 재질의 열화를 평가하기 위한 다양한 준 비파괴적인 방법들이 시도되고 있다[5,6]. 이들 방법 중 하나가 연속 볼 압입시험을 이용한 재료물성치 평가이다. 연속 볼 압입시험은 재료의 표면에 1mm 이하의 작은 볼 압입자를 압입하여 재료의 인장물성치를 측정하는 준 비파괴적인 시험 방법으로 국내·외적으로 원자로압력용기의 조사취화 평가, 용접부와 같은 국소부의 재료물성치 변화 평가, 그리고 가스 배관 등에 대한 열화 평가에서 타당한 결과를 주는 것으로 보고하고 있다[7~10]. 또한, 열화되지 않은 주조 스테인리스강에 대한 선행연구 결과에 의하면, 주조 스테인리스강의 인장물성치 평가에도 신뢰성 있는 결과를 주는 것으로 파악되었다[11].

따라서, 본 연구에서는 주조 스테인리스강의 열화 평가에 연속 볼 압입시험의 적용 타당성을 살펴보기 위해서, 열화된 주조 스테인리스강을 이용하여 연속 볼 압입시험을 수행하고 데이터의 신뢰성을 분석하였다. 이를 위해 400°C 에서 3600 시간 동안 가속 열화시킨 4 종류의 주조 스테인리스강을 이용하여 연속 볼 압입시험을 수행하였으며, 각 시험 재료별 데이터의 분산과 인장시험 데이터와의 편차 등을 비교함으로써 시험결과의 신뢰성을 분석하였다. 또한, 예측식에 의한 열화 평가 결과와 실험 결과를 비교하였다.

2. 시험 재료 및 절차

2.1 시험 재료

본 시험에는 400°C 에서 3600 시간 동안 가속 열화시킨 4 종류의 주조 스테인리스강이 이용되었다. 4 종류의 주조 스테인리스강은 강도와 미세조직, 특히 δ-페라이트 함량이 다른 것으로 선택되었다. 본 연구에서 고려된 주조 스테인리스강의 δ-페라이트 함량과 재료 종류는 현재 운전 중인 국내 원전의 주냉각재 배관에 대한 화학조성을 기초로 결정되었으며, δ-페라이트 함량이 낮은 L-등급, 중간인 M-등급, 높은 H-등급의 CF8M 3 종류와 CF8A 1 종류가 선택되었다. 이들 재료는 모두 실험용으로 주조된 것이며, CF8M_M 과 CF8A 는 각각 30kg 의 4 각 주괴 형태로, CF8M_H 와 CF8M_L 은 80mm×150mm×340mm 의 블록 형태로 제작되었다. 모든 재료는 주조 후 1100°C 에서 용체화 처리하여 급냉시킴으로써 재질 내의 탄화물 및 σ-상을 감소시켰다. 각 재료에 대한 주조시 화학조성은 Table 1 과 같으며, Aubery 의 이론식[2,4]에 따라 계산된 페라이트 함량을 고려하였다.

모든 재료는 미세조직의 차이를 정량화하기 위해서 열화에 앞서 페라이트 측정기를 이용하여 δ-페라이트 함량을 측정하고, 광학현미경 사진을 이용하여 각 재료의 δ-페라이트 분포를 확인하였다. 각 시편에서 측정한 δ-페라이트 함량의 평균은 CF8M_L 이 10.1%, CF8M_M 이 20.6%, CF8M_H 가 26.0%, 그리고 CF8A 가 25.9%를 보였으며, 시편 별로 최대 1.5% 정도의 표준편차를 보였다. Fig. 1 은 미세조직을 관찰한 것으로 각 재료의 페라이트 크기, 간격, 그리고 배열의 특징을 확인할 수 있다. δ-페라이트 함량이 10% 정도인 CF8M_L 의 경우에는 오스테나이트 조직 내에 작은 페라이트(검은색)가 여러 곳에 분산(100μm 이상 떨어짐)되어 존재한다. 반면, δ-페라이트의 함량이 20% 정도인 CF8M_M 의 경우에는 오스테나이트 조직 내에 작은 페라이트가 조밀(15 20 μm 정도의 간격)하게 배열되어 있다. δ-페라이트 함량이 26% 정도인 CF8M_H 의 경우에는 CF8M_M 에 비해 δ-페라이트가 조대하고, 페라이트 사이의 간격이 넓으며(50 μm 정도의 간격), 오스테나이트 기지내에 δ-페라이트들이 연속적으로 연결되어 배열하는 것을 알 수 있다. 또한, δ-페라이트 함량이 26% 정도인 CF8A 의 경우에는 CF8M_H 에 비해 δ-페라이트 크기는 작으나, CF8M_M 에 비해 δ-페라이트간의 간격이 넓고 페라이트 크기가 크며 서로 연결되어 있는 것을 알 수 있다.

한편, 각 주조 스테인리스강의 열화 전 인장물성치는 Table 2 와 같다. Table 2 에서 알 수 있는 것과 같이 모든 주조 스테인리스강의 열화전 강도는 ASME Sec.II 의 최소요구 강도를 모두 만족하고 있으며, CF8M 의 경우 재료의 δ-페라이트 함량에 따라 항복강도가 증가하여 CF8M_L 이 가장 낮고, CF8M_H 가 가장 높은 값을 보였다. 인장강도의 경우에는 항복강도과 달리 δ-페라이트의 함량이 가장 높은 CF8M_H 가 CF8M_M 보다 30MPa 정도 낮은 값을 보였으며, CF8M_H 와 유사한 δ-페라이트 함량을 가진 CF8A 가 CF8M_M 보다 낮은 강도를 보였다.

2.2 시편 및 실험 절차

2.2.1 시편

본 연구에서는 열화된 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 결과의 신뢰성을 분석하는 것이 중요한 목적이므로 볼 압입시험을 수행한 후 동일한 시편을 이용하여 인장시험을 수행할 수 있도록 Fig. 2 에서 보는 것과 같이 모든 시편을 4 각 봉상(10mm×10mm×80mm or ×90mm)으로 각 재료 별로 3 개씩 제작하였다. 볼 압입시험은 작은 볼을 반복적으로 압입하면서 하중과 압입 깊이를 측정하므로 시험 결과가 시편의 가공 상태에 상당히 민감하다. 따라서, 볼 압입시편은 모든 면을 연삭하여 하중이 작용되는 동안에 시편의 눌림이나 기울여짐이 없도록 하였으며, 시험면은 #800 이상까지 연마하여 표면 거칠기에 의한 영향을 제거하였다.

2.2.2 시험방법 및 절차

본 연구에서 사용된 볼 압입시험 장비는 Frontics 사의 AIS-2000 모델(Fig. 3)로 인장물성치의 측정은 식(1)과 (2)에 나타낸 것과 같이 볼 압입에 따른 하중과 압입 흔적의 크기로부터 응력과 변형률이 계산된다. 1 point 의 볼 압입 과정에서 보통 15 회 정도의 가중(加重)과 해중(解重)이 반복되며, 각 cycle 마다 하중과 탄성 회복량을 측정하여 응력과 변형률을 계산하고, 이 데이터를 식(3)으로 curve fitting 하여 응력-변형률 곡선을 구한다. 또한, 응력-변형률 곡선으로부터 강도계수 K, 가공경화지수 n, 그리고 항복강도와 인장강도를 계산하며, 모든 계산은 시험장치와 연결된 프로그램에서 자동으로 수행된다.

$$\sigma = \frac{1}{\Psi}\frac{F}{\pi a^2} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(a/R)^2}}\frac{a}{R} \tag{2}$$

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{3}$$

여기서, a 는 압흔의 반경으로 압입 후 볼의 해중 과정에서 미세하게 발생하는 볼 하부의 탄성 회복 량으로부터 계산되며, F는 볼 압입하중, R은 압입자의 반경, α는 상수, Ψ는 소성 구속인자이다[12].

본 실험에서는 열화 주조 스테인리스강의 볼 압입시험 결과와의 비교를 위해서 열화 전에 모든 시편에 대한 볼 압입시험을 수행하여 기본 테이터를 확보하였다. 시험은 시편의 양면에서 수행되었으며, 각각 5 7 point 의 데이터를 취득하였다. 시험후 모든 시편은 열화되었으며, 열화가 완료된 시편의 동일한 면에서 다시 볼 압입시험을 수행하였다. 열화 후 볼 압입시험은 시편의 표면을 연마하여 산화막을 제거한 다음 수행하였으며, 시험 조건은 열화 전과 동일한 조건을 유지하였다. 볼 압입시험이 완료된 시편은 모두

인장시편으로 가공하여 인장시험을 수행하고, 그 결과를 볼 압입시험 결과와 비교하였다. 본 시험에서는 선행연구의 결과에 따라 0.5mm 볼 압입자를 사용하였으며, 한 면에서 5 7 point 의 데이터를 측정하여 경향에서 가장 크게 벗어나는 2 point 의 데이터를 제거한 후 결과를 정리하였다[11].

3. 실험결과 및 토의

3.1 볼 압입시험 데이터의 분산 비교

열화 주조 스테인리스강의 볼 압입시험 결과에서 데이터의 재연성을 확인하기 위해서, 시편의 각 면에서 측정된 볼 압입시험 데이터로부터 최대 볼 압입하중, 항복강도, 인장강도, 강도계수, 그리고 가공경화지수에 대한 평균과 표준편차를 계산하여 데이터의 분산 정도를 분석하였다. Fig. 4 는 각 면에서 측정된 재료물성치의 표준편차를 평균 값으로 무차원화하여 정량화한 값을 재료의 δ-페라이트 함량에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 4 에서 알 수 있는 것과 같이 열화 주조 스테인리스강의 시험결과, 볼 압입 데이터의 표준편차에 대한 평균의 비는 항복강도가 최대 5%, 인장강도가 최대 3%, 그리고 강도계수와 가공경화지수가 각각 5%와 6%정도의 최대 값을 보였다. 열화 주조 스테인리스강에 대한 이 정도의 데이터 분산은 건전 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 데이터의 분산과 비교할 때, 가공경화지수를 제외하면 모든 인장물성치에서 비슷하거나 낮은 데이터 분산을 보이는 것을 알 수 있다. 또한, δ-페라이트 함량에 따른 데이터의 분산 정도를 비교하면, 모든 인장물성치에서 페라이트 함량이 증가함에 따라 데이터의 분산 정도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 재료의 미세조직에 따른 데이터의 분산 특성은 선행 연구에서 수행된 건전 주조 스테인리스강의 시험 결과와 일치하는 것이다[11].

따라서, 열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험의 재연성은 건전 재료와 비교하여 만족할 수준인 것을 알 수 있다. 또한, δ-페라이트 함량의 감소에 따른 데이터 분산의 증가는 선행연구에서 논의된 바와 같이 미세조직적인 δ-페라이트의 분포와 연관되는 것으로 판단된다. 즉, δ-페라이트의 함량이 낮은 경우에는 오스테나이트 기지 속에 페라이트들이 독립적으로 분산되어 있기 때문에 볼이 압입되는 위치에 따라 볼 하부에서의 응력과 변형이 불균일하게 발생하는 반면, δ-페라이트의 함량이 높은 경우에는 페라이트 사이의 간격이 작고 서로 연결되어 있기 때문에 볼 압입에 따른 볼 하부에서의 응력과 변형의 분산이 비교적 균일하게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 열화된 재료의 경우에는 열화에 의해 δ-페라이트의 강도가 증가하고, 오스테나이트 기지와의 강도 차이가 커짐에 따라 이러한 현상을 더욱 뚜렷이 나타날 것으로 예상된다.

3.2 인장시험 결과와의 비교

볼 압입시험을 통한 인장물성치 측정 결과의 신뢰성을 확인하기 위해서, 먼저 볼 압입시험의 진응력-변형률 곡선을 인장시험의 결과와 비교하였다. 전체적으로 5% 이하의 변형률 구간에서는 인장시험의 진응력-변형률 곡선이 높은 응력값을 보였으며, 그 이상의

변형률 구간에서는 볼 압입시험의 진응력-변형률 곡선이 높은 응력 값을 보였다. 또한, 인장시험의 진응력-변형률 곡선을 식(3)으로 curve fitting 하여 볼 압입시험의 진응력-변형률 곡선을 비교한 결과, 전반적으로 볼 압입시험의 진응력-변형률 곡선과 비교적 잘 일치하지만 일부 데이터에서 볼 압입시험이 인장시험보다 높은 진응력-변형률 곡선을 보였다. 따라서, 전체적으로 볼 압입시험은 열화 주조 스테인리스강의 진응력-변형률 곡선을 유사하거나 과대평가하고 있는 것을 알 수 있다.

한편, 볼 압입시험 결과를 인장시험 결과와 보다 정량적으로 비교하기 위해서, 각 시편에서 볼 압입시험을 통해 구한 항복강도, 인장강도, 강도계수, 그리고 가공경화지수를 각 시편의 인장시험 결과와 비교하였다. Fig. 5 는 각 시편에서 측정된 인장물성치를 비교하여 나타낸 것이다. Fig.5(a)에서 알 수 있는 것과 같이 항복응력은 CF8M_H 를 제외하면 모든 재료에서 볼 압입시험이 약 ±10%의 오차 범위 내에서 인장시험 결과를 예측하고 있으며, 평균 오차는 거의 1~2% 미만인 것을 알 수 있다. 그러나, CF8M_H 의 경우에는 모든 시험에서 항복강도를 과대평가하고 있으며, 15%를 초과하는 데이터도 존재한다. 인장강도는 모든 재료에서 볼 압입시험이 약 ±10%의 오차 범위 내에서 인장시험의 인장강도를 예측하고 있으며, 전체적으로 평균 약 4%정도 인장강도를 과대평가하는 것으로 나타났다 (Fig. 5(b)). 한편, 강도계수와 가공경화지수의 경우에는 Figs. 5(c)와 (d)에 나타낸 것과 같이 항복강도와 인장강도에 비해 데이터의 분산이 크게 관찰되었으나, 거의 대부분의 데이터가 약 ±15%의 오차 범위에서 인장시험 결과를 예측하였으며, 항복강도와 인장강도에서와 유사하게 전체적으로 인장시험 결과를 과대평가하는 경향을 보였다. 또한, 전체적인 데이터를 분석해 본 결과, 볼 압입시험에서 인장물성치 평가 결과에 미치는 δ-페라이트 함량의 영향은 특별한 경향을 보이지 않았다.

따라서, 이들 결과로부터 10~25% 정도의 δ-페라이트 함량을 갖는 열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험은 항복강도와 인장강도의 경우 평균 ±10% 이내의 오차 범위에서 측정이 가능한 것을 알 수 있으며, 강도계수와 가공경화지수 역시 ±15%이내에서 예측이 가능한 것을 알 수 있다. 다만, CF8M_H 에서 항복강도의 오차가 다른 재료에 비해 크게 나타나고 있는데, 이것은 시험상의 오류로 인해 인장시험에서 항복강도가 낮게 평가된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 왜냐하면, 인장시험에서 구한 CF8M_H 의 항복강도가 열화 전에 동일한 건전 재료의 인장시험에서 측정된 항복강도보다 낮거나 유사한 결과를 보였기 때문이다. 이것은 일반적으로 열화에 의해 항복강도가 증가되는 것과 상반된 경향이며, 인장강도의 증가와도 일치하지 않는 결과인 것을 알 수 있다[2~4].

3.3 주조 스테인리스강의 열화 평가 타당성

연속 볼 압입시험을 이용한 주조 스테인리스강 열화 평가의 타당성을 살펴보기 위해서, 각 재료 별로 열화 재료에 대한 볼 압입시험 결과와 열화전 재료물성치와 화학조성을 바탕으로한 평가식에 의한 예측 결과, 그리고 열화 재료에 대한 인장시험 결과를 비교하였다. 열화되지 않은 주조 스테인리스강의 항복강도와 인장강도와 화학조성을 이용한

열화 재료의 항복강도와 인장강도 예측은 식(4)와 (5)에 따라 평가된다[4]. 식(4)와 (5)에서 σ_{ef}는 $\sigma_{ef} = (\sigma_{ey} + \sigma_{eu})/2$ 로 정의되며, P 는 열화인자로 식(6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ey,aged} &= (0.798 + 0.076P)\sigma_{ey,unaged} \\ \sigma_{ef,aged} &= (0.84 + 0.08P)\sigma_{ef,unaged} \end{aligned} \quad \text{for CF8} \qquad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ey,aged} &= (0.708 + 0.092P)\sigma_{ey,unaged} \\ \sigma_{ef,aged} &= (0.77 + 0.10P)\sigma_{ef,unaged} \end{aligned} \quad \text{for CF8M} \qquad (5)$$

$$P = \log_{10}(t) - \frac{1000Q}{19.143}\left(\frac{1}{T_s + 273} - \frac{1}{673}\right) \qquad (6)$$

여기서, 활성화에너지 Q는 재료의 화학조성으로부터 계산되며, T_s는 열화온도, 그리고 t는 열회시간이다[4].

Fig. 6 은 볼 압입시험을 통해 측정된 열화 재료의 항복강도와 인장강도를 평가식에 의해 예측 결과 및 인장시험 결과와 함께 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 항복강의 경우(Fig. 6(a)), 평가식에 의해 예측된 항복강도는 CF8A 를 제외하고 모든 재료에서 인장시험 결과와 거의 일치하였으며, CF8A 에서는 인장시험 결과를 과소평가하였다. 따라서, CF8M_L 과 CF8M_M 에서는 볼 압입시험 결과와 인장시험 결과, 그리고 평가식에 의한 예측 결과가 거의 일치하였다. 그러나, CF8M_H 에서는 볼 압입시험 결과의 오차가 평가식의 오차보다 크게 나타났으며, CF8A 에서는 볼 압입시험과 평가식에 의한 예측 결과가 비슷한 정도의 절대 오차를 보였다. 한편, 인장강도의 경우는 Fig. 6(b)에서 알 수 있는 것과 같이 평가식에 의한 예측 결과가 CF8M_L 과 CF8M_M 에서는 인장시험 결과를 과대 평가하고 있으며, CF8M_H 와 CF8A 에서는 과소 평가하였다. 따라서, 볼 압입시험 결과와 평가식에 의한 예측 결과의 오차 정도를 살펴보면 CF8M_L 과 CF8M_M 에서는 거의 유사한 오차를 보였으며, CF8M_H 와 CF8A 에서도 오차의 방향은 반대지만 절대 값은 거의 유사한 것으로 나타났다.

따라서, 볼 압입시험을 이용하여 평가된 열화 주조 스테인리스강의 항복강도와 인장강도는 평가식에 의해 예측된 값들과 비교할 때, 전반적으로 항복응력에서는 오차가 유사하거나 약간 큰 것으로 나타났으며, 인장강도의 경우에는 비슷한 오차범위를 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 볼 압입시험을 통한 주조 스테인리스강 열화 평가의 신뢰성을 확인하기 위해서, 400°C에서 3600시간 동안 가속 열화시킨 4종류의 주조 스테인리스강을 이용하여 볼 압입시험을 수행하고, 그 결과로부터 데이터의 분산 평가를 통해 시험의 재연성과 인장시험과의 비교를 통해 시험 결과의 신뢰성을 분석하였다. 또한, 평가식을 이용한 열화 재료

의 물성치 평가 결과와 볼 압입시험 결과를 비교하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 데이터는 건전 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 데이터와 비교하여 비슷하거나 낮은 데이터 분산을 보였으며, 재료의 δ-페라이트 함량이 감소할수록 데이터의 분산이 증가하였다.

(2) 볼 압입시험 결과를 인장시험 결과와 비교한 결과, 항복강도와 인장강도는 ±10% 정도의 오차 범위 내에서 인장시험 결과를 예측하였으며, 강도계수와 가공경화지수는 ±15% 정도의 오차 범위 내에서 인장시험 결과와 일치하였다. 또한, 볼 압입시험과 인장시험 결과의 오차는 δ-페라이트 함량에 무관한 것으로 판단되었다.

(3) 볼 압입시험을 통해 평가된 열화 주조 스테인리스강의 항복강도와 인장강도는 평가식에 의해 예측된 값들과 비교할 때, 전반적으로 항복응력에서는 오차가 유사하거나 약간 큰 것으로 나타났으며, 인장강도의 경우에는 비슷한 오차 범위를 보였다.

참고문헌

[1] D. Peckner and I. M. Bernstein, Handbook of Stainless Steels, p.2-1, McGraw-Hill Book Company, New York (1987).

[2] V.N. Shah and P.E. Macdonald, Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components, p.161, Elsevier Science Pub., Amsterdam(1993).

[3] Electric Power Research Institute, "Generic Licence Renewal Technical Issues Summary", EPRI TR-107521, April(1998).

[4] O.K. Chopra and W.J. Shack, Assessment of Thermal Embrittlement of Cast Stainless Steel, NUREG/CR-6177, ANL-94/2(1994).

[5] T. Goto, T. Naito, and T. Yamaoka, "A study on NDE Method of Thermal Aging of Cast Duplex Stainless Steels", Nucl. Eng. & Des., 182, 181(1998).

[6] J.S. Cheon, I.S. Kim, J.G. Jang, J.G. Kim, "Small Punch Test for the Evaluation of Thermal Aging Embrittlement of CF8 Duplex Stainless Steel", Proc. of KNS Spring Meeting(1996).

[7] F.M. Haggag, "Effects of Irradiation Temperature on Embrittlement of Nuclear Reactor Vessel Steels", ASTM STP 1175, p.172(1993).

[8] F.M. Haggag, "In-situ Nondestructive Measurements of Key Mechanical Properties of Oil and Gas Pipelines", Residual Stress Measurement and General Nondestructive Evaluation, ASME PVP-429, p.99(2001).

[9] K.L. Murty, P.Q. Miraglia, M.D. Mathew, V.N. Shah, and F.M. Haggag, "Characterization of Gradients in Mechanical Properties of SA-533B Steel Welds using Ball indentation", Int. J. of Pres. Vess. & piping, 76, 361(1999)

[10] T.S. Byun, J.W. Kim, and J. H. Hong, "A Theoretical Model for Determination of Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessel Steels in the Transition Region from Automated Ball Indentation Test", J. of Nucl. Mater., 252, 187(1998)

[11] J.W.Kim and J.Y.Kim, "Evaluation of Tensile Properties of Cast Stainless Steel using Ball Indentation Test," Proc. of KNS fall meeting (2003)

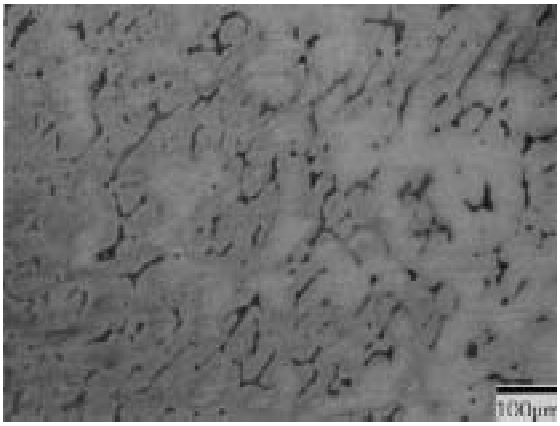
[12] J.H. Ahn and D. Kwon, "Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve", J. Kor. Inst. Met. & Mater., 38, 1606(2000).

Table 1 Chemical compositions of cast stainless steels used in experiment

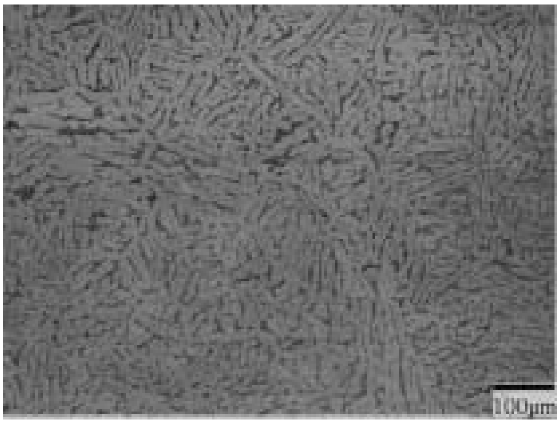
Material		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Co	Fe
CF8M	L	0.04	0.6	0.8	19.5	11.0	2.5	-	-	0	Balance
	M	0.04	0.6	1.0	19.2	9.6	2.25	0.02	0.03	0.1	Balance
	H	0.04	0.6	1.2	20.0	9.0	2.5	0.02	0.03	0.04	Balance
CF8A		0.04	0.6	1.2	20.5	8.5	-	0.02	0.03	0.1	Balance

Table 2 Tensile properties of unaged cast stainless steels used in experiment

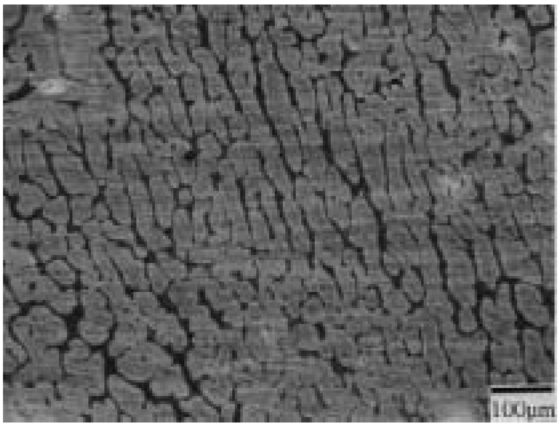
Material		Unaged CSS		ASME Sec.II	
		Yield stress (MPa)	Tensile stress(MPa)	Yield stress (MPa)	Tensile stress(MPa)
CF8M	L	253.1	511.3	205	485
	M	300.6	623.4		
	H	318.7	595.4		
CF8A		285.4	605.8	240	530



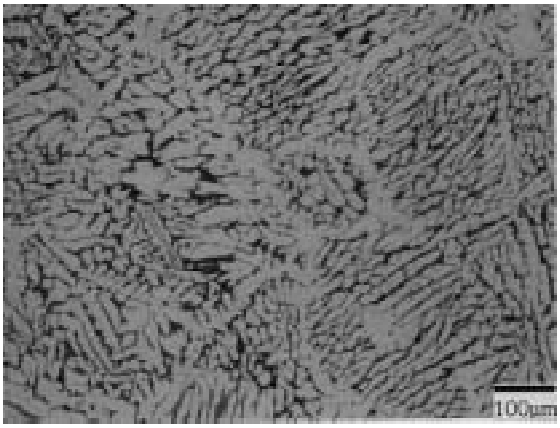
[CF8M_L]



[CF8M_M]



[CF8M_H]



[CF8M_A]

Fig. 1 Microstructure of cast stainless steels used in experiment

Fig. 2 Specimens for ball indentation tests

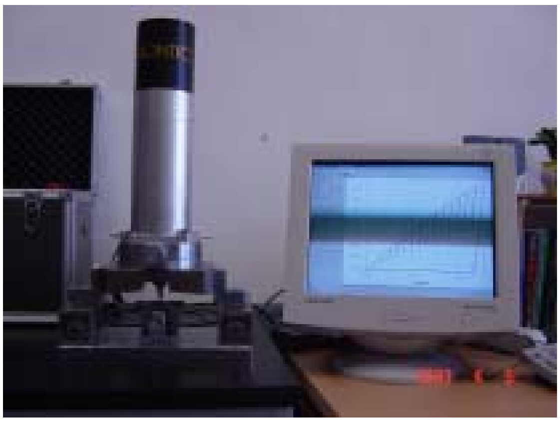


Fig. 3 Ball indentation test system

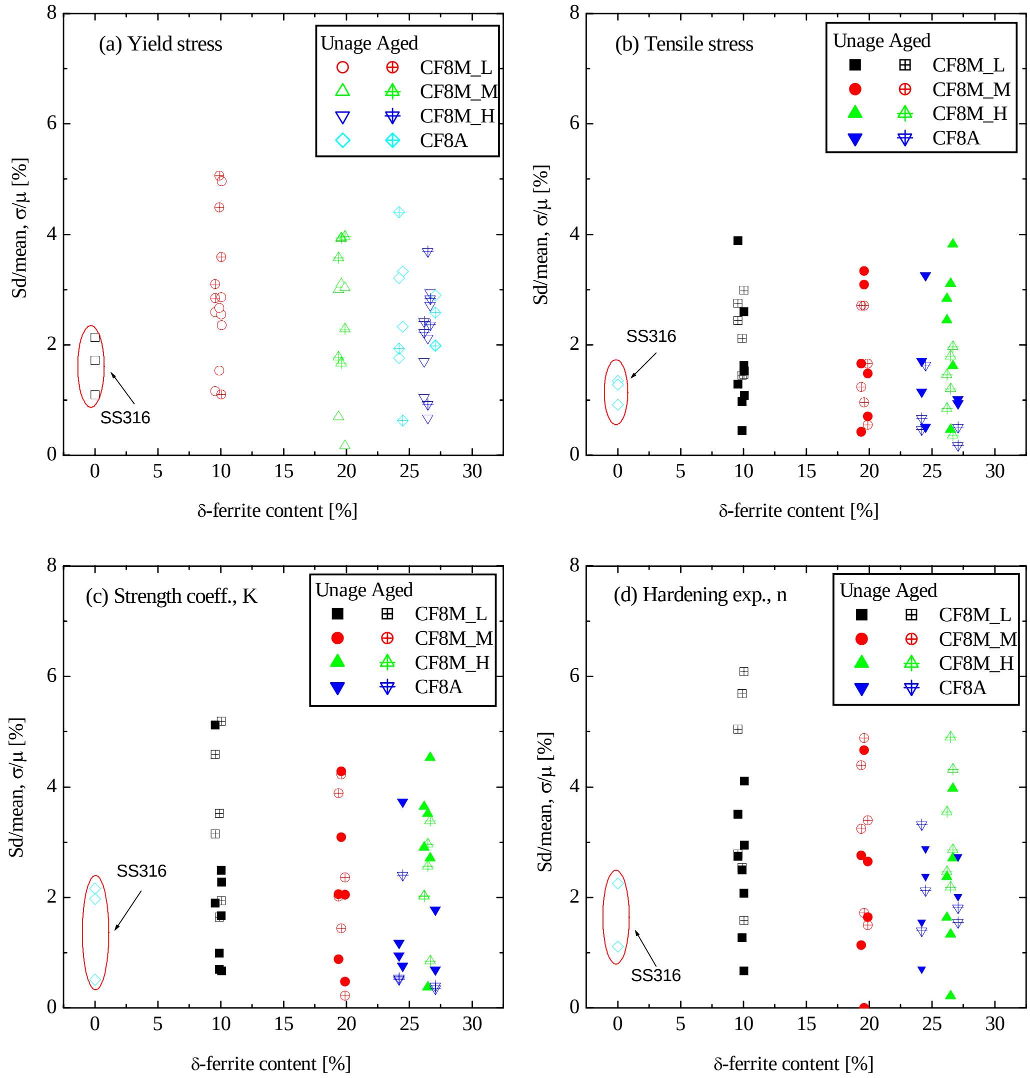


Fig. 4 Variations of normalized standard deviation of ball indentation test data with δ-ferrite content.

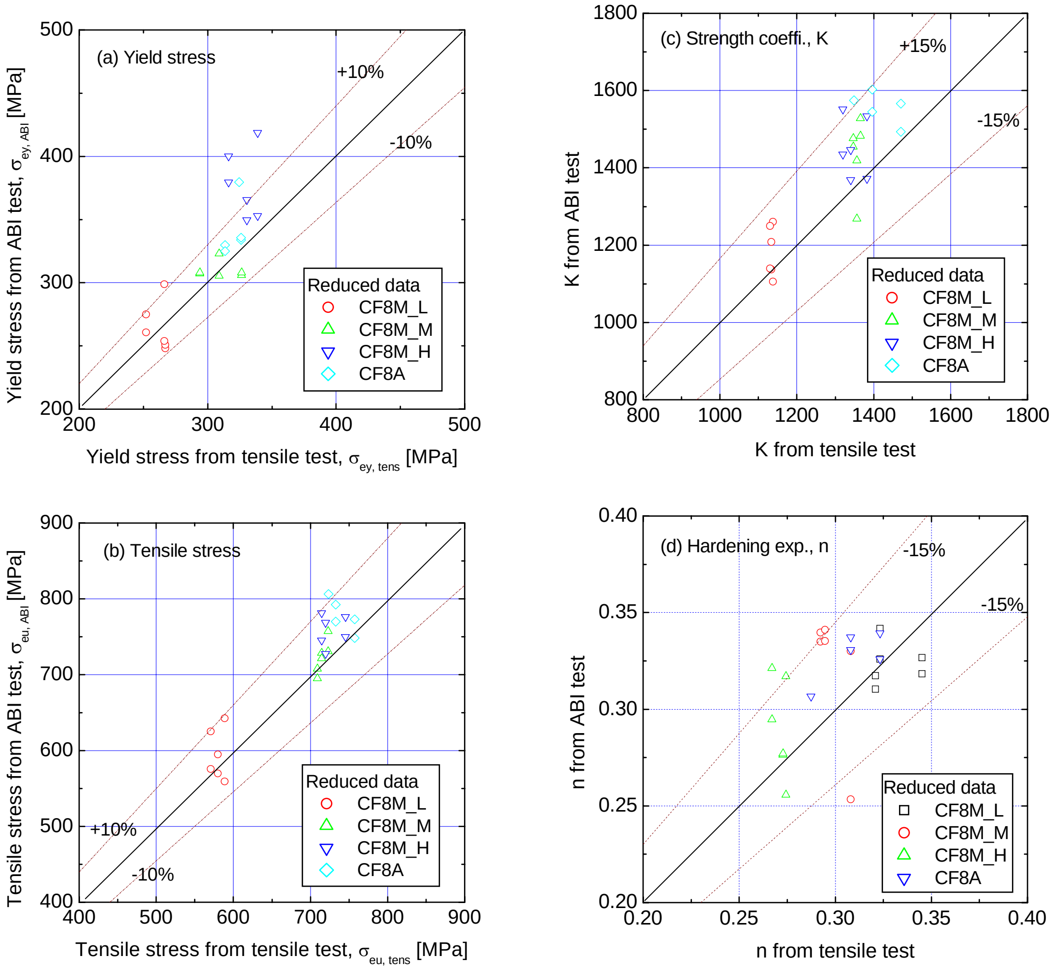
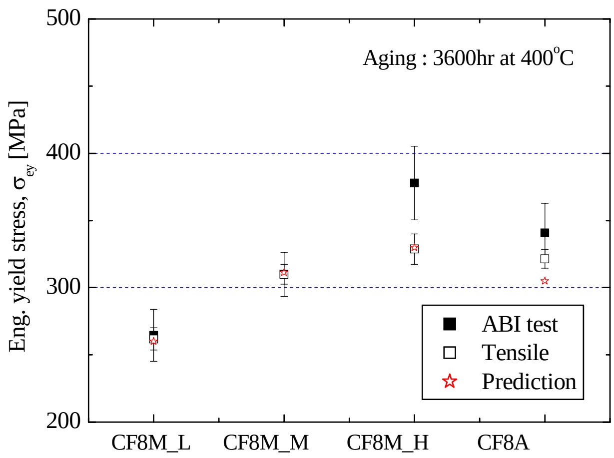
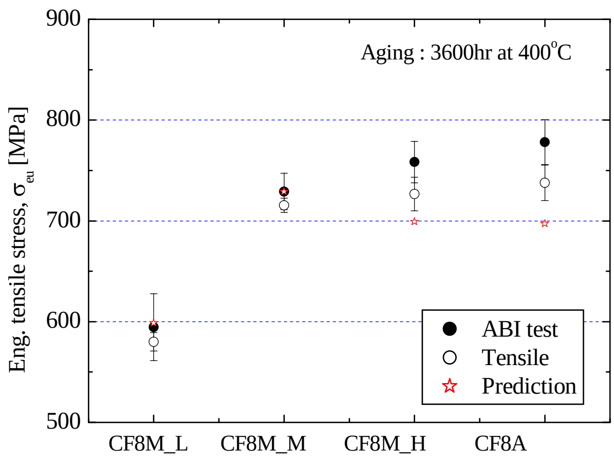


Fig. 5 Comparisons of tensile properties of aged CSS obtained from ABI test and tensile test.



(a) Yield stress



(b) Tensile stress

Fig. 6 Comparisons of ABI test and predicted tensile properties of aged CSS