

〈 논문 〉

볼 압입시험을 이용한 2상 주조 스테인리스강의 열화 평가

김진원*

(2005년 4월 26일 접수, 2005년 7월 20일 심사완료)

Aging Evaluation of Duplex Cast Stainless Steel Using Ball Indentation Test

Jin-Weon Kim

Key Words: Duplex Cast Stainless Steel(2상 주조 스테인리스강), Thermal Aging(열화), Ball Indentation Test(볼 압입시험), Tensile Properties(인장물성치)

Abstract

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

1. 서론

주조 스테인리스강은 발전소나 기타 플랜트의 주요 배관, 엘보우, 펌프 케이싱 및 밸브 몸체 등 다양한 기기에 사용된다. 주조 스테인리스강은 오스테나이트 기지에 10~25% 정도의 δ -페라이트가 섞여있는 2상 조직을 갖는데, 오스테나이트 조직 내에 섞여있는 δ -페라이트는 재료의 기계적 강도와 용접성을 향상시키며, 응력부식균열에 대한 저항성을 높여 준다.⁽¹⁾ 그러나, 주조 스테인리스강에서 δ -페라이트는 고온 사용에 따른 열화의 원인이 되는 것으로 알려져 있다. 주조 스테인리스강의 열화 메커니즘은 온도에 따라 차이

가 있으나, 원자력발전소 운전 온도에서 강도를 증가시키고 연성과 인성을 감소시켜 파괴에 대한 저항성을 낮추는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 따라서, 가동 년 수가 증가됨에 따라 주조 스테인리스강으로 제작된 주요 기기들의 열화 현상이 기기의 건전성 확보 관점에서 중요한 고려 사항으로 대두되고 있다. 또한, 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 재료를 채취하여 파괴적으로 측정하는 것이 가장 신뢰성 있는 방법이다. 그러나, 현실적으로 가동 중인 원전 기기로부터 시험에 필요한 재료를 채취하는 것이 거의 불가능하다. 따라서, 2상 주조 스테인리스강의 열화를 준 비파괴적으로 평가할 수 있는 시험 방법이 요구되고 있으며, 이를 위해 다양한 방법들이 시도되고 있다.^(5,6) 본 연구에

* 회원, 조선대학교 원자력공학과
E-mail : jwkim@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7109 FAX : (062)230-7763

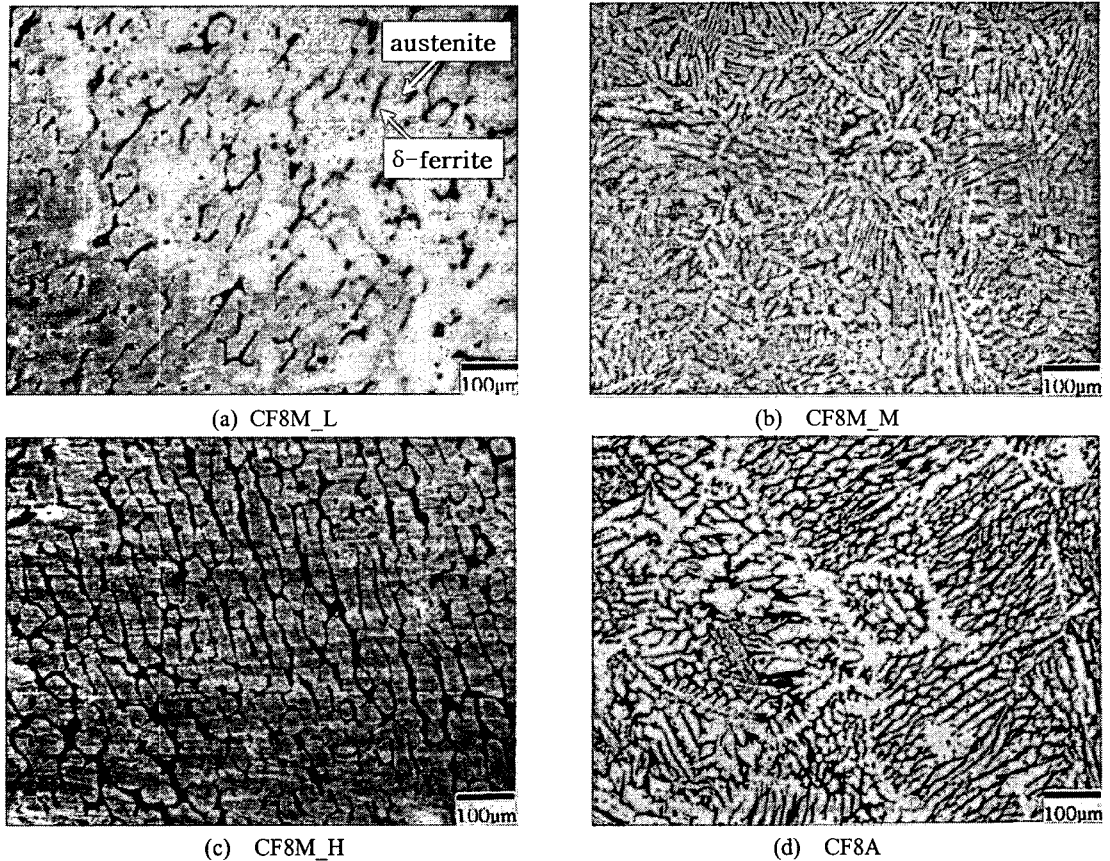


Fig. 1 Microstructure of cast stainless steels before the thermal aging

서는 비파괴적이고 In-situ 측정이 가능한 불 압입 시험을 이용하여 2상 주조 스테인리스강의 열화를 평가해 보고자 한다. 불 압입시험은 재료의 표면에 직경이 1 mm이하인 작은 불을 압입하여 인장물성치를 측정하는 시험 방법으로 페라이트 강에 대해서는 정확한 측정 결과를 주는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 또한, 열화되지 않은 주조 스테인리스강의 인장물성치에 대해서도 비교적 신뢰성 있는 데이터를 주는 것으로 파악되었다.⁽¹¹⁾

따라서, 본 연구에서는 주조 스테인리스강의 열화 평가에 대한 불 압입시험의 신뢰성과 적용의 타당성을 살펴보기 위해서, 미세조직과 기계적 강도가 다른 4 종류의 열화 주조 스테인리스강을 이용하여 불 압입시험과 인장시험을 수행하였다. 실험 결과로부터 각 시험 재료별 데이터의 분산과 정확성 등을 비교함으로써 시험 결과의 신뢰성을 분석하였다. 또한, 평가식에 의한 예측 결과와 실험 결과를 비교하였다.

2. 재료 및 실험 절차

2.1 시험재료

본 시험에는 400°C에서 3600 시간 동안 가속 열화시킨 4 종류의 주조 스테인리스강이 사용되었다. 이들 4 종류는 기계적 강도와 미세조직이 다른 것으로 δ -페라이트 함량이 낮은 L-등급, 중간인 M-등급, 높은 H-등급의 CF8M 3종류와 CF8A 1종류이다. 이들 재료는 모두 실험용으로 주조된 것이며, 주조 후 1100°C에서 용체화 처리하여 급냉시킴으로써 재질 내의 탄화물과 σ -상을 감소시켰다. 각 재료에 대한 화학조성은 Table 1과 같다.

모든 재료는 미세조직의 차이를 정량화하기 위해서 열화에 앞서 δ -페라이트 함량을 측정하고, 미세조직을 관찰하였다. 시험에 사용된 각 시편

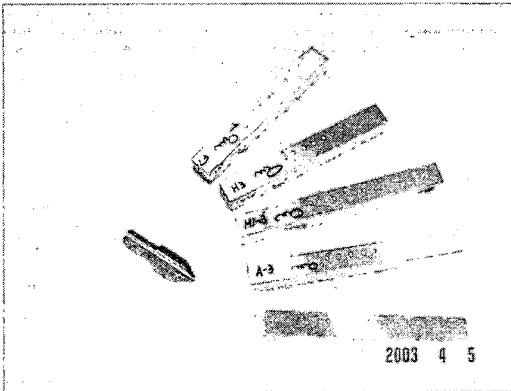


Fig. 2 Indentor and specimens for ball indentation tests

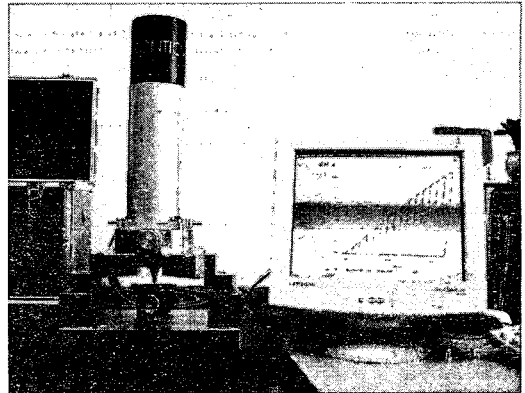


Fig. 3 Ball indentation testing system

Table 1 Chemical compositions in wt % 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 the experiment

Material		Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]
CF8M	L	253.1	511.3
	M	300.6	623.4
	H	318.7	595.4
CF8A		285.4	605.8

에서 측정된 δ -페라이트 함량의 평균은 재료별로 CF8M_L이 9.9%, CF8M_M이 19.7%, CF8M_H가 26.5%, 그리고 CF8A가 25.3%이다. Fig. 1은 각 재료의 미세조직을 관찰한 것으로 페라이트 크기, 간격, 그리고 분포의 차이를 보여주고 있다. CF8M_L의 경우에는 오스테나이트 조직 내에 작은 페라이트가 여러 곳에 분산(100 μm 이상 떨어짐)되어 있다. 반면, CF8M_M의 경우에는 오스테나이트 조직 내에 작은 페라이트가 조밀(15~20 μm 정도의 간격)하게 배열되어 있다. δ -페라이트 함량이 높은 CF8M_H의 경우에는 CF8M_M에 비해 δ -페라이트가 조대하고, 페라이트 사이의 간격이 넓으며(50 μm 정도의 간격), 오스테나이트 기지 내에 δ -페라이트들이 연속적으로 연결되어 배열한다. 또한, CF8M_H와 비슷한 정도의 δ -페

라이트 함량을 가진 CF8A의 경우에는 CF8M_H에 비해 δ -페라이트 크기는 작으나, δ -페라이트들이 서로 연결되어 분포한다.

한편, Table 2는 각 재료의 열화 전 인장물성치를 나타낸 것으로 CF8M의 경우 δ -페라이트 함량에 따라 항복강도가 증가하여 CF8M_L이 가장 낮고, CF8M_H가 가장 높은 값을 보였다. 그러나, 인장강도는 항복강도와 달리 δ -페라이트 함량이 가장 높은 CF8M_H가 CF8M_M보다 28 MPa 정도 작은 값을 보였으며, CF8M_H와 유사한 δ -페라이트 함량을 가진 CF8A도 CF8M_M보다 낮은 인장 강도를 보였다.

2.2 시편 및 실험절차

2.2.1 시편

본 연구에서는 시험 결과의 비교를 위해 볼 압입시험 후 동일한 시편을 이용하여 인장시험을 수행할 수 있도록 시편을 가공하였다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 모든 시편은 4각 봉상(10 mm \times 10 mm \times 80 mm or \times 90 mm)으로 각 재료 별로 3개씩 제작하였다. 볼 압입시험은 작은 볼을 반복적으로 압입하면서 하중과 압입 깊이를 측정하므로 시험 결과가 시편의 가공 상태에 상당히 민감

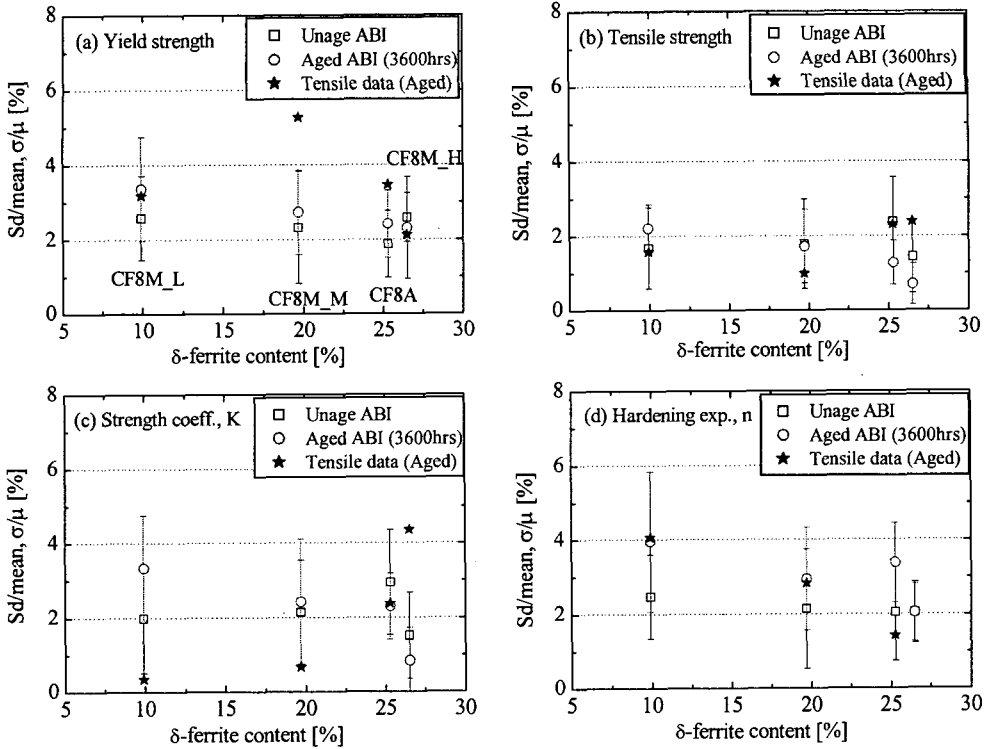


Fig. 4 Variations of normalized standard deviation of ball indentation test with δ -ferrite content

하다. 따라서, 시편의 모든 면을 연삭하여 압입되는 동안 시편의 눌림이나 기울어짐이 없도록 하였으며, 압입 면은 #800 이상의 에머리페이퍼로 연마하여 거칠기에 따른 영향을 제거하였다.

2.2.2 실험 절차

본 연구에 사용된 볼 압입시험 장비는 Frontics사의 AIS-2000 모델 (Fig. 3)로 인장물성치는 식 (1)과 (2)에 나타낸 것과 같이 볼 압입에 따른 하중과 압입 흔적의 크기로부터 응력과 변형률이 계산된다. 볼 압입 과정에서 가중(加重)과 해중(解重)이 반복되며, 각 cycle마다 하중과 탄성 회복량을 측정하여 응력과 변형률을 계산하고, 이 데이터를 식 (3)으로 curve fitting하여 응력-변형률 곡선을 구한다. 또한, 응력-변형률 곡선으로부터 강도계수 K , 가공경화지수 n , 그리고 항복강도와 인장강도를 계산한다.

$$\sigma = \frac{1}{\Psi} \frac{F}{\pi a^2} \quad (1)$$

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

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (3)$$

여기서, a 는 압흔 반경, F 는 볼 압입하중, R 은 압입자 반경, α 는 상수, Ψ 는 소성구속인자이다.

본 실험에서는 열화에 따른 차이를 비교하기 위해서, 열화 전에 모든 시편에 대해 볼 압입시험을 수행하여 기준 데이터를 확보하였다. 시험은 시편의 양면에서 수행되었으며, 시험 후 모든 시편을 열화시켰다. 열화가 완료된 시편에 대해서는 동일한 면에서 다시 볼 압입시험을 수행하였다. 열화 후의 볼 압입시험은 시편의 표면을 연마하여 산화막을 제거한 다음 수행하였으며, 시험 조건은 열화 전과 동일한 조건을 유지하였다. 볼 압입시험이 완료된 시편은 모두 인장시편 (봉상 : $D = 6 \text{ mm}$, $L = 25 \text{ mm}$)으로 가공하여 인장시험을 수행하고, 결과를 볼 압입시험 결과와 비교하였다. 볼 압입시험에는 0.5 mm 볼 압입자가

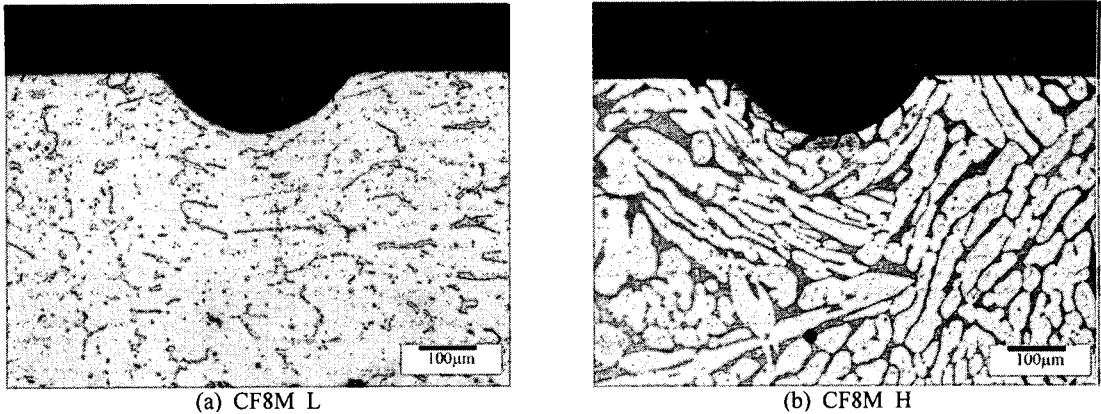


Fig. 5 Cross-section microscopes of unaged cast stainless steels after ball indentation test

사용되었으며, 0.3 mm/min의 속도로 가중과 해중을 15회 반복하며 변위제어 형태로 150 µm 깊이까지 볼을 압입하였다. 각각의 재료물성치는 각 면당 5~7 point에서 측정하여 경향에서 가장 크게 벗어나는 2 point의 데이터를 제외하고 평균값을 취하였다. 이러한 시험 조건은 선행 연구에서 수행된 주조 스테인리스강의 볼 압입시험 결과에 기초한 것으로, 2상 조직을 갖는 주조 스테인리스강에 대한 신뢰성 있는 볼 압입시험 결과를 주는 것으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾

3. 실험 결과 및 토의

3.1 볼 압입시험 데이터의 분산 평가

열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험의 재연성을 확인하기 위해서, 시편의 각 면에서 측정된 재료의 항복강도, 인장강도, 강도계수, 그리고 가공경화지수에 대한 데이터의 분산 정도를 분석하였다. Fig. 4는 각 면에서 측정된 재료물성치의 표준편차를 평균값으로 무차원화하여 정량화한 값을 열화 전 재료의 데이터와 함께 δ -페라이트 함량에 따라 나타낸 것이다. 열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 데이터의 표준편차에 대한 평균의 비는 δ -페라이트 함량에 따라 차이가 있으나, 항복강도가 3.5%, 인장강도가 2.5%, 그리고 강도계수와 가공경화지수가 각각 3.5%와 4.0% 이하의 평균값을 보였다. 건전 주조 스테인리스강의 경우와 비교할 때, 이 정도의 데이터 분산은 가공경화지수를 제외하면 모든 인

장물성치에서 열화 전 재료와 비슷한 수준인 것을 알 수 있다. 또한, 열화 재료에 대한 인장시험 데이터의 분산과 비교해도 강도계수를 제외하면 볼 압입시험 데이터의 분산은 인장시험 데이터의 분산과 거의 유사한 수준이다. 따라서, 열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험의 재연성은 만족할 수준인 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 4에서 δ -페라이트 함량이 증가됨에 따라 전반적으로 데이터의 분산이 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향은 열화 전 재료에 비해 열화 재료에서 더욱 뚜렷하였다. δ -페라이트 함량의 감소에 따른 데이터 분산의 증가는 선행연구에서 분석된 바와 같이 δ -페라이트 함량에 따른 페라이트 상의 분포와 연관되는 것으로 판단된다.⁽¹¹⁾ 즉, δ -페라이트 함량이 낮은 경우에는 오스테나이트 기지 속에 페라이트가 독립적으로 분산되어 있기 때문에 볼이 압입되는 위치에 따라 볼 하부의 응력과 변형률이 불균일하게 발생할 수 있다. 반면, δ -페라이트의 함량이 높은 경우에는 페라이트 사이의 간격이 작고 서로 연결되어 있기 때문에 볼 압입에 따른 볼 하부의 응력과 변형률 분포가 비교적 균일하여 압입 위치에 따른 데이터의 편차가 감소하는 것이다. 따라서 열화된 재료의 경우에는 열화에 의해 δ -페라이트의 강도가 증가하고, 오스테나이트 기지의 강도 차이가 커지기 때문에 이러한 현상이 더욱 크게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 5는 열화 전 재료에 대한 볼 하부 단면의 변형 상태를 나타낸 것으로 δ -페라이트 함량에 따른 볼 하부의 미세조직적 차이를 잘 보여주고 있다.

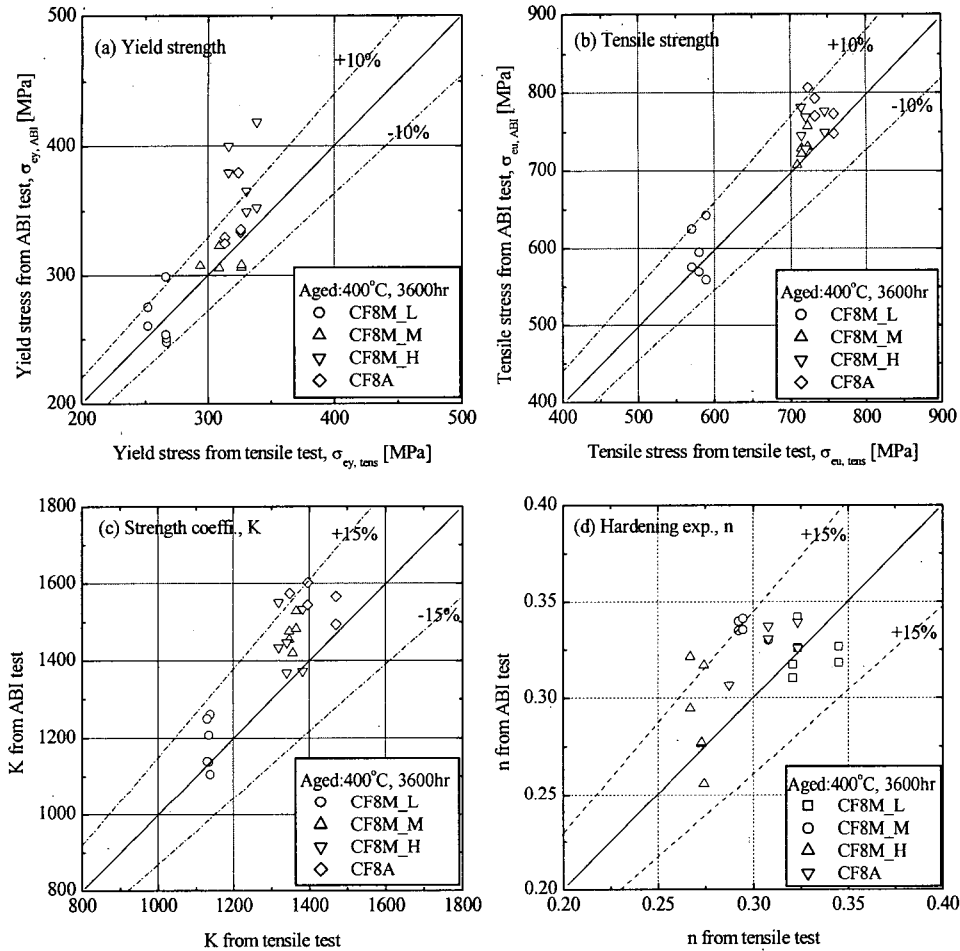


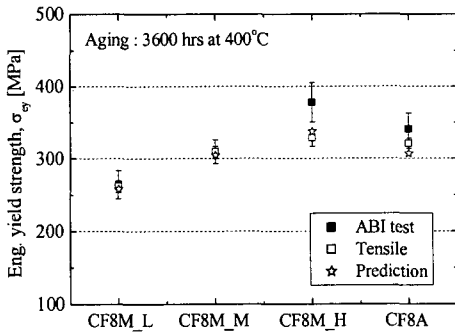
Fig. 6 Comparisons of tensile properties of aged CSS obtained from ABI test and tensile test

3.2 불 압입시험 데이터의 정확성 평가

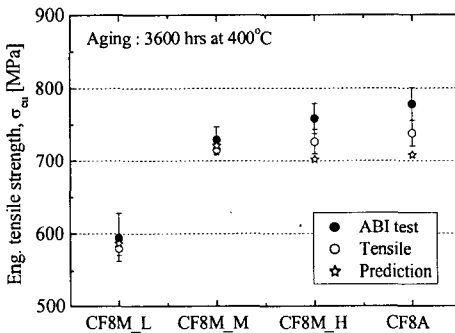
불 압입시험 결과의 정확성을 평가하기 위해서, 각 시편에서 불 압입시험을 통해 측정된 항복강도, 인장강도, 강도계수, 그리고 가공경화지수를 각 시편의 인장시험 결과와 비교하였다. Fig. 6은 각 시편에서 측정된 인장물성치를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 알 수 있는 것과 같이 항복응력은 CF8M_H를 제외하면 모든 재료에서 불 압입시험이 ±10%의 오차 범위에서 인장시험 결과를 예측하고 있으며, 평균 오차는 1~2% 정도인 것을 알 수 있다. CF8M_H의 경우에는 모든 시험에서 항복강도를 과대평가하였으며, 15%를 초과하는 데이터도 존재했다. 인장강도는 모든 재료에서 불 압입시험이 ±10%의 오차 범위에서 인장시험의 인장강도를 예측하고 있으

며, 평균 4%정도 인장강도를 과대평가하는 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 한편, 강도계수와 가공경화지수는 Figs. 6(c)와 (d)에 나타난 것과 같이 항복강도와 인장강도에 비해 데이터의 편차가 다소 크게 관찰되었으나, 대부분의 데이터가 ±15%의 오차 범위에서 인장시험 결과를 예측하였으며, 항복강도나 인장강도의 경우와 유사하게 인장시험 결과를 과대평가하는 경향을 보였다.

이들 결과로부터 10 ~ 27% 정도의 δ-페라이트 함량을 갖는 열화 주조 스테인리스강에 대한 불 압입시험은 평균 ±10% 이내의 오차 범위에서 항복강도와 인장강도를 측정할 수 있으며, 강도계수와 가공경화지수 역시 ±15%이내에서 예측이 가능한 것을 알 수 있다. 다만, CF8M_H에서 항복강도의 오차가 다른 재료에 비해 크게 나타나



(a) Yield strength



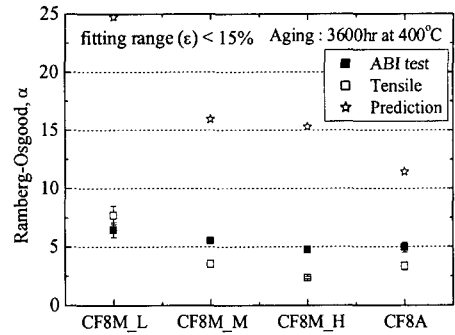
(b) Tensile strength

Fig. 7 Comparisons of yield and tensile stresses of aged CSS obtained from ABI test and prediction

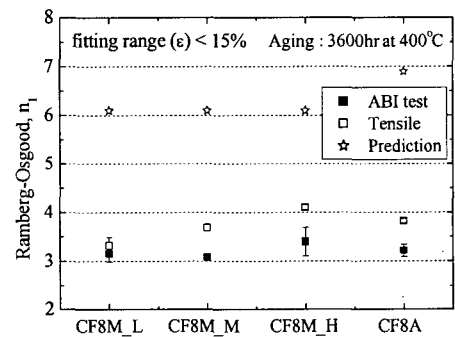
고 있는데, 이것은 시험상의 오류로 인해 인장시험에서 항복강도가 낮게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다. 왜냐하면, CF8M_H의 인장시험 결과가 열화 전에 동일한 재료에서 측정된 항복강도보다 낮거나 유사한 결과를 보였기 때문이다. 이것은 구조 스테인리스강이 열화에 의해 항복강도가 증가되는 일반적인 경향과 일치하지 않으며,⁽²⁻⁴⁾ 동일한 재료에서 열화에 의해 인장강도가 증가한 결과와도 일치하지 않는 것이다.

3.3 불 압입시험의 적용 타당성 분석

불 압입시험의 적용에 대한 가능성을 살펴보기 위해서, 각 재료 별로 불 압입시험 결과와 기존의 평가식에 의한 예측 결과를 인장시험 결과와 비교하였다. 평가식에 의한 열화 구조 스테인리스강의 인장물성치 예측은 데이터베이스에 기초한 것으로, 열화 전 재료의 항복강도, 인장강도, 그리고 화학조성을 바탕으로 열화 재료의 항복강



(a) Parameter, α_1



(b) Parameter, n_1

Fig. 8 Comparisons of Ramberg-Osgood parameters of aged CSS obtained from ABI test and prediction

도, 인장강도, 그리고 식 (4)로 주어지는 Ramberg-Osgood식의 α_1 과 n_1 을 예측하는 것이다.^(3,4)

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n_1} \quad (4)$$

Fig. 7은 불 압입시험을 통해 측정된 열화 재료의 항복강도 및 인장강도와 평가식에 의한 예측 결과를 인장시험 결과와 함께 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 알 수 있는 것과 같이 모든 재료에서 불 압입시험을 통해 측정된 항복강도는 인장시험 결과보다 약간씩 큰 값을 보인 반면, 평가식에 의한 예측 결과는 CF8M_H를 제외하면 모든 재료에서 인장시험 결과보다 약간씩 작은 값을 보였다. 그러나, CF8M_H를 제외하면 인장시험 결과를 기준으로 불 압입시험 결과와 평가식에 의한 예측 결과의 절대 오차는 유사하였다. 인장강도의 경우 (Fig. 7(b)), CF8M_L과 CF8M_M은 불 압입시험 결과와 평가식에 의한 결과 모두

인장시험 결과를 약간씩 과대평가하였으며, 볼 압입시험 결과가 평가식에 의한 예측 결과보다 조금 높게 나타났다. δ -페라이트 함량이 높은 CF8M_H와 CF8A의 경우에는 두 방법 모두 인장시험 결과와의 오차가 증가하였으며, 볼 압입시험 결과는 인장시험보다 큰 값을 보인 반면 평가식에 의한 예측 결과는 인장시험보다 작은 값을 보였다. 그러나, 두 방법 모두 인장시험 결과와의 절대 오차는 유사한 것으로 나타났다.

한편, 탄소성 균열해석에서 중요한 입력 자료인 α_1 과 n_1 인자는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 전체적으로 볼 압입시험 결과가 평가식의 결과에 비해 인장시험 결과를 정확히 예측하였다. 평가식에 의해 예측된 α_1 과 n_1 은 모두 인장시험 결과보다 상당히 큰 값을 보였으며, 볼 압입시험의 α_1 은 인장시험 결과보다 조금 크고 n_1 은 조금 낮은 값을 보였다.

따라서, 볼 압입시험은 평가식에 의한 예측 결과와 비슷한 정도의 오차를 가지고 열화 주조 스테인리스강의 항복강도와 인장강도를 평가하며, 평가식에 의한 예측 방법보다 상대적으로 정확하게 열화 주조 스테인리스강의 Ramberg-Osgood 인자 α_1 과 n_1 을 제공하는 것으로 파악되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 400°C에서 3600 시간 가속 열화된 4 종류의 주조 스테인리스강을 이용하여 볼 압입시험과 인장시험을 수행하고, 이들 결과로부터 볼 압입시험의 재연성과 결과의 신뢰성을 분석하였다. 또한, 결과를 평가식에 의해 예측된 열화 주조 스테인리스강의 기계적물성치와 비교함으로써, 볼 압입시험 결과의 활용 가능성을 살펴 보았다. 이를 바탕으로 다음의 결론을 얻었다.

(1) 열화 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 데이터는 건전 주조 스테인리스강에 대한 볼 압입시험 데이터 및 인장시험 결과와 비교하여 비슷한 수준의 데이터 분산을 보였으며, 재료의 δ -페라이트 함량이 낮을수록 데이터의 분산이 증가하는 경향을 보였다.

(2) 볼 압입시험 결과를 인장시험 결과와 비교한 결과, 볼 압입시험은 열화 주조 스테인리스강의 항복강도와 인장강도를 $\pm 10\%$, 강도계수와 가공경화지수를 $\pm 15\%$ 의 오차 범위에서 예측하였으

며, 전체적으로 인장시험 결과를 조금씩 과대평가하였다.

(3) 볼 압입시험을 통해 측정된 열화 주조 스테인리스강의 항복강도와 인장강도는 평가식에 의해 예측된 결과와 유사한 정도의 오차를 보였으며, Ramberg-Osgood식의 α_1 과 n_1 에 대해서는 평가식에 의해 예측보다 정확한 결과를 보였다.

참고문헌

- (1) Peckner, D. and Bernstein, I. M., 1987, Handbook of Stainless Steels, McGraw-Hill Book Company, New York
- (2) Shah, V.N. and Macdonald, P.E., 1993, Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components, Elsevier Science Pub., Amsterdam
- (3) Electric Power Research Institute, 1998, "Generic Licence Renewal Technical Issues Summary," *EPRU TR-107521*
- (4) Chopra, O.K. and Shack, W.J., 1994, Assessment of Thermal Embrittlement of Cast Stainless Steel, *NUREG/CR-6177, ANL-94/2*
- (5) Goto, T., Naito, T. and Yamaoka, T., 1998, "A study on NDE Method of Thermal Aging of Cast Duplex Stainless Steels," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 182, pp. 181~192.
- (6) Cheon, J.S. and Kim, I.S., 2000, "Evaluation of thermal aging embrittlement in CF8 duplex stainless steel by samll punch test," *J. Nucl. Mater.*, Vol. 278, pp. 96~103.
- (7) Jang, J.I., Choi, Y., Son, D.I., Lee, Y.H., Kwon, D., Kim, J.T., 2002, "Determination of New Parameter for Materials Degradation Using Continuous Indentation Testing Technique," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 26, No. 5, pp. 881~889.
- (8) Haggag, F.M., 2001, "In-situ Nondestructive Measurements of Key Mechanical Properties of Oil and Gas Pipelines," Residual Stress Measurement and General Nondestructive Evaluation, *ASME PVP-429*, pp. 99~104.
- (9) Murty, K.L., Miraglia, P.Q., Mathew, M.D., Shah, V.N. and Haggag, F.M., 1999, "Characterization of Gradients in Mechanical Properties of SA-533B Steel Welds Using Ball

- indentation," *Int. J. of Pres. Ves. & piping*, Vol. 76, pp. 361~369.
- (10) Byun, T.S., Kim, J.W. and Hong, J. H., 1998, "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.*, Vol. 252, pp. 187~196.
- (11) Kim, J.W., 2004, "Evaluation of Tensile Properties of Cast Stainless Steel Using Ball Indentation Test," *J. Kor. Nucl. Soc.*, Vol. 36, No. 2, pp. 237~247.
- (12) Ahn, J.H. and Kwon, D., 2000, "Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 38, pp. 1606~1611.