

개량 9Cr-Mo 마르텐사이트강의 중성자 조사에 따른 인장특성 변화

김성호, 송병준, 류우석
 한국원자력연구소, 원자력재료기술개발부, shkim7@kaeri.re.kr

1. 서론

차세대 원자로인 고온가스냉각로, 액체금속로, 초임계경수로, 핵융합로 등의 원자로용기, 핵연료 피복관 또는 전열관의 후보재료로 각광을 받고 있는[1,2] 고 Cr 페라이트/마르텐사이트강은 조사를 받은 경우 재료의 경화로 인한 취성이 나타나는 것으로 보고되고 있어[3,4], 재료의 개발 단계에서 조사경화 특성 자료를 생산하고 분석하는 연구가 절대적으로 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 차세대 원자로에서 가장 많은 부품의 후보재료로 거론되고 있는 고 Cr 페라이트/마르텐사이트 계열의 강 중에서 개량 9Cr-Mo 강에 대해 하나로에서 조사시험(00M-03K 캡슐)을 수행한 후에 인장특성 변화를 측정하여 조사에 따른 경화 정도를 평가하였다.

2. 시험 방법 및 결과

2.1 시험 방법

조사시험은 하나로 IR2 시험공에서 24MW 출력으로 11일간 실시하였다. 조사시험 조건은 조사온도가 320°C 였으며, 조사량은 0.53×10^{20} n/cm² (E>1.0 MeV) 또는 1.1×10^{20} n/cm² (E>0.1 MeV)이었다. 중성자 조사는 개량 9Cr-Mo 강(M)과 고 Cr 페라이트/마르텐사이트강의 크리프 파단강도를 향상시키는 것으로 알려진 소량의 질소를 첨가시킨 개량 9Cr-MoN 강(N)의 두 가지 시편에 대해 수행하여 질소 첨가가 조사특성에 어떠한 영향을 미치는지도 평가하였다. 그리고 각각의 조사시편에 대해 조사후 고온인장시험을 수행하였다. 고온인장시험은 조사재시험시설의 핫셀 내에서 상온부터 600°C 까지의 온도영역에서 2×10^{-3} /sec의 변형속도로 수행하였다.

2.2 강도 특성 변화

그림 1은 개량 9Cr-Mo 강(M)에 대한 항복강도 및 인장강도 변화를 비조사재와 인장시험 온도 별로 비교하여 나타낸 것이다. 중성자 조사에 의해 강도의 증가가 나타나고 있는데, 특히 항복강도의 증가가 더 크게 나타나고 있었다. 인장시험 온도가 증가하면

조사에 의한 강도의 증가 효과가 점차 감소하고 있음을 볼 수 있으며, 시험온도가 500°C 이상이 되면 조사에 의한 강도증가 효과가 거의 사라지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 열활성화에 따른 조사결함의 회복에 기인하는 것이다. 즉 조사 후에 온도를 상승시키면 조사에 의해 생성된 격자간 원자와 원자공공들이 열활성화에 의해 불안정하게 되고, 이동하여 서로 결합 함으로써 결함들이 소멸되어 조사하기 전의 상태로 회복되기 때문이다.

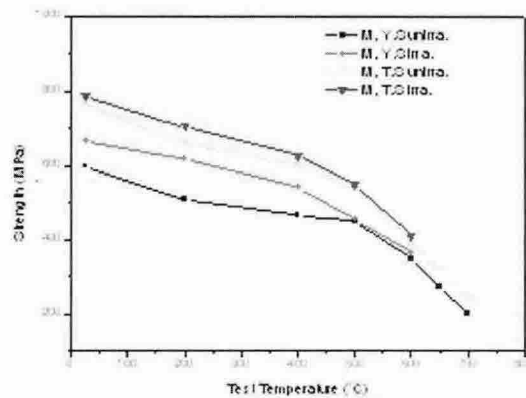


그림 1 개량 9Cr-Mo 강의 조사후 강도 변화

그림 2에 나타난 개량 9Cr-MoN 강에 대한 인장시험 결과도 개량 9Cr-Mo 강과 유사한 경향을 보이고 있어, 조사에 의해 인장강도 보다는 항복강도의 증가가 뚜렷한 것을 알 수 있었다. 그러나 질소 첨가에 의해 강도가 향상된 개량 9Cr-MoN 강에서는 인장시험 온도가 600°C 가 되어도 항복강도의 감소가 크게 일어나지 않아 비조사재에 비해 높은 항복강도를 유지하고 있었다.

2.3 연신율 변화

그림 3에는 인장시험 온도에 따른 연신율의 변화를 나타낸 것으로 두 재료 모두 중성자 조사에 의해 연신율이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 인장시험 온도가 증가하여도 강도에서와는 달리 비조사재와의 연신율 차이가 크게 줄어들지 않고 있었다. 이상의 결과를 정리하면 항복강도의 증가는 두 재료에서 최대

20% 정도 되었으나, 인장시험 온도가 500°C 이상으로 높아짐에 따라 점차 증가가 둔화되는 것을 알 수 있었으며, 인장강도는 두 재료 모두에서 10% 미만으로 인장강도 보다는 항복강도의 증가가 큰 것을 알 수 있었다. 반면에 연신율은 중성자 조사에 따라 감소하고 있었는데, 연신율의 감소는 50% 정도로 매우 높았다. 그리고 두 재료를 비교하면 질소가 첨가되어 항복강도와 인장강도가 높은 개량 9Cr-MoN 강에서 중성자 조사에 따른 항복강도와 인장강도의 증가가 더 크게 나타나고 있었으며, 연신율의 감소도 질소 첨가강에서 더 크게 나타나고 있었다.

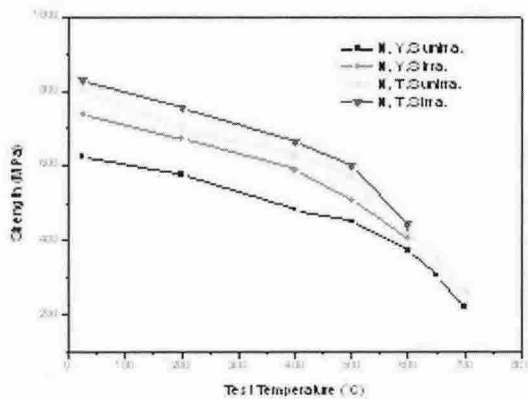


그림 2 개량 9Cr-MoN 강의 조사후 강도 변화

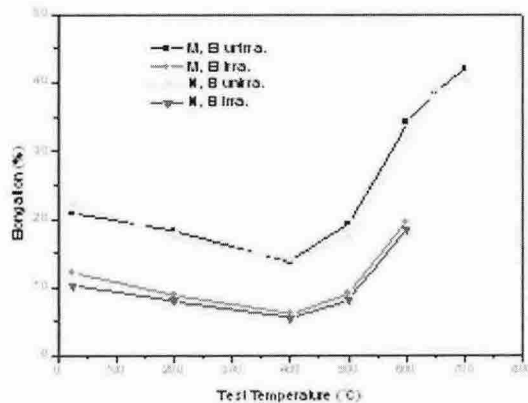


그림 3 고 Cr-Mo 강의 조사에 따른 연신율 변화

한편 고 Cr 강과 316 스테인레스강의 경우 [5]를 비교해 보면 스테인레스강에서 항복강도 증가는 상온에서는 약 60% 정도이고, 인장강도의 증가는 상온에서 약 11% 정도로 나타났고, 연신율은 약 33% 정도 감소하고 있었다. 인장강도의 변화율은 두 재료에서 비슷하였으나, 항복강도의 변화는 고 Cr 강에

비해 스테인레스강에서 크게 나타났으나, 연신율의 변화는 고 Cr 강에서 더 높게 나타나고 있었다. 즉 고 Cr 강은 스테인레스강에 비해 중성자 조사에 따른 경화 정도는 작으나, 취성이 나타날 가능성이 높은 것으로 나타났다.

3. 결론

하나로에서 24MW 출력으로 320°C 에서 11 일간 조사시켜 중성자를 약 $0.53 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1.0 \text{ MeV}$) 조사시킨 고 Cr 페라이트/마르텐사이트강의 고온 인장시험을 수행하여 다음의 기초자료를 얻었다. 조사시험 결과, 중성자 조사재료에서 전형적으로 나타나는 조사경화와 연성저하의 거동을 보였으며, 특히 인장강도의 증가는 수% 정도에 불과 하였으나, 항복강도는 최대로 20% 이상 크게 증가되었다. 그러나 시험온도가 높아질수록 재료의 회복이 일어나 조사에 의한 경화는 점차 감소되고 있었다. 연신율은 시험온도에 관계없이 약 50% 정도 감소하고 있었다. 그리고 질소가 첨가된 강에서 중성자 조사에 따른 항복강도와 인장강도의 증가와 연신율의 감소가 더 크게 나타나고 있었다.

고 Cr 페라이트/마르텐사이트강을 차세대 원자로의 구조재료에 적용하기 위해서는 조사에 따른 취화를 최소화할 수 있는 재료개발이나 제조공정 개발 방안이 모색되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] S. N. Rosenwasser, P. Miller, J. A. Dalessandro, J. M. Rawls, W. E. Toffolo and W. Chen, The Application of Martensitic Stainless Steels in Long Lifetime Fusion First Wall/Blankets, *J. Nucl. Mater.*, Vol.85-86, p. 177, 1979.
- [2] D. R. Harris, Ferritic/Martensitic Steels for Use Near-term and Commercial Fusion Reactors, Proceedings of Topical Conference on Ferritic Alloys for Use in Nuclear Energy Technologies, June 19-23, 1983, Snowbird, Utah
- [3] G. E. Lucas and D. S. Gelles, The Influence of Irradiation on Fracture and Impact Properties of Fusion Reactor Materials, *J. Nucl. Mater.*, Vol.155-157, p. 164, 1988
- [4] R. L. Klueh and D. J. Alexander, Effects of Radiation on Materials, 15th Inter. Symp., ASTM STP 1125, pp.1256, 1992
- [5] 류우석, 김우곤, 김대환, 안상복, 주기남, 하나로 workshop 2003, 대전, 2003