

조사경화에 미치는 He이온 조사와 중성자 조사의 상관성

이기순, 박대규, 백상열, 안상복, 주용선, 김기홍

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵융합로 제1벽이 사용수명 동안에 받는 조사량은 300 dpa 이상인데, 연구용 원자로에서 이와같은 조사량으로 조사시키기 위해서는 상당히 장기간이 요구된다. 그러므로 핵융합로 제1벽 재료의 연구에서는 중성자 조사 대신에 단시간에 높은 조사량으로 조사시킬 수 있는 싸이클로트론 등 입자가속기를 이용한 이온조사 시험이 활용되고 있다. 따라서 조사 손상에 미치는 이온조사와 중성자조사의 상관성은 대단히 중요하므로 본 연구에서는 이의 상관성에 대해 검토 분석하였는데, 이온조사시 경화가 일정하게 일어나는 plateau 영역에서는 중성자 조사와 선형 관계가 있으나 경화가 크게 일어나는 peak 영역에서는 중성자 조사에 비해 경화가 크게 일어났다.

1. 서 론

핵융합로의 제1벽은 사용 수명 동안에 300 dpa 이상의 중성자 조사량에 피폭될 것으로 예측되고 있는데, 연구용 원자로에서 이와 같은 조사량으로 조사하기 위해서는 중성자 속(flux)이 높은 고성능 연구용 원자로를 이용해도 수 십년이 소요된다¹⁾. 따라서 연구용 원자로에서 이와 같은 조사량으로 조사시키는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 핵융합로의 노심 재료와 같이 사용 수명중에 조사손상을 크게 받는 경우에는, Van de Graaff 또는 사이클로트론 등과 같은 입자 가속기를 이용한 이온 조사 방법이 광범위하게 활용되고 있다. 이온 조사는 원자로와는 달리 손상 밀도가 높아서 단시간에 다량의 조사손상을 생성시킬 수 있으므로 (낮은 에너지를 갖는 중이온의 경우에는 단시간에 수십 dpa로 조사시킬 수 있음) 경제적인 연구를 할 수 있는 이점이 있다. 그러나 이온 조사에도 원천적인 문제점이 있는데 조사손상 영역이 마이크론 정도로 좁아 미소경도 측정을 제외한 기계적인 특성 시험이 어려우며, 기계적 성질에 미치는 이온조사와 중성자조사의 상관성도 명확하지 않다. 따라서 이 연구에서는 이온조사와 중성자조사의 상관성에 대해 검토 분석하여 보았다.

2. 시험 방법

산소를 극력 제거시킨 몰리브덴과 몰리브덴 합금은 상용 몰리브덴 분말에 Sc를 탈산제로 첨가하여 아크 용해하는 방법²⁾으로 제조하였으며 단조와 압연을 통해 시편으로 가공한 후 잔류응력을 제거하기 위해 1100°C에서 어닐링 열처리를 하였다. 시편은 50 MeV의 He 이온으로 조사시켰는데, He

이온 빔의 전류량과 flux monitor로 시편과 함께 장전된 바나듐의 $^{54}\text{V}(n, \alpha)^{51}\text{Mn}$ 의 핵변환에 따라 나오는 감마선 강도의 등고선(contour)으로부터 구한 시편의 조사량은 각각 5×10^{20} , 9×10^{20} , 14×10^{20} , $18 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$ 이었으며 조사온도는 $\sim 100^\circ\text{C}$ 이었다. 조사에 따른 기계적 성질의 변화는 경도시험으로 조사하였는데, 조사손상 영역이 좁으므로 knoop 압자를 사용하였으며 시험하중은 10gf 이었다.

3. 결과 및 검토

Fig. 1은 100°C 에서 몰리브덴에 50MeV의 He 이온을 $5 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$ (plateau 영역 ~ 0.0025 dpa, peak 영역 ~ 0.09 dpa), $9 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$ (plateau 영역 ~ 0.0040 dpa, peak 영역 ~ 0.16 dpa), $14 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$ (plateau 영역 ~ 0.0063 dpa, peak 영역 ~ 0.25 dpa), $18 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$ (plateau 영역 ~ 0.0081 dpa, peak 영역 ~ 0.32 dpa)의 조사량으로 조사시킨 후 10gf의 하중으로 조사영역의 경도를 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 입사면에서부터 $\sim 300 \mu\text{m}$ 까지는 경도가 거의 일정하였으며 그 이상의 깊이에서부터 경도가 갑자기 증가하기 시작하여 $\sim 340 \mu\text{m}$ 의 깊이에서 경도의 최대치가 나타났다. 50MeV의 He 이온을 몰리브덴에 조사하는 경우에 도달거리(flying range)를 TRIM 및 E-DEP-81 Code로 계산한 바에 의하면 각각 $349 \mu\text{m}$ 및 $357 \mu\text{m}$ 이므로 code로 계산한 He 이온의 도달거리는 본 실험 결과와 대단히 잘 일치하고 있다. 조사경화가 거의 일정하게 일어나는 plateau 영역에서 조사량에 따른 경도의 증가분은 knoop 경도로 조사량이 $5 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$, $9 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$, $14 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$, $18 \times 10^{20} \text{ He}^{++}/\text{m}^2$ 일때 각각 13, 18, 24, 30 이었으며, 경도가 최대로 크게 일어나는

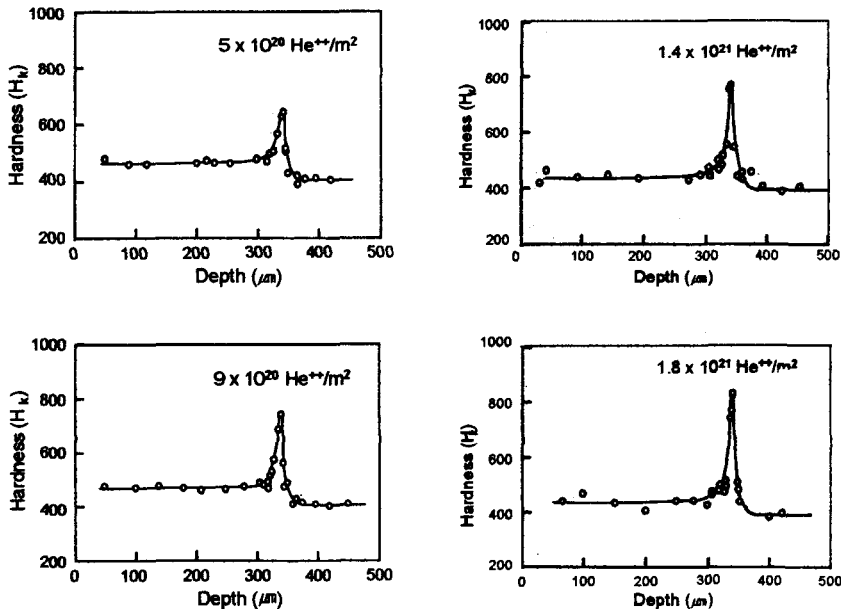


Fig. 1 Penetration depth dependence of hardening in molybdenum irradiated at 100°C with 50 MeV He ion.

dpa는 Mo 격자원자의 탈출문턱에너지를 60eV로 보고 계산하였음.

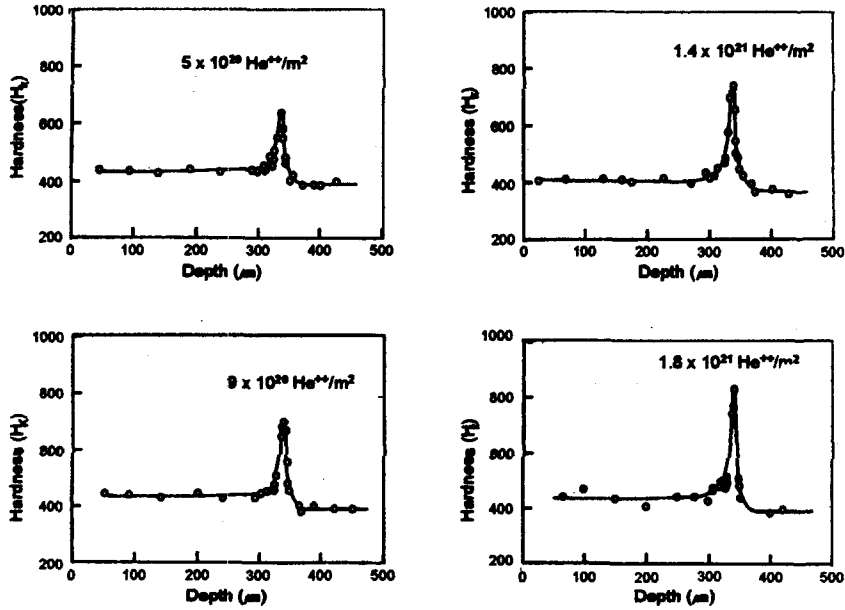


Fig. 2 Penetration depth dependence of hardening in Mo-0.5V alloy irradiated at 100°C with 50 MeV He ion.

peak 영역에서는 각각 220, 285, 380, 417 이었다.

Fig. 2는 폴리브덴에 합금원소로 바라듐을 0.5% 첨가한 Mo-0.5V 합금의 조사량에 따른 knoop 경도를 나타낸 것으로 조사량에 따른 정도의 증가는 조사량이 $5 \times 10^{20} \text{He}^{++}/\text{m}^2$, $9 \times 10^{20} \text{He}^{++}/\text{m}^2$, $14 \times 10^{20} \text{He}^{++}/\text{m}^2$, $18 \times 10^{20} \text{He}^{++}/\text{m}^2$ 일때 각각 10, 22, 29, 32 이었으며, peak 영역에서는 각각 211, 241, 343, 420 으로 폴리브덴의 경우와 큰 차이가 없다.

Fig. 3은 중성자 조사와 He 이온 조사의 상관성을 검토하기 위해 조사량의 단위로 fluence 대신에 dpa(displacement per atom)를 사용하여 조사에 따른 정도의 증가를 표시한 것이다. 조사에 따른 경도를 plateau 영역과 peak 영역으로 구분하여 표시하였는데, 중성자 조사시의 정도 증가와 비교하기 위해 300°C에서 $1.3 \times 10^{24} \text{n/cm}^2$ (~1.1 dpa)의 조사량으로 중성자를 조사시킨 후 측정된 정도값³⁾이 함께 표시되어 있다. 그림에서 보는바와 같이 중성자 조사시의 정도 증가분과 이온 조사시의 plateau 영역에서의 정도 증가는 조사량 dpa의 함수로 표시하면 선형비례의 관계가 있다. 그러나 이온조사시의 peak 영역에서의 정도 증가와 중성자 조사시의 정도 증가를 조사량의 함수로 보면 선형의 관계에 있지 않고 이온 조사의 경우가 조사량에 비해 정도의 증가가 아주 크게 나타났다.

금속 결정에 높은 에너지를 갖는 방사선 입자를 조사시키면 knock-on에 의해 다수의 격자원자가 격자 위치에서 쫓겨나가므로 점결함인 vacancy와 interstitialcy가 대량으로 생성된다. 이러한 점결함은 열 활성화에 의한 활발한 격자 진동으로 쉽게 이동하여 서로 만나게 되는데, 다른 종류의 점결함이 만나면 재결합하여 소멸하고 같은 종류의 점결함이 만나면 집합체를 형성하여 loop, 전위, void 등 결함 집합체를 형성하는데, 이들 결함은 전위 이동에 장애물로 작용하므로 금속을 경화시킨다. 중성자 조사시의 결함 생성과 이온조사시 plateau 영역에서의 결함의 생성은 둘다 입사입자와 격자원자의 충

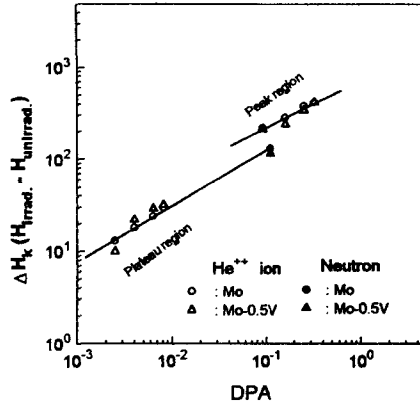


Fig. 3 Relationship between ion-irradiation and neutron-irradiation on radiation hardening in Mo and Mo-V alloy

들에 따른 캐스케이드 생성에 의한 점결함의 대량 생성으로 조사결함이 생성되므로 조사량 단위를 dpa로 표시하면 이온조사나 중성자 조사에 따른 조사손상은 그림 3에서 보는 바와 같이 조사량과 선형의 관계를 갖는다. 이에 반해 중성자 조사시의 결함 생성과 이온조사시 peak 영역에서의 결함 생성은 특히 입사입자가 질소나 헬륨과 같이 기체원소 이온인 경우에는 peak 영역에서 이들이 불순물인 기체 원자로 존재하면서 bubble을 형성하거나 또는 void의 생성을 촉진시키므로 조사량에 따른 결함계의 생성 형태와 수량에 차이가 있다. 그러므로 조사량을 dpa로 표시해도 이온조사가 중성자조사에 비해 경화에 더 크게 일어나게 된다고 생각된다.

4. 결 론

중성자 조사와 이온조사가 기계적 성질에 미치는 영향의 상관성을 검토하기 위해 불순물 산소를 극력으로 제거시킨 Mo 및 Mo-0.5V 합금을 50MeV의 He 이온으로 조사시험하여 그결과를 중성자 조사시험 결과와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이온 조사시의 plateau 영역에서의 경도 증가와 중성자 조사시의 경도 증가는 조사량을 dpa로 표시하면 선형비례의 관계가 있다.
- 2) 이온 조사시 peak 영역에서의 경도 증가와 중성자 조사시의 경도 증가는 조사량을 dpa로 표시해도 선형비례 관계에 있지않고 이온 조사의 경우가 더 크게 나타났다.
- 3) 따라서 He이온 조사로 중성자 조사시의 조사경화를 예측하려면 plateau 영역의 경도를 사용해야 한다.

참고문헌

- 1) 이기순, 조사공학, 문경출판사(1997), p223
- 2) K. S. Lee, *et. al.*, J. Less-com Metals, 25(1984), 401
- 3) K. S. Lee, 대한금속학회지, 23(1985), 691