

중성자 조사에 의한 원자로 압력용기강의 자기적 특성 변화

한국원자력연구소 송영열*, 박덕근, 홍준화

Change of Magnetic Properties in Reactor Pressure vessel Steel after Neutron Irradiation

Korea Atomic Energy Research and Institute Young-Yeal Song*, Duck-Gun Park, Jun-Hwa Hong

1. 서론

최근 자성 측정법에 의한 재료의 기계적 성질이나 미세구조를 비파괴적 방법으로 평가하고자 하는 많은 연구가 수행되고 있다. 이는 재료의 응력상태, 입자크기, 탄소함유량[1], 전위, 석출물의 크기 및 분포 등에 따른 Barkhausen noise(BN)나 보자력 같은 자성 변수들의 민감함에 기인한다. 이와 같은 배경에 의해 자성 측정법을 원자로압력용기강의 중성자 조사취화 평가에 응용하고자 하는 연구가 일부 수행되어왔다. 본 연구에서는 기존의 평가방법인 Barkhausen noise 및 M-H hysteresis 측정과 함께, 추가로 이제까지 거의 시도되지 않았던 ferromagnetic resonance(FMR)실험을 통해 중성자 조사전 후의 자기적 특성 변화를 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 시료는 SA 508 Cl. 3로 Table I에 나타내었다. 중성자 조사는 연구용 원자로에서 수행되었으며, 조사 온도는 288 °C, 조사량은 $4.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 1\text{MeV}$) 이었다.

Table I. Chemical composition of SA 508 Cl. 3 steel A, B, C, and D.

Sample I.D	C	Si	Ni	Mn	Cr	Mo	Cu	P	N	Al
A	0.18	0.08	0.77	1.40	0.15	0.53	0.06	0.005	0.004	<20ppm
B	0.17	0.10	0.82	1.35	0.16	0.50	0.03	0.006	55ppm	0.015
C	0.21	0.24	0.92	1.36	0.21	0.49	0.03	0.007	52ppm	0.022
D	0.19	0.20	0.82	1.44	0.15	0.55	0.03	0.006	89ppm	0.020

BN 측정시 외부자기장은 5Hz의 교류 자기장을 사용하였고, 필터의 주파수 밴드는9kHz-15.4 kHz를 사용하였다. 또한 M-H hysteresis 측정 시 0.1 Hz의 교류자기장을 사용하였으며, 이때 시편의 크기는 18×3×1mm의 막대형을 사용하였다. FMR 실험은 9.76 GHz에서 수행하였으며, 시편의 크기는 지름 3mm, 두께 100 μm의 필름 형태를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

BN 측정결과 중성자 조사전 후 신호의 변화를 관측하기가 어려웠으며, 이를 정량적으로 구체화하기 위해 한 주기 동안 얻어진 BN signal을 적분하여 BNE(Barkhausen noise energy)를 계산하였다. 그 결

과 A, B, C 및 D시편 모두에서 중성자 조사 후 미세한 증가를 나타내었다. 그림 1은 외부 교류자기장을 -0.6 - 0.6 kOe 까지 증가시키면서 측정한 M-H hysteresis의 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 중성자 조사 후 에러에 해당하는 정도로 미세하게 포화자화 값이 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 이러한 경향은 A, B 및 D에서도 같은 결과를 보여주고 있다.

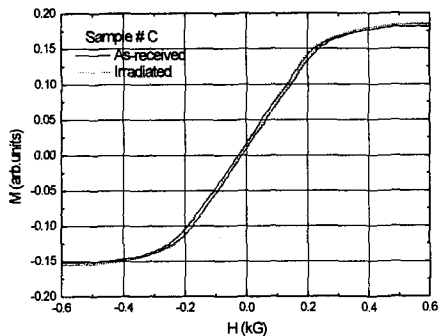


Fig. 1. Change of Hysteresis loops of C after irradiation.

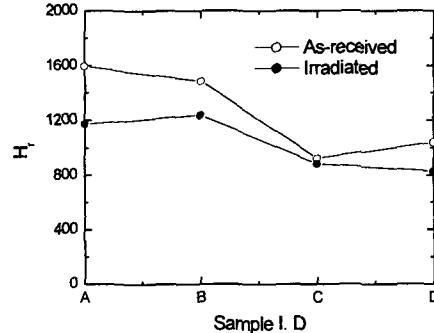


Fig. 2. Change of resonance field in all samples after irradiation.

포화자화 값의 증가를 확인하기 위하여 중성자 조사 전 후의 FMR 실험을 수행하였고, 조사 전 후 시료에 따른 공명자기장(H_r)의 변화를 그림 2에 나타내었다. 모든 시편에서 조사 후 H_r 이 감소하였으며,

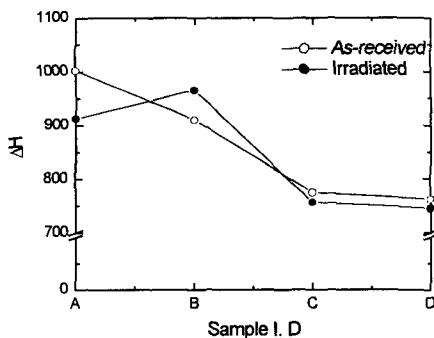


Fig. 3. Change of ferromagnetic resonance linewidth after irradiation.

이러한 결과는 포화자화 값이 철보다 작은 Fe_3C 와 같은 탄화물이 중성자 조사에 의해 Fe가 분리되어, 전체적으로 포화자화 값의 증가로 인해 시편의 유도 자기장이 증가했기 때문으로 볼 수 있다[2]. 또한 포화자화 값의 증가에 의해 유도자기장의 시간변화율인 dB/dt 도 증가하고 이로 인해 BNE도 증가한 것으로 사료된다[3]. 그림 3은 조사 전 후 각각의 시료에 대한 공명선폭(ΔH)의 변화를 나타내었다. 조사 전의 ΔH 는 A, B, C, D 순으로 감소하고 있음을 보여주고 있고, 이는 D로 갈수록 자기적으로 좀더 균일함을 알 수 있다. 중성자 조사 후 B시료를 제외한 각 시편의 경우 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 중성자 조사 후 자기적으로 좀더 균일한 상태로 변화한 것을 나타내고 있다.

4. 결론

288 °C에서 중성자 조사된 원자로 압력용기강의 BN 및 포화자화 값은 조사 전보다 오히려 증가하였으며, 이러한 결과는 강자성 공명선폭과 비교해 볼 때 시료 전체적으로 자기적 균일도가 증가함으로써 나타난 결과로 볼 수 있다. 또한 강자성 공명실험을 통해 시료의 자기적 균일 정도를 상호 비교해 볼 수 있었으며, 향후 기계적 성질과 관련하여 물질의 특성을 평가하는데 이용될 수 있을 것으로 본다.

5. 참고문헌

- [1] R. Ranjan, D. C. Jiles, P. K. Rastogi, IEEE Trans. Mag. **Mag-23**, 1869(1987)
- [2] O. Kohmoto, Jpn. J. Appl. Phys., **37**, 3965(1998)
- [3] J. Kameda and R. Ranjan, Acta Metall. **35**, 1515(1987)