

감마선 조사된 사용후핵연료 수송·저장 용기 소재의 물성 및 내식성에 관한 연구

Mechanical Properties and Corrosion Resistance for Transportable Storage Cask Material of Spent Nuclear Fuel Irradiated by Gamma Rays

이정환^a, 박종원^a, 박신화^a, 표주영^b, 박종혁^b
(재)포항산업과학연구원^a (e-mail: k-hwanglee@rist.re.kr), 포스코특수강^b

초 록: 본 연구는 사용후핵연료 수송·저장 용기인 저합금강(SA350 LF3)에 일정한 감마선을 조사하고 감마선 조사 전후 물성 및 내식 특성 변화와 표면처리에 의한 내식성 개선 효과에 관하여 연구하였다. 상온 항복강도 및 인장강도의 기계적 물성은 감마선 조사 여부에 따라 물성의 차이는 보이지 않았지만, 저온충격 특성은 감마선 조사를 하지 않은 충격 흡수 에너지에 비교하여 조사후 시험편의 충격 흡수 에너지가 감소되었다. 양분극 곡선에 측정에 의해 관찰된 저합금강의 내식성은 감마선 조사된 시험편에서 감마선을 조사하지 않은 시험편 보다 낮은 부식전위를 나타내었다.

1. 서론

원자력 발전 후 발생하는 사용후핵연료(SNF: Spent Nuclear Fuel)는 지속적으로 발생하는 열과 핵임계로부터 안전하게 관리하기 위해 일정기간 발전소내의 수조에 보관한다. SNF의 저장수조가 만조되는 경우는 저장용량이 여유가 있는 인접 저장수조로 이송하여 저장할 수 있지만, 국내의 원자력발전소 수조는 2018년부터 순차적으로 발전소의 수조 포화가 예상되고 있어 SNF의 중간저장 혹은 처분 관련 국산화 기술이 시급한 실정에 있다. 미국과 유럽의 일부 국가는 건식저장 방식에 의해 SNF를 중간저장하는 방식을 채용하여 운영 중에 있으며, 일본은 SNF를 재처리하기 전까지 건식 중간저장 방식을 채용하여 관리하는 정책이 결정되어 연구개발을 마치고 중간저장을 위해 중앙집중식 저장시설을 건설 중에 있다.

건식저장방식은 물 대신 불활성 기체 또는 공기를 냉각제로 이용하고, 방사선 차폐체로서 물 대신 콘크리트나 금속 및 고분자 수지를 이용한다는 점에서 습식저장방식과 구분되고 있다. 이러한 건식저장방식은 2차 방사성오염폐기물이 습식에 비교하여 상대적으로 적어 세계적으로 SNF 관리를 위해 채택이 증가하고 있다. 건식저장방식에는 볼트방식, 모듈방식, 콘크리트 용기 방식, 금속 용기 방식 등이 있다. 미국은 경제성을 고려하여 콘크리트 용기 방식을 채용하고 있으며, 프랑스, 독일, 스페인 등의 유럽국가와 일본은 안전성이 입증되고 장기 저장에 유리한 금속 용기 방식을 채용하고 있는 추세이다.

일본은 SNF를 저장하기 위한 금속 용기 수명을 50년으로 결정하고 기술 개발을 완료하였지만, 국내는 SNF 정책이 결정되지 않아 중간저장 기간이 길어질 것으로 판단된다. 미국은 초기 중간저장을 20년으로 결정하고 용기 인허가를 하였지만 처분 정책 결정의 지연에 따라 운영 중의 용기 인허가 연장을 위한 SNF 및 용기의 건전성에 대한 문제가 이슈화되어 다양한 연구를 진행 중에 있다. 이와 같이 SNF는 중간저장에 대한 요구가 장기화되고 있어, 장기 저장에 따른 용기 소재의 열화 및 부식에 대한 기초 및 대책 연구가 필요하게 되었다.

본 연구는 SNF 중간저장 용기 저합금강 소재(SA350 LF3)에 계산된 감마선을 조사하고, 감마선 조사 전후의 물성 및 내식성 변화와 표면처리에 의한 내식성에 대하여 연구하였다.

2. 본론

SNF의 중간 저장은 일정기간 동안 수조에 보관되어 방사선 발생량과 발열을 억제시킨 후에 중간 저장 용기에 담기는 것이 일반적이다. 그러나, SNF가 일정 기간 수조에서 보관된다고 할지라도 다량의 방사선과 열이 방출되고, 이 방사선과 열에 의해 용기 소재의 열화가 촉진되는 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 SNF 저장 용기 소재의 물리적 특성 열화는 일정 이상의 에너지 (> 0.5MeV)를 갖는 중성자에 의해 열화되는 것으로 알려져 있다. 이것은 중성자선이 정전기장의 영향을 받지 않는 대신에 금속의 원자핵과 충돌하여 에너지가 상쇄하기 때문이다. 반면, 감마선은 금속 소재의 물성 열화에 무시 가능하다는 것이 일반적이지만, 감마선은 광전효과에 의해 궤도 전자와 상호작용을 통해 에너지 전달이 이루어지기 때문에 금속 소재의 전기화학적 특성에 영향을 미칠 것으로 예측되었다.

1) 감마선 발생량 조사: 감마선은 4.5wt.%의 농축도와 45,000MWD/MUT의 연소도를 갖는 10년 냉각된 PWR 연료를 기준으로 하고, 핵분열 생성물에 의해 80% 이상 발생하는 것을 고려하여 계산하였다. 계산된 감마선은 1.936×10^5 Ci/unit 이었다.

2) 감마선 조사 시험: 감마선 조사시험은 0.5 MeV 이상의 에너지를 갖는 Flux의 총량을 계산하여 평균 1.25MeV (Co-60 Gamm-rays)의 감마선을 이용하여 Total Absorbed Dose 4.27×10^6 Gy (4.27×10^8 rad/hr)를 조사하였다. 이때의 Absorbed dose rate는 1.529×10^4 Gy/hr (1.529×10^6 rad/hr)로 279.32시간 동안 조사하였다.

3) 감마선 조사후 물성 평가 : 표1은 개발 중인 SA350 LF3 소재의 감마선 조사 전후의 인장시험 결과를 보인다. LF3-1 소재는 첨가 원소 중 알루미늄이 소량 첨가된 소재이고, LF3-2 소재는 알루미늄이 첨가되지 않은 소재이며, LF3-3은 LF3-2 소재 보다 탄소 성분을 감소시켜 제강된 소재이다. 항복강도, 인장강도, 연신율 등은 감마선 조사 전후 물성의 차이를 보이지 않았다. 표2는 LF3-3 소재의 감마선 조사 전후 저온충격 특성 결과를 보인다. 저온 충격 특성은 온도가 -20도에서 -101도까지 내려감에 따라 충격 흡수 에너지가 감소하는 경향을 나타내었으며, -120도의 저온 충격 흡수 에너지는 비유적

으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 감마선이 금속 소재의 물성에 영향을 준다는 일반적인 결과와는 상이한 결과를 나타내었다. 향후 감마선에 의한 금속 소재의 저온 물성 변화에 미치는 재현성 시험과 감마선에 의한 저온 물성 특성에 미치는 상세한 조사 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감마선조사 전					감마선조사 후				
시편명	단면적 (mm ²)	항복 강도 YS (N/mm ²)	인장 강도 TS (N/mm ²)	연신율 El (%)	시편명	단면적 (mm ²)	항복 강도 YS (N/mm ²)	인장 강도 TS (N/mm ²)	연신율 El (%)
LF3-1-1	121.93	465	585	30	AF-LF3-1-1	121.99	468	578	30
LF3-1-2	121.99	463	579	30	AF-LF3-1-2	122.13	460	576	30
LF3-1-3	122.13	497	595	29	AF-LF3-1-3	122.19	459	575	30
LF3-2-1	121.99	506	602	29	AF-LF3-2-1	121.21	493	592	30
LF3-2-2	121.99	473	582	31	AF-LF3-2-2	122.58	470	586	31
LF3-2-3	121.74	516	610	29	AF-LF3-2-3	121.99	473	581	30
LF3-3-1	122.27	442	556	30	AF-LF3-3-1	122.27	471	570	30
LF3-3-2	122.19	477	574	30	AF-LF3-3-2	122.27	482	576	30
LF3-3-3	122.19	471	571	30	AF-LF3-3-3	122.52	458	563	31

표 1 감마선 조사 전후 인장시험 결과

Notch	Temp.	Energy (Joule), 3ea 평균		감마선 조사에 의한 충격에너지 비율 증감
		감마선 조사 전	감마선 조사 후	
2V	-20	314	248	23.5% ↓
	-40	294	198	39.0% ↓
	-60	285	248	13.9% ↓
	-80	209	207	1.0% ↓
	-101	151	125	18.8% ↓
	-120	29	43	38.9% ↑

표 2 감마선 조사 전후 LF3-3 (C 0.08) 개발재의 충격에너지 결과

4) 감마선 조사 전후 전기화학적 특성: 그림 1은 감마선 조사 전후 SA350 LF3 개발 소재의 양분극 곡선 측정 결과를 보인다. 부식전위는 합금성분 변화에 따라 큰 차이점을 보이지 나타내지 않았으며, 동일 소재의 감마선 조사 전후 부식전위는 감마선 조사 후의 소재가 낮게 나타나는 동일한 결과를 보였다. 이것은 감마선 조사에 의해 소재의 내식 특성이 변화되는 것으로 사료되었다.

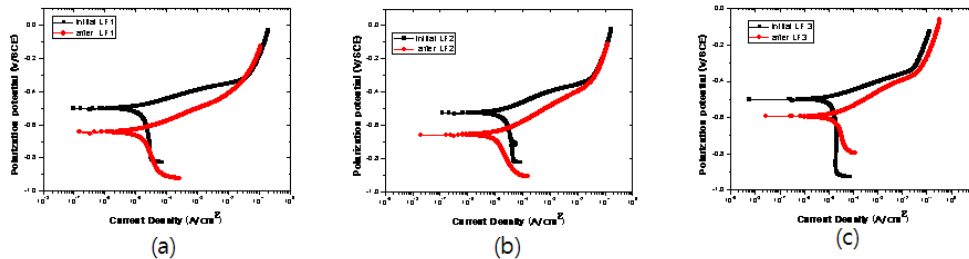


Fig. 1. 감마선 조사 전후 SA350 LF3 개발 중 소재의 양분극 곡선 (a) Al 첨가, (b) Al 미첨가, (c) c 0.08

3. 결론

저합금강(SA350 LF3)의 상온 항복강도 및 인장강도는 감마선 조사 여부에 따라 차이를 보이지 않았지만, 저온충격 특성은 감마선 조사를 하지 않은 시험편에 비교하여 조사후의 시험편에서 충격흡수에너지가 감소되었다. 또한, 양분극 곡선에 측정에 의해 관찰된 내식 특성은 감마선 조사된 시험편에서 조사하지 않은 시험편 보다 낮은 부식전위를 나타내었다.

감사의글

본 연구는 "산업통상자원부", "한국산업기술진흥원", "동남지역사업평가원"의 "광역경제권 선도산업 육성사업"으로 수행된 연구결과입니다.