

삼중층 모델을 이용한 HTGR 핵연료 입자 코팅 층의 특성평가

이현근, 김종호, 김도경
한국과학기술원 신소재공학과
대전광역시 유성구 구성동 373-1

차세대 원자력 에너지 원으로 각광받고 있는 HTGR 에 사용되는 핵연료 피복입자 (TRISO)에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. TRISO 입자는 내부의 핵연료에 열분해 탄소 층과 SiC 또는 ZrC 층, 그리고 다시 열분해 탄소 층을 가지고 있는 층상구조로 이루어져 있다. SiC 층이 열분해 탄소 층보다 높은 탄성률을 가지고 있으며 전체구조를 지지하는 역할을 담당한다. 현재 TRISO 입자에서의 피복입자 코팅의 손상에 관한 여러 가지 모델이 제시되어 있다. 그 중에서 내부 압력 증가에 의한 코팅 층에 인장 응력 생성에 의한 파괴 모델이 실제 파괴 양상에 부합하는 것으로 고려되고 있으며, 실제로 FEM 계산 결과 내부에 TRISO 입자 내부에 압력이 발생하는 경우 SiC 층 내부에 인장 압력이 집중되는 것을 확인할 수 있다.

층상 재료의 강도를 측정하는 기법에 대한 연구가 지난 10 년간 활발히 이루어지고 있으며, 특히 세라믹 인공 치아 재료의 이중 층 구조에서 방사형 균열 발생을 통한 층상 재료의 신뢰성 평가 기법에 대한 이론이 확립되었다. 지지 층과 코팅 층으로 이루어진 이중 층 구조에서 구를 이용하여 인덴테이션 하는 경우, 코팅 층의 아래 부분에 인장 응력이 집중되고, 방사형 균열이 발생하게 된다. 이 임계 하중은 간단한 식 $P_R = B \sigma d^2 / \log (E_c / E_s)$ 에 의해서 간단히 예측될 수 있으며, 이 관계식을 바탕으로 변형된 식 $\sigma = P_R \log (E_c / E_s) / B d^2$ 을 이용하면 코팅 층의 강도를 평가할 수 있다. 그러나 이중 층 식은 코팅 층의 두께가 감소할 경우 경향이 정확하게 예측되지 않으므로 TRISO 입자의 SiC 층 강도 특성에 직접 적용하기에는 적당하지 않다. 이를 수정 보완하기 위한 삼중 층의 구조에서는 관계식이 명확히 제시되지 않았으며, 선행 연구자의 결과에서 신뢰할 만한 강도 평가식도 도출되지 않았다. 본 연구에서는 삼중 층의 구조를 이용하여 강도 평가 기법을 제안하고자 한다.

흑연/유리/폴리카보네이트 재료를 이용하여 삼중 층 모델 실험을 수행하였다. 전체적인 구조는 Fig. 1 (a)에 나타나 있으며, 인덴테이션 결과 이중 층에서와 마찬가지로 방사형 균열이 나타남을 확인할 수 있다. 모델 재료에서 중간층은 유리로 탄성률이 가장 높아 SiC 의 모델 재료이며, 위층은 흑연으로 탄성률이 10 GPa 근처이며 유리에 비해서 낮아 열분해 탄소의 모델 재료이다. 아래층은 폴리카보네이트

재료로 투명하여 균열 발생을 관찰할 수 있도록 하며 탄성률이 가장 낮아 버퍼 열분해 탄소 층을 대변한다. 두께의 범위가 실제 TRISO 구조 보다 다소 크지만 삼중 층 구조를 이용하는 경우가 이중 층 구조를 이용하는 경우에서 발생하는 문제점을 해결해줄 것으로 보이며, 방사형 균열의 형태로 보아 인장 응력에 의한 파괴로 보인다.

위와 같은 삼중 층 모델로 유리의 두께를 150 μm 로 고정하고 흑연의 두께를 350 μm 에서 1000 μm 까지 변화시키며 실험하였고, 흑연의 두께를 500 μm 로 고정하고 유리의 두께를 100 μm 에서 150 μm 까지 변화시키며 실험하였다. 이때 임계하중 값과 흑연과 유리의 두께에 대한 그래프를 Fig. 2 (a), (b)에 나타내었다.

흑연과 유리의 두께가 증가함에 따라 방사형 균열의 임계하중 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 삼중 층에서 임계하중 값과 강도와 의 관계를 도출하였다. 이중 층에서의 임계하중과 강도와 의 관계를 확장하였으며, 흑연과 유리 두 층을 E_c^* 의 탄성률을 가지며, 각 층의 두께인 d_o 와 d_i 를 더한 값인 전체 두께 d 를 갖는 단일 재료로 가정하고 식을 유도하였다. $E_c^* = f (E_o, E_i, d_i / d)$ 의 형태로 나타내어지며, 삼중 층 임계하중 관계식은 아래와 같다.

$$P = B \sigma d^2 / \log (E_c^* / E_s).$$

TRISO 입자와 동일한 구조인 흑연/SiC/폴리카보네이트 삼중 층에서의 실험 결과를 Fig. 2 (c) 에 나타내었다. SiC 층은 CVD 방법으로 증착되었으며, 20 μm 에서 60 μm 의 두께를 가지고 있다. 앞의 모델 실험과 같이 두께가 증가함에 따라 균열의 임계하중 값이 증가하였으며, 삼중 층 모델 재료에서 얻은 관계식으로 SiC 의 강도를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 흑연/유리/폴리카보네이트를 이용한 삼중 층의 모델 재료에서 방사형 균열 실험을 행하고 이를 바탕으로 삼중 층 임계하중 식을 도출하였으며, 이 모델 식을 이용하여 실제 피복코팅 입자 구조에 사용되는 SiC 흑연 층상 구조의 강도를 평가하였다.

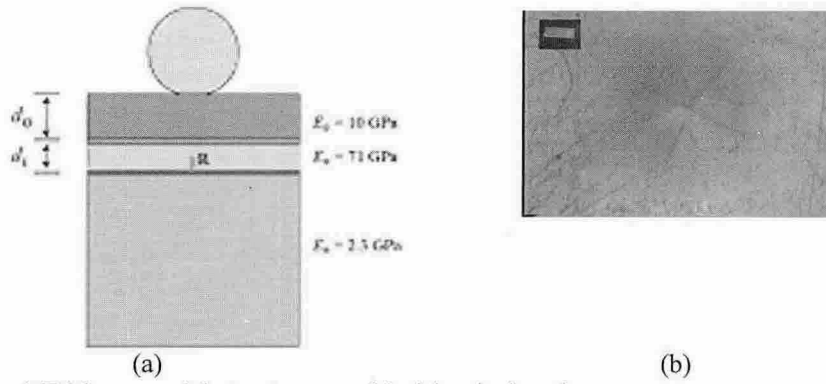


Fig. 1 Tri-layer model structure: graphite/glass/polycarbonate, (a) schematic drawing (b) Radial cracking from contact loading with WC sphere by *in situ* observation

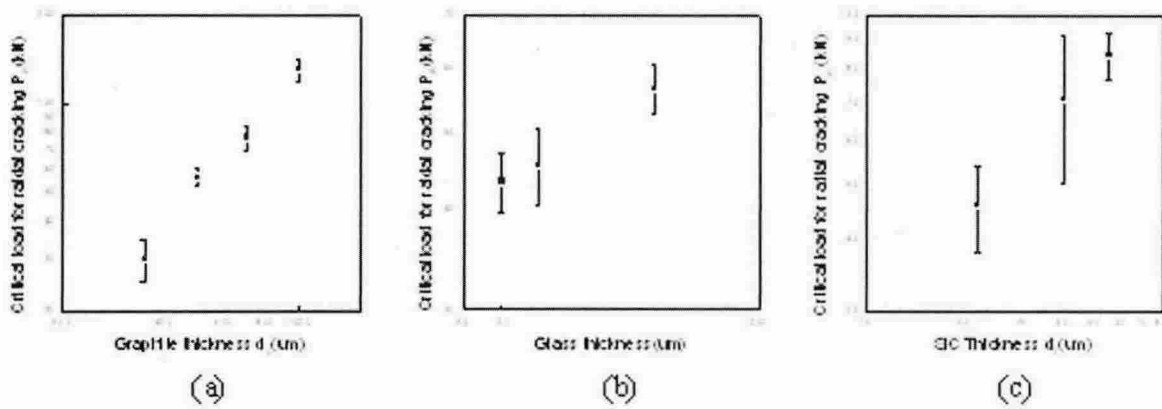


Fig. 2. Critical load for radial cracking as function of (a) graphite thickness (b) glass thickness in graphite/glass/polycarbonate, (c) SiC thickness in graphite/SiC/polycarbonate