

핵융합로용 초전도 전자석 구조재의 파괴역학적 특성에 관한 연구

김 지 현, 황 일 순

서울대학교 원자핵공학과

요 약 문

국제 열 핵융합로 (International Thermonuclear Experimental Reactor) 의 중앙 솔레노이드 (solenoid) 초전도 전자석의 피복관 (conduit) 으로서 가장 유력한 후보 재료인 니켈-철 기저 초합금에 대한 개선된 파괴역학적 거동 예측 모형을 개발하기 위하여 피로균열 성장과 파괴 인성치의 측정이 사용되었다. 유한 요소법을 사용하는 상용 구조해석 코드인 ANSYS 제 5.2판에 의해 초전도 전자석 피복관 재료에 대한 탄소성 파괴역학적 거동을 살펴보았다. 정확한 파괴 기준을 개발하기 위하여 삼차원 J 적분 인자에 의한 결과를 사용하였다. 얇은 피복관의 경우에 절대온도 4도에서의 적합한 파괴 인성치는 실제 단면효과를 고려한 표면균열 인장시험 결과를 토대로 J 적분으로 도출한 $150 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 제시되었다.

1. 서론

국제 열핵융합로의 초전도 전자석 구조재로서 유력한 후보재료인 Incoloy 908에 대한 파괴인성치는 지금까지는 선형탄성파괴역학을 적용한 $200 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 알려져 있다. 그러나, 이 재료에 대해 여러 탄성파괴역학적 인자들을 적용해 본 결과 선형탄성파괴역학은 정확한 파괴거동을 예측하기에는 부적합하다는 결론에 도달하여, 좀 더 실제적인 파괴거동을 예측하기 위한 인자가 필요하게 되었다. 본 연구에서는 Incoloy 908 재료에 대한 더 현실적인 파괴거동을 예측하기 위해 탄소성과 파괴역학적 변수인 J-적분치를 적용하고 실제거동을 모사하기 위해 3차원 유한요소법을 통하여 J-적분치를 계산하였다.

2. 유한요소해석 방법 및 결과

2. 1 이론적 배경

Rice[1]는 2차원 형상에서의 연성재료에 존재하는 균열선단의 응력장을 나타내는 매개변수로서, J-적분치를 다음과 같이 제안하였다.

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds) \quad (1)$$

where, Γ : 2차원 변위장과의 임의의 반시계방향 선적분경로

T_i : Γ 의 외향법선 응력벡터, u_i : 변위 벡터

ds : 적분경로를 따르는 미소길이, W : 변형에너지 밀도 = $\int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$

σ_{ij} : 응력 벡터, ϵ_{ij} : 변형 벡터

J-적분은 수학적으로 적분경로에 독립적인 성질을 가지며, 또한 탄성영역에서는 에너지방출률 G와 같다. 한편 J-적분은 균열진전에 따른 포텐셜에너지의 변화로 다음과 같이 표시된다.

$$J = - \left\langle \frac{\partial \Pi}{\partial A} \right\rangle \quad (2)$$

여기서, Π 는 포텐셜에너지를 나타낸다.

이상과 같은 2차원 균열형상에서와 마찬가지로, 3차원 J-적분 인자로서 $J(s)$ 는 비선형재료에서 균열선단을 따른 국부적인 응력과 변형장을 나타내기 위해 Atluri[2]에 의해 제안되었다. 이러한 $J(s)$ 의 실제적인 계산을 위해서 본 연구에서는 3차원 선로(contour) 방법을 사용하였다. 이러한 3차원 선로방법은 Atrujli 외[2], Carpenter 외[3], 그리고 Dodds[4] 외 등에 의해서 실제 적용되었다.

국부적인 에너지 방출률인 $J(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$J(s) \approx J_C + J_A \quad (3)$$

여기서, J_C 는 균열로부터 아주 멀리 떨어진 곳에서의 균열을 감싸는 경로에 대한 선적분값이고, J_A 는 그 경로에 의해 형성된 면적에 대한 면적분값이다. 선적분과 면적분은 다음과 같이 표현된다.

$$J_C = \int_{\Gamma} [W^{ep} n_1 - \sigma_{ij} n_i \frac{\partial u_j}{\partial x_1}] d\Gamma, \quad (4)$$

$$J_A = - \int_A [\frac{\partial W^p}{\partial x_1} - \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}^p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} (\sigma_{i3} \frac{\partial u_i}{\partial x_1})] dA \quad (5)$$

여기서, W 는 탄성과 소성변형과 관련된 변형에너지밀도를 나타낸다.

2. 2 J-적분치 계산을 위한 유한요소모형

Tobler[5]에 의한 잔류강도측정으로부터 J_{IC} 의 예측을 위하여 3차원 유한요소모형을 통하여 $J(s)$ 를 결정하였다. 여기서 얻어진 유한요소해석결과는 소규모 변형의 가정하에서 변위에 기초한 공식화를 사용하였기 때문에 균열선단을 따른 균열침단의 무더짐(blunting) 효과는 무시하였다. 본 유한요소해석에 사용된 표면균열 인장시험시편의 형태와 크기는 그림 1에 나타나있고, 이 시편의 대칭조건에 의해 가능한 1/4 유한요소모형은 그림 2에 나타나있다. 유한요소모형화와 계산은 공학용 워크스테이션에서 구조해석범용코드인 ANSYS 버전 5.2로 수행되었다. 반타원형 표면균열을 가진 유한요소모형을 만들기 위해서, 먼저 반원형의 표면균열을 가진 모형을 생성한 후 Raju와

Newman[6]에 의한 다음과 같은 타원형 변환식을 사용하여 반타원균열을 가진 모형을 생성하였다.

$$x' = x\sqrt{\left(1 + \frac{c^2 - a^2}{x^2 + z^2}\right)}, \quad y' = y, \quad z' = z \quad \text{for } \frac{a}{c} \leq 1$$

$$x' = x, \quad y' = y, \quad z' = z\sqrt{\left(1 + \frac{a^2 - c^2}{x^2 + z^2}\right)} \quad \text{for } \frac{a}{c} \geq 1 \quad (6)$$

여기서, (x, y, z)는 원형균열모형에서의 각 노드의 직교좌표계 좌표값이고, (x', y', z')는 표면균열모형에서의 같은 노드에서의 직교좌표계 좌표값이다. 위식은 원점에서는 성립하지 않으므로, 원형균열모형에서 원점부근에 a/1000 정도의 아주 작은 반지름을 가진 반원을 생성한 후 타원변환을 한다. 이러한 변환과정을 균열선단 주위에서 여러 요소들의 직교성을 인위적으로 만들어 주기 위함이다. 균열선단을 따른 유한요소들은 20 절점의 육면체 형태로 되어있고, 나머지 요소들은 8 절점의 육면체 요소들로 이루어져있다.

재료의 비선형적거동은 ANSYS내의 소성선택사항 중 다중선형 등방 경화(multilinear isotropic hardening) 방법을 사용하였다[7]. 이 방법은 Von Mises 항복면과 등방경화를 가지고 증분소성 이론에 의해 재료의 비선형적 거동을 나타내는 방법이다. 다중선형성을 위한 입력자료는 참고문헌 5에서 진응력-진변형곡선의 자료를 사용하였다.(그림 3) 모형의 대칭조건을 위해 X=0과 Y=0의 표면에 변위제한 조건을 추가하였다. 하중은 12단계로 나누어서 그림 4와 같이 일정변위 간격으로 추가하였다.

2. 3 유한요소해석결과

먼저, 유한요소모형의 적합성을 알아보기 위해 선형탄성재료물성을 입력하고 균열선단을 따라 응력확대계수 K_I 을 계산하였다. 여기서, 물성치는 Young's 모듈러스 180 GPa, 포아송비 0.3을 사용하였다. 응력확대계수는 3가지 방법에 의해 구한 결과를 서로 비교하였는데, 첫 번째는 Raju와 Newman에 의한 응력확대계수식을 사용한 것이고, 두 번째는 ANSYS가 제공하는 응력확대계수계산방법을 사용한 것이고, 세 번째는 구한 J(s)로부터 응력확대계수와의 상관관계식 $K_I = \sqrt{E J}$ 을 사용한 것이다. 그 계산결과는 그림 5에 비교되어 있다. 위의 세가지 다른 방법으로 구한 응력확대계수값은 아주 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 선형탄성 유한요소모형의 적합성을 토대로 하여 비선형경우에 적용하였다. 이러한 유한요소모형을 사용하여 J(s)를 구한 결과는 그림 6에 나타나 있다.

2. 4 토론

이전의 연구결과는 Incoloy 908의 CT 시편에 의한 파괴실험으로부터 K_{Ic} 값이 $200 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 보고하고 있다. 그러나, 3차원 유한요소를 통한 본연구 결과에 의하면 J_{Ic} 값이 약 $130 \text{ kPa} \cdot \text{m}$ 정도로 나타나고 있다. 이 값은 하중단계 7에서의 값이다. 그리고, 이 값을 K값으로 환산하면 K_{Ic} 가 $150 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 가 된다. 이러한 차이는 전형적인 측정의 오차(~10%)보다 훨씬 큰 값으로서, 시

편크기에 의한 효과로 추정된다 [8].

3. 결론

두께방향으로의 균열진전을 가지는 초전도 전자석 구조재와 같은 얇은 금속 피복판재의 보다 현실적인 파괴역학적 거동을 예측하기 위해서는 표면균열인장시험에 의해서 파괴인성치가 측정되어야만 한다. 따라서, I-908 재료의 파괴인성치 K_{Ic} 는 잔류 단면 효과에 의해 CT시험에 의한 $200 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 가 아니라, 약 $150 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 낮아지게 됨을 보였다.

참고문헌

- [1] J.R. Rice, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35 (1968) 379-386
- [2] S.N. Atluri, T. Nishioka, and M. Nakagaki, Incremental Path-Independent Integrals in Inelastic and Dynamic Fracture Mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 20, No. 2 (1984) 209-244
- [3] W.C. Carpenter, D.T. Read, and R.H. Dodds, Jr, Comparison of Several Path Independent Integrals Including Plasticity Effects, *International Journal of Fracture*, Vol. 31 (1986) 303-323
- [4] R.H. Dodds, Jr. and D.T. Read, Experimental and Numerical Studies of the J-Integral for a Surface Flaw, *International Journal of Fracture*, Vol. 43 (1990) 47-67
- [5] R.L. Tobler, I.S. Hwang and M.M. Steeves, Fracture Mechanics Behavior of a Ni-Fe Superalloy Sheath for Superconducting Fusion Magnet, Part I: Property Measurements, submitted to *Fusion Engineering and Design* (1996).
- [6] I.S. Raju and J.C. Newman, Jr., Stress-Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite Thickness Plates, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11 (1979) 817-829
- [7] "ANSYS User's Manual" , Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pa., U.S.A.
- [8] W.A. Sorem, R.H. Dodds, Jr., and S.T. Rolfe, Effect of Crack Depth on the Elastic-Plastic Fracture Toughness, *International Journal of Fracture*, Vol. 48 (1991) 107-125.

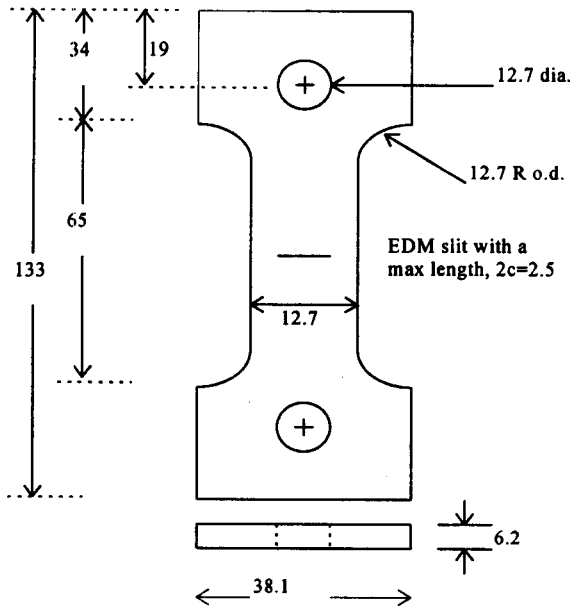


그림 1. 표면균열 인장시편의 형태와 크기 (모든 크기는 mm단위임).

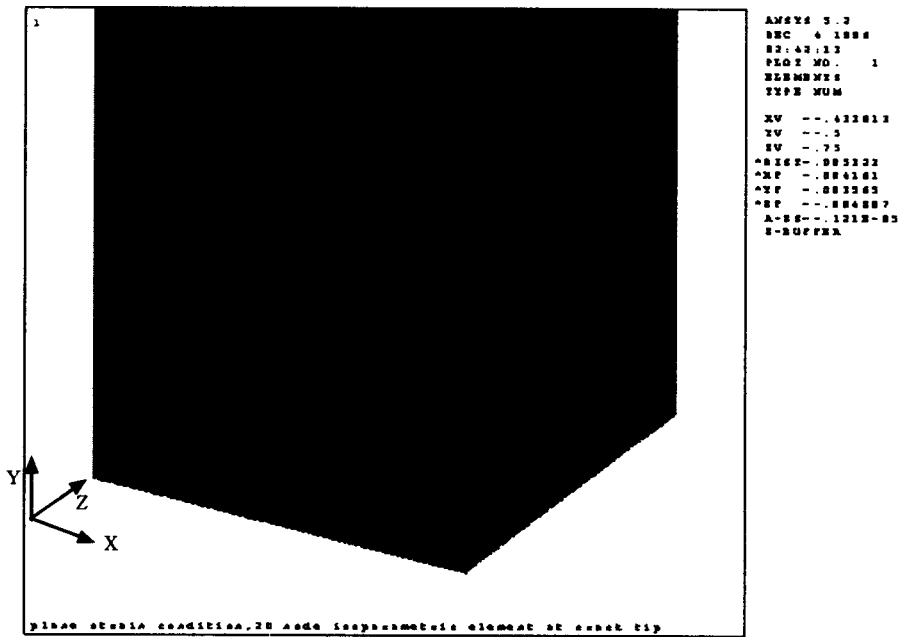


그림 2. 표면균열 인장시편에 대한 1/4 유한요소 모형.

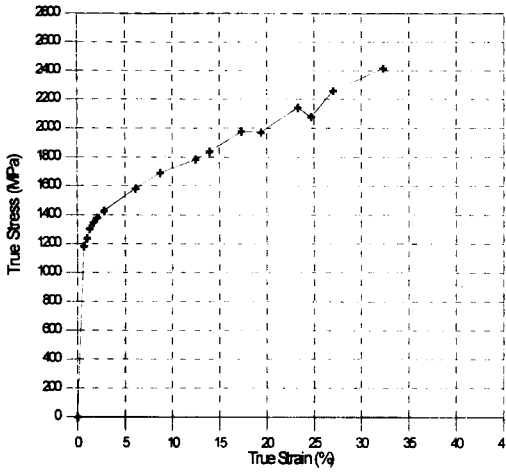


그림 3. Incoloy 908의 진응력-변형곡선.

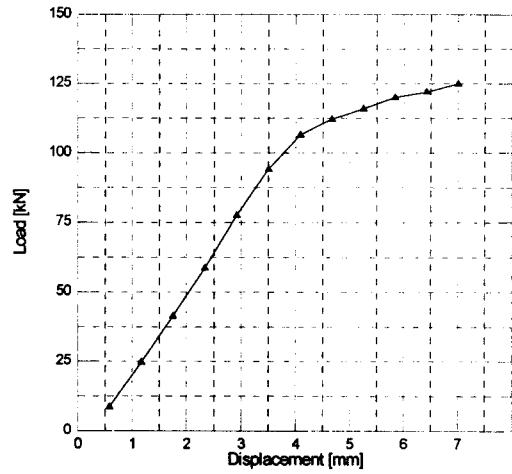
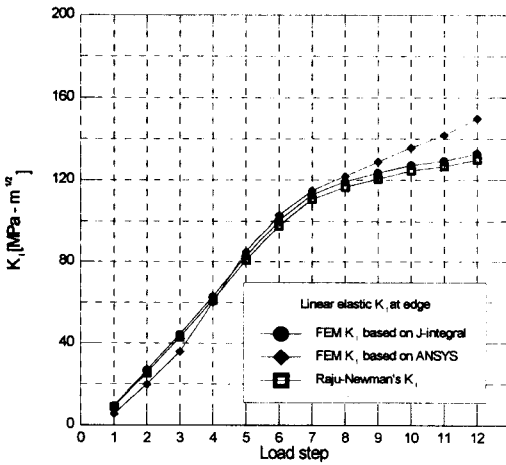
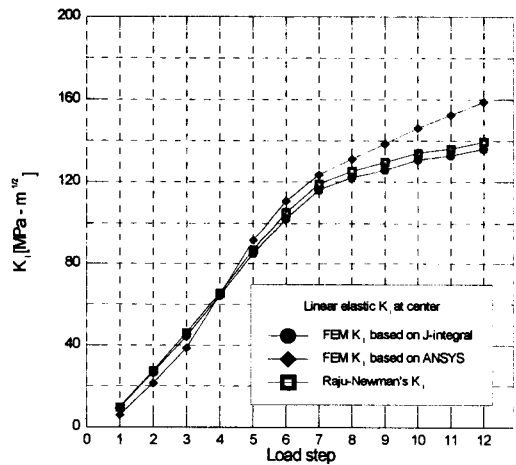


그림 4. Incoloy 908 잔류강도시험의 하중-변위곡선.

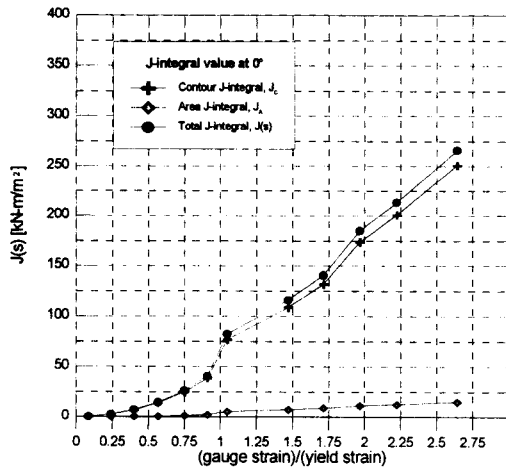


(a)

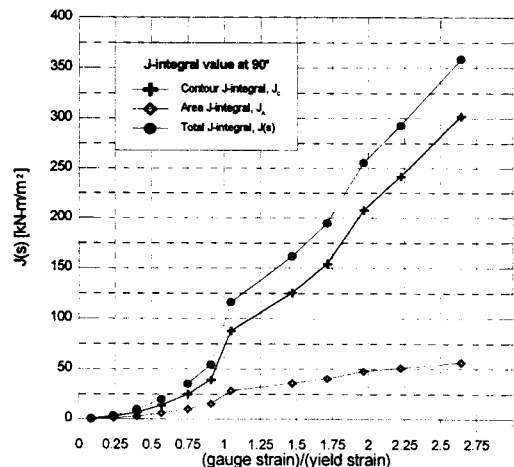


(b)

그림 5. 선형탄성 유한요소해석에 의한 (a) $\phi = 0^\circ$ 와 (b) $\phi = 90^\circ$ 에서의 응력확대계수값.



(a)



(b)

그림 6. 하중단계에 따른 (a) $\phi = 0^\circ$ 과 (b) $\phi = 90^\circ$ 에서의 계산된 J(s) 값.