

유전자 알고리즘을 이용한 탄소강 재료의 와이블 응력 상수 보정 Calibration of Weibull Stress Parameters for Carbon Steel using Genetic Algorithm

*고한옥¹, 장윤석¹, 최재봉¹, #김영진¹, 김민철², 이봉상²

¹H. O. Ko¹, Y. S. Chang¹, J. B. Choi¹, #Y. J. Kim(yjkim50@skku.edu)¹, M. C. Kim², B. S. Lee²

¹성균관대 기계공학부, ²한국원자력연구원 원자력재료기술개발부

Key words : Cleavage Fracture, Failure Probability, Local Approach, Genetic Algorithm

1. 서론

장기간 운전된 원자력 발전소의 안전성을 확보하기 위해서는 열화된 기기의 구조건전성 평가가 필요하다. 특히, 기기 재료의 파괴특성 실험이 선행되어야 하는 경우 실험 시편의 채취가 쉽지 않기 때문에 제한된 실험데이터를 통하여 재료의 파괴특성을 평가해야 한다. 원자로압력용기나 배관에 널리 사용되는 페라이트계 재료의 경우 연성-취성전이온도 영역에서 온도에 따라 파괴 인성 값이 큰 편차를 보이고 있으며 또한 구속효과에 의해 시편의 크기와 종류에 따라 서로 다른 의존성을 보이기 때문에 재료의 파괴특성을 파악하는 것이 더욱 어렵다.[1,2] 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 새로운 접근법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 마이크로 역학적 손상모델(micro-mechanical damage model)을 이용한 국부접근법은 대표적인 예이다. 벽개파괴의 경우 마이크로 역학적 손상모델로 와이블 응력모델[3]이 제안되었으며 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[4,5] 국부접근법에서는 마이크로 역학적 손상모델의 재료상수를 결정하는 것이 가장 중요한 과정이지만 실험데이터의 불확실성 및 재료/해석자의 차이로 인하여 같은 재료일지라도 재료상수가 상당한 차이를 보인다.[6]

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 와이블 응력모델의 재료상수를 결정하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 이를 이용하여 원자로 압력용기나 배관 등의 재료로 많이 사용되는 SA508 탄소강의 와이블 응력 상수를 결정하고 기존 연구결과와 비교하여 제안된 방법론의 타당성 및 효율성을 검증하고자 한다.

2. 와이블 응력모델

본 논문에서 사용한 마이크로 역학적 손상모델은 링크 끊어짐 현상(weakest link theory)에 기반을 둔 와이블 응력모델이다. 이 모델의 기본개념은 벽개파괴를 링크 끊어짐 현상으로 가정하고 파손확률은 최소한 개의 파괴 유발입자를 만나는 확률과 같다는 것이다. 이 모델의 적용을 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다. 먼저 국부적인 균열은 각 요소(element)의 소성 변형에서 시작하며 균열이 임계길이에 도달하거나 수직응력이 임계값에 다다르게 되면 임계파괴가 발생한다.

한편 부피가 이고 단위 부피당 ρ 개의 임계입자를 갖는 재료에 대한 파손확률은 포아송 분포로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = 1 - \exp(-\rho V) \quad (1)$$

식 (1)에서 우변의 두 번째 항은 부피 내에서 임계입자를 발견하지 못하게 될 확률이므로 n 개 이상의 임계입자를 만나게 될 확률이다. 포아송 분포는 ρ 가 작고 n 가 크다는 가정에 기초한 이항 분포로부터 유도된 것이다. 임계입자의 크기는 균열선단에서 변하는 응력에 의존하므로 ρ 는 위치에 따라 변한다. 그러므로 파손확률은 균열선단에서 각각의 부피 요소에 대해 적분을 취함으로써 구할 수 있다.

$$F = 1 - \exp\left(-\int_V \rho dV\right) \quad (2)$$

식 (2)의 적분항에서 임계입자에 관한 분포는 Beremin에 의해 와이블 분포를 따른다고 밝혀진 바 있다.[3] 따라서 식 (2)는 와이블 분포를 따르는 응력분포를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_f = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_w - \sigma_{th}}{\sigma_u - \sigma_{th}}\right)^m\right\} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 파손확률이며 m 과 σ 는 각각 shape, scale, threshold parameter로 같은 재료에 대해서는 동일한 값을 갖는 재료상수이다. 파손확률을 평가할 때 균열선단 주변의 요소는 요소전체가 균일한 응력분포를 가질 수 있도록 충분히 작게 설정해야 한다. 또한 와이블 응력(σ)은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_w = \left(\sum_{i=1}^{n_e} \left(\frac{V_i}{V_0}\right) \sigma_{1,i}^m\right)^{1/m} \quad (4)$$

여기서 V_0 는 Fig. 1과 같이 균열 선단에 정한 참조부피(reference volume)를 나타내며 n_e 는 참조부피 내에 존재하는 소성요소 개수, i 는 i 번째 소성요소의 부피, $\sigma_{1,i}$ 는 최대 주응력을 나타낸다.

식 (4)에서 알 수 있듯이 와이블 응력은 균열선단에 발생하는 소성영역을 고려하여 계산하며 식 (5)와 같이 요소의 주응력이 일정한 응력보다 크면 소성영역으로 정의한다. 보통 σ_0 는 항복응력보다 작은 값을 사용하며 λ 는 1~2 사이의 값을 사용한다.

$$\sigma_1 > \lambda \sigma_0 \quad (5)$$

3. 유전자 알고리즘을 이용한 재료상수 결정

기존 재료상수 결정법인 시행착오법[6]의 경우 실험데이터로부터 구한 평균 파손확률과 유한요소 해석 데이터로부터 구한 파손확률 사이의 평균제곱오차를 구하고 parameters(m, σ, σ_0)의 값을 변화시켜서 평균제곱오차를 최소화 하는 parameters를 와이블 응력 상수로 결정한다. 이 방법은 모든 과정을 사용자가 직접 처리하기 때문에 비효율적이고 와이블 응력 상수 결정과정에서 사용자의 경험이 많이 작용한다.

따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 평균제곱오차의 최소화 문제를 식 (6)과 같이 최적 설계 문제로 정식화하였다.

$$\text{Min } \frac{1}{2} \sum_i [y_i - f_i(m, \sigma_u, \sigma_{th})]^2 \quad (7)$$

여기서 y_i 는 평균 파손확률(P_f)이고 $f_i(m, \sigma_u, \sigma_{th})$ 는 유한요소 해석 결과로부터 구한 파손확률이며 i 는 파괴인성 실험데이터의 개수이다. 또한 m, σ, σ_0 는 설계변수이고 0보다 큰 값을 가져야 한다.

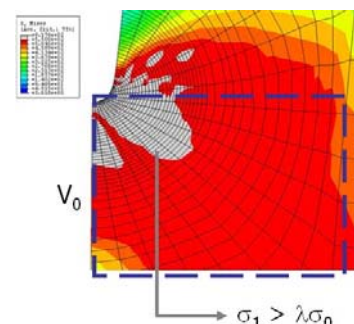


Fig. 1 Schematics of reference volume

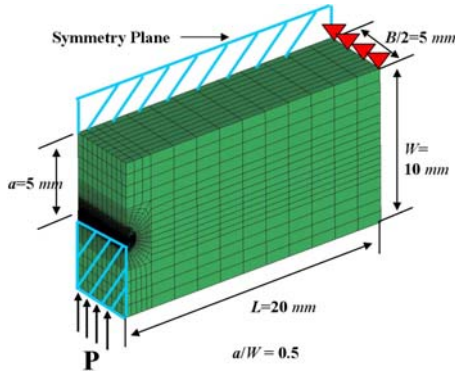


Fig. 2 FE mesh and analysis condition for PCVN specimen

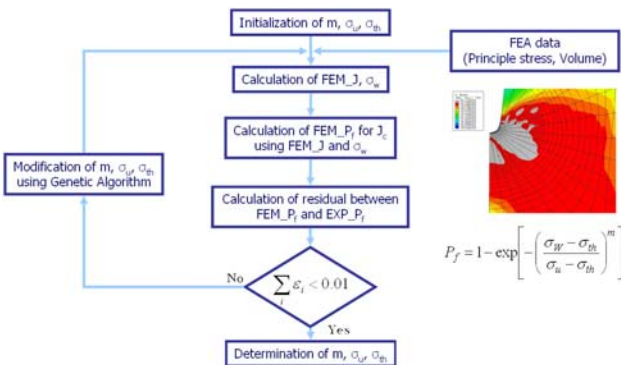


Fig. 3 The procedure for determining Weibull parameters

평균 파손확률은 파괴인성 실험데이터와 식 (7)을 이용하여 구하며 본 논문에서 사용한 파괴인성 실험데이터는 Table 1과 같다. 파괴인성 실험은 단면의 크기가 10×10mm인 PCVN (Pre-Cracker V-Notch)시편(a/W =0.5)을 이용하여 한국원자력연구원에서 수행하였으며 재료는 SA508 탄소강으로, 시험온도는 -80℃이다.

$$P_r = \frac{i - 0.5}{N} \quad (7)$$

여기서 은 평균 파손확률, i는 값을 오름차순으로 정렬했을 때 순서에 따라 부여된 자연수이며, N은 전체 시편의 개수이다.

또한 유한요소해석 결과로부터 구한 파손확률은 유한요소해석 데이터와 식 (3), (4)를 이용하여 구한다. Fig. 2는 해석에 사용된 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 형상의 대칭성을 고려하여 1/4만 모델링 하였으며 8절점 육면체 요소를 사용하였고 11,594개의 절점과 9,740개의 요소로 구성하였다. 탄소계수와 포아송 비는 각각 210GPa, 0.3을 사용하였고 유한요소해석은 범용 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

본 논문에서는 식 (6)의 목적함수를 유전자 알고리즘과 iSight를 사용하여 최적화하였으며 전체 과정은 Fig.3과 같다. 평균제곱오차가 0.01보다 작으면 값이 수렴하는 것으로 판단하였다.

Table 1 The critical values at the cleavage fracture for PCVN specimen

	1	2	3	4	5	6	7
σ_c (N/mm), -80℃	31.9	33.6	45.3	60.4	70.0	80.4	100.0

Table 2 Weibull parameters obtained by genetic algorithm

Method	m	σ_w	σ_{th}	residual
Trial & Error	22	1400	350	0.2010
GA	10.52	1211.36	214.42	0.0049

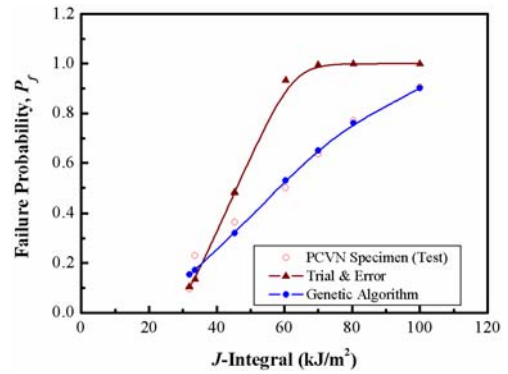


Fig. 4 Comparison of failure probability between trial & error method and genetic algorithm

새로운 와이블 응력 상수 결정법을 이용하여 PCVN시편의 와이블 응력 상수를 결정한 결과는 Table 2와 같다. 시행착오법의 경우 평균제곱오차가 0.201 이었으며 유전자 알고리즘을 이용할 경우 0.005 이었다. 새로운 방법의 경우 평균제곱오차를 97.5% 감소시켰으며 효율적으로 재료상수를 결정하였다. 또한 Fig.4는 결정된 와이블 응력 상수를 이용하여 구한 파손확률을 비교한 것이며 유전자 알고리즘을 적용한 새로운 방법을 이용하여 예측한 파손확률이 실험 데이터로부터 구한 파손확률과 잘 일치하였다.

4. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 탄소강의 와이블 응력 상수를 결정하였으며, 여기서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 유전자 알고리즘을 이용하여 와이블 응력 상수 결정하는 새로운 방법을 제안하였으며 제안된 방법과 실험 및 유한요소해석 데이터를 활용하여 탄소강의 와이블 응력 상수를 결정하였다.
- (2) 시행착오법을 이용할 경우 평균제곱오차는 0.201이었으나 새로운 방법을 이용할 경우 0.005로 평균제곱오차를 약 97.5% 감소시켰으며 효율적으로 재료상수를 결정하였다.
- (3) 새롭게 제안된 방법이 실험 데이터와 잘 일치하는 파손확률을 예측하였으며 이를 이용하여 탄소강의 파손기구 특성 예측에 활용될 것으로 예상된다.

후기

본 논문은 한국원자력연구원의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Wallin, K., "The scatter in K_{Ic} results," *Engineering Materials*, Vol. 19, pp.1085~1093, 1984.
2. Sorem, W. A., Dodds, R. H. and Rolfe, S. T., "Effects of crack depth on elastic-plastic fracture toughness," *International Journal of Fracture*, Vol. 47, pp.105~126, 1991.
3. Beremin, F. M., "A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel," *Materials*, Vol. 14A, pp.2277~2287, 1983.
4. Minami, F., Brückner-foit, A., Munz, D. and Trolldenier, B., "Estimation procedure for the Weibull parameters used in the local approach," *International Journal of Fracture*, Vol. 54, pp.197~210, 1992.
5. Ruggieri, C. and Dodds, R. H. Jr., "Numerical evaluation of probabilistic fracture parameters using WSTRESS," *Engineering Materials*, Vol. 15, No. 1, pp.49~73, 1998.
6. R6, Revision 4, "Guidance on local approach methods," British Energy Generation, Gloucester, 2001.