

## 손상모델의 온도의존성을 고려한 SA508 탄소강의 취성파괴 평가

최신범\* · 정재욱\* · 최재봉\* · 장윤석\*\*† · 고한옥\*\*\* · 김민철\*\*\*\* · 이봉상\*\*\*\*

\* 성균관대학교 기계공학부, \*\* 경희대학교 원자력공학과, \*\*\* 한국원자력안전기술원, \*\*\*\* 한국원자력연구원

### Estimation of Brittle Fracture Behavior of SA508 Carbon Steel by Considering Temperature Dependence of Damage Model

Shin-Beom Choi\*, Jae-Uk Jeong\*, Jae-Boong Choi\*, Yoon-Suk Chang\*\*†, Han-Ok Ko\*\*\*, Min-Chul Kim\*\*\*\* and Bong-Sang Lee\*\*\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,

\*\* Dept. of Nuclear Engineering, Kyung Hee Univ.,

\*\*\* Korea Institute of Nuclear Safety,

\*\*\*\* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received October 12, 2011 ; Revised February 29, 2012 ; Accepted March 6, 2012)

**Key Words:** Brittle Fracture(취성파괴), Damage Model(손상모델), Multi-Island Genetic Algorithm(다중 섬 유전자알고리즘), Reactor Pressure Vessel Steel(압력용기강), Temperature Dependency(온도의존성), Weibull Stress Model(와이블 응력모델)

**초록:** 본 연구의 목적은 손상모델의 온도의존성을 고려하여 압력용기강의 취성파괴 거동을 평가하는 것이며, 이를 위해 다중 섬 유전자알고리즘과 와이블 응력모델을 연계하여 대표적 취성파괴 손상모델의 재료상수 결정절차를 개선하였다. 벽개파괴가 예상되는 -60°C, -80°C, -100°C 온도에서 수행한 SA508 탄소강 재료의 파괴인성 실험 데이터를 사용하여 개선된 절차에 따른 재료상수를 결정하였고, NUREG/CR-6930과 동일한 결과인 재료상수의 온도의존성을 확인하였다. 최종적으로는 손상모델 재료상수의 온도의존성에 따른 2-매개변수 와이블 응력모델과 3-매개변수 와이블 응력모델의 차이를 정량화하였으며, 공학적으로 활용 가능한 관계식을 제안하였다.

**Abstract:** The aim of this study was to determine the brittle fracture behavior of reactor pressure vessel steel by considering the temperature dependence of a damage model. A multi-island genetic algorithm was linked to a Weibull stress model, which is the model typically used for brittle fracture evaluation, to improve the calibration procedure. The improved calibration procedure and fracture toughness test data for SA508 carbon steel at the temperatures -60°C, -80°C, and -100°C were used to decide the damage parameters required for the brittle fracture evaluation. The model was found to show temperature dependence, similar to the case of NUREG/CR-6930. Finally, on the basis of the quantification of the difference between 2- and 3-parameter Weibull stress models, an engineering equation that can help obtain more realistic fracture behavior by using the simpler 2-parameter Weibull stress model was proposed.

## 1. 서론

원자로 압력용기(RPV, Reactor Pressure Vessel) 제작에 사용되는 저합금강에서는 가동 중 중성자조사에 의한 열화(material degradation)가 발생할 수 있다. 지속적인 재료열화 감시(monitoring)는 발전소 수명 예측 및 평가 측면에서 매우 중요하며, 특히 균열의 발생 및 성장과 관련하여 압력용기강의 파

괴저항 특성에 근거한 공학적 분석이 요구된다. 결함이 존재하는 연성 및 취성 재료의 거동을 예측하기 위해 선형탄성파괴역학에서는 응력확대계수(SIF, Stress Intensity Factor)를 이용하여 시편의 파괴특성을 평가하며, 선형탄성파괴역학이 적용될 수 없을 경우 탄소성파괴역학에 기초한 J-적분(J-integral) 또는 균열열린변위(CTOD, Crack-Tip Opening Displacement)를 이용하여 파괴특성을 평가한다. 응력확대계수, J-적분, CTOD를 결정하기 위해서는 굽힘 하중이 작용하는 CT(Compact Tension)와 SENB(Single Edge

† Corresponding Author, yschang@khu.ac.kr

Notched Bend) 등 표준시편이 필요하나, 이러한 표준시편은 높은 구속효과(constraint effect)로 인해 보수적인 평가결과를 제시하며 구속조건이 상이한 실제 결함이 존재하는 구조물 하중조건, 시편형상의 변화에 따라 파괴특성의 차이가 발생할 수 있다. 이러한 제한사항을 개선하기 위해 공학적 방법으로 2-매개변수 접근법(two-parameter approach)과 국부접근법(local approach)을 사용하고 있다. 2-매개변수 접근법은  $T$ -응력과  $Q$ -매개변수로 구속효과를 정량화하여 파괴특성의 변화를 표현하는 방법이며, 국부접근법은 파괴가 발생하는 균열 선단의 마이크로 역학적인 거동을 기반으로 국부적인 영역에 대한 파괴특성을 평가하는 방법이다. 국부접근법의 적용은 마이크로 역학적 손상모델(micro-mechanical damage model)의 수립과 다수의 반복적인 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)으로 구분될 수 있으며, 원자로 압력용기의 파괴거동 예측에 활용될 수 있다.

국부접근법에서는 동일한 재료로 제작된 시편과 구조물의 파괴가 발생하는 국부영역의 재료거동이 동일하다고 가정하기 때문에 마이크로 역학적 모델의 매개변수 결정이 가장 중요하다. 기존의 매개변수 결정절차인 시행착오법(trial & error)은 해석자의 경험에 좌우될 뿐만 아니라 많은 계산이 필요하기 때문에 비효율적이다. 최대가능성법(MLM, Maximum Likelihood Method)의 경우에도 복잡한 가능성 함수(likelihood function)가 필요하며 결정된 재료상수의 신뢰성 확보를 위해 충분한 수의 실험결과가 요구되는 등의 문제가 있다. 따라서 체계적인 최적화 기법을 활용하여 매개변수 결정절차를 개선하는 것이 바람직하다. 저자들은 선행연구를 통해 유전자알고리즘과 3-매개변수 와이블 응력모델(3-parameter Weibull stress model)을 연계하여 손상모델 매개변수를 결정할 수 있다.<sup>(1)</sup> NUREG/CR-6930<sup>(2)</sup>에 의하면 3-매개변수 와이블 응력의 매개변수 중 형상 매개변수( $m$ , shape parameter)는 온도에 크게 영향을 받지 않는 18~20 사이의 값이며, 다른 매개변수들은 온도의 의존적이라고 하였다. 저자들의 선행연구 결과는 최적화 과정에서 변수들의 범위를 상대적으로 넓게 적용하였기 때문에 재료의 온도의존성(temperature dependancy)을 정확히 반영하기 위해서는 형상 매개변수 및 하한계응력, 참조응력에 대한 추가적인 고려가 필요한 것으로 판단된다.

본 연구는 국부접근법을 활용하여 원자로 압력

용기강의 취성파괴 거동을 평가하기 위한 것이다. 이를 위해 다중 섬 유전자알고리즘(MIGA, Multi-Island Genetic Algorithm)과 2-매개변수 와이블응력 모델, 3-매개변수 와이블 응력모델을 연계하여  $-60^{\circ}\text{C}$ ,  $-80^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서의 취성파괴 예측에 필요한 재료상수를 결정한 후 온도의존성을 확인한다. 또한 2-매개변수 와이블 응력모델과 3-매개변수 와이블 응력모델의 관계를 정량화하고, 이를 반영하여 취성파괴평가를 위한 파괴인성 예측식을 제안하고자 한다.

## 2. 매개변수 결정절차 개선

### 2.1 다중 섬 유전자알고리즘

유전자알고리즘(GA, Genetic Algorithm)<sup>(3)</sup>은 다윈의 자연선택 메커니즘(mechanism)을 근간으로 진화과정을 모사하기 위해 제안된 방법이다. 다시 말해서, 주어진 환경에 잘 적응하는 유전자를 선택하여 교배(cross over)하고 경우에 따라서 돌연변이(mutation)도 고려하며 다음 세대에 우수한 유전 형질만 전달되도록 한다. 이런 방법으로 진화(evolution)가 거듭되면, 결국 주어진 환경에 가장 적합한 유전자들만 남게 된다. 여기서 주목할 점은 적합(fitness)하다는 것은 그 만큼 우수하다는 뜻이다. Fig. 1은 유전자알고리즘의 개념도를 나타낸 것으로써, 유전자알고리즘은 비선형 최적화 문제에 있어서 준최적해를 효율적으로 탐색하나 파라미터의 설정에 따라 결과 값이 큰 영향을 받는다. 최근에 유전자알고리즘은 최적화 문제 해결을 위해 공학 분야에서도 많이 응용되고 있는데, 여러 가지 다양한 기법 중 다중 섬 유전자알고리즘이 가장 많이 사용되고 있다. 다중 섬 유전자알고리즘은 방대한 반복계산의 효율성을 높이고 부분 최적해의 수렴을 방지할 수 있는 장점이 있다. 이 방법은 분산 유전자알고리즘으로 불리는 병렬분산의 최적화 기법으로, 한 세대의 개체군이 여러 개의 하위 개체군으로 나뉘질 수 있으며, 이러한 하위 개체군을 섬(island)이라고 한다. 또한 반복과정 동안 하위 개체군을 독립적으로 유지하고 새로운 반복과정 전에 하위 개체군 간의 지식 전달 과정(migration)을 수행하여 부분 최적해의 발생 가능성을 낮게 한다. Fig. 2는 다중 섬 유전자알고리즘의 개념도이다.

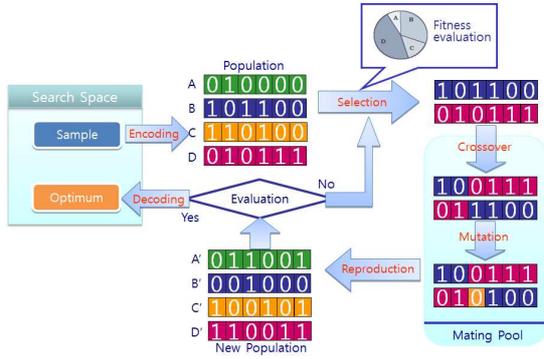


Fig. 1 Schematic diagram of genetic algorithm

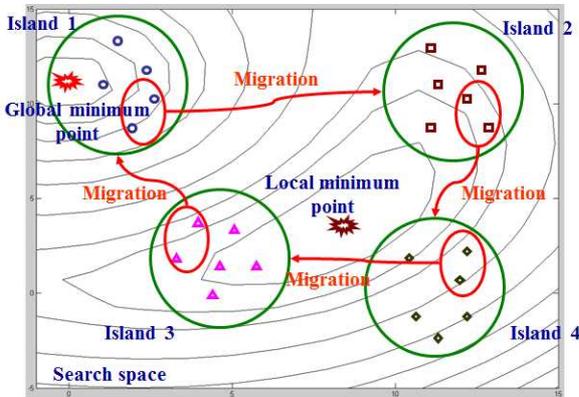


Fig. 2 Schematic diagram of MIGA

2.2 와이블 응력모델

본 연구에서 사용한 마이크로 역학적 손상모델은 링크 끊어짐 현상(weakest link theory)에 기반을 둔 와이블 응력모델<sup>(4)</sup>이다. 이 모델의 기본개념은 벽개파괴(cleavage fracture)를 링크 끊어짐 현상으로 가정하고 파손확률(failure probability)은 최소 한 개의 파괴 유발입자를 만나는 확률과 같다는 것이다. 와이블 응력모델의 적용을 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다. 먼저 국부적인 균열은 각 요소(element)의 소성 변형에서 시작하며 균열이 임계길이에 도달하거나 수직응력이 임계값에 다다르게 되면 파괴가 발생한다. 부피가  $V$ 이고 단위 부피당  $\rho$  개의 임계입자를 갖는 재료에 대한 파손확률은 푸아송 분포로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = 1 - \exp(-\rho V) \tag{1}$$

식 (1)에서 우변의 두 번째 항은 부피  $V$  내에서 임계입자를 발견하지 못하게 될 확률이므로  $F$

는 한 개 이상의 임계입자를 만나게 될 확률이다. 푸아송 분포는  $\rho$ 가 작고  $V$ 가 크다는 가정에 기초한 이항분포로부터 유도된 것이다. 임계입자의 크기는 균열선단에서 변하는 응력에 의존하므로  $\rho$ 는 위치에 따라 변한다. 그러므로 파손확률은 균열선단에서 각각의 부피 요소에 대해 적분하여 구할 수 있다.

$$F = 1 - \exp\left(-\int_V \rho dV\right) \tag{2}$$

식 (2)의 적분항에서 임계입자에 관한 분포는 Beremin 그룹이 제안한 와이블 분포(Weibull distribution)를 따른다고 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 따라서 식 (2)는 와이블 분포를 따르는 응력값을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서  $P_f$ 는 파손확률이며  $m$ 과  $\sigma_u$ ,  $\sigma_{th}$ 는 각각 형상계수(shape parameter), 참조응력(reference stress), 하한계응력(threshold stress)으로써 같은 재료에 대해서는 동일한 값을 갖는 재료상수이다. 파손확률을 평가할 때 균열선단 주변의 요소는 요소전체가 균일한 응력분포를 가질 수 있도록 충분히 작게 설정해야 하며, 이 때 와이블 응력( $\sigma_w$ )은 다음과 같이 정의된다.

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

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

2.3 MIGA와 연계한 매개변수 결정절차 개선<sup>(5)</sup>

전술한 바와 같이 기존 매개변수 결정절차인 시행착오법의 경우 실험데이터로부터 구한 평균 파손확률과 유한요소해석 데이터로부터 구한 파손확률 사이의 평균제곱오차를 구하고 매개변수의 값을 임의로 변화시켜 평균제곱오차를 최소화한다. 이 방법은 모든 과정을 사용자가 직접 처리하고 사용자의 경험에 의해 시간 및 결과가 크

게 좌우되므로 비효율적이라 할 수 있다. 아울러 최대가능성법의 경우에도 복잡한 형태의 가능성 함수를 설정해야 하고, 결정된 매개변수의 신뢰성 확보를 위해 충분한 수의 실험결과가 요구되는 등의 문제점이 발생한다.

본 연구에서는 평균제곱오차의 최소화 문제를 식 (5)와 같이 최적화 설계문제로 정식화하였다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n [y_i - f_i(m, \sigma_u, \sigma_{th})]^2 \quad (5)$$

여기서,  $y_i$ 는 평균 파손확률이고,  $f_i(m, \sigma_u, \sigma_{th})$ 는 유한요소해석결과로부터 구한 파손확률이며,  $i$ 는 파괴인성 실험데이터의 개수이다. 평균 파손확률은 동일 조건에서 얻어진  $N$ 개 시편의 파괴인성 측정값들을 크기 순서로 정렬한 후,  $i$ 번째 순위의 값에 대한 발생확률로 식 (6)을 이용하여 구한다. 본 연구에서 사용한 파괴인성 시편은 단면의 크기가 10x10mm PCVN(Pre-cracked Charpy V-Notched) 시편( $a/W=0.5$ )을 이용하여 한국원자력연구원(KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute)에서 파괴인성 실험을 수행하였다.

$$P_r = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \quad (6)$$

여기서,  $P_r$ 은 평균 파손확률,  $i$ 는  $J_c$ 값을 오름차순으로 정렬했을 때 순서에 따라 부여된 자연수이며,  $N$ 은 전체 시편의 개수이다. 또한 유한요소해석 결과로부터 계산된 파손 확률은 식 (3)과 식 (4)을 이용하여 도출한다.

해석에 사용된 유한요소모델은 실험에 사용된 것과 동일한 PCVN 시편으로써, 11,594개의 절점과 9,740개의 8절점 육면체 요소를 이용하여 작성하였다. 식 (5)의 목적함수(objective function)를 다중 섬 유전자알고리즘을 사용하여 최적화하였으며, 전체 과정과 최적화에 사용된 해석조건은 각각 Fig. 3 및 Table 1과 같다. 실험을 통해 구한 파손확률과 유한요소해석 결과를 통해 구한 파손확률을 비교하여 그 오차가 0.01보다 작으면 값이 수렴하는 것으로 판단하였다. Table 2는 -80°C에서 SA508 탄소강의 파괴인성 데이터와 개선된 매개변수 결정절차를 이용하여 구한 PCVN 시편의 재료상수를 정리한 것으로써, 이 때 매개변수의 온도의존성은 고려하지는 않았다. 해석자의 경험에 좌우될 뿐만 아니라 많은 계산과 시간이

필요한 시행착오법이나 결정된 재료상수의 신뢰성 확보를 위해 충분한 수의 실험결과가 요구되는 최대가능성법에 비해 다중 섬 유전자알고리즘은 방대한 반복계산의 효율성을 높이고 부분 최적해의 수렴을 방지할 수 있다. 따라서 최적화된 시간 및 정확도를 고려했을 때 다중 섬 유전자알고리즘과 연계하여 개선된 매개변수 결정절차는 효율적인 방법이다.

Table 1 Optimized parameters of MIGA

Size of subpopulation	100	Rate of crossover	0.85
No. of island	10	Rate of mutation	0.02
No. of generations	10	Rate of migration	0.5
Gene size	32	Interval migration	5

Table 2 Calibrated parameters of Weibull model

Method	$m$	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_{th}$ (MPa)	Residual
Trial & Error	22	1400	350	0.201
MLM	19	1238	-	0.053
GA (2-parameter Weibull model)	10	1177	-	0.005
GA (3-parameter Weibull model)	11	1211	214	0.005

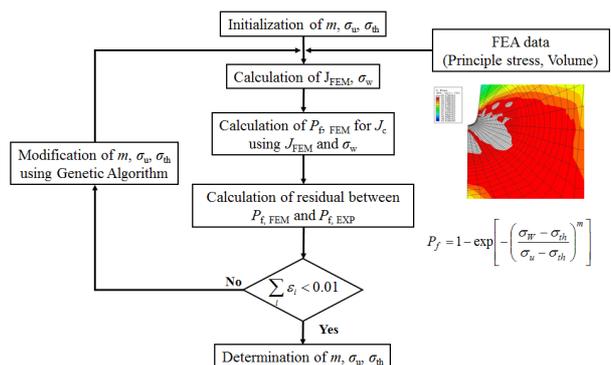


Fig. 3 Calibration procedure in use of MIGA

### 3. 수치해석을 이용한 파괴인성 평가

#### 3.1 와이블 응력모델 매개변수의 온도의존성

NUREG/CR-6930에서는 현재 유럽에서 사용하고 있는 압력용기강에 대해 -40°C와 -110°C에서 3-매개변수 와이블 응력모델의 재료상수를 결정하였다. 와이블 응력모델 중 형상계수( $m$ ) 값은 18(-110°C일 때)~20(-40°C일 때) 사이로 온도에 의존적이지 않으며, 참조응력( $\sigma_0$ )의 경우에는 온도에 의존성을 보이는 것으로 연구결과를 보고하였다. 본 논문에서도 와이블 응력모델과 온도와의 관계를 평가하기 위해 전술한 유전자 알고리즘과 와이블 응력모델 매개변수 결정절차를 활용하여 파괴거동을 예측할 수 있는 매개변수를 구하였다. 이 때 관심온도인 -60, -80, -100°C는 벽개파괴가 존재할 때의 온도이다. 평균 파손확률은 파괴인성 시험데이터와 식 (6)으로 계산하였으며, 파괴인성 시편은 측면홈(side-grooves)이 없는 10x10mm PCVN 시편이다. Table 3은 본 연구에 사용된 파손확률과 파괴인성을 정리한 것이다.

한편, 온도와 와이블 응력모델 매개변수와의 관계를 확인하기 위해 2-매개변수 와이블 응력모델과 3-매개변수 와이블 응력모델을 활용하였으며 Table 4와 Fig. 4에 그 결과를 정리하였다. -60, -80, -100°C에서 취성과 파괴 거동을 예측하기 위해 결정된 와이블 응력모델 매개변수 중 형상계수는 온도에 의존적이지 않았고, 참조응력은 온도의존성을 보였으며, 이는 NUREG/CR-6930과 동일한 결과이다.<sup>(6)</sup> Fig. 5에 도시한 바와 같이 형상계수와 참조응력은 2-매개변수 와이블 응력모델의 값이 3-매개변수 와이블 응력모델보다 큰 값을 갖으며, 각각의 온도에서도 동일한 결과를 나타냄을 확인하였다.

일반적으로 3-매개변수 와이블 응력모델이 2-매개변수 와이블 응력모델보다 정확하게 파손확률을 예측하게 된다. 3-매개변수 와이블 응력모델의 하한계응력은 실험 데이터를 활용하거나 형상계수를 변화시키면서 하한계의 최소값을 결정하게 된다. 본 논문에서는 유전자알고리즘을 활용하여 실험에 의해 계산되는 파손확률과 유한요소해석으로 계산된 파손확률을 최소화하여 매개변수들을 구하였기 때문에 결정된 매개변수들은 타당한 것으로 판단된다. 또한 형상계수는 온도에 거의 영향을 받지 않는 반면 참조응력과 하한계응력은

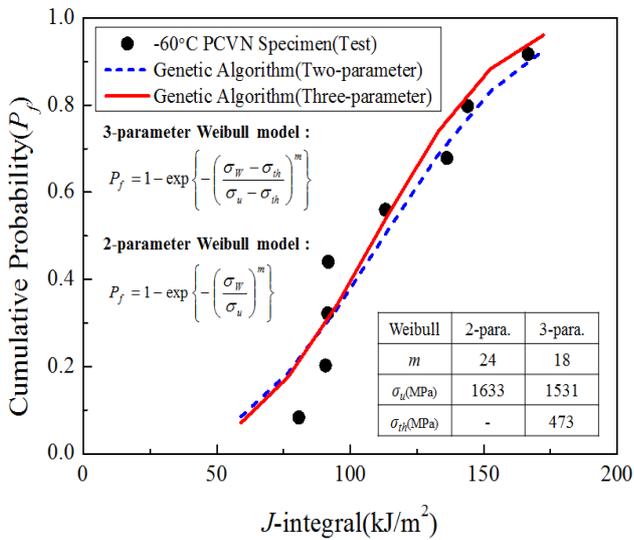
동일한 하중속도(loading rate) 하에서 온도 의존적임을 확인하였다. 참조응력 사이에 정량적인 차이가 존재하였고 하한계응력의 영향으로 인해 3-매개변수 와이블 응력모델의 매개변수들이 적은 값을 가지며 파손확률을 잘 예측하는 것으로 여겨진다. Table 4에 정리한 바와 같이 2-매개변수 와이블 응력모델과 3-매개변수 와이블 응력모델로 결정된 재료상수들의 사이에 형상계수와 참조응력은 평균적으로 각각 5.3 및 83.3MPa의 정량적 차이를 보였다. 따라서 이 결과를 활용하면 두 응력모델의 상관관계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3 Probability of fracture

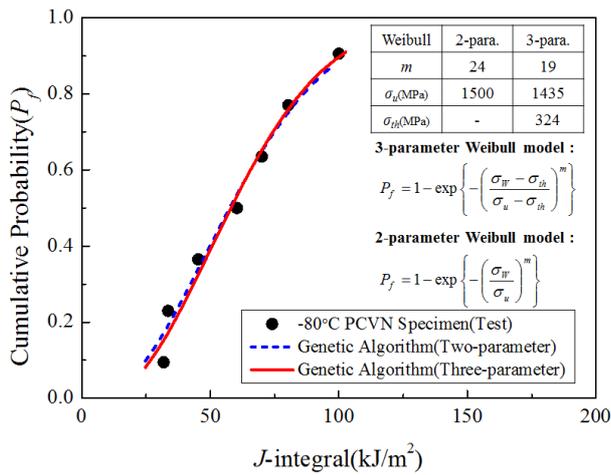
-60°C		-80°C		-100°C	
$J_c$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$P_f$	$J_c$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$P_f$	$J_c$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$P_f$
80.8	0.083	31.9	0.095	23.3	0.075
90.8	0.202	33.6	0.230	32.8	0.180
91.6	0.321	45.3	0.365	33.0	0.287
91.8	0.440	60.4	0.500	34.5	0.394
113.2	0.560	70.0	0.635	39.5	0.500
136.3	0.679	80.4	0.770	46.8	0.606
144.0	0.798	100.0	0.905	68.8	0.713
166.7	0.917	-	-	71.0	0.819
-	-	-	-	73.0	0.926

Table 4 Calibration results at each temperature

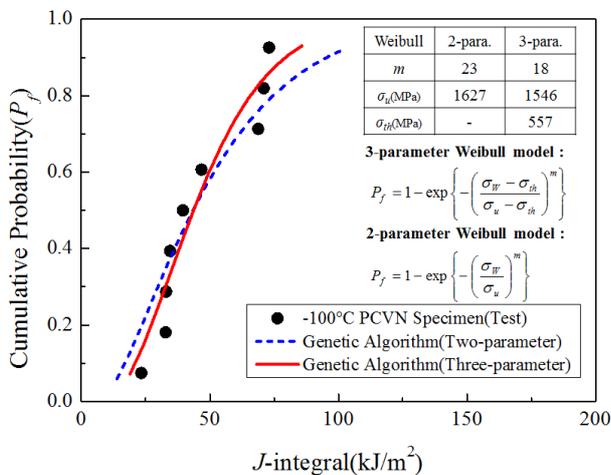
Weibull model	Temp. (°C)	$m$	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_h$ (MPa)	Residual
2-para.	-60	24	1633	-	0.025
	-80	24	1500	-	0.005
	-100	23	1627	-	0.04
3-para.	-60	18	1531	473	0.026
	-80	19	1435	324	0.005
	-100	18	1546	557	0.024



(a) -60°C

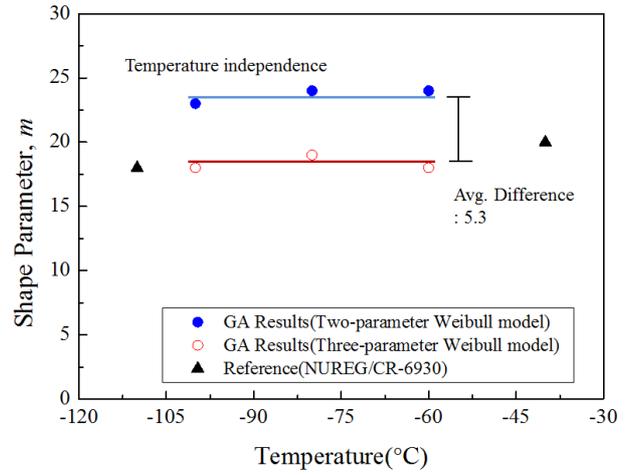


(b) -80°C

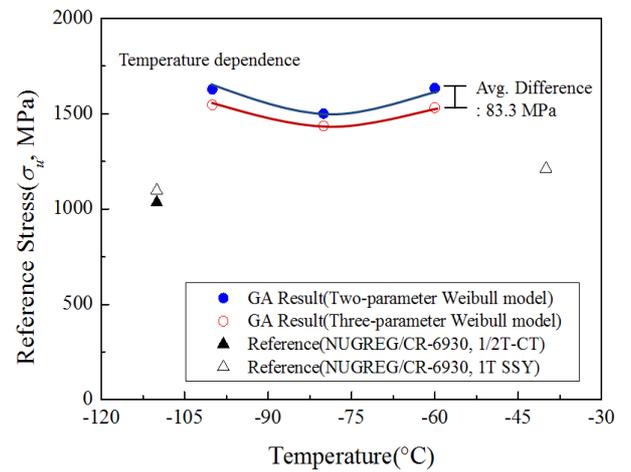


(c) -100°C

Fig. 4 Calibration results at each temperature



(a) Shape parameter



(b) Reference stress

Fig. 5 Comparison results between 2-parameter Weibull model and 3-parameter Weibull model

### 3.2 파괴인성변환도표 작성

3.1절에 기술한 바와 같이 와이블 응력은 형상 계수로부터 계산되는데, 2-매개변수 및 3-매개변수 와이블 응력모델의 재료상수는 온도에 따라 일정한 차이를 나타내었다. 본 연구에서는 두 응력모델의 상관관계를 분석하기 위해 유한요소해석을 통하여 시편의 크기 및 형상에 따른 구속효과를 정량화할 수 있는 파괴인성변환도표(fracture toughness diagram)를 작성하였다. Dodds Jr. 등은 ASTM E1921에 제시된 두께 보정식 형태로 구속효과를 정량화하기 위한 와이블 응력 기반의 TSM(Toughness Scale Diagram)을 제시하였다.<sup>(7)</sup> 본 논문에서는 이를 기반으로 하여 1T-CT 시편의 유한요소해석을 통해 계산된 와이블 응력 및

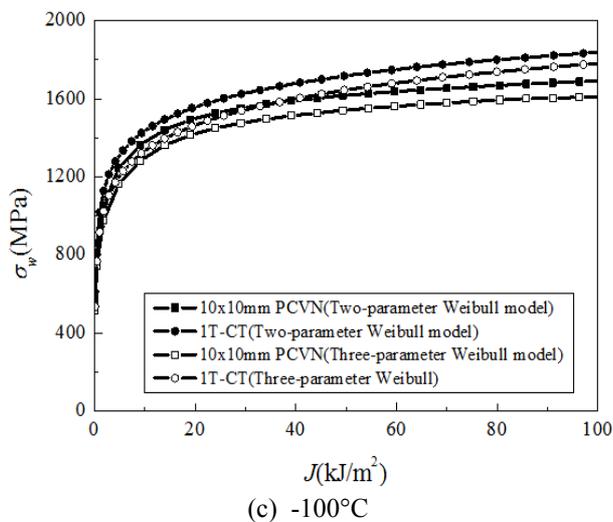
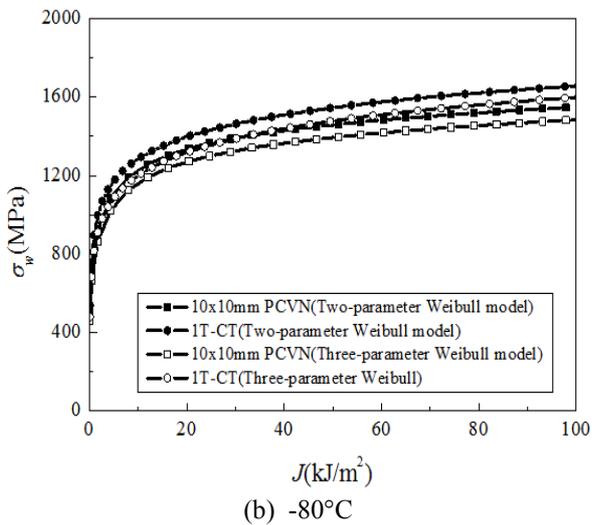
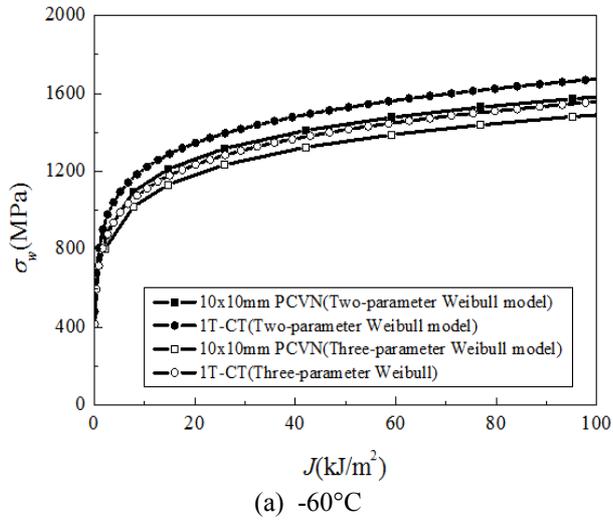


Fig. 6 Relationship between  $J$ -integral and Weibull stress at each temperature

$J$ -적분값의 관계와 10x10mm PCVN 유한요소해석을 통해 계산된 와이블 응력 및  $J$ -적분값의 관계

Table 5 Comparison results of fracture toughness diagram at each Weibull stress model

PCVN (MPa√m)	CT(MPa√m)	
	2-parameter Weibull model	3-parameter Weibull model
20	18.63	21.44
40	33.13	35.78
60	47.63	50.12
80	62.13	64.46
100	76.63	78.80

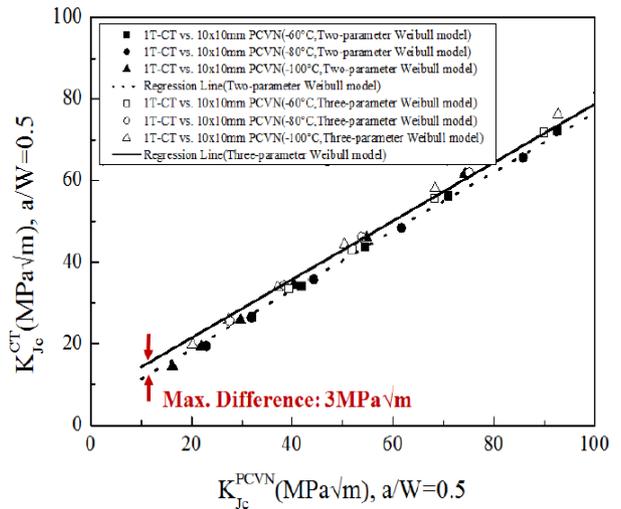


Fig. 7 Fracture toughness diagram

를 비교하여 파괴인성변환도표를 제시하였다. 즉, 동일한 와이블 응력을 가질 때 1T-CT 시편과 10x10mm PCVN 시편의 상관관계를 비교하였다. 그 결과 상대적으로 큰 형상계수를 가지는 2-매개변수 기반의 모델이 3-매개변수 기반의 모델보다 상대적으로 큰 와이블 응력값을 가지게 된다. Fig. 6은 각 온도별 와이블 응력과  $J$ -적분값의 관계를 나타낸 것이다.

### 3.3 파괴인성평가

유한요소해석을 통해 계산한 와이블 응력과  $J$ -적분값을 활용하여 파괴인성변환도표를 작성하였다. 파괴인성변환도표는 형상계수와 식 (4)를 활용하여

계산된 와이블 응력이 동일할 때, 10x10mm PCVN 시편의 파괴인성과 1T-CT 시편 파괴인성의 선형적 관계를 보여준다. 두 와이블 응력모델의 매개변수들은 온도의존성을 고려할 때 정량적인 차이를 보이므로, Fig. 7과 같이 선형적인 파괴인성변환도표에 영향을 미치게 된다. Table 5는 PCVN 시편의 파괴인성값을 사용하여 두 가지 형태의 와이블 응력모델로 예측한 CT 시편의 파괴인성값을 비교한 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 각각의 응력모델로 예측한 파괴인성값 사이에는 2~3MPa $\sqrt{m}$ 의 차이가 발생한다. 따라서 10x10mm PCVN 시편의 파괴인성을 기반으로 하여, 2-매개변수 와이블 응력모델의 형상계수를 활용하여 계산된 1T-CT 시편의 파괴인성을 3-매개변수 와이블 응력모델의 형상계수를 활용하여 계산된 1T-CT 시편의 파괴인성으로 변환하기 위해 다음과 같은 식을 제안하고자 한다.

$$K_{Jc}^{3-para., CT} = K_{Jc}^{2-para., CT} + 2.5(MPa) \quad (6)$$

$$= (K_{Jc}^{PCVN} \times 0.725 + 4.13) + 2.5$$

상술한 식과 -80°C 파괴인성 데이터를 활용하여 마스터커브의 기준온도를 계산하였다. 그 결과 2-매개변수 와이블 응력모델을 활용한 기준온도는 -69.3°C였으며, 3-매개변수 와이블 응력모델을 활용한 기준온도는 -70.8°C로 둘 사이에는 1.5°C의 정량적인 차이가 발생하였다. 따라서 식 (6)을 활용하면, 기존 문헌들에 제시되어 있는 비교적 단순하나 상대적으로 정확도가 떨어졌던 2-매개변수 와이블 응력모델 값들을 보다 정확도가 높은 3-매개변수 와이블 응력모델 값으로 변환할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 손상모델의 온도의존성을 반영하여 취성파괴평가를 수행하였으며, 주요내용은 아래와 같다.

(1) 다중 섭 유전자알고리즘과 와이블 응력모델을 연계하여 손상모델 매개변수 결정절차를 개선

하였으며, -60, -80, -100°C에서의 SA508 탄소강 파괴인성 시험데이터를 활용하여 매개변수 결정절차의 타당성을 확인하였다.

(2) 와이블 응력모델의 매개변수 중 형상계수는 온도에 거의 영향을 받지 않는 반면, 참조응력과 하한계응력은 온도에 상당한 영향을 받음을 확인하였다. 또한 2-매개변수 와이블 응력모델과 3-매개변수 와이블 응력모델에 따른 형상계수와 참조응력은 평균적으로 각각 5.3, 83.3MPa의 차이를 보였다.

(3) 간단하나 상대적으로 정확도가 떨어졌던 2-매개변수 와이블 응력모델을 3-매개변수 와이블 응력모델 값으로 변환할 수 있는 식을 제안하였다. 이를 활용하면, 연성-취성 천이영역에서 취성 파괴를 보다 정확하게 예측할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국원자력연구원 및 국토해양부 LNG플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었기에 관계자 분들께 감사드립니다. 또한 항상 연구자들을 격려하시고 논문 작성에 조언해 주신 고(故) 김영진 교수님께 진심으로 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Sungkyunkwan University, 2009, "Development of Numerical Analysis Techniques Based on Damage Mechanics and Fracture Mechanics," KAERI/CM-1249/2009.
- (2) U.S. NRC, 2007, "Temperature Dependence of Weibull Stress Parameters: Studies Using the Euro-Material Similar to ASME A508 Class-3 Steel," NUREG/CR-6930.
- (3) Goldberg, D. E., 1989, "Genetic Algorithm in Search, Operation and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Co. Inc., New York.
- (4) Beremin, F. M., 1983, "A Local Criterion for Cleavage Fracture of a Nuclear Pressure Vessel Steel," *Metallurgical Transactions*, Vol. 14A, pp. 2277~2287.
- (5) Ko, H. O., Chang, Y. S., Choi, J. B., Kim, Y. J., Kim, M. C. and Lee, B. S., 2007, "Calibration of Weibull Stress Parameters for Carbon Steel using

- Genetic Algorithm," 2007 *Fall Conference of KSPE*.
- (6) Choi, S. B., Jeong, J. U., Kim, Y. J., Chang, Y. S., Kim, M. C. and Lee, B. S., 2011, "Brittle Fracture Evaluation of RPV Steels in Use of Multi-Island Genetic Algorithm and Local Approach," 2011 *Annual Conference of KPVP*.
- (7) Petti, J. P. and Dodds R. H. Jr., 2004, "Constraint Comparisons for Common Fracture Specimens: C(T)s and SE(B)s," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, pp. 2677~2683.