

< 논 문 >

원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측 (3)

- 파괴저항곡선 예측을 위한 프로그램의 개발 -

장윤석* · 석창성** · 김영진**

(1996년 8월 20일 접수)

Prediction of Fracture Resistance Curves for Nuclear Piping Materials (III)

- Development of Computer Program for Fracture Resistance Curve Prediction -

Yoon-Suk Chang, Chang-Sung Seok and Young-Jin Kim

Key Words : J-R Curve Prediction(JRCP : 파괴저항곡선 예측) Fracture Strain(파괴변형률), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

In order to perform leak-before-break design of nuclear piping systems and integrity evaluation of reactor vessels, full stress-strain curves and fracture resistance (J-R) curves are required. However it is time-consuming and expensive to obtain J-R curves experimentally. To resolve these problems, three different methods for predicting J-R curves from tensile data were proposed by the authors previously. The objective of this paper is to develop a computer program based on those J-R curve prediction methods. The program consists of two major parts; the main program part for the J-R curve prediction and the database part. Several case studies were performed to verify the program, and it was shown that the predicted results were, in general, in good agreement with the experimental ones.

기 호 설 명

a : 균열길이
 a_o : 피로예비균열의 길이
 Δa : 균열진전량
 B : 시편두께
 b_o : 시편의 잔여길이
 C_1, C_2 : 파괴저항곡선의 상수
 J : J-적분값
 M : 재료별 특성계수
 RA : 단면수축률
 W_c : 변형률에너지밀도의 임계값
 ϵ_c : 파괴변형률
 ϵ'_c : 파괴변형률의 수정값

ϵ_{FEM} : 유한요소법으로 구한 균열선단의 변형률
 $\epsilon_{c,FEM}$: ϵ_{FEM} 의 임계값
 ϵ_0 : 기준변형률
 α, n : Ramberg-Osgood 상수
 σ_f : 유동응력
 σ_0 : 기준응력
 σ_Y : 항복강도
 σ_U : 인장강도

1. 서 론

원자력발전소 배관계통의 탄소성 파괴역학(Elastic Plastic Fracture Mechanics : EPFM) 해석에 필요한 재료의 기준 파괴저항(J-R)곡선을 확보하기 위하여 저자들은 전보^(1,2)에서 SA106 Gr. C 탄

*회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

**회원, 성균관대학교 기계공학부

소강 및 SA312 TP316 스테인레스강 등 대표적인 원자력 배관재료를 대상으로 J-R곡선 예측을 위한 3가지 방법을 제시한 바 있다. 첫번째 방법인 유한요소법을 이용한 J-R곡선 예측방법의 경우 정확성 및 비교적 타당한 이론적 근거를 보유한 장점이 있으나 일정 수준 이상의 전문성과 상당한 시간 및 비용이 소요되는 단점이 있으며, 두번째 방법인 실험식을 이용한 J-R곡선 예측방법의 경우 간편하다는 장점이 있으나 보다 다양한 재료시험 결과를 토대로 한 실험식의 수정 또는 확장이 요구되는 단점이 있다. 한편 세번째 방법인 응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선 예측방법의 경우 실험식을 이용한 J-R곡선 예측방법과 마찬가지로 간편하다는 장점이 있으나, 상이한 형태의 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선을 갖는 재료에 대한 일반적인 적용성 여부가 문제점으로 지적될 수 있다.

본 논문의 목적은 원자력 배관재료의 J-R곡선 예측의 편의를 도모하기 위하여 기존에 제시한 바 있는 3가지 J-R곡선 예측방법을 토대로 한 통합 프로그램을 개발하기 위한 것이다. 이 과정에서 원자력발전소 배관용 재료의 실험결과를 사용하고자 하며,^(3,4) 예측 및 실험결과를 데이터베이스화하고자 한다. 또한 J-R곡선 예측 프로그램을 이용한 사례 연구를 수행함으로써 J-R곡선 예측방법 및 이를 토대로 개발한 J-R곡선 예측 프로그램의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 파괴저항곡선 예측방법

J-R곡선 예측 프로그램 개발에 사용된 정보^(1,2)의 3가지 J-R곡선 예측방법을 요약하면 다음과 같다.

2.1 유한요소법을 이용한 J-R곡선 예측방법

1단계 : 균열길이/시편폭 비(a/W)를 변화시키면서 유한요소해석을 수행하여 하중-하중선변위(P - δ)곡선과 균열선단 첫번째 요소의 1/4위치에서의 응력 및 변형률(ϵ_{FE})을 계산한다.

2단계 : 각각의 P - δ 곡선상에서 파괴변형률과 평균 수정계수의 곱 $[(\epsilon_c)(f_{mean})]$ 에 해당하는 P 와 δ 를 구하고, 이를 이용한 변적(A_{pl})을 계산한다.

3단계 : J-적분값은 2단계에서 구한 A_{pl} 과 ASTM E813 및 E1152의 절차를 따라 다음과 같이 계산한다.

$$J = A_{pl} \cdot \eta / B \cdot b_i$$

여기서, $\eta = 2 + 0.522b_i/W$ 이다.

4단계 : 1단계에서 설정한 균열길이와 3단계에서 구한 J-적분값을 이용하여 J-R곡선을 작성하며, 이때 균열진전 개시점 이전의 데이터는 ASTM E813의 둔화선(blunting line) 계산식을 이용하여 생성한다.

$$J = 2\sigma_r \Delta a$$

2.2 실험식을 이용한 J-R곡선 예측방법

1단계 : J-R곡선의 상수 C_1 은 σ - ϵ 시험결과와 J-R시험 결과를 비교하여 다음과 같이 결정한다.

$$C_1 = 7.073 E [(\sigma'_v \times \epsilon_c)]^{1.245}$$

여기서, E 는 탄성계수이며, $\sigma'_v = \sigma_v/E$ 이다.

2단계 : J-R곡선의 상수 C_2 는 탄소강의 경우 0.38, 스테인레스강의 경우 0.61을 사용한다.

3단계 : 1, 2단계에서 결정한 상수 C_1 , C_2 를 이용하여 J-R곡선을 작성한다.

2.3 응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선 예측방법

1단계 : SA106 Gr.C 탄소강 및 SA312 TP316 스테인레스강의 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선을 각각 4개의 기준구간 및 5개의 기준곡선으로 분류한다.

2단계 : 임의의 σ - ϵ 곡선이 주어졌을 경우 각 재료별로 이와 가장 유사한 형태의 2개의 기준시편을 선정한다. 선정된 기준시편의 σ - ϵ 곡선과 임의의 σ - ϵ 곡선의 관계를 등간격으로 설정한 30개 위치에서 내삽 또는 외삽하여 비례관계를 결정한다.

3단계 : 2단계에서 결정한 비례관계를 이용하여 2개의 기준시편의 a/W 값 변화에 따른 유한요소해석 결과를 등간격으로 설정한 30개 위치에서 내삽 또는 외삽하여, 임의의 σ - ϵ 곡선에 해당하는 유한요소해석 결과를 결정한다.

4단계 : 3단계에서 결정한 관계를 토대로 유한요소법을 이용한 J-R곡선 예측방법에 따라 등간격으로 설정한 10개의 위치에서의 J-적분값을 계산한다.

5단계 : 3단계에서 설정한 균열길이와 4단계에서 구한 J-적분값을 이용하여 J-R곡선을 작성한다.

3. 파괴저항곡선 예측 프로그램 개발

2장에서 언급한 바 있는 3가지 J-R곡선 예측방법을 토대로 J-R곡선 예측을 위한 통합 프로그램

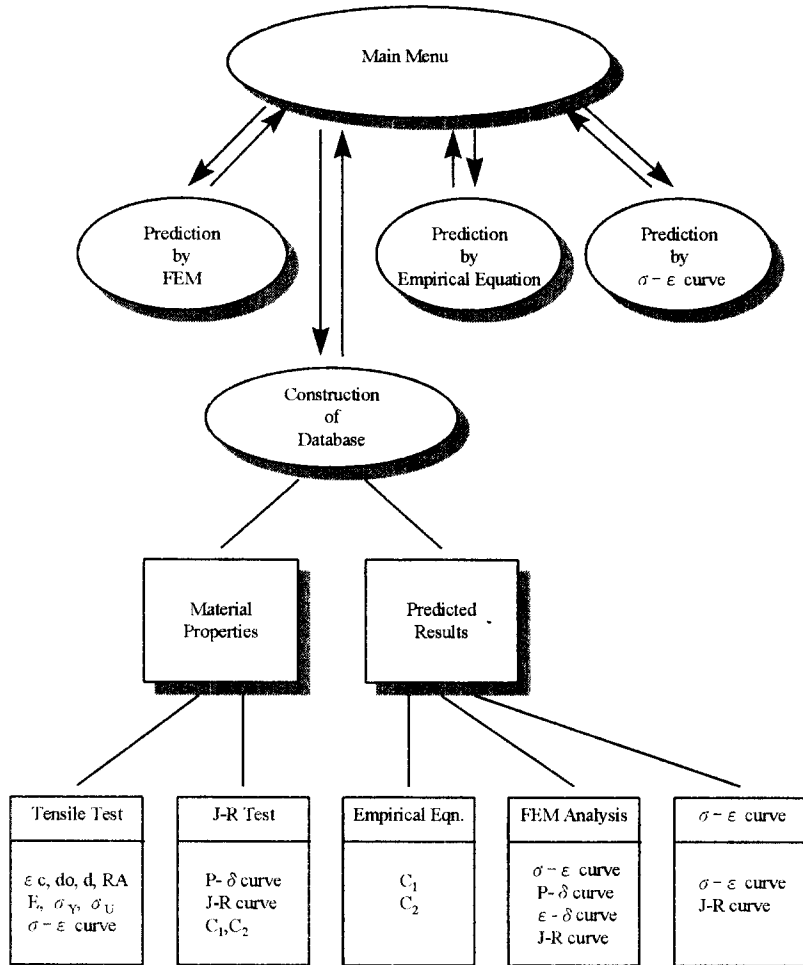


Fig. 1 Structure of JRCP system

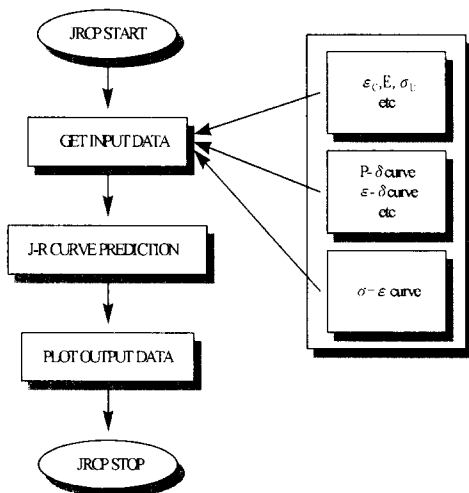


Fig. 2 Flow chart for JRCP system

을 다음과 같이 개발하였다.

Fig. 1은 원자력 배관재료의 J-R곡선 예측 프로그램인 JRCP(J-R Curve Prediction)의 개발을 위한 전체적인 구조를 나타낸 것인데, 크게 J-R곡선 예측을 위한 주 프로그램부와, 데이터의 비교 및 검색을 위한 데이터베이스부로 구분할 수 있다. Fig. 2는 JRCP 프로그램의 흐름도를 나타낸 것으로서, 재료의 파괴변형률(ϵ_c), 인장강도(σ_U), 응력-변형률($\sigma-\epsilon$)곡선, 탄소성 유한요소해석 결과 등을 입력자료로 사용하여 J-R곡선을 예측할 수 있도록 하였다. 한편 주 프로그램 및 데이터베이스 프로그램은 Turbo C++ 언어를 사용하여 구성하였으며, 통합환경 내에서 수행될 수 있도록 하였다. Fig. 3은 통합환경의 초기화면을 보여주는 것으로서, 입력부를 선정하였을 때 입력하여야 할 데이터

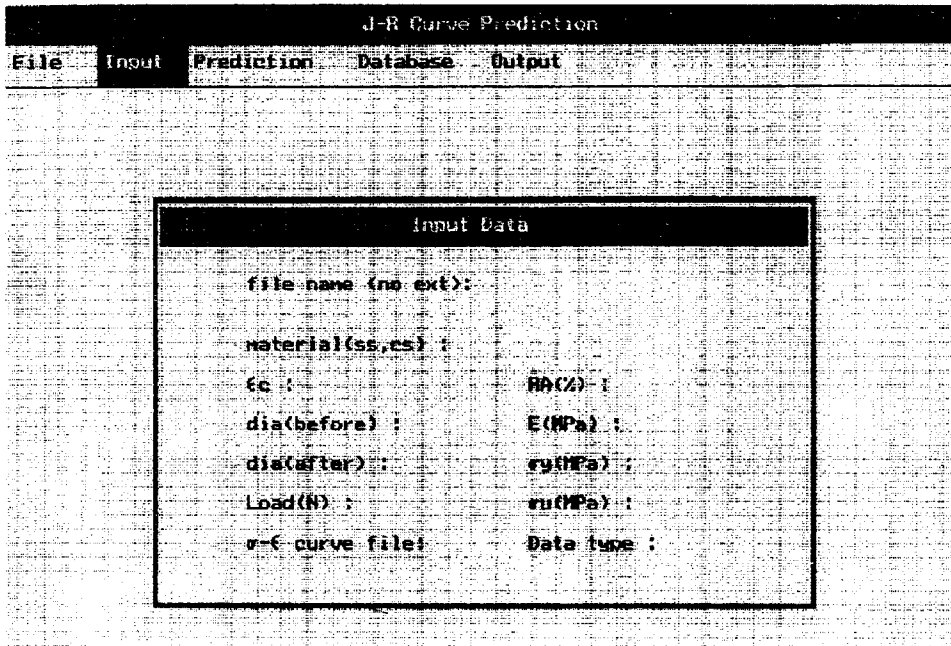


Fig. 3 Initial screen for JRCP system

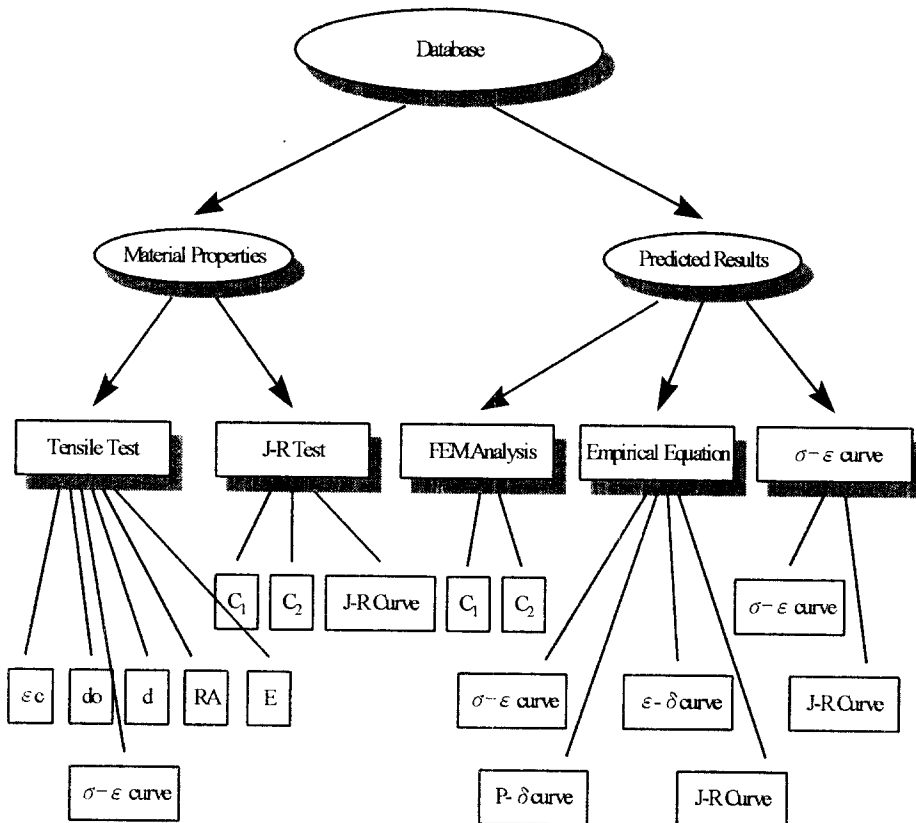


Fig. 4 Structure of JRCP database

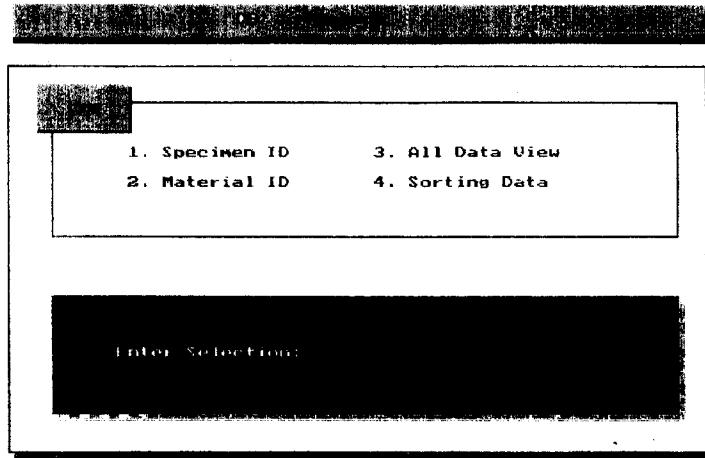


Fig. 5 Initial screen for JRCP database

| J-R Curve Prediction | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------|------------|-------|-------|-------|------------|------------|--------|---------|-------|------|
| File | Input | Prediction | | | | | | Output | | | |
| Spec | Mat | Ec | D0 | D | RA | σ_y | σ_u | E | PL | C1 | C2 |
| m1-p | CS | 0.760 | 12.70 | 10.21 | 76.00 | 214 | 482 | 189160 | 1866294 | 610.0 | 0.36 |
| m1-r | CS | 0.670 | 12.70 | 10.60 | 64.00 | 365 | 530 | 189160 | 2433410 | 614.0 | 0.37 |
| CS-l | CS | 0.550 | 12.70 | 9.65 | 64.00 | 234 | 552 | 190701 | 2112695 | 457.0 | 0.29 |
| m1-t | CS | 0.660 | 12.70 | 10.60 | 64.00 | 372 | 530 | 189160 | 2392630 | 590.0 | 0.40 |
| m1-f | CS | 0.520 | 12.70 | 10.21 | 64.00 | 270 | 469 | 189160 | 2007146 | 430.0 | 0.41 |
| m1-h | CS | 0.510 | 12.70 | 10.21 | 64.00 | 296 | 469 | 189160 | 2020121 | 404.0 | 0.51 |
| m2-c | CS | 0.390 | 12.70 | 10.20 | 54.00 | 255 | 529 | 190694 | 2112695 | 189.0 | 0.27 |
| CS-b | CS | 0.650 | 12.70 | 9.10 | 64.00 | 297 | 476 | 200292 | 2075705 | 342.0 | 0.57 |
| m1-c | CS | 0.510 | 12.70 | 10.21 | 64.00 | 276 | 462 | 189160 | 1992323 | 491.0 | 0.37 |
| m1-d | CS | 0.510 | 12.70 | 10.21 | 64.00 | 290 | 475 | 189160 | 2003135 | 402.0 | 0.47 |
| m2-i | CS | 0.270 | 12.70 | 10.20 | 42.00 | 251 | 595 | 190694 | 2112695 | 174.0 | 0.26 |
| CS-g | CS | 0.700 | 12.70 | 8.95 | 65.00 | 207 | 434 | 190701 | 1723670 | 552.0 | 0.41 |
| m1-o | CS | 0.710 | 12.70 | 10.21 | 64.00 | 214 | 482 | 189160 | 1079267 | 537.0 | 0.45 |
| m1-j | CS | 0.510 | 12.70 | 10.21 | 64.00 | 289 | 489 | 189160 | 2006041 | 459.0 | 0.34 |
| m1-g | CS | 0.510 | 12.70 | 10.20 | 65.00 | 269 | 455 | 189160 | 2112695 | 464.0 | 0.46 |

Fig. 6 Database screen for selecting carbon steel

의 항목을 나타내고 있다.

3.1 주 프로그램부

J-R곡선 예측부는 앞서 제시한 바 있는 3가지 J-R곡선 예측방법을 수록하고 있다. 먼저 사용자 입력부에서 배관재료의 파괴변형률, 항복강도(σ_y), 인장강도, 응력-변형률곡선 등의 기본적인 재료물성치를 입력한 후, 예측부에서 예측방법을 선정하면 이에 해당하는 J-R곡선을 생성할 수 있도록 하였다. 출력부는 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선을

비교할 수 있도록 구성하였는데, 실험결과가 있는 SA경우는 실험결과를, 실험결과가 없는 경우는 J-R곡선 예측에 사용된 재료의 상한계 및 하한계 실험결과를 비교 대상으로 선정하였다.

3.2 데이터베이스부

Fig. 4는 JRCP 프로그램 데이터베이스부의 구조를 나타낸 것으로서, 실험 및 유한요소해석 결과를 수록한 부분과 예측결과를 수록한 부분으로 나누어서 구축하였다. 실험 및 유한요소해석 결과로는 영

광 원자력 3/4호기 및 울진 원자력 3/4호기 배관계통에 대한 데이터를 부분적으로 수록하였으며, 예측결과는 저자들이 수행한 사례연구 결과를 수록하고자 하였다. Fig. 5는 데이터베이스부의 초기화면을 보여주는 것으로서 데이터베이스의 검색방법 선택을 요구하고 있으며, Fig. 6은 사용자가 재질의 항목을 탄소강으로 선정하였을 경우 수록하고 있는 데이터를 보여주는 화면의 일부를 나타낸 것이다.

4. 사례연구 및 토의

4.1 사례연구

JRCP 프로그램의 타당성을 검증하기 위한 사례연구를 수행하였으며, 울진 원자력 3/4호기 1차계통 배관재료인 SA508 CL1a 강에 대한 17개의 σ - ϵ 시험 및 17개의 J-R시험 결과와, SA182 F1 강에 대한 6개의 σ - ϵ 시험 및 6개의 J-R시험 결과를 대상으로 하였다.

Table 1 Tensile property determination for Ulchin unit 3/4 materials

| Material | Identification | | Experiment | | α Prediction | | n Prediction | Temp. (°C) |
|---------------|----------------|---------|------------------|------------------|---------------------|----------|--------------|------------|
| | Specimen | Orient. | σ_y (MPa) | σ_u (MPa) | EPRI | Battelle | | |
| SA508 CL1a | M1-A | L-C | 276 | 475 | 2.32 | 2.38 | 5.46 | 316 |
| | M1-B | L-C | 296 | 469 | 2.30 | 1.24 | 6.12 | 316 |
| | M1-C | L-C | 276 | 462 | 2.38 | 1.34 | 5.68 | 316 |
| | M1-D | L-C | 298 | 475 | 2.28 | 1.23 | 6.06 | 316 |
| | M1-E | L-C | 303 | 489 | 2.25 | 1.21 | 5.94 | 316 |
| | M1-F | L-C | 278 | 469 | 2.31 | 2.37 | 5.61 | 316 |
| | M1-G | L-C | 269 | 455 | 2.36 | 2.42 | 5.61 | 316 |
| | M1-H | L-C | 317 | 455 | 2.13 | 2.23 | 1.15 | 316 |
| | M1-I | L-C | 241 | 462 | 2.53 | 2.56 | 4.84 | 316 |
| | M1-J | L-C | 289 | 489 | 2.26 | 2.31 | 5.57 | 316 |
| | M1-K | L-C | 269 | 475 | 2.36 | 2.42 | 5.29 | 316 |
| | M1-L | L-C | 269 | 475 | 2.36 | 2.42 | 5.29 | 316 |
| | M1-M | L-C | 298 | 469 | 2.22 | 2.28 | 6.19 | 316 |
| | M1-N | L-C | 289 | 469 | 2.26 | 2.31 | 5.92 | 316 |
| | M1-O | L-C | 214 | 482 | 2.75 | 1.74 | 4.13 | 316 |
| | M1-P | L-C | 214 | 482 | 2.75 | 1.74 | 4.13 | 316 |
| | M1-Q | L-C | 227 | 475 | 2.63 | 2.65 | 4.42 | 316 |
| SA182 F1 | M1-R | L-C | 365 | 538 | 1.98 | 2.06 | 6.75 | 316 |
| | M1-S | L-C | 352 | 538 | 2.02 | 2.09 | 6.36 | 316 |
| | M1-T | L-C | 372 | 538 | 1.96 | 2.04 | 6.98 | 316 |
| | M1-U | L-C | 317 | 524 | 2.14 | 2.20 | 5.70 | 316 |
| | M1-V | L-C | 279 | 503 | 2.33 | 2.37 | 5.07 | 316 |
| | M1-W | L-C | 269 | 510 | 2.36 | 2.40 | 4.85 | 316 |

4.1.1 σ - ϵ 곡선의 추론

유한요소법 및 σ - ϵ 곡선을 이용한 J-R곡선의 예측방법에는 예측하고자 하는 재료의 σ - ϵ 곡선 전체가 필요하다. 그러나 사례연구에 사용된 울진원자력 3/4호기 1차계통 배관재료의 경우 항복강도, 인장강도, 단면수축률(Reduction in Area : RA)과 같은 기본적인 데이터는 보유하고 있으나 전체 σ - ϵ

곡선은 보유하고 있지 못한 상태이기 때문에, 이 경우 유한요소법 및 σ - ϵ 곡선을 이용한 J-R곡선의 예측방법을 적용할 수 없다. 따라서 J-R곡선 예측을 위하여 오차를 감수하고 σ - ϵ 곡선을 추론하고자 하며, 이 과정에서 항복강도, 인장강도, 탄성계수 등을 이용하여 σ - ϵ 곡선의 상수 α 와 n 을 추론할 수 있는 다음 식⁽⁵⁾을 이용하였다.

File Input Prediction Database Output

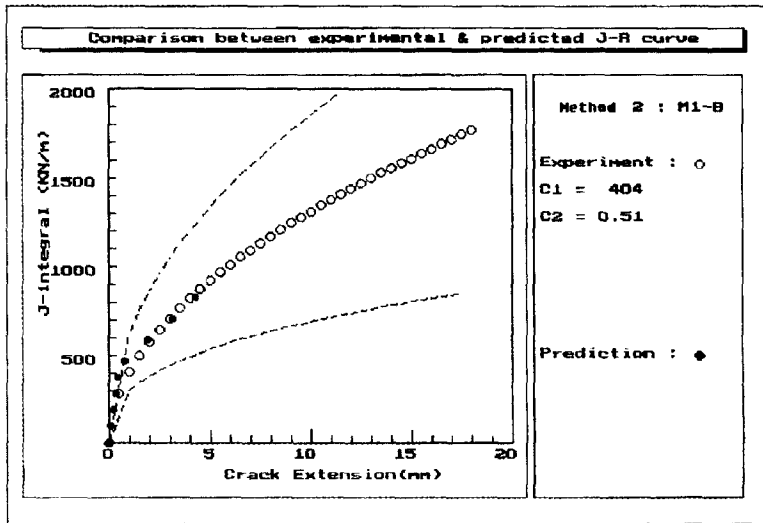


Fig.7(a) J-R curve prediction by FEM for specimen M1 B

File Input Prediction Database Output

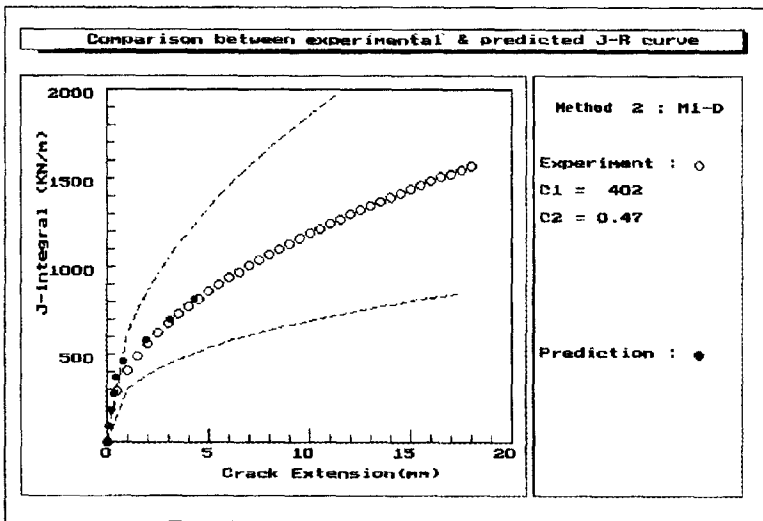


Fig.7(b) J-R curve prediction by FEM for specimen M1 D

$$\alpha = \frac{\frac{1}{\epsilon_0} \ln(1.002 + \epsilon_0) - (1.002 + \epsilon_0)}{(1.002 + \epsilon_0)^n} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{E}{2.7183n\sigma_0} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_U} \right)^n \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_Y}{\sigma_U} (1.002 + \epsilon_0) = [n \times 2.718 \ln(1.002 + \epsilon_0)]^{1/n} \quad (3)$$

여기서, σ_0 는 기준응력(reference stress)으로서 항복강도를 의미하며, ϵ_0 는 σ_0/E 이다.

식 (1)과 식 (2)는 α 와 n 값 추론을 위하여 EPRI와 Battelle 연구소에서 제시한 것이며, 식 (3)은 n 값을 구하기 위하여 Framatome사에서 제시한 것이다. 탄소강의 경우 대체적으로 식 (1)~식 (3)을 이용하여 구한 값이 실험결과와 거의 일치하는 것으로 알려져 있으며,⁶⁾ 특히 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 구한 α 와 n 값이 실험결과에 더 근접하는 것으로 파악되었다.⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 식 (1)과 식 (3)에서 구한 값을 이용하여 σ - ϵ 곡선을 결정하였다.

Table 1은 식 (1)~식 (3)을 사용하여 구한 α 와 n 값을 정리하여 나타낸 것이다.

4.1.2 유한요소법을 이용한 J-R곡선의 예측

Fig. 7은 시편M1-B, 시편M1-D, 시편M1-G에 대한 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것으로서, 균열진전량 5 mm인 경우 실험결과를

기준으로 할 때 평균 6% 정도의 차이를 보여주고 있다. 나머지 시편들의 경우 평균 24% 정도의 차이로서 앞서의 경우보다 큰 차이를 나타내고 있으나, 대체로 실험결과와 잘 일치하였다. 따라서 유한요소법을 이용한 J-R곡선의 예측결과는 균열진전 개시점 부근에서 약간의 차이를 보이지만 전반적으로 실험결과와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 3가지 J-R곡선 예측방법중 가장 정확한 기준 J-R곡선을 제시하고 있다.

Table 2는 유한요소법을 이용하여 예측한 J-R곡선의 상수 C_1 , C_2 와 J-R시험결과로부터 구한 값을 비교하여 나타낸 것이다.

4.1.3 실험식을 이용한 J-R곡선의 예측

실험식을 이용하여 재료의 J-R곡선을 예측하기 위해서는 ϵ_c 의 결정이 선행되어야 하며, 이때 σ - ϵ 시험 전후의 시편의 직경을 측정하여야 한다. 그러나 J-R곡선 예측방법 검증에 사용된 재료의 경우 시편 직경에 대한 측정결과를 확보하지 못하여, 재료의 연성을 나타낼 수 있는 대표적 파라미터인 RA로부터 ϵ_c 를 결정하고자 한다. RA를 시편의 직경(d , d_0) 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$RA = 1 - (d/d_0)^2 \quad (4)$$

전보^(1,2)에서 제시한 바 있는 ϵ_c 결정식과 식 (4)를 함께 고려하면 ϵ_c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

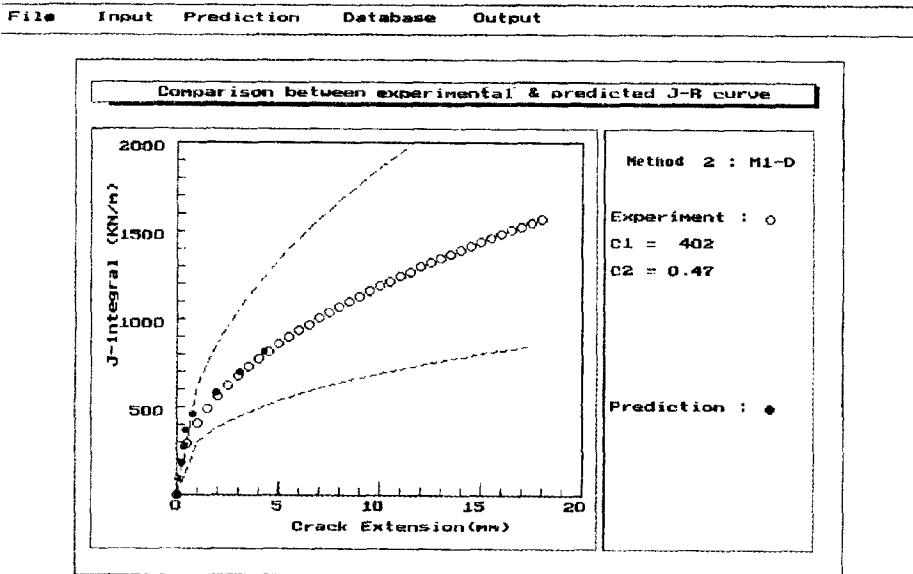


Fig. 7(c) J-R curve prediction by FEM for specimen M1-G

Table 2 J-R curve prediction results by FEM for Ulchin unit 3/4 materials

| Material | Identification | | a_0/W | Temp. ($^{\circ}C$) | Experiment | | Prediction | | Difference at $\Delta a=5$ mm (%) |
|---------------|----------------|---------|---------|--------------------------|------------|-------|------------|-------|---|
| | Specimen | Orient. | | | C_1 | C_2 | C_1 | C_2 | |
| SA508 CL1a | M1-A | L-C | 0.60 | 316 | 434 | 0.48 | 436 | 0.46 | -2.7 |
| | M1-B | L-C | 0.60 | 316 | 404 | 0.51 | 443 | 0.47 | 2.8 |
| | M1-C | L-C | 0.60 | 316 | 491 | 0.37 | 450 | 0.49 | 11.2 |
| | M1-D | L-C | 0.61 | 316 | 402 | 0.47 | 442 | 0.47 | 10.0 |
| | M1-E | L-C | 0.60 | 316 | 457 | 0.40 | 452 | 0.37 | -5.8 |
| | M1-F | L-C | 0.60 | 316 | 438 | 0.41 | 473 | 0.40 | 6.3 |
| | M1-G | L-C | 0.60 | 316 | 464 | 0.46 | 432 | 0.48 | -3.9 |
| | M1-H | L-C | 0.62 | 316 | 486 | 0.39 | 457 | 0.40 | -4.4 |
| | M1-I | L-C | 0.60 | 316 | 417 | 0.42 | 475 | 0.41 | 12.1 |
| | M1-J | L-C | 0.60 | 316 | 459 | 0.34 | 509 | 0.33 | 9.1 |
| | M1-K | L-C | 0.61 | 316 | 514 | 0.36 | 507 | 0.36 | -1.7 |
| | M1-L | L-C | 0.60 | 316 | 416 | 0.44 | 450 | 0.48 | 15.4 |
| | M1-M | L-C | 0.60 | 316 | 399 | 0.46 | 440 | 0.47 | 12.1 |
| | M1-N | L-C | 0.61 | 316 | 421 | 0.44 | 443 | 0.48 | 12.2 |
| | M1-O | L-C | 0.61 | 316 | 537 | 0.45 | 730 | 0.56 | 62.3 |
| M1-P | L-C | 0.61 | 316 | 610 | 0.36 | 760 | 0.62 | 89.3 | |
| M1-Q | L-C | 0.60 | 316 | 521 | 0.44 | 713 | 0.44 | 36.9 | |
| M1-R | L-C | 0.60 | 316 | 614 | 0.37 | 724 | 0.49 | 43.0 | |
| M1-S | L-C | 0.60 | 316 | 551 | 0.46 | 656 | 0.45 | 17.2 | |
| SA182 | M1-T | L-C | 0.60 | 316 | 598 | 0.40 | 698 | 0.48 | 32.8 |
| F1 | M1-U | L-C | 0.60 | 316 | 600 | 0.44 | 734 | 0.46 | 26.3 |
| | M1-V | L-C | 0.60 | 316 | 507 | 0.51 | 717 | 0.54 | 48.4 |
| | M1-W | L-C | 0.60 | 316 | 624 | 0.41 | 793 | 0.48 | 40.4 |

$$\epsilon_c = -\ln(1-RA) \quad (5)$$

그러나 식 (5)로부터 구한 ϵ_c 를 J-R곡선 예측에 직접 사용하는 것이 부적절하여 다음과 같이 수정된 파괴변형률 ϵ_c' 를 구하였다.

$$\epsilon_c' = -M \ln(1-RA) \quad (6)$$

여기서, M 은 재료별 특성을 고려한 계수로서, 탄소강의 경우 0.5, 스테인레스강의 경우 1.0을 사용하였다.

Table 3은 식 (6)을 이용하여 구한 ϵ_c' 를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 시편M1-J, 시편M1-P, 시편M1-R에 대하여 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것으로서, 균열전진량 5 mm인 경우 실험결과를 기준으로 할 때 평균 14% 정도의 차이를 보여주고 있다. 나머지 시편들의 경우 평균 27% 정도의 차이가 발생하였는데, 이와 같이 예측으로 구한 J-R곡선이 실험결과에 비하여 전반적으로 낮은 경향을 보이는 이유는 $[(\sigma_v)(\epsilon_c')]$ 에 대한 상수 C_1 값

Table 3 Calculated fracture strain for Ulchin unit 3/4 materials

| Material | Identification | | RA (%) | ϵ_c' | Temp. (°C) |
|------------|----------------|---------|-----------|---------------|---------------|
| | Specimen | Orient. | | | |
| SA508 CL1A | M1-A | L-C | 63 | 0.50 | 316 |
| | M1-B | L-C | 65 | 0.51 | 316 |
| | M1-C | L-C | 64 | 0.51 | 316 |
| | M1-D | L-C | 64 | 0.51 | 316 |
| | M1-E | L-C | 61 | 0.49 | 316 |
| | M1-F | L-C | 66 | 0.52 | 316 |
| | M1-G | L-C | 65 | 0.51 | 316 |
| | M1-H | L-C | 66 | 0.52 | 316 |
| | M1-I | L-C | 66 | 0.52 | 316 |
| | M1-J | L-C | 65 | 0.51 | 316 |
| | M1-K | L-C | 66 | 0.52 | 316 |
| | M1-L | L-C | 64 | 0.51 | 316 |
| | M1-M | L-C | 64 | 0.51 | 316 |
| | M1-N | L-C | 64 | 0.51 | 316 |
| | M1-O | L-C | 76 | 0.71 | 316 |
| | M1-P | L-C | 78 | 0.76 | 316 |
| | M1-Q | L-C | 76 | 0.71 | 316 |
| SA182 F1 | M1-R | L-C | 74 | 0.67 | 316 |
| | M1-S | L-C | 71 | 0.62 | 316 |
| | M1-T | L-C | 73 | 0.66 | 316 |
| | M1-U | L-C | 73 | 0.66 | 316 |
| | M1-V | L-C | 75 | 0.69 | 316 |
| | M1-W | L-C | 71 | 0.69 | 316 |

이 과소평가되었기 때문인 것으로 생각된다. 한편 균열진전량 5 mm에서 예측 및 실험으로 구한 J-적분값의 차이를 정량화한 결과는 전반적으로 J-R곡선 예측결과의 타당성을 보여주고 있다.

4.1.4 응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선의 예측

Fig. 9는 시편M1-F에 대한 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것으로서, 예측 및 실험결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 나머지 시편들의 경우 균열진전량 5 mm인 경우 평균 22% 정도의 차이를 보이고 있으며, 균열진전량 5 mm

에서 예측 및 실험으로 구한 J-적분값의 차이를 정량화한 결과는 전반적으로 J-R곡선 예측결과의 타당성을 보여주고 있다.

4.2 토의

사례연구에 사용된 울진원자력 3/4호기 1차계통 배관재료는 실험시 σ - ϵ 곡선 전체를 측정하지 않았기 때문에, 유한요소법 및 σ - ϵ 곡선을 이용한 J-R곡선 예측방법의 경우 부득이 타 연구자가 제안한 식 (5)을 사용하여 σ - ϵ 곡선을 추론하는 형식을 취하였다. 또한 파괴변형률 계산에 필요한 인장시편

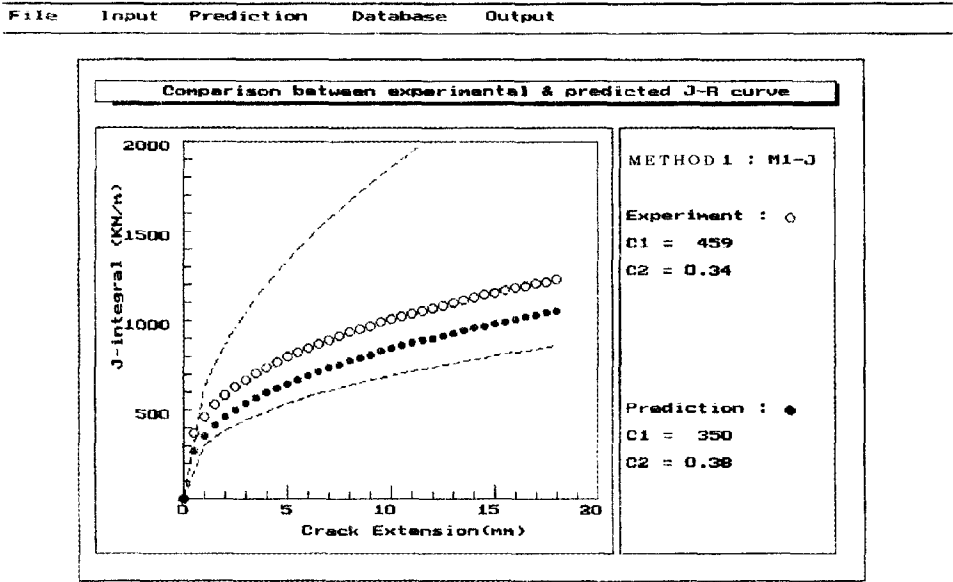


Fig. 8(a) J-R curve prediction by empirical equation for specimen M1-J

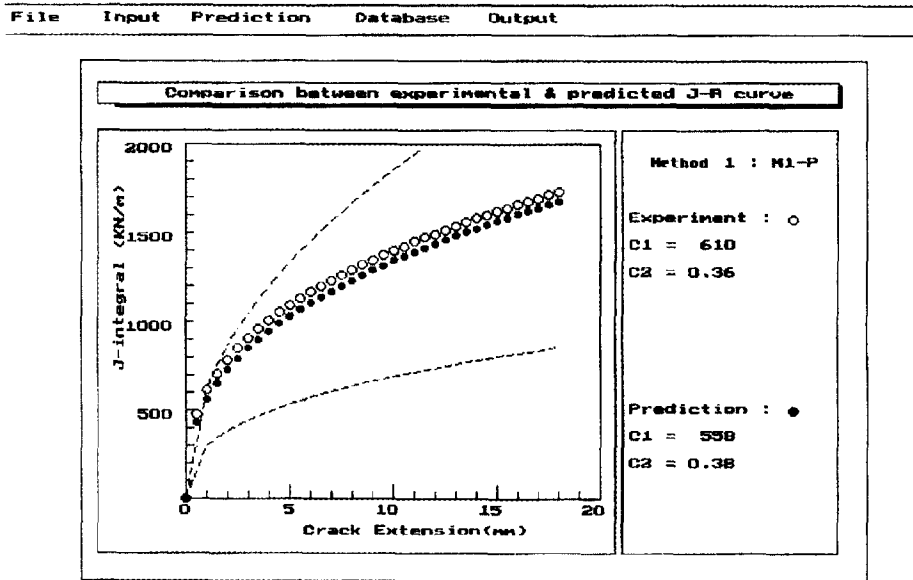


Fig. 8(b) J-R curve prediction by empirical equation for specimen M1-P

의 시험 전후의 직경에 대한 측정값을 확보하지 못하였기 때문에, 이에 준하는 단면수축률로부터 파괴변형률을 결정하였다. 따라서 3가지 예측방법을 이용한 예측결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하였으나, 앞서 언급한 문제점들이 J-R곡선 예측결과에의 정확성을 떨어뜨리는 요인으로 작용하였을 것으

로 판단된다.

한편 J-R곡선 예측방법의 수정 또는 검토를 위해서는 사례연구에 사용할 수 있는 추가데이터의 확보가 필수적이다. 특히 응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선 예측결과는 4.1항에 제시한 바와 같이 전반적으로 타당한 것으로 나타나고 있으나 이는

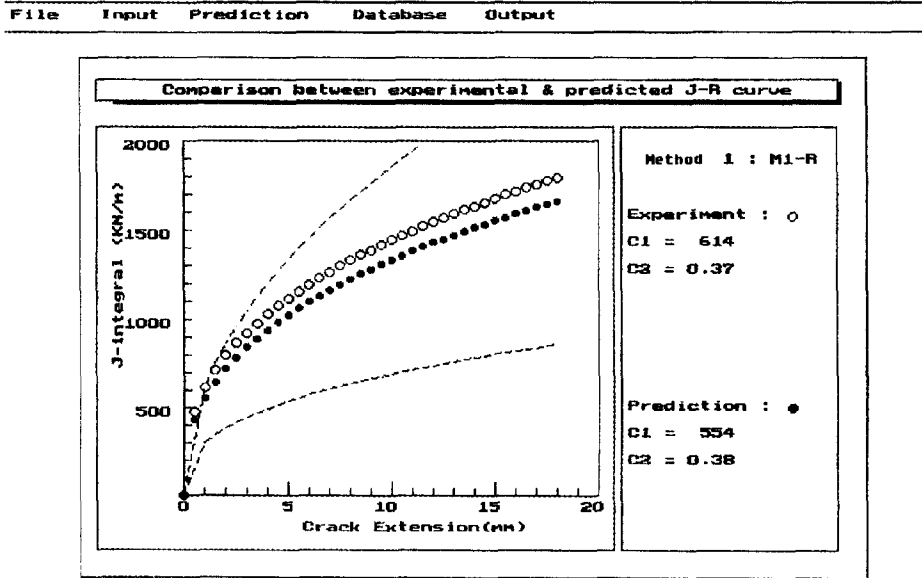


Fig. 8(c) J-R curve prediction by empirical equation for specimen M1-R

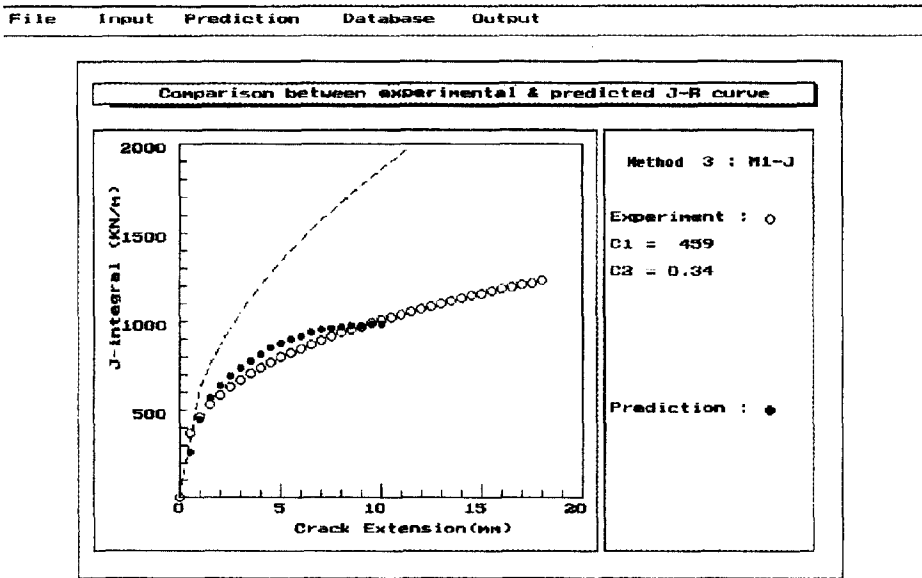


Fig. 9 J-R curve prediction by $\sigma - \epsilon$ curve for specimen M1-F

영광 원자력 3/4호기 배관재료와 울진 원자력 3/4호기 배관재료의 $\sigma - \epsilon$ 곡선과 J-R곡선의 형태가 유사하였기 때문이며, 아직까지 이 방법의 일반적인 적용성 여부는 단언할 수 없는 상태이다. 따라서 본 논문에서 개발한 JRCP 프로그램의 주 프로그램부와 데이터베이스부는 원자력 배관재료에 대한 신

뢰성있는 예측방법 및 시험결과가 확보될 경우 확장이 가능하도록 모듈(module)별로 구성하였으며, 이와 관련된 연구는 현재 여러 연구자에 의해 수행 중에 있다.

5. 결 론

이미 제시한 바 있는 3가지 J-R곡선 예측방법을 토대로 J-R곡선을 예측할 수 있는 통합 프로그램인 JRCP를 개발하였으며, 이를 원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) JRCP 프로그램은 J-R곡선 예측을 위한 주 프로그램부와 데이터베이스부로 구성되어 있으며, 통합환경하에서 수행될 수 있도록 하였다.

(2) 울진 원자력 3/4호기 배관재료를 대상으로 사례연구를 수행하여 구한 예측결과는 실험결과와 대체로 잘 일치하였으며, J-R곡선 예측방법 및 통합 프로그램의 타당성도 입증되었다.

후 기

본 연구는 1995년도 한국과학재단 핵심전문 연구비(951-1009-036-2)에 의하여 수행되었으며, 이에 과학재단 관계자들에게 감사사를 드립니다.

참고문헌

(1) 장윤석, 석창성, 김영진, 1995, "원자력 배관

재료의 파괴저항곡선 예측 (1)," 대한기계학회논문집, 제19권, 제4호, pp. 1051~1061.

(2) 김영진, 석창성, 장윤석, 1997, "원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측 (2)," 대한기계학회논문집, 제21권, 제11호, pp. 1786~1795.

(3) Kim, Y. J., Seok, C. S., Chang, Y. S., Kim, J. O. and Ra, I. S., 1995, "Fracture Properties Evaluation of Carbon Steel Piping for Main Steam Line," *Int. J. of Nuclear Engineering and Design*, Vol. 158, pp. 241~251.

(4) 김영진, 석창성, 박종주, 강병구, 1994, "울진 원자력발전소 3/4호기용 1차계통 배관재료의 파괴저항 특성," 상균관대학교 과학기술연구소.

(5) ASME Working Group on Flaw Evaluation, 1987, "Working Papers on Development of Criteria for Assessment of Reactor Vessels with Low- Upper-Shelf Fracture Toughness."

(6) EPRI, 1982, "Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects," *EPRI NP-2431*.

(7) 김영진, 석창성, 손상환, 이진호, 전현규, 이학래, 1995, "배관건전성평가 전문가시스템 개발," *KINS/HR-121*.