

하드웨어-인-더-루프 기반의 배관 평가 시뮬레이터의 개발

허남수* · 차현주*** · 최재봉* · 김영진* · 표창률**
(1999년 12월 15일 접수, 2001년 5월 14일 심사완료)

Development of a Piping Integrity Evaluation Simulator Based on the Hardware-in-the-Loop Simulation

Nam-Su Huh, Hun-Joo Cha, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim and Chang-Ryul Pyo

Key Words: Curved Wide-Plate(휨 광폭 평판), DCPD(직류전위차), Full-Scale Pipe(실배관), Leak-Before-Break(파단전누설), Through-Wall Crack(관통균열)

Abstract

In order to verify the analytical methods predicting failure behavior of cracked piping, full-scale pipe tests are crucial in nuclear power plant piping. For this reason, series of international test programs have been conducted. However, full-scale pipe tests require expensive testing equipment and long period of testing time. The objective of this paper is to develop a test system which can economically simulate the full-scale pipe test regarding the integrity evaluation. This system provides the failure behavior of cracked pipe by testing a wide-plate specimen. The system was developed for the integrity evaluation of nuclear piping based on the methodology of hardware-in-the-loop (HiL) simulation. Using this simulator, the piping integrity can be evaluated based on the elastic-plastic behavior of full-scale pipe, and the high cost full-scale pipe test may be replaced with this economical system.

1. 서 론

국내 원자력발전소의 주요기기(고에너지 배관, 원자로용기, 가압기, 증기발생기 등)는 가동년수의 증가에 따른 노후화로 인하여 균열 발생 가능성이 높아지고 있으며, 이로 인해 파괴역학적 건전성 평가가 요구되고 있다. 원자력발전소 주요기기의 건전성 유지는 구조물의 안전성과 관련하여 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 배관의 경우, 엄격한 기준 및 규격에 따라 설계, 제작됨에도 불구하고 많은 균열 발생 사례^(1,2)가 보고되고 있으며, 이로 인한 파손 가능성의 최소화 및

2차적 파급효과 방지를 위한 건전성 평가를 수행하고 있다. 또한 최근 원자력발전소 배관 설계시 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 개념이 신규 및 가동중인 원자력발전소 배관에 활발하게 적용됨에 따라 이의 타당성 입증 및 검증에 위한 배관내 균열 안정성 평가법과 파괴물성치의 확보 등이 요구되고 있다.^(3,4)

원자력발전소 배관에 존재하는 균열의 안정성 평가나 배관계에 대한 LBB 설계를 위해서는 먼저 탄소성 파괴역학 해석을 위한 해석방법의 개발 및 검증이 이루어져야 하며 이를 위해서는 실배관(full-scale pipe)에 대한 실증시험이 필수적이다. 그러나 실배관에 대한 실증시험을 수행하기 위해서는 시험설비의 구성에 막대한 비용 및 시간이 소요되기 때문에 선진국에서도 국제공동연구^(5~8)를 통해 제한된 경우에 대해서만 수행되고 있다. 국내의 경우는 시험기술 및 설비의 미비로 인해 실증시험을 수행하지 못하고 있으며 관련 데이터를 외국에 의존하고 있는 형편이다. 따라

+ 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276
* 회원, 성균관대학교 기계공학부
** 인덕대학 기계과
*** 성균관대학교 기계공학부

서 현실적이고 경제적으로 배관 건전성 평가를 수행할 수 있는 시험기법의 개발이 필요하다.

실배관의 거동에 준하면서도 경제적으로 배관 건전성 평가를 수행할 수 있는 방법으로 하드웨어-인-더-루프(hardware-in-the-loop; HiL) 시뮬레이션이 있다. HiL은 기존의 소프트웨어 알고리즘에서 비선형성이 심하거나 해석하기 어려운 부분만을 실제 하드웨어로 대체하여 시뮬레이션을 수행하는 방법으로써 현실적으로 시험이 불가능하거나 시험비용이 고가인 우주 항공 산업 분야에서 처음으로 도입되었다. 최근에는 차량의 성능 향상을 위해 자동차 업계에서 활발하게 적용하고 있다.^(9,10)

본 논문의 목적은 HiL 방법을 기반으로 하여 막대한 비용과 시간이 소요되는 실배관의 균열 진전 거동 평가를 모사할 수 있는 배관 평가 시뮬레이터의 개념을 제시하고 적용성을 평가하는 것이다.

2. 배관 평가 시뮬레이터의 구성

배관 평가 시뮬레이터는 HiL 방법을 이용하여 실시간으로 배관에 존재하는 균열 성장의 시뮬레이션을 수행하는 장치이다. 본 방법의 특징은 실배관에 대한 해석을 수행하는 소프트웨어 알고리즘 속에 국부적으로 탄소성 거동을 하는 균열 부위를 흰 광폭 평판(curved wide-plate)으로 채워하여 서브루틴으로 사용하는 것이다. 배관 평가 시뮬레이터는 유한요소해석을 수행하는 소프트웨어 부분, 실제 균열이 있는 흰 광폭 평판에 대한 시험을 수행하는 하드웨어 부분, 그리고 얻어진 결과를 실시간으로 출력하는 디스플레이 부분으로 구성된다. Fig. 1은 배관 평가 시뮬레이터의 구성과 흐름을 나타낸 것으로 각 부분의 세부적인 내용과 기능은 다음과 같다.

2.1 소프트웨어 부분

- 하중 조건 생성부

하중 조건 생성부는 실배관에 작용하는 하중의 변화를 모사하는 부분이다. 원자력발전소 배관에는 굽힘 모멘트와 내압이 동시에 작용되지만 균열 진전 거동에 미치는 영향은 굽힘 모멘트가 지배적이다. 따라서 본 논문에서는 굽힘 모멘트만을 고려하였다.

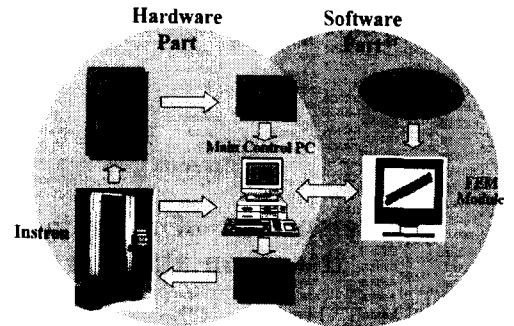


Fig. 1 A schematic illustration of piping integrity evaluation simulator

- 유한요소해석부

유한요소해석부는 흰 광폭 평판에 작용하는 경계조건을 구하기 위해 하중 조건 생성부에서 정의한 실배관의 하중 조건을 바탕으로 전체 배관 모델에 대한 유한요소해석을 수행하는 부분이다. 유한요소해석으로 구한 전체 배관의 변형률 값을 이용하여 흰 광폭 평판에 작용시킬 하중 스케줄을 정의한다. 유한요소해석부의 구성을 위해서 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾를 사용하였다.

2.2 하드웨어 부분

- 흰 광폭 평판

원자력발전소 배관의 건전성 평가법은 탄소성 파괴역학 매개변수인 J -적분에 기초하고 있으며, 이때 J -적분이 파괴인성치 측정에 사용되는 시편이나 실배관의 균열부 응력 상태를 정확하게 예측한다고 가정하고 있다. 그러나 이러한 가정은 실배관 균열부의 구속(constraint)이 시편에 비해 작을 경우 지나치게 보수적인 평가 결과를 초래한다. 구속은 인장 하중인 경우가 굽힘 하중인 경우보다 작으며, 균열이 얇은 경우가 깊은 경우보다 작은 것으로 알려져 있다. 원자력발전소 배관의 경우도 전체적으로 굽힘 모멘트가 작용되지만(Fig. 2(a)), 균열부는 국부적으로 인장 하중 상태(Fig. 2(b))로 모사할 수 있다. 따라서, 배관 평가 시뮬레이터에서는 실배관의 구속 상태를 모사할 수 있는 인장 하중이 작용하는 흰 광폭 평판을 이용하여 실배관의 균열 거동을 모사한다. 흰 광폭 평판은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실배관

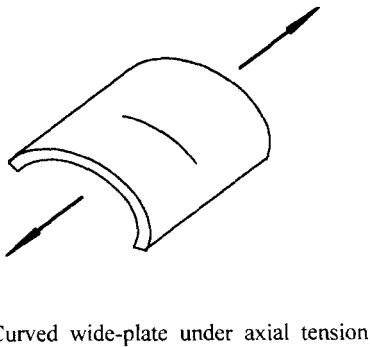
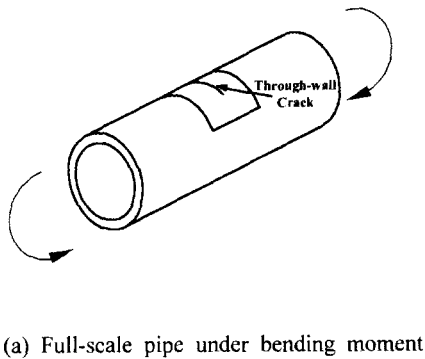


Fig. 2 A curved wide-plate specimen configuration subject to axial tension

의 균열부에서 채취하며 피로하중에 의해 예비 관통균열(through-wall crack)을 생성한다. 하중은 실패관과 동일하게 작용될 수 있도록 구성한다. 즉, 실패관에 대한 유한요소해석 결과를 토대로 시편 추출 부위에 작용하는 하중 조건이 제작된 흰 광폭 평판에 시험기를 통해 모사될 수 있도록 설계한다.

본 논문에서는 표준 시편^(12,13)인 CT(Compact Tension) 시편과 SENB(Single Edge Notched Bending) 시편, 흰 광폭 평판, 그리고 실패관에 대해 3차원 유한요소해석을 이용한 $J-Q$ 해석을 수행하여 균열부의 구속 상태를 평가하였으며, 이를 통해 흰 광폭 평판을 이용한 실패관 균열 거동 해석의 타당성을 입증하였다. Fig. 3은 해석 결과를 나타낸 것으로 J -적분의 증가에 따른 Q 값의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 작용하중은 $\log(J/(a\sigma_0))$ 로 무차원화 하였으며, 여기서 a 는 균열 길이이고, σ_0 는 항복강도이다. 배관에 존재

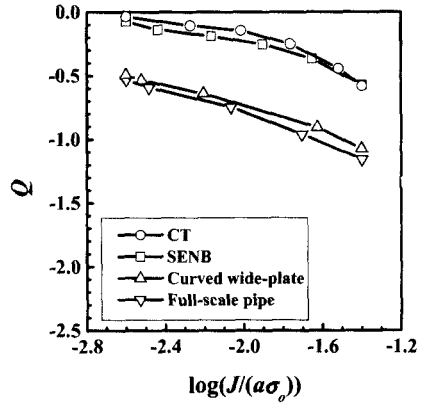


Fig. 3 Comparison of Q values for standard test specimens, curved wide-plate, and full-scale pipe

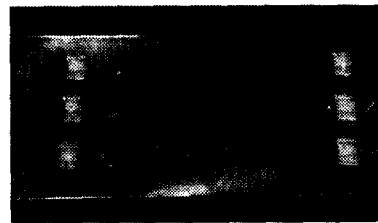


Fig. 4 A wide-plate specimen used in HiL simulation

하는 원주방향 관통균열의 길이는 원주의 12.5%이며, 표준 시편과 흰 광폭 평판의 균열 길이비 (a/w)는 0.5이다.

해석 결과, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 굽힘 하중 상태의 깊은 균열이 존재하는 표준 시편(CT, SENB)은 실패관에 비해 높은 구속 상태를 보였으나, 인장 하중 상태의 흰 광폭 평판은 실패관 균열부와 구속 상태가 유사하였다. 이는 높은 구속 상태의 표준 시편과 낮은 구속 상태의 실패관의 직접적인 비교는 건전성 평가시 매우 보수적인 평가 결과를 초래할 수 있음을 의미하며, 이에 반해 흰 광폭 평판은 실패관의 균열 거동을 보다 정확하게 모사할 수 있음을 의미한다.

본 논문에서는 먼저 배관 평가 시뮬레이터의 개념을 제시하고 그 적용성을 평가하기 위해서 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 실험의 용이성을 고려하여 곡률이 없는 광폭 평판으로 실험을 수행하

였다.

- 시험기

시험기는 유한요소해석부에서 구한 흰 광폭 평판으로 채워진 부위의 하중을 흰 광폭 평판에 작용시키는 역할을 한다. 본 논문에서는 Instron사에서 제작한 50ton 용량의 만능 시험기를 사용하였다. 시험기는 하중 조건 생성부에서 구성한 하중 조건에 따라 전기 모터에 의해 자동적으로 제어된다.

- 변형률 측정부

변형률 측정부는 유한요소해석에서 구한 흰 광폭 평판의 경계 조건을 생성, 확인하기 위한 부분이다. 시뮬레이션 과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해서는 다수의 스트레인 게이지를 사용해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 16개의 채널에서 동시에 변형률을 측정할 수 있는 다채널 변형률 측정 시스템(multi-channel strain measurement system)을 개발하였다. 본 논문에서 개발한 다채널 변형률 측정 시스템은 휘트스톤 브릿지(wheatstone bridge), 채널 변환부, 필터(filter), 증폭기(amplifier), A/D 변환기(A/D converter)로 구성되어 있다. 다채널 변형률 측정 시스템에서는 16개의 채널을 동시에 구동할 수 있으며 필요시 채널을 선택적으로 사용할 수도 있다. 특히 각 채널마다 필요한 필터와 증폭기를 릴레이를 이용하여 채널 변환부에 추가함으로써 1개의 필터와 증폭기를 사용한 경제적인 시스템을 구성하였다. 필터는 차단 주파수(cut-off frequency)가 10Hz인 LPF(low pass filter)를 사용하였으며, 증폭기의 배율은 40, 54, 60, 74dB로 설정하였다. 흰 광폭 평판에서 측정된 변형률 값은 최종적으로 주 제어 PC(main control PC)에 저장된다. 본 논문에서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 6개의 스트레인 게이지를 광폭 평판에 부착하였다.

- 균열 거동 측정부

균열 거동 측정부에서는 직류전위차(Direct Current Potential Drop; DCPD)법을 이용하여 균열의 성장 거동을 측정한다. 본 논문에서는 균열의 성장 거동을 정확하게 측정하기 위해서 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 3개의 채널을 이용하여 균열 길이를 측정하였다. 이를 위해 측정 대상물의 형

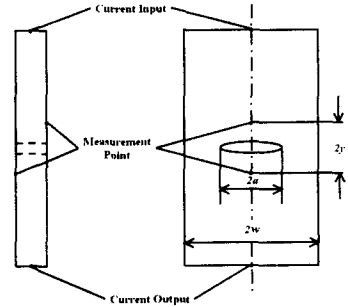


Fig. 5 Electric potential wire placement locations for Johnson's formula

상 변화에 대비할 수 있도록 최대 10개의 채널을 이용하여 동시에 균열 성장 거동을 측정할 수 있는 다채널 DCPD 시스템(multi-channel DCPD system)을 개발하였다.

다채널 DCPD 시스템으로 측정된 전압 변화는 다음 식과 같이 균열 길이의 함수로 나타낼 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y/2w)/\cos(\pi a_0/2w)]}{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y/2w)/\cos(\pi a_0/2w)]} \quad (1)$$

식 (1)을 균열 길이의 함수로 정리하면 다음과 같다.

$$a = \frac{2w}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\cosh(\pi y/2w)}{\cosh \left[(V/V_0) \cosh^{-1} \left\{ \frac{\cosh(\pi y/2w)}{\cos(\pi a_0/2w)} \right\} \right]} \right) \quad (2)$$

여기서, a_0 와 V_0 는 각각 기준 균열 길이 및 기준 전압이고, a 와 V 는 측정 균열 길이 및 측정 전압이다. 식 (1)과 식 (2)의 허용 a/w 범위는 0~1까지로 균열 전구간에 대하여 적용할 수 있다. 광폭 평판에 대한 측정 단자의 위치는 Fig. 5에 나타내었다.

- A/D 변환부

A/D 변환부는 변형률 측정부와 균열 거동 측정부에서 측정된 균열 길이나 변형률 값 등의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 역할을 한다.

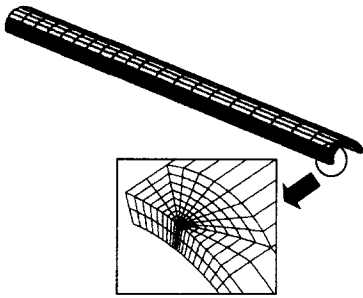


Fig. 6 A three dimensional mesh design for the finite element analysis

- 주 제어 PC

주 제어 PC는 변형률 측정부와 균열 거동 측정부에서 측정한 데이터를 저장하며, 유한요소해석부와 시험기를 연결하여 시뮬레이터의 하중 스케줄을 관리하는 역할을 한다.

3. 배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가 절차

배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가 절차는 다음과 같다.

(1) 원자력발전소 배관에 대한 하중 스케줄을 작성하고 이를 바탕으로 실패관에 대한 유한요소 해석을 수행한다. 해석 결과를 바탕으로 균열에 의해 응력장이 영향을 받지 않는 부분까지를 흰 광폭 평판으로 제작한다. 균열은 관통균열로 설정하며 피로 하중을 이용하여 예비 균열을 생성한다.

(2) 실패관에 대한 유한요소해석으로 구한 변형률 값을 이용하여 흰 광폭 평판의 하중 스케줄을 작성한다.

(3) 흰 광폭 평판을 시험기에 설치하고 균열부 측정을 위한 센서(다채널 변형률 측정 시스템, 다채널 DCPD 시스템)를 부착한다.

(4) 흰 광폭 평판에 작용될 하중 스케줄을 주 제어 PC로 전송한다.

(5) 시험기에 의해 흰 광폭 평판에 하중이 가해지기 시작하면 실시간으로 변형률 값과 균열 성장 거동을 측정한다. 측정된 변형률 값은 주 제

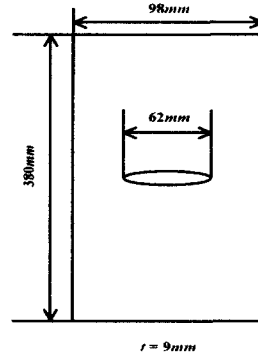


Fig. 7 The configuration of wide-plate specimen

어 PC로 전송되어 하중 스케줄에서 정의한 변형률 값과 비교한 후, 그 값이 일치할 때까지 하중이 자동적으로 증가된다.

(6) 설정된 하중 스케줄이 완료될 때까지 위의 과정을 반복한다.

(7) 설정된 하중 스케줄에 따라 시험이 완료될 때까지의 균열 거동에 대한 정보를 하중 변수와 함께 저장한다.

4. 배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가

4.1 광폭 평판의 크기 결정

시험에 사용할 광폭 평판의 크기를 결정하기 위해서 앞의 건전성 평가 절차에서 언급한 바와 같이 실패관에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석대상은 내경이 289mm이고 두께가 9mm인 관통균열이 존재하는 배관으로 가상 관통균열의 길이 $2a$ 는 62mm이다. Fig. 6은 해석에 사용된 유한요소모델로 전체 배관의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가를 위해 200kN-m의 굽힘 모멘트를 고려하였다. 응력 해석을 수행한 결과 균열 선단으로부터 반경 약 9mm 정도까지 균열 선단에 의해 응력장이 변화하였다. 따라서 Fig. 4에 나타난 스트레인 게이지 부착부의 응력장이 균열 선단에 영향을 받지 않으며, 광폭 평판의 폭도 실패관의 인장 하중 작용부에 해당 되도록 Fig. 7과 같이 광폭 평판을 제작하였다. 앞서 언급한 바와 같이 원자력발전소 배관에 대

Table 1 Material properties for the wide-plate specimen

SM45C Carbon Steel	Young's modulus, E (GPa)	206
	Yield strength, σ_y (MPa)	651
	Ultimate strength, σ_u (MPa)	807
	Poisson's ratio	0.3

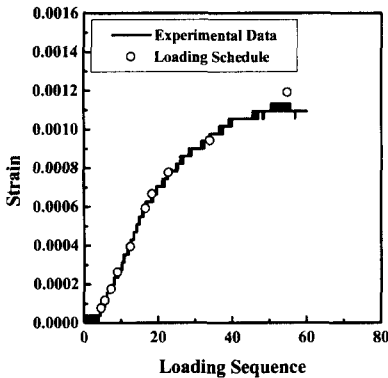


Fig. 8 Comparison of strain values between loading schedule and experimental result

한 시험을 수행하기에 앞서 배관 평가 시뮬레이터의 구성 및 개념 체계를 위해 SM45C 탄소강을 사용하여 시험을 수행하였으며, 재료물성치를 Table 1에 정리하였다.

4.2 광폭 평판에 대한 HiL 시뮬레이션

광폭 평판에 대한 HiL 시뮬레이션을 위해서 앞서 언급한 바와 같이 200kN-m의 굽힘 모멘트를 고려하였다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 전체 하중 스케줄을 15구간의 변형률 값으로 나타내었다. HiL 시뮬레이션이 수행되는 동안 각 하중 구간에서 광폭 평판의 변형률 값이 측정되며 하중 스케줄로 설정된 변형률 값과 비교하여 일치하면 다음 하중 구간에 대한 시뮬레이션이 자동으로 수행된다.

Fig. 8은 초기 균열 길이 a 가 31mm인 광폭 평판에 대해 하중 스케줄로 가정한 변형률 값과 시뮬레이션이 수행되는 동안 광폭 평판에서 측정된

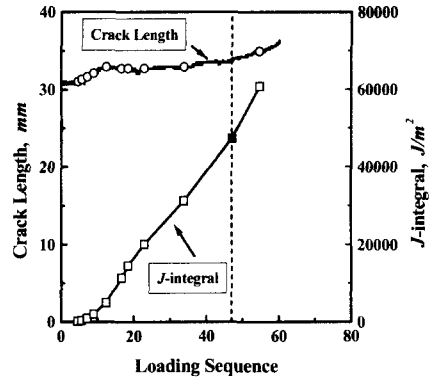


Fig. 9 Variation of crack length and J -integral during the simulation at each loading step

변형률 값을 비교하여 나타낸 것으로 각각의 하중 구간에서 구한 값은 "○"로 나타내었다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 광폭 평판에서 구한 변형률 값이 하중 스케줄로 설정한 값과 잘 일치하여 배관 평가 시뮬레이터의 하중 제어부의 타당성이 입증되었으며, 실배관의 응력장이 광폭 평판에 정확하게 적용됨을 확인하였다.

Fig. 9는 하중 증가에 따른 균열 길이의 변화와 균열 길이의 변화에 따른 실배관의 J -적분값을 예측하여 나타낸 것이다. 앞의 경우와 동일하게 각각의 하중 구간에서 구한 균열 길이는 "○"로 나타내었으며, J -적분값은 "□"로 나타내었다. DCPD법으로 균열 길이를 측정하는 경우, 하중-전위차 선도에는 초기의 탄성적 거동을 보이는 탄성 변형 영역, 소성 변형에 의해 균열 둔화가 일어나는 균열 둔화 영역, 그리고 선형적으로 변화하는 안정 성장 영역의 세 영역이 나타난다. 이 세 영역에서 곡선의 기울기가 다르게 나타나며, 이러한 현상을 이용하여 균열 둔화로부터 안정 균열 성장이 발생하는 시점을 결정할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 본 논문에서는 균열 둔화 영역과 안정 성장 영역의 기울기 변화로부터 균열 진전 시점을 결정하였다. 균열 진전이 시작된 점(Fig. 9의 "■")에서의 굽힘 모멘트는 144kN-m이었으며, 이때의 J -적분값(J_{init})은 47,344J/m²으로 계산되었다. 동일 재질에 대해 1T-CT 표준 시편으로 구한 파괴인성치(J_{IC})는 6,438J/m²으로 광폭 평판을 이용하여 예측한 값과 큰 차이를 보인다. 이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 표준 시편과 광폭 평판의 구속

Table 2 Comparison of *J*-integral between full-scale pipe and wide-plate

Loading step	<i>J</i> -integral (J/m^2)		Difference (%)
	Full-scale pipe	Flat wide-plate	
1	164	183	10.6
2	379	426	11.0
3	876	909	3.6
4	2,033	2,112	3.8
5	4,914	5,022	2.1
6	11,373	11,483	1.0
7	14,513	14,654	1.0
8	20,068	20,465	1.9
9	31,306	31,940	2.0
Initiation	47,344	50,316	5.9

상태의 차이에서 기인한 것으로, 표준 시편으로 구한 파괴인성치를 실배관과 직접 비교한다면 매우 보수적인 해석 결과를 초래할 수 있다. Table 2는 동일한 하중 구간에서 실배관과 광폭 평판의 *J*-적분값을 비교하여 나타낸 것이다. 해석 결과, 동일한 응력장에서 실배관의 *J*-적분값과 광폭 평판의 *J*-적분값은 최대 11%내에서 잘 일치하였다. 이는 실배관과 광폭 평판 균열부의 구속 상태가 매우 유사하다는 것을 의미하며, Fig. 3의 결과와도 잘 일치한다. 본 논문에서 나타난 차이는 흰 광폭 평판 대신 실험의 용이성을 고려하여 곡률이 없는 광폭 평판을 사용했기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 기존의 표준 시편에 비해 광폭 평판이 보다 현실적이고 정확하게 실배관의 균열 진전 거동을 모사할 수 있음을 확인하였다. 파단이 발생한 후 식 (2)를 이용하여 다채널 DCPD 시스템으로 구한 균열 길이가 시뮬레이션이 완료된 후 실측으로 구한 균열 길이와 1%내에서 잘 일치하여 본 논문에서 개발한 다채널 DCPD 시스템의 타당성을 확인하였다.

향후에는 실제 원자력발전소 배관 재료를 이용한 실배관 실증시험과 흰 광폭 평판 시험을 수행하여 흰 광폭 평판을 이용한 실배관 파괴평가 기준을 제시하고 타당성을 입증할 예정이다.

5. 결론

본 논문에서는 막대한 비용과 시간이 소요되는 실배관 실증시험을 대체하여 경제적인 규모로 실배관의 균열 진전 거동을 평가할 수 있는 배관 평가 시뮬레이터를 HiL 방법을 기반으로 개발하였다.

배관 평가 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 하중 제어부와 다채널 DCPD 시스템 등을 비롯한 시뮬레이터의 각 부분의 타당성이 잘 입증되었다. 또한 *J-Q* 해석을 이용한 균열부 구속 상태 평가 및 실제 시험을 통해 광폭 평판이 기존의 표준 시편에 비해 보다 정확하게 실배관 균열부의 균열 진전 거동을 모사할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 개발한 배관 평가 시뮬레이터를 이용하면 막대한 비용이 소요되는 실배관 실증시험을 대체하여 실배관의 균열 진전 거동을 실험실 규모의 시험만으로도 평가할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 실배관 실증시험이 불가능한 다양한 하중 이력에 대해서도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) USNRC, 1979, "Cracking in Feedwater System Piping," Bulletin No. 79-13.
- (2) USNRC, 1980, "Investigation and Evaluation of Cracking Incidents in Piping in Pressurized Water Reactors," NUREG-0691.
- (3) 허남수, 김영진, 표창률, 유영준, 양준석, 1999, "차세대 원전배관의 LBB 적용을 위한 수경배관 평가선도의 개발," 대한기계학회 논문집 A권, 제 23권, 제5호, pp. 763~771.
- (4) 원종일, 석창성, 1999, "역사이클하중이 원자력 배관재료의 파괴저항곡선에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집 A권, 제23권, 제7호, pp.

- 1112~1119.
- (5) Wilkowski, G.M., Ahmad, J., Barnes, C.R., Broek, D., Kramer, G., Landow, M., Marschall, C.W., Maxey, W., Nakagaki, M., Scott, P., Papaspyropoulos, V., Pasupathi V. and Popelar, C., 1985, "Degraded Piping Program Phase II," NUREG/CR-4082, Vol. 1~Vol. 8.
- (6) Wilkowski, G.M., Ahmad, J., Brust, F., Ghadiali, N., Krishnaswamy, P., Landow, M., Marschall, C.W., Scott, P. and Vieth, P., 1991, "Short Cracks in Piping and Piping Welds," NUREG/CR-4599, Vol. 1~Vol. 4.
- (7) Scott, P., Wilson, M., Olson, R., Marchall, C.W., Schmidt, R. and Wilkowski, G.M., 1994, "International Piping Integrity Research Group Program - Final Report," NUREG/CR-6223, Vol. 1~Vol. 4.
- (8) Hopper, A., Wilkowski, G.M., Scott, P., Olson, R., Rudland, D., Kilinski, T., Mohan, R., Ghadiali, N. and Paul, D., 1997, "The Secondary International Piping Integrity Research Group Program - Final Report," NUREG/CR-6452.
- (9) Michales, L., 1993, "The Use of a Graphical Modeling Environment for Real Time Hardware-in-the-Loop Simulation of Automotive ABS System," SAE Paper 930507, Society of Automotive Engineers Inc.
- (10) Sailer, U. and Essers, U., 1994, "Real Time Simulation of Trucks for Hardware-in-the-Loop Application," SAE Paper 942297, Society of Automotive Engineers Inc.
- (11) ABAQUS User's Manual-Ver. 5.8, 1999, Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.
- (12) Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, 1989, ASTM Standard E-813-89.
- (13) Standard Test Method for Determining J-R Curves, 1997, ASTM Standard E-1152-87.
- (14) Johnson, H. H., 1965, "Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth," *Material Research and Standards*, Vol. 5, No. 9, pp. 442~445.
- (15) Bakker, A., 1985, "A DC Potential Drop Procedure for Crack Initiation and R-Curve Measurements During Ductile Fracture Tests," ASTM STP 856, pp. 394~410.