'99 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

배관 건전성 평가를 위한 Hardware-in-the-Loop 시뮬레이터의 개발

(Development of Hardware-in-the-Loop Simulator for Piping Integrity Evaluation)

허남수, 심도준, 최재붕, 김영진
성균관대학교
경기도 수원시 장안구 천천동 300

표창률
인덕대학
서울특별시 노원구 월계동 산 78

요 약

균열이 존재하는 원자력발전소 배관에 대한 건전성 평가법의 개발 및 검증을 위해서는 실배관에 대한 실증시험이 필수적이다. 이와 같은 이유로 다수의 국제공동연구를 통해 실배관 실증시험이 수행된 바 있다. 그러나 실배관에 대한 실증시험을 수행하기 위해서는 막대한 비용 및 시간이 소요되기 때문에 많은 어려움이 있다. 본 논문의 목적은 실배관 실증시험의 회수를 절감하고, 실배관의 거동에 준하여 경제적으로 배관 건전성 평가를 수행할 수 있는 배관 평가 시뮬레이터를 개발하는 것이다. 배관 평가 시뮬레이터는 hardware-in-the-loop (HiL) 방법을 기반으로 구성되며, wide-plate 시편을 이용하여 배관에 존재하는 균열의 거동을 평가한다. 배관 평가 시뮬레이터를 사용하면 막대한 경제적 비용 및 시간이 소요되는 실배관 실증시험을 대체하여 원자력발전소 배관의 건전성을 실배관의 거동에 준하여 경제적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

In order to verify the analytical methods predicting failure behavior of cracked pipes, 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 that 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, piping integrity evaluation can be performed based on 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, 원자로 압력용기, 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 파손사례[1~5]가 보고되고 있으며, 파손 가능성의 최소화 및 2차적 파급효과 방지를 위한 건전성 평가를 수행하고 있다. 최근에는 원자력발전소 배관 설계의 새로운 개념으로 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 개념이 신규 및 가동중인 원자력발전소에 활발하게 적용됨에 따라 이의 타당성 입증 및 검증을 위한 배관내 균열 안정성 평가법과 파괴인성치의 확보, 그리고 관련 규제지침의 개발 등이 요구되고 있다.

원자력발전소 배관에 존재하는 균열의 건전성 평가나 배관계에 대한 LBB 설계를 위해서는 먼저 탄소성 파괴역학 해석을 위한 해석방법의 개발 및 검증이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 실배관(full pipe)에 대한 실증시험이 필수적이다. 그러나 실배관에 대한 실증시험을 수행하기 위해서는 시험설비의 구성에 막대한 비용 및 시간이 소요되기 때문에 국외에서도 여러 국제 공동 연구[6~9]를 통해 제한된 경우에 대해서만 수행하고 있다. 국내의 경우는 시험기술 및 설비의 미비로 인해 실증시험을 수행하지 못하고 있으며 관련 데이터를 국외에 의존하고 있는 형편이다. 따라서 현실적이고 경제적으로 배관 건전성 평가를 수행할 수 있는 시험기법의 개발이 필요하다.

배관 건전성 평가를 실배관의 거동에 준하여 수행하면서도 경제적으로 해석할 수 있는 시뮬레이션 방법으로서 하드웨어-인-더-루프(hardware-in-the-loop; HiL) 방법이 있다. HiL은 기존의 소프트웨어 알고리즘에서 비선형성이 심하거나 해석하기 어려운 부분을 실제 하드웨어로 대체하여 시뮬레이션을 수행하는 방법으로써 현실적으로 시험이 불가능하거나 시험비용이 고가인 우주 항공 산업 분야에서 처음으로 도입되었다. 근래에는 차량의 성능 향상을 위해 자동차 업계에서 활발하게 적용하고 있다[10~12]. 본 논문의 목적은 막대한 비용과 시간이 소요되는 실배관 실증시험을 대체하여 경제적으로 배관 건전성 평가를 수행할 수 있는 배관 평가 시뮬레이터를 HiL 방법을 기반으로 개발하는 것이다.

2. 배관 평가 시뮬레이터의 구성

배관 평가 시뮬레이터는 HiL 방법을 이용하여 실시간으로 배관에 존재하는 균열 성장의 시뮬레이션을 수행하는 장치로서 배관 해석을 수행하는 소프트웨어 알고리즘 속에 탄소성 거동을 하는 부위를 서브루틴으로 사용하는 점이 그 특징이다. 배관 평가 시뮬레이터는 유한요소해석을 수행하는 소프트웨어 부분, 실제 균열이 있는 시편에 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

- 하중조건 생성부

하중 조건 생성부는 실배관에 작용하는 하중의 변화를 모사하는 부분이다. 본 연구에서는 원자력발전소 배관에 작용하는 하중 가운데 굽힘하중(remote bending moment)만을 고려하였다.

- 유한요소해석부

유한요소해석부는 시편에 작용하는 경계조건을 구하기 위해 전체 배관 모델에 대한 유한요소해석을 수행하는 부분이다. 유한요소해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[13]를 사용하였다.

2.2 하드웨어 부분

- 시편

시편은 균열이 존재하는 배관의 일부분을 wide-plate 형태로 추출하여 제작하며 피로하중에 의해 예비 관통균열을 생성하고 실제 구조물과 동일한 하중조건이 작용될 수 있도록 구성한다. 즉, 유한요소해석부에서 수행한 실배관에 대한 해석결과를 토대로 시편 추출 부위에 작용하는 하중조건이 제작된 wide-plate 시편에 시험기를 통해 모사될 수 있도록 설계한다. Fig. 2는 본 연구에서 제작한 wide-plate 시편을 나타낸 것이다.

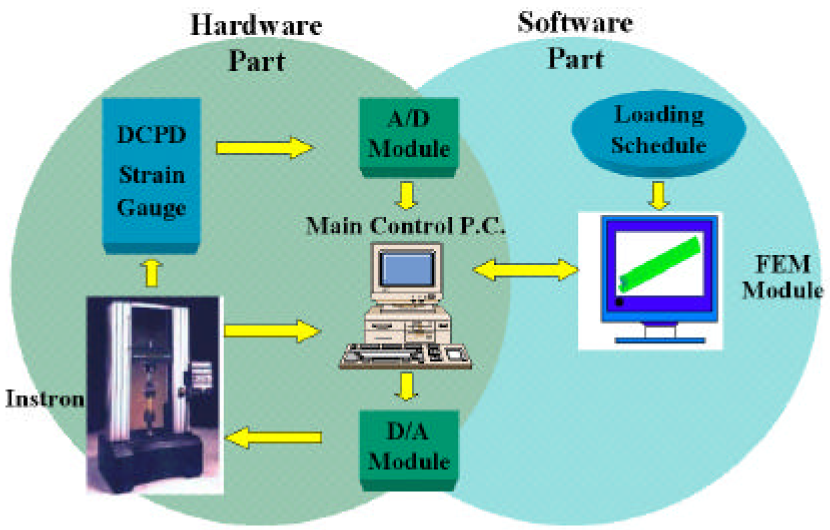

Fig. 1 A schematic illustration of piping integrity evaluation simulator

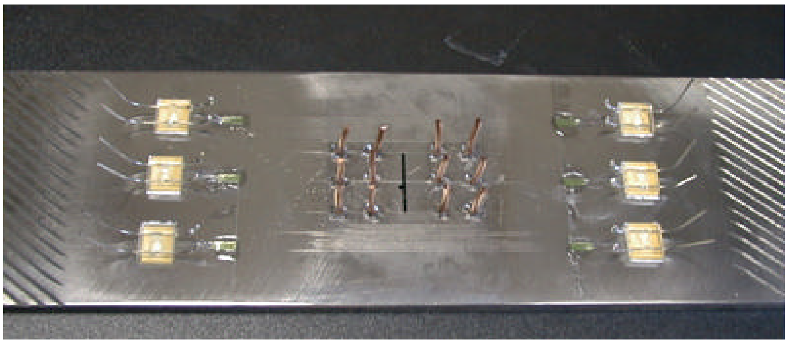

Fig. 2 Wide-plate specimen

- 시험기

시험기는 유한요소해석부에서 구한 시편으로 추출된 부위의 하중을 wide-plate 시편에 작용시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 INSTRON 사에서 제작된 만능시험기(Model 8503)를 사용하였다. 시험기는 하중 조건 생성부에서 구성한 하중 조건에 따라 전기 모터에 의해 자동적으로 제어된다.

- 변형률 측정부

변형률 측정부는 유한요소해석에서 구한 wide-plate 시편의 경계조건을 생성, 확인하기 위한 부분이다. 시뮬레이션 과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해서는 다수의 스트레인 게이지를 사용해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 16 개의 채널에서 동시에 변형률을 측정할 수 있는 다채널 변형률 측정 시스템(multi-channel strain measurement system)을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 다채널 변형률 측정 시스템은 휘트스톤 브릿지(wheatstone bridge), 채널 변환부, 필터(filter), 증폭기 (amplifier), A/D converter 로 구성하였다. 다채널 변형률 측정 시스템에서는 16 개의 채널을 동시에 구동할 수 있으며 필요시 채널을 선택적으로 사용할 수 있다. 특히 각 채널마다 필요한 필터와 증폭기를 릴레이를 이용하여 채널 변환부에 추가함으로써 1 개의 필터와 증폭기를 사용한 경제적인 시스템을 구성하였다. 필터는 차단 주파수(cut-off frequency)가 10*Hz* 인 LPF(Low Pass Filter)를 사용하였으며, 증폭기의 배율은 40*dB*, 54*dB*, 60*dB*, 74*dB* 로 설정하였다. 시편에서 측정한 변형률 값은 최종적으로 main control PC 에 저장된다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 6 개의 스트레인 게이지를 wide-plate 시편에 부착하였다.

- 균열 거동 측정부

균열 거동 측정부에서는 직류전위차(Direct Current Potential Drop; DCPD)법을 이용하여 균열의 성장 거동을 측정한다. 본 연구에서는 균열의 성장 거동을 정확하게 측정하기 위해서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 3 개의 채널을 이용하여 균열 길이를 측정하였다. 이를 위해 최대 10 개의 채널을 이용하여 동시에 균열 성장 거동을 측정할 수 있는 다채널 DCPD 시스템(multi-channel DCPD system) 을 개발하였다.

다채널 DCPD 시스템으로 측정한 전압변화는 다음 식과 같이 균열길이의 함수로 나타낼 수 있다[14].

$$\frac{V}{V_o} = \frac{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y / 2W) / \cos(\pi a / 2W)]}{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y / 2W) / \cos(\pi a_o / 2W)]} \tag{1}$$

균열길이를 구하기 위하여 식 (1)을 다시 정리하면 아래와 같다.

$$a = \frac{2W}{\pi}\cos^{-1}\frac{\cosh(\pi y / 2W)}{\cosh\left\{(V / V_o)\cosh^{-1}[\cosh(\pi y / 2W) / \cos(\pi a_o / 2W)]\right\}} \tag{2}$$

여기서, a_o와 V_o는 각각 기준 균열길이 및 기준 전압이고, a 와 V 는 측정 균열길이 및 측정 전압이다. 식 (1)과 식 (2)의 허용 a/W 범위는 0~1 까지로 균열전구간에 대하여 적용할 수 있다. Wide-plate 시편의 형상 및 측정단자의 위치는 Fig. 3 에 나타내었다.

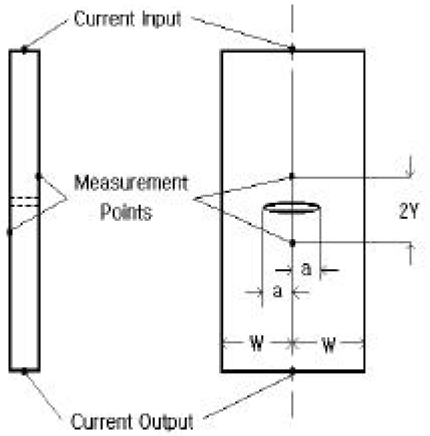

Fig. 3 Wide-plate specimen geometry and electric potential wire placement locations for Johnson's formula

- A/D 변환부

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

- Main control PC

Main control PC는 유한요소해석부와 시험기 사이의 정보를 교환하고 변형률 측정부와 균열 거동 측정부에서 측정한 데이터를 저장하며 시뮬레이터의 스케줄을 관리하는 역할을 한다. Main control PC의 구성을 위해서 고성능의 PC(Pentium II 350MHz)가 사용되었다.

3. 배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가 절차

배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가 절차는 아래와 같다.

1) 원자력발전소 배관에 대한 하중 스케줄을 작성하고 이를 바탕으로 실배관에 대한 유한요소해석을 수행한다. 해석결과를 바탕으로 응력분포의 연속성을 고려하여 wide-plate 시편을 제작한다. 균열은 관통균열로 설정하며 피로하중을 이용하여 시편에 예비균열을 생성한다.
2) 실배관에 대한 유한요소해석으로 얻은 변형률 값을 이용하여 wide-plate 시편에 대한 하중 스케줄을 작성한다.
3) Wide-plate 시편을 시험기에 설치하고 Fig. 2에 나타낸 바 같이 균열부 측정을 위한 센서(다채널 변형률 측정 시스템, 다채널 DCPD 시스템)를 시편에 부착한다.
4) Wide-plate 시편에 작용될 하중 스케줄을 main control PC로 전송한다.
5) 시험기에 의해 wide-plate 시편에 하중이 가해지기 시작하면 실시간으로 변형률 값과 균열 성장 거동을 측정한다. 측정된 변형률 값은 main control 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 변수

와 함께 저장한다.

4. 배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가

4.1 Wide-plate 시편의 크기 결정

시험에 사용할 wide-plate 시편의 크기를 결정하기 위해서 앞의 건전성 평가 절차에서 언급한 바와 같이 실배관에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 유한요소모델로 전체 배관의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 배관 평가 시뮬레이터를 이용한 건전성 평가를 위해 200*kN-m* 의 굽힘모멘트를 선형적으로 증가시켰으며, 응력해석 결과를 이용하여 균열선단에 의해 응력장이 영향을 받지 않도록 wide-plate 시편을 제작하였다. Fig. 5는 유한요소해석 결과를 바탕으로 결정한 wide-plate 시편의 형상이다. 해석 및 시험에 사용된 재질은 SM45C로 재료물성치를 Table 1에 정리하였다.

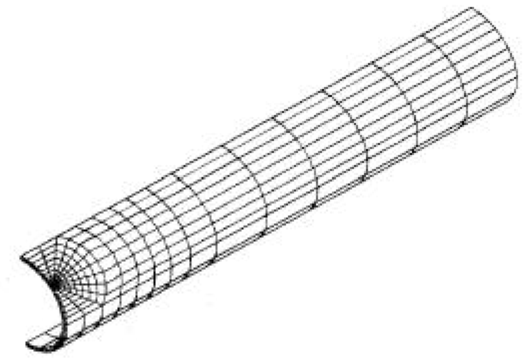

Fig. 4 A three dimensional mesh design for the finite element analysis

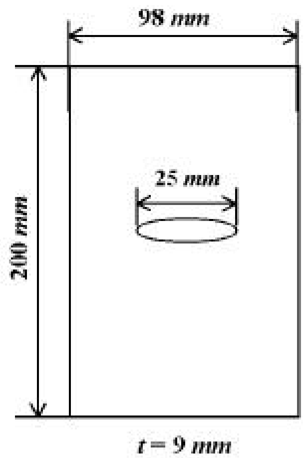

Fig. 5 The configurations of wide-plate specmen

Table 1 Material properties for the wide-plate specimen

Wide-plate specimen (SM45C)	Young's modulus, E (*GPa*)	207
	Yield strength, σy (*MPa*)	466
	Ultimate strength, σu (*MPa*)	977
	Poisson's ratio, υ	0.3

4.2 Wide-plate 시편에 대한 HiL 시뮬레이션

Wide-plate 시편에 대한 HiL 시뮬레이션을 위해서 앞서 언급한 바와 같이 200*kN-m* 의 굽힘 모멘트를 고려하였다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 전체 하중 스케줄을 15 구간의 선형적인 변형률 값으로 나타내었다. HiL 시뮬레이션이 수행되는 동안 각 하중 구간에서 시편의 변형률 값이 측정되며 하중 스케줄로 설정된 변형률 값과 비교하여 일치하면 다음 하중 구간에 대한 시뮬레이션이 자동으로 수행된다.

Fig. 6은 초기 균열 길이가 22 *mm* 인 시편에 대해 하중 스케줄로 가정한 변형률 값과 시뮬레이션이 수행되는 동안 시편에서 측정한 변형률 값을 비교하여 나타낸 것으로 각각의 하중 구간에서 구한 값은 "■"로 나타내었다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 시편에서 구한 변형률 값이 하중 스케줄로 설정한 값과 잘 일치하여 배관 평가 시뮬레이터의 하중 제어부의 타당성을 확인하였다.

Fig. 7은 하중 증가에 따른 균열 길이의 변화를 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 초기 균열 길이가 22 *mm* 인 경우는 7 번째 하중 구간에서 파단이 발생하였다. Fig. 8은 시편의 파단 모양을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보면 초기에는 균열 진전이 발생하지 않았으며 1 번째 하중 구간과 2 번째 하중 구간 사이에서 균열 진전이 발생하였다. 그 후 7 번째 하중 구간까지는 균열 진전이 발생하지 않고 유지되었는데 이는 균열이 존재하지 않는 잔여 단면에 넥킹(necking)이 발생하여 더 이상 균열이 진전하지 않은 것으로 생각된다. 그리고 7 번째 하중 구간을 지나면서 급격하게 소성 붕괴에 의한 시편의 파단이 발생하였다. 또한 7 번째 하중 구간에서 식 (2)를 이용하여 다채널 DCPD 시스템으로 구한 균열 길이가 시뮬레이션이 완료된 후 실측으로 구한 균열 길이와 1%내에서 일치하여 본 연구에서 개발한 다채널 DCPD 시스템의 타당성을 확인하였다.

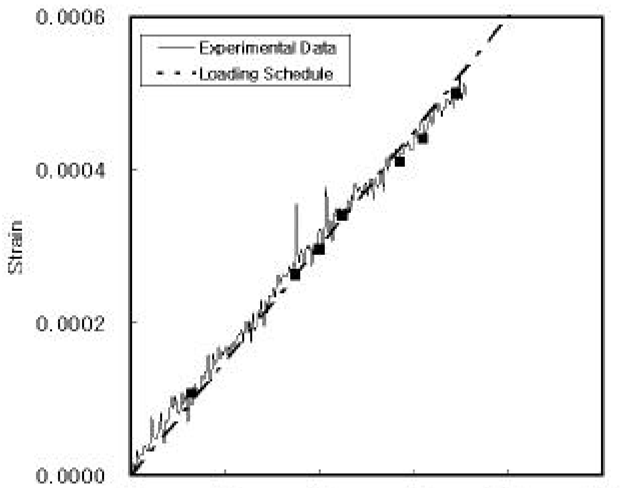

Fig. 6 Comparison of strain values between loading schedule and experimental result

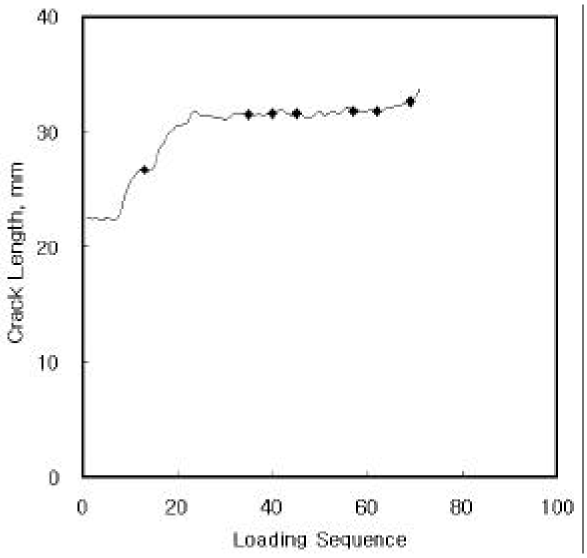

Fig. 7 Variation of crack length during the simulation at each loading step

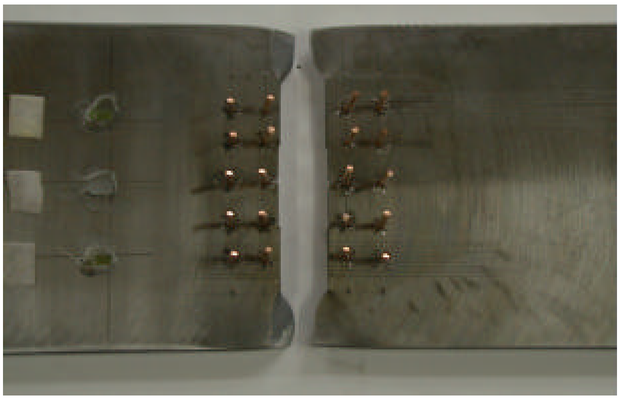

Fig. 8 Ruptured specimen after HiL simulation

5. 결 론

본 연구에서는 막대한 비용과 시간이 소요되는 실배관 실증시험을 대체하여 경제적인 규모로 실배관의 거동에 준한 배관 건전성 평가를 수행할 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. 본 연구에서 개발한 배관 평가 시뮬레이터를 이용하면 현재 사용되고 있는 공학적 평가법(GE/EPRI 법, Limit load 법 등)으로 예측한 균열진전하중(crack initiation load) 및 최대하중(maximum load)의 타당성을 실험실 규모의 시험만으로도 검증할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서 제시한 배관 평가 시뮬레이터를 응용하면 현재 배관 건전성 평가 및 LBB 설계와 관련하여

관심사항으로 대두되고 있는 역사이클 하중의 실험적 영향 평가를 위해서도 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터와 과학기술부(원자력연구개발 기초연구사업)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

[1] "Water Hammer in Nuclear Power Plant," *NUREG-0582*, USNRC, 1979

[2] "Erosion/Corrosion-Induced Pipe Wall Thinning in U.S. Nuclear Power Plants," *NUREG/CR-1334*, USNRC, 1989

[3] "Cracking in Feedwater System Piping," *Bulletin No. 79-13*, USNRC, 1979

[4] "Investigation and Evaluation of Cracking Incidents in Piping in Pressurized Water Reactors," *NUREG-0691*, USNRC,1980

[5] R.M. Roidt, et al., "Testing and Analysis of Turbulent Penetration and Stratification in Unisolable Piping System," *Westinghouse RP 2291-01*, 1990

[6] G.M. Wilkowski, et al., "Degraded Piping Program – Phase II," *NUREG/CR-4082, Vol. 1–Vol. 8*, 1984

[7] G.M. Wilkowski, et al., "Short Cracks in Piping and Piping Welds," *NUREG/CR-4599, Vol. 1, No. 1~ Vol. 4, No. 1*, 1994

[8] G.M. Wilkowski, et al., "International Piping Integrity Research Group Program," *Final Report*, 1991

[9] G.M. Wilkowski, et al., "The Secondary International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program – Final Report," *NUREG/CR-6452*, 1996

[10] L. Michales, "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., U.S.A., 1993

[11] U. Sailer, U. Essers, "Real Time Simulation of Trucks for Hardware-in-the-Loop Application, *SAE Paper 942297*, Society of Automotive Engineers Inc., U.S.A., 1994

[12] M.W. Suh, Y.J. Kim, et al., "Hardware-in-the-Loop Simulation for ABS," *SAE Paper 980244*, Society of Automotive Engineers Inc., U.S.A., 1998

[13] ABAQUS User's manual, Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., 1998

[14] H.H. Johnson, "Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth," *Materials Research and Standards, Vol. 5, No. 9*, pp. 442~445, 1965