

비선형 균열배관 해석 방법을 이용한 배관 안전성 평가

김태순 · 박치용 · 김진원 · 박재학*

한국전력공사 전력연구원 · *충북대학교 안전공학과

1. 서 론

원자력발전소 배관계통에 존재하는 균열을 해석하는 방법으로, 이제까지는 균열을 고려하지 않은 상태에서 지진하중을 고려한 탄성 배관해석을 수행하여, 배관에 작용하는 하중을 구한 후, 다음 단계에서 파괴해석 방법으로 균열을 가정한 탄소성 균열해석을 수행하는 2단계의 해석을 통해 균열안정성을 평가해 왔다. 이러한 방법은 전체 배관의 거동과 배관 내에 존재하는 균열의 거동을 서로 독립적인 것으로 고려하고 있으며 재료물성치로는 설계값을 사용하는 등의 보수적인 가정들을 포함하고 있어 배관에 작용하는 하중 또는 응력을 과도하게 계산하는 결과를 초래하고 있다. 특히, 지진하중과 같은 반복적인 외부 동적하중이 작용하는 경우, 배관에 국부적인 소성변형이 발생함에도 이를 단지 탄성거동으로 간주하게 되는 것이다. 이러한 몇몇 보수적 가정들을 포함하고 있는 기존의 해석방법은 지나친 보수성을 가질 뿐만 아니라, 균열에 의한 실제 배관의 파단하중과 계산에 의한 파단하중의 비교로서 배관의 안전여유도를 예측하는 방법으로는 적절하지 못하다.

따라서 이러한 보수적인 가정들을 제거하고 실제 물리적 현상에 가까운 평가를 위해서는 응력해석시 배관 내에 균열을 고려하고, 균열부(crack section) 및 배관의 소성변형을 포함할 수 있는 탄소성 동적해석 및 균열의 비선형 거동해석을 동시에 수행해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 균열을 포함하는 배관에 대한 비선형 해석 방법을 이용하여 배관 내에 존재하는 균열에 진폭이 일정하게 증가되는 단일주파수의 동적 반복하중이 작용하는 경우에 대한 해석을 수행하고, Battelle¹⁾ 실험값과 비교하였다. 그리고, 균열을 포함하는 배관에 대하여 균열의 존재와 소성변형이 작용하중의 감소에 미치는 효과를 살펴보기 위한 해석을 수행함으로써, 기존의 균열을 포함하지 않고 탄성변형만을 고려하는 방법을 대체하여 실제로 작용하는 하중을 평가할 수 있도록 하였다.

2. 균열배관 평가 개요

일반적으로 배관해석은 배관 재료물성치의 분류에 따라 탄성해석과 탄소성해석으로 나눌 수 있고, 배관 거동에 따라 정적해석 및 동적해석으로 나눌 수 있으며, 배관에 균열이 존재할 때의 균열해석은 배관해석에서 구한 하중을 통하여 균열의 안정성을 평가한다. 균열 안전성의 평가는 취성재질에 적합한 K-평가법과 연성재질에 적합한 J-평가법 등이 있다. 이와 관련하여 ASME Sec.XI²⁾에서는 K에 기준한 평가법으로 평가하고,

수명기간 중 불만족시에는 탄소성 파괴역학 평가법에 의한 평가기준을 사용하여 만족 여부를 평가하고 있다.

이러한 균열배관 해석은 균열이 없는 배관의 탄성-동적해석으로 얻어진 하중 및 응력을 배관 균열 평가 방법에 적용하여 균열을 평가하는 방법으로서, 배관해석 및 균열 해석이 비연계된 해석법이다. 그러므로 이 두 과정이 각기 독립적인 여유도를 갖기 때문에 실제 배관에서 종합적인 안전여유도를 평가하는 것이 어려울 뿐만 아니라, 균열을 포함하는 배관해석이 이루어지지 않기 때문에 배관해석에서의 실제 여유도를 파악하기가 곤란하다. 따라서 배관 내에 균열 존재 여부에 따른 기존 평가법의 오차, 배관해석 시 배관의 국부소성발생에 따른 작용하중의 감소, 동적 해석시 전체 배관의 소성거동에 의한 감쇄의 증가 및 동적 응답의 변화 등을 살펴보기 위해서는, 정적 및 동적 배관 해석시 균열부 비선형성을 고려하고, 배관의 소성거동을 포함하여 해석할 필요성이 있다.

3. 비선형 균열배관 해석 방법

배관 균열부의 비선형성을 묘사하기 위해서는 균열을 묘사하는 상세한 3차원 요소를 사용할 수 있으나 해석 시간의 비효율성 및 시간이력 동적 해석 수행의 어려움으로 인하여 균열부 거동을 간단히 비선형 스프링으로 묘사하는 방법을 선택하였다. 비선형 스프링 요소를 사용하는 방법에서 균열은 한 점에서 1개의 자유도에 대한 모멘트-회전 거동을 보이는 것으로 가정한다.³⁾ 균열은 기존의 요소들을 직렬과 병렬로 연결하여 ANSYS code에 삽입하여 묘사하는데, 표면균열은 스프링-미끄럼으로 묘사된 3개의 요소(COMBIN40)를 병렬로 조합하여 모델링 한 것으로 Fig. 1은 스프링-미끄럼 요소의 기본 개념과 비선형 하중-변위 모델을 잘 설명해 주고 있다. 또한 배관계통은 직관 및 곡관 PIPE요소(PIPE16과 PIPE18)를 사용하여 모델링 한다. 본 해석에서는 이상과 같은 개념을 적극 반영하고, 특히 표면균열의 해석에 초점을 맞추어서 최종적으로 균열부를 Fig. 2와 같은 형상으로 최적화하여 모델링하였다.

비선형 유한요소(FEM) 파괴안정성 해석의 적용에서 가장 중요한 사항 중 하나는

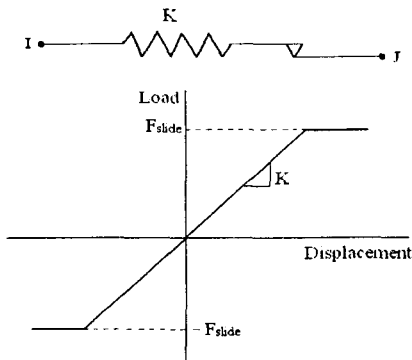


Fig. 1 Basic spring-slider element.

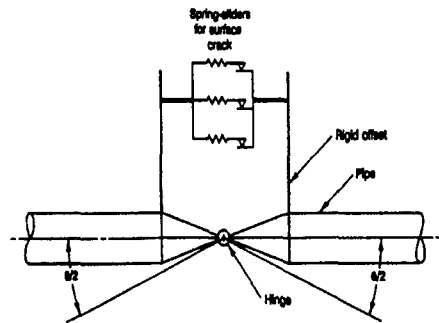


Fig. 2 Spring-slider model for a crack.

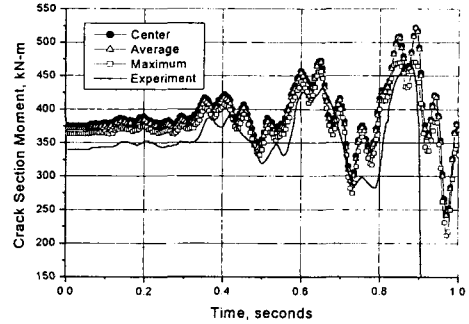
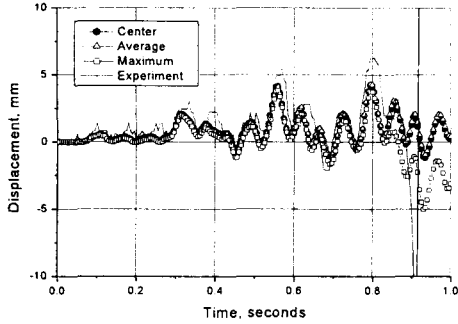


Fig. 3 X-dir. displacement vs. time curve of the crack section. Fig. 4 Bending moment vs. time curve of the crack section.

균열에 대한 비선형 모멘트-회전 거동을 어떻게 정의할 것인가 하는 문제인데, 이를 위해 원주방향 표면균열을 위한 J-평가법 Code에서 제공하고 있는 SC.TNP와 관통균열을 위한 LBB.ENG2를 사용하여 모멘트-회전 거동을 나타냈다.

다음으로, 균열을 포함하고 있는 배관에 지진하중과 같은 반복적인 외부 동적하중이 작용하는 경우, 배관에서 국부적인 소성변형이 발생하는 현상과 균열부의 비선형 동적 거동을 동시에 고려할 수 있는 평가 방법에 대한 검증이 필요하다. 이를 위해서 본 해석에서는 응력해석시 배관 내에 균열을 고려하고, 소성변형 조건을 포함할 수 있는 탄소성 동적해석 및 균열부의 비선형 거동해석을 동시에 수행하는 해석방법을 수행하고 그 결과를 Battelle 실험값과 비교하여 본 방법의 적절성을 검증하였다.

배관에 존재하는 균열에 대한 비선형해석은 재료물성치의 선택이나 J-평가법에서 제공하는 해석방법 등에 의해 그 결과가 달라지므로 다양한 평가 방법들을 적용하여 실험결과와 비교하였으며, 그 결과 중 표면균열에 대한 변위와 모멘트를 비교하여 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다. 이 결과에서 알 수 있듯이 실험결과와 해석결과가 잘 일치하고 있으므로, 본 해석에서 적용한 균열부 비선형을 고려한 배관 해석 방법이 균열을 포함한 배관의 해석에 타당한 방법이며, 배관의 실제 물리적 현상을 반영할 수 있는 평가 방법임을 알 수 있다.

4. 비선형 균열배관 해석

1. 비선형 균열배관 해석 개요

배관계통에 존재하는 균열과 소성변형에 의한 효과가 배관계통에 작용하는 하중에 미치는 영향을 평가하기 위해, 원주방향 표면균열과 일정 균열길이를 가진 관통균열에 대하여 작용하중의 감소효과를 비교하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 표면균열의 경우는 균열의 깊이가 두께의 76.5% 정도이고, 길이는 원주방향으로 원주 길이의 47.6% 정도 되는 균열에 대하여 해석을 수행하였다. 관통균열의 길이는 원주방향으로

Table 1 Tensile properties of the pipe crack section.

Material	Crack Definition			하중속도	항복강도, MPa	인장강도, MPa	Young's Modulus, GPa	Rambertg -Osgood parameter
	Type	Depth (a/t)	Length ($2C/\pi D$)					
TP304 Stainless Steel	Surface	0.765	0.476	Quasi- Static	258	465	176.17	$\alpha = 2.59001$ $n = 6.62532$
				Dynamic	287	443	176.17	$\alpha = 1.98045$ $n = 7.85761$
	Through wall	-	0.238	Quasi- Static	258	465	176.17	$\alpha = 2.59001$ $n = 6.62532$
				Dynamic	287	443	176.17	$\alpha = 1.98045$ $n = 7.85761$

원주 길이의 23.8% 정도로 표면균열의 1/2 정도 되는 길이를 갖는 균열을 고려하였다.

균열부의 재료는 표면균열과 관통균열 모두 판상 재료를 용접한 외경이 415.3mm이고, 두께가 26.01mm인 TP304 스테인리스강으로 항복강도는 258MPa, 극한강도는 469MPa 정도이다. 또한 일정한 굽힘하중과 15.513Mpa의 내압을 받고 있으며, 상온에서 288℃까지의 온도변화를 고려하였다. J-평가법에서 고려하는 J-R 곡선은, Fig. 5에 나타낸 것 같이, 정적하중이 가해지는 경우의 해석에는 준정적 하중속도로, 동적하중이 가해지는 경우에는 동적 하중속도 J-R 곡선을 고려하였다.

2. 해석 결과

배관에 균열이 존재할 때, 균열을 포함하지 않는 경우와 포함하는 경우의 배관에 대해 탄성해석과 소성성 해석을 행하여, 균열의 존재와 소성변형이 배관의 거동에 미치는 영향을 비교하였다.

먼저 Fig. 6은 정적하중시 표면균열이 존재하는 배관에 대한 균열면에서의 굽힘모멘트를 나타내고 있는데, 균열을 포함하였을 경우가 균열을 포함하지 않는 탄성배관에 비해 약 9%, 소성거동을 고려하였을 경우에는 약 8%, 그리고 균열과 소성변형을 동시에 고려하였을 경우에는 약 13%의 하중 감소가 일어났다. Fig. 7과 같은 동적 하중이 작용하는 배관에 대한 해석 결과는 Fig. 8에 나타냈는데, 균열을 포함하고 소성변형을 고려하였을 경우에는 균열을 포함하지 않는 탄성배관에 비해 약 16% 하중 감소가 일어났다. 또 Olsen 등⁴⁾에 의하면 비선형 배관해석에서는 굽힘모멘트가 (-)방향으로 치지는 경향을 보인다고 했는데, 이 경우에도 균열을 고려하거나 소성변형을 고려하는 비선형 해석의 경우는 같은 결과를 보였다.

배관에 관통균열이 존재하고 정적하중이 작용하는 경우에는 Fig. 9에서 보는 것처럼 배관 전체가 탄성거동을 하고 균열을 포함하는 것으로 고려하였을 경우와 균열부만 소성변형을 하는 것으로 가정한 경우 모두 약 11%, 소성거동에 의해서는 약 15%, 균열과 소성변형을 모두 고려하였을 경우에 약 20%의 하중 감소가 일어났다. 그리고 Fig. 10은 동적 하중이 작용하는 경우인데, 균열을 포함하고 전체 배관계통에 대해 소

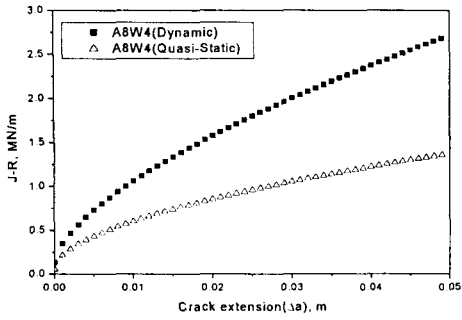


Fig. 5 J-R curves of TP304 stainless steel at 288°C.

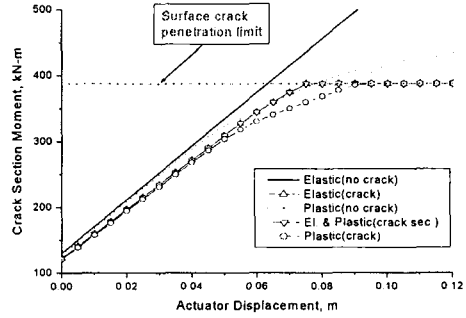


Fig. 6 Moments for a surface crack when static loads are applied.

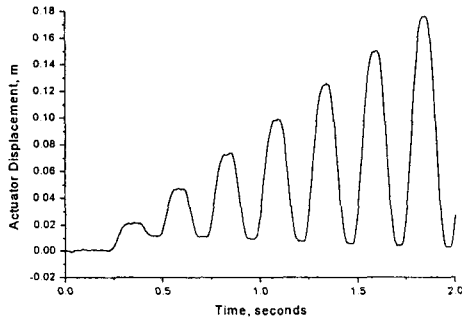


Fig. 7 Actuator displacement for input of the dynamic loading analysis.

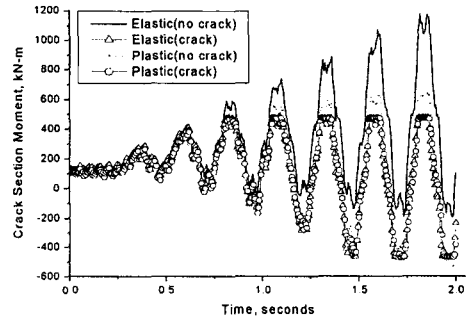


Fig. 8 Moments for a surface crack when dynamic loads are applied.

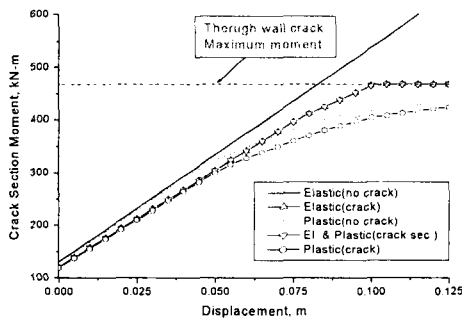


Fig. 9 Moments for a TWC when static loads are applied.

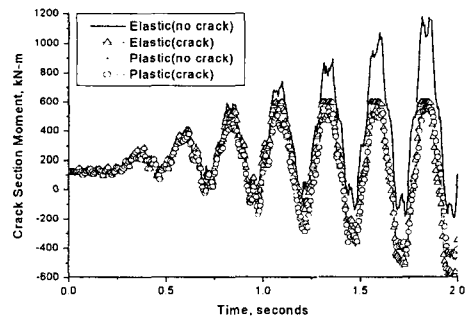


Fig. 10 Moments for a TWC when dynamic loads are applied.

성변형을 고려하였을 경우가 균열을 포함하지 않는 탄성배관의 경우보다 36% 정도 하

중 감소가 일어나 가장 큰 하중 감소 효과를 나타냈다.

이상의 비선형 균열배관 해석의 결과로부터, 균열배관에 대해 단지 탄성거동으로 간주하고 있는 기존의 해석방법이 갖는 과도한 보수성을 제거하기 위해서 또는 균열파단 시점 및 정확한 값으로 균열배관 안정성을 평가하기 위해서는, 본 논문에서 제시한 배관 내에 균열을 고려하고 균열부에서의 소성변형 조건을 포함할 수 있는 탄소성 동적 해석 및 균열부의 비선형 거동해석을 동시에 수행하는 비선형 균열배관 해석 방법이 적절하다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

균열을 포함한 배관의 소성효과를 고려한 비선형 균열배관 해석 방법을 통하여, 표면균열 및 관통균열을 포함하고 있는 배관 해석을 수행함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 배관 균열부의 비선형성을 고려하기 위해 균열부 거동을 간단히 비선형 스프링으로 묘사하는 방법을 선택하였고, 배관계통은 직관 및 곡관 PIPE요소를 사용하여 배관 해석을 수행한 결과, 실험결과와 잘 일치하고 있음을 보였다.
- (2) 배관에 원주방향 표면균열이나 관통균열이 존재하는 경우에 작용하중의 감소효과에 대한 해석 결과 배관 내에 균열의 존재와 소성변형이라는 두 조건은 배관에 작용하는 하중의 감소에 영향을 미치는 주된 인자임을 알 수 있다.
- (3) 균열을 포함하지 않는 배관에 대한 기존의 균열 평가 방법이 균열을 포함하는 균열배관 해석 방법보다 안전여유도 측면에서 과도하게 보수적임을 보였다.
- (4) 균열을 포함하는 배관의 안정성 및 안전여유도를 실제적으로 평가하기 위해서는 균열파단 시간 및 작용하중을 정확하게 예측하기 위한 비선형 균열배관 해석 방법으로 평가할 필요성이 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Bockbrader, J., and others, Data Record Book Entry 1.2.8.12 for BINP Task-1 Experiment, September 17, 1999
- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, 1992.
- (3) P. Scott and others, Crack Stability in a Representative Piping System under Combined Inertial and Seismic/Dynamic Displacement Controlled Stressess, Subtask 1.3 Final Report : NUREG/CR-6233 Vol. 3, June 1997.
- (4) Olsen, R., Wolterman, R. and Wilkowski, G., Margines from Dynamic FEM Analysis of Cracked Pipe under Seismic Loading for the DOE New Production Reactor, PVP Vol. 280, pp.119-134, June 1994.