

‘96 춘계학술대회 논문집

한국원자력학회

PWR 운전조건하에서 원주방향 균열을 가진 페라이트 배관의 파괴 거동에 관한 실험적 연구

최영환, 정언기, 김용범, 박윤원, 이정배

한국원자력안전기술원

G. Wilkowski

Battelle Memorial Institute(USA)

요 약

이 연구의 목적은 원주방향 균열을 가진 페라이트 배관의 파괴거동을 실험적으로 평가하는데 있다. 한계하중방법, SC.TNP 방법, R6방법, 그리고 ASME Code방법과 같은 여러 파괴거동 평가 방법의 타당성이 PWR 운전조건(압력:15.5MPa, 온도:228°C)하에서의 직경 16인치의 대규모 배관 파괴실험을 통해 조사된다. 모사지진하중, 단일주파수 사인함수하중, 정하중과 같은 여러 가지 형태의 하중이 배관의 하중지지능력에 미치는 영향이 조사된다. 또한 엘보우부위와 직관부의 영향과 표면균열 및 관통균열의 영향 등도 함께 조사된다. 결과는 다음과 같다. (1) 표면균열을 가진 배관의 파괴거동은 한계하중방법과 SC.TNP 방법에 의해 잘 예측될 수 있다. 반면 관통균열의 경우는 한계하중방법에 의해 잘 예측된다. (2) 모사지진하중하에서는 단일주파수 사인함수하중이나 정하중 하에서 보다 하중지지능력이 크게 예측된다. (3) 엘보우부위와 직관부, 관통균열과 표면균열 사이에 파괴거동에 대한 큰 차이는 없다.

1. 서 론

최근 배관 설계의 새로운 개념으로 파단전누설(leak before break, LBB)개념[1,2]이 신규 원전에 활발하게 적용됨에 따라 이의 타당성 입증 및 검증을 위한 배관내 균열(crack) 안정성 평가방법과 파괴(fracture) 물성치의 확보, 그리고 관련 규제지침의 개발 등이 요구되고 있다. 또한 원전 장기 가동에 인해 노후화된 배관 내에서 균열발생 가능성이 증대함에 따라 이러한 균열의 안정성 평가

를 위한 균열 평가방법에 대한 개발과 그 평가방법의 실증적 확인 등도 요구되고 있다.[3-5]

이 연구의 목적은 원주방향균열을 갖는 원자력발전소 페라이트 배관의 파괴거동을 실험적으로 평가하는데 있다. 이 연구에서는 균열을 가진 배관의 하중지지능력에 대한 평가방법에 대한 하중 타입의 영향, 엘보우의 영향, 표면균열/관통균열의 영향 등이 직경 406mm(16인치)의 배관으로 구성된 대규모 배관계통에 대한 파괴실험을 통해 조사된다. 이 배관계통은 원전 운전조건인 15.5MPa의 고압과 288°C의 고온의 유체를 포함하고 있으며, 하중으로 모사지진하중, 단일주파수를 갖는 사인함수하중, 정하중 등이 가해진다. 배관내 균열거동을 예측하기 위한 한계하중방법, SC.TNP 방법, R6방법, 그리고 ASME Code방법과 같은 여러 탄소성 균열평가방법의 타당성이 평가된다.

이 연구는 배관건전성 국제공동연구 프로그램(International Piping Integrity Research Group Program, IPIRG Program)의 일부로 수행되었다.

2. 배관계통 실험

2.1 배관계통 실험장치

이 연구에서는 원자력발전소 배관계통을 모사하는 배관계통 실험장치를 제작하였다.[3-5] 배관계통은 25.4mm(1인치)두께의 406.4mm(16인치)직경을 갖는 배관으로 제작되었으며, 총길이는 약 40m 이다. Fig. 1은 배관계통 실험장치의 전체 모습을 보여주는 구성도이다. 배관계통은 5개의 엘보우와 6개의 직관부로 구성되어 있으며, 직관부 재질은 ASTM A710 Grade A Class 3 Schedule 100, Elbow 1,2,3,5는 16inch Schedule 100 WPHY 65, 그리고 Elbow 4는 16inch Schedule 160 WPHY 65로 제작되었다.

원전 배관에 부착된 밸브를 모사하기 위해 배관계통에 1950kg의 질량(mass)이 설치되었다. 배관 내부는 가압경수형원전(PWR)의 운전조건인 288°C의 온도와 15.5MPa의 압력을 가진 유체로 가압되며, 457mm의 행정을 갖는 150톤 용량의 유압시험기를 사용하여 배관외부에서 하중을 가하였다. 여러 경우를 실험하기 위해 배관계통의 일부 직관부를 교체가 가능하도록 설계하였다. 이 직관부에는 EDM과 피로에 의해 제작된 균열이 위치한다. 균열부위에 걸리는 모멘트는 배관 균열부의 양단에 설치된 모멘트게이지로, 균열진진량은 전위차법(Potential Drop Method)으로, 변위는 LVDT로, 그리고 균열열림변위(COD)는 클립온게이지로 측정된다.

하중타입은 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)이 배관계통에 걸리도록 모사한 모사지진하중(Simulated Seismic Load, SSL), 단일주파수 사인함수하중(Single Frequency Sinusoidal Load, SFSL), 정하중(Quasi Static Load, QSL) 등 3가지 형태가 실험에 사용되었다.

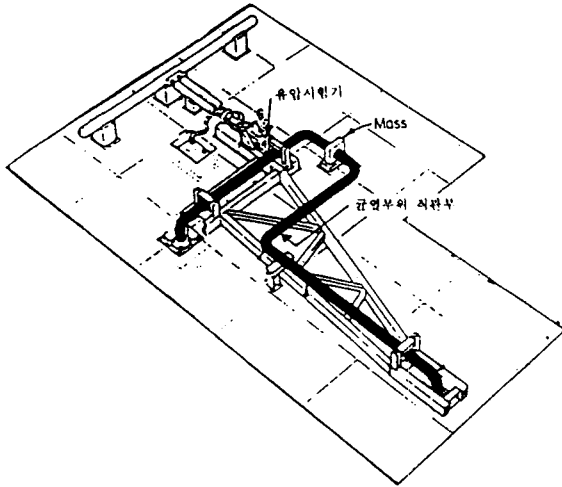


Fig. 1 Pipe System Loop Geometry

Table 1. Fracture Test Matrix

Exp. No	Test Type	Load Type	Mat. Type	Crack Type	Do (mm)	t (mm)	a/t	θ/π
							MAX	MAX
1-1	System	SSL	CSBM	SC	405	24.8	0.719	0.412
2-1	System	SFSL	CSW	SC	406	33.6	0.726	0.50
2-2	Elbow	QSL	CSW	SC	406	33.6	625	0.50
3-1	System	SSL	CSBM	TWC	399	26.2	1	0.120
3-2	FPB	QSL	CSBM	TWC	400	26.2	1	0.120

2.2 배관계통 실험 종류 및 목적

이 연구에서는 다음 3가지 경우에 대해 모두 5개의 실험이 수행되었다.

- (1) Case 1 : 모사 지진하중 실험 - Exp. 1-1
- (2) Case 2 : 엘보우 Girth 용접부 실험 - Exp. 2-1 and 2-2
- (3) Case 3 : 작은 관통균열 실험 - Exp. 3-1 and 3-2

Table 1은 세가지 경우에 대해 실험된 5개의 파괴실험 요약이다. 실험(Test Type)은 배관계통 실험(System)과 4점굽힘실험(FPB)으로 나뉘며, 하중(Load Type)은 SSL, SFSL, QSL등 세가지이고, 재질(Material Type)은 탄소강 모재(CSBM)와 탄소강 용접부(CSW)이다. 균열형상(Crack Type)은 표면균열(SC)과 관통균열(TWC)이 있으며, 각 실험에 사용된 배관의 외직경(Do), 두께(t), 균열깊이(a/t), 균열길이(θ/π)가 표에 나타나 있다.

각 Case의 수행 목적과 실험내용은 다음과 같다. 먼저 Case 1의 목적은 모사지진하중을 받는 직관내의 균열에 대한 파괴해석방법을 입증하는데 필요한 실험 데이터를 얻기 위한 것이다. 지금까지의 배관파괴실험은 준정적 하중제어나 변위제어와 같이 비교적 단순한 하중조건을 받는 경우에 대한 것이었다. 비록 균열이 없는 경우에 대해서는 지진하중에 대한 실험결과가 있지만 지진하중을 받는 경우에 대한 배관의 파괴거동은 실험된 적이 없었다.

Case 2의 목적은 엘보우 Girth 용접부에 존재하는 표면균열의 거동을 평가하기 위함이다. 지금까지의 대부분 연구는 직관부에 균열이 있는 경우에 대한 것이었다. Table 1에 나타난 바와 같이 이 Case에서는 Sinusoidal 하중을 받는 배관계통실험(Exp.2-1)과 준정적 하중을 받는 엘보우실험(Exp.2-2)이 수행되었다. 엘보우 실험을 위한 별도의 실험장치가 제작되었다.

Case 3의 목적은 큰 관통균열과 작은 관통균열사이의 균열거동의 차이를 비교하는데 있다. 지금까지의 대부분 연구는 상대적으로 큰 관통균열을 갖는 배관에 대한 것이었다. Degraded Piping Program과 IPIRG-1 Program에서는 원주의 37% 관통균열길이를 갖는 배관이 실험되었다. 그러나 이 정도의 관통균열은 파단전누설 개념 평가에서 사용되는 것보다는 큰 균열이다. Table 1에 나타난 바와 같이 이 Case에서 모사지진하중을 받는 배관계통실험(Exp.3-1)과 준정적 하중을 받는 사점굽힘실험(Exp.3-2)이 수행되었다.

3. 결과 및 토론

3.1 실험결과의 평가

3.1.1 Case 1 결과

Case 1의 목적은 모사지진하중을 받는 배관계통의 파괴거동을 조사하는 것이다. 이 결과를 QS 하중을 받는 경우와 SFS 하중을 받는 경우와 비교하였다. 비교 결과가 Table 2에 나타나 있다. 표에는 탄소강 재질에 대해 QSL, SFSL, SSL의 하중이 가해진 경우를 비교하였다.[3-6]

하중형태가 파괴거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 각 실험에 대한 파괴비(Fracture Ratio)가 조사되었다. 파괴비는 $F.R = (\sigma_b + \sigma_m)_{exp} / (\sigma_b + \sigma_m)_{pred}$ 로 정의된다. 파괴비는 Net Section Collapse(NSC) 방법[6], SC.TNP 방법[4,5], R6 방법[7], ASME Code Sec.XI 방법[8] 등으로 결정하였다. 평가방법에 대한 자세한 내용은 여기서는 생략하기로 한다. 자세한 이 실험들에 대한 파괴비(Fracture Ratio)를 계산한 결과도 Table 2에 나타나 있다. 표에 나타난 바와 같이 SSL일 경우의 파괴비가 다른 하중형태, 즉 QSL이나 SFSL일 경우에 비해 크게 나타났다. 이 결과는 지

Table 2 Comparison of fracture ratio for Case 1

Exp No	Load Type	Max. Moment (kN-m)	Fracture Ratio (FR)			
			NSC	SC.TNP	R6	ASME
1-1	SSL	476	0.92	1.00	1.63	2.18
1-1-a	SFSL	341	0.70	0.78	1.27	1.69
1-1-b	QSL	748	0.90	1.01	1.50	1.94

Table 3 Comparison of fracture ratio for Case 2

Exp No	Load Type	Max. Moment (kN-m)	Fracture Ratio (FR)			
			NSC	SC.TNP	R6	ASME
2-1	SFSL	815	1.36	1.36	2.16	3.15
2-1-a	SFSL	618	1.05	1.28	1.94	2.67
2-2	QSL	775	1.07	1.30	1.70	2.45
2-2-a	QSL	594	0.93	1.17	1.71	2.47

진하중이 가해질 경우 예측치가 실제치보다 작게 나타남 의미하는 것으로 안전성 측면에서 비보수적임을 보여주는 결과이다. 한편 균열거동은 한계하중 방법 및 SC.TNP1 방법으로 잘 예측된다.

3.1.2. Case 2 결과

Case 2의 목적은 엘보우 Girth 용접부에 존재하는 표면균열의 거동을 평가하기 위함이다. 이를 위해 Exp.2-1 및 2-2의 결과를 같은 크기의 균열을 갖는 균열을 갖는 직관부배관에 대한 다른 실험과 비교하였다. Table 3에는 비교되는 각 실험의 조건들과 결과가 나타나 있다.[3-6] 엘보우가 파괴거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 각 실험에 대한 파괴비가 Case 과 같이 조사되었다. 표에 나타난 바와 같이 엘보우부위와 직관부 사이의 파괴비는 큰 차이가 없음을 보여준다. 또한 한계하중 방법과 SC.TNP방법이 균열거동을 잘 예측하고 있음을 보여준다.

3.1.3 Case 3 결과

Case 3의 목적은 큰 관통균열과 작은 관통균열사이의 균열거동의 차이를 비교하는데 있다. 이를 위해 Exp.3-1 및 3-2의 결과를 큰 관통균열을 갖는 배관에 대한 다른 실험과 비교하였다. Table 4에는 비교되는 각 실험의 조건들과 결과가 나타나 있다.[3-6] 관통균열크기가 파괴거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 각 실험에 대한 파괴비가 조사되었다. 파괴비는 Net Section Collapse (NSC) 방법, LBB.ENG 방법, R6 방법 등으로 결정하였다. 관통균열에 대한 자세한 평가 방법 내용도 지면관계상 여기서는 생략하기로 한다. 이 실험들에 대한 파괴비(Fracture Ratio)를 계산한 결과가 Table 4에 함께 나타나 있다. 표에 나타난 바와 같이 큰 관통균열과 작은 관통균열사이의 파괴비는 큰 차이가 없음을 보여준다. 이 결과는 관통균열 실험에 있어 균열길이의 영향은 큰 문제가 되지 않음을 보여주는 것이다. 한편 균열거동은 한계하중방법으로 잘 예측되고 있다.

Table 4 Comparison of fracture ratio for Case 3

Exp No	Load Type	θ/π MAX	Fracture Ratio (FR)		
			NSC	LBB.ENG	R6
3-1	SSL	0.12	0.85	1.06	1.28
3-1-a	Dynamic	0.249	1.03	1.27	1.53
3-2	QSL	0.12	0.84	1.37	1.48

4. 결 론

이 연구에서는 원전 페라이틱 배관내에 존재하는 원주방향균열 거동에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 한계하중방법, SC.TNP 방법, R6방법, 그리고 ASME Code방법과 같은 여러 파괴거동 평가방법의 타당성이 PWR 운전조건(압력:15.5MPa, 온도:228°C)하에서의 직경 16인치의 대규모 배관 파괴실험을 통해 조사되었다. 모사지진하중, 단일주파수 사인함수하중, 정하중과 같은 여러 가지 형태의 하중이 배관의 하중지지능력에 미치는 영향이 조사되었으며 엘보우부위와 직관부의 영향과 표면균열 및 관통균열의 영향 등도 함께 평가되었다. 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 표면균열을 가진 배관의 파괴거동은 한계하중방법과 SC.TNP 방법에 의해 잘 예측될 수 있다. 반면 관통균열의 경우는 한계하중방법에 의해 잘 예측된다.
- (2) 모사지진하중하에서는 단일주파수 사인함수하중이나 정하중하에서 보다 하중지지능력이 크게 예측된다.
- (3) 엘보우부위와 직관부, 관통균열과 표면균열 사이에 파괴거동에 대한 큰 차이는 없다.

참 고 문 헌

- [1] 10 CFR Part 50 Appendix A General Design Criteria 4, 1992
- [2] US NRC Standard Review Plan 3.6.3(draft) Leak Before Break Evaluation Procedure, 1987
- [3] Wilkowski, G.M., et al., 1989, Degraded Piping Program- Phase II, NUREG/CR-4082.
- [4] Wilkowski, G.M., et al., 1993, International Piping Integrity Research Group - Final Report
- [5] Choi, Y.H., et al., 1995, Fracture Behavior of Short Circumferentially Surface-Cracked Pipe, NUREG/CR-6298
- [6] Norris, D.M., et al., 1986, Evaluation of flaws in austenitic steel piping, Electric Power Research Institute, NP-4690.
- [7] Milne, et al., 1986, R6 Method, CEGB Report R/H/R6-Rev 3.
- [8] ASME, 1992, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI.