

2차응력이 균열 배관계의 동적 파단에 미치는 영향

Effects of the Secondary Stress on the Pipe Fracture by the Dynamic Loads in the Cracked Pipe System

박치용, 김진원,
*최영환, 정연기, **장운석, 진태은

한국전력 전력연구원
*한국원자력안전기술원, **한국전력기술주식회사

요약문

원자력 발전소에서 배관의 역할은 주요 기기의 파손을 영원히 배제하기 위하여 압력경계에서 안전의 제 1차적 책임을 지므로 배관의 파괴 거동에 대한 정확한 공학적 이해 및 파단하중의 정확한 예측이 필요하다. ASME Sec.XI에서 SS인 경우 2차 응력에 의해서 파단이 일어나지 않는다고 가정하고 있으며, SS 용접부나 CS의 모재나 용접부에 대해서는 열팽창만 고려하고, SAM에 대한 하중은 고려하고 있지 않다. 또한 1차응력 및 2차응력에 해당하는 안전계수를 달리 적용하고 있다. 이와 같이 균열 배관의 안전성을 평가하는 기준에 일관성이 없고, 2차 응력에 대한 파단 기여도의 평가 근거가 명확하지 않다. 따라서 균열이 있는 배관에서 균열부위가 2차응력에 의하여 어떠한 거동을 보이는가를 규명할 필요가 있다. 본 논문에서는 배관의 파단거동에서 2차응력의 영향에 대한 실패관 파괴실험 결과 및 분석을 수행하고, 향후 계속적인 분석 방향을 제시하고자 할 목적으로 작성되었다. 배관 파단에 영향을 미치는 2차응력의 영향을 관찰하기 위하여 초기변위를 준정적으로 가하고 난 후에 동적 변위를 가하는 고압, 고온의 실패관 실험을 수행 결과 큰 균열의 경우이거나 또는 배관 배치가 균열부위배관에 하중이 집중되게 되어 있는 경우에는 열팽창 하중 등 2차응력을 발생시키는 하중도, 동적 하중이 배관 파단에 기여하는 수준으로, 배관 파단에 기여하였다. 또한 ASME Sec.XI App.C의 배관 파단 평가식의 수정이 필요한 것으로 검토되었다.

ABSTRACT

The fracture effects of the initial displacement such as thermal expansion on the fracture evaluation are experimentally investigated in the cracked pipe system. In this experiment, the plasticity of the pipe was restricted to the crack section and the initial displacement of actuator was obtained by the elastic pipe analysis and the code evaluation method. Dynamic load with the single frequency was consequently applied to cracked pipe system. The results of an experiment were shown that secondary stresses such as thermal expansion and seismic anchor motion was behaved as a primary stress in the fracture process. Several investigations such as the selection of crack depth, a definition of flow stress, the crack evaluation method in ASME Sec.XI App.C are carried out by the load ratio evaluation

1. 서 론

원자력 발전소에서 배관의 역할은 주요 기기의 파손을 영원히 배제하기 위하여 압력경계에서 안전의 제 1차적 책임을 진다. 따라서 배관의 파괴 거동에 대한 정확한 공학적 이해 및 파단하중의 정확한 예측은 원자력 발전소의 안전을 담보하는 일이다. 따라서 배관의 파괴 거동에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며, 또한 연구되어야 한다. 특히 공학적 평가기법의 정확성을 기하고, 평가 방법의 간결성을 유지하기 위하여 간략하면서도 유용한 배관 파단 예측식들이 제안되어 공학적으로 유용하게 사용되고 있다.

배관에 부분 원주균열이 존재하는 경우에, 배관의 균열 안정성에 대한 평가 기준은 미국기계학회 보일러 및 압력용기 코드(ASME Sec.XI)⁽¹⁾에 의하여 평가되고 있다. 보일러 및 압력용기 코드에 따르면 응력을 항복 후에 응력 재분배가 일어나지 않는 막응력 및 굽힘 응력등을 1차응력으로, 열응력 및 지진에 의한 앵커 운동(SAM : Seismic Anchor Motion)에 의한 응력과 같이 구속에 의한 응력으로 항복후에 응력 재분배가 가능한 응력을 2차응력으로 정의하고, 국부적인 재료 불균일, 결함등에 의한 응력을 피크응력(Peak Stress)으로 분류하고 있다.

미국기계학회 보일러 및 압력용기 코드 가동중 검사 및 평가부분에 해당하는 Sec.XI에서는 스테인레스 강인 경우에 2차 응력에 의해서 파단이 일어나지 않는다고 가정하고 있으며, 스테인레스 강 용접부나 탄소강의 모재나 용접부에 대해서는 열팽창만 고려하고, SAM에 대한 하중은 고려하고 있지 않다. 또한 1차응력에 해당하는 안전계수와 2차응력에 해당하는 안전계수를 달리 적용하고 있다. 이와 같이 균열 배관의 안전성을 평가하는 기준에 일관성이 없고, 2차 응력에 대한 파단 기여도의 평가 근거가 명확하지 않다. 또한 앞선 연구^(2,3)의 일부 실험 조건에서 2차 응력이 배관 균열의 파괴에 크게 기여하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 균열이 있는 배관에서 균열부위가 2차응력에 의하여 어떠한 거동을 보이는가를 명백히 밝히고 이를 코드에 포함시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 배관의 파단거동에서 2차응력의 영향에 대한 실패관 파괴실험을 수행하였으며, 시험으로부터 얻어진 결과를 이용하여 산업계에서 현재 적용하고 있는 코드의 적절성을 평가하고자 하였다.

2. 동적하중 실패관 파괴실험

가. 실험장치 구성

실패관 파단실험 장치는 IPRG - I, II (1st & 2nd International Piping Integrity Research Group)라는 이름으로 국제공동연구가 수행되었던 미국 Battelle 연구소의 실험장치가 이용되었다. 본 실험 장치는 Fig.1에서 보는 바와 같이 원자력발전소의 실제 배관을 사용하여 파괴실험을 수행할 수 있도록 동적하중을 가하는 유압가진장치, 지지 베어링부, 밸브등을 모사하기 위한 집중질량, 가압 가열장치, 결함 측정부 배관 등으로 구성되어 있고, 5개의 엘보우 및 약 30 m의 406.6 mm 직경 Schedule 100인 직선 배관으로 연결되어 있다. 배관의 재질로 직관의 경우에는 ASTM A710 Grade A Class 3이며, 엘보우는 WPHY-65 재질이고, 측정부 배관은 측정 재질로 교체 가능하도록 되어 있다.

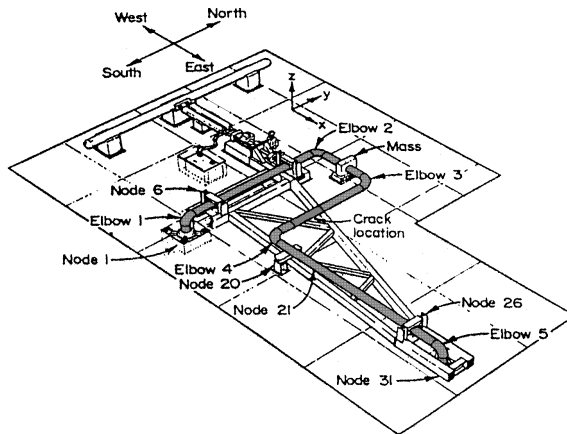


Fig.1 Pipe loop experimental facility

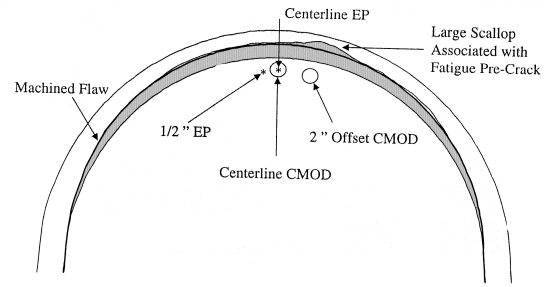


Fig.2. Specimen pre-test flaw and measurement points

나. 실험 조건

배관 파괴거동에 대한 2차응력의 영향을 고려하기 위하여 2차응력에 해당하는 초기 변위를 동적 유압가진기(actuator, 이하 가진기)에 가하였다. 초기변위 즉 2차응력을 가진 배관에 동적하중을 가할때는 단일 주파수 함수로서 진폭이 점차 증가하는 하중을 가진기에 동서 방향 수평으로 가하였다. 실험 대상 재질은 기존 IPIRG -II 국제공동연구에서 2차응력을 인위적으로 가하지 않은 상태의 연구결과와 비교하기 위하여 스테인레스 304 SAW(Submerged-Arc Weld)를 사용하였다. 또한 실험대상 배관부를 제외한 엘보우 및 직배관은 실험대상 배관에 비하여 강성이 큰 재질을 사용하여, 배관의 동적 파괴거동시 탄성영역 범위에 존재하도록 하였다. 발전소의 실제 배관 환경을 모사하기 위하여 배관 내부의 작용압력은 15.5 MPa (2,250 psi)이며, 온도는 288 °C이다.

데이터 측정은 가진기의 변위 및 힘, 균열이 있는 배관 전후 및 동서방향 직선부(동쪽 모우멘트 쉘)에서의 모우멘트 쉘에 의한 모멘트 하중, 엘보우 #3 및 동서 방향 직선부에서의 변위 등을 측정하였다. 또한 Fig.2에서 보는 바와 같이 초기 변위 또는 동적하중 변위에 의해 균열 진전량을 측정하기 위한 직류전위차계(d-c EP)를 균열 중심부와 12.7 mm 편심된 위치에서 측정하였으며, 균열개구변위 (CMOD : Crack-Mouth- Opening Displacement)를 균열 중심부 및 최대균열 발생부인 50.8 mm (2 inch) 편심된 위치에서 측정하였다. 원주방향의 부분 초기 균열은 중심부에서 14.783 mm(0.582 inch) 가공한 후에 내부압력 변화에 의한 피로균열 진전으로 14도 기울어진, 즉 50.8 mm (2 inch) 편심된 위치에서 최대 19.888 mm (0.783 inch) 균열 깊이를 가진 조개모양을 형성하였다. 초기 균열의 형상이 Fig.2에 나타나 있다.

다. 예비시험을 위한 설계

배관에 작용하는 2차응력의 영향을 알기 위해서 가진기의 초기변위를 가하는데 초기변위의 크기 결정하여야 하고, 가진기의 변위에 상당하는 균열 배관 부위 및 엘보우 위치에서의 모멘트와의 관계를 설정하여야 한다. 또한 가진기의 능력과 실험 설비 제한성에 대한 조건은 다음과 같고 이에 대한 만족 여부도 확인하여야 한다.

- i) 배관지지대가 정수압 베어링 테이블 위에서 지지할 수 있어야 한다.
- ii) 가진기의 초기 정적 변위중에 배관 두께를 따라 표면균열이 파단되어서는 안 된다.

iii) 가진기 운동의 초기 과도 상태를 벗어나서 균열 진전 및 배관 파단이 일어나도록, 최소한 2 주기 이상의 동적 주기 하중이 가해질 수 있어야 한다.

ix) 초기 정적 변위를 가하는 동안에 균열 개시를 감시하여 초기 변위에 의한 균열 깊이 변화를 고려할 수 있어야 한다.

초기변위를 결정하기 위한 조건으로서 배관에 작용하는 응력을 기준으로 하였다. 미국기계학회 압력용기 및 보일러 설계기준인 ASME Sec.III에서 제시하는 응력 기준을 사용하였다. 실험 설비 배관계의 임의 위치에서 초기 변위를 가하였을 때 작용하는 최대응력이 코드응력허용 범위내에서 작용하도록 하였다. 주응력 및 이차응력이 작용하는 경우에 대한 배관설계식을 정리하면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M_{cr-offset} \leq \frac{3S_m - C_1[P_o D_o / (2t)]}{C_2[D_o / (2t)]} - M_{s,e} \quad (1)$$

여기서 $M_{s,e}$ 는 실제로 작용하는 열평창 모멘트이고, $M_{cr-offset}$ 는 가진기 초기 변위량에 해당하는 모멘트이다. 또한 2차응력지수 C_1 , C_2 는 배관에 서 1.0이고, 엘보우에서 2.389이며, S_m 은 SA 312 TP304 용접부의 허용 설계응력강도로서 288 °C(550 °F)에서 116.87 MPa(16.95 ksi)이다.

식(1)의 계산으로부터 균열을 가진 배관부위인 TP304 배관의 최대허용 모멘트는 644 m-kN (5,700,000 in-lb)를 얻을 수 있다. 또한 엘보우 위치에서도 최대로 허용되는 모멘트는 엘보우 #4 위치에서 1,175 m-kN (10,400,000 in-lb)이다. 피로손상에 의한 파손응력은 응력 조건에서 구한 제한치보다 상당히 큰 여유를 가지고 있기 때문에 피로에 의한 최대 허용 모멘트 구속조건은 초기 변위 설정에 실질적 역할을 못하였다.

ANSYS를 이용하여 균열이 없는 배관계에서 가진기 변위에 대한 주요 부위에 작용하는 모멘트를 구하였다. 주요 부위(엘보우 #4 및 배관 균열 위치의 TP 304 배관)에서의 모멘트와 가진기 변위의 선형적 관계를 도식하고, 식(1)에서 구한 모멘트 상한 경계조건을 적용하면 최대 가진기 허용 변위가 116.84 mm(4.6 inch)로 얻어졌다. 이에 대한 그림이 Fig.3에 나타나 있다.

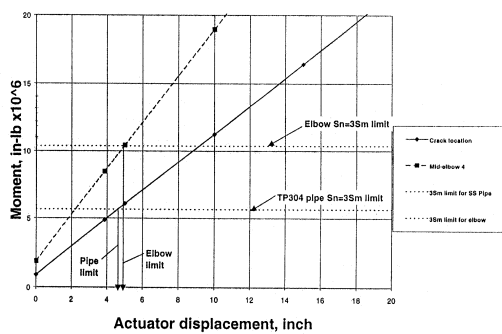


Fig.3 Relation of moment and actuator displacement for determining an initial actuator static offset

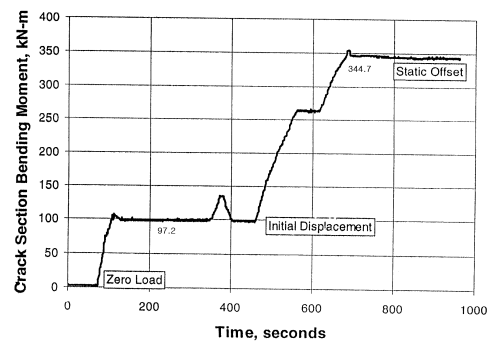


Fig.4 Actuator displacement during static push.

ASME Sec.III 설계코드에 의해 허용되는 최대 모멘트에 해당하는 가진기의 초기변위가 선정되었는데 이를 확인하기 위해서 균열깊이/배관 두께(a/t)의 비를 0.627로 가정하고 균열이 있는 배관계에 대한 ANSYS 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석은 크랙을 가진 배관을 묘사할 수 있는 STIF39 요소(Nonlinear Spring-Slide Element)를 사용하였고, 그 결과 정적으로 가진기 변위를

가하는 동안에 배관 두께를 통하여 표면 균열의 파단이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 4 inch(101.6 mm)의 초기변위를 가진 상태에서도 내부압력과 열팽창 하중에 의한 응력으로 원주방향 표면 균열을 가진 배관이 파단됨을 확인하였다. IPIRG 연구(Exp. 1.3-3)⁽²⁾ 수행의 결과를 살펴보면 TP 304 모재인 경우에 열팽창 하중을 최소화한 상태에서, 해석에 의한 파단 하중 보다 실험 파단 하중이 적게 나왔기 때문에 본 연구에서의 초기변위도 4.6 inch보다 더 적게 선정하여야 한다. 따라서 최종적으로 최대 허용치의 52%인 2.4 inch(60.96 mm)를 가진기의 초기변위로 선정하였다. 열팽창 하중의 효과를 관찰하기 위하여 가진기의 초기변위를 가하고서 단일 주파수로 진폭이 증가하는 동적하중을 가하였다. 동적하중에 의해 균열배관의 파단 거동 관찰이 목적이기 때문에 초기 변형시에 균열의 진전이 있다면 이를 충분히 고려하여야 한다. 따라서 초기변위를 가하는 중에도 가진기 변위에 따른 균열개구변위(CMOD) 및 직류전위차계(d-c EP)로서 균열의 초기 시작점을 감시하였다. 만약 정적하중을 가하는 중에 균열 개시가 시작된다면 관찰 즉시에 약간 변위를 되돌려서 동적하중을 가하기 위함이었다.

3. 실험 결과 및 검토

가. 준정적 하중 작용시 결과

2차응력의 효과를 최대한 얻을 수 있도록 가능한 초기변위를 x 방향으로 60.96 mm로 설정하고 가진기의 변위를 Fig.4와 같이 서서히 단계적으로 가하였다. 60 mm까지가 최종 목표였으나 초기 균열 진전 신호가 발생하여 58 mm에서 정지시킨 후 약 56 mm까지 약간 후퇴시켰다.

Fig.3에서 나타낸 균열개구변위(CMOD) 측정점인 중심부 및 48.8 mm 편심된 위치에서의 균열 개구변위의 변화를 살펴보면 다음과 같은 결과를 관찰할 수 있었다. 650초 이후 700초까지의 균열 개구속도가 500 - 600초 사이의 속도보다 빠르게 일어나고 있음을 알 수 있었는데, 이는 균열선단 주위에서 소성변형이 일어나고 있음을 나타내는 것으로 균열선단이 무디어지는 과정임을 암시하는 것이다.

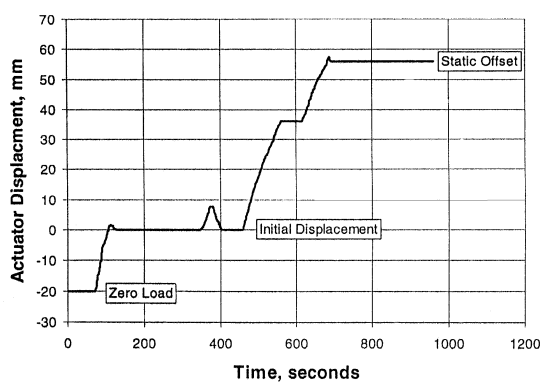


Fig.5 Crack section bending moment during static push

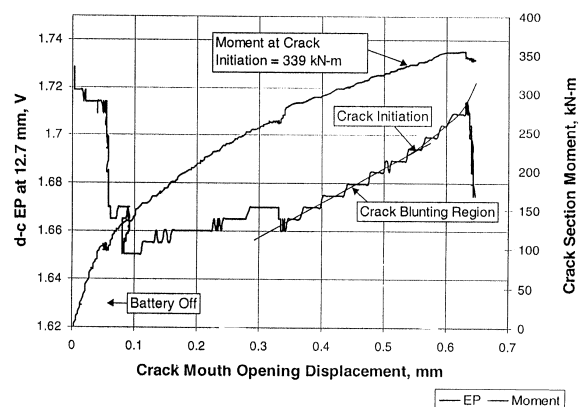


Fig.6 Crack blunting region and crack initiation point during static push

Fig.5에서는 시간에 따른 균열부위배관에서의 굽힘 모멘트 변화를 도시한 것으로 가진기에 가하는 변위 그래프인 Fig.4와 동일한 경향을 보이고 있다. 가진기 변위를 가하기 전에 내부압력 간접

효과, 열하중 및 자중등에 의해 발생하는 97.2 kN-m의 모멘트가 초기에 균열을 가진 배관부에 작용되고 있음을 알 수 있다. 또한 균열개시 직전에 균열을 가진 배관부에 작용되는 모멘트가 344.7 kN-m로 나타났다. 따라서 가진기 초기변위를 가함으로 발생한 균열 배관부에 작용하는 모멘트는 247.5 kN-m임을 알 수 있고, 본 실험에서 加하고자 하는 2차응력이 균열부에 작용되고 있다.

균열부위배관에서의 굽힘 모멘트와 가진기 변위의 선형관계를 정량적으로 확인하기 위하여, 가진기 초기변위를 준정적으로 가하는 도중에 작용 변위와 균열부위 배관에 작용하는 모멘트 관계를 비교하면 선형적으로 변함을 확인할 수 있었다. 따라서 균열의 진전없이 2차응력을 초기변위를 줌으로서 실험적으로 부과시킨 것이 적절함을 확인할 수 있었다.

Fig.6에서는 균열 시작점을 찾기 위하여 균열면 전후에 설치한 직류전위차계로 얻는 전압과 균열개구변위의 관계와 함께 균열개구변위와 균열부위배관과의 관계를 도시하였다. 균열 진전이 시작된 균열개구변위는 0.55 mm이며, 이 때 초기변위는 약 50 mm에 해당하고, 균열부위배관에 작용하는 모멘트는 339 kN-m 이었다. 본 실험에서는 Fig.4에서 볼 수 있는 바와 같이 가진기의 초기 변위를 55.9 mm 가했기 때문에 균열개시 직후까지 변위를 가했음을 알 수 있고, 초기변위에 의한, 즉 2차응력 유발 하중을 위한 균열부위배관에 작용하는 모멘트는 균열개시점 모멘트보다 큰 344.7 kN-m임을 확인할 수 있다. 또한 최대 초기변위를 가했을 때 균열개구변위가 0.63 - 0.64 mm 사이임을 알 수 있고, 이에 상응하는 위치는 배관 중심부에서 48.8 mm 편심된 최대균열 깊이에서 균열 개시가 일어났음을 알 수 있었다.

나. 동적하중 작용시의 결과

배관 파단에 대한 2차응력의 영향을 조사하기 위해 2차응력을 발생시키는 초기변위를 Fig.4와 같이 가한 후에 단일 주파수의 동하중을 Fig.7과 같이 가진기에 가하였다. 정적 초기변위(55.9 mm)후에, 배관 파단을 일으키기 위하여 선형적으로 진폭을 증가시키면서 변위를 가하였다. 크랙 부위 배관에서의 동적거동을 관찰하면, y 방향으로의 동적 거동이 가진 주파수와 거의 일치하나, x 방향으로는 일치하지 않고 1.5 - 2배의 높은 주파수를 보였다. 본 연구 실험 설비의 강성이 큰 크랙부위배관을 제외한 배관계의 위치인 엘보우 #3 및 동서방향(x 방향)에 위치한 배관 등에서는 위상각의 변화만 있을 뿐 주파수 변화는 관찰되지 않았다. 이러한 균열부위배관의 동적거동은 y 방향으로는 강성이 커서 변화가 없으나, x 방향으로는 균열부위배관과 주위 실험설비 배관과의 x 방향 강성의 불연속으로 인해 발생하는 현상이다.

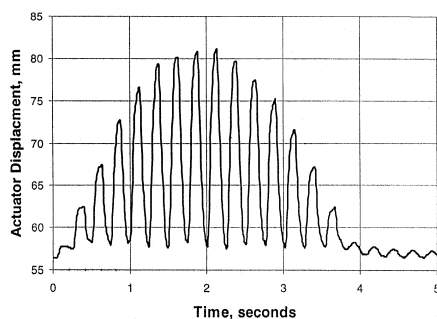


Fig.7 Actuator displacement considered initial offset displacement with single frequency

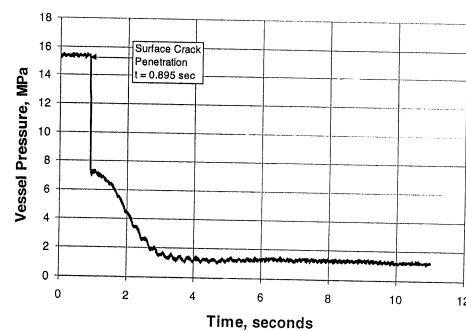


Fig.8 Surface crack penetration time measured by vessel pressure drop

균열부위배관에서 크랙면 내부의 압력을 측정하는 압력계를 설치하여 배관 내부압력 변화를 측정하였는데 그 결과가 Fig.8에 나타나 있다. 초기 배관 내부압력 15.5 MPa에서 0.895초에 압력이 급격히 떨어짐을 관찰 할 수 있는데, 이는 균열이 진전되어 배관 두께를 관통하였다는 것을 의미한다. 또한 동적하중을 가할 시에 균열개구변위의 변화를 Fig.9에 나타내었다. 3번째 주기 최대 진폭 때에 균열개구변위가 상승하고, 4번째 주기 최대 진폭시에 균열이 급속히 진전되기 시작하여 0.895초에서 파단이 일어났다. 균열면 배관에서 균열 좌우 배관 사이의 회전각 변화를 관찰하면, 회전각 변화의 주파수는 균열주위배관의 x방향 주파수와 동일하다. 이는 균열 열림각이 배관의 x방향운동에 지배됨을 나타내는 것이다.

또한, 최대 굽힘모멘트가 469.5 kN-m에서 파단이 급속히 진행되어 파단되었다. 따라서 초기변위가 없을 시의 작용하중 97.2 kN-m 및 초기변위시 정적하중(2차응력하중) 247.5 kN-m를 제하면 124.8 kN-m의 동적하중이 작용한 것이다.

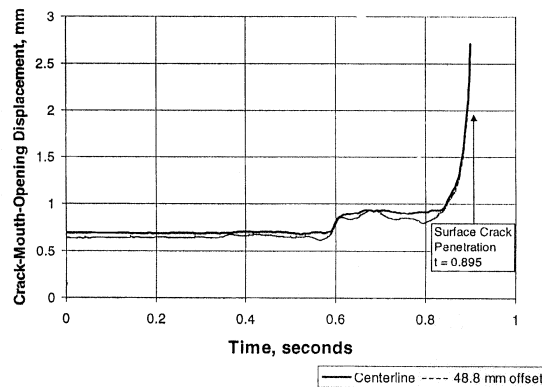


Fig.9 CMOD for the dynamic input load

다. 2차응력의 파단 영향 분석

2차응력이 파단에 미치는 영향은 물리적으로 다음과 같이 알려져 있다.

첫째로, 파손응력이 균열이 없는 배관영역의 항복강도보다 높은 경우, 즉 큰 표면 균열을 가진 배관으로서 소성역이 균열이 있는 배관 영역에 집중될 때 해당되는 경우이다. 이러한 상황에서는 열팽창 하중이나 SAM 하중과 같은 하중이 작용하여 발생하는 2차응력이 1차응력과 거의 동일하게 배관 파괴에 기여한다. 이는 균열 이외의 부위에서 흡수되는 소성에너지의 양이 적어서 배관에 작용하는 에너지가 대부분 파단에 기여하는 에너지로 작용하기 때문이다. 또한 배관의 기하학적 배치 및 배관 물성치가 동적에너지를 흡수하는 감쇄력이 작아서 배관에 가해지는 에너지를 흡수하지 못하고 균열 부위 배관에 집중되는 이유이다.

둘째로, 파손응력이 균열이 없는 배관영역의 항복강도보다 작은 경우로서 배관 균열의 크기가 작거나, 배관의 감쇄력이 큰 경우이다. 이런 경우에는 배관에 작용하는 에너지에 의해 엘보우 및 T형 연결부 등에서 소성 변형이 발생하게 된다. 이는 배관 배치 형상이나 또는 배관 물성치에 의존하게 된다.

이상과 같이 2차응력의 영향에 대한 물리적인 분석을, 실험 결과를 통하여 정량적으로 확인하고, 2차응력 영향 실험데이터를 이용하여 2차응력 평가기준을 설정하는 것이 필요하게 되었다. 이를 위해 균열이 없는 배관영역의 항복강도보다 낮은 파손응력을 가지는 경우의 실험을 본 연구에

서 수행한 것이다.

라. 파단비(Fracture Ratio) 분석

균열길이 정의에 따른 파단비 분석을 위하여 참조 실험 및 본 연구 실험에서의 균열 길이 정의에 따른 차이를 Table.1에서 보이고 있다. Table 1 및 2에서, R-Exp.1는 준정적 4절점 굽힘실험으로 압력은 11.0 MPa(1,600 psi)이고, 준정적 J-R곡선을 사용하였고, R-Exp.2(1,3-5)는 압력 15.5 MPa(2,250 psi)에 열팽창응력을 최소화한 상태에서 단일 주파수의 동적하중을 가한 실험으로 동적 시험 J-R곡선을 사용하였다.

Table.1 Experimental moments (mm/24.5)

Exp. Num.	R-Exp-1	R-Exp-2	BINP Task-1 (center)	BINP Task-1 (offset)
total $2c/\pi D$	0.500	0.532	0.510	0.510
Equiv. $2c/\pi D$	NA	0.440	0.476	0.476
t_2	1.124	1.055	1.121	1.112
t_4	1.024	0.931	0.988	1.024
a_1	0.689	0.634	0.715	0.871
a_2	0.589	0.510	0.582	0.783
a_1/t_2	0.613	0.601	0.638	0.783
a_2/t_4	0.575	0.548	0.589	0.765

t_1 =wall thickness
 t_2 =(wall thickness - countbore)
 t_3 =(wall thickness + crown height)
 t_4 =(wall thickness + crown height - countbore)
 a_1 =flaw depth from inner diameter
 a_2 = a_1 - counterbore

BINP Task-1(center)는 본 연구 실험으로 압력 155MPa에 큰 열팽창 응력을 고려하기 위하여 초기변위를 가한 상태에서 단일 주파수 동적하중을 가한 파괴실험 결과 중 배관 중심부에서의 결과이며, BINP Task-1(offset)은 14° 편심된 균열 최대 깊이에서의 결과이다.

Table.1에서 등가 균열길이(Equiv. $2c$)는 균열 총면적에서 최대깊이를 나눈 값이며, a_1 은 시추용 단면(counterbore)을 포함한 길이이고, t_3 는 NUREG 6389⁽⁸⁾에서 제안한 용접관(weld crown)을 포함하는 배관 두께이다. a_2 , t_4 는 시추용 단면을 제외한 균열 깊이 및 배관 두께의 정의이다.

Table.1의 결과에 의하면 균열 길이의 정의에서 시추용 단면(counterbore)의 포함 여부는 2 - 7 %의 작은 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 동하중에 의한 배관 파단실험을 초기 정적변위를 가한 경우와 가하지 않은 경우 및 4절점 굽힘실험의 파단하중이 Table 2에 나타나 있다. Table.2의 실험하중을 이용하여 식(2)와 같이 정의된 파단하중을 비교하였다.

$$FR = \frac{\sigma_m + k\sigma_{\text{expt}}}{\sigma_m + \sigma_{\text{resd}}} \quad (2)$$

여기서 k 는 위치상수로서 작용 모멘트의 방향을 결정해 주는 상수 값으로 중심위치에서는 1이며, 14도 편심된 최대깊이 위치에서는 $\cos(14)$ 이고, σ_m 은 초기변위에 의해 발생하는, 즉 열팽창 하중에 의한 정적 응력으로 2차응력을 나타낸다.

모든 실험에서 얻어진 모멘트를 이용한 응력값 산출시 사용된 응력-변형을 곡선은 준정적 시험 데이터를 사용했으며, 예측 응력값 산출을 위해 사용된 J-R 데이터는 참조실험 1에서는 준정적

값이고, 참조실험 1 및 본 연구 실험에서는 동적 시험 데이터를 사용하였다. 본 실험 BINP Task-1)에서는 중심부에서의 균열길이 및 편심위치에서의 균열 길이인 경우에 대하여 각각 따로 계산하였다. 또한 균열길이 및 배관두께의 정의를 NUREG 6389 제안방법 및 대체 정의 방법을 사용하여 비교해 보았다. 이 결과를 Table. 3에 정리하였다.

Table.2 Experimental moments (kN-m)

Exp Num.	Zero Disp.	Static Push	Dyna-mic	Total	Total minus Static
R-Exp.1	NA	NA	NA	501.4	-
R-Exp.2	84.4	0.0	408.6	493.0	493.0
BINP Task-1	97.2	247.5	124.8	469.5	222.0

Table.3 Comparison of fracture ratios

Experiment Number	NUREG 6389 (a_1/t_s)	Altena (a_2/t_s)
R-Exp.1	1.09	1.12
R-Exp.2	1.11	1.10
BINP Task-1(center) /total M	1.07	1.09
BINP Task-1(offset) /total M	1.45	1.42

균열 길이에 대한 ASME Sec.XI에서의 기반인 편심된 위치에서 최대 균열 길이를 균열 길이로 정의된 실험결과인 BINP Task-1(offset)의 결과가 30% - 35.5%의 보수적인 결과를 나타내고 있다. 균열 길이 정의에 따른 차이는 적게 나왔으며, 중심부에서의 파단비는 참조실험에서의 파단비와 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 이는 초기변위에 의한 하중 즉 열팽창 하중등의 이차응력을 발생시키는 하중도, 동적 하중이 배관 파단에 기여하는 정도로, 배관 파단에 기여하는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 본 실험은 전술한 바와 같이 균열부위배관 이외의 배관부 및 엘보우 강성이 크기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다. 따라서 큰 균열의 경우이거나 또는 배관 배치가 균열부위배관에 하중이 집중되게 되어 있는 경우에는 2차응력하중의 영향도 동적하중과 동일하게 파단에 영향을 미치기 때문에 배관 설계시나 평가시에 충분히 고려하여야 할 것으로 사료된다.

마. 코드 요건의 적합성 검토

ASME Sec.XI App.C에 따르면 스테인레스 SAW 용접부 재료에 대한 파단 예측식은 다음과 같다.

$$Pb' = Z*SF(Pm+Pb+Pe/SF)-Pm \quad (4-1)$$

$$(Pb'+Pm)/Z=(\text{limit load})/Z =SF(Pm+Pb+Pe/SF) \quad (4-2)$$

여기서 Pb'는 파단시 예측되는 극한 하중시의 굽힘응력이며, Pm은 일반적으로 Sm/2인 실제 압력에 의해 발생된 막응력이고, Pb는 자중 및 관성력 등에 의한 굽힘 응력이다. 또 Pe는 SAM을 포함해야만 하고 응력으로 실제 작용하는 열팽창응력이며, Z는 재질이나 배관 직경에 의존하는 EPFM 수정 계수이고, SF는 안전계수이다.

식(4-2)에 대응하는 실제 파단응력을 구해보면 코드를 사용한 경우에는 1.45(limit load)[f(Sm)]/Z를 얻을 수 있고, 실제 파단응력을 기준으로 하면 1.11(limit load)[f(Sm)]/Z의 값을 얻을 수 있다. 그러나 이는 안전성을 고려할 때 Pe<Sm의 경우에 충분히 만족되는 조건을 가지고 있다. 그러므로 2차응력도 1차응력과 동일하게 파단에 기여하고 있음을 고려하기 위하여 ASME Sec.XI App.C의 배관 파단 평가식을 Pe<Sm의 경우에는 ASME 코드상의 유동응력 사용시에는 Pb' = Z*SF(Pm+Pb+Pe)-Pm에서 SF를 1.45로 사용하고, 실제 유동응력 사용시에는 SF를

1.11을 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 현재 ASME 코드에서는 정상운전에서 SF=2.77, Level C & D(Emergency & Faulted Conditions) 상황에서는 1.39로 규정되어 있다. 이는 지나치게 보수적으로 평가하고 있으므로 본 연구의 결과 및 기존에 수행된 실험의 결과를 반영하고, 추후 더 필요한 실증 실험을 추가하여 개정되어야 실제 파단거동을 묘사할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구

배관 파단에 영향을 미치는 2차응력의 영향을 관찰하기 위하여 초기변위를 준정적으로 가하고 난 후에 동적 변위를 가하는 고압, 고온의 실패관 실험을 수행하였다. 초기변위를 선정하기 위하여 선형 배관해석 및 ASME 코드에 의한 평가를 수행하였고, 기존 실험 결과를 참고하여 초기변위를 선정할 수 있었다. 선정된 초기변위는 파단이 일어나기전의 최대하중에 해당하였다. 동적하중 실험 결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- 균열깊이를 정의할 때 시추용 단면(counterbore)의 고려는 파단평가에 큰 영향을 미치지 못한다.
- ASME Sec.XI에서 기준으로 하고 있는 균열 깊이 선정방법인 부분적인 최대균열 깊이 선정 방법은 보수성을 가진다.
- 큰 균열의 경우이거나 또는 배관 배치가 균열부위배관에 하중이 집중되게 되어 있는 경우에는 열팽창 하중등 이차응력을 발생시키는 하중도, 동적 하중이 배관 파단에 기여하는 수준으로, 배관 파단에 기여한다.
- ASME Sec.XI App.C의 배관 파단 평가식과 비교한 결과, $Pe < Sm$ 인 영역에서는 1차 응력과 2차 응력에 관계없이 안전계수(SF)로 1.45(ASME code의 유동응력 적용) 또는 1.11(실제 유동응력 적용)을 적용할 때 가장 정확한 결과를 주었다.
- $2Sm > Pe > Sm$ 인 경우의 배관 파단 평가식의 새로운 제안이 요구된다.

5. 참고문헌

- [1] ASME Sec.XI, 1998, ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components .
- [2] NUREG/CR-6233, 1997, Crack Stability in a Representative Piping System Under Combined Internal and Seismic/Dynamic Displacement-Controlled Stresses, Vol. 3.
- [3] NUREG/CR-6389, 1997, IPIRG-2 Task 1 Report - Pipe System Experiments with Cracks in Straight Pipe Locations.

후기) 본 연구는 전력연구원, 한국원자력안전기술원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소와 공동으로 추진하고 있는 국제공동연구인 BINP (Battelle Integrity for Nuclear Piping)의 일환으로 추진되는 연구입니다. 관계자 여러분께 심심한 감사말씀 드립니다.