



# THEME 02

## 파단전누설 설계를 위한 실배관 파괴저항시험

석창성 | 성균관대학교 기계공학부, 교수 | e-mail : seok@skku.edu

이 글에서는 원전배관의 안전설계 개념인 양단순간파단(DEGB: Double Ended Guillotine Break) 및 파단전누설(LBB: Leak Before Break)에 대해 설명하고, 파단전누설 설계를 위한 다양한 실배관 파괴저항시험 방법 및 실배관 파괴저항시험의 필요성에 대해 소개하고자 한다.

### 원전배관 안전 설계

일반적으로 원자력발전소는 운전 도중 발생할 수 있는 모든 사고를 가상하여 이중 가장 심각한 사고 하에서도 모든 기기 및 부품이 제 기능을 발휘하고 충분한 건전성을 확보할 수 있도록 설계된다. 과거 이와 같은 설계기준에 의해서 가정된 사고 중의 하나가 배관의 양단순간파단에 의한 사고이다. 양단순간파단이란 배관이 운전 중 순간적으로 취성 파단되어 완전히 둘로 갈라지는 현상을 말하며 DEGB가 일어나면 배관 내부에 있던 고온, 고압의 유체가 순간적으로 다량 분출되므로 배관의 주변에 있는 각종 기기 및 부품에 심각한 영향을 미치게 된다. 이러한 영향을 최소화하기 위해서 과거에 설계된 원자력발전소의 경우는 막대한 경비를 들여 파단이 예상되는 위치에 배관파단구속장치(PWR:

Pipe Whip Restraint) 및 유체 충돌 차단벽(jet impingement shield) 등과 같은 육중한 구조물을 설치하였다. 그러나 이같은 보호물들은 제작·설치비용이 클 뿐 아니라 운전 중 검사 및 보수 시 배관 접근을 방해하여 검사요원 및 보수 요원들의 방사선 피폭을 증가시키는 요인이 되었으며, 보호물과의 접촉이나 구속으로 인하여 오히려 배관응력을 증가시킨다는 문제점을 갖고 있다.

1980년대 이후 탄소성 파괴역학의 발전과 원자력발전소의 충분한 운전경험을 토대로 결함이 있는 배관은 대부분 파단되기 전에 많은 누설이 발생한다는 결론을 얻었다. 즉, 배관계통에 각종 형태의 작은 결함들이 존재한다고 가정하고 다양한 배관하중 조합 하에서 그들의 거동을 해석/시험한 결과에 의하면, 이러한 결함들은 양단순간파단이나 그와 동등한 파단형태에 도달할

수 있는 임계균열길이(CCL: Critical Crack Length)로 성장하기 훨씬 전에 가동 중 검사(ISI: In-Service Inspection) 또는 누설감지장치(leak detection system)로 탐지할 수 있으며, 불안정 균열성장에 대해 충분한 안전여유를 갖고 있으므로 대형 파단사고로 발전될 가능성이 극히 낮다는 것이 파괴역학적으로 입증되었다. 이러한 결과를 배관계통설계에 적



그림 1 양단순간파단 및 파단전누설에 대한 기본 개념

용한 것이 파단전누설 설계 개념이다.

파단전누설 개념이 등장한 이후로 배관의 양단순간 파단 대신 파단전누설 개념을 배관 설계 시 새로운 설계기준으로 사용할 수 있게 되었고, 배관의 설계에 있어서 양단순간파단의 가능성을 배제함으로써 여러 가지 설계상의 이점을 얻게 되었다. 배관의 양단순간파단 사고에 대비하여 설치했던 배관 파단 구속장치, 유체충돌차단벽 및 각종 스너버(snubber) 등을 제거함으로써 설계비용을 절감할 수 있었고, 배관파단으로 인해 원자로 내부에 발생할 수 있는 비대칭 취출 부하의 영향이 제거됨으로써 원자로 내부구조물 및 핵연료의 설계하중을 감소시킬 수 있었으며, 핵연료 재정전수조 밀봉장치의 영구적인 설치가 가능해짐으로써 핵연료 재장전 시 소요되는 기간을 상당히 단축시킬 수 있게 되었다.

### 실배관 물성 평가의 중요성

파단전누설 개념을 설계에 적용하기 위해서는 각각의 배관계통에 대한 탄소성 파괴역학 해석이 요구되며, 이때 배관재료의 응력-변형률( $\sigma-\epsilon$ ) 및 파괴저항(J-R) 특성자료가 필요하다. 응력-변형률 데이터의 경우 인장시험을 수행하여 간단히 획득할 수 있지만 파괴저항 특성자료를 위해서는 실제 배관과 동일한 두께의 시험편으로 파괴저항시험을 수행하도록 되어 있다. 그러나 배관과 두께가 같은 파괴저항 시험편을 배관으로부터 직접 채취하기가 어렵기 때문에, 채취 가능한 두께의 표준시험편으로 시험을 수행하고 있다. 그러나 배관에서 시험편을 채취하여 시험할 경우, 실제 배관과 다른 구속 조건으로 인하여 실배관의 파괴저항 시험결과와 시험편 파괴저항 시험결과가 다를 수 있다. 이러한 구속효과의 영향은 배관의 재질 및 크기에 따라 영향을 받으며 이는 실제 배관의 물성과 무시할 수 없을 만큼의 큰 차이를 보이기도 한다. 이 밖에도 하중이력, 하중속도 등이 파괴저항곡선에 큰 영향을 미친다.

이와 같은 인자들이 배관의 파괴인성에 미치는 영향을 이해하더라도 실 사용배관의 파괴인성에 대한 정량적인 데이터와 연구결과들을 종합한 자료가 없기 때문에 배관 설계자는 보수적인 시험편의 시험결과를 바탕으로 설계를 하고 있다. 즉, 배관 설계 시 일반적으로 참고문헌에서 찾은 동종재료의 표준시험편에 대한 시험결과와 중간값을 reference data로 사용하고 있는 실정이다.

실제 원전배관을 설계하는 데에 있어서 가장 좋은 설계는 배관을 실제 가동조건하에서 시험 및 평가한 결과를 바탕으로 하는 설계일 것이다. 그러나 이 경우, 내압을 부여하는 문제와 배관의 형상 및 각종 구속 장치를 모사해야 하는 문제가 발생하게 된다. 내압을 부여한 시험의 경우 해외에서 수행한 경우는 있으나, 수행하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 또한 배관의 형상 및 각종 구속 장치를 모사하기 위해서는 각 경우별 시험을 모두 수행해야 하는 어려움이 따르게 된다.

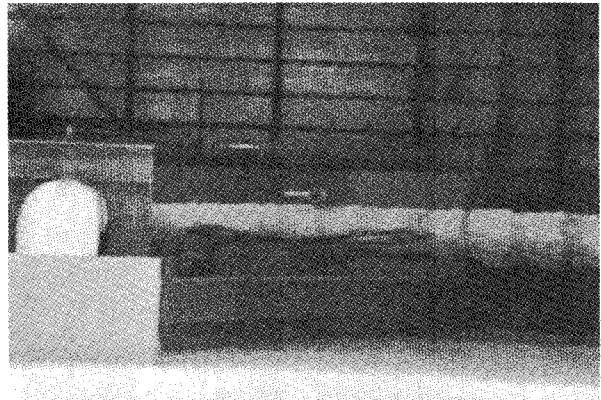
따라서 대부분의 경우 표준 시험편을 이용한 시험 및 평가가 이루어지게 되고 이를 바탕으로 원전배관을 설계하게 된다. 이때 배관의 실제 가동조건을 모사한 시험이 아닌 표준 시험편을 이용하여 시험?평가함으로써 발생하는 배관 건전성 평가의 불확실성을 해소하고 실제 원전배관의 안전성을 확보하기 위해 지나치게 높은 안전율을 적용하고 있는 것이 현실이다. 이러한 높은 안전율은 초기 건설비용을 과다하게 증가시킬 뿐 아니라, 배관의 수명을 과소평가하여 사용가능한 원전을 조기에 폐기하는 문제를 발생시키고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 실배관을 대상으로 파괴저항시험을 수행하여 현실성 있는 안전율을 적용하는 절차가 필요하다.

### 국내외 관련 연구 동향

국외에서는 실배관 시험의 중요성을 인식하고 원자력 발전소 배관의 가동조건을 모사한 실증시험에 대한 연구를 수행해 왔다. 미국에서는 Westinghouse,



그림 2 엘보 배관에 대한 내압 및 굽힘 시험(IPIRG test)



Battelle 연구소 등을 중심으로 관련 연구가 진행되어왔으며, 특히 Battelle 연구소에서는 배관건전성 국제공동연구(IPIRG: International Piping Integrity Research Group) 프로그램의 일환으로 실배관 및 시험편의 파괴저항치에 대한 cyclic & dynamic 하중의 영향, 시험편의 형상 및 크기에 관한 연구를 수행한 바 있다. IPIRG-2 프로그램에서는 배관의 파괴물성치의 변화를 재질, 부하 하중 속도, 하중 양상 및 시험편 형상에 따라 구분하고 각각에 대하여 연구를 수행하여 각 조건에 따른 탄소강 및 스테인리스강의 파괴특성 변화에 대한 연구를 수행하여 원자력과 관련된 재료물성 데이터베이스를 미국 원자력규제위원회(NRC: Nuclear Regulatory Commission)에서 구축해 놓은 상태이다.

반면 국내에서는 설계단계부터 파단전누설 개념을 최초로 도입한 국가임에도 불구하고 이와 관련한 연구가 국외 수준에 비해 미비한 실정이다. 국내 관련 연구 수준을 높이고 원전 기술 선진국에 진입하기 위해 한국 원자력안전기술원에서는 1992년부터 원자력발전소 기계설비의 안전성 평가 기술을 개발하기 위한 연구를 수행하고 있다. 1단계로 LBB 개념 적용과 관련된 안정성 평가기술 및 누설량 평가절차의 체계화, 배관의 하중 조건 평가기술 및 데이터베이스 기본 구조 개발을 수행하였으며 IPIRG-2 프로그램에도 참여한 바 있다.

하지만 배관 건전성 평가 및 파단전누설 설계 해석 기술 개발을 위해서 국내에서 수행된 대부분의 연구는 외국의 설계기준 절차에 준한 재료물성치 측정시험이나 현장 적용을 위한 설계 데이터 제공을 중심으로 이루어졌으며, 실배관에 대한 실증 시험은 시험 기술 및 설비의 미비로 국내에서는 극히 일부 수행중이며 그 외 관련 데이터를 모두 외국에 의존하고 있는 형편이다.

### 다양한 실배관 파괴저항시험 방법

일찍이 국외에서는 앞서 언급한 바와 같이 정부 주도 하에 다양한 실배관 시험을 수행하였다. Battelle 연구소에서는 배관건전성 국제공동연구를 통해 엘보 배관을 대상으로 그림 2와 같이 실제 원전 배관과 동일한 형태의 내압을 형성하고, 굽힘하중을 가하여 배관의 파괴저항 특성을 파악한 예가 있다. 또한 지진하중을 고려하기 위해 동적 하중을 모사한 시험을 수행하여 이에 따른 배관 특성을 평가한 경우도 존재한다. 그러나 이러한 시험은 많은 시간 및 막대한 비용이 소요되기 때문에 계속하여 진행되고 있지는 않다.

실배관을 이용한 파괴저항특성 평가에서는 그림 3에 나타난 계략도와 같이 대부분 4점 굽힘 시험의 형태로 시험을 수행하는데, 이 방법에서는 직관 형태의 시험

양쪽 끝단을 지지하고 균열 생성부 주위에 하중을 가하여 균열을 진전 시킨다. 이때, 시험 하중과 다양한 균열길이 측정법을 통하여 측정된 균열 길이 등의 데이터를 획득하여 원하는 실패관 파괴저항특성을 계산하게 된다. 한편, 일반적으로 원자력발전소 배관에는 정상운전 하중에 해당하는 내압(인장하중)과 굽힘모멘트가 동시에 작용하지만 4점 굽힘 시험의 경우 순수 굽힘하중만 모사가 가능하며 시험 대상인 LBB 개념이 적용되는 배관의 직경이 305mm(12in)부터 최대 1,067mm(42in)까지로 매우 크기 때문에 대형 배관 시험시 시험장치의 크기 및 용량 또한 제한적이다.

따라서 실패관의 4점 굽힘 시험을 통해서는 모사할 수 없었던 인장과 굽힘이 동시에 작용하는 배관의 구속상태를 모사할 수 있고, 실패관의 일부분을 이용하되 크기는 4점 굽힘시험에 사용되는 배관의 크기보다는 작아서 그림 4와 같은 시험절차가 간소화될 수 있는 새로운 시험법 개발에 대한 연구가 진행 중이며, 그 일환으로 국내에서는 인장실패관 형태의 시험법에 대한 연구가 진행 중이다.

그림 5에 나타난 인장실패관 시험의 경우 앞서 언급한 4점 굽힘 시험의 단점을 보완한 시험법으로 직관 형태의 배관에서 일부만을 채취해 레버를 체결하고 레버에 인장

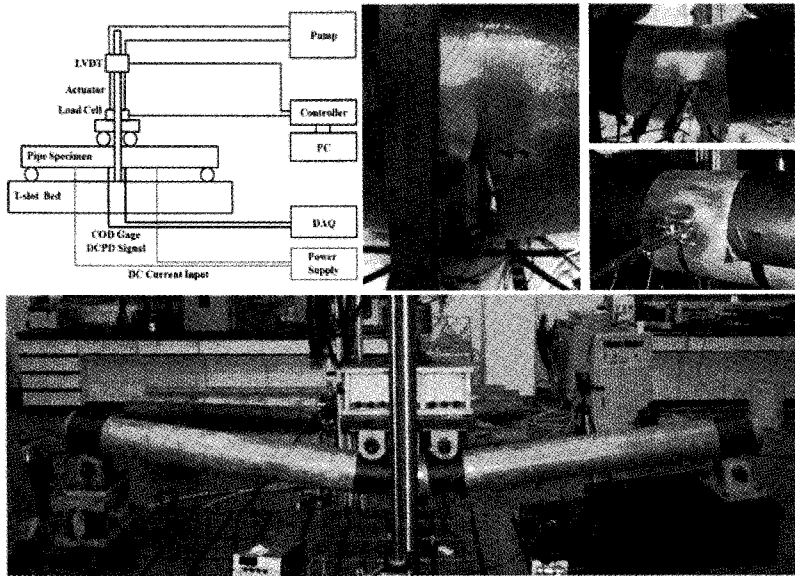


그림 3 실패관을 이용한 4점 굽힘시험 방법

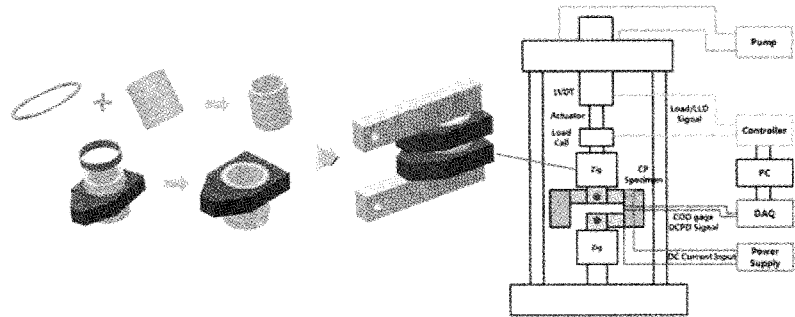


그림 4 인장실패관 시험 및 시험방법



그림 5 인장실패관을 이용한 대형 배관의 파괴저항시험

하중을 가하는 시험법이다. 이 하중부가 방법은 배관에 인장 및 굽힘 하중을 동시에 구현할 수 있으며, 레버 길이를 조절하여 인장 및 굽힘 하중의 비율을 조절할 수 있는 장점이 있다. 현재 동일한 배관을 대상으로 4점 굽힘 시험을 수행하여 두 시험 데이터의 비교를 통해 그 타당성을 규명하는 연구를 진행하고 있다.

### 맺음말

이처럼 파단전누설 개념을 적용하여 원전배관을 설계하기 위해서는 배관의 정확한 파괴저항시험 데이터 및 참고자료로 활용할 수 있는 데이터베이스가 중요하다. 또한 다양한 종류의 원전 배관에 대한 파단전누설 안전여유도 평가 및 파단전누설 개념을 확대 적용하기

위해서는 실배관에 대한 파괴저항시험 절차 확립 및 시험 평가 기술의 개선, 데이터베이스 증설 등의 연구가 필수적이다.

정확한 실배관 파괴저항특성 평가는 원자력에너지의 안정적 공급을 위한 원천기반기술으로써, 원전산업설비에 사용되는 주요기기를 설계하고 유지, 보수하는데 필요한 설계기반 기술이며, 차세대 원전배관의 파단전누설 설계 및 안전여유도 평가를 위한 주요 기술이기 때문에 지속적인 연구를 통해 원전 주요 배관 설계의 신뢰성 향상과 LBB 평가에 의한 원전배관 안전성을 증대 시키고 원전 주요 배관계통의 안전성 저하 우려를 불식시켜 원전 설비에 대한 기술적 근간을 마련함으로써 원전 설비에 대한 신뢰를 증진시켜야 할 것이다.



### 기계 용어해설

#### 터보 제트(Turbojet)

앞쪽에서 공기를 흡입하여 터보 압축기로 압축하고, 연소실에서 연료와 혼합하여 연소시켜 고온 고압의 가스로 만든 후 터빈을 돌려 압축기의 동력을 얻는 동시에 그 가스를 후방의 제트 노즐로부터 대기 속에 분사하여 그 반동력으로 추진력을 얻는 제트 엔진의 일종.

#### 다중 연료기관(Multi-fuel Engine)

알코올, 경유, 식물유 등 조금 성질이 달라도 연소가 잘 되므로 여러 가지 연료를 써서 운전할 수 있는 기관.

#### 중립면(Neutral Plane)

힘 모멘트가 작용하여 보의 단면에 수직응력이 발생할 때, 그 내부에 수직응력을 일으키지 않는 면, 즉 신축되지 않는 면.

#### 줄 열(Joule Beat)

저항  $R$ 의 선에 불변전류  $I$ 가 흐를 때, 도체내의 저항 때문에 단위시간에 소비되는 에너지  $I^2R$ 은 전부 열로 변한다는 법칙을 줄의 법칙이라고 하며, 이때 발생하는 열.

#### 줄-톰슨 효과(Joule-Thomson Effect)

엔탈피를 일정하게 유지하고 압력을 변화시킬 때, 이상기체에서는 변화하지 않으나 실제의 기체에서는 일반적으로 온도가 변화하는 현상.

#### 중성자(Neutron)

양자와 함께 원자핵을 구성하는 요소로, 양자와 거의 동등한 질량을 지니고 전기를 띠지 않으며 질량에 대한 투과력이 커서 원자핵의 파괴에 쓰이는 소립자의 일종.

#### 터보프롭 엔진(Turboprop Engine)

엔진 출력의 90%를 축 출력으로 추출하고 감속장치를 개입시켜 프로펠러를 구동하여 추진력을 얻는 동시에 나머지 10%의 추진력을 배기 제트에서 얻도록 설계된 엔진.

#### 트러니언형 실린더(Trunnion Mounting Cylinder)

피스톤 로드 중심선에 대하여 실린더 양측에 직각으로 뺀 한 쌍의 원통상의 피벗으로 지지하는 결부 형식의 실린더.