

# 내압과 굽힘의 복합하중에서 내부 감육배관의 손상기준

김진원<sup>†</sup> · 박치용<sup>\*</sup>

조선대학교 원자력공학과 · \*한전전력연구원 원자력연구실  
(2002. 8. 6. 접수 / 2002. 9. 27. 채택)

## Criterion for Failure of Internally Wall Thinned Pipe Under a Combined Pressure and Bending Moment

Jin Weon Kim<sup>†</sup> · Chi Yong Park<sup>\*</sup>

Department of Nuclear Engineering, Chosun University

<sup>\*</sup>Nuclear Laboratory, Korea Electric Power Reserach Institute(KEPRI)

(Received August 6, 2002 / Accepted September 27, 2002)

**Abstract** : Failure criterion is a parameter to represent the resistance to failure of locally wall thinned pipe, and it depends on material characteristics, defect geometry, applied loading type, and failure mode. Therefore, accurate prediction of integrity of wall thinned pipe requires a failure criterion adequately reflected the characteristics of defect shape and loading in the piping system. In the present study, the finite element analysis was performed and the results were compared with those of pipe experiment to develop a sound criterion for failure of internally wall thinned pipe subjected to combined pressure and bending loads. By comparing the predictions of failure to actual failure load and displacement, an appropriate criterion was investigated. From this investigation, it is concluded that true ultimate stress criterion is the most accurate to predict failure of wall thinned pipe under combined loads, but it is not conservative under some conditions. Engineering ultimate stress estimates the failure load and displacement reasonably for all conditions, although the predictions are less accurate compared with the results predicted by true ultimate stress criterion.

**Key Words**: Failure Criterion, Locally Wall Thinned Pipe, Finite Element Analysis, Combined Load

### 1. 서 론

발전소나 일반 화학공장 등의 배관계통에서 흔히 발견되고 있는 두께감소(감육, 減肉) 현상은 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion)에 의해 발생되며, 배관의 건전성을 저해하는 중요한 원인 중 하나로 알려져 있다<sup>1-3)</sup>. 특히, 안전성과 경제성을 중요하게 고려하고 있는 원자력발전소의 경우, 감육배관의 건전성 확보는 매우 중요한 고려 사항으로 대두되고 있다. 따라서, 보다 안정적이고 정확한 감육배관 건전성 평가 방법과 기준을 개발하기 위해 많은 연구들이 수행되고 있다<sup>4-8)</sup>.

감육배관의 건전성 평가와 관련한 기존의 연구

결과에 의하면, 감육배관의 건전성 평가는 감육부의 형상, 감육배관의 손상기준, 작용하중의 형태 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다<sup>5,9)</sup>. 특히 감육배관의 손상기준은 손상에 대한 배관재의 저항성을 나타내는 것으로 평가 결과에 직접적으로 영향을 미치며, 재료의 인성, 작용하중의 형태, 감육형상, 그리고 손상모드 등에 의존하는 것으로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 따라서, 감육배관 건전성 평가의 신뢰성 확보를 위해서는 평가하고자 하는 감육배관의 특성이 충분히 고려된 적절한 손상기준을 적용하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 인성이 높은 배관의 감육결합에 대한 손상기준으로는 감육부의 순단면 붕괴 기준이 실험 결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 보고하고 있다<sup>5)</sup>. 감육부에 대한 순단면 붕괴 기준으로는 국부 응력이나 변형률이 적용되는데, 응력기준 형태의 손상기

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
jwkim@chosun.ac.kr

준들이 잘 알려져 있다<sup>5,7,9-11)</sup>. 그러나, 이들 기준은 대부분 외부 부식결함을 가진 가스나 오일 배관에서 내압에 의한 파열을 예측하기 위해 제안된 것이다. 따라서, 원전 배관과 같이 결함이 배관 내부에 존재하며 내압 뿐 아니라 굽힘모멘트가 동시에 작용되는 경우에는 다양한 형태의 손상거동<sup>12)</sup>을 보이기 때문에, 이들 기준을 직접 평가에 적용하는 것은 결과의 신뢰성을 저해하는 원인이 될 수 있다. 그러나, 아직까지 내압과 굽힘하중을 받는 내부 감육배관의 손상을 예측하기 위한 기준은 거의 검토되지 않은 상태이며, 원전 감육배관에 대한 신뢰성 있는 건전성 평가를 위해서는 먼저 적절한 손상기준의 정립이 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 배관실험과 유한요소해석 결과를 바탕으로 내압과 굽힘의 복합하중이 작용되는 내부 감육배관의 손상 평가에 적합한 손상기준을 제시하고자 한다. 이를 위해서 선행연구<sup>12)</sup>에서 수행된 배관실험을 대상으로 유한요소해석을 수행하고, 실험결과와 비교하였다. 비교결과로부터 감육

배관의 실제 손상하중과 최대 허용변위를 가장 적절히 예측할 수 있는 감육부에서의 응력조건을 도출하여 손상기준으로 제시하였다.

## 2 배관 붕괴실험

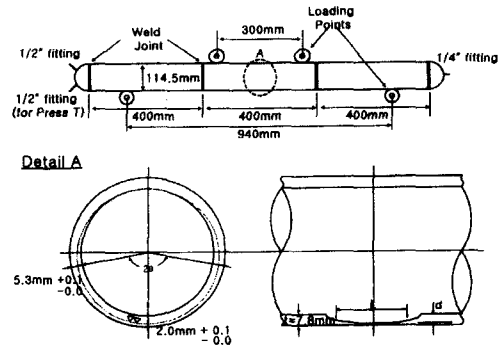


Fig. 1. Geometry of pipe specimen and local wall thinning shape

Table 1. Matrix of full-scale pipe tests and failure mode

| Spec. ID | d/t  | 2θ (°) | L(mm) | P(MPa)      | Loading Type   | Failure Mode              |                |                              |
|----------|------|--------|-------|-------------|----------------|---------------------------|----------------|------------------------------|
| SP-12    | 0.74 | 90     | 25    | 10          | Tension        | Cracking                  |                |                              |
| SP-13    |      |        | 200   |             | Tension        | Ovalization               |                |                              |
| SP-15    |      |        | 25    |             | Compression    | Local Buckling            |                |                              |
| SP-16    |      |        | 200   |             | Compression    | Local Buckling            |                |                              |
| SP-01    |      | 180    | 25    |             | Tension        | Cracking                  |                |                              |
| SP-02    |      |        | 50    |             | Tension        | Cracking                  |                |                              |
| SP-03    |      |        | 100   |             | Tension        | Cracking                  |                |                              |
| SP-04    |      |        | 200   |             | Tension        | Cracking                  |                |                              |
| SP-05    |      |        | 25    |             | Compression    | Local Buckling            |                |                              |
| SP-06    |      |        | 50    |             | Compression    | Local Buckling            |                |                              |
| SP-07    |      |        | 100   | Compression | Local Buckling |                           |                |                              |
| SP-08    |      |        | 200   | Compression | Local Buckling |                           |                |                              |
| SP-09    |      |        | 360   | 25          | Tens.+Comp.    | Local Buckling → Cracking |                |                              |
| SP-10    |      |        |       | 200         | Tens.+Comp.    | Local Buckling → Cracking |                |                              |
| SP-17    |      | 180    | 0     | 25          | 5              | Tension                   | Cracking       |                              |
| SP-18    |      |        |       | 200         |                | Tension                   | Ovalization    |                              |
| SP-19    |      |        |       | 25          |                | Compression               | Local Buckling |                              |
| SP-20    |      |        |       | 200         |                | Compression               | Local Buckling |                              |
| SP-31    |      |        |       | 360         |                | 25                        | Tens.+Comp.    | Local Buckling → Cracking    |
| SP-32    |      |        |       |             |                | 200                       | Tens.+Comp.    | Local Buckling → Ovalization |
| SP-39    | 180  | 0      | 25    | 5           | Tension        | Cracking                  |                |                              |
| SP-40    |      |        | 200   |             | Tension        | Cracking                  |                |                              |

2.1. 배관 재료 및 시편

실험에 사용된 배관은 원자력발전소 2차 계통에 많이 사용되는 ASTM A333 Gr.6 (STS370 in JIS) 탄소강으로, 실험장치의 최대 용량 (620kN, ±125mm)을 고려하여 외경( $D_o$ )이 114.3mm이고 두께( $t$ )가 8.5mm인 배관이 사용되었다.

배관 시편은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 총 길이가 1200mm로 감육부의 가공을 위해서 400mm인 직관 3개를 가공 후 용접하여 제작하였으며, 가운데 배관이 감육결합을 포함한 시험부이다. 모든 배관은 외경과 두께를 일정하게 가공하였으며, 가공 후 배관의 외경과 두께는 각각 113.8mm, 7.8mm를 유지하였다. 시험 조건별 감육 형상은 Table 1에 나타낸 것과 같으며, 감육부의 모양은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 원주방향과 길이방향으로 모두 일정한 반경을 가지는 원형이 되도록 가공하였다. 모든 시편에서 감육부의 가장 얇은 부분이 2mm가 되도록 하였으며, 감육부의 형상과 시험조건은 Table 1과 같다. Table 1에서 감육부의 원주방향 폭( $2\theta$ )과 축방향 길이( $L$ )는 설계코드<sup>13,14</sup>의 최소설계요구두께( $t_{min}$ ) 이 하인 영역의 폭과 길이로 정의하였다.

2.2. 실험 장치 및 방법

배관실험은 Table 1에 나타낸 것과 같이 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우와 내압이 없이 굽힘하중만 작용되는 경우로 구분되며, 굽힘하중은 감육부에 압축응력이 작용되는 경우와 인장응력이 작용되는 경우를 각각 분리하여 고려하였다. 시편은 질소 가스를 이용하여 가압하였으며, 굽힘하중은 4점 굽힘 방식으로 작용시켰다. 4점 굽힘시험 장치의 안쪽 하중점간 거리는 300mm이고, 바깥쪽 하중점간 거리는 940mm이다.

모든 실험은 상온에서 수행하였으며, 내압이 작용되는 경우에는 먼저 가압하여 일정한 내압을 유지한 후 굽힘하중을 작용시켰다. 굽힘하중은 변위제어 형태로 작용되었으며, 이때 가진기의 이동 속도는 2mm/min로 준정적 하중속도를 유지하였다. 실험 과정에서 하중, 내압, 배관의 변위, 그리고 감육부의 변형률이 측정되었다.

2.3. 배관 실험결과

배관 실험에서 관찰된 감육배관의 손상 형태는 Table 1에 나타낸 것과 같이 감육부의 형상과 감육부의 응력상태에 따라 분류되며, 균열발생, 국부좌

굴, 단면변형, 그리고 국부좌굴 후 균열발생으로 크게 구분되었다<sup>12</sup>.

감육형상에 따른 감육배관의 손상하중과 변위는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 감육부에 작용되는 응력의 형태에 따라 결정되었다. 즉, 감육부에

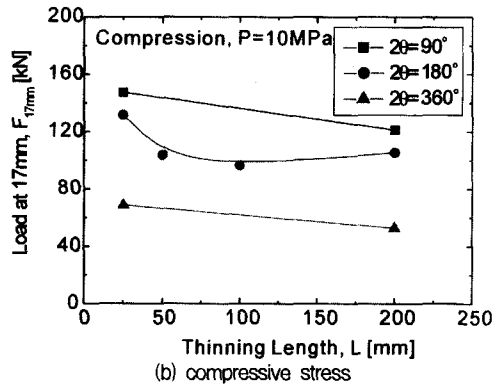
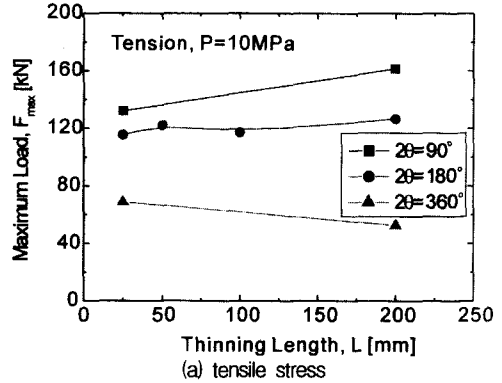


Fig. 2. Variations in load to failure with increase in axial thinning length

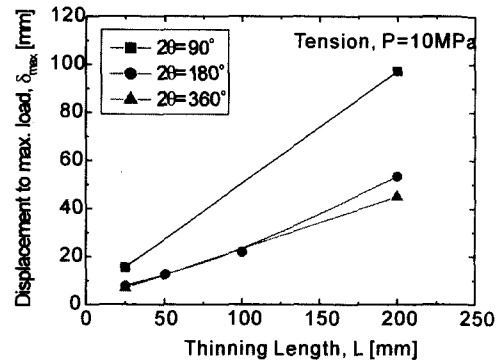


Fig. 3. Variation in displacement to failure with increase in axial thinning length

인장응력이 작용되는 경우, 원주방향 감육 폭이 작을 때 ( $2\theta < 180^\circ$ )는 감육길이에 따라 손상하중이 증가하였으며, 폭이 큰 조건 ( $2\theta > 180^\circ$ )에서는 감육길이에 따라 손상하중이 감소하였다. 그러나, 감육부에 압축응력이 작용되는 조건에서는 감육 폭에 관계없이 감육길이가 증가함에 따라 하중이 감소하는 경향을 보였다. 한편, 감육부에 인장응력이 작용하는 경우에 손상하중까지의 변위는 감육부 폭에 관계없이 감육길이가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

### 3. 유한요소해석 모델 및 검증

#### 3.1. 유한요소해석 모델

유한요소해석 모델에는 실험에 사용된 배관시편과 동일한 형상 및 하중조건이 고려되었다. 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 3차원 모델로서 대칭성을 고려하여 배관의 1/4만을 모델링하였으며, 20절점의 육면체요소를 사용하였다. 유한요소모델에서 내압이 작용되는 경우에 배관의 내면에 압력과 내압에 의한 인장하중을 배관 끝단면에 먼저 작용시킨 후 4점 굽힘하중을 작용시켰으며, 내압이 고려되지 않는 조건에서는 4점 굽힘하중만을 작용시켰다.

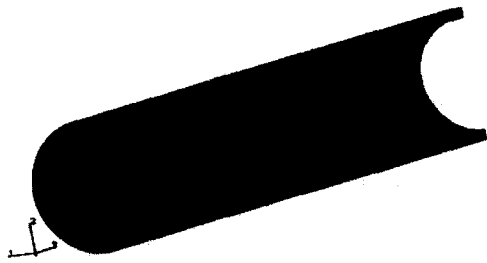


Fig. 4. Finite element model used for analysis

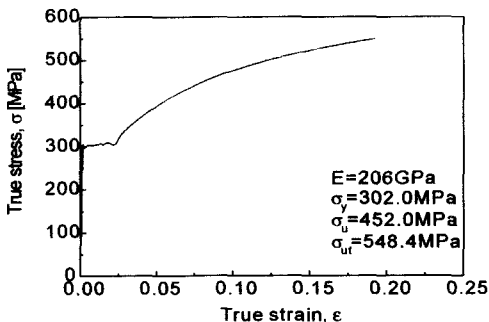


Fig. 5. True stress-strain curve used for FE analysis

해석에 사용된 응력-변형률 곡선은 직접 배관재에서 구한 것으로 Fig. 5와 같으며, 재료의 영률과 포아송비는 각각 206GPa와 0.3이 적용되었다. 유한요소해석에는 범용유한요소 프로그램인 ABAQUS Code가 사용되었다. 실험결과에서 알 수 있는 것과 같이 감육배관의 손상에는 큰 소성변형이 수반되므로, 형상에 대한 비선형 조건을 적용하여 대변형 효과를 고려하였다.

#### 3.2. 유한요소해석의 검증

유한요소모델과 해석 방법의 타당성 검증을 위해 모든 실험 조건에 대해서 유한요소해석을 수행하고, 해석결과와 실험에서 주어진 하중-변위 곡선 및 감육부에서 측정된 원주방향 및 축방향 변형률을 비교하였다. 일부 조건에서 해석결과가 실험결과의 하중-변위 곡선을 조금씩 과소 평가하는 경향을 보였으나, 대부분의 조건에서는 해석결과가 실험결과를 잘 예측하였다. 감육부에서 변형률 역시 변형이 상당히 크게 발생할 때까지 해석결과가 실험결과를 비교적 정확히 예측하였으며, 감육부에서 국부좌굴이 진행됨에 따라 관찰되는 축방향 변형률의 변화 현상 (감소하다 증가하는 경향)도 어느 정도 예측하는 것으로 나타났다. Fig. 6은  $2\theta = 180^\circ$ ,  $L=100\text{mm}$ 인 감육부에 인장응력이 작용되는 경우, 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타난 것으로 해석결과의 신뢰성을 보여주고 있다.

한편, 실험결과와 해석결과를 보다 정량적으로 비교하기 위해 동일한 변위에서 하중을 비교하였다. 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 하중-변위 곡선에서 최대하중에 해당하는 변위의 하중을 비교하였으며, 압축응력이 작용되는 경우에는 최대하중이 정의되지 않으므로 변위( $\delta$ )가 17mm에 해당하는 하중을 비교하였다. Fig. 7은 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타난 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 감육부의 형상, 내압의 크기, 그리고 감육부의 응력상태 등에 관계없이 최대 -8.4~2.0%의 오차 범위에서 해석결과가 실험결과를 예측하였다.

따라서, 본 연구에서 적용된 유한요소모델과 해석 방법은 굽힘하중 또는 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 내부 감육배관의 손상거동을 상당히 잘 예측하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 해석결과와 실험결과의 비교를 통해 감육배관의 손상 발생에 대한 기준을 도출하는 것이 타당하다는 것을 알 수 있다.

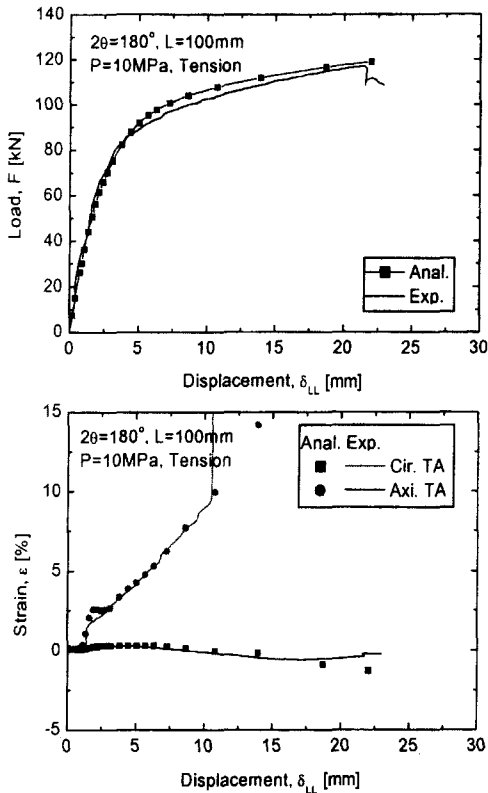


Fig. 6. Comparison of experimental and FE predicted load-displacement curves and strains at thinned area

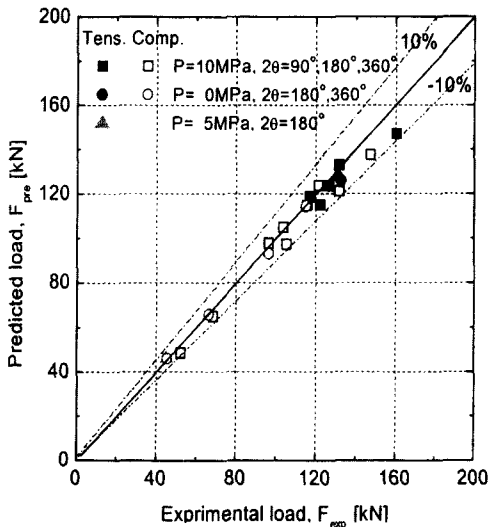


Fig. 7. Comparison of experimental and predicted loads at a given displacement

## 4. 내압과 굽힘하중 조건에서 감육배관의 손상기준

### 4.1. 손상기준의 결정

앞서 유한요소해석 결과가 감육배관의 거동을 잘 예측하는 것을 확인하였다. 또한, 선행 연구의 실험 결과에서 내압과 굽힘하중이 작용되는 경우, 감육배관의 손상이 국부적인 소성붕괴에 의해 발생하는 것을 관찰하였다<sup>12)</sup>. 따라서, 내압과 굽힘하중을 받는 내부 감육배관의 손상기준으로 소성붕괴 기준을 고려하였다. 즉, 해석결과에서 감육부 단면의 평균 등가응력이 특정 응력기준을 초과하는 경우에 손상이 발생하는 것으로 가정하였다. 응력기준으로는 인성이 높은 배관의 손상예측에 적합한 것으로 알려져 있는 Table 2의 기준이 고려되었으며, 이들 기준을 적용하여 실제 감육배관의 손상을 가장 적절히 예측하는 응력기준을 손상기준으로 제시하고자 한다. 따라서, 기준의 적절성을 평가하기 위해 하중지지능력, 변형수용능력, 그리고 감육부의 형상 변화에 따른 경향 등의 예측 측면에서 손상기준이 검토되었다.

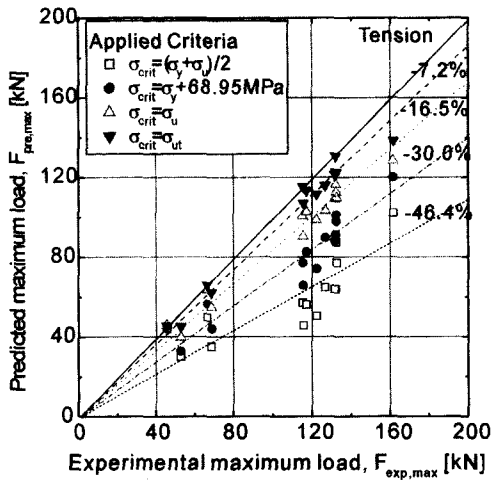
### 4.2. 하중지지능력 측면의 손상기준 검토

하중지지능력 측면에서 손상기준의 적절성을 살펴보기 위해서, Table 2에 제시된 4가지 응력기준을 적용하여 해석결과로부터 감육배관의 손상하중을 예측하였다. Fig. 8(a)는 감육부에 인장응력이 작용되는 경우, 예측된 손상하중과 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유동응력 ( $\sigma_f$ )과 Modified B31G의 기준이 적용된 경우에는 예측된 손상하중이 실제 배관의 손상하중을 평균 46.4%와 30.0% 정도 과소 평가하였다. 재료의 공칭 인장강도( $\sigma_w$ )와 진 인장강도( $\sigma_{ut}$ )가 기준으로 적용된 경우에도 모든 조건에서 손상하중을 과소 평가하였다. 그러나, 데이터의 분산이 10% 이내로 일관

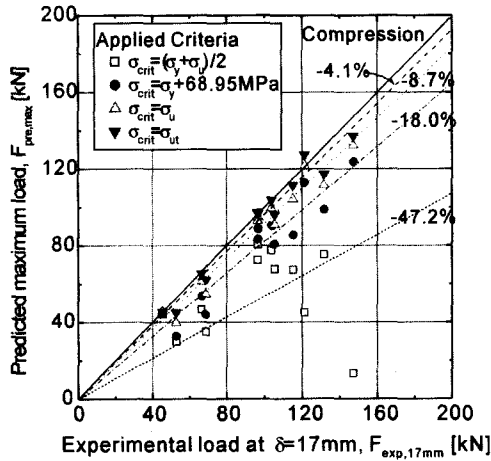
Table 2. Stress criteria for failure of wall thinned pipe

| No. | Stress Criteria                              | ref.  |
|-----|--|-------|
| 1   | $\sigma_{crit} = (\sigma_y + \sigma_w)/2$    | (4,7) |
| 2   | $\sigma_{crit} = \sigma_y + 68.95\text{MPa}$ | (10)  |
| 3   | $\sigma_{crit} = \sigma_u$                   | (5)   |
| 4   | $\sigma_{crit} = \sigma_{ut}$                | (11)  |

\* $\sigma_y$  = yield stress ;  $\sigma_u$  = ultimate engineering tensile stress ;  $\sigma_{ut}$  = ultimate true tensile stress



(a) tensile stress



(b) compressive stress

Fig. 8. Comparison of experimental and predicted maximum loads for various failure criteria

성을 보였으며, 특히  $\sigma_{ut}$ 가 기준으로 적용된 경우에는 실제 손상하중을 평균 7.2% 정도의 오차 범위에서 잘 예측하는 것을 알 수 있다.

한편, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 실험 결과에서 손상하중을 명확히 정의하기 어렵기 때문에 예측된 손상하중과 하중 변위 곡선에서  $\delta = 17\text{mm}$ 의 하중을 비교하였다. 비교 결과 Fig. 8(b)에서 보는 것과 같이 유동응력과 Modified B31G의 기준이 적용된 경우에는 예측치가 실제 배관의 손상하중을 평균 47.2%와 18.0% 정도 과소 평가하였으며, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에 비해 큰

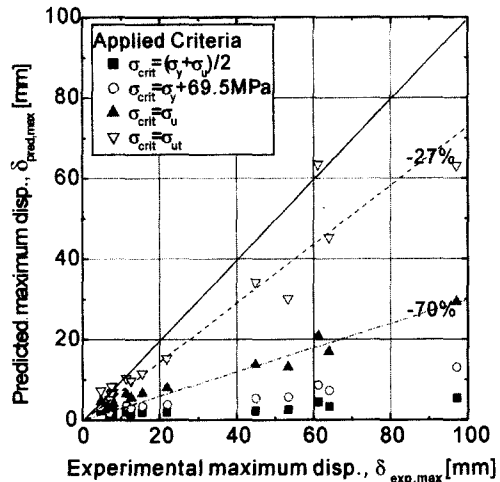


Fig. 9. Comparison of experimental and predicted displacements to maximum load for various failure criteria

분산을 보였다. 그러나,  $\sigma_u$ 와  $\sigma_{ut}$ 가 손상기준으로 적용된 경우에는 오차의 범위가 평균 8.7%와 4.1%로 비교적 정확히 손상하중을 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 다만,  $\sigma_{ut}$ 가 기준으로 적용된 경우에 일부 조건에서 손상하중을 과대 평가하는 결과를 보였다.

따라서, 하중지지능력의 예측 측면에서 손상기준을 살펴본 결과, 감육부에 작용된 응력상태에 관계 없이 유동응력과 Modified B31G는 감육배관의 하중지지능력을 지나치게 과소 평가하는 보수적인 기준임을 알 수 있다.  $\sigma_{ut}$ 의 손상기준은 감육배관의 손상하중을 가장 정확히 예측하였으나, 일부 조건에서 비보수적인 평가 결과를 보였다.  $\sigma_u$ 는  $\sigma_{ut}$ 에 비해 큰 오차를 가지고 손상하중을 평가하였으나, 데이터의 분산이 10% 이내로 일관성을 보였으며 모든 조건에서 보수적인 결과를 보였다.

### 4.3. 변형수용능력 측면의 손상기준 검토

내압과 함께 굽힘하중이 작용되는 배관은 하중제어 형태의 하중 뿐 아니라 2차 응력으로 작용되는 변위제어 형태의 하중 조건에서도 건전성을 유지하여야 한다. 따라서, 감육배관의 손상기준은 하중지지능력 뿐 아니라 변형수용능력 측면에서도 적절한 안전여유도와 정확성이 보장되어야 할 것이다. 따라서, 앞절에서와 같이 Table 2의 기준을 적용하여 예측된 최대 허용변위와 실험에서 주어진 최대하중까지의 변위를 비교하였다.

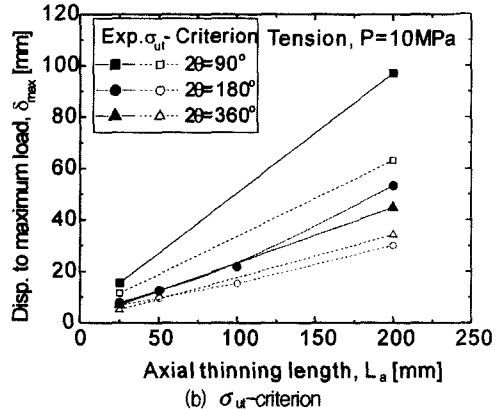
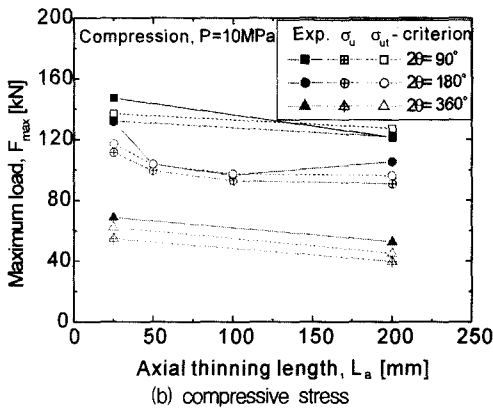
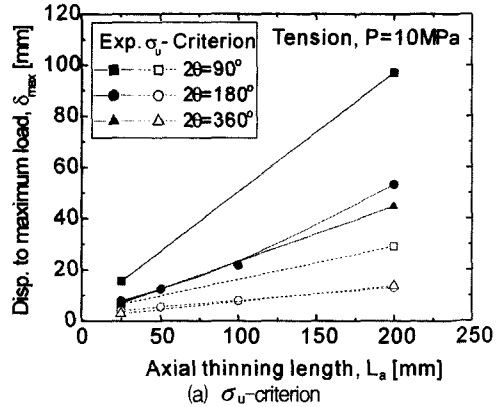
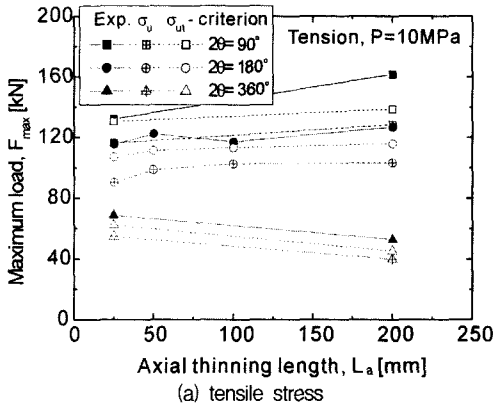


Fig. 10. Variation in predicted maximum load with shape of wall thinned area

Fig. 11. Variation in predicted displacement to maximum load with shape of wall thinned area

비교 결과, Fig. 9에서 보는 것과 같이 손상하중에 비해 데이터의 분산이 크게 나타났으며, 전체적으로 큰 보수성을 보였다.  $\sigma_t$ 와 Modified B31G 기준이 적용된 경우는 배관의 최대 허용변위를 80% 이상 과소 평가하였으며,  $\sigma_u$  기준이 적용된 경우에도 실험결과를 평균 70% 정도 과소 평가하였다. 손상하중의 예측에서와 같이  $\sigma_{ut}$  기준이 다른 기준들에 비해 가장 정확한 예측 결과를 보였다. 그러나, 과소 평가의 정도가 평균 27%로 큰 오차를 보였으며, 일부 조건에서는 감육배관의 최대 허용변위를 과대 평가하는 결과를 보였다.

따라서, 변형수용능력 측면에서도 하중지지능력에서와 같이 유동용력과 Modified B31G 기준은 지나치게 보수적인 결과를 보였으며,  $\sigma_{ut}$ 는 일부 조건에서 비보수적인 결과를 보이지만 가장 정확한 예측 결과를 보였다.

#### 4.4. 감육형상에 따른 손상거동의 변화 예측

앞서 하중지지능력과 변형수용능력 측면에서 손상응력 기준의 적절성을 평가하였다. 추가적으로 손상기준에 의해 예측된 결과가 감육부 형상에 따른 손상거동의 변화를 적절히 예측할 수 있어야 할 것이다. 따라서, 앞 절의 결과에서 손상하중을 비교적 잘 예측하는 것으로 판단된  $\sigma_u$ 와  $\sigma_{ut}$  기준을 적용하여 감육부 형상에 따른 손상하중과 변위의 변화 경향을 살펴보았다.

Fig. 10은 각각의 기준에 의해 예측한 손상하중을 감육부 형상에 따라 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 감육부에 인장응력이 작용되는 경우, 두 손상기준 모두 실험에서 관찰된 감육 폭과 길이의 영향을 적절히 평가하였다. 즉,  $2\theta=90^\circ$  인 경우에는 감육길이에 따라 손상하중이 증가하고 있으며,  $2\theta=180^\circ$  의 경우에는 초기에 약간 증가하다가 수렴하는 경향을 보였다. 또한,  $2\theta=360^\circ$  인 경우에

는 감육길이가 증가함에 따라 최대하중이 감소하는 경향을 보였다. 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에도 두 기준 모두 실험결과에서 관찰된 것과 같이 감육부의 폭에 관계없이 감육길이에 따라 손상하중이 감소하다 수렴하는 경향을 보였다.

한편, 손상기준을 적용하여 감육부의 형상에 따른 최대하중까지의 변위를 평가한 결과, Fig. 11에서 보는 바와 같이 두 기준 모두 최대 하중까지의 변위가 감육길이에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한,  $2\theta=90^\circ$  인 경우에 가장 높은 값을 보였고,  $2\theta=180^\circ$  와  $360^\circ$  인 경우에는 유사한 값을 보였다. 이러한 경향은 실험결과와 일치하는 것으로 두 응력기준 모두 감육배관의 최대 허용변위에 미치는 감육부 형상의 영향을 적절히 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 내압과 굽힘하중을 받는 내부 감육배관에 대한 손상기준을 제시하기 위해서, 유한요소해석을 수행하고 실험결과와 비교하였다. 이들 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1) 유동응력( $\sigma_f$ )과 Modified B31G의 응력기준은 하중지능력과 변형수용능력 측면에서 모두 지나치게 보수적인 평가 결과를 보였다.
- 2) 진 인장강도( $\sigma_w$ )가 손상기준으로 적용된 경우, 내압과 굽힘하중을 받는 내부 감육배관의 손상을 가장 정확하게 예측하였다. 그러나, 일부 조건에서 하중지능력과 변형수용능력을 비보수적으로 평가하였다.
- 3) 손상기준으로 공칭 인장강도( $\sigma_w$ )가 사용된 경우에는 진 인장강도 기준에 비해 약간 큰 오차를 보였으나, 모든 조건에서 결과의 보수성과 일관성을 유지하였다.
- 4) 따라서, 내압과 굽힘하중을 받는 내부감육 배관의 손상 평가에서 정확성을 우선적으로 고려하는 경우에는 진 인장강도가 손상기준으로 적절하며, 결과의 보수성을 함께 고려를 해야하는 경우에는 공칭 인장강도가 적합한 손상기준인 것으로 판단된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 기초전력연구소가 지원하는 원전 운전·전력설비 신뢰도 연구센터의 연구비 지원으로 수행된 것임.

### 참고문헌

- 1) Michel, F., Reck, H., and Schulz, H. "Experience with piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects.," Nucl. Eng. & Des., Vol. 207, pp. 307-316, 2001.
- 2) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI/TR-106611-R2, 1998.
- 3) Virginia Electric and Power Co., "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report.," 1989.
- 4) Japan Atomic Energy Research Institute, "Technical Reprt on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)," JAERI-M, 93-074, pp. 104-115, 1993.
- 5) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components," Nucl. Eng. & Des., Vol. 195, pp. 149-169, 2000.
- 6) 김진원, 박치용, 김범년, "내압과 굽힘하중하에서 감육배관의 국부허용두께 평가," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 25, No. 1, pp. 81-88, 2001.
- 7) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H., and Ando, K., "Fracture Behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load," Nucl. Eng. & Des., Vol. 191, pp. 195-204, 1999.
- 8) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, ASME Code Case N-597, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning.," 1998ed.
- 9) Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M.F., and Anderson, M., "Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading," J. Pres. Ves. Tech., Vol.119, pp. 457-466, 1997.
- 10) Ahamined, M., "Prediction of Remaining Strength of Corroded Pressurised pipelines," Int. J. Pres. Ves. & Piping., Vol.71, pp.213-217, 1997.
- 11) 이억섭, 김호중, "외부부식 형상이 파이프라인의 파손예측에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 23, No. 11, pp. 2096-2101, 1999.



- 12) 김진원, 박치용, “배관실험을 통한 국부감속 배관의 손상거동 평가,” 대한기계학회논문집 A권, Vol. 26, No. 4, pp. 731-738, 2002.
- 13) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, “Nuclear Components,,” 1995 ed.
- 14) American Society of Mechanical Engineer, ANSI/ASME B31.1, “Power Piping,,” 1995.