

# 내압과 굽힘의 복합하중에서 덴트 배관의 소성붕괴 거동 평가

## Plastic Collapse of Dented Pipeline Subjected to Internal Pressure and Bending Loading

\*#백종현<sup>1</sup>, 김영포<sup>1</sup>, 김철만<sup>1</sup>, 김우식<sup>1</sup>, 구재민<sup>2</sup>, 석형성<sup>2</sup>

\*#J. H. Baek(jhbaek@kogas.re.kr)<sup>1</sup>, W. S. Kim<sup>1</sup>, C. M. Kim<sup>1</sup>, J. M. Koo<sup>2</sup>, C. S. Seok<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국가스공사 연구개발원, <sup>2</sup> 성균관대학교 기계공학부

Key words : API X65 Pipe, Bending loading, Dent, Internal pressure, Plastic collapse

### 1. 서론

지하 매설 가스배관은 대량의 천연가스를 운송하기 위하여 고압으로 운영되며 배관 내압에 의해 발생하는 원주방향응력이 배관 벽면에 작용하며 지반침하, 지반이동 또는 부분적인 매설깊이가 변화하는 경우에는 굽힘응력이 복합적으로 작용한다. 운영 중인 배관의 건전성 평가를 위해서는 배관에서 발생하는 원주응력, 압축응력 그리고 굽힘응력과 같은 복합응력에 대한 한계상태를 평가하여야 하며, 특히 배관 단면 형상이 불균일한 덴트결함 배관의 경우 안정적인 운영을 위해서는 내압과 굽힘응력이 동시에 작용하는 복합응력에 대한 하중지지능력을 평가하여야 한다 [1].

일정 온도로 운영되는 배관의 경우 배관에 가해 질 수 있는 응력은 내압과 굽힘응력 이며 이들 하중이 배관에 부가되는 형태는 3종류로 구분 할 수 있다. 내압과 굽힘응력이 동시에 증가하며 배관에 작용하는 경우와 일정 내압에서 굽힘응력만 증가하는 경우 그리고 일정 굽힘응력 하에서 배관 내부 압력만 증가되는 경우가 있다. 정상운전 조건의 경우 배관 내부 압력은 일정 상태로 유지되며 운영되나, 배관의 부동침하 또는 토양 이동이 발생하는 경우에는 굽힘응력이 증가되어 배관에 과도한 변형 또는 파단이 발생 된다 [2, 3].

본 연구에서 사용한 하중조건은 일정 압력하의 덴트결함 배관에 대하여 굽힘응력이 작용하는 복합하중에 대하여 평가하였다. 배관에 작용하는 압력조건은 내압이 없는 경우와 4, 8, 및 16 MPa에 대하여 평가하였으며 일정 압력을 유지하고 있는 배관에 대한 굽힘응력은 삼점굽힘에 의한 굽힘 모멘트를 부가하는 방식으로 덴트결함 부위가 인장응력을 받는 opening bending 모멘트와 덴트결함 부위가 압축응력을 받는 closing bending 모멘트를 평가하였다. Fig. 1에는 두 종류의 굽힘응력 부가방법을 나타내었다.

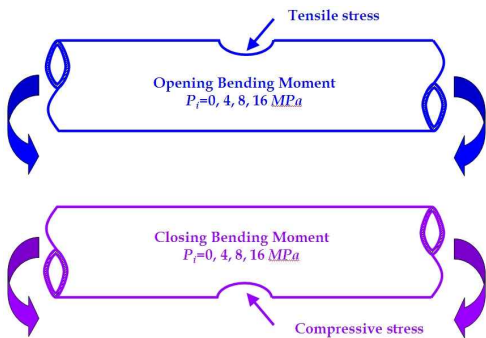


Fig. 1. Bending moment types used in this study.

본 논문은 유한요소해석을 통하여 배관에 외력에 의해 발생한 덴트결함 배관에 내압과 굽힘응력이 동시에 작용하는 복합응력하에서 덴트결함 배관의 하중지지능력을 평가하여 덴트결함 직경과 깊이가 배관의 건전성에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

### 2. 유한요소해석

외경 762 mm, 두께 17.5 mm인 외경대 두께비(D/t)가 43.54인 API 5L X65 배관에 덴트결함 배관의 소성붕괴거동에 대한 유한요소해석을 위하여 ABAQUS 6.62를 사용하였다. 직경 6 mm의 봉상 인장시험편을 배관의 길이방향에서 채취하여 인장시험을 상온에서 실시하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었으며 진응력-진변형률 곡선은 유한요소해석시 재료물성치 입력자료로 사

용하였다.

Table 1 Mechanical properties of API X65 used in this study.

Yield strength	464 MPa	True fracture strength	923 MPa
Ultimate tensile strength	563 MPa	True fracture strain	1.16
True tensile strength	629 MPa	Young's modulus	210 GPa

배관에 대한 모델링은 8절점 등계수 사각주요소 (8-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D8R)를 사용하였으며, 배관의 대칭성을 고려하여 1/4 모델을 사용하였으며, 배관 길이는 1,000 mm로 설정하였다. 배관 길이에 따른 모멘트 변화를 평가하기 위하여 1,000 mm ~ 5,000 mm의 범위에서 1,000 mm 간격으로 배관 길이를 변화시켜 1/4 모델에 대하여 유한요소해석을 수행하였으나 배관 길이변화에 따른 모멘트 차이는 없었다.

배관 중앙상단부의 덴트 결함이 형성되는 부위는 배관길이와 원주방향 방향의 200 mm 까지의 배관두께 방향으로 1.75 mm, 길이와 원주방향으로는 10 mm 간격으로 mesh를 분할하였으며, 그 이외의 영역은 배관두께 방향으로 3.5 mm, 길이와 원주방향으로는 50 mm 간격으로 mesh를 분할하였다.

덴트 가공시 사용한 압입자는 봉상형으로 끝단은 직경 40, 80, 160, 및 320 mm인 반구형으로 가공하였으며 강체거동을 구현하기 위하여 analytical rigid 요소를 사용하였다. 덴트 가공시 배관과 압입자 사이에서 발생하는 접촉현상(contact)을 구현하기 위하여 ABAQUS내의 Interaction module에서 surface-surface 조건으로 contact를 설정하였다. 접촉조건 설정시 압입자를 master로 설정하였으며 배관을 slave로 설정하였으며 마찰계수는 0.3을 사용하였다.

덴트 가공깊이에 따른 소성붕괴 거동의 차이를 평가하기 위하여 덴트 깊이를 19, 38, 76, 114, 152 mm로 설정하였다. 이는 배관 외경의 2.5, 5, 10, 15 및 20 %에 해당하는 깊이이다. 배관 상단부의 덴트는 압입자를 y축 방향 변위이동에 의해 가공하였다. 내압에 따른 덴트결함 배관의 붕괴거동을 평가하기 위하여 덴트 가공 전 내압이 없는 조건과 내압이 4, 8 그리고 16 MPa인 조건에 대하여 덴트 결함을 가공하였으며 각각의 내압이 유지된 상태에서 배관 끝단면에 굽힘하중을 부여하여 굽힘각도 변화에 따른 붕괴모멘트를 평가하였다. 배관 상단부에 덴트결함 가공 및 배관에 굽힘하중을 부가하는 과정은 다음과 같으며 유한요소 해석 종류를 Table 2에 나타내었다.

- (1) 1/4 모델로 제작된 배관의 상단부에 압입자를 위치시킨다.
- (2) 배관내부에 4 MPa (또는 8, 16 MPa)의 내압을 부하시키고, 배관 끝 단면에는 내압에 따른 길이방향 인장응력 43.5 MPa (또는 87.1, 217.7 MPa) 를 배관 길이방향으로 부가시킨다.
- (3) 배관 상단부에 위치한 압입자를 목표 덴트 깊이(19, 38, 76, 114, 152 mm)로 이동시킨다.
- (4) 덴트결함 생성 후 압입자를 배관 상단부 100 mm 위치로 이동시킨다.
- (5) 배관 끝 단면 중앙부의 기준점을 x-축 기준으로 0.4 또는 -0.4 radian을 회전하여 굽힘하중을 부가한다

위 과정을 통해 덴트결함 배관에 대한 한계하중 평가는 모멘트-굽힘각도 곡선의 탄성구간 기울기에 대하여 직선을 만들고 하중축과의 각 "φ"를 설정 후 "φ"의 2배가 되는 "φ<sub>1</sub>"을 tan φ<sub>1</sub>=2tan φ 인 관계로 설정하여 모멘트-굽힘각도 곡선의 교차점에서의 모멘트를 평가하는 보수적 평가법인 TES (twice elastic slope) 모멘트를

기준으로 평가하였다.

Table 2 FE analysis cases in this study.

Indenter diameter (mm)	Internal pressure during denting (MPa)	Target dent depth (mm)	Bending modes
40	$P_i=0, 4, 8, 16$	19, 38, 76, 114, 152	Opening bending & Closing bending
80	$P_i=0, 4, 8, 16$	19, 38, 76, 114, 152	
160	$P_i=0, 4, 8, 16$	19, 38, 76, 114, 152	
320	$P_i=0, 4, 8, 16$	19, 38, 76, 114, 152	

### 3. 유한요소해석 결과

Fig. 2는 직경 80 mm의 반구형 압입자를 사용하여 텐트결함 깊이와 내압변화에 따른 TES 모멘트 변화를 나타낸 것이다. 텐트결함 배관에 opening bending 또는 closing bending이 가해지면 동일 텐트 깊이에서 압력 증가에 따라 TES 모멘트는 감소하며 동일 내압인 경우 텐트 깊이 증가에 따라 TES 모멘트는 감소한다. Opening bending이 텐트결함부에 가해지는 경우가 closing bending에 비하여 더 높은 TES 모멘트를 나타내고 있었으며 텐트 깊이가 38 mm까지는 건전배관과 비슷한 TES 모멘트를 나타내고 있어 배관직경 5%까지의 텐트 깊이는 TES 모멘트에 영향을 받지 않는 것으로 평가되었다. Opening bending의 경우 텐트 깊이에 따른 TES 모멘트는 압력 증가에 따라 일정한 크기차를 가지며 감소하고 있으나 closing bending의 경우 내압 증가에 따라 텐트 깊이에 따른 TES 모멘트 차이는 점차로 감소하는 거동을 보인다. 텐트결함 깊이와 내압변화에 의한 TES 모멘트 예측식을 결정하기 위하여 각 직경의 압입자에서 동일 내압과 동일 텐트 깊이에서 최저를 나타내는 TES 모멘트를 무차원하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 x-축은 각 내압에 대하여 건전배관에서 내압에 의해 항복이 발생하는 압력으로 무차원 하였으며, y-축은 각 TES 모멘트에 대하여 대기압에서 opening bending과 closing bending시 건전배관의 TES 모멘트인 4,400 kN·m로 무차원하여 나타내었다. 무차원된 TES 모멘트는 텐트 깊이 증가에 따라 감소하므로 opening bending과 closing bending에 의한 TES 모멘트 예측식을 텐트 깊이비의 함수로 구성하여 식 (1)에 나타내었다.

$$\left(\frac{P}{P_y}\right)^{2.7} + \left(\frac{M_{TES,d,o}}{\eta M_{TES,plain,o}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

$$\eta = 1 - 0.81(H/D_o) + 0.83(H/D_o)^2 \quad \text{for opening bending}$$

$$\eta = 1 - 1.43(H/D_o) + 3(H/D_o)^2 \quad \text{for closing bending}$$

여기서  $H$ 는 텐트깊이,  $D_o$ 는 배관외경,  $P$ 는 내압 그리고  $P_y$ 는 내압에 의해 항복이 발생하는 압력이다. 식 (1)로부터 예측된 무차원된 모멘트선도는 점선 형태로 하여 Fig. 3에 나타내었다. 각 텐트 깊이의 모멘트선도 하단부의 압력비와 모멘트비 구간에서 운영되는 배관은 안전한 상태이며 모멘트선도 상부 구간에서 운영되는 배관은 불안정한 상태로 평가된다.

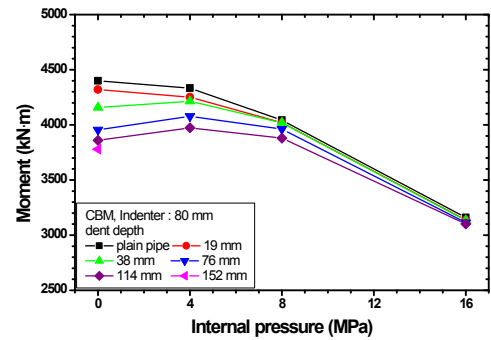
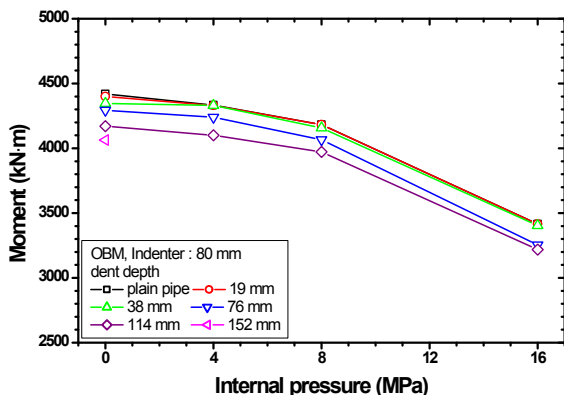


Fig. 2. TES moment with variation of dent depth at the OBM and CBM in case of 80 mm indenter.

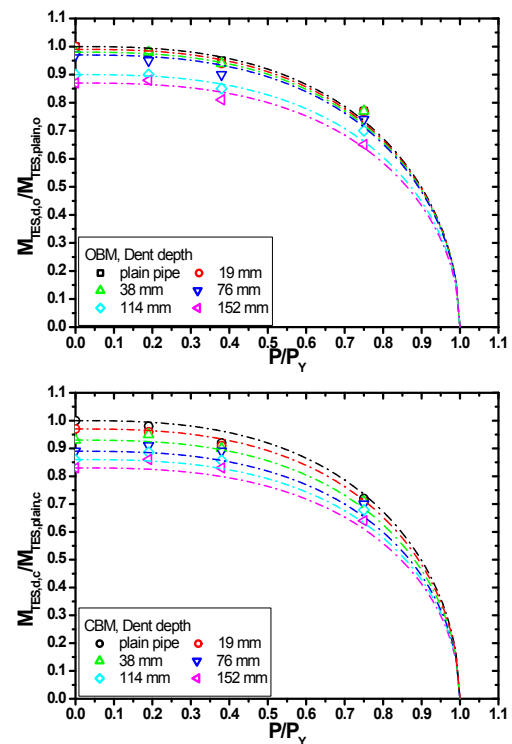


Fig. 3. Comparison between estimation Eq. 1 and FEM for TES moments for various normalized internal pressure.

### 4. 결론

텐트결함 배관의 하중지지능력은 굽힘응력 부가방식에 따라 변화하며 opening bending이 가해지는 경우가 closing bending에 비하여 더 높은 하중지지능력을 나타내며, 텐트결함 깊이와 내압 증가에 따라 굽힘응력 부가방식에 관계없이 TES 모멘트는 감소하며, 텐트결함 깊이 변화에 의한 TES 모멘트는 식 (1)을 이용하여 예측할 수 있다.

### 참고문헌

- Murray D.W., "Local buckling, strain localization, wrinkling and postbuckling response of line pipe", *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 5, 1997, pp. 360~371.
- Bai Y., et al., "Tube collapse under combined pressure, tension and bending", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 3, No. 2, 1993, pp. 121~129.
- Robertson A., et al., "Plastic collapse of pipe bends under combined internal pressure and in-plane bending", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, Issue 10, October 2005, pp. 407~416.