

<연구논문>

내압과 굽힘하중을 받는 가스배관의 변형특성에 관한 연구

장윤찬*·김익중*·김철만*·전법규**·장성진**·김영표†

A Study on the Deformation Characteristics of Gas Pipeline under Internal Pressure and In-Plane Bending Load

Yun-Chan Jang*, Ik-Joong Kim*, Cheol-Man Kim*, Bub-Gyu Jeon**, Sung-Jin Chang** and Young-Pyo Kim**†

(Received 11 November 2019, Revised 6 December 2019, Accepted 23 December 2019)

ABSTRACT

This paper investigates deformation characteristics of gas pipeline using the in-plane bending experiment and finite element analysis of a pipe bend. The effect of the bending angle and internal pressure on the deformation characteristics is analyzed. The pipe bend used in this study is API 5L X65 (out diameter: 20 inch) material with the thickness of 11.9 mm. The maximum load, displacement at maximum load, angle and local strain of 90° pipe bend are obtained from the in-plane bending experiment. Comparison between FE results and experimental data shows overall good agreements. In addition, the deformation characteristics of 22.5° and 45° pipe bend are calculated using the finite element analysis. As a result, the effect of the bend angle on the deformation characteristics is discussed.

Key Words : Gas Pipeline (가스배관), In-Plane Bending Load (굽힘하중), Deformation Characteristic (변형특성), FE Analysis (유한요소해석)

1. 서 론

전 세계적으로 수많은 강진이 발생하면서 인적 피해와 경제적 피해가 심각해지고 있다. 국내에서도 2016년에 규모 5.8의 경주지진과 2017년에 규모 5.4의 포항지진이 발생하였다. 지진에 의한 가스배관의 손상은 가스누출, 화재 및 폭발로 이어져 대규모의 인명 및 재산피해를 유발할 뿐만 아니라, 가스 공급 중단에 따른 사회적, 경제적 파급 효과가 매우 크다.

가스배관은 주로 도로 하부나 일반 성토지반에 매설 되어있기 때문에 지진파에 의한 변형뿐만 아니라, 지

반의 영구변형, 사면의 불안정성 및 지반 액상화등에 의한 배관의 굽힘 변형이 발생하게 된다. 이러한 가스 배관의 굽힘 변형이 과도하게 발생되면 가스배관이 하중을 지지하지 못하게 되고 결과적으로 가스배관의 파단으로 이어진다. 따라서, 가스배관의 굽힘 특성을 산출해야지만 지진이나 지반의 변형이 발생했을 때 가스배관의 건전성을 정확하게 평가할 수 있다.

기존에 배관의 굽힘 변형특성에 관한 연구는 한계하중 기반⁽¹⁻⁴⁾, 배관의 굽힘 실험^(5,6), 굽힘 거동 분석⁽⁷⁻¹⁰⁾ 등 다양한 방법을 통해 연구되었다. 한계하중 산출에 관한 연구는 압력, 굽힘 하중 및 배관의 굽힘 각도가 한계하중에 미치는 영향을 정량화하였다. 굽힘 실험에 관한 연구는 배관의 형상, 압력 및 반복하중에 의한 배관의 변형, 최대하중 및 파괴 특성을 분석하였다. 굽힘 거동 분석에 관한 연구는 배관의 굽힘 각도, 면내·외 굽힘 하중, 곡관의 형상에

† 책임저자, 회원, 한국가스공사 가스연구원
E-mail : ypkim@kogas.or.kr
TEL: (031)400-7482 FAX: (031)416-9014

* 한국가스공사 가스연구원

** 부산대학교 지진방재연구센터

대한 배관 단면의 형상변화, 하중-변위 관계 및 한계하중 등을 분석하였다. 하지만, 국내에서 주로 사용되는 가스배관 재료(API 5L X65)의 굽힘 변형특성을 연구한 결과는 찾아보기 힘들다.

따라서, 본 연구에서는 20인치 곡관의 압축(단립방향) 실험과 3차원 유한요소해석으로 가스배관의 굽힘하중에 의한 굽힘 변형특성을 분석하였다. API 5L X65 20인치 90° 곡관을 사용하여 실패관 압축 실험을 수행하였다. 압축 실험과 동일한 조건으로 유한요소해석을 수행하였고, 실험에서 측정된 하중-변위 곡선, 변형률 및 배관의 변형형상 결과와 해석결과를 비교하여 해석방법을 검증하였다. 검증된 유한요소해석으로 22.5° 및 45° 곡관의 굽힘 하중에 의한 굽힘 변형특성을 분석하였다. 압축 실험은 5000 kN 액츄에이터를 사용하였고 하중이 감소되는 지점까지 압축하중을 가해주었다. 내압의 영향을 평가하기 위해서 0.5 MPa와 8.0 MPa의 내압을 배관에 가해주었다. 배관의 변형거동을 분석하기 위해서 최대 하중, 최대 변위, 변형률을 측정하였다. 최종적으로 배관의 굽힘 각도와 내압의 차이에 따른 배관의 변형특성을 분석해서 배관의 굽힘 하중에 의한 허용 변형한계를 산출하였다.

2. 90° 곡관의 압축 실험

2.1 시편

압축 실험에 사용된 배관은 천연가스 수송용으로 주로 사용되는 API 5L X65등급으로, 외경 20 인치, 두께 11.9mm인 직관과 외경 20 인치, 두께 14.3 mm인 3D 열간 밴드 배관이다. 인장시편은 직관에서 3개의 시편을 길이방향으로 채취하여 인장실험을 수행하였으며, 인장실험결과는 Fig. 1에 나타내었다. 항복강도는 468 ~ 487 MPa 이며, 인장강도는 558 ~ 563 MPa로 측정되었다. API 5L⁽¹¹⁾에서 요구하는 최소항복강도(450 MPa)와 최소인장강도(535 MPa)를 만족한다. Fig. 2는 실험에 사용된 배관의 상세도면이다. 곡관의 굽힘 각도는 90°이며, 곡률반경은 배관 직경의 3배 (1524 mm)로 제작하였다. 배관의 곡관 부위에서 하중이 집중될 수 있도록 충분한 길이의 직관을 곡관에 용접으로 부착하였다. 곡관은 열간 밴딩으로 가공하였으며, 곡관의 외호면(extrados)의 최소두께는 직관의 두께와 동일하도록 제작하였다. 곡관의 내호면(intrados)의 두께는 17 mm 이며, 크라운 부분의 두께는 14.3 mm 이다. 배관의 양끝에는

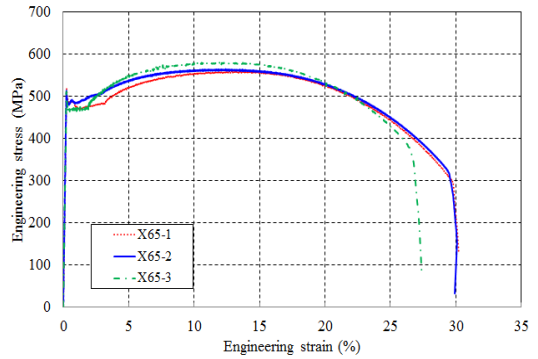


Fig. 1 Stress-strain curve of API 5L X65

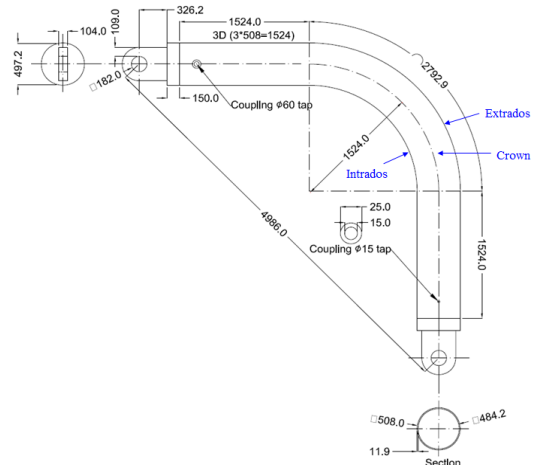


Fig. 2 Pipe bend geometry with attached straight pipe

내압을 유지할 수 있도록 원형관을 부착하였으며, 원형관에 핀 연결을 구현하기 위한 지그를 제작하여 용접으로 부착하였다. 배관에 수압으로 내압을 가하기 위하여 양끝에 급·배수관을 가공하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3과 같이, 배관에 5000 kN 액츄에이터 및 선형가이드를 설치하였다. 배관의 한쪽 끝 단은 반력 바닥에 핀으로 연결하여 고정하였으며, 반대쪽은 선형가이드에 핀으로 연결하였다. 선형가이드는 하중이 가해지는 동안 직진성을 확보할 수 있도록 제작하였다. 변위제어 하에서 10 mm/min의 변위 속도로 실험을 수행하였으며, 하중이 감소되는 지점 또는 누설이 발생하는 지점까지 압축 변위를 가해주었다. 내압의 영향을 평가하기 위해서 0.5 MPa와

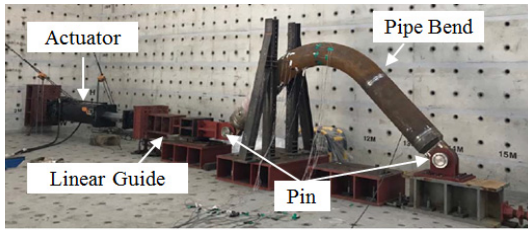


Fig. 3 Experimental configuration of bending test

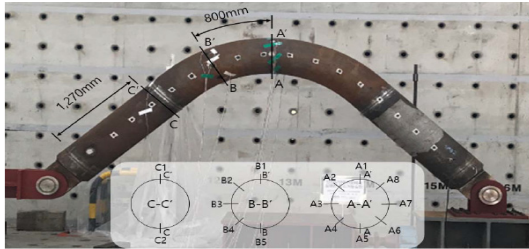


Fig. 4 Location of strain gage

설계압력인 8.0 MPa의 내압을 가한 상태에서 실험을 수행하였고, 실시간으로 액츄에이터의 변위, 하중 및 배관의 변형량을 측정하였다. Fig. 4는 3축 변형률 게이지 부착위치를 나타낸 것이다.

2.3 실험결과

Fig. 5는 압축 실험에서 측정된 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 배관이 변형을 하면 배관 내부의 부피가 변하기 때문에 초기에 설정한 내압이 증가하거나 감소하게 된다. 내압의 변화를 최소화하기 위해 실험 중에 내압을 조정하였다. 그러나, 내압이 0.5 MPa일 때 배관의 변위가 220 mm에서 내압을 조정하는 과정에서 펌프의 문제로 내압이 급격히 감소하였다. 이 과정에서 하중이 약 10%정도 감소되었고, 다시 압력을 초기 설정내압으로 조정하여 하중은 다시 증가되었다.

내압이 8.0 MPa일 때는 내압을 조정하는 과정에서 하중의 미세한 차이는 발생하였지만 내압이 0.5 MPa일 때와 같이 급격하게 감소되지는 않았다. 내압이 0.5 MPa일 때 배관의 변위가 78 mm에서 소성변형의 시작되었고, 462 mm에서 하중이 감소되었다. 내압이 8.0 MPa일 때 배관의 변위가 95 mm에서 소성변형이 시작되었고, 498 mm에서 하중이 감소되었다. 최대하중은 내압이 0.5 MPa일 때 411 kN이며, 8.0 MPa일 때 616 kN으로 약 50% 증가되었다. 본 연구에서 도출된 결과는 기존 연구자⁸⁾가 해석적으로 도출한 결과와 유사한 경향을 나타낸다. 단립 방향의 하중에서는

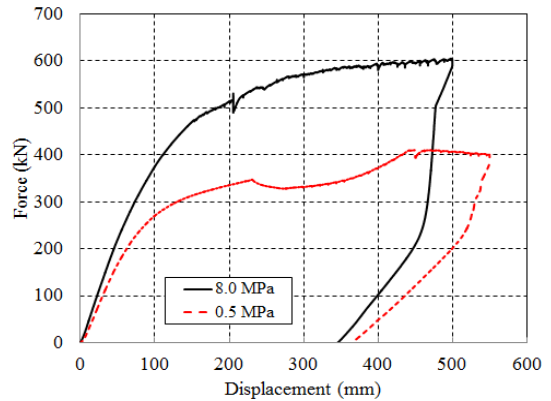


Fig. 5 Force-displacement curve of bending test

내압의 방향과 가해진 하중의 방향이 반대이고, 내압에 의해서 배관의 타원변형(ovalization)을 억제되기 때문에 하중감소지점과 최대하중은 증가하게 된다. 내압에 따라 약간의 차이는 있지만 배관의 굽힘 각도 7°까지는 하중을 지지하는 것을 확인하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석모델

Fig. 6은 압축 실험을 모사하기 위해 사용된 유한요소모델을 나타낸 것이다. 가스배관에 사용되는 곡관의 각도는 22.5°, 45°, 90°로 3가지이며, 압축 실험은 90° 곡관만 수행하였다. 나머지 각도의 곡관은 해석으로 압축 실험을 모사하였다. 22.5°와 45°곡관은 90° 곡관과 곡관의 길이와 각도만 다르게 직관의 길이 및 두께는 동일하게 생성하였다. 곡관의 내호면(intrados)의 두께는 17 mm, 외호면(extrados)의 두께는 11.9 mm 및 크라운의 두께는 14.3 mm이며, 곡관은 위치에 따른 두께를 반영하여 모델링하였고, 직관은 11.9 mm로 모델링하였다. Fig. 7은 요소의 사이즈에 따른 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 두께방향의 요소가 3개 이상이고, 원주방향의 요소는 40개 이상일 때 해석의 수렴성을 확인할 수 있었다. 따라서, 배관과 원형관은 3차원 8절점요소를 사용하였으며, 지그는 3차원 빔 요소를 사용하여 모델링 하였다. 변형이 집중되는 곡관은 요소를 조밀하게 생성하였으며, 직관부는 요소를 조대하게 생성하였다. 최종적으로 배관의 두께방향은 3개, 원주방향은 60개의 요소를 균일하게 생성하였다. 요소의 개수는 배관의 각도에 따라 차이가 있고, 30000 ~ 35000개 이다.

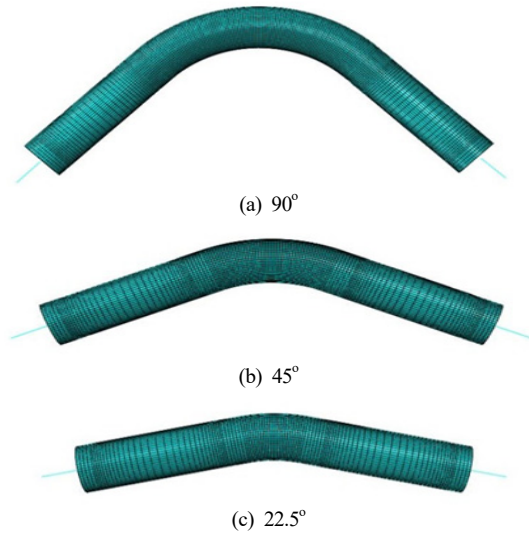
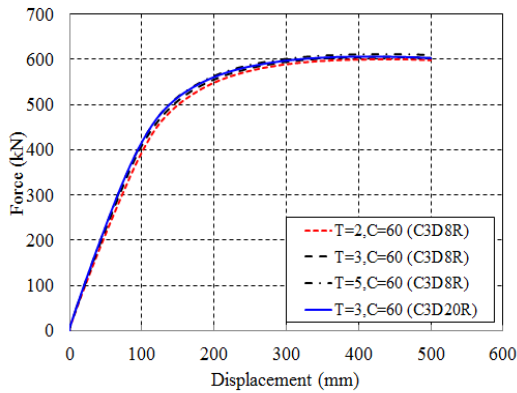
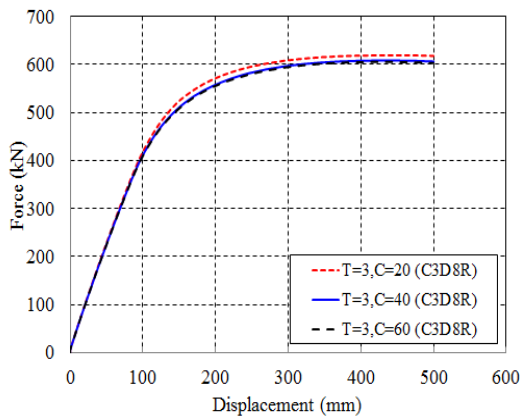


Fig. 6 Finite element mesh of pipe bends



(a) Thickness direction



(b) Circumferential direction

Fig. 7 Force-displacement curve of pipe bends for different element size

3.2 해석조건

상용유한요소 프로그램인 ABAQUS 2017⁽¹²⁾을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 배관의 소성거동을 모사하기 위해 실험으로 측정된 배관재료의 재료물성(Fig. 1) 중 API X65-3의 실험데이터를 진응력-진변형률로 변환하여 해석에 적용하였고 1.7%의 Lüders strain을 고려하였다. 대변형 옵션을 사용하였다. 해석조건은 압축 실험과 동일하게 배관 내부에 초기 설정내압을 균일하게 가해주고 시편의 한쪽 끝 단을 핀 형태로 고정하고, 나머지 끝 단에 강제 변위를 가하는 방식으로 해석을 수행하였다. 90° 곡관은 실험에서 측정된 변위까지 변위를 가해주었고, 나머지 각도의 곡관도 동일한 변위까지 가해주었다. 90° 곡관은 실험에서 측정된 내압변화를 동일하게 적용하였으며, 나머지 곡관은 초기설정 내압을 8.0 MPa로 고정하였다.

3.3 해석결과 검증

본 연구에서는 90° 곡관에 대해서만 압축 실험을 수행하였고 압축 실험결과와 해석결과를 비교하여 해석방법을 검증하였다. 검증된 해석 방법으로 나머지 각도의 곡관의 굽힘 변형특성을 분석하였다.

3.3.1 하중-변위 곡선 비교

Fig. 8은 압축 실험에서 측정된 하중-변위 곡선과 해석 결과를 비교한 것이다. 배관의 항복이 발생되기 전까지 실험결과와 해석결과는 잘 일치하였고, 배관이 항복을 시작한 이후 해석으로 계산된 하중이 실험결과보다 최대 10% 정도 크게 계산되었다. 전체적으로 하중-변위 곡선의 경향, 최대하중 및 하중감소지점은 실험결과 유사하게 계산되었다. 동일한 배관 재료라도 항복강도는 차이가 있고 인장강도의 차이는 미미하다(Fig. 1). 항복이 발생한 이후 실험과 해석결과의 차이는 재료의 항복강도의 차이로 판단된다.

3.3.2 중심부 단면 비교

Fig. 9는 곡관의 중심부의 단면을 나타낸 것이다. 단힘방향으로 굽힘하중을 받는 곡관의 중심부는 외호면과 내호면의 간격이 줄어들며 타원변형(ovalization)이 발생한다. 실험과 해석 결과 모두 타원변형 형태를 나타냈다. 내압이 증가되면 배관의 타원변형을

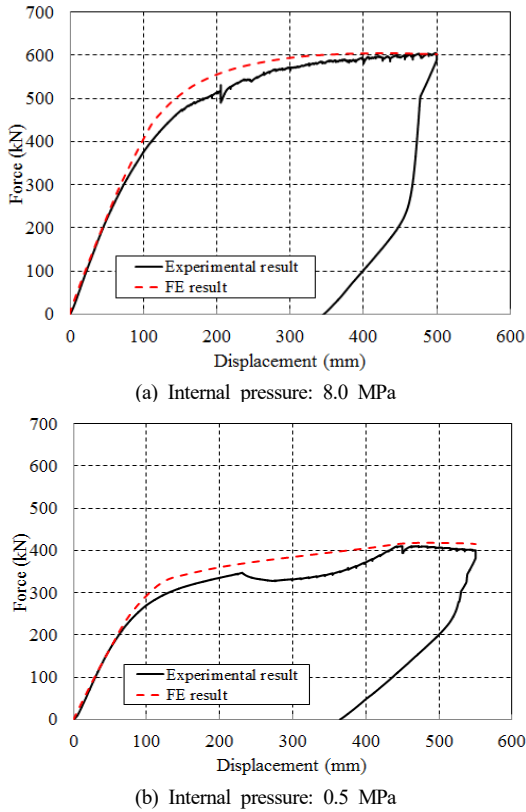


Fig. 8 Comparison of experimental results with FE results

억제하게 되고, 내압이 감소되면 배관의 타원변형이 증폭된다. 본 압축 실험 및 해석에서도 최종단면이 동일하게 측정 및 계산되었다. 배관의 외호면과 내호면의 간격이 줄어드는 타원변형은 곡관부의 단면이차 모멘트를 감소시키게 된다. 실험에서 측정된 하중-변위곡선(Fig. 5)에서 내압에 따라 기울기 및 최대하중의 차이는 내압과 단면형상의 차이로 발생한 것으로 판단된다. 내압이 8.0 MPa 일 때의 해석결과는 최대 3.5 % 오차가 발생되었으며, 내압이 0.5 MPa 일 때의 해석결과는 최대 0.5 % 오차가 발생되었다. 단면의 형상도 실험결과와 해석결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

3.3.3 변형률 비교

변형률은 Fig. 4와 같이 총 15 곳에서 측정하였고, 배관의 변형이 집중되는 곡관 중심의 내호면(A-5)과 내호면 중심을 기준으로 원주방향으로 45° 위치(A-4,6)에서 변형률을 비교하였다. Fig. 10, 11은 측정된 변형률과 계산된 변형률을 비교한 것이다. 곡관의 내호면(A-5)은 원주방향과 축방향 모두 압축 변형이 발생하였다(Fig. 10(a), (b)). 내압이 작을 때는 원주방향 변형률이 축방향 변형률보다 크고, 내압이 클 때는 축방향 변형률이 원주방향 변형률보다

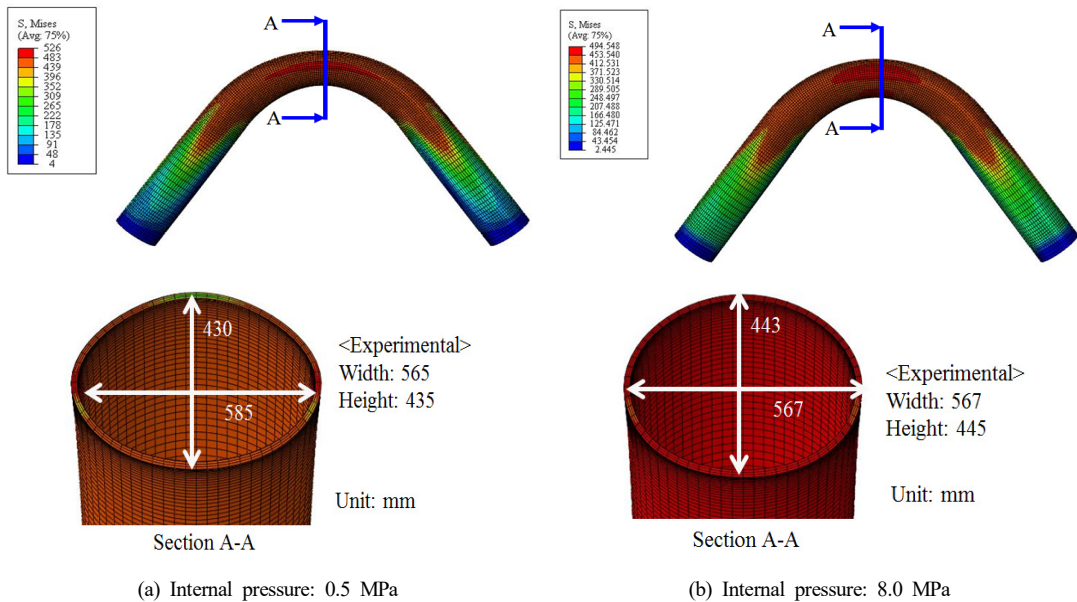
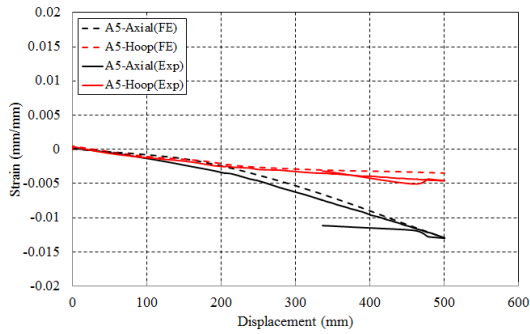
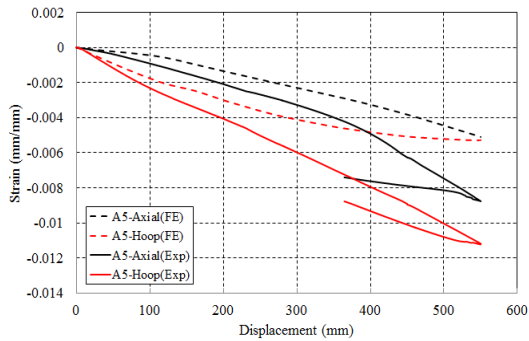


Fig. 9 Deformed shape of cross sections for pipe bends under different internal pressure



(a) Internal pressure: 8.0 MPa

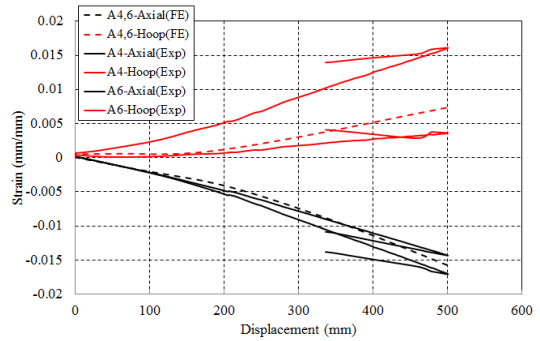


(b) Internal pressure: 0.5 MPa

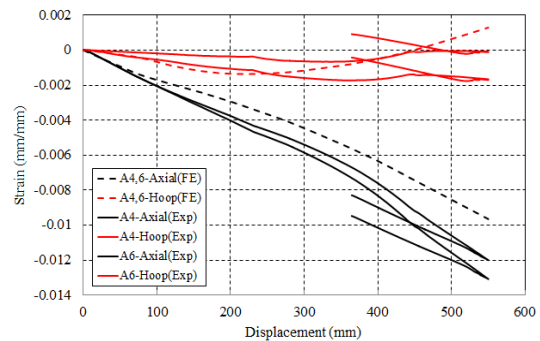
Fig. 10 Comparison of measured strain with calculated one of A-5

크다. 이는 원주방향 변형률이 내압에 지배적이기 때문이다. A-4, 6 지점은 내호면 중심을 기준으로 대칭이다. 해석에서는 대칭이기 때문에 동일한 변형률이 계산되었다. 실험에서는 변형률의 차이가 발생하였지만, 경향은 유사하게 측정되었다(Fig. 11(a), (b)).

이 지점의 변형률은 내호면 변형률과 유사한 경향을 보였다. 다만, 내압이 8.0 MPa 일 때의 원주방향 변형률이 인장으로 발생하였다 이는 Fig. 9에서와 같이 내압에 의해서 타원변형이 억제되어 인장 변형이 발생한 것으로 판단된다. 축방향은 하중의 방향에 지배적이기 때문에 값의 차이는 있지만, 모두 압축변형이 발생하였다. 전체적으로 측정된 배관의 변형률과 계산된 변형률의 값은 차이가 있지만, 경향은 유사하게 나타났다 압축 실험모사를 검증하기 위해서 하중-변위 곡선, 단면 및 변형률을 비교하였고, 일부분에서 실험결과와 해석결과가 차이는 있지만 전반적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.



(a) Internal pressure: 8.0 MPa



(b) Internal pressure: 0.5 MPa

Fig. 11 Comparison of measured strain with calculated one of A-4, 6

3.4 곡관의 각도에 따른 변형 특성

가스배관에 사용되는 곡관의 각도는 22.5°, 45°, 90°이며, 압축 실험을 수행하지 않은 곡관은 해석적으로 변형특성을 분석하였다. 22.5°, 45° 곡관 해석 시에 90° 곡관과 동일한 내압(8.0 MPa)과 배관의 끝 단에 강제 변위(500 mm)를 가하는 방식으로 해석을 수행하였다. Fig. 12는 곡관의 각도에 따른 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 기존의 연구결과⁽²⁾와 동일하게 최대하중은 곡관의 각도가 증가함에 따라 감소되었다. 하중감소지점은 곡관의 각도가 증가함에 따라 증가되었다. 곡관의 각도가 작을 때는 최대하중 이후 하중이 급격하게 감소되고, 곡관의 각도가 증가되면 최대하중에서 서서히 감소된다. 변형특성을 분석하기 위해서 배관의 항복지점과 최대하중 지점의 변형형상을 정리하였다(Fig. 13). 곡관의 각도가 감소하면 크라운부분에서 내호면으로 소성변형되는 위치가 이동하였다. 최대하중점에서는 곡관의 각도가 크면 원주방향 및 직관 연결부까지 소성변형이 발생되었고, 곡관의 각도가

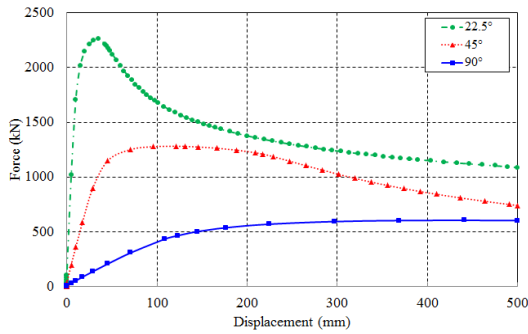


Fig. 12 Force-displacement curve of pipe bends for different bend angle

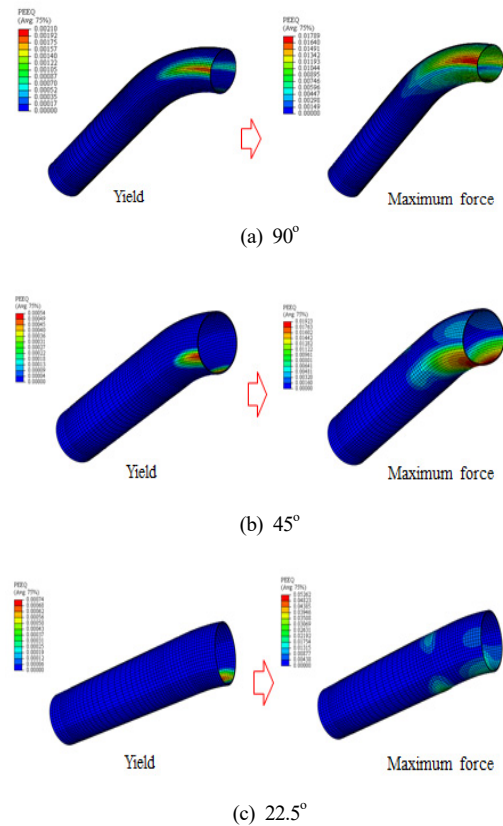


Fig. 13 Deformation of pipe bends for different bend angle at yield point and maximum force

줄어들수록 내호면에 소성변형이 집중되는 것을 확인하였다. 22.5° 곡관에서는 직관 연결부에 소성 변형 및 좌굴이 발생되었다. 이는 직관의 두께가 곡관보다 작기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 곡관의 각도에 따라 변형이 집중 되는 부분이 다르기 때문에 최대하중 및 하중감소지점이 달라진

것으로 판단된다.

최대하중에서 곡관의 굽힘 각도는 7°(90°), 4.3°(45°) 그리고 1.4°(22.5°)로 계산되었고, 곡관 각도가 감소함에 따라 허용 굽힘 각도는 크게 감소되는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 굽힘 하중을 받는 가스배관의 굽힘 변형특성을 분석하였다. 이를 위해, 가스배관에 주로 사용되는 API 5L X65 20인치 90° 곡관을 사용하여 실패관 압축 실험을 수행하였다. 압축 실험과 동일한 조건으로 유한요소해석을 수행하였고, 검증된 해석방법으로 22.5°, 45° 곡관의 굽힘 변형특성을 분석하였다. 굽힘 하중을 받는 곡관의 변형 특성은 기존의 연구결과와 유사한 결과가 도출되었다. 내압의 영향에 지배적인 원주방향의 변형 차이에 의해서 내압이 증가하면 곡관의 타원변형이 감소되고, 최대하중 및 하중감소지점은 증가하였다.

곡관의 각도에 따라 강성, 강도 및 최대하중 이후 거동이 변하였고, 각도가 증가되면 최대하중은 감소되고, 하중감소지점은 증가하였다. 또한, 곡관의 각도가 감소되면 곡관의 내호면에 변형이 집중되며 직관에 가까운 굽힘변형 특성을 보인다. 곡관의 각도에 따라 최대 허용 굽힘 각도는 1.4°(22.5° 곡관) ~ 7°(90° 곡관)로 확인할 수 있었다. 지진 또는 지반의 영구변형이 발생했을 때, 가스배관의 건전성을 평가하는데 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Oh, C. S. and Kim, Y. J., 2006, "Limit load for pipe bends under combined pressure and in-plane bending based on finite element limit analysis," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 5, pp. 505~511.
- (2) Lee, G. H., Kim, Y. J., Oh, C. S., Yoo, B. and Park, C. Y., 2007, "Effect of bend angle on plastic loads of pipe bends under internal pressure and In-Plane Bending," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 3, pp. 322~330.
- (3) Kim, Y. J. and Oh, C. S., 2006, "Limit loads for pipe bends under combined pressure and in-plane bending based on finite element limit analysis," *Int. J. Press. Ves. Pip.*, Vol. 83, pp. 148~153.

- (4) Kim, N. H., Oh, C. S., Han, J. J. and Kim, Y. J., 2007, "Limit loads for pipe bends under combined pressure and in-plane bending based on finite element limit analysis," *Trans. of the KPVP*, Vol. 3, No.4, pp. 28~37.
- (5) Fizeozabad, E. S., Jeon, B. G., Choi, H. S. and Kim, N. S., 2015, "Seismic fragility analysis of seismically isolated nuclear power plants piping system," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 284, pp. 264~279.
- (6) Neilson, R., Wood, J., Hamilton, R. and Li, H., 2010, "A comparison of plastic collapse and limit loads for single mitered pipe bends under in-plane bending," *Int. J. Press. Ves. Pip.*, Vol. 87, pp. 550~558.
- (7) Karamanos, S. A., Tsouvalas, D. and Gresnigt, A. M., 2006 "Ultimate bending capacity and buckling of pressurized 90 deg steel elbow" *J. Press. Vess-T. ASME*, Vol.128, No.3, pp.348~356
- (8) Abdalla, H. F., 2019, "Load carrying capacities of pressurized 90 degree miter and smooth bends subjected to monotonic in-plane and out-of-plane bending loadings," *Int. J. Press. Vessel Pip.*, Vol. 171, pp.253~270.
- (9) Shalaby, M. A. and Younan, M. Y., 1998, "Nonlinear analysis and plastic deformation of pipe elbows subjected to in-plane bending," *Int. J. Press. Vessel Pip.*, Vol. 75, pp.603~611.
- (10) Li, S. J., Zhou, C. Y., Li, J., Pan, X. M. and He, X.H., 2017, "Shalaby, M. A. and Younan, M. Y., 1998, "Effect of bend angle on plastic limit loads of pipe bends under different load conditions," *Int. J. Mechanical Sciences*, Vol. 131, pp.572~585.
- (11) API Specification 5L, 2012, "Specification for line pipe", American Petroleum Institute.
- (12) Dassault Systems, 2017, *ABAQUS Analysis User's Guide*, France.