

압축 가공된 비용접 배관의 소성변형 거동에 미치는 내압의 영향

서위걸¹ · 이문수² · 손수지² · 최시훈^{1#}

Effect of Inner Pressure on the Plastic Deformation Behavior of Seamless Pipe Deformed by Compression Process

W. G. Seo, M. S. Lee, S. J. Son, S. H. Choi

(Received February 11, 2019 / Revised June 27, 2019 / Accepted July 7, 2019)

Abstract

In this study, compression process is performed on the seamless E235 pipe using the newly developed compression technology for seamless pipe. Experimental analysis on the heterogeneity of microstructures and mechanical properties of the deformed seamless pipe is conducted. As a result, the correlation between microstructures and mechanical properties are determined. The spatial distribution of effective stress and effective strain developed in the seamless pipe deformed through compression is analyzed using the finite element method (FEM) based on different inner pressure conditions. From the results of the FEM, the impact of the inner pressure on effective stress and effective strain of the seamless pipe deformed through compression can be understood theoretically.

Key Words : Seamless Pipe, FEM, Compression, Plastic Deformation

1. 서 론

튜브 혹은 배관(pipe) 형태로 만들어진 구조재료는 여러 형태와 종류의 유동 물질을 효과적으로 운반하는 목적으로 널리 사용되고 있다. 특히 배관 형태의 부품소재는 화력 발전용 보일러, 오일 수송관 등과 같은 산업 분야 뿐만 아니라 자동차 배관, 수도관, 배기가스 혹은 도시가스 배관과 같이 일상생활까지 다양한 환경에서 사용되고 있다[1-3]. 배관의 종류는 이음매(seam)가 있는 형태와 이음매가 없는(seamless) 형태로 분류할 수 있다. Seamless 배관의 경우 용접선이 없어 원주방향으로 균일한 기계적 특성을 보이며 압력에 대한 저항성이 높은 것이 장점이다. 그런

이유로 고압에서 사용하는 경우에는 seamless 배관을 사용하는 것이 보다 유리하다고 알려져 있다[4,5].

또한 배관 형태의 부품은 일반적으로 형상적인 제약 및 사용환경 등에 따라 다양한 용접 기술(용접, 압접)을 이용하여 접합한 후 사용되고 있다. 그러나 최근까지도 문제가 되고 있는 온수배관의 파열은 용접 불량에 주요 원인으로 간주되고 있는데, 이와 같은 용접 시 발생하는 결함은 배관 수명의 저하 뿐만 아니라 인명사고까지도 유발시킬 수 있다[6]. 용접 시 입열량의 불균일성으로 용접부에 발달하는 열영향부(heat affected zone, HAZ)는 기계적 특성 측면에서 모재에 비해 상대적으로 열위하며, 또한 용접 후 모재와 용가재의 열팽창계수 차이로 이 부위에 잔류응력 및 결함이 발생되어 용접 배관의 수명이 감소된다고 알려져 있다[7].

최근에는 기존 용접의 단점을 보완하기 위한 목적

1.국립 순천대학교

2. Aistier Co., Ltd

Corresponding Author : Suncheon National University,

E-mail: shihoon@snu.ac.kr, ORCID ID : 0000-0002-2557-0646

으로 회전 스웨이징을 이용한 접합[8], 내부 정수압을 이용한 접합[9], 압축 가공 후 볼트 체결에 의한 접합 방법 등이 개발되고 있다. 압축 가공 장치를 통한 seamless 배관강의 활용은 조선분야, 선박엔진 분야에 적용되고 있으며, 고압의 가스 배관에 적용되고 있다. 기존에 포스코 등 제철소 내의 고압 유압시스템은 전량 용접한 후 사용하여 왔으나, 용접 후 고압 및 진동으로 용접 부위의 균열이 발생하여 재용접, 누유 처리 등으로 인해서 비용부담의 문제점이 발생하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 목적으로 배관을 효과적으로 압축 가공할 수 있는 장치가 국내에서도 개발되고 있다. 이 장비는 향후 seamless 배관의 볼트 체결에 의한 접합과 관련된 분야에 적용이 확대될 것으로 기대되고 있다.

Seamless 배관의 볼트 체결을 이용한 접합 공정은 Fig. 1과 같이 상온에서 배관에 대해서 압축 가공을 수행한 후 볼트를 이용하여 체결하는 방식을 취하고 있다. 이러한 볼트 체결에 의한 접합은 공정의 자동화가 상대적으로 용이하여 경제적인 이익을 취할 수 있다는 장점이 있다. 또한 압축 공정 시 입열량이 무시할 정도로 적기때문에 기계적 물성의 불균일성이 기타 용접 법에 비해 상대적으로 작을 것으로 예상할 수 있다. 그러나 압축 공정 이후 배관의 내부 표면에 접힘이나 헤어크랙(hair crack)의 발생이 가능한데 이런 가공결함들은 볼트 체결에 의한 접합 후 현장에서 사용시 균열이나 파단의 원인이 된다고 보고되고 있다[10].

압축 가공 장비를 활용하여 배관의 볼트 체결형 접합에 관한 연구는 국내에서 많이 진행되어 오지 못한 실정이다. 최근 연구에서는 공정 중의 배관의 내부 표면의 접힘에 의해 발생하는 균열에 대한 실험적 및 이론적 고찰이 보고되어 있다[11,12]. 그러나 seamless 배관 강의 압축 가공 후 가공경화 및 결정립 미세화로 인한 기계적 특성의 변화에 대한 고찰이 미진한 실정이다. 또한 가공 후 기계적 특성의 불균일이 배관의 안정성에서 미치는 영향에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 볼트 체결형 접합을 위한 목적으로 E235 seamless 배관강을 압축 가공한 후에 배관강에 발달하는 미세조직 뿐만 아니라 기계적 물성의 불균일성을 실험적으로 평가하였다. 또한 압축 공정 후 발달하는 변형 미세조직과 기계적 물성과의 상관관계를 분석하였다. 한편 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용하여 내압 조건의 변화에 따른 배관의 소성변형 거동을 이론적으로 모사하여 안정적으로 사용 가능한 내부 압력을 평가하고자 하였다.

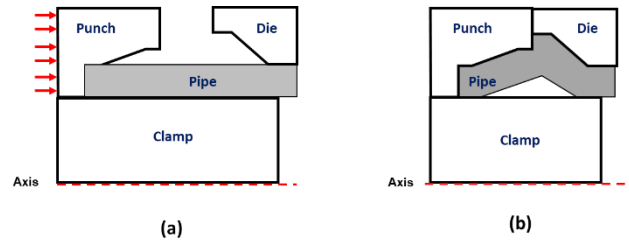


Fig. 1 Schematic diagrams of compression process: (a) before compression and (b) after compression

2. 실험

2.1 실험 조건

본 연구에서는 Table 1의 화학적 조성을 갖는 seamless 배관용 E235강을 이용하였다. 외경이 25 mm이고 두께가 3 mm인 Seamless 배관 강을 볼트 체결을 위해서 압축 가공하였다. 사용된 볼트의 규격은 M34-2P이었으며, 유효경(=(골지름+바깥지름)/2)은 34.701 mm로 설정하였다. Fig. 2는 압축 가공된 배관과 볼트를 이용해 체결이 완료된 배관을 보여주고 있다. 압축 가공된 배관의 표면에는 압축 공정 후 돌출부(protrusion)가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 압축 가공된 시편의 변형 미세조직을 관찰하기 위한 목적으로 축방향으로 절단된 배관에 대해서 다이아몬드 연마액(diamond suspension)를 이용한 기계적 연마와 3% Nital(Etahnol + HNO₃) 용액을 이용한 화학적 연마를 연속으로 실시하였다. 광학현미경(Olympus GX-51)을 이용하여 변형이 되지 않는 부분, 돌출부 주변 및 돌출부의 미세조직을 관찰하였다.

Table 1 Chemical composition of E235

	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Fe
E235	0.1	0.44	0.23	0.006	0.01	0.03	0.01	0.01	Bal.

압축 가공된 시편의 변형 정도를 준정량적으로 분석하기 위해서 다이아몬드 연마액과 콜로이드 실리카(colloidal silica)를 이용하여 기계적 연마를 실시한 후 FE-SEM(JEOL-7100F)에 부착된 EBSD(electron back scattered diffraction) 장비를 이용하여 결정방위 맵을 측정 후 KAM(kernel average misorientation)을 분석하였다. EBSD 분석 시 측정 영역과 측정 간격은 각각 $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ 과 $0.3 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 변형된 부분의 기계적 물성의 변화를 측정하기 위한 목적으로 비커스 경도기(Matsuzawa MMT-X7)를 이용하여 $300 \mu\text{m}$ 간격으로 300 gf로 10초간 유지하면서 경도 값을 측정하였다. 배관 강의 기계적 성질을 파악하기 위해서 압축 가공된 배관 강의 변형되지 않은 부분에서 측방향으로 인장시편을 가공한 후 정적 만능 시험기(MTS-E44)를 이용하여 인장 시험을 실시하였다. Fig. 3은 인장 시험에 사용된 실험실에서 자체 제작한 소형 인장시편의 치수를 보여준다[13]. DIC(digital image correlation, GOM ARAMIS 3D 5M LT) 기법을 결합하여 일축 인장 시 응력-변형률 곡선을 확보하였으며 총 3번의 실험을 수행한 후 얻어진 평균 값을 유한요소해석에 사용하였다[14].



Fig. 2 Seamless pipes: (a) after compression process and (b) after connection with the bolt

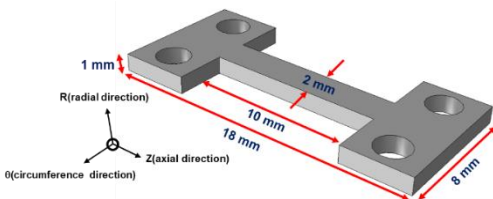


Fig. 3 Miniature tensile specimen

2.2 실험 결과

Fig. 4는 압축 가공된 seamless E235 배관 단면의 특정 영역에 발달하는 변형 미세조직을 보여주고 있다. E235강은 일반적으로 페라이트(ferrite)와 펄라

이트(pearlite)로 구성되어 있다고 알려져 있는데, 분석 결과 페라이트가 상대적으로 넓은 영역을 차지하고 있고 펄라이트가 일부 영역을 차지하는 것으로 확인되었다[15]. 변형이 상대적으로 크게 작용했을 것으로 판단되는 영역c, 영역f와 영역g의 결정립은 상대적으로 미세한 것으로 관찰되었으며, 변형이 거의 작용하지 않았을 것으로 판단되는 영역a의 결정립은 가장 조대한 것으로 관찰되었다. 압축 가공 시 발생하는 재료 유동(mass flow)에 따라 결정립이 연신되는 경향을 관찰할 수 있었다. 영역 h에서 실선처럼 보이는 부분은 좌우의 재료의 유동(massflow)가 상의한 것으로 보아, 배관을 압축 가공할 때, 발생하는 접힘에 의해 발생한 결함으로 판단된다.

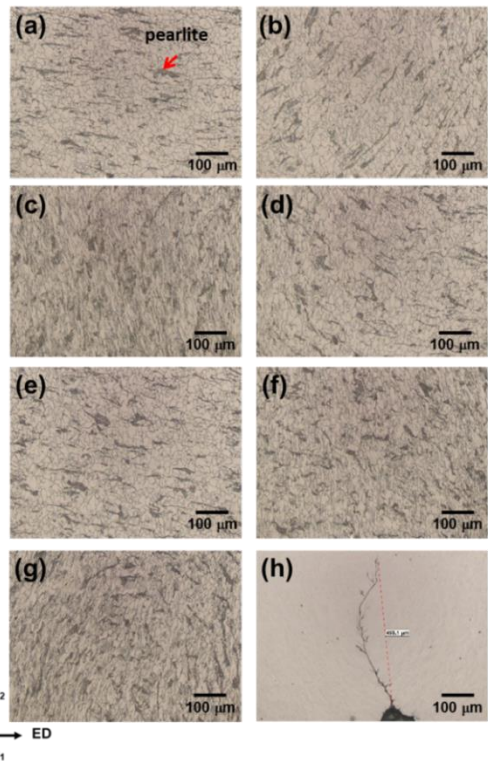
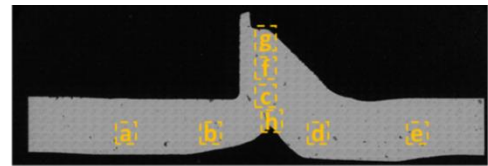


Fig. 4 Microstructure in the seamless pipe: (a) undeformed (punch side), (b) near protrusion (punch side), (c) bottom of protrusion, (d) near protrusion (die side), (e) undeformed (die side), (f) middle of protrusion, (g) top of protrusion and (h) defect of protrusion

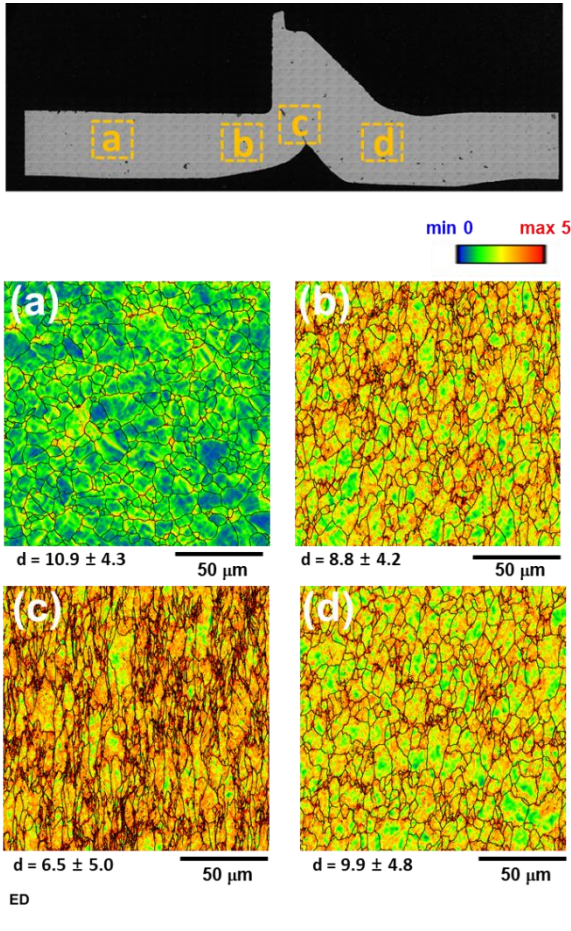


Fig. 5 KAM map of the seamless pipe: (a) undeformed, (b) near protrusion(left side), (c) protrusion and (d) near protrusion(right side)

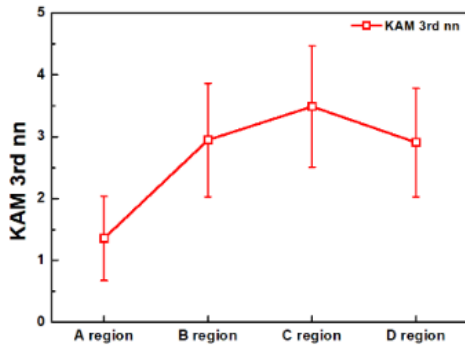


Fig. 6 Comparison of KAM in each area of seamless pipe

Fig. 5는 seamless 배관의 압축 가공 후 배관 단면의 각 영역에서 EBSD를 측정한 후 3rd nn(nearest neighbor)의 조건으로 분석된 KAM 맵의 결과를 보

여준다. 파란색 및 초록색의 영역은 압축 가공 후 상대적으로 낮은 전위 밀도(낮은 수준의 소성변형)를 갖고, 빨간색의 영역은 상대적으로 높은 전위 밀도(높은 수준의 소성변형)를 갖는 것을 의미한다. 소성변형을 심하게 받은 영역에서의 KAM 값이 상대적으로 큰 것으로 관찰되었는데, 특히 돌기부 영역에서 가장 높은 KAM 값을 보이는 것으로 확인되었다.

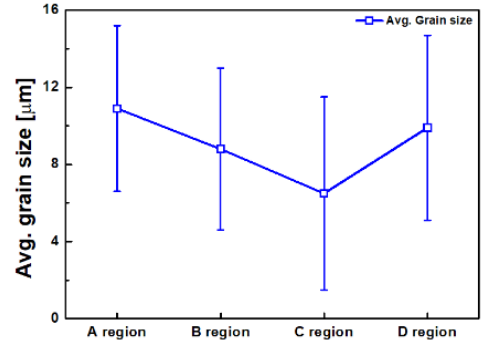


Fig. 7 Comparison of grain size in each area of seamless pipe

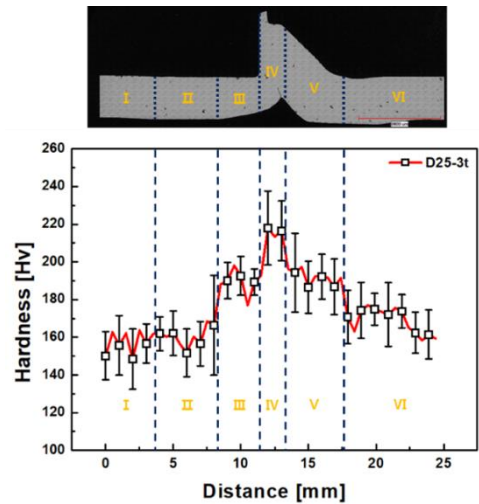


Fig. 8 Vickers hardness profile of the seamless pipe

Fig. 6과 7은 각각 EBSD를 측정한 후 각 영역의 KAM값과 결정립 크기를 정량적으로 비교하여 나타낸 결과이다. Fig. 6은 압축 가공된 seamless 배관의 각 영역에 발달하는 KAM 값을 정량적으로 비교하여 나타낸 것이다. 압축 가공 시 소성변형을 가장 심하게 겪게 되는 돌기부는 KAM값이 3.487로 가장 높은 값을 보였으며, 소성변형이 미미할 것으로 예상되는 영역에 비해 157% 높은 것으로 분석되었다.

Fig. 7으로부터 소성변형이 미미한 영역a의 결정립 크기는 10.9 μm 이지만 돌기부에 해당하는 영역c의 결정립 크기는 6.5 μm 로 결정립의 미세화가 발생한 것을 확인할 수 있다. 돌기부 주변 영역b와 영역d도 소성변형이 미미한 영역에 비해 상대적으로 결정립이 미세한 것으로 분석되었다.

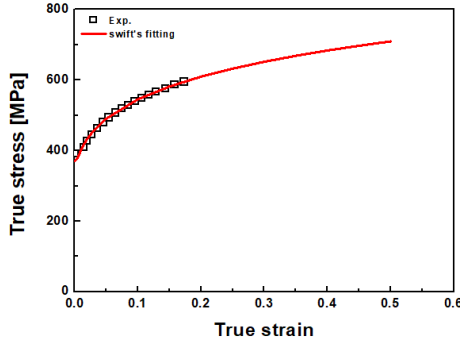


Fig. 9 Stress-strain curves obtained from uniaxial tension test and fitted by Swift's equation

Fig. 8은 압축 가공 후 seamless 배관의 단면에서 측정된 경도 값의 결과를 보여준다. 변형을 가장 심하게 겪은 영역은 경도 값이 217 Hv로 가장 높은 값을 보였으며, 소성변형이 미미한 영역은 150 Hv로 가장 낮은 경도 값을 보였다. 이는 소성변형으로 인해 유도된 결정립의 미세화와 가공경화로 경도가 높아진 것으로 판단된다. 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 효과적으로 수행하기 위한 목적으로 경도 값의 수준을 기준으로 Fig. 8과 같이 6개의 영역으로 압축 가공된 seamless 배관을 분할하였다. Fig. 9는 소형 인장시편을 이용하여 측정된 인장시험 결과를 보여준다. 유한요소해석에 사용하기 위한 목적으로 아래 식(1)의 Swift 식을 이용하여 응력-변형률 곡선을 fitting 하였다[16].

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

3. 배관의 소성변형 거동 해석

3.1 해석 조건

내압이 걸려있는 볼트 체결형 배관의 소성변형 거동을 이론적으로 모사하기 위한 목적으로 ABAQUS 상용 소프트웨어를 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 재료의 탄성성질은 탄성계수와 포아송비가 각각 210 GPa과 0.33로 가정하였고,

재료의 소성성질은 실험 결과로부터 얻어진 아래 식(2)의 경도와 항복강도의 상관관계를 이용하여 결정하였다. Fig. 8에서 설명한 분할된 영역에 각각 다른 유동 곡선을 부여하였다[17].

$$\sigma_{YS} = 2.736[Hv] - 70.6 \quad (2)$$

Fig. 10은 경도와 항복강도의 상관관계로부터 결정된 각 분할된 영역의 유동곡선의 결과를 보여준다. 이때 모든 변형률 조건에서 각 영역의 유동응력의 차이는 변형 초기 항복강도의 차이와 동일하다고 가정하였다

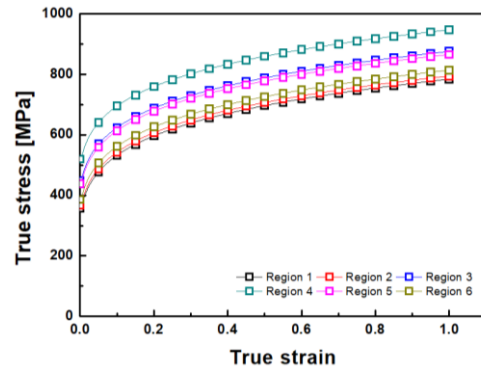


Fig. 10 Stress-strain curves of each region

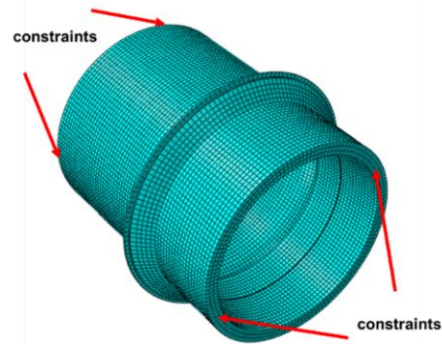


Fig. 11 Initial mesh and boundary conditions for FEA

해석에 사용한 총 요소 수는 33,900개이었으며, C3D8R 타입의 요소를 이용하였다. 내압 조건은 500, 600, 700, 800 및 900 bar로 점진적으로 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 11은 압축 가공된 seamless 배관강이 볼트 체결에 의해 접합이 이뤄졌다고 가정하고 다양한 내압 조건에서 유한요소해석을 수행하기 위해 사용한 유한요소 메쉬와 경계조건을 보여준다.

3.2 유한요소해석 결과

Fig. 12은 다양한 내압 조건에서 유한요소해석을 수행한 후 seamless 배관강에 발달하는 유효응력 분포의 결과를 정리한 것이다. 900 bar 내압 조건에서는 약 780 MPa의 유효응력이 발생하는 것으로 해석되었고, 500 bar 내압 조건에서는 상대적으로 유효응력의 발달이 미미한 것으로 해석되었다. 따라서 탄소 배관강이 일반적으로 사용되는 내압조건이 500 bar인 점을 감안하면 실제 seamless 배관에 매우 낮은 유효응력이 발생할 것으로 예상할 수 있다. 그러나 600 bar 내압 조건에서는 돌기부의 내부 표면에서 유효응력이 가장 높은 것으로 해석되었으며, 상대적으로 높은 내압조건(700, 800, 900 bar)에서는 외부와 내부의 구분없이 돌기부 영역에서 유효응력이 집중되는 것으로 해석되었다.

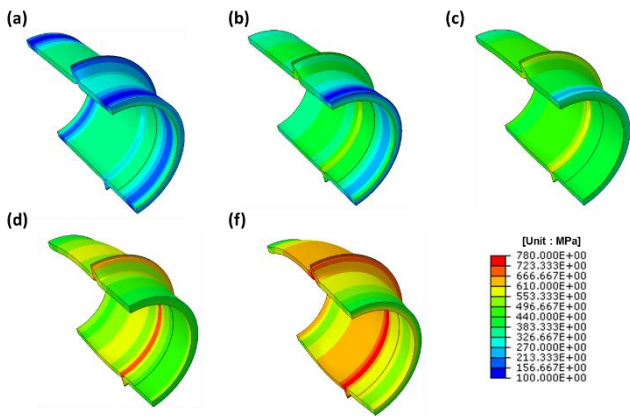


Fig. 12 Distribution of effective stress under different inner pressure conditions: (a) 500 bar, (b) 600 bar, (c) 700 bar, (d) 800 bar and (f) 900 bar

Fig. 13와 14는 다양한 내압 조건에서 유한요소해석을 수행한 후 seamless 배관강에 발달하는 유효변형률 분포와 반경방향의 변형률 분포의 결과 정리한 것이다. 유효변형률과 반경방향의 변형률은 매우 유사한 것으로 해석되었다. 따라서 배관에 내압이 작용할 때 반경반향의 변형률이 주된 것으로 판단된다. 700 bar이하의 내압 조건에서는 배관 형상의 변화는 발생하지 않았으나, 800 bar이상의 내압에서는 배관 형상의 변화가 발생하였다. 또한 내압이 증가함에 따라 팽창되는 정도가 심하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 영역a에서 내압 조건에 관계없이 높은 유효변형률이 발생하는 것으로 해석되었다. 600 bar 이하의 내압 조건에서는 유효변형률이 발생

하지 않았기 때문에 실제 seamless 배관은 사용되는 압력하에서는 소성변형이 발생하지 않을 것으로 예측된다. 700 bar 이상의 내압 조건에서 영역a에 유효변형률이 발생하는 것으로 해석되었다. 영역a의 유효변형률은 내압이 증가함에 따라서 커졌으며, 900 bar의 내압 조건에서는 돌기부에서도 유효변형률이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 900 bar의 내압 조건에서는 영역a에서 0.283의 가장 높은 유효변형률이 발생하는 것으로 해석되었다.

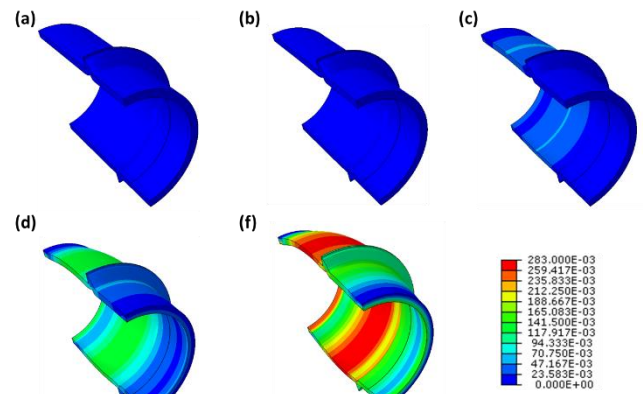


Fig. 13 Distribution of effective strain under different inner pressure conditions: (a) 500 bar, (b) 600 bar, (c) 700 bar, (d) 800 bar and (f) 900 bar

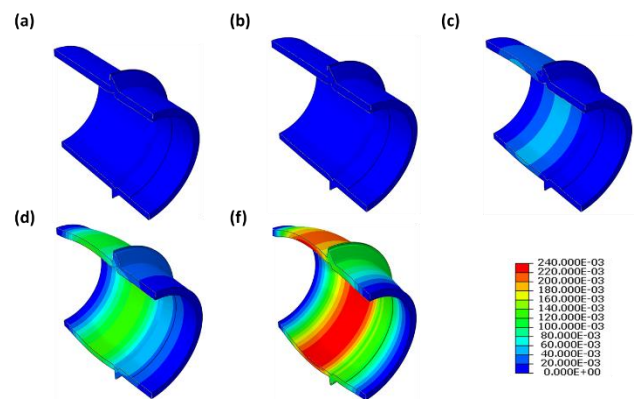


Fig. 14 Distribution of circumferential direction strain under different inner pressure conditions: (a) 500 bar, (b) 600 bar, (c) 700 bar, (d) 800 bar and (f) 900 bar

4. 결론

본 연구에서는 압축 가공 후 seamless E235 배관에 발달하는 변형 미세조직 및 기계적 성질의 불균

일성을 실험적으로 측정하고, 볼트 체결 후 다양한 내압 조건에서 배관의 소성변형 거동을 유한요소해석을 활용하여 이론적으로 전산모사한 후 다음과 같은 결론을 얻었다

(1) Seamless 배관의 미세조직은 상대적으로 넓은 영역을 페라이트가 차지하고 부분적으로 펄라이트가 차지하고 있는 것으로 관찰되었다. 일부 소성변형을 심하게 겪는 영역에서는 재료의 유동에 따라 미세조직이 연신되는 것이 관찰되었다.

(2) 압축 가공 시 소성변형이 심한 돌기부에서의 결정립의 크기는 6.5 μm 로 가장 미세한 것으로 분석되었으며, 압축 가공 시 소성변형이 미미한 영역에서는 결정립 크기가 10.9 μm 로 가장 조대하였다. 돌기부에서의 KAM 값은 소성변형이 미미한 영역에 비해서 157% 정도 높은 것으로 분석되었다.

(3) 돌기부의 가공 경화 및 결정립 미세화로 인해서 217 Hv의 가장 높은 경도 값을 보였으며, 소성변형이 미미한 영역의 경도 값은 150 Hv로 가장 낮게 평가되었다.

(4) 유한요소해석을 이용하여 배관의 내압 조건의 변화에 따른 유효응력 및 유효변형률 분포를 해석한 결과 낮은 압력 조건(600 bar 이하)에서는 압축 가공 시 소성변형이 미미한 영역에서는 상대적으로 큰 유효응력이 발생하였고, 유효변형률은 발생하지 않았다. 따라서 탄소 배관 강이 일반적으로 사용되는 조건하(600 bar)에서는 소성변형이 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 높은 내압 조건(700 bar 이상)에서는 돌기부에서 상대적으로 큰 유효응력이 발생하는 것으로 해석되었고, 내압 조건에 관계없이 압축 가공 시 소성변형이 미미한 영역에서는 가장 큰 유효변형률이 발생하는 것으로 해석되었다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화산업육성사업(R&D, R0006322)”으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

[1] K-Y Bea, T-H. Lee, K-C. Ahn, 2002, An Optical Sensing System for Seam Tracking and Weld Pool Control in Gas Metal Arc Welding of Steel Pipe, J.

Mater. Process. Technol., Vol. 120, pp. 458~465.
 [2] L. Masurkiewicz, M. Tomazewski, J. Malachowski, K. Sybilski, M. chebakov, M. Witek, P. Yukhymets, R. Ditrienko, 2017, Experimental and Numerical Study of Steel Pipe with Part-Wall Defect Reinforced with Fibre Glass Sleeve, Int. J. Pres. Ves. pip., Vol. 149, pp. 108~119.
 [3] K. M. Ku, T. H. Kim, I. T. Jin, 2015, Development of a Process to Simultaneously Weld and Extrude Pipe using a Spring Type Wire Material, Trans. Mater. Process., Vol. 24, No. 5, pp. 317~322.
 [4] Y. S. Lee, S. H. Yoon, D. J. Yoon, 2011, Effects of Mandrel and Die Shape in Seamless Tube Drawing, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 8, pp. 562~567.
 [5] B. Brickstad, B. L. Josefson, 1998, A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes, Int. J. Press. Vessels pip., Vol. 75, pp. 11~25.
 [6] K. S. Yeom, 2019, The Cause of the Hot Water Piping Accident in Beakseok Station was ‘weld defect’., <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4120850&ref=A>
 [7] Ji-Hwan shin, N. Jahanzeb, M. S. Kim, J. H. Hwang, S. H. Choi, 2016, Analysis of Deformation and Failure Behaviors of TIG Welded Dissimilar Metal Joints using Miniature Tensile Specimens, J. Kor. Inst. Met. Mater., Vol. 55, No. 2, pp. 125~131.
 [8] Q. zhang, K. Jin, D. Mu, 2014, Tube/Tube Joining Technology by using Rotary Swaging Forming Method, J. Mater. Process. Trans., Vol. 214, pp. 2085~2094.
 [9] M. Marre, S. Gies, F. Maevus, A. E. Tekkaya, 2010, Joining of Lightweight Frame Structures by Die-Less Hydroforming, Int. J. Mater. Form., Vol. 3, pp. 1031~1034.
 [10] H. Y. Lee, K. S. Kim, S. Y. Chun, K. D. Hur, 2008, A Study on the Heading Process of Pipe, Trans. Mater. Process., pp. 500~502.
 [11] A. Sviridov, P. Grutzner, M. Rusch, M. Bambach, 2017, Joining by Upset Bulging-Tooling Design and New Concepts for Online Process Control using Servo Presses and Local Heating, J. Mech. Eng., Vol. 17, No. 1, pp. 78~87.
 [12] I. Sizova, A. Sviridov, M. Bambach, 2017, Avoiding

- Crack Nucleation and Propagation During Upset Bulging of Tubes, *Int. J. Mater. Form.* Vol. 10, pp. 443~451.
- [13] W. Tong, H. Tao, X. Jiang, N. Zhang, M. P. Marya, L. G. Hector, X. Q. Gayden, 2005, Deformation and Fracture of Miniature Tensile Bars with Resistance-Spot-Weld Microstructures, *Metall. Mater. A*, Vol. 36, pp. 2651~2669.
- [14] C. Y. Kim, J. H. Song, K. J. Park, 2012, Tensile Tests for Copper Thin Foils by using DIC Method, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1529~1534.
- [15] N. D. Luozzo, B. Doisneau, M. Boudard, M. Fontana, B. Arcondo, 2014, Microstructural and Mechanical Characterizations of Steel Tubes Joined by Transient Liquid Phase Bonding using an Amorphous Fe-B-Si Interlayer, *J. Alloys compd.*, Vol. 615, pp. 518~522.
- [16] Y. Tomota, M. Umemoto, N. Komatsubara, A. Hiramatsu, N. Nakajima, A. Moriya, T. Watanabe, S. Nanba, G. Anan, K. Kunishige, Y. Higo, M. Miyahara, 1992, Prediction of Mechanical Properties of Multi-phase Steels Based on Stress-Strain Curves, *ISIJ Int.* Vol. 32, No. 3, pp. 343~349.
- [17] M. Fujita, K. Kuki, 2016, An Evaluation of Mechanical Properties with the Hardness of Building Steel Structural Members for Reuse by NDT, *Mater.*, Vol. 247, pp. 1~13.