〈 기술논문 〉

변형 및 복원공정에 따른 실린더 형상 구조물의 응력분포 특성

부명환† · 박치용* · 김진원**

(2004년 7월 28일 접수, 2004년 11월 29일 심사완료)

Evaluation of Characteristics for Stress Distribution on Cylindrical Beam Structure by Deformation and Restoration Process

Myung-Hwan Boo, Chi-Yong Park and Jin-Weon Kim

Key Words: Deformation(변형), Restoration Process(복원공정), Stress Distribution(응력분포), Cylindrical Beam Structure(실린더 형상 구조물)

Abstract

In heavy industrial fields such as power plant and chemical plant, it is often necessary to restore damaged part of large machinery and structure which is installed in the hazard working place. In this paper, to estimate stress distribution which occurs during damage and restoration of cylindrical beam structure, the finite element technique has been used. A finite element model was verified by experiment for non deformed cylindrical beam structure. The displacements and elastic recovery have an excellent agreement between experiment and finite element analysis. The variations of stress distribution on deformation and restoration procedure for surfaces have been examined. The maximum von Mises stress appears in the surface for deformation and restoration procedure. In deformation procedure, the maximum stress occurs in the vicinity of support body. In restoration procedure, the maximum stress occurs in the vicinity of the fixing body. The fixing body allows avoiding stress concentration in adjacent support structure boundary.

1. 서 론

대형 장치산업에서 사용되는 기계구조물은 특정한 위치에 고정되어 구조물로서의 기능 또는 기계장치로서의 고유 기능이 수행된다. 일반적으로 기계구조물은 사용수명이 다하거나 외력에 의해 손상이 발생하였을 경우 필요한 부분을 교체하여 사용할 수 있지만, 대형구조물의 일부이거나 사람이 접근하기 어려운 특수한 환경에 놓인 경우에는 교체가 불가능하거나 또는 교체시 막대한 경제적 · 시간적 손실이 발생할 수 있다. 이와 같이 특수한 환경에 놓여 있는 대형구조물의 일부가 소성변형에 의해 변형 손상이 발생한 경우에는 구조물의 건전성, 경제성, 작업시간 등을 고려하여 적절한 정비공정을 선택하여야 한다. 또한 구조물의 정비에 앞서 손상된 구조물의 건전성을 파악하여야 하며 이에 따른 적절한 정비 공정의 선택과 복원 이후에 대한 구조물의 건전성이 유지됨을 확인하여야 한다.

유한요소법을 이용한 잔류응력의 해석에서 쇼트피닝,[1] Ice Pluging[2] 및 노치부 잔류응력평가[3] 등에 대한 평가는 있지만 대형구조물의 변형과

† 책임저자, 회원, 한전전력연구원 원자력연구실 원전기계재료그룹
E-mail : mhboo@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5654 FAX : (042)865-5604
* 회원, 한전 전력연구원 원전기계재료그룹
** 회원, 조선대학교 공과대학 원자력공학과

복원에 관한 연구는 없다.

본 연구에서 변형단계에서는 대형 기계구조물의 일부인 실린더 형상 구조물 자유단에 외부 하중이 가해져 영구변형이 발생하고, 복원공정에서는 외부 하중에 의해 변형된 실린더 형상 구조물의 복원공정에서 구조물의 경계부분에 응력이 집중하는 것을 피하기 위하여 고정대를 설치하여 복원공정을 수행한다고 가정하였다. 변형되지 않은 실린더 형상 구조물의 굽힘실험을 통하여 유한요소 모델의 타당성을 검증하였다. 또한 검증된 유한요소 모델을 이용하여 변형과 복원공정에 대한 유한요소 해석을 수행하여 각 단계에서 발생하는 변위 및 응력의 분포를 관찰하였으며 고정대가 실린더 형상 구조물의 변형과 응력 분포에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실린더 구조물의 모델링 및 실험

2.1 실린더 형상 구조물

본 해석에 사용된 실린더 형상 구조물을 Fig. 1에 나타내었다. 실린더 형상 구조물은 구조물 지지대에 완전히 고정되어 있다. 실린더의 재질은 STS304로서 외경 66 mm, 두께 114.3 mm의 지지대에 하단부 J Groove 용접으로서 체결되어 있다. 본 구조물은 다른 구조물을 실린더 내부로 삽입하여 단순 지지하는 역할을 하며, 정상가동 중에 기계구조물이 받는 외력이나 열에 의한 영향은 무시할 정도로 적다고 가정한다.

2.2 유한요소 모델

실린더 형상 구조물은 구조물 지지대에 의해 완전히 고정되어 있고 지지대의 강성이 실린더보다 크다고 가정하면 실린더 형상 구조물은 한쪽이 고정되어 있고 다른 한쪽은 자유로운 단순 외팔보로 생각할 수 있다. 실린더 형상 외팔보의 자유단에 어떤 임의의 하중이 가해져 외팔보가 변형된 경우, Fig. 2와 같이 나타낼 수가 있다. Fig. 2는 외부 하중에 의해 실린더 형상 구조물이 외부 하중에 의한 변형이 발생하는 과정을 나타낸 것으로, 실린더 형상 구조물은 탄소성 변형, 탄성회복 및 영구변형이 발생하게 된다. Fig. 2(b)의 Step 2와 같이 변형된 구조물을 복원하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 지지대 경계부에 추가적인 응력이 가해지지 않도록 지지대에서 일정거리 떨어진 곳에 고정대를 두어 자유단에 굽힘을 가하는 방법을 채택하였다.

실린더 형상 구조물의 응력평가는 변형단계와 복원단계로 나누어진다. 변형단계는 외력에 의해 변형이 발생하는 단계로, Fig. 2(a)에서 외력이 작용하여 변형이 진행되며, Fig. 2(b)에서 외력이 제거된 후 영구변형이 발생한다. 복원단계는 원형으로 복원하는 단계로서 Fig. 3(a)와 같이 반대방향으로 변위를 가하여 Fig. 3(b)의 원형으로 복원하는 단계이다. 여기서 부호의 통일을 위하여 변형과

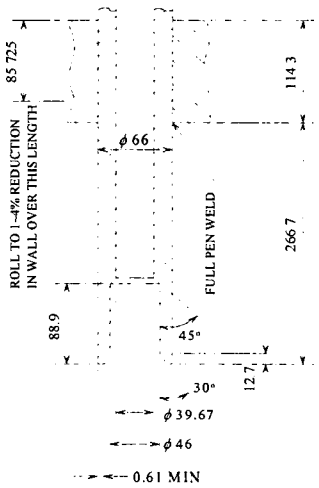
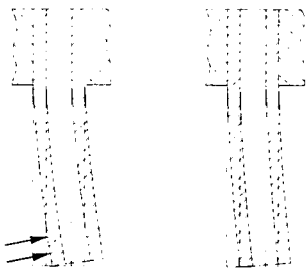


Fig. 1 cylindrical beam structure (unit : mm)



(a) Step 1 (b) Step 2

Fig. 2 Deformation process

정에서 외력이 가해지는 방향을 +X방향으로, 복원 과정에서 당기는 방향을 -X방향으로 정의하였다.

2.3 해석의 경계조건

실린더 구조물의 잔류응력을 평가하기 위한 유한요소모델은 절반 모델(half model)로 Fig. 4와 같으며, 8절점(node) 3D structural solid 요소(ANSYS element Solid 185)를 적용하였다. 반경방향은 4층 구조이며 상부 실린더 고정부는 용접부를 포함하며 축방향 조대 격자를 적용하였다. 경계조건은 상부고정판의 변형을 무시하여 Fig. 5(a)와 같이 설정하였다. 266.7 mm 길이의 돌출부는 두께방향 요소크기를 고려하여 최적 자동크기로 결정하였다. 복원과정에서 굽힘지그의 작용변위 및 고정대의 변위 구속을 묘사하기 위해 실린더 형상 구조물 표면은 접촉면요소(CONTACT 174) 및 고정대 및 굽힘지그 내면은 대응하는 목표면요소(TARGET 170)를 선택하여 사용하였다. 변형단계에서 유한요소모델에 가해지는 하중은 +X방향으로 Fig. 5(b)와 같이 자유단 끝에서 폭 25.4 mm에 대해 압력을 가하였다. 이때 굽힘지그는 해석에 영향을 미치지 않도록 하였다. 변형과정에 의해 Fig. 2(b)의 실린더 형상 구조물 끝단이 3.0 mm의 영구변형이 발생하였다고 가정하였다. 복원과정에서 Fig. 3(a)와 같이 고정대는 위쪽 끝단이 최초로 접촉하는 거리인 0.39 mm를 이동하였으며 굽힘지그를 -X방향으로 이동하여 자유단의 위치가 0이 되도록 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료는 스테인레스강인 STS304로 인장시험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선인 Fig. 6을 이용하여 실린더 구조물의 탄소성 거동을 해석하였다. 실린더 구조물의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

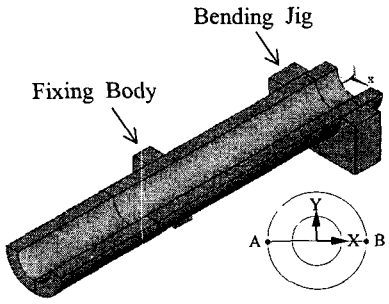
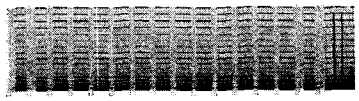


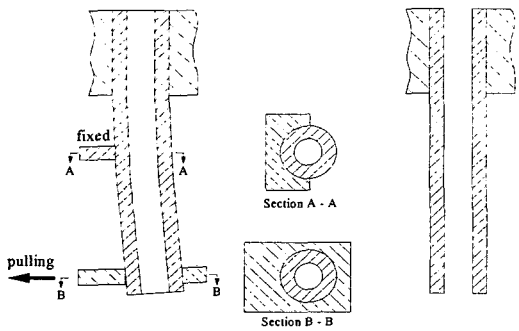
Fig. 4 Finite element model



(a)

(b)

Fig. 5 Boundary conditions



(a) Step 3 (b) Step 4

Fig. 3 Restoration process

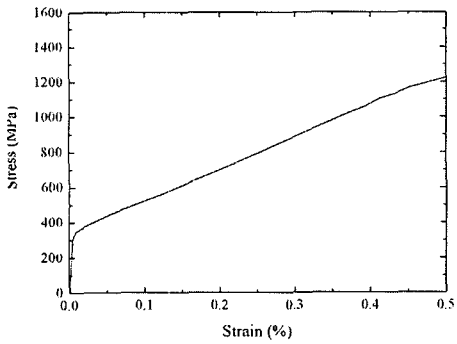


Fig. 6 Stress-strain curve

Table 1 Material properties for STS304

Yield Stress	Ultimate Tension Stress	Elastic Modulus	Poisson's ratio (ν)
295 MPa	743 MPa	193 GPa	0.29

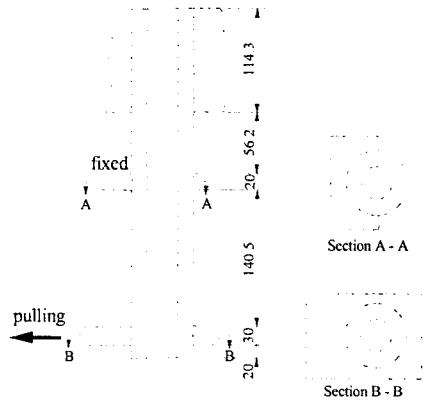


Fig. 7 Specimen and bending test method

2.4 해석의 타당성 검증 실험

실린더 형상 구조물의 복원공정에 있어서 유한요소 해석의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 7과 같이 손상되지 않은 실린더 형상 구조물의 자유단에 대해 굽힘변위를 가하여 자유단에 대한 영구변형량을 측정하였다. 실험에 사용된 재료는 STS304로 기계적 성질은 Table 1과 같으며 유한요소모델과 동일한 재료이다. 사용된 유압램은 Enerpac RCH-302로 용량은 30 ton이며, 행정 64 mm 및 단면적 46.6 cm^2이다. 굽힘실험은 Fig. 7과 같이 지지대에서 56.2 mm 떨어진 곳에 두께 20 mm의 고정대를 두었으며, 실린더 형상 끝단에 고리모양의 지그를 만들어 4.5 mm당겨 5분간 유지한 후 제하하여 굽힘이 발생하도록 하였다. 이때 자유단의 변형량은 정밀도 1/100 mm 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다. 복원과정에 대한 유한요소모델과의 부호를 통일하기 위하여 굽힘을 가하는 방향을 음(-)으로 나타내었다.

굽힘실험 결과 -4.5 mm의 변형을 가했을 경우 -3.09 mm의 영구변형이 발생하였다.

Table 2 FE analysis and bending test (mm)

변위량	해석(ANSYS)		실험	
	탄성 회복량	영구 변형량	탄성 회복량	영구 변형량
-4.5	-1.36	-3.14	-1.41	-3.09

3. 잔류응력 해석 및 건전성 평가

3.1 해석과 실험 및 모델 검증

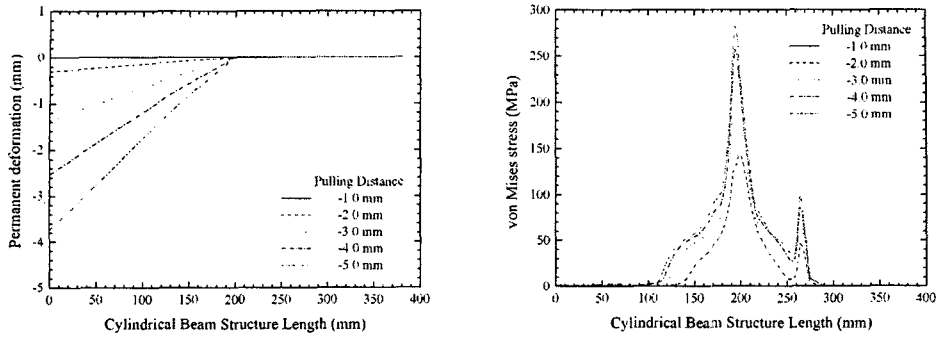
실린더 형상 구조물의 복원과정에 대한 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같은 유한요소모델을 만든 후 실험과 동일한 경계조건을 적용하여 탄소성변형해석을 수행하였다.

Fig. 4의 A위치에서 굽힘지그를 이용해 당긴 거리에 대한 실린더 형상 구조물의 길이방향에 대한 영구 변형량 및 응력 크기를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에서 고정대가 위치한 200 mm를 경계로 하여 당김거리가 증가 할수록 자유단의 변형량이 증가하고 있다. Fig. 8(b)에서 응력분포는 당김거리가 증가할수록 증가하고 있다. 또한 실린더 형상 구조물 길이에 대해 고정대 위치에서 응력의 크기는 최대가 되며 구조물의 경계부에서 다시 응력이 증가하고 있다.

지지대 경계부에서 굽힘지그를 이용해 당긴 거리에 대한 실린더 형상 구조물의 영구 변형량 및 응력 크기를 Fig. 9에 나타내었다. 영구 변형량과 최대 잔류응력의 절대값 크기는 당기는 거리가 증가할수록 점진적으로 증가하고 있다. Table 2는 실험과 유한요소 해석으로 구한 실린더 형상 구조물 자유단의 영구 변형량을 비교한 것이다. 영구 변형량은 실험과 해석에 대해 각각 -3.09 mm 및 -3.14 mm로 실험값을 기준으로 약 1.6%의 오차를 나타내고 있다.

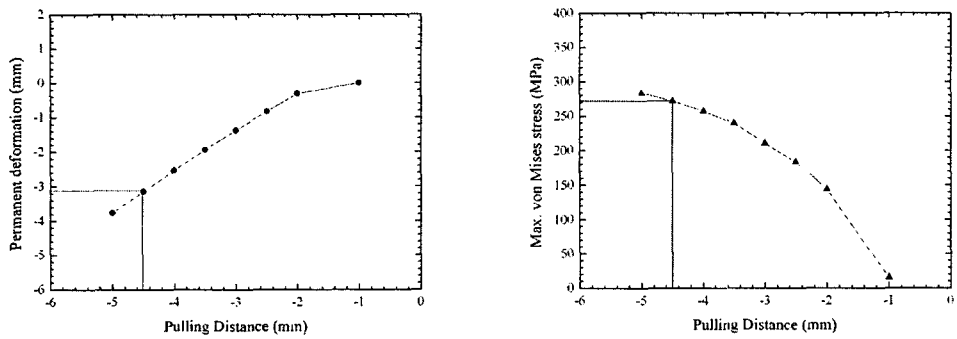
변형이 되지 않은 실린더 형상 구조물의 굽힘실험 및 유한요소 해석결과는 거의 일치하였으며 유한요소 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

Fig. 10은 굽힘실험을 검증하기 위한 유한요소 해석의 일예를 나타낸 것으로 당김거리가 -4.5 mm일때의 변위와 응력 분포를 나타낸 것이다.



(a) (b)

Fig. 8 Permanent deformation and von Mises stress distribution at position A



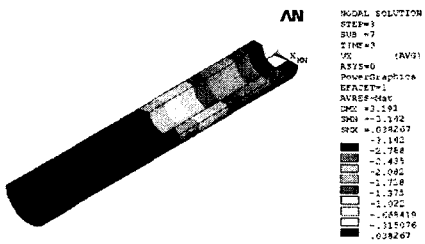
(a) (b)

Fig. 9 Permanent deformation and von Mises stress distribution for pulling distance

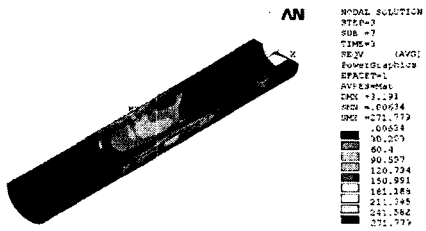
3.2 실린더 형상 구조물의 변위 및 응력 분포

실험결과와 비교하기 위해 작성한 유한요소 모델을 기본으로 변형단계와 복원단계에 대한 유한요소 모델을 생성하여 각 단계에서 실린더 형상 구조물의 길이 방향에 대한 변위 및 응력분포를 검토하였다.

Fig. 11은 변형단계인 Step1과 Step2에 대한 위치 A에서 실린더 형상 구조물의 길이에 대한 X 방향의 변형량 및 응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 11(a)에서 변형량은 자유단에서 최대이고 점점 감소하여 지지대 부분인 약 260 mm에서 최소를 나타내고 있다. 또한 외부 변형에 대해 약 62 %정도의 영구 변형이 발생하는 것으로 나타나고 있다. Fig. 11(b)에서 응력 분포는 Step 1의 경우, 자유단에서 지지대쪽으로 갈수록 증가하여 120 mm지점에서 천이를 나타내며 다시 증가하여 지

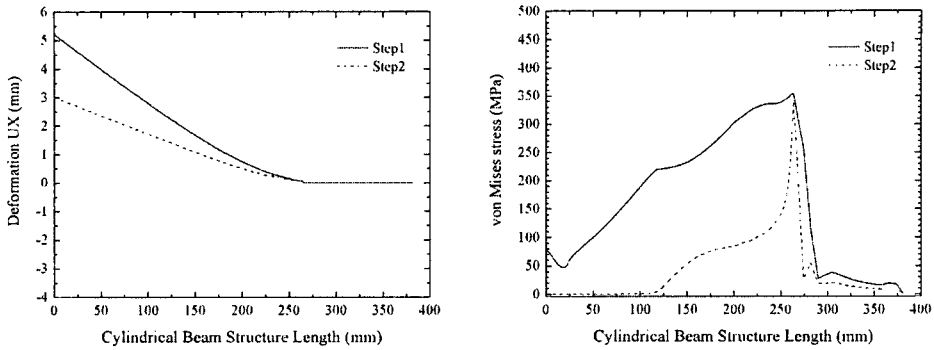


(a) Displacement distribution (mm)



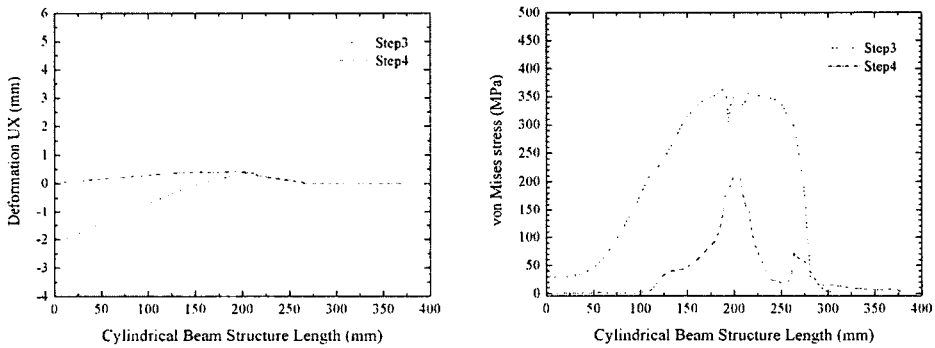
(b) Stress distribution (MPa)

Fig. 10 Displacement and stress distribution at pulling distance -4.5mm



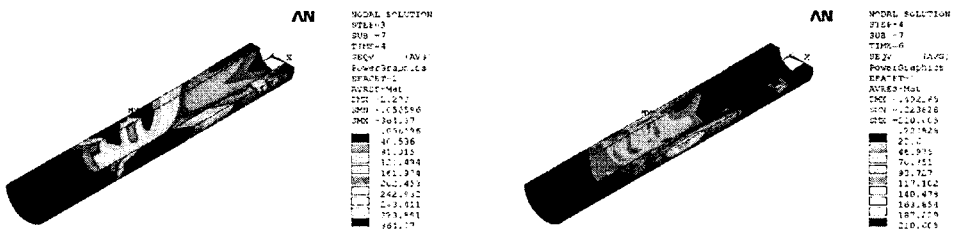
(a) Deformation distribution (b) Stress distribution

Fig. 11 Deformation and stress distribution at deformation process



(a) Deformation distribution (b) Stress distribution

Fig. 12 Deformation and stress distribution at deformation process



(a) Step3 (b) Step4

Fig. 13 von Mises stress distribution at Step 3 and 4

지대경계부인 260 mm에서 최대값을 나타낸다. 이후 급격히 감소하여 지지대에서 최소값를 나타내고 있다. 120 mm의 천이점을 기준으로 탄성영역과 탄소성영역으로 구분된다. Step 2의 경우, 외부하중이 제하되어 자유단에서 약 120 mm까지는 완전히 탄성회복이 되며 이후 점진적으로 증가하지만 지지대 경계부에서 급격한 증가를 보이고 있다.

Fig. 12는 복원단계인 Step 3과 Step 4에 대한 위치 A에서 실린더 형상 구조물의 길이에 대한 X방향의 변형량 및 응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)에서 Step 3의 변형량은 약 -2 mm에서 서서히 증가하여 고정대가 위치한 200 mm지점에서 다시 감소한 후 영이 되고 있다. Step 4에서는 자유단은 거의 복원이 되었지만 고정대가 위치한 부분에서는 변형이 발생되고 있다. Fig. 12(b)의

응력분포에서 Step 3의 경우, 고정대가 위치한 200 mm 전후에서 크게 증가하고 있다. 고정대 위치에서 실린더 형상 구조물과의 접촉에 의해 약간의 응력 천이를 보이고 있다. Step 4에서 많은 부분이 탄성회복을 하지만 고정대 위치에서 230 MPa정도의 잔류응력이 최대로 발생하고 있으며, 반면에 경계부분 즉 구조물 길이 260 mm 근처에서 최대응력은 복원과정에 의한 응력의 재배치에 의해 Fig. 11(b)의 Step 2와 비교하여 약 85%이상 응력이 완화되고 있다.

Fig. 13은 Step 3, 4에서의 실린더 형상 구조물에 대한 von Mises 응력 분포를 나타낸 것이다. Step 3에서 고정대를 중심으로 항복강도이상의 응력이 넓게 분포되어 있지만 Step 4에서는 200 MPa이하의 비교적 작은 응력이 고정대에 존재하고 있으며 지지대의 경계에는 약 60 MPa의 응력만이 남아 있다. 실린더 형상 구조물의 복원공정에서 고정대를 이용함으로서 구조물 경계에 대한 응력 집중을 완화되는 것을 확인할 수 있었으며, 실린더 형상 구조물의 고정대위치에서 약 0.4 mm 변형이 발생하지만 구조물의 성능에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 대형기계구조물의 일부가 외부하중에 의해 변형 손상된 경우, 구조물 전체 또는 일부분을 교체하지 않고 복원공정을 통하여 구조물을 정비하는 공정에 대한 건전성을 평가하기 위하여 변형 및 복원공정에 대한 실린더 구조물의 잔류응력 평가를 수행하였다.

변형과 복원단계에 대한 비선형해석의 정확한 해를 구하기 위한 실린더 형상 구조물의 굽힘실험과 유한요소 모델의 비교 검증에서 약 1.6 %의 오차범위에서 잘 일치하고 있으며, 유한요소 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

실린더 형상 구조물의 비선형 유한요소 해석에서 변형단계에서는 구조물의 경계부분에서 변형량은 거의 0이 되고 있으며, 응력은 최대값을 나타내고 있다. 복원단계에서 변위는 고정대에서 최대를 나타내며, 응력은 고정대에서 최대 피크 값을 나타내고 구조물 경계에서 2차 피크 값을 나타낸다.

고정대위치에서 발생하는 소성변형에 따른 영구 변형과 잔류응력의 발생은 피할 수 없지만 구조물 경계부의 응력은 상당히 완화되고 있다. 구조물은 고유기능을 수행하는 동안 고온상태를 유지하며, 정상운전시 응력이 거의 작용하지 않으며, 용접 불량, 균열 등 실린더 구조물의 내부 결함이 없다고 가정한다면, 구조물의 시간에 따른 잔류응력 완화 특성을 고려할 때, 구조물 내부에 국부적으로 포함된 잔류응력의 크기가 실린더 구조물의 건전성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 변형된 실린더 형상 구조물의 복원공정은 구조물의 경계부분에 응력집중을 피하기 위한 방법 중 하나이다. 복원공정의 최적화를 위해서는 고정대의 위치, 고정대 폭, 굽힘의 반복등 추가적인 연구로 최적의 복원공정을 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 공학적 범위에서는 복원공정의 타당성을 건전성 측면에서 입증하였다고 사료된다.

참고문헌

(1) Kim, T. J., Kim, N. S., Park, S. C. and Jeong, W. W., 2002, "Finite Element Analysis of Shot Peening Effected by Multiple Impacts," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 12, pp. 2656~2661.

(2) Park, Y. D., Byun, S. K. and Kang, B. S., 1998, "Thermal Deformation and Thermal Stress Analysis of Pipe During Pipe Internal Fluid Freezing," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 22, No. 1, pp. 227~237.

(3) Lee, S. B., 1992, "Distributions of Load Stresses and Residual Stresses at Notchs," *KSME Int. Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 132~139.

(4) ANSYS Inc., 2004, Structural Analysis Guide, release 8.1