

소성변형된 실린더형 빔의 복원 안전성 평가

박치용[†] · 부명환

한국전력연구원 원자력연구실
(2004. 9. 10. 접수 / 2005. 1. 5. 채택)

Safety Evaluation for Restoration Process on Plastic Deformed Cylindrical Beam

Chi-Yong Park[†] · Myung-Hwan Boo

Nuclear Power Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)
(Received September 10, 2004 / Accepted January 5, 2005)

Abstract : In heavy industrial fields such as power plant and chemical plant, it is often necessary to restore a damaged part of large machinery or structure which is installed in the hazard working place. In this paper, to evaluate the safety of plastic deformed cylindrical beam, a finite element technique has been used. The variations of residual stresses on the process of damaging and restoring for surfaces and cross-sections have been examined. The results show that the maximum von Mises stresses occur outer cylinder surfaces of boundary between cylindrical beam support and cylindrical beam when deformation procedure and restoring force is applied. The maximum residual stress remains 158.6MPa in the inner wall and this value correspond to 53% of yield stress when restoration procedure is finished.

Key Words : plastic deformation, cylindrical beam, safety evaluation, restoration, residual stress

1. 서 론

대형 장치산업에서 사용되는 기계구조물은 특정한 위치에 고정되어 구조물로서의 기능 또는 기계 장치로서의 고유 기능이 수행된다. 일반적으로 기계 구조물은 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 안전성을 파악하여야 하며, 이에 따른 적절한 정비 공정의 선택과 복원 이후에 대한 구조물

의 건전성이 유지됨을 확인하여야 한다.

유한요소법을 이용한 잔류응력의 해석에서 쇼트 피닝¹⁾ 및 ice plugging²⁾과 같은 기계부품에 대한 평가는 있지만 대형구조물의 변형과 복원과정에 대한 안정성 평가는 없는 실정이다.

본 연구는 발전산업 플랜트의 실린더형 구조물이 외부 하중으로 소성 변형된 사안에 대하여 변형의 재현과 복원공정에서의 구조물 안전성 평가에 관한 것이다. 구조물을 단순화된 모델로 정의하고, 소성 변형과 복원단계에서의 탄성복원을 고려한 변위를 계산하여 정비공정에 활용하도록 하고, 탄성복원 후의 잔류응력 분석을 통해 안전성을 평가함으로써 복원정비를 위한 기술적 근거를 확보하고자 하였다.

2. 실린더형 빔의 모델링

2.1. 실린더형 빔

본 해석에 사용된 실린더형 빔(Beam)을 Fig. 1에 나타내었다. 실린더형 빔은 구조물 지지대에 완전히 고정되어 있다. 실린더의 재질은 SS304이며 외경 66

[†]To whom correspondence should be addressed.
cypark@kepri.re.kr

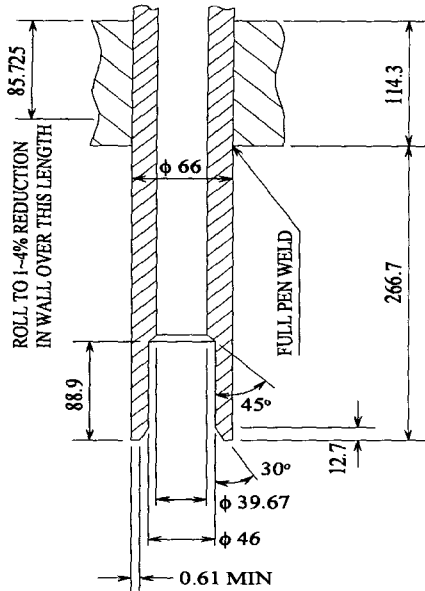


Fig. 1. Cylindrical beam (unit : mm)

mm, 두께 114.3mm의 지지대에 하단부 J 그루브 용접으로 체결되어 있다. 본 구조물은 다른 구조물을 실린더 내부로 삽입하여 단순 지지하는 역할을 하며, 정상가동 중에 기계구조물이 받는 외력이나 열에 의한 응력은 무시할 정도로 작다.

2.2. 공정 및 해석 절차

실린더형 빔보다 지지대 강성이 크고, 지지대 양쪽 끝이 고정되어 있기 때문에 지지대 쪽을 고정지지 조건으로 한 단순 외팔보로 가정할 수 있다. 실린더 형상 외팔보의 자유단에 임의의 하중이 가해져 외팔보가 소성 변형된 경우를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 외부 하중에 의해 실린더형 빔이 외부 하중에 의한 소성변형이 발생하는 과정을 나타낸 것으로, 탄소성 변형 후에 탄성회복을 거쳐 영구변형을 나타내고 있다. Fig. 2(b)와 같이 변형된 구조물을 복원하기 위해서는 여러 가지 공정을 생각해 볼 수 있다. 첫 번째 방법으로 지지대 경계부에 응력이 가해지도록 하중을 가하는 방법, 두 번째로 지지대 경계부에 응력이 가해지지 않도록 중간 고정체를 두어 하중을 가하는 방법으로 나눌 수 있다. 구조물 복원공정 해석에서 가장 보수적인 해석방법으로는 Fig. 3과 같이 변형 반대방향으로 하중을 가하는 방법이다. 이 공정은 가장 간단하지만 경계부에 추가적인 소성변형이 가해지게 된다. 따라서 본 연구에서는 외부하중에 의해 변형된 실린더형 빔의 복원

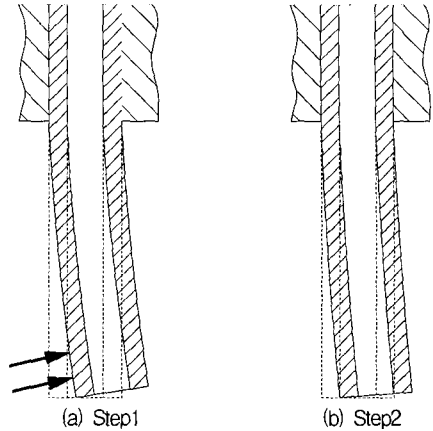


Fig. 2. Deformation process (Stage 1)

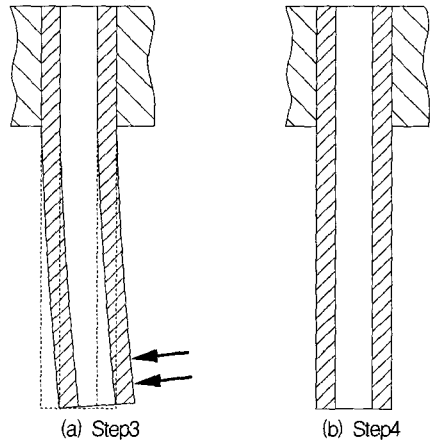


Fig. 3. Restoration process (Stage 2)

공정중 가장 보수적인 방법을 선택하여 복원공정을 해석함으로써 구조물의 안전성을 입증하였다.

실린더형 빔의 변형 및 복원 공정에 대한 평가는 다음과 같이 행하였다.

- 변형단계(Stage 1) : 외력에 의해 영구변형이 발생하는 단계
 - Step1 : 외력이 작용하여 변형 발생
 - Step2 : 외력 제거 및 탄성회복 후 영구변형
- 복원단계(Stage 2) : 원형으로 복원하는 단계
 - Step3 : 반대방향으로 하중 작용
 - Step4 : 탄성회복 후 원형으로 복원

2.3. 해석 및 경계조건

실린더형 빔의 잔류응력을 평가하기 위한 유한요소모델은 절반 모델(half model)로 Fig. 4와 같으며, 8 절점의 3차원 6면체요소(ANSYS Solid 185 ele-

ment)를 적용하였다. 반경방향은 4층 구조이며 상부 실린더 고정부는 용접부를 포함하며 축방향 조대 격자 적용하였다. 경계조건은 상부고정판의 변형을 무시하여 Fig. 5와 같이 설정하였다. 외팔보 부분은

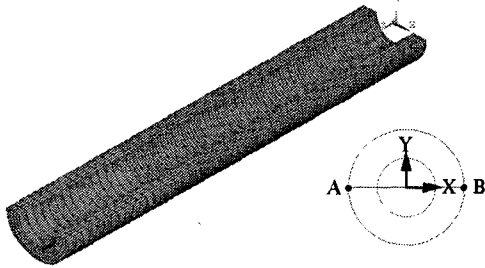


Fig. 4. Finite element model

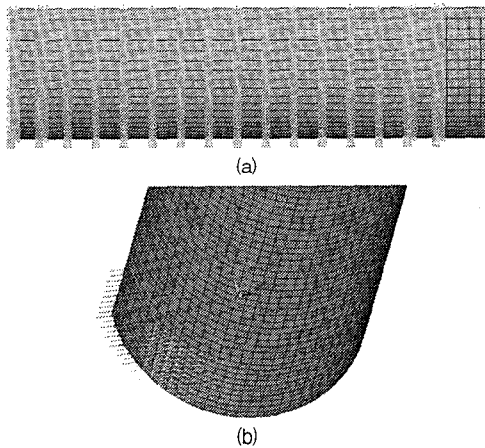


Fig. 5. Boundary conditions

Table 1. Material properties for SS304

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

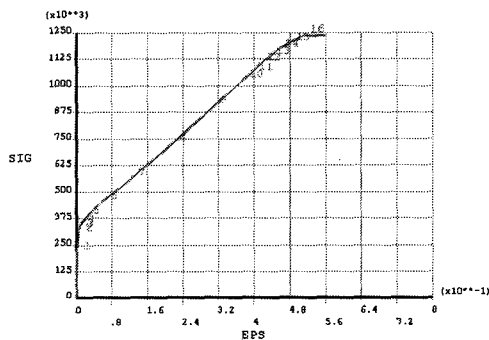


Fig. 6. Stress-strain curve

두께방향 요소크기를 고려한 최적 자동크기로 결정하였다. 외부 하중은 자유단에서 폭 25.4mm에 대해 Fig. 4의 A위치에서 X방향으로 압력을 가하였다. 해석에 사용된 재료인 스테인레스강 SS304의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었고, 응력-변형을 곡선은 인장시험을 통해 얻은 Fig. 6을 이용하여 탄소성 거동 및 탄성회복을 해석하였다.

3. 잔류응력 해석

3.1. 변형량 재현 및 복원량 계산

본 논문의 목적중의 하나는 탄소성유한요소해석과 탄성회복 과정의 해석을 통하여 끝단에서 측정된 3.1mm의 변형량을 재현하고, 변형 후에 포함된 잔류응력을 고려한 경우 최종 빔이 직진도를 유지하도록 하는 복원공정의 변위를 제안함과 동시에, 탄성회복량과 최종적인 잔류응력 크기를 산출하는데 있다. 따라서 Stage 1 해석은 영구 변형 3.1mm가 구해지기 위해 다양한 하중을 가하는 단계이며, Step2는 하중을 제하한 후 실린더에 발생하는 최대 잔류응력의 크기 및 변형량을 얻기 위한 해석으로, 이를 Fig. 7에 표현하였다. 또한, 복원공정에서의 목적은 복원변위 후 탄성회복을 고려하여 최종 상태에서의 빔 변위가 영(zero)이 되도록 하는 것이다. 이를 위해 최적의 복원 변위를 얻기 위한 몇 차례 해석이 수행되었다. 목적변위 산출을 위한 작용하중과 작용변위, Stage 4에서의 탄성회복후의 최대잔류응력 크기와 목적변위와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

3.2. 각 변형단계에 대한 작용 및 잔류응력

본 절에서는 Fig. 7 및 Fig. 8에서 얻은 최종 변형 및 복원공정의 변위 크기에 대한 결과를 응력 측면에서 고찰하였다. 외부 하중에 의해 변형단계에서 Step1과 Step2과정에서 발생하는 von Mises 응력을 Fig. 9과 10에 나타내었다. 외부 하중에 의해 Step2에서 3.1mm 영구변형의 발생을 위해서는 Fig. 9의 Step1에서 빔 끝단 변형은 5.33mm이며, 실린더에 발생하는 최대응력은 355.3MPa로 실린더형 빔 지지대 직하에서 나타나고 있다. Fig. 10은 탄성회복 후의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로 최대 잔류응력은 342MPa로 나타나고 있다. 또한 영구변형을 일으키기 위한 외부하중의 크기는 1,580kgf로 계산되었다. 탄성회복된 Step2의 응력분포는 국부적으로 항복강

도 이상의 큰 값을 나타내고 있어 변형의 복구이에도 응력완화 측면에서도 정비가 필요함을 알 수 있다.

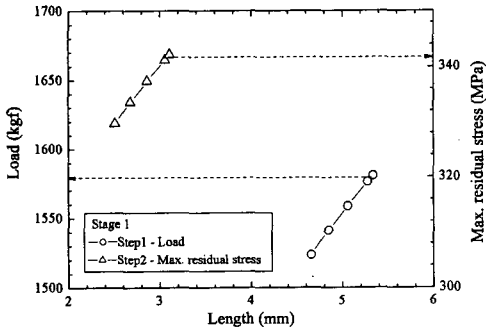


Fig. 7. Applied load and max. residual stress for stage1

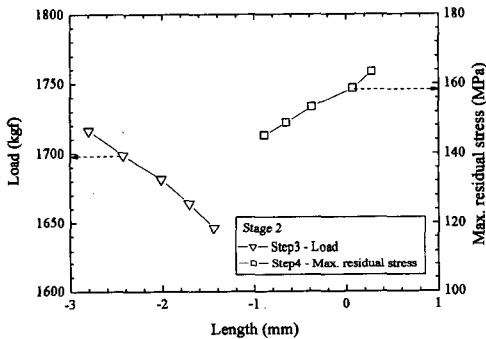


Fig. 8. Applied load and max. residual stress for stage2

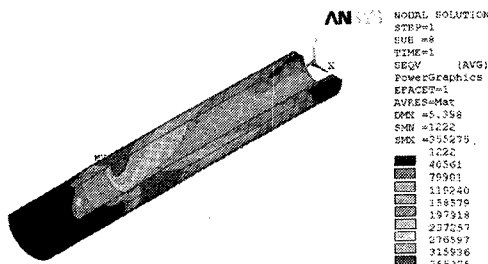


Fig. 9. Stress distribution at step1

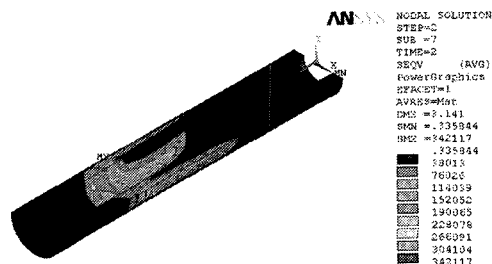


Fig. 10. Residual stress distribution at step2

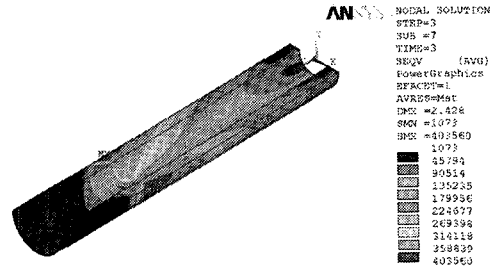


Fig. 11. Stress distribution at step3

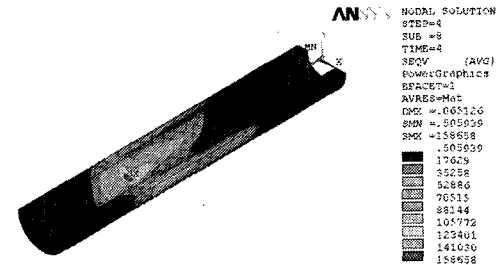


Fig. 12. Residual stress distribution at step4

복원공정에서 Step3과 Step4과정에 의한 von Mises 응력을 각각 Fig. 11와 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11에서 -X방향으로 가해지는 복원 하중에 의해 최대 변위는 약 -2.54mm까지 변형될 때 발생하는 응력은 404MPa이 발생하며, 응력분포는 Step1보다 더 넓은 범위에서 높은 응력이 발생하고 있다. 다시 Step4에서 복원하중을 제거하면 탄성회복된 실린더는 Fig. 12와 같이 잔류 최대응력은 항복강도의 약 1/2인 156.3MPa가 된다.

3.3. 각 변형단계에서의 변위

실린더형 빔의 변형과 복원단계에 대한 빔 끝단의 A위치(Fig. 4)에서 실린더형 빔 길이에 대한 X방향

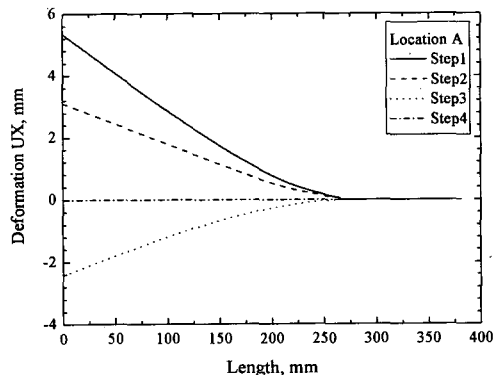


Fig. 13. Deformation distribution at position A

변위크기를 길이에 따라 Fig. 13에 나타내었다. 각 Step에 따른 자유단에서의 변위를 간단하게 요약하면 다음과 같다. 실린더 자유단은 Step1에 의해 약 5.3mm 변위가 발생하며, Step2에서 약 2.2mm 탄성회복하여 약 3.1mm의 영구변형이 발생한다. SS304는 연신율 70%의 연성재료로서 Step2에서 약 40%의 탄성회복을 나타내고 있다. Stage2 과정에서 Stage1 과정과 동일하게 약 40%의 탄성회복을 거쳐 최종 변위가 0으로 복원되고 있음을 알 수 있으며, 복원공정을 위해 가해 주어야 하는 변위는 5.64mm를 가해야 하는 것으로 얻어졌다.

3.4. 각 변형단계에서의 상세 응력크기 고찰

실린더형 빔의 변형단계에서 위치 A에 대한 실린더 길이방향의 응력분포를 Fig. 14(a)에 나타내었고, 길이방향에서 최대응력이 발생하는 위치인 약 260mm의 단면에서 원주방향 및 지름방향에 대한 응력분포를 각각 Fig. 14의 (b) 및 (c)에 나타내었다. 최대응력을 나타내는 위치는 실린더의 자유단에서 약 260mm인 지지대 경계에서 발생하고 있다. Fig. 14(a)의 Step1에서 응력은 실린더 길이 약 114mm까지 탄성변형에 의해 비례적으로 증가한 후 탄소성 변형에 의해 계속 증가하다가 최대를 나타낸 후 급격히 감소하고 있다. Step2에서는 약 114mm까지 탄성회복에 의해 응력은 완전히 회복되며 다시 점진적으로 증가한 후 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 14(b)의 원주방향에 대한 응력분포의 경우, Step1에서 하중방향과 평행한 A와 B의 위치에서 최대응력이 발생하고 90도 방향에서 최소응력이 발생하고 있으며, 하중을 제하한 Step2에서는 최대응력이 발생하는 위치는 Step와 동일하지만 최소응력이 발생하는 위치는 약 68° 및 112°에서 발생하고 있다. Fig. 14(c)의 지름방향의 응력분포는 Step1에서 A 및 B의 외부표면에서 최대를 나타내며 내부표면에서 최소를 나타내고 있다. Step2에서 최대·최소가 되는 위치는 동일하지만 표면에서 약 6.4mm의 위치에서 천이를 보이고 있다.

복원단계에서 위치A에 대한 실린더 길이방향의 응력분포를 Fig. 15(a)에 나타내었고, 길이방향에서 최대응력이 발생하는 위치인 약 260mm의 단면에서 원주방향 및 지름방향에 대한 응력분포를 각각 Fig. 15의 (b) 및 (c)에 나타내었다. Fig. 15의 복원단계에서 Step 3의 응력분포는 Step1의 응력분포와 유사한 경향을 보이지만, 가공경화의 영향으로 Step1보다 응력이 큰

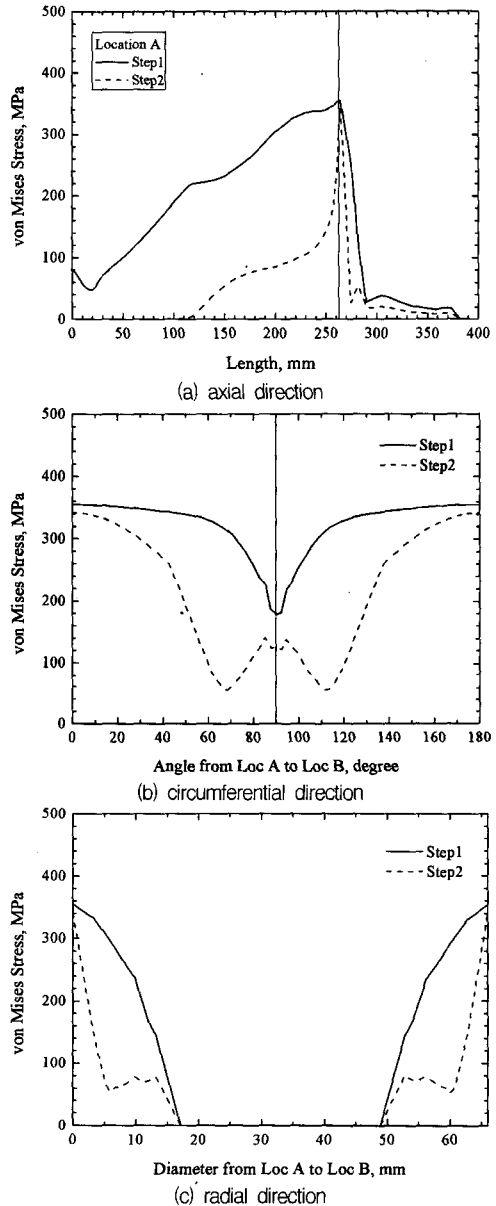


Fig. 14. Von Mises stress distribution for deformation process

부위가 많이 발생하고 있다. 복원이 완료되는 Step4의 경우, 응력의 재배치에 의해 응력이 완화되는 경향을 나타내고 있다. Fig. 15(a)에서는 국부적인 응력 집중이 완화되었고, Fig. 15(b)에서는 하중이 작용하는 A의 위치에서 60° 및 120°에서 항복강도의 약 1/2인 158.6 MPa의 잔류응력이 발생하고 있다.

즉, 실린더형 빔의 변형과 복원단계에 대한 응력 분포로부터 실린더형 빔의 복원에 따른 최대잔류응

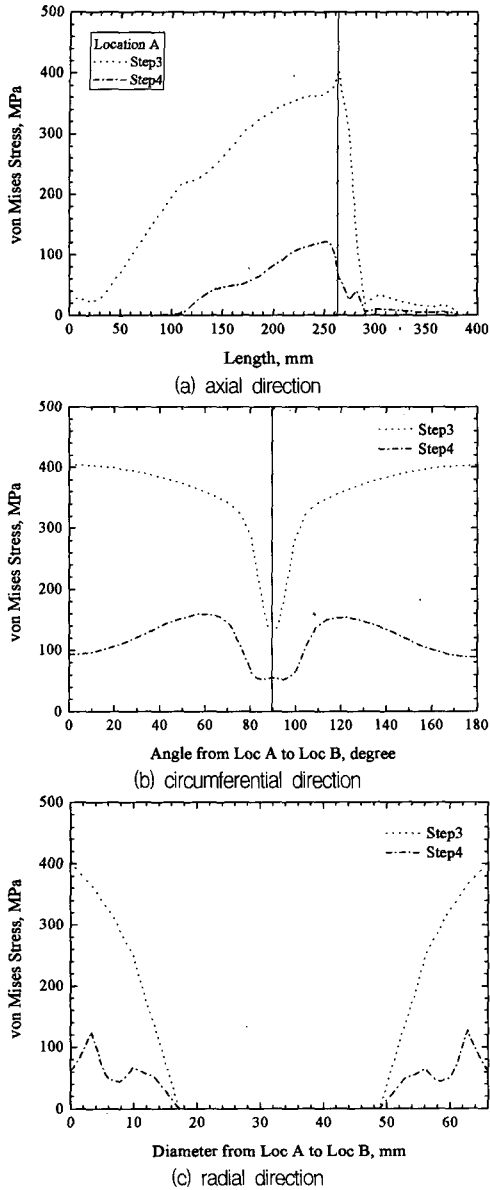


Fig. 15. Von Mises stress distribution for restoration process

력은 실린더 내벽에서 발생하고 있으며 위치A를 기준으로 60° 및 120°인 지점으로 나타나고 있다. 또한 최대잔류응력의 크기는 약 158.6MPa로 항복강도의 53%에 이르는 것을 알 수 있다. 복원과정에서 가해지는 응력의 크기는 변형이 발생할 때 가해지는 응력을 크게 초과하지 않으며, 변형과 복원과정에서 실린더에 발생하는 응력의 분포는 인장과 압축과정을 거쳐 응력이 완화되고 있다. 따라서 복원과정은 실린더형 빔에 소성변형을 유발하지만 최종 복원

과정 후에는 잔류응력의 크기가 구조물에 치명적인 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 대형기계구조물의 일부가 외부 하중에 의해 소성변형된 경우, 구조물 전체 또는 일부분을 교체하지 않고 단순 복원공정을 통하여 구조물을 정비하는 공정에 대한 안전성을 평가하기 위하여 변형 및 복원공정에 대한 실린더형 빔의 잔류응력 평가를 수행하였다. 변형 및 복원단계의 Step 1~3에서 최대응력은 실린더의 외벽에서 발생하고 있으나, 복원이 완료된 Step4에서는 실린더 내벽에서 발생하고 있으며, 위치A를 기준으로 약 60° 및 120°인 곳에서 발생하였다. 또한 실린더형 빔에 잔류하는 최대 잔류응력은 158.6MPa로 항복강도의 약 53%였다.

용접 불량, 균열 등 실린더형 빔의 내부 결함이 없다고 가정한다면, 잔류응력 고은 운전중 완화효과, 1 사이클의 피로 횟수 및 정상작동에서의 하중이 극히 작은 점을 고려할 때, 잔류응력 크기가 실린더형 빔의 안전성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

변형된 실린더형 빔의 복원공정은 변형 반대방향으로 하중을 가하는 방법에서부터 경계부분의 응력 집중을 피하기 위한 지렛대 역할의 고정대를 중간에 설치하여 반대방향으로 외력을 가하는 방법, 실린더 내부에 보강재를 삽입하여 복원하는 방법 등 여러 가지 정비 공정이 있으며, 이에 대한 최적의 공정 선택은 본 연구에서 이루어진 결과가 보수적인 모델을 기반으로 하고 있기 때문에 선택에는 제약이 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) Kim, T. J., Kim, N. S., Park, S. C., and Jeong, W. W., "Finite Element Analysis of Shot Peening Effected by Multiple Impacts", Trans. of the KSME (A), Vol. 26, No. 12, pp. 2656~2661, 2002.
- 2) Park, Y. D., Byun, S. K., and Kang, B. S., "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, 1998.
- 3) ANSYS Inc., Structural Analysis Guide, release 8.1, 2004.