

증기발생기 전열관의 정밀성형을 위한 스프링 백 저감에 관한 연구

서영성* · 김용완** · 김종인**

A Study on the Reduction of Spring Back for Precision Forming of Steam Generator Tube

Y. S. Suh, Y. W. Kim, and J. I. Kim

Abstract

The spring back taking place after the coiling process of steam generator tube leads to the dimensional inaccuracy. In order to reduce the spring back, tension force was applied to the one end of the tube during forming. In this work, parametric study using FEM was performed to find the appropriate magnitude of tension force. The force that induces minimum spring back was found by simultaneously taking account of spring back amount, cross-sectional ovality, and thickness of the tube wall after deformation. In addition, stress relieving by heat treatment was also simulated as an alternative to the former method. The latter was found to be more effective under the given constraints.

Key Words : Spring Back, Coiling, Tension Force, FEM, Stress Relieving

1. 서 론

일체형 원자로 SMART의 증기 발생기는 Fig. 1에 보는 바와 같이 관류식 나선형으로 설계되었다. 이 전열관은 소성을 이용한 굽힘 성형공정으로 제작되는데 이때 성형 후에 반드시 수반되는 스프링 백(Spring back)으로 인하여 제작의 정밀도를 확보하기가 매우 어렵다. 러시아에서는 관류식 나선형 증기 발생기를 제작할 때 스프링 백을 반경의 변화 3mm로 엄밀히 규정하는데, 스프링 백의 제어가 없이 제작될 경우 그 값이 40mm까지도 늘어나는 경우를 비교할 때⁽¹⁾, 별도의 조치를 취하지 않는 한, 정확한 치수로 제작하기는 매우 어려운 것으로 본다.

본 연구의 전 단계 작업으로서, 한국원자력연구소에서 증기 발생기를 제작할 때 일어나는 변형 거동을 해석적으로 계산한 바 있다⁽¹⁾. 즉, 증기 발생기의 소성가공 후 일어나는 스프링 백을 개략적으로 예측할 수 있는 해석적 모델을 개발하여 민감도 해석을 수행함으로써 스프링 백을 감소시키기 위한 시도를 하였다. 그 결과, 설계 단계에서 제어할 수 있는 인자로서 낮은 항복강도와 높은 탄성계수를 가진 재료를 선택할 것과 전열관 제작시 작은 곡률반경을 유지할 것, 그리고, 전열관의 외경을 크게 할 것을 제시하였다. 제작 단계에는 인장하중을 추가적으로 가하여 스프링 백을 감소시킬 수 있음을 보였다^(1~2). 따라서, 설계과정에서 앞에서 제시한 모든 인자들

* 한남대학교 기계공학과

** 원자력연구소 동력로개발팀

만족시킨 후에는 제작시 인장하중을 가하며 굽힘 가공을 하는 방법에 대해 좀 더 구체적인 연구가 필요하였다. 즉, 얼마나 큰 인장하중을 주어야 할지, 혹은 굽힘하중과 인장하중을 동시에 가함으로써 단면과 두께의 변화나 잔류응력으로 인한 부식의 가능성은 높아지지 않는지, 또한, 일체형 원자로 전열관의 정확한 코일링을 위한 스프링 백 현상 규명 및 이를 고려한 가공 방법을 제시하기 위하여 FEM을 활용, 전열관 성형시 발생하는 관의 스프링 백(spring back), 기하적 왜곡도(ovality), 두께(thickness)의 변화를 예측하여 실제 성형시에 적용할 수 있는 엔지니어링 데이터를 확보하였다. 또한 전열관 성형시 실제로는 전열관과 원자로 사이에 직사각형 단면 모양의 지지대(support)가 삽입되어야 하는바 과도한 인장하중을 줄 경우에 코일의 국부적인 변형이 일어나므로, 인장하중 없이 응력 풀림처리(stress relieving)를 활용하여 잔류응력을 제거시키는 방법을 검토해 보았다.

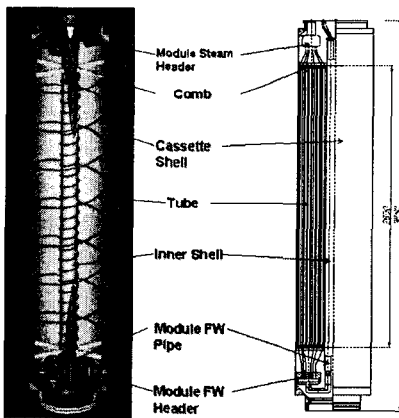


Fig. 1 SMART steam generator cassette

2. 유한요소 모델링

2.1 인장을 가한 코일링-스프링 백

유한요소해석 프로그램으로는 ABAQUS/STANDARD를 사용하였다. S4R 셀(shell)요소를 이용하여 원형 보(beam)의 굽힘 및 스프링 백을 3차원적으로 해석하였다. 작용하중은 코일 단면에 걸리는 인장응력이 항복응력에 대하여 일정 비율이 되도록 적용하였다.

(즉, $\sigma_{applied} = n\sigma_Y$, $0 < n < 1$) 이 되도록 결정) 코일의 외경은 10mm이고, 두께는 1.5mm, 벤딩 롤러의 반경은 52mm이다. 실제의 전열관 재료는 티타늄(Ti7M)이며

탄소성 해석에 필요한 재료의 기계적 성질은 다음과 같다.

- 항복강도, $\sigma_Y = 372$ MPa
- 인장강도, $\sigma_U = 510$ MPa
- 탄성계수, $E = 112$ GPa
- 푸아송비, $\nu = 0.3$

Fig. 2에 코일링 공정의 개략도를 보인다. 코일 원소재의 오른쪽 끝 부분에 인장하중을 부가할 수 있도록 하중 조건을 부여하였다. 강체로 가정할 수 있는 물러는 *RIGID SURFACE 옵션을 이용하여 강성요소로 만들었다.

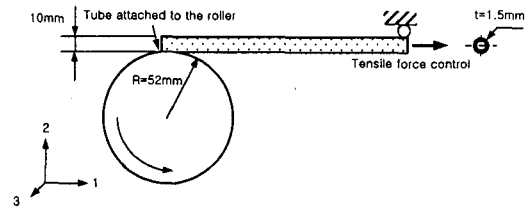


Fig. 2 Schematic of the coiling process

2.2 코일링-응력제거-스프링 백

모든 입력 조건은 앞 절과 동일하고 단지 잔류응력 제거 처리를 위한 열 해석 부분만 추가하였다. Table 1과 같이 각 온도에 따른 유효 소성변형을 - 유동응력 데이터를 이용하였다.

Table 1 Effective Plastic Strain - Flow Stress

$\bar{\epsilon}^p$	$\bar{\sigma}$ [MPa]	T [°K]
0	372	291
0.2	510	
0	186	573
0.2	235	
0	10(calculated)	973
0.2	12.6(calculated)	

그밖에 계산에 고려된 기계적 성질은 다음과 같다.

- 탄성계수: $E = 112$ GPa at 291 °K
89 GPa at 623 °K
- 푸와송비, $\nu = 0.3$
- 열팽창계수 $\alpha = 8.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{K}$ at 293 °K
 $9.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{K}$ at 623 °K

3. 결과 및 토론

3.1 인장을 가한 코일링-스프링 백

Fig. 3과 4에 코일의 왼쪽 끝 부분에 인장하중을 가하지 않을 경우와 가할 경우, 스프링 백 전, 후의 길이 방향 응력, σ_1 의 분포를 보여 준다. 스프링 백 전을 보면 인장하중을 가하지 않을 경우에는 중립축 위 부분에 인



Fig. 3(a) Longitudinal stress (σ_1) distribution without tensile pulling force before spring back



Fig. 3(b) Longitudinal stress (σ_1) distribution without tensile pulling force after spring back



Fig. 4(a) Longitudinal stress (σ_1) distribution with tensile pulling force that induces the average tensile stress equivalent to 20% of the yield stress before spring back



Fig. 4(b) Longitudinal stress (σ_1) distribution with tensile pulling force that induces the average tensile stress equivalent to 20% of the yield stress after spring back

장응력이, 아래 부분에는 압축응력이 명백히 나타나나, 코일에 작용하는 평균 인장응력이 항복응력의 20% (2.98 kN)가 되도록 인장하중을 가하면 Fig. 4(a)에 보듯이, 상부의 인장응력이 증가되고 하부의 압축응력이 줄어들게 되어 스프링 백 거동이 달라질 것임을 예측할 수

있다. 스프링 백 후를 보면 Fig. 3(b)에 비해서 Fig. 4(b)에서 잔류응력의 패턴이 바뀐 것을 볼 수 있다. Figs. 3(b)와 4(b)에서 롤러를 타고 성형이 많이 진행된 부분을 비교해 보면 인장하중을 부가하지 않았을 경우에는 중립축 위 부분에서 길이방향 응력이 더 높은 인장 값을 갖는 것으로 나타나는데, 인장하중을 가했을 경우에 이 부분의 응력이 압축으로 바뀔 수 있으며 전체적으로 인장 잔류응력이 확연히 줄어들게 됨을 관찰할 수 있다. 이러한 분포는 높은 인장 잔류응력으로 인한 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)이 일어나는 것을 피할 수 있기 때문에 유의한 것으로 볼 수 있다. 스프링 백 후의 두께도 관찰하였는데, 인장하중을 가하지 않은 경우에는 코일의 상부가 얇고 하부가 두꺼운 양식이 현저히 관찰되었으나 인장하중을 가한 경우에는 상부가 더 얇아지고 하부의 두꺼운 정도가 훨씬 줄어들게 됨을 관측할 수 있었다. 이는 너무 과도한 인장하중을 가하게 되면 코일의 최소두께가 더 줄어들게 되어 설계구속 조건을 만족시키지 못하는 수도 있음을 시사한다.

성형 후에 전열관으로서 사용할 수 있는 치수 기준은 다음과 같으며 이 세 조건을 동시에 만족시켜야 한다.

- 임의의 단면에서의 $(D_{max} - D_{min})/D_o < 8\%$
- 스프링 백 후의 반경 변화 $< 3\text{ mm}$
- 코일 벽 두께 감소율 $< 5\%$

여기서 D_{max} 은 변형 후의 최대 직경, D_{min} 은 변형 후의 최소 직경, 그리고 D_o 는 변형 전의 코일 직경이다. 이러한 기준을 염두에 두고 인장하중을 바꾸어 가며 여러 번의 계산을 수행하였다. Fig. 5에서 보듯이 단면적에 작용하는 평균응력이 항복응력의 34% (5.1 kN)가 되면 설계 기준을 만족시킬 수 있을 것으로 보인다. Fig. 5에서 보면 가한 인장하중이 항복응력의 0~60% 사이의 응력을 유발할 때, 스프링 백으로 인한 반경의 변화율이 3.2 mm~2.5 mm인데, 실제 실험에서는 7 mm~5.5 mm 정도로 좀 차이를 보였다. 이는 현장에서의 코일반경 측

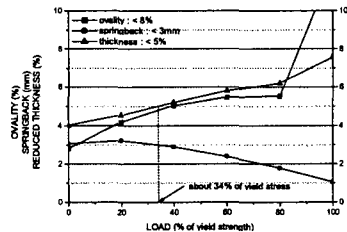


Fig. 5 Ovality, radius change, and thickness changes after spring back under various tensile pulling force

정 위치에 따른 오차 때문에 기인한 것으로 보였다. 동일한 인장하중 범위에서, 기하학적 왜곡도가 2.8 %~5.6 %인데, 비록 측정 위치는 정확히 같지는 않지만, 실제 실험에서도, 1 %~5 % 정도로 유사한 패턴을 보였다.

3.2 코일링-응력제거-스프링 백

지금까지는 롤러가 원통형인 것으로 가정하였으나, 실제로는 전열관과 원자로 사이에 너비 10mm 정도의 지지대(support)를 놓고 감게되므로 과도한 인장력을 가하면 국부적인 변형으로 인해 원하는 치수를 얻기 힘들다.

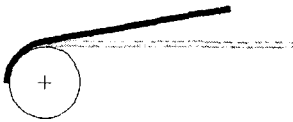


Fig. 6(a) Post-forming deformation without stress relieving. Tensile force was not applied



Fig. 6(b) Post-forming deformation with stress relieving. Tensile force was not applied

따라서, 인장력을 가하지 않고 열처리를 활용한 응력제거(stress relieving)를 적용해보기 위하여 이를 FEM으로 시뮬레이션 해보았다. 계산 순서는 이전과 동일하되, 인장하중을 가하는 단계를 없앴고, 성형 후에 그 모양을 그대로 유지한 채로 변태점을 넘지 않도록 700 °C에서 1시간 유지시킨 후, 7시간 동안 서냉하였다. 온도에 따른 응력-변형을 관계는 2.2절에 수록하였다. Fig. 6(a)와 (b)에 인장하중을 주지 않고 응력제거를 하지 않은 경우와, 응력제거를 수행한 경우에서의 결과를 각각 보여주고 있

다. 그림에서 보듯이 응력제거를 거친 후에는 스프링 백이 거의 사라짐을 예측할 수 있다. 실제 프로토타입 실험에서도 응력제거 후의 스프링 백은 0.8 %~1.2 %로 측정되었다.

4. 결론

FEM을 이용하여 스프링 백의 제어를 위한 가공데이터를 획득하고 스프링 백 저감의 방법을 연구하였다. 간략히 연구 결과를 요약한다면 다음과 같다.

- (1) 스프링 백을 감소시켜 주어진 설계 구속조건에 맞출 수 있는 적절한 인장하중을 찾았다. 주어진 설계 조건을 만족시키는 인장하중은 단면적에 걸리는 평균응력이 항복응력의 34 %이 될 때인 5.1 kN임을 예측하였다.
- (2) 인장하중을 가하지 않고 스프링 백을 줄일 수 있는 방법을 모색하기 위하여 응력제거를 추가적으로 고려하였다. 이 경우, 스프링 백이 상당히 감소됨을 예측하였으며 따라서, 주어진 설계 구속조건에서는 이 방법이 더 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 김용완, 김종인, 김동욱, 허형, 김지호, 박진석, 장문희, 1999, "SMART 증기발생기의 나선형 전열관을 감을 때 발생하는 스프링 백 해석," KAERI/ TR-1406/99, 한국원자력연구소.
- (2) Hosford, William F. and Caddell, Robert M., 1983, "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy," Prentice-Hal, pp. 250~256.