

한국표준형원전 증기발생기 전열관 확관부위의 응력해석

김용규[†] · 송명호* · 유완**

홍익대학교 금속공학과, *한국원자력안전기술원, **한국전력기술(주)

(2013년 2월 4일 접수, 2013년 6월 10일 수정, 2013년 6월 10일 채택)

Stress Analysis of Expansion Transition Area in Steam Generator Tube of Optimized Power Reactor-1000

Young Kyu Kim · Myung Ho Song* · One Yoo**

Hongik University, *Korea Institute of Nuclear Safety, **KEPCO E&C

(Received 4 February 2013, Revised 10 June 2013, Accepted 10 June 2013)

요 약

한국표준형원전(OPR-1000)의 증기발생기 전열관은 관재료로 Alloy 600과 Alloy 690이 사용되고 있으며 전열관 확관방법은 폭발확관법이 적용되었다. 원전 운전경험에 따르면 전열관 확관법으로 폭발확관법이 사용된 증기발생기의 전열관들은 원주방향 균열이 잘 발생하였으며 그 위치는 전열관의 확관천이부위 외면이었고 슬러지에 의해 둘러싸인 지역이었다. 그러나 같은 조건의 전열관이라도 수압확관법이 적용된 경우는 원주방향 균열보다는 축방향 균열이 우세한 경향을 보여왔다. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 차이를 규명하기 위하여 전열관과 관관의 형상을 모델링하였으며 확관법에 따라 운전중 조건에서 전열관의 확관천이 부위에 작용하는 응력의 크기를 전산프로그램을 사용하여 계산하였고, 균열의 방향성과 우세성을 평가하였다.

주요어 : 증기발생기 전열관, 응력해석, 폭발확관법, 수압확관, 확관부위, 잔류응력, 전산모델

Abstract - The steam generators of OPR-1000 plants have Alloy 600 and Alloy 690 as the tube material and its tube expansion method is the explosive expansion method. According to the experience of these plants, circumferential cracks were largely occurred in steam generator tubes expanded by the explosive expansion method and their locations were the outer surface of tube expansion transition region surrounding with piled-up sludge. But even though tubes have the same conditions, tubes with the hydraulic expansion method shows the prevail trend of axial cracks compared to circumferential cracks. Therefore in this study, in order to identify the difference of such phenomena as above, configurations of tube and tubesheet were modeled and at operating conditions, stress values applied in the tube expansion transition area in accordance with tube expansion methods were calculated by using computational program and the direction and the predominance of cracks were evaluated.

Key words : Steam Generator Tube, Stress Analysis, Explosive Expansion, Hydraulic Expansion, Expansion Transition Area, Residual Stress, Computational Modelling

[†]To whom corresponding should be addressed.
2639 Sejongro Jochiwon-eup, Sejong-city, South Korea 339-701
Tel : 044-860-2594 E-mail: kyu@hongik.ac.kr

1. 서 론

원자력발전소에 사용되는 증기발생기의 제작 시 전열관을 관관에 고착시키기 위해 용접 및 확관과정을 거치게 된다. 관관(tubesheet)에 가공된 구멍에 전열관을 확관시키는 방법으로는 대표적으로 기계식확관(rolling expansion), 폭발확관(explosive expansion) 그리고 수압확관(hydraulic expansion)이 있으며 한국표준형원전에서는 폭발확관이 사용되었다[1]. Fig. 1은 확관된 전열관의 확관부위, 확관천이부위 그리고 미확관부위를 도식화한 것이다. 폭발확관된 한국표준형 원전의 증기발생기 전열관은 가동 초기에 확관천이부위에서 균열이 다수 발생하였으며, 특히 원주방향 균열은 전열관의 건전성을 위협하는 주요 결함이였다. 그에 반해 가동기간이 훨씬 길며 수압확관이 적용된 F형 증기발생기의 전열관들은 상대적으로 균열결함이 적게 발생하는 경향을 가졌다[2]. 따라서 전열관에 작용하는 잔류응력과 가동중에 영향을 미치는 인가응력(applied stress)의 합이 전열관의 균열발생에 영향을 미치는 인자이며 그 중 잔류응력의 방향 및 크기가 균열의 특성을 결정짓는 주요 변수라 생각된다. 증기발생기 전열관의 잔류응력을 측정하는 방법은 제작 시의 확관공정에 따라 전열관을 확관한 후 관관을 제거하고 전열관 내외면의 잔류응력을 스트레인게이지 또는 X-선 회절측정기 등을 사용하여 측정하거나 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS 또는 ANSYS와 같은 컴퓨터 프로그램을 사용하여 계산하게 된다. 본 연구는 선행 연구로 수행되었던 한국표준형원전의 증기발생기 전열관의 확관방법이 확관부위의 잔류응력에 미치는 영향의 결과[3]을 토대로 전열관의 확관상태를 2차원 및 3차원으로 모델화하고 폭발확관 및 수압확관의 두 가지 확관방법에 따라 전열관 확관부위에 잔류하는 응력의 크기를 전산해석하였다.

1-1. 수압확관 전열관의 잔류응력 모델링

ABAQUS 전산프로그램을 사용하여 수압확관된 전열관의 잔류응력 해석을 2차원 및 3차원 모델에 대해 수행하였으며 2차원 축대칭 모델이 2차원 모델에서의 해석을 간단히 하기 위하여 사용되었다. 해석에 사용된 4가지의 모델들은 ① 2차원 평면응력 모델, ② 2차원 관관등가두께 모델, ③ 2차원 축대칭 모델

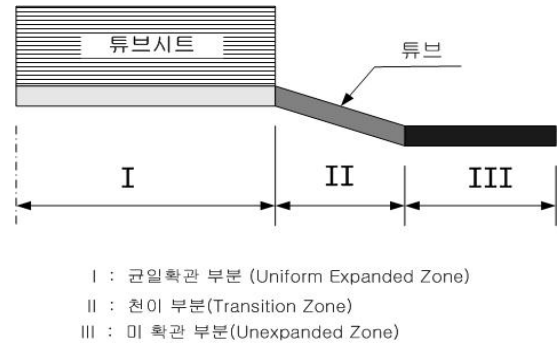


Fig. 1. Schematic drawing of tube/tube-sheet expansion area.

그리고 ④ 3차원 모델이다[4].

첫째, 평면응력 해석 모델은 전열관의 균일확관영역에 대한 해석에 사용되었는데 해석 모델과 경계조건은 Fig. 2와 같다. 전열관 배열의 기하학적 대칭성을 고려하여 전열관 배열의 1/12(즉, 30°)로 모델링하였고, 0° 평면 및 30° 평면에서의 원주방향 변위를 구속하였다. 관관의 바깥거리는 2.64 inch로 확관압력의 영향이 미치는 최대 길이로 설정하였다. 평면응력 상태로 가정하여 해석을 수행하였으며, 사용한 요소는 CPS4(4-node bilinear) 이다.

둘째, 등가두께 모델은 2차원 해석을 간단히 하기 위해 관관을 관관의 강성을 가장 잘 묘사하는 유사 원통으로 모델링하여 사용하였다. Fig. 3은 등가두께를 가지는 등가두께 평면응력 모델로서 적용요소의 종류는 평면응력모델과 동일하다. 등가두께는 0.360 inch 이다.

셋째, 축대칭 모델은 관관 등가두께 모델에서 구한 등가관 두께를 이용하여 작성하였다. Fig. 4는 2차원 축대칭 모델 및 경계조건을 보여준다. 모델에 사용된 요소는 CAX4(4-node bilinear)이며, 전열관의 굽힘을 잘 묘사하기 위하여 부조화 모드 (incompatibles mode) 요소를 사용하였다. 축대칭 모델의 하단 경계조건은 수평으로만 움직일 수 있도록 제한을 가하였으며 확관 시 확관량의 변화가 예상되는 부분은 작은 요소를 사용하여 잔류응력 해석의 정확도를 높였다.

넷째, 3차원 모델로 실제 전열관 및 관관을 묘사하였으며, Fig. 5는 3차원 모델을 보여준다. 전열관 배열의 대칭성을 고려하여 1/12로 모델링하였고, 원주방향 변위를 구속하였다. 모델에 사용된 요소는

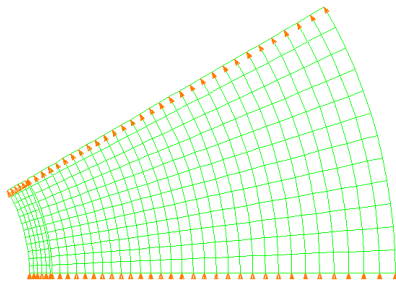


Fig. 2. Plane stress model.

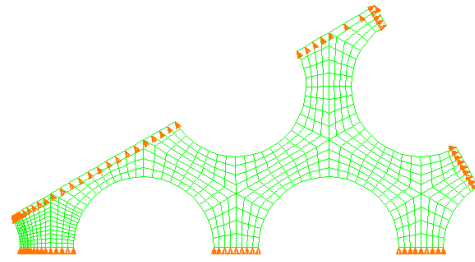


Fig. 3. Equivalent thickness model.

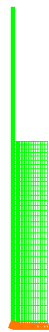


Fig. 4. Axis symmetry model.

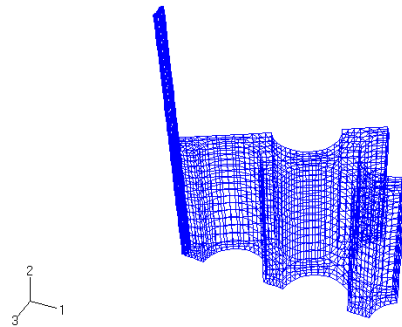


Fig. 5. 3-dimensional model.

C3D8 (8-node linear brick)이며, 전열관은 굽힘을 잘 묘사하기 위하여 부조화 모드 요소를 사용하였다. 환관 압력은 36,200 psi를 사용하여, 모델의 하단에서 환관 상단아래 0.118 inch까지 적용하여 해석을 수행하였다. 환관과 전열관사이의 접촉은 무한 미끄러짐 (infinite sliding)으로 가정하여 마찰계수로 0을 적용하였다.

1-2. 폭발환관 전열관의 잔류응력 모델링

등가두께를 사용한 환관 두께를 이용하여 축대칭 모델을 작성하였다. 이때의 등가두께는 수압환관과 동일하게 0.36 inch를 적용하였다. 또한 폭발환관은 여러 개의 전열관을 동시에 환관시키므로 환관되는 전열관 사이의 대칭성을 고려하여 환관 반경방향으로의 변위를 구속하였다. Fig. 6는 폭발환관용 2차원 축대칭 모델을 보여준다. 모델에는 폭약, 전열관 및 환관이 포함되었으며, 사용된 요소는 CAX4R(4-node bilinear)이다. 축대칭 모델의 전열관과 튜브시트 하단

경계조건은 수평으로만 움직일 수 있도록 제한을 가하였다. 폭약은 폭발시 급격히 변형되므로 Adaptive Meshing방법을 적용하였다[5].

1-3. 전열관 재료의 특성

사용된 환관 및 전열관 재료는 각각 SA508 Class 3 및 Alloy 600으로, 해석에는 Fig. 7에 표시한 응력-변형률 곡선을 변환하여 사용하였다[6].

이와 함께 폭발환관의 경우는 전열관의 변형률 경화 거동과 변형률속도 경화 거동을 고려하는 구성 방정식으로서 변형률(strain rate) 효과를 미반영한 Johnson-Cook 모델을 적용하였고[7], 폭약 특성을 해석에 고려하기 위해서 JWL 상태방정식 (Jones-Wilkins-Lee Equation of State)을 사용하였다 [8]. 폭발환관의 특징인 완충제에 대해서는 물성치에 대한 정보가 없어 해석대상에서 고려하지 않았다.

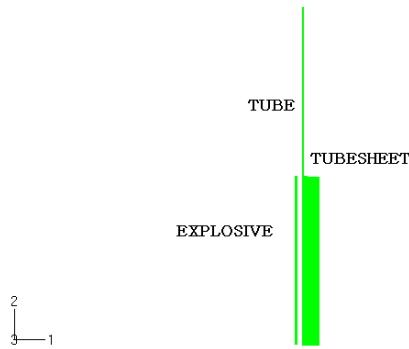


Fig. 6. 2-dimensional axis symmetry model of a tube expanded explosively.

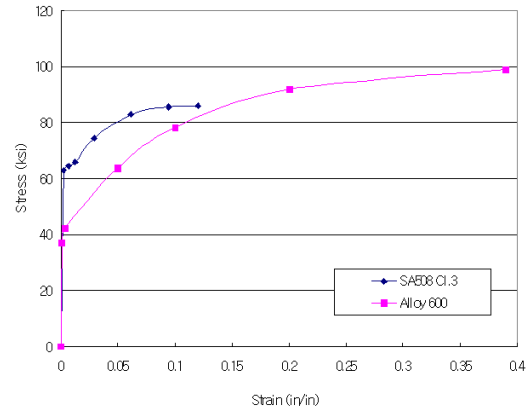


Fig. 7. Stress-strain curve of tube-sheet(SA508 Cl.3) and tube(Alloy 600).

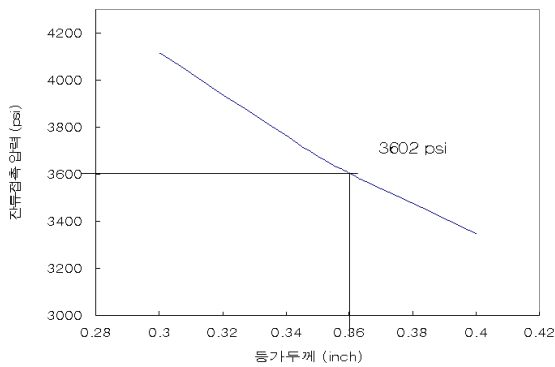


Fig. 8. Changes of residual contacting stresses with increases of equivalent thickness.

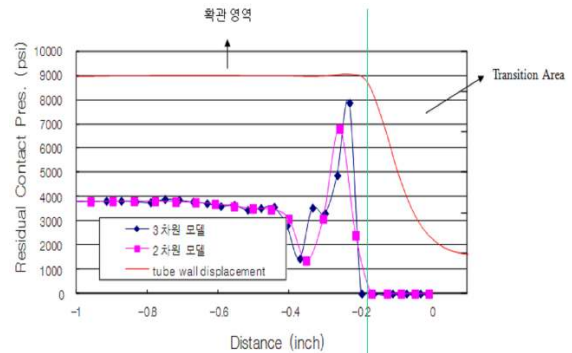


Fig. 9. Comparisons of contacting stresses in case of hydraulic expansion.

2. 잔류응력 및 운전응력 해석결과

2-1. 수압확관

2-1-1. 등가두께 결정

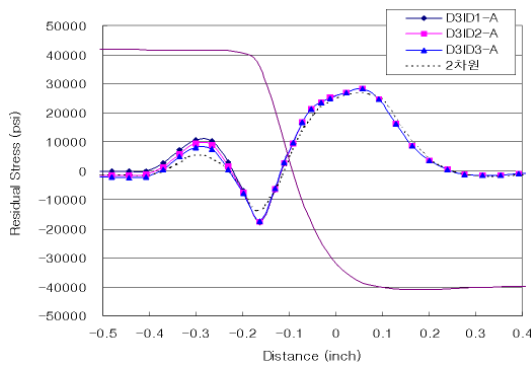
Fig. 2의 평면응력 모델을 이용하여 구한 평균접촉 응력을 사용하여 Fig. 3의 모델로부터 수압확관 시의 관관의 등가두께를 구하였다. Fig. 8은 등가두께별로 구한 잔류접촉응력을 그래프에 나타낸 것으로 계산된 등가두께는 0.360 inch 이었다. Fig. 9는 등가두께의 타당성을 보기위해 3차원 해석결과와 비교한 것이다. 접촉압력이 평평한 값을 나타내는 부위에서 접촉압력은 3,600 psi와 3,700 psi사이의 값으로 평면응력 모델에서 구한 값과 유사함을 알 수 있다.

2-1-2. 전열관 확관천이 부위의 잔류응력

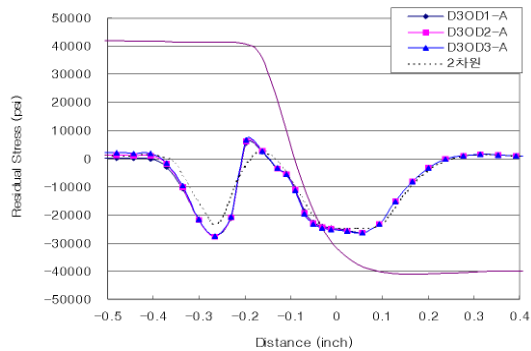
확관천이 부위에서의 잔류응력을 2차원 및 3차원 모델에서 해석하였다. 그림 9 및 10은 전열관의 축방향 및 원주방향 잔류응력 변화를 나타낸다. 이때 2차원 축방향 모델은 관관의 정확한 거동을 모사하기 위해 보수적으로 등가두께 0.65 inch를 이용하였다. 2차원 및 3차원 모델의 해석결과는 축방향 및 원주방향 모두 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 최대 잔류인장응력은 천이구역의 확관천이 종료부에서 발생한다. 전열관 내면에서 축방향의 최대인장응력은 28,300 psi이고 원주방향에서는 21,400 psi로 계산되어, 축방향 응력이 원주방향 응력보다 32% 더 높았다. 외면에서는 최대인장잔류응력이 내면과 비교 시 크지 않으므로 내면보다 덜 중요하다.

2-1-3. 실험값과의 비교

수압확관의 잔류응력에 대한 측정은 프라마툼, 웨

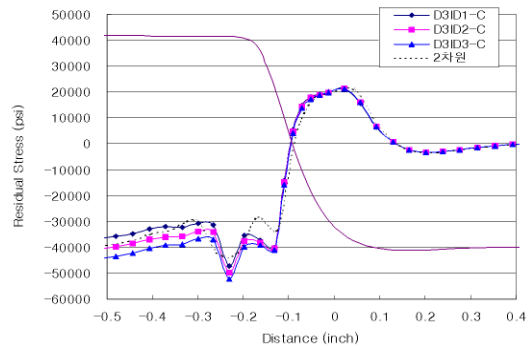


(a) inner surface

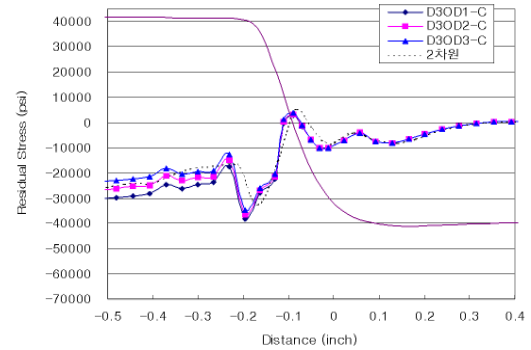


(b) outer surface

Fig. 10. Comparisons of ABAQUS 2-dimensional and 3-dimensional model(axial direction)



(a) inner surface



(b) outer surface

Fig. 11. Comparisons of ABAQUS 2-dimensional and 3-dimensional model(circumferential direction)

스팅하우스 및 도미니온 엔지니어링에서 측정된 바 있다[9]. 측정된 내면 축방향의 응력은 35, 38, 41 ksi, 원주방향의 응력은 28, 30, 38 ksi로 축방향의 응력이 더 큰 것으로 보고된 바 있어 Fig. 12의 해석을 통한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 13은 측정된 외면 잔류응력과 해석의 결과를 비교한 것으로 축방향의 경우 잔류응력의 형상과 잔류응력의 크기에서 매우 흡사하였다.

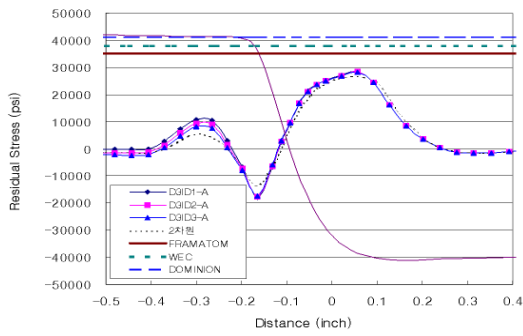
2-1-4. 운전압력을 고려한 전열관 확관부 및 천이부 응력

발전소는 정상운전 시 증기발생기 1차측 압력 2,250 psi 및 2차측 압력 1,180 psi의 내압을 갖는다 [10]. 이 압력을 전열관에 적용하여 정상운전 시의 전열관 확관부 및 천이부의 잔류응력변화를 계산하였다. Fig. 14는 가동압력이 적용된 축방향응력을 나타내고 있으며 최대 인장응력이 잔류응력 대비 16% 증가하였다. Fig. 15는 가동압력이 적용된 원주방향응

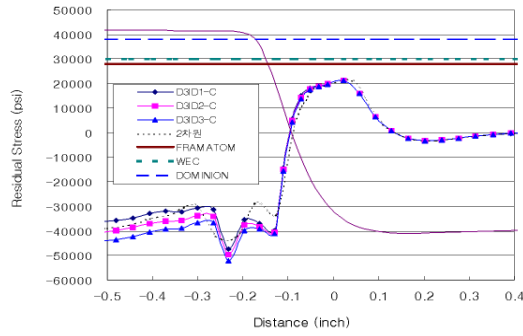
Table 1. Total stresses at the expanded and transition area of hydraulic expanded tube before and after the operating pressure is considered.

응력 조건	위치, in		응력크기, ksi		
	확관 +운전	수압	확관 +운전	수압	
내면	축방향	0.0435	0.0435	31.7	27.5
	원주방향	0.0435	0.0435	31.3	20.6
외면	축방향	-0.17	-0.181	7.0	4.2
	원주방향	-0.087	-0.087	15.1	5.4

력을 나타내며, 최대 인장응력은 잔류응력 대비 51% 증가하였다. 따라서 가동최대인장응력은 잔류응력의 경우와는 달리 내면의 경우 원주방향 응력이 축방향 응력과 거의 같아지며 외면의 경우는 원주방향 응력이 더 커짐을 알 수 있다. Table 1에 운전압력을 고려한 전열관 확관부 및 천이부의 발생응력을 정리하였다.

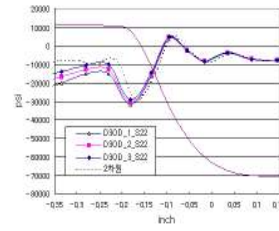


(a) Axial inner surface residual stresses

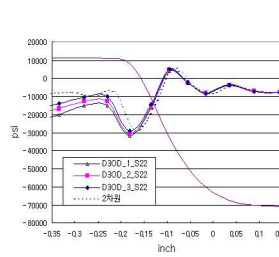


(b) Circumferential inner surface residual stresses

Fig. 12. Comparison of results between measuring and analysis modelling for inner surface residual stresses.

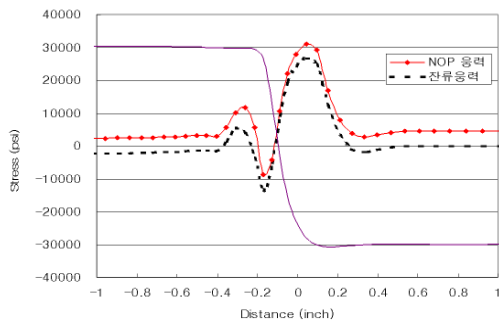


(a) Axial outer surface residual stresses

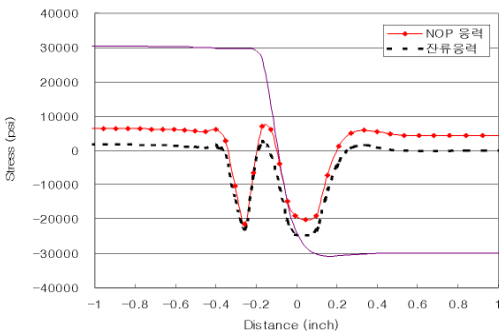


(b) Circumferential outer surface residual stresses

Fig. 13. Comparison of results between measuring and analysis modelling for outer surface residual stresses.

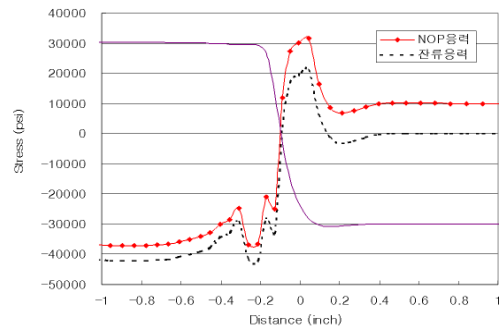


(a) inner surface

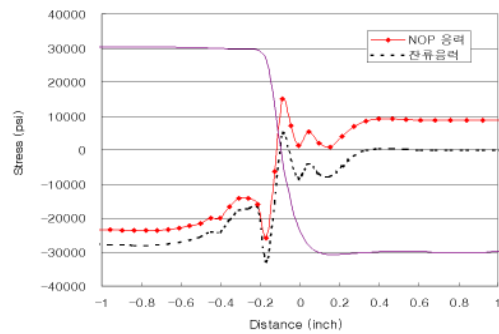


(b) outer surface

Fig. 14. Total axial stresses before and after the operating pressure is considered.

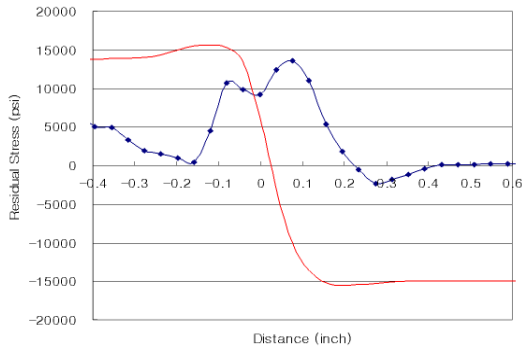


(a) inner surface

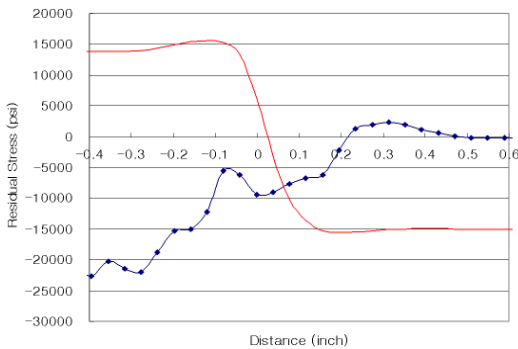


(b) outer surface

Fig. 15. Total circumferential stresses before and after the operating pressure is considered.

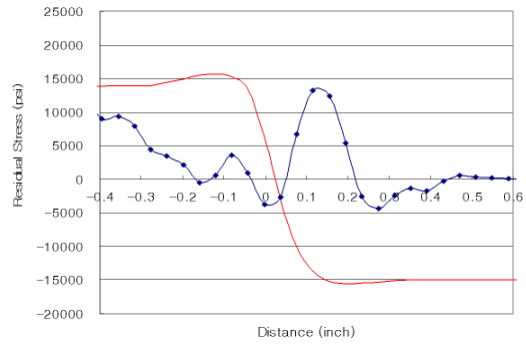


(a) inner surface

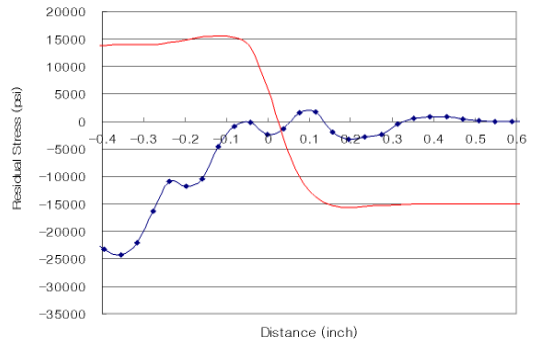


(b) ouer surface

Fig. 16. Axial residual stresses of the explosive-expanded tube



(a) inner surface



(b) outer surface

Fig. 17. Circumferential residual stresses of the explosive expanded tube

Table 2. Comparisons of FEM analysis results for the hydraulic expanded tube and the explosive expanded tube.

응력 조건	위치, in		응력크기, ksi		
	폭발 확관	수압 확관	폭발 확관	수압 확관	
내면	축방향	0.076	0.0435	13.7	27.5
	원주방향	0.12	0.0435	13.2	20.6
외면	축방향	0.313	-0.181	2.4	4.2
	원주방향	0.12	-0.087	1.7	5.4

2-2. 폭발확관

폭발확관의 경우, 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력을 Fig. 16과 17에 각각 나타내었다. 유한요소 해석 방법에 의한 해석결과, 전열관 내면에서 축방향의 최대인장응력은 관관 상단 0.076 inch에서 13,600 psi이고 원주방향에서는 관관 상단 0.12 inch에서 13,200 psi로 계산되었다. 외면의 경우 축방향 최대응

력은 관관 상단 0.313 inch에서 2,400 psi, 원주방향 최대응력은 관관 상단 0.12 inch에서 1,700 psi 이었다. 폭발확관은 특성상 확관력이 전열관 내벽을 따라 관관 전장에 대해 파동형으로 진행한다고 예상되며 이에 대한 모사가 용이하지 않았다. 따라서 폭발확관 시의 응력해석에는 불확실성이 존재하고 최대응력의 절대치는 수압확관에 비해 작게 계산되었으나 응력의 발생 경향은 유사하였다. 폭발확관의 응력발생 경향이 수압확관의 경우와 크게 차이나지 않음에도 불구하고, 결함발생이력에 따르면 확관천이부위 외면에 원주방향 균열이 우세하였다는 점에서 폭발확관의 결함발생은 본 연구에서 고려하고 있는 단순가정 확관에 의해 모델링된 수압확관과는 다른 형상의 확관부와 천이부가 생성되었을 가능성 및 그에 따른 응력이 크게 영향을 주고 있을 것으로 판단된다. 한 예로써 한국원자력연구소에 의해 확인된 한 한국표준형 원전의 증기발생기 전열관들의 편심확관 형상과 균열발생 전열관들은 모두 균열발생 부위에 덴트(dent)를 가지고 있었다는 사실을 들 수 있다 [11].

2-3. 수압확관과 폭발확관 전열관의 잔류응력간 비교

Table 2는 수압확관과 폭발확관 시 전열관에 발생하는 잔류응력들에 대한 유한요소 해석결과를 정리한 것이다. Table 2로부터 수압확관의 잔류응력이 폭발확관보다 더 크게 계산되었다. 그러나 폭발확관의 경우에도 수압확관의 경우에서와 같이 축방향 응력이 원주방향 응력보다 약간 더 높은 것으로 평가되었고 Fig. 10 및 11과 Fig. 16 및 17로부터 전반적인 잔류응력의 분포형상은 수압확관과 폭발확관 사이에서 유사함을 알 수 있었다.

3. 결론

수압확관된 전열관과 폭발확관된 전열관의 확관천이 부위에서의 잔류응력에 대한 유한요소 해석결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 가. 잔류응력은 대체로 외면에 비해 내면이 더 큰 것으로 나타났다.
- 나. 수압확관의 경우, 잔류응력은 내면에서 축방향이 더 크나 내압을 가하면 축방향 및 원주방향의 응력이 거의 동일해진다. 반면에 외면에서는 원주방향 응력이 축방향 응력보다 더 크게 나타났다. 따라서 원주방향 2차측 응력부식균열의 발생 가능성은 낮은 것으로 판단된다.
- 다. 폭발확관의 경우, 잔류응력은 내압을 가하지 않는 경우에 축방향과 원주방향에서 유사하였으나 축방향의 잔류응력이 약간 더 큰 것으로 평가된다.
- 라. 폭발확관 전열관에서 발생한 균열의 특징을 고려할 때, 단순가정 확관에 의해 모델링된 수압확관 시와는 다른 형상의 확관천이부가 생성되었을 가능성과 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

후기

이 논문은 2013학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. 홍준화, 원자력재료, 한스하우스, 2012, 524-527
2. 한국원자력안전기술원, 원전 증기발생기의 안전규제 기술보고서(II), KINS/AR-669. Vol.2, 2004, 184-189
3. 김용규, 송명호, 원전 증기발생기 전열관 확관법이 확관부위 잔류응력에 미치는 영향, 에너지공학, 제 21권 제4호, 2012, 362-372
4. ABAQUS/Standard Version 6.6, ABAQUS/CAE User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc. 2006
5. ibid, ABAQUS Analysis User's Manual, Section 12.2, ALE Adaptive Meshing, 2006
6. KEPCO-E&C, Internal Data-base, 2001
7. ABAQUS/Standard Version 6.6, ABAQUS Analysis User's Manual, Section 18.2.7, Johnson-Cook Plasticity, 2006
8. B. M. Dobratz and P. C. Crawford, LLNL Explosives Handbook, 1985, 8-21
9. R.S. Pathania and D. Lim, Stress Corrosion Cracking of Expanded Tube-to-Tubesheet Joints in Steam Generators, Proceedings of the International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, 1983, Paper #45
10. 울진 3,4호기 증기발생기 설계시방서, N0291-ME-DS265-00, Rev. 06, 1999
11. 한정호 등, 영광4호기 증기발생기 전열관 인출검사 및 분석, KAERI/CR-168, 한국원자력연구소, 2003, 8-16