

나선형 증기발생기 전열관집합체 제작기술 개발

Development of Manufacturing Technology for the Tube Assembly of Helical Steam Generator

김충관, 임병훈
현대티타늄(주)

김용완, 김종인
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

일체형원자로 SMART에 내장되는 증기발생기는 관류식 나선형 증기발생기로서 전열관을 감는 방법이 핵심기술이다. 본 연구에서는 나선형 증기발생기에서 전열관을 효율적으로 감을 수 있는 장비를 자체 설계 개발하였다. 장비는 맨드릴을 회전시키는 모터와 감기는 전열관을 볼스크류로 이송하는 두 개의 모터로 구동되도록 설계하였다. 스테인리스 전열관으로 Mock-up을 제작해봄으로써 전열관을 감는 과정에서 필연적으로 발생하는 스프링백 현상을 효율적으로 제어하고, 전열관과 전열관 사이의 피치를 정확히 유지하기 위한 다양한 방법이 연구되었다. 또한, 전열관을 감았을 때 ASME에서 요구하는 진원도를 유지하고 전열관의 두께감소가 5%이내에 포함될 수 있도록 제작과정을 최적화하였다. CATIA를 사용하여 컴퓨터 상에서 전열관을 감아 봄으로써 실제 제작 과정에서 발생할 수 있는 간섭문제가 많이 해결되었다. 몇 차례의 시행착오와 함께 국내기술로 나선형증기발생기 제작에 필요한 코일링 기술을 확보하였다.

Abstract

Coiling of the tube is the core technology in the manufacturing process of the helical steam generator. An equipment to coil the tube bundle of the helical steam generator was developed. The equipment has two motors; one to rotate the mandrel and the other to rotate the screw which translates the tube. Diverse investigations have been performed in order to control the amount of the spring back and to maintain the tube axial pitch. Also, the coiling process has been optimized to minimize the ovality and the thickness reduction of the tube. A virtual coiling in the computer using CATIA has reduced a lot of interference problem that might appear in the real coiling process. After several trials and errors, the coiling technology for the manufacturing of helical steam generator was developed.

1. 서론

일체형원자로 SMART의 증기발생기는 원자로가 운전될 때는 노심에서 발생한 열을 일차 냉각수로부터 전달받아 고온고압의 증기를 생산하고, 냉각 시에는 일차측의 열을 제거하는 역할을 한다. 관류식 나선형 증기발생기에서는 전열관이 나선형으로 감겨 각각의 모듈급수 및 증기헤더로 나뉘어진다[1, 2]. 전열관은 내식성이 높은 티타늄 합금을 사용하며, 필요한 전열면적을 얻기 위하여 축방향 및 반경방향 피치를 유지하여야 한다. 전열관 배열은 최대한 밀집되고 각 전열관의 길이 차이가 $\pm 15\%$ 이내에 포함되어야 하므로, 반경방향의 각 열에서 전열관의 수를 달리하여 전열관 배열을 설계하였다.

실제 제작을 하기 위하여 각각의 모듈헤더에 각 열별로 균등하게 전열관을 배치하고, 동일한 모듈급수헤더에서 나온 전열관은 동일한 모듈증기헤더와 연결되도록 하였다. 각 전열관간의 간섭을 피하고, 전열관의 축방향 및 반경방향 피치, 전열면적 등 해당 조건을 만족하도록 상용 CAE 프로그램인 CATIA를 이용하여 3차원으로 모델링하였다. 이 모델링으로부터 실제 제작에 필요한 값들을 도출해 내었다.

전열관 코일링 장비는 전열관을 감기 위해 맨드릴을 회전시키는 모터와 감기는 전열관을 볼스크류로 이송하는 두 개의 모터로 구동되도록 장치를 설계 제작하였다. 전열관의 축방향 피치를 유지하기 위하여 주축과 이송축의 회전속도를 제어할 수 있는 별도의 컨트롤러를 설치하였다. 전열관의 축 및 반경방향 피치를 유지하기 위하여 전열관 지지대, 감은 전열관을 모듈증기헤더에 끼워서 고정하기 위해 전열관을 고정하기 위한 치구 등 여러 기구를 제작하였다. 이를 이용하여 설계 요건대로 전열관을 모두 감아 스테인리스 관으로 전열관 집합체 Mock-up 제작을 해봄으로써 제작변수를 결정하였다.

2. 제작 장치 및 장비

증기발생기 카세트 및 한 모듈에 해당하는 전열관 집합체는 그림 1과 같다. 증기발생기에는 모듈급수헤더와 모듈증기헤더가 있다. 그림 1에서 보듯이 한 모듈증기헤더에서 나온 모든 전열관은 동일한 모듈증기헤더로 연결된다. 증기발생기 제작 중에서 전열관을 감는 것은 증기발생기의 성능을 좌우하기 때문에 상당히 중요한 핵심기술이다.

증기발생기 전열관 집합체를 그림 1과 같이 제작하기 위하여 그림 2와 같은 전열관 코일링 장비를 설계, 제작하였다. 맨드릴을 회전시키는 모터와 감기는 전열관을 볼스크류로 이송하는 두 개의 모터로 구동되도록 설계하였다. 주축에는 내통이 설치되고, 이송대에는 전열관을 적당한 인장력으로 잡아주는 장치가 장착되어 있다. 이송대를 이동시키는 모터와 주축을 회전시키는 모터가 각각의 인버터에 의해 제어되도록 하였고, 전열관의 축방향 피치를 유지하기 위하여 이송대의 이동속도를 주축의 회전속도에 대해 제어하도록 컨트롤러를 설치하였다. 주축과 이송대 부분에서 나선각도로 감김이 시작되는 지점과 마무리되는 지점에는 베드 하단에 빔 센서를 장착하여 균일한 간격 조정이 가능하도록 설계, 제작하였다. 이 모든 것이 제어가 가능하도록 별도의 컨트롤 상자를 부착하여 인버터 및 기타 기어가 장착된 모터를 제어한다. 주축의 반대쪽 심압대 역할을 해주는 중앙의 고정치구에 안내 레일을 좌, 우 2 열로 장착하였다. 내통상단이 이송대와 동일한 위치가 되도록 높이 조절이 가능한 형태로 설계, 제작하였다.

모듈급수헤더 및 모듈증기헤더는 전열관을 감은 후에 열처리를 하고 나서 각 전열관과 튜브시트, 튜브시트와 덮개를 용접하기 때문에 전열관을 감기 위해서 별도의 모듈급수헤더 및 증기헤더 튜브시트 치구를 제작하여 코일링 장비에 설치하였다. 그림 3과 같이 모듈급수헤더 튜브시트 치구는 Round Bar에 모듈급수헤더와 같은 위치에 구멍 가공하였고, 모듈증기헤더 튜브시트 치구는

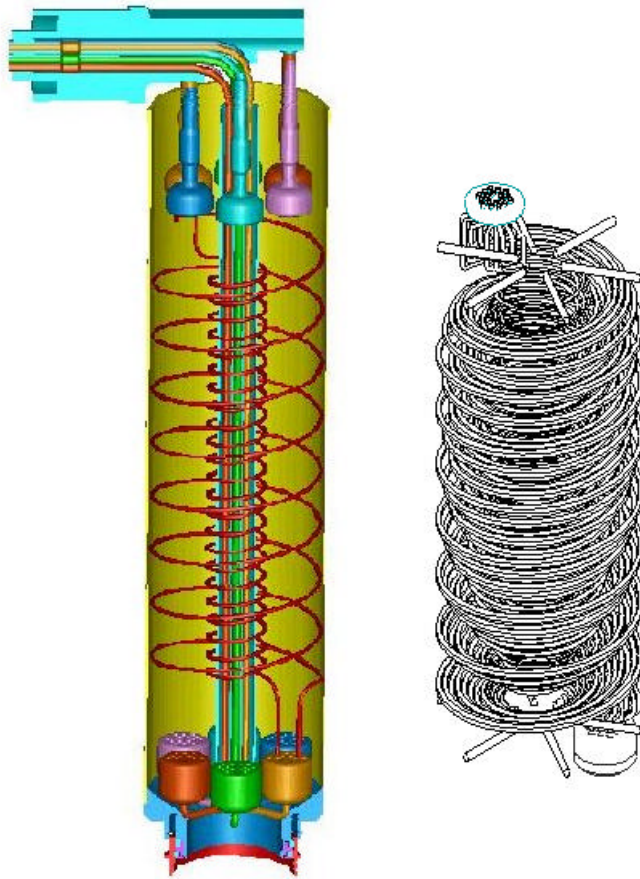


그림 1. 증기발생기 및 전열관 집합체

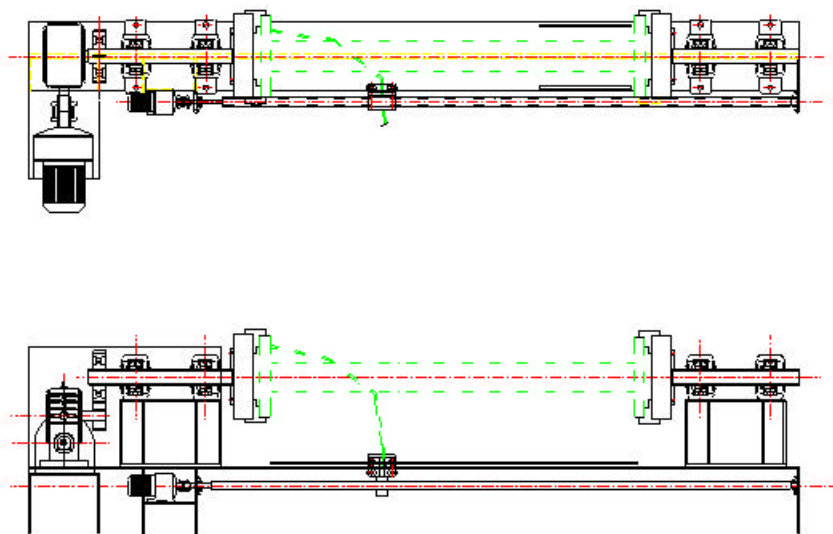


그림 2. 전열관 코일링 장비

각 전열관을 감은 후 매번 고정해야 하기 때문에 모듈증기헤더 튜브시트 치구를 레고 형식으로 제작하였다.

전열관을 감을 때 튜브시트 치구에서 나선형으로 감기는 부분까지 평행부가 존재한다. 전열관이 감기면서 이 평행부에 모멘트가 작용하여 휘어지는 현상이 발생한다. 이것을 방지하기 위하여 그림 4와 같이 평행부에 치구를 설치하였다. 전열관을 감은 후 다음 전열관을 감기 위하여 증기헤더 튜브시트 치구에 감은 전열관을 고정해야 한다. 전열관을 감을 때 전열관을 잡고 있던 이송대의 치구를 풀어야 하는 데 전열관이 감김으로 인해 큰 잔류응력이 발생한다. 이 잔류응력으로 인해 스프링백 현상이 발생하기 때문에 이를 방지하기 위하여 그림 4와 같이 이송대의 치구를 풀기 전에 나선형으로 감긴 전열관의 마지막 부분을 고정할 수 있는 치구를 제작하였다.

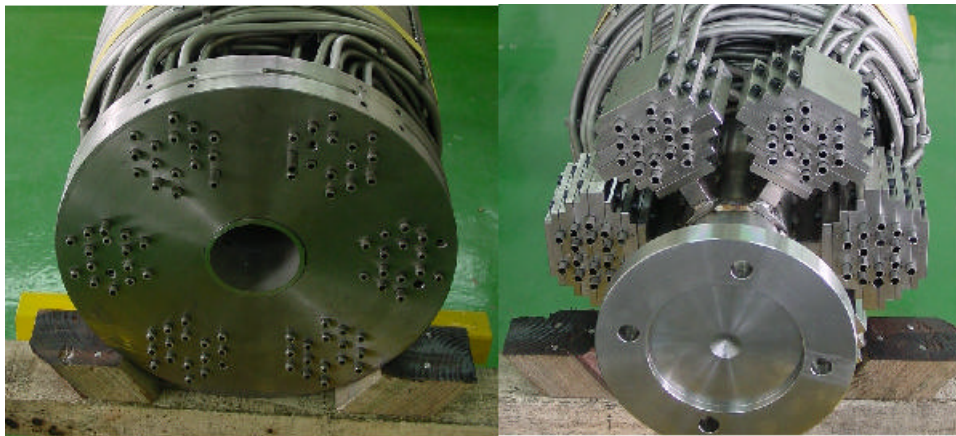


그림 3. 모듈급수헤더 및 증기헤더 튜브시트 치구

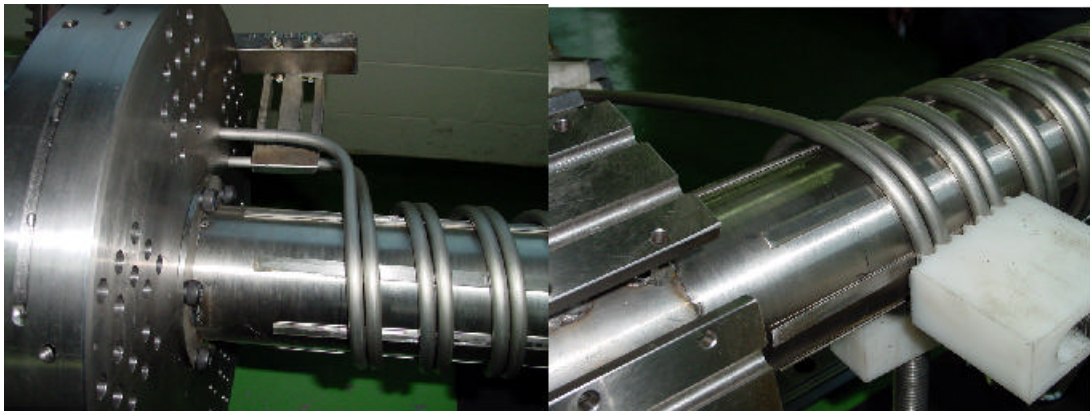


그림 4. 전열관 고정 치구(시작과 마무리)

전열관의 축방향 피치와 반경방향 피치를 유지하고, 일차측 냉각재의 유로면적을 유지하기 위하여 전열관 지지대를 사용한다. 축방향 및 반경방향 피치를 유지하기 위하여 그림 4와 같은 전열관 지지대를 제작하여 사용했다. 1열의 경우엔 전열관 지지대를 카세트 내통에 용접 후 전열관을 감았고, 2열 이후에는 전열관 지지대를 앞 열의 전열관에 끼워서 감았다. 최외각 지지대는 마지막 열의 전열관에 끼우고, 카세트 외통과 밀착하게 된다. 전열관 지지대의 형상 및 설치 방법은 그림 5와 같다.

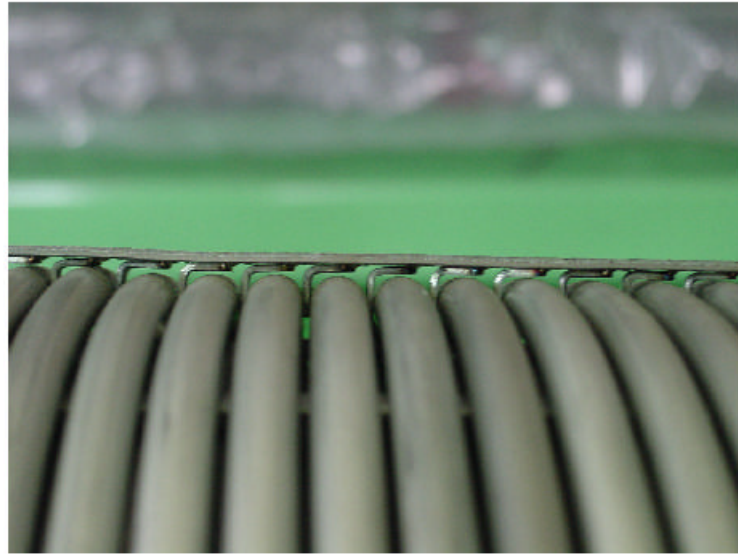
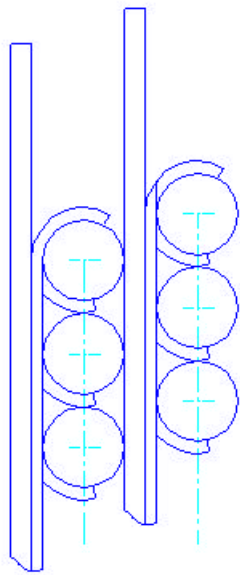


그림 5. 전열관 지지대

전열관 지지대의 개수는 유로면적에 제한을 받는다. 각 열의 유로면적에 해당하는 전열관 지지대의 개수를 구하여 그림 6과 같이 배치하였다. 각 전열관 지지대는 전열관 지지보에 용접된다. 전열관 지지보는 빗처럼 제작하여 각각의 홈에 전열관 지지대를 끼워서 용접한다. 전열관 지지보에서 벗어난 지지대는 그림처럼 길게 가공하지 않고 마지막 전열관에서 절단하여 마무리하였다.

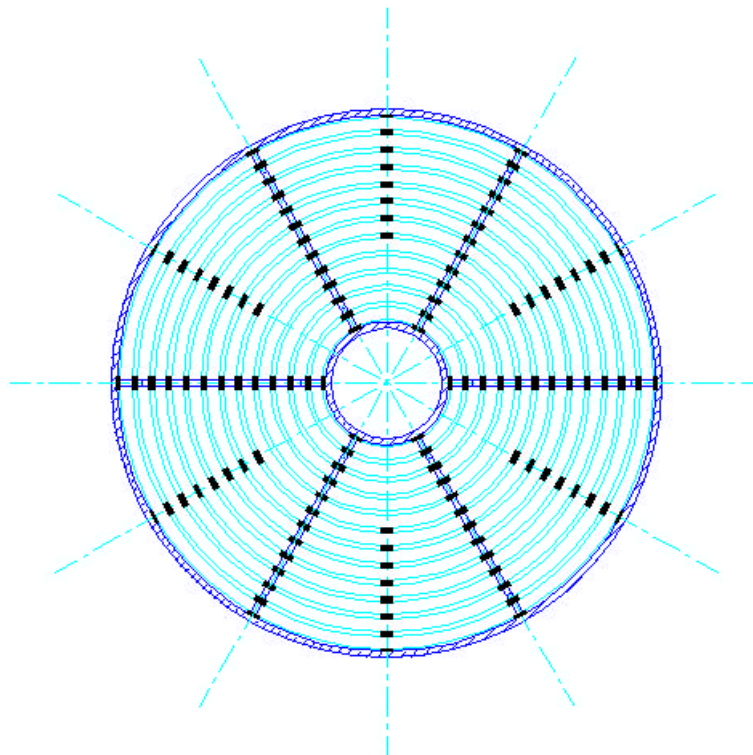


그림 6. 전열관 지지대 배열

전열관을 감기 위해선 시작부위에 각 열의 나선각만큼 전열관을 구부려야 하고, 증기헤더 튜브 시트 치구에 감은 전열관을 고정하기 위해서도 전열관을 구부려야 한다. 그림 7과 같은 상용 장비로 작업을 하였다.

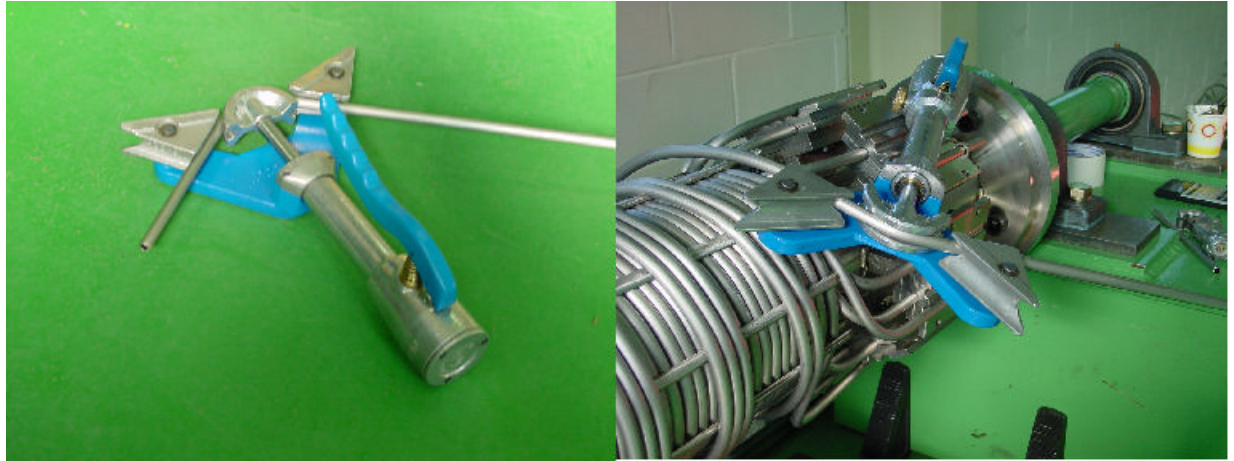


그림 7. 전열관 구부림(시작과 마무리)

3. 전열관 집합체 제작

설계 과정에서 요구되는 전열면적을 얻기 위하여 각 열마다 전열관의 나선경, 나선각 그리고 회전수가 정해져 있다. 이를 바탕으로 실제 제작에 필요한 것들을 계산하였다. 먼저 전열관을 각 모듈급수헤더에 균등하게 배치해야 한다. 동일한 모듈급수헤더에서 나온 전열관은 동일한 모듈중기헤더와 연결되어야 하고, 각 모듈들은 비슷한 전열면적을 가져야 한다. 원자로나 운전 중 한 모듈에 파손이 생기면, 그 모듈을 고립시키고 가동하여야 하기 때문에 각 모듈들의 전열면적이 비슷해야 한다. 전열관의 배치가 끝나면 전열관 수, 나선각 등에 맞추어 그림 1과 같이 CAE 프로그램인 CATIA를 이용하여 3차원으로 모델링한다. 이를 통해 각 전열관의 간섭을 체크하고, 실제 각 모듈의 전열면적을 다시 비교한다. 모든 것을 만족하면 전열관 코일링 시 필요한 값들을 이 모델로부터 구한다.

전열관 집합체 제작 순서는 아래와 같다.

1. 카세트 내통에 전열관 지지대를 용접하고 장치에 장착한다.
2. 그림 7과 같이 전열관을 각 열의 나선각만큼 구부린다.
3. 그림 4와 같이 급수헤더 치구에 전열관을 끼우고 전열관 고정 치구로 고정한다.
4. 이송대에 전열관을 고정한다.
5. 각 열의 축방향 피치만큼 주축과 이송대의 회전수를 컨트롤러에 입력한 후 구동하여 전열관을 감는다.
6. 감은 후 증기헤더 튜브시트 치구에 끼우기 위하여 그림 4와 같이 전열관을 고정한다.
7. 그림 7과 같이 장비를 이용하여 전열관을 구부린 후 증기헤더 치구에 고정한다.
8. 해당 열의 전열관을 모두 감은 후 전열관 지지대를 전열관에 끼운다.
9. 2부터 8까지 반복하여 감는다.
10. 전열관 집합체를 완성한 후 잔류응력을 제거하기 위하여 열처리한다.



그림 8. 전열관 집합체

위와 같은 방법으로 그림 8과 같은 전열관 집합체를 제작하였다.

전열관을 감는 방법은 상당히 어려운 기술이다. 많은 수의 전열관을 감아야 함으로 전열관간의 간섭현상이 발생할 수 있다. CATIA를 사용하여 컴퓨터 상에서 전열관을 감아 봄으로써 실제 제작 과정에서 발생할 수 있는 간섭문제가 많이 해결되었다. 그리고 실제 제작 과정에서 전열관을 구부려야 하는 위치 및 길이 등 다른 값도 구할 수 있었다.

축방향 피치를 유지하기 위하여 맨드렐을 회전시키는 모터와 감기는 전열관을 볼스크류로 이송하는 모터를 인버터에 의해 제어하도록 하였다. 각 열마다 나선각에 해당하는 값들을 컨트롤러에 입력하여 축방향 피치가 정확하게 유지되도록 하였다. 그리고 각 열마다 전열관 지지대를 사용하여 축방향 및 반경방향 피치를 유지하였다.

전열관을 감을 때 전열관 지지대를 중심으로 전열관이 꺾이는 현상이 발생한다. 지지대를 등골게 가공하여 꺾임을 다소 방지하였고, 지지대의 간격을 조정하여 전열관이 꺾이는 현상을 방지하였다. 그리고 지지대의 수가 제한되어 있으므로 각 열의 지지대 사이에 전열관 지지대보다 작은 크기의 보조 지지대를 사용하고 감은 후에 제거하는 것을 검토할 것이다.

전열관을 구부릴 때 현재 장비로는 그림 7에 보듯이 중심으로부터 충분히 긴 길이를 요구하기 때문에 작업상의 어려움이 있었다. 장비를 보완하여 설계 제작할 것이다.

전열관 감는 중 몇 열에서는 시작 부분과 마지막 부분에 앞 열의 지지 없이 허공 상에서 감아야 하는 부분이 발생했다. 이 부분에서는 축방향 피치가 유지되지 않고 일차 냉각수의 유로를 방해하는 요인이 될 수도 있다. 적당한 치구를 설치하거나 다른 방법을 강구해야 한다.

전열관을 감는 과정에서 필연적으로 스프링백 현상이 발생하고, 전열관이 찌그러지며 두께가 감소한다. 이것을 제어하기 위하여 해석모델을 개발하고 시행착오를 한 결과, 전열관을 감을 때 항복응력의 34%에 해당하는 인장력을 가하면 스프링백, ovality, 판재 두께 감소율을 만족할 수 있다[3, 4].

3. 결 론

일체형원자로 증기발생기의 나선형 전열관 집합체를 제작하는 장비를 개발하였다. 축방향 피치를 유지하기 위하여 맨드렐 구동 모터와 볼스크류 구동 모터를 독립적으로 컨트롤하였다. 스테인리스 Mock-up을 제작하여 제작변수를 설정하였는데 전열관 지지대를 사용하여 축방향 및 반경방향 피치를 유지하였으며, 적절한 개수의 지지대를 사용하여 전열관의 ovality도 줄일 수 있었다. CATIA로 3차원 모델링하여 실제 작업과정에서 발생할 수 있는 간섭 문제를 많이 해결하였고, 실제 감을 때 필요한 변수를 결정하였다. 코일링 해석 모델을 개발하고 시행착오를 거쳐 ovality, 두께 감소율, 스프링백 등을 효율적으로 제어할 수 있었다. 이상과 같이 몇 차례의 시행착오와 함께 국내기술로 나선형 증기발생기 제작에 필요한 코일링 기술을 확보하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Kim Jong In, et al., Development and Verification Test of Integral Reactor Major Components, KAERI/RR-1889/98, 1999.
2. Kim Yong Wan, et al., Conceptual Design of Once-Through Helical Steam Generator for Integral Reactor SMART, KAERI/TR-1446/99, 1999.
3. Kim Yong Wan, et al., Development of Spring Back Analysis Model for the SMART Steam Generator Helical Tube, KAERI/TR-1406/99, 1999.
4. Kim Yong Wan, et al. "An analysis to minimize the amount of spring back after coiling of helical steam generator tubes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, in press