

# 헬리컬 증기발생기 코일에서 강제대류 비등 열전달 및 유동의 수치적 예측

조 종 철<sup>1</sup>, 김 효 정<sup>2</sup>, 김 응 식<sup>2</sup>, 유 선 오<sup>2</sup>

## Numerical Prediction of Forced Convective Boiling Heat Transfer and Flow in Steam Generator Helical Coils

J. C. Jo<sup>1</sup>, H. J. Kim<sup>2</sup>, W. S. Kim<sup>2</sup>, and S. O. Yu<sup>2</sup>

In this study, three-dimensional numerical calculations are performed to simulate the flow and heat transfer in helically coiled tube steam generator employing a commercial CFD (Computational Fluid Dynamics) code. The problem considered herein includes the boiling phase change flow of tube side fluid and the single-phase counter-current flow of shell side hot fluid transferring heat to the tube side flow thru the tube wall. Detailed investigations are performed for both shell-side and tube-side flow fields in terms of density and volume fractions of each phase of fluids as well as for the tube wall heat transfer field in terms of heat transfer coefficients.

**Key Words:** 나선형 코일 튜브 증기발생기(Helically Coiled Tube Steam Generator), 2상 유동(Two-Phase Flow), 비등(Boiling)

### 1. 서 론

헬리컬 증기발생기의 다양한 용도와 중요성 때문에 코일내 강제대류 비등열전달에 대하여 다수의 실험적 및 이론적 연구들[1-7]이 이루어져 오고 있다. 그러나 코일내 2상 난류 유동 및 상변화 열전달 현상의 복잡성과 측정기술 및 전산기법의 제한성으로 인하여 실제 현상을 객관적으로 규명하는 수준에는 이르지 못하고 있다. 따라서 헬리컬 증기발생기 설계 안전성 평가를 위한 열수력 해석과 원자로계통의 안전해석시 필수적인 관련 기술지식과 적용성이 입증된 자료를 확보하는 것이 중요하다.

본 논문은 고온 고압의 압축수가 하향 유동하

는 동심원형관내에 위치한 나선형 형상의 코일을 통하여 저압의 냉수가 상향 유동하면서 비등하는 2상 유동을 CFD 코드[8]를 사용하여 수치적으로 모사한 것이다. 본 연구에서 코일 내부의 비등 2상 유동과 외부 동심원관 유동은 모두 표준  $k-\epsilon$  난류 모형으로 모사되었다. 수치모사는 신행 일체 형원자로 헬리컬 증기발생기의 정상운전조건에서 하나의 코일을 대상으로 비등 2상 유동에 대하여 이루어졌으며 코일 내외 벽면에서의 열전달계수와 코일측 유체의 밀도와 보이드율을 예측하였다.

### 2. 헬리컬 코일 증기발생기 해석모형

나선형 코일 증기발생기는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 원통 셸과 나선형상의 코일들로 구성되어 있다. 증기발생기 하단부의 코일 입구로 저온 저압의 냉수가 유입되어 코일 내부를 따라 상향

1 정회원, 한국원자력안전기술원, jcjo@kins.re.kr

2 한국원자력안전기술원

유동하면서 상단부 셀측 입구로 유입되어 코일 외부에서 하향 유동하는 고온 고압의 압축수로부터 열을 전달 받게 됨으로써 열교환이 이루어진다. 이렇게 지속적으로 전달되는 열로 인하여 코일로 유입되는 저온의 급수는 포화온도까지 가열된 다음 비등하여 증발이 일어나며 발생한 증기는 코일출구에 도달할 때까지 과열된다. 한편 셀측에서 하향유동하는 고온유체는 상변화없이 온도만 강하된 압축수로 출구에서 유출된다.

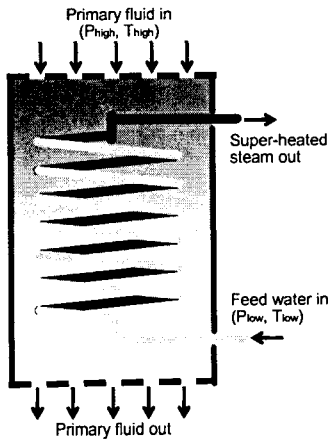
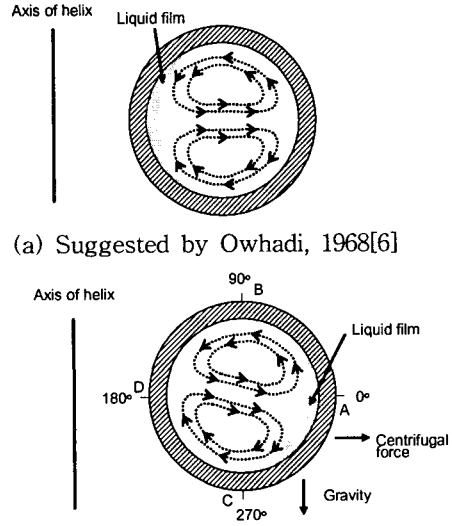


Fig. 1 Schematic of helical steam generator(SG)

본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 실제 원자력에서 채용하는 나선형 증기발생기 코일의 기하학적 사양과 운전조건을 동일하게 유지하는 1 개의 코일만을 해석 대상 모형으로 선정하였다. 이것은 셀측의 코일외부를 유동하는 고온유체의 유속이 설계값과 근사하게 유지되도록 코일 1개에 대한 평균 유량과 유로 단면적을 산정하여 유체벽면을 갖는 동심원통형 셀을 만들어 원통사이 환상공간내에 코일을 위치시킴으로써 실제 셀측 유동조건에 이와 같이 고안된 단순 해석 모형이다.

### 3. 해석방법

계산에서 사용된 코일은 외경 10.0mm, 두께 1.5mm, 피치 35.0mm이며, 셀측 중심 유체벽 실린더의 반경은 147.0mm (헬릭스 반경과 동일)이고 두께는 14.0mm이다. 셀측 고온유체의 유입 속도, 온도, 압력은 각각 1.0 m/s, 310 °C, 14.7Mpa이며, 코일측 저온유체의 유입 속도, 온도, 압력은 각각 0.541 m/s, 50.0 °C, 3.55Mpa 이다.



(a) Suggested by Owhadi, 1968[6]

(b) Present calculation

Fig. 2 Secondary flow pattern

유한 두께를 갖는 나선형 코일 벽에서의 열전도와 벽내외부 표면에서의 대류를 유체-벽-유체 접촉경계조건이 잘 맞추어 지도록 동시에 계산하기 위하여 복합열전달 문제로 고려하여 해석하였다.

해석영역을 6면체 요소로 분할하여 격자구성을 하였으며 코일 내외부 접촉경계면 근방에서는 벽면과 평행한 방향으로 격자층을 밀집시켜 경계층모사가 적절히 처리 되도록 하였다.

CFX-5.6 코드에서 채용하고 있는 열적상변화 모형은 질량전달 반응을 일으키게 하기 위하여 증기체적분율을 갖는 입구유동장을 만들거나 초기추축하든지 또는 최소 증기체적분율을 설정을 필요로 한다. 본 해석에서는 코일내부 벽에서의 비등 모사를 위하여 핵비등 자리를 만드는 분산상(dispersed phase)의 최소체적분율값으로 10-3을 적용하였다.

### 4. 결과 및 토의

본 연구에서 고안한 헬리컬 코일 증기발생기 해석모형에 대한 기초적인 유동 및 열전달 계산 결과 파는 이미 발표[9]된 바 있다. 그 중에서 가장 중요한 finding 은 코일 내부 2차 유동형상으로서 위 Fig. 2에 나타내어 놓았다.

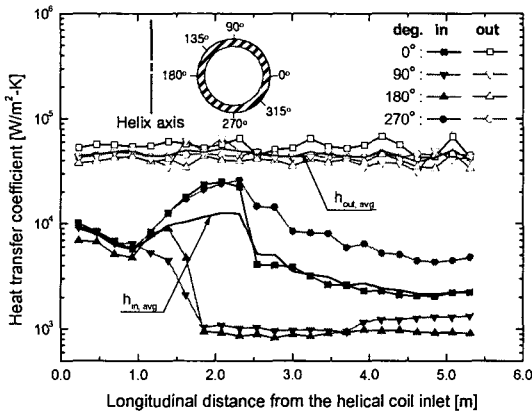


Fig. 3 Heat transfer coefficients at the inner and outer coil wall surfaces

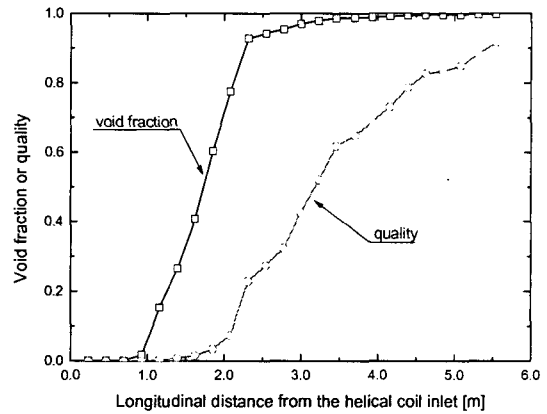


Fig. 4 Coil-side void and quality along the tube length

Owhadi 등[3]은 코일의 extrados 외측벽면 (Fig.2b의 0°위치)에서 측정된 열전달계수 값이 intrados 내측벽면 (180° 위치) 보다 높다는 사실에 기초하여 상대적으로 밀도가 높은 물과 습증기가 본 수치모사결과와는 반대로 Fig.2a와 같이 헬릭스 축과 가까운 코일의 intrados 내측벽면을 중심으로 부착분포하게 되는 것으로 추정하였다. 그러나 본 해석에서 도출된 결과는 이와 반대로, 헬리컬 코일을 따라 회전상향유동으로 내부 유체에 발생하는 원심력과 중력의 영향으로 밀도가 큰 저온의 물 또는 습증기는 헬릭스 축과 먼 코일의 extrados 내측벽면 (Fig.2b의0°위치)과 바닥벽면 (270° 위치) 사이에 분산부착되고 상대적으로 가벼운 고온상태의 물 또는 증기는 헬릭스축과 가까운 코일의 intrados 내측벽면 (180°위치)과 상부벽면 (90°위치)에 근접분포하여 유동함을 보였다. 이는 곡관덕트내 단상층류 및 헬리컬 코일내 단상난류 유동 및 열전달에 관한 선행의 실험 및 수치해석 연구들[4-7]에서 확인되었듯이 코일내에서 상향 회전유동하는 유체에 작용하는 원심력으로 유동방향에 수직한 단면에 형성되는 2차유동에 기인한다.

결론적으로 여기서 다루고 있는 헬리컬 코일 내부 비등을 수반하는 2상 난류 복합열전달 유동과 같은 복잡한 유동은 CFD 해석기술과 측정기술의 한계로 지금까지 선행연구자들은 간단한 실험을 통하여 코일 외벽면의 온도를 측정하고 그 자료에 기초하여 열전달계수 값을 산정하였을 뿐 코일 내부 유동 및 열전달을 상세히 조사 파악할 수 없었던 것으로 유추된다.

수평관내 유동장에서 코일내벽에서의 열전달계수를 나타내는 경험식들이 Reynolds 수와 Prandtl 수의 함수로 표현되고 두 매개변수들의 크기가 증가할수록 열전달계수 값도 커지는 일반적인 경향을 나타낸다. 증기보다는 물이 Reynolds 수와 Prandtl 수가 더 높으므로 본 계산결과와 같이 실제로 실험 연구[2-4]에서 열전달계수 값이 높게 측정되는 extrados 내측벽면 (Fig. 2b의 0° 위치) 부위에서 밀도가 높은 물 또는 습증기가 분포되는 것이 열전달 현상으로서 그 타당성이 성립하며, 원심력에 의한 물리적 현상으로도 설명이 가능해진다.

Fig. 3은 코일 길이 방향에 따른 코일벽 내외부면에서의 열전달계수 분포를 나타낸 것이다. 코일 외벽면에서의 열전달계수는 40,000-60,000 W/m²K의 값을 가지는 것으로 계산되었다. 일반적으로, 코일의 원주방향으로 90° 간격으로 배치된 4군데의 모니터링 포인트들 중에서 extrados 및 intrados 외벽면에서 각각 최대와 최소의 열전달계수 값을 가지며 바닥과 천정 위치에서는 거의 차이가 나타나지 않는다. 예상할 수 있듯이 코일 길이방향을 따르는 외벽면 열전달계수는 큰 변동 없이 분포됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 외부에 액상의 유체가 흐르는 수평관 외벽에 대한 실험적 상관식인 ESDU (Engineering Science Data Unit)[10]로 예측한 결과와 잘 일치한다. 한편, 코일 내벽면의 4군데 모니터링 포인트에서의 계산된 코일 길이방향의 열전달계수들은 비등이 국소적으로 시작되어 dry-out이 된 이후에 걸쳐 상호간 상당한 차이를 보인다.

이미 언급한 바와 같이 나선형으로 감아 올라가는 코일을 통한 유체운동으로 초래되는 원심력으로 인하여 상대적으로 무거운 액체나 질이 낮은 습증기는 Fig.2(b)의 315° 위치의 내벽면 방향으로 밀린다. 그리고 반대편 내벽면이 비교적 짧은 거리만큼 젖은 상태로 유지되는 반면에 먼거리의 내벽면까지 내벽면이 젖은 상태를 유지한다. 이러한 현상은 코일 길이를 따르는 열전달계수 변동을 보여 주고 있는 Fig.3로부터 확인된다. Fig.2(b)에서 270° 및 0° 위치에서 액막으로 덮이는 내벽면에서의 열전달계수가 마주보는 내벽면에서의 값보다 높다. 이러한 코일 길이를 따르는 열전달계수의 변동을 나타내는 plot의 일반적 경향이 다만 두 경우의 경계조건과 고려된 기하학적 조건의 상호 차이가 있음에 기인하여 열전달계수 값의 크기에서 상당한 차이가 있는 점을 제외하고는 Owhadi[3]가 튜브표면온도의 측정결과를 사용하여 추정된 자료와 거의 유사하다.

Fig.4는 코일 길이방향으로의 코일축 유체의 증기체적분율(보이드율)과 밀도 분포를 나타낸 것이다. 그림으로부터 코일 내벽이 젖어 있는 동안에는 짧은 통과거리에서 비등 상변화가 매우 빠르게 일어나며 그런 다음에는 느려진다. 이는 증기에 직접 노출되는 내벽면에서의 대류열전달이 약화되기 때문이다. 이상의 계산결과 및 토의로부터 본 연구에서 다룬 문제에 대한 수치모사가 물리적 타당성을 보이는 것으로 사료된다. 그렇지만 향후 이러한 수치해석의 일반적 적용성을 완벽하게 확인하기 위해서는 궁극적으로는 이용가능한 실험자료와의 정량적 비교평가가 필요하다.

### 5. 결 론

본 연구는 고온 고압의 압축수가 하향 유동하는 동심원형관내에 위치한 나선형 코일을 통하여 저압의 냉수가 상향 유동하면서 비등 상변화를 거쳐 과열증기로 변화하는 2상 유동을 CFD코드로서 수치 모사한 것이다. 수치모사는 신형 일체형원자로 나선형 코일 증기발생기의 정상운전조건에서 하나의 코일을 대상으로 비등 2상 유동에 대하여 이루어졌다. 수치계산 결과는 셀측과 튜브축 유체 각각에 대한 밀도, 증기체적분율, 속도 및 온도 향으로 나타내어 유동 특성을 코일 내외벽면에서의 열전달계수 향으로 열전달 특성을 분

석하였다. 그 결과, 나선형 코일 코일내부의 비등 2상 유동에 대한 본 수치모사는 기존의 관련 실험 및 이론 연구로부터 얻은 기초 지식에 비추어 물리적으로 합당한 것으로 보인다.

### 참고문헌

- [1] Mori, Y. and Nakayama, W., "Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes (1st Report, Laminar Region)", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.8, (1965), pp.67-82.
- [2] Mori, Y. and Nakayama, W., "Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes (2nd Report, Turbulent Region)", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.10, (1967), pp.37-59.
- [3] Owhadi A., Bell, K. J., and Crain, B. Jr., "Forced Convective Boiling inside Helically-Coiled Tubes," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.11,(1968), pp.1779-1793.
- [4] Cumo, M., Farello, G.E., and Ferrari, G., "The Influence of Curvature in Post Dry-out Heat Transfer," *Int'l J. Heat and Mass Transfer*, Vol.15, (1972), pp.2045-2062.
- [5] Patanker, S. V., Pratap, V. S., and Spalding, D. B., "Prediction of Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Pipes," *J. Fluid Mechanics*, Vol.62, (1974) p.539.
- [6] Patanker, S. V., Pratap, V. S., and Spalding, D. B., "Prediction of Turbulent Flow in Curved Pipes," *J. Fluid Mechanics*, Vol.67, (1975), p.283.
- [7] Pratap, V. S., and Spalding, D. B., "Numerical Computation of the Flow in Curved Ducts," *Aeronaut. Q.*, Vol.26, (1975), p.219.
- [8] CFX, CFX-5.6 User Manual, CFX Ltd, Oxfordshire, United Kingdom, (2003).
- [9] 조종철, 김웅식, 김효정, 이용갑, "나선형코일 튜브 비등2상 유동 수치해석," 한국 전산유체공학회 춘계학술대회 논문집, (2004), pp.49 -55.
- [10] Chung, D. B, Lee, Y. J., and Jo, J. C., "Development of Heat Transfer Model of Helical Tube Steam Generator for Thermal Hydraulic System Analysis Code, MARS," *Proc. Korean Nucl. Society Spring Meeting*, Gyungju, (2003).