2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

열수력 계통분석코드 MARS 의 헬리컬 튜브형 증기발생기 열전달 모델 개발

Development of Heat Transfer Model of Helical Tube Steam Generator for Thermal Hydraulic System Analysis Code, MARS

정법동, 이영진
한국 원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

조종철
한국 원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

헬리컬튜브형 증기발생기는 독특한 나선형 구조로 인하여 자체적으로 발생하는 원심력으로 튜브 내부에 이차유동을 발생시켜 열전달을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 습분 분리도 동시에 이루어지므로 과열 증기를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 일반적인 상용 경수로 원자로의 안전해석에 사용되는 RELAP5 나 TRAC 과 같은 전산 코드는 나선형 구조의 증기발생기에서 발생하는 열 전달 상관식과 수력학적 모델이 없으므로 헬리컬 증기발생기를 채택하고 있는 IRIS 나 SMART 와 같은 일체형 원자로를 해석하기에는 부 적합할 것으로 판단된다. 이에 따라 나선형 구조에서의 열전달 특성과 상관식을 검토하고 기존의 계통코드가 사용하고 있는 열전달 상관식 외에 나선형 구조에 적합한 모델을 계통분석코드인 MARS 에 적용시켜, 사용자가 옵션으로 헬리컬 구조의 열전달을 채택할 수 있게 하였다. 개선된 계통분석코드로 전 출력상태의 헬리컬 증기발생기의 성능을 계산하여 분석하였으며, 이전의 버전에 비하여 증기발생기 성능해석의 정확도에서 많은 개선이 이루어 졌음을 확인하였다.

Abstract

The centrifugal force caused by the helical shape of the helically coiled tube steam generator enhances the heat-transfer by generating the secondary flow within the tube, and makes it easier to produce superheated steam by enhancing moisture separation. However such generally used computer codes as RELAP and TRAC in thermal hydraulic systems analysis of commercial Pressurized Water Reactors do not have the heat transfer correlations and hydraulic models suitable for helically coiled tube steam generator. Therefore, application of such codes to SMART and IRIS reactors which have helically coiled steam generators is not appropriate. The heat transfer characteristics and relevant correlations for helical tubes have been examined and then added to MARS T/H systems analysis code. The user can optionally select the helical tube heat transfer package via input. A performance analysis under full power operation has been carried out with the modified MARS code. The results show a significant improvement in the accuracy in the steam generator performance analysis compared to the version without the helical heat transfer package.

1. 서론

헬리컬 증기발생기는 독특한 나선형구조에서 유동의 흐름에 의하여 자체적으로 발생하는 반경방향의 원심력이 존재하므로, 무중력 상태인 우주선이나 중력영향이 수시로 변할 수 있는 선박의 동력원으로서의 응용에 많은 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 헬리컬 튜브내에서 발생하는 원심력은 보통 중력의 수 천배에 달하며, 이 영향으로 튜브 내에 증기와 물을 효과적으로 분리할 수 있으며 튜브내의 fog 의 형성을 억제할 수 있다. 더욱이 튜브내의 중심에서 고속으로 흐르는 증기(vapor core)에서 발생하는 이차유동장의 영향으로 90 ~ 95%의 아주 높은 증기 건도에서도 물을 효과적으로 튜브 벽면으로 배분시켜 드라이 아웃을 억제하며 열전달을 향상시킬 수 있음이 알려져 있다. 결과적으로 헬리컬 증기발생기는 직관형 증기발생기에 비하여 쉽게 과열 증기를 얻을 수 있는 장점이 있다. 헬리컬 증기발생기는 MRX, SPWR, LMFBR, 그리고 가스로 등의 증기발생기로 채택되고 있으며 최근에는 IRIS[1]나 SMART[2]등의 일체형 원자로의 증기발생기로 응용되고 있다.

계통분석 코드인 MARS[3]는 주로 상업용 원자로인 가압경수로와 중수로의 상세한 안전해석을 위하여 개발되어 왔다. 최근 MARS 의 응용 범위를 확장하기 위하여 신형원자로의 안전해석을 위하여 필요한 모델을 개발하고 있으며, 그 중에서 일체형 원자로 SMART 에의 적용을 위하여 헬리컬 튜브의 열전달 모델이 필수 모델로 선정하였다. MARS 의 열전달 모델은 기본적으로 직관 튜브에서의 자료를 바탕으로 하는 열수력 상관식으로부터 발전된 것이며 각 열전달 모드에 따라 각각 다른 상관식으로 구성되어 있다. 따라서 이들 각 상관식의 헬리컬 튜브 적용에 대한 검토와 헬리컬 튜브에 맞는 상관식을 조사, 제안하여 MARS 코드에 적용하였다.

2. 헬리컬 튜브내에서의 열전달 모델의 개선

2.1 단상유동영역

헬리컬 튜브에서의 열전달에 대한 실험적, 이론적연구는 1920 년 대에 러시아에서 Dean 등에 의하여 시작을 한 것으로 알려져 있으며 1960 년대에서부터 1980 년대 까지 다양한 나라에서 연구를 수행하였다. 그 중에서 Seban 과 McLaughlin[4] (1963) 은 전기가열관에서 오일과 물을 사용하여 다음과 같은 실험적인 난류 열전달 상관식을 구하였다.

$$h_c = 0.023\frac{k_f}{d}{Re_f}^{0.8}{Pr_f}^{0.4}\left[{Re_f}^{0.05}\left(\frac{d}{D}\right)^{0.1}\right] \quad (1)$$

Mori 와 Nakayama[5] (1964) 도 실험과 이론적연구를 통하여 다음과 같은 상관식을 구하였는데 공기에 대하여 이론식과 잘 일치한다고 알려져 있다.

Pr >1 인 경우

$$h_c = 0.02439\frac{k_f}{d}{Re_f}^{0.8333}{Pr_f}^{0.4}\left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{12}}\left[1+\frac{0.061}{\left[Re_f\left(\frac{d}{D}\right)^{2.5}\right]^{1/6}}\right] \quad (2)$$

Pr < 1 인 경우

$$h_c = 0.03846\frac{k_f}{d}{Re_f}^{0.8}\frac{Pr}{\left(Pr^{2/3}-0.074\right)}\left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{10}}\left[1+\frac{0.098}{\left[Re_f\left(\frac{d}{D}\right)^{2}\right]^{1/5}}\right] \quad (3)$$

여기서 d 는 튜브 내경이며 D 는 나선형 코일의 직경이다. 이외에도 여러 상관식이 제안되었으나 열전달을 향상시키는 배수를 유사하게 다루고 있으므로 생략하고 두 상관식에 대하여 검토를 하였다.

그림 1 은 SMART 의 헬리컬 증기발생기의 출력 운전조건에서의 대표적인 튜브내경 대 나선형코일의 비율(d/D) 가 1/43 일 경우 헬리컬 튜브상관식인 식(1)과 식(2) 그리고 직관에서 사용되고 있는 Dittus-Boelter 상관식과 비교하여 Re 함수그래프로 나타내었다. 그림에서 보듯이 SMART 출력운전조건에서 식 (1)과 식(2)는 잘 일치하였으며 직관에서의 열전달보다 약 20 ~ 30% 증가함을 보여주고 있다. 헬리컬 튜브에 대한 상관식으로는 Mori-Nakayama 식을 사용하였다.

2.2 이상유동영역

이상유동영역에서의 열전달은 통상적으로 열수력 해석 전산코드에서는 비등 열전달과 드라이 아웃이 발생된 후의 천이 열전달과 막 비등열전달로 구한다. 따라서 열수력상관식인 3 종의 상관식 과 드라이 아웃에 대한 상관식을 검토하여야 한다.

<u>비등 열전달 상관식</u>

튜브에서의 비등열전달은 미시적 핵비등에 의한 것과 거시적 강제 대류에 의한 것의 합으로 나타낼 수 있다. MARS 코드에서도 이러한 상관식을 사용하는데 다음과 같은 가장 잘 알려진 Chen 상관식을 사용하고 있다.

$$q'' = h_{mac}(T_w - T_s)F + h_{mic}(T_w - T_s)S \quad (4)$$

여기서

h_{mac} = 단상유동 열전달계수

h_{mic} = Poster-Zuber pool boiling 상관식

F = Reynolds number factor

S = Suppresion factor

Owhadi[6] (1968)는 이러한 Chen 상관식의 F factor 를 작은 직경의 헬리컬 튜브 자료와 비교하였는데 그림 2 와 같이 미시적 핵비등이 지배적인 $1/\chi < 0.1$ 의 영역을 제외하고는 잘 일치 함을 보여주었다. 또한 헬리컬 튜브내에서의 대표적인 유동영역에서는 강한 이차 유동으로 미시적인 핵비등에 의한 것 보다는 강제 대류에 의한 것이 훨씬 큰 것으로 알려져 있으므로 h_{mac} 에 대한 상관식을 헬리컬 튜브에 대한 상관식으로 대체하고 식 (4) 를 사용하였다.

드라이 아웃 상관식

헬리컬 튜브내의 증기 속도는 물에 비하여 상당히 빠르며 이로 인하여 강한 이차 유동장이 형성된다. 이차 유동장은 그림 3 과 같이 액막을 효과적으로 벽면으로 배분시켜주므로 이차 유동장이 형성되지 않는 직관에 비하여 높은 건도까지 드라이 아웃이 되는 것을 막을 수 있고 과열증기를 쉽게 얻을 수 있다. MARS 코드의 CHF 모델은 직관에서 얻은 실험자료에 근거한 CHF AECL Lookup 표에 의한 것으로 헬리컬 튜브에 적용할 수 없다. 헬리컬 튜브에서의 실험에 의하면 이차 유동의 영향으로 나선축에 가까운 벽면에 액막이 쏠리는 경향으로 건도가 0.7 부터 나선 축에서 먼 벽면부터 부분적인 드라이 아웃이 되면서 순차적으로 건도가 높아지면서 드라이아웃이 되는 것으로 알려져 있다[7,8] (그림 4 참조). 즉 관 전체적인 평균으로 보면 직관에서처럼 급격하게 드라이 아웃이 일어나는 것이 아니라 열전달이 서서히 감소하는 경향이 있다. 헬리컬 튜브에서의 드라이 아웃 상관식이 없으므로 실험에 의하여 관측된 점인 건도 0.8 을 드라이 아웃 상관식으로 설정하였다.

즉

$$x_s > 0.8 \qquad (5)$$

천이 열전달 상관식

MARS 에서는 천이 열전달 모델로 Chen 의 상관식을 사용하고 있는데 벽면의 물의 접촉면 A_f 에 따라 다음과 같이 구한다.

$$q_{tb} = q_{CHF} A_f + h_g (T_w - T_g)(1 - A_f) \qquad (6)$$

여기서 $h_g = 0.0185 \, Re_g^{0.83} \, Pr_g^{1/3}$

헬리컬 튜브에서는 드라이아웃 되는 건도가 상당히 높기 때문에 곧 바로 증기가 되어 천이 열전달의 길이와 그 영향은 상대적으로 미미하다. 현재까지 천이 열전달에 대한 상관식에 대한 정설이 없고 대안이 없으므로 헬리컬 튜브에서도 같은 상관식을 적용하였다.

막 비등 열전달상관식

막 비등영역에서는 증기 막과 가열벽면 간에 열전도를 고려하여 다음과 같은 상관식을 사용하고 있다.

$$h = 0.62\left[\frac{g\rho_g k_g^2(\rho_f - \rho_g)h_{fg}' C_{pg}}{L(T_w - T_s)Pr_g}\right]^{0.25} M_\alpha \tag{7}$$

여기서 M_α 는 void fraction factor

헬리컬 튜브에서의 막 비등열전달은 천이 열전달과 마찬가지로 길이가 짧고 그 영향이 미미하므로 같은 식을 사용하였다.

3. 헬리컬 증기발생기 Shell측에서의 열전달 모델의 개선

헬리컬형 증기발생기의 Shell측 유동장은 직관형과는 달리 유동의 흐름방향과 전열관의 배열방향이 수직인 상태가 된다. 이러한 기하학적 구조에서 단상유동일 때 MARS 코드에서는 수평방향의 횡류를 감안한 ESDU(Engineering Science Data Unit, London, 1973)의 식을 사용한다[9].

즉

$$h = \sqrt{h_{parallel}^2 + h_{cross}^2} \tag{8}$$

여기서 $h_{parallel}$ 은 통상적인 Dittus-Boelter 상관식을 사용하여 구하며 h_{cross} 는 다음과 같은 식으로 구한다.

$$h_{cross} = 0.211\frac{k}{D} Pr^{0.34} Re_{cross}^{0.651} \tag{9}$$

$$A_{ratio} = \frac{1 - \frac{\pi}{4}\left(\frac{D}{P}\right)^2}{1 - \frac{D}{P}}$$

$$G_{cross} = G_{parallel} A_{ratio}$$

$$Re_{cross} = G_{cross} D / \mu$$

또한 Zukauskas[10](1972)는 라인배열의 수평다발에 대하여 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$h = C\frac{k}{D}Re^{m}Pr^{0.36}\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0.25} \quad (10)$$

여기서

Re	C	m
10 ~ 100	0.8	0.4
100 ~ $2x10^5$	0.27	0.63
> $2x10^5$	0.021	0.84

그림 4 는 SMART 헬리컬 증기발생기의 출력운전 조건에서 직관의 Dittus-Boelter 상관식과 식(8)과 식(10)을 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 Zukauskas 상관식은 직관형에 비하여 약 2 배 그리고 ESDU 상관식은 약 4 배 정도로 열전달이 향상되는 것을 볼 수 있다. ESDU 의 상관식은 Cross flow 의 예측에 따라 상당히 틀려질 수 있으므로 Zukauskas 상관식을 단상유동의 상관식으로 채택하였다.

일체형 원자로에서는 증기발생기 Shell 측에서 이상유동이 발생하는 경우가 없으므로 자세한 검토 없이 이상유동 영역에서의 상관식을 MARS 코드에서 채택하고 있는 수평다발에서의 상관식과 동일하게 채택하였다.

4. 헬리컬 증기발생기 열전달모델의 MARS 코드적용 및 계산

원래의 MARS 열전달모델 입력에서는 경계조건 입력카드 1cccg501 ~ 99 의 3 번째 입력이 경계조건유형이며 여러가지 기하학적구조에 대하여 사용자가 선택하도록 되어 있다. 현재 헬리칼 튜브에 대한 옵션으로 114 가 있지만 직관 튜브인 100 으로 자동변환이 되게 되어 있으며 실제적인 모델이 없다. 그리고 헬리컬 Shell 측의 번들구조의 옵션이 없다.

이에 따라 114 는 튜브측, 135 는 Shell 측을 선택하는 옵션으로 택하여 모델이 작동하도록 수정하였다. 114 옵션은 튜브 직경대 나선형코일의 직경비인 di/Dc 의 사용자 입력이 필요하므로 추가 경계조건을 입력 할 수 있는 1cccg800(좌측경계조건) 혹은 1cccg900(우측경계조건)를 이용하고 1cccg801 ~ 899 (혹은 1cccg901 ~ 999)의 10 번째 입력인 P/D 의 입력치를 Dc/di (1.1 < Dc/di < infinite) 로 대치하게 하였다.

실제적으로 식 (3)을 모델하기 위하여는 상관식의 제한적인 경우를 생각하여야 한다. 식 (3)의 분모항인 ($Pr^{2/3}$ - 0.074) 는 Pr 가 0.02013 보다 작아지면 0 이 되고 음수가 된다. 따라서 분모항을 max(0.01, ($Pr^{2/3}$ - 0.074))으로 하였으며 Re 가 작은 경우도 분모항이 0 가 되므로 Re 수가 10 보다 큰 수에만 적용하였다. 식 (10)을 모델 할 때 벽면 가열효과인 $(Pr/Pr_w)^{0.25}$ 항 은 벽면과 유체의 온도차가 심하지 않고 무시할 만하다고 가정하여 코딩에는 제외 시켰다. 최대로 차이가 날때를 가정하여도 (T_f =300 C, T_w=200 C, P = 15Mpa) 코드모델에 비하여 실제상관식이 벽면효과로 약 1%의 열전달 감소효과만 있어 무시할 만하다. 이외에도 층류

대류 열전달계수 및 자연대류 열전달계수와 비교하여 최대 값을 택하는 알고리듬도 적용하였다.

헬리컬 열전달모델의 MARS 코드의 적용완성도를 확인하기 위하여 실제적인 SMART 원자로의 100% 출력운전 상태에 대하여 모의를 하고 개선된 코드결과를 비교하였다. SAMRT 모델시 증기발생기의 튜브측은 총 25 개의 균일한 노드로 모델하였으며, Shell 측은 5 개의 노드로 모델하였다. 그림 6 은 헬리컬 튜브내에서의 보이드 및 증기건도를 비교한 것이다. SMART 의 설계 값에 의하면 출구에서 증기건도가 100% 이며 과열증기가 얻어져야 하는데 이전 버전의 결과는 건도가 0.8 정도로 설계에는 차이가 많다. 개선된 버전의 계산결과는 개선된 열전달 계수를 사용합으로써 100%의 증기 건도와 과열이 얻어짐을 보여준다. 그림 7 은 증기발생기 튜브와 Shell 측의 열전달계수를 보여주고 있다. 이전 버전의 MARS 모델에서는 Shell 측이 ESDU 상관식을 사용하므로 Zukauskas 상관식에 비하여 2 배정도 크며 이로 인하여 먼저 튜브측에서 비등영역에 도달한다. 그러나 드라이 아웃이 증기건도가 50%인 10 번 노드에서 발생함으로써 이후 열전달이 나쁘게 되며 출구의 건도가 80%에도 되지 않는 결과를 초래한다. 개선된 열전달모델을 사용하였을때는 드라이 아웃조건이 증기건도가 80%에 도달하였을 때 이루어지므로 지속적으로 비등영역에 있을 수 있으며 17 번째 노드에서 드라이 아웃이 발생하여 짧은 천이영역 후 마지막으로 과열증기가 된다. 그림 8 은 열전달모드를 비교하여 나타낸 것으로 이전의 버전을 사용하여 계산한 결과에서 드라이 아웃이 너무 일찍 발생하였음을 보여준다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

헬리컬 증기발생기 모델을 위한 헬리컬 튜브와 Shell 측의 열전달 모델을 제안하였다. 제안된 모델로는 헬리컬 튜브측 단상유동영역의 상관식으로 Zukauskas 상관식을 사용하였으며, 이상유동영역에서는 그 동안의 실험결과를 참조하여 증기건도가 0.8 이 될 때까지 비등열전달을 유지하되 대류열전달항으로 Zukauskas 상관식을 사용하였다. Shell 측의 열전달모델도 단상유동에서 수평다발 Zukauskas 상관식을 사용하였다. 제안된 모델의 MARS 코드의 적용을 위해 헬리컬 튜브와 Shell 의 열전달 사용자 선택의 옵션이 추가되었으며 상관식 적용에 필요한 튜브직경 대 나선형코일의 직경비 (d/D)도 사용자가 입력하게 하였다. 개선된 MARS 코드 버전으로 SMART 의 전출력 운전상태를 모의한 결과 이전의 버전에 비하여 많은 개선이 있음을 확인하였고 증기발생기 성능계산과 과도계산에 적절히 응용할 수 있음을 알았다.

그러나 아직도 헬리컬 튜브내에서 드라이 아웃이 발생하는 기구와 상관식 개발을 위한 실험이 되어 있지 않으며 드라이 아웃 이후의 열전달의 기구도 정확히 알려져 있지 않다. 향후 일체형 원전인 SMART 의 증기발생기 성능에 대한 실험이 본격적으로 이루어 지면 당 모델에 대한 검증과 더 나은 개선이 이루어 질 것으로 기대한다.

6. 참고문헌

[1] Carelli, M.D., Ritterbusch, S. E. "Pre-aplication activities for IRIS and related research needs", Westinghouse Electric Co., Presented in Nuclear Safety Research Conference in Washington D.C., USA, Oct 22 (2001)

[2] 장문희 외 "일체형원자로 (SMART)기본설계 보고서", KAERI/TR-2142/2002, 한국원자력연구소 (2002)

[3] 이원재 외 "원자력 열수력 실증실험 및 평가기술개발/ 최적열수력계통분석코드 개발", KAERI/RR-2235/2001, 한국원자력연구소 (2002)

[4] Seban, R.A. and McLaughlin, E.F., " Heat Transfer in Tube Coils with Laminar and Turbulent Flow,", Int, J, Heat Mass Transfer, **6**, 387-395 (1963)

[5] Mori, Y., Nakayama, W., "Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes", Int. J. Heat Mass Transfer, **7** (1964)

[6] Owhadi, A., Bell K.J., and Crain B., "Forces convective boiling inside helically-coiled tubes", Int. J. Heat Mass Transfer, **11**,1779-1793 (1968)

[7] Young, M.A, and Bell, K.,J., "Review of two phase flow and heat transfer in helically coiled tubes", Eight symposium on space nuclear power systems, Albuquerque, New Mexico, 6-10, January (1991)

[8] Bi, Q.C, Chen, T.K., Luo,Y.S., Zheng J.X., "Heat transfer characteristics in helical coil tubes", Experimental Heat Transfer, Fluid mechanics and thermodynamics (1997)

[9] Thermal Hydraulics Group "RELAP5/MOD3 Code Manual Volume IV : Code Structure, System Models, and Solution Methods", chapter 4, Scientech, Inc. , NUREG/CR-5535 (1998)

[10] Zukauskas, A.A., "Heat transfer from tubes in cross flow",Adv. Heat Transfer Academic, **8**, 93-106 (1972)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

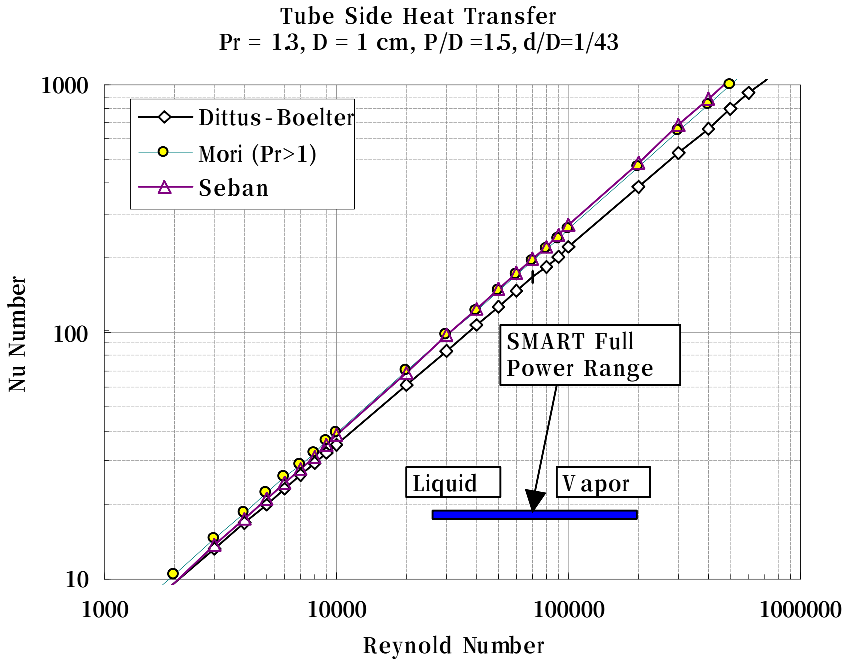

그림 1. **헬리컬 튜브내에서의 열전달상관식의 비교**

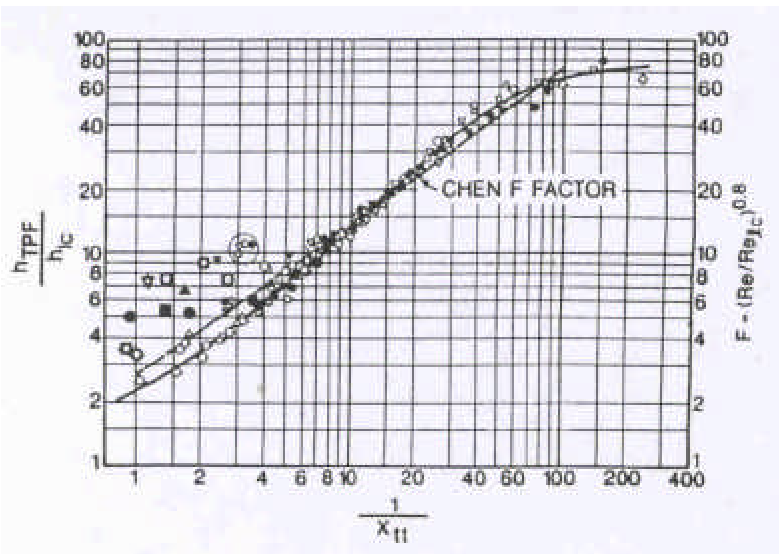

그림 2. **헬리컬 튜브의 열전달 실험자료와** Chen **상관식의**

F **계수와의 관계** (Owhadi, 1968, from refernce [6])

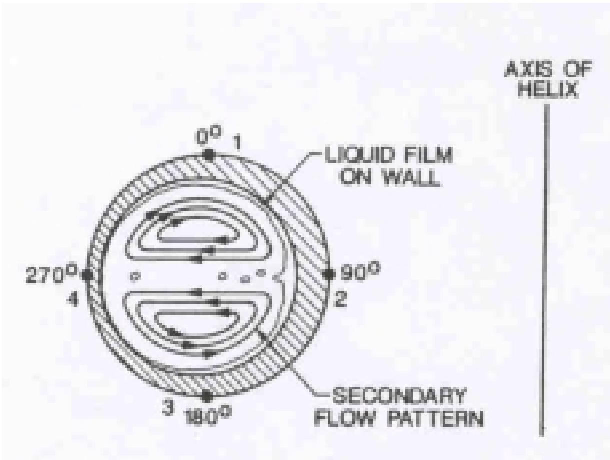

그림 3. 헬리컬 튜브내에서 제안된 이상유동 양상
(Owhadi , 1968, from reference [6])

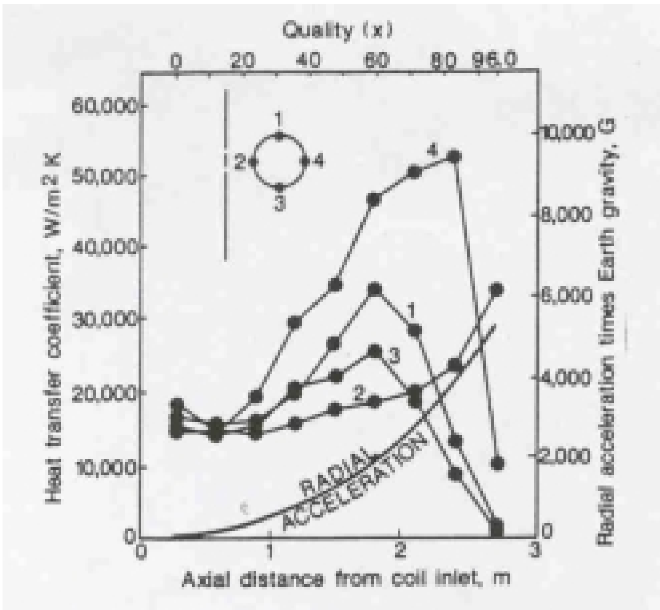

그림 4. 헬리컬 튜브내에서 방위각 위치에 따른 길이에 따른
열전달 변화율 (Owhadi, 1966, from reference [6])

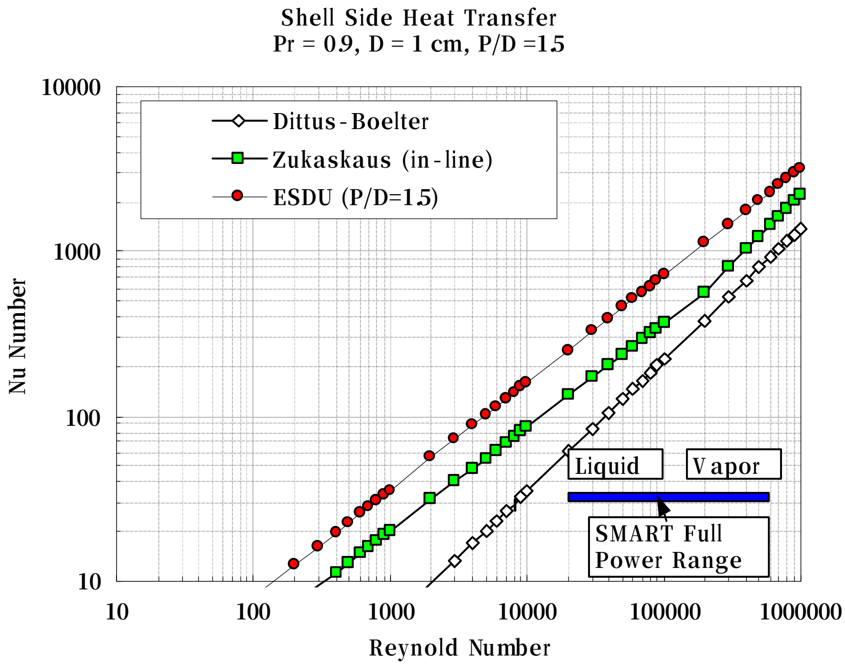

그림 5. 헬리컬 증기발생기 Shell 측에서의 열전달상관식의 비교

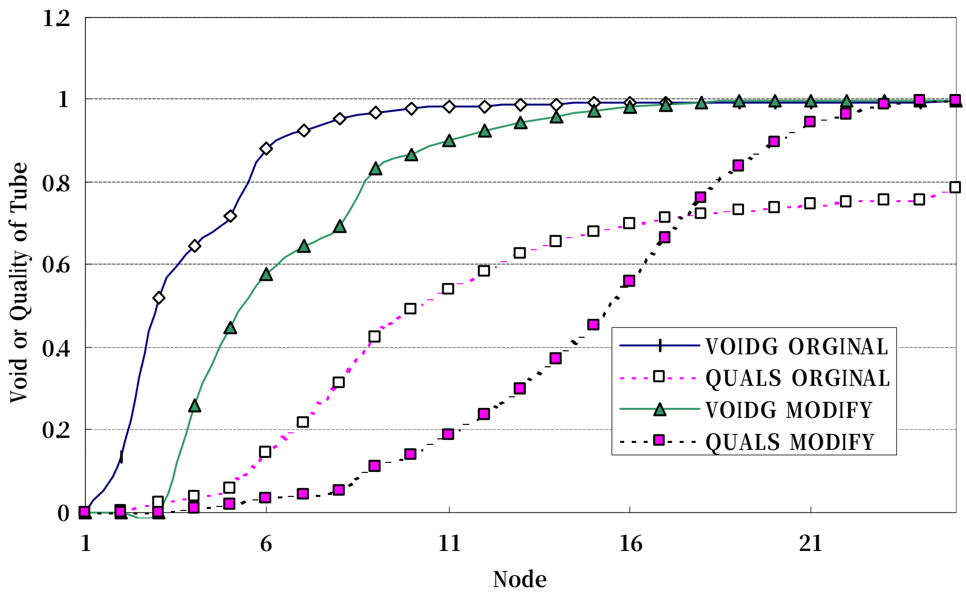

그림 6. SMART 헬리컬 튜브에서의 보이드 및 증기건도 비교

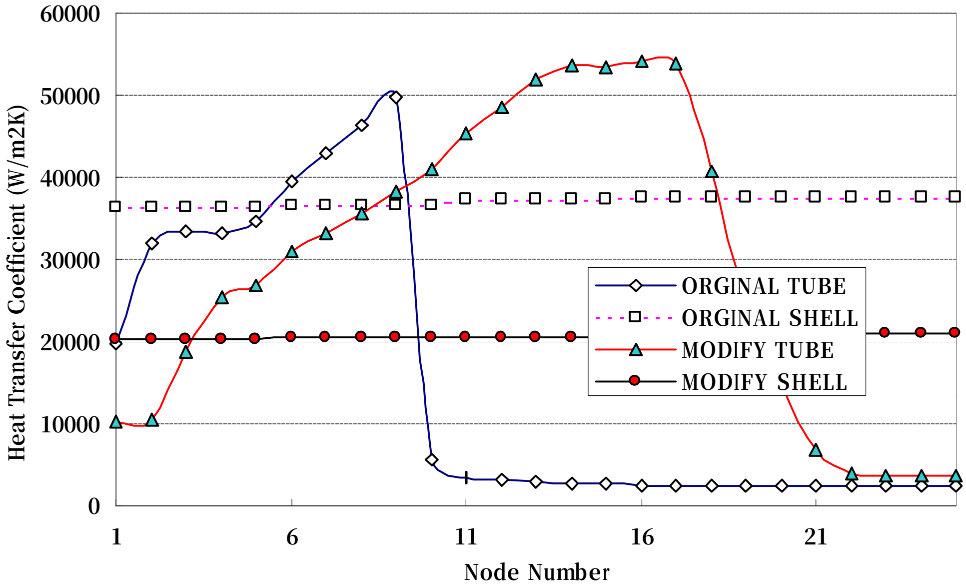

그림 7. SMART 헬리컬 증기발생기에서의 열전달계수의 비교

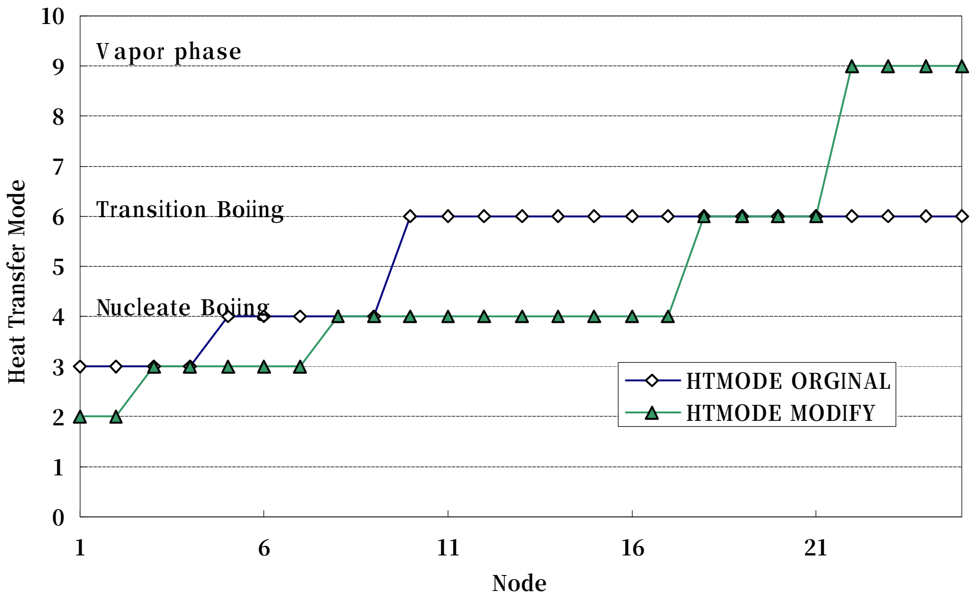

그림 8. SMART 헬리컬 튜브에서의 열전달모드의 비교