

나선형 와이어가 삽입된 튜브 안의 초임계압 열전달 실험

Heat transfer experiments in a wire-inserted tube at supercritical pressures

KAERI

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009 년도 “초임계압수냉각로 기술성과 안전성 평가 연구”
과제의 기술보고서로 제출합니다.

2009. 7.

과 제 명: 초임계압수냉각로 기술성과
안전성 평가 연구

주 저 자: 배 윤 영

공 저 자: 김 환 열

유 태 호

KAERI

요 약 문

I. 제 목: 나선형 와이어가 삽입된 튜브 안의 초임계압 열전달 실험

II. 연구의 목적 및 필요성

KAERI가 개념적으로 설계한 초임계압수냉각로(SCWR)의 노심은 기존 경수로보다 더 밀집된 핵연료집합체 개념을 채택하고 있어 부수로의 수력직경이 6.5 mm 정도로 매우 좁다. 좁은 부수로에는 기존의 경수로에서 채택하고 있는 복잡한 형상의 spacer grid 대신에 나선형 wire가 적합할 수도 있다. 이러한 경우를 대비하여 내경 6.32 mm Inconel 625 튜브 안에 스프링 강재의 직경 1.3 mm 나선형 와이어를 삽입하여 이 와이어가 초임계압 열전달에 미치는 영향을 평가하였다.

III. 연구의 내용 및 범위

실험은 임계압력 7.38 MPa의 105%와 110%에서 질량유속 400과 1200 kg/m²sec와 열유속 30~90 kW/m²의 범위에서 수행하였다. 입구 온도가 5℃일 때 해당하는 입구 레이놀즈 수는 $2.5 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ 이다.

IV. 연구결과

와이어가 장착된 튜브 안의 열전달은 단순한 튜브의 경우에 비해 유사임계온도 부근에서 거의 2배로 증가하였다. 이 증가 효과는 유사임계온도로부터 멀어질수록 감소하였다. 열전달 상승효과는 와이어 접촉면에서부터 와이어 직경의 40 - 60 배 거리의 하류까지 지속되었다. 튜브 벽면온도는 와이어 접촉지점 사이의 약 절반에 해당하는 거리까지 감소하다가 이후에는 증가하였다.

V. 연구결과의 활용계획 및 건의사항

본 연구결과는 초임계압수냉각로의 노심개념을 정립하는 데 필수적인 노심열수력 계산에 유용한 자료로 활용이 가능할 것이다.

SUMMARY

I . Project Title: Heat transfer experiments in a wire-inserted tube at supercritical conditions

II . Objective and Importance of the Project

One of the experiments was concerned with a sub-channel of a conceptual core concept developed at KAERI where the hydraulic diameter was 6.5 mm. The sub-channel of the currently available core concept is much smaller than that of the conventional PWR, and naturally a helical wire was considered as one of the candidates for a spacer or turbulence generator. The subchannel was simulated by a commercially available Inconel 625 tube of 6.32 mm ID with a helically-coiled wire insert of 1.3 mm OD. The effect of wire was investigated.

III. Scope and Contents of Project

The test pressures are 7.75 and 8.12 MPa corresponding to 1.05 and 1.1 times the critical pressure of CO₂, respectively. The mass flux and heat flux, which were in the range of 400 ~ 1200 kg/m²s and 30 ~ 90 kW/m², were changed at a given system pressure. The corresponding Reynolds numbers are 2.99×10^4 and 1.30×10^5 .

IV. Result of Project

The heat transfer was enhanced by almost twice in the vicinity of pseudo-critical temperature and the effect was attenuated as the temperature moves away from the pseudo-critical temperature. The test results revealed that the wire effect was sustained in the downstream up to 40-60 times the wire diameter. The temperature decreases in the first half of the span between contact points and it increases in the second half of the span.

V . Proposal for Applications

The test result can be valuable information for the core thermal-hydraulics calculation to support establishment of core concept, which may adopt wire type spacer due to the relatively narrow sub-channels.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Previous studies	4
Chapter 3 Test	7
1. Test facility	7
2. Test section	8
3. Test procedures and scope	12
4. Calculation of heat transfer coefficients	13
5. Accuracy of measuring instruments	13
Chapter 4 Test Results	15
1. Comparison of test results between wired tube and plain tube	15
2. Effect of wire	20
3. Effect of heat flux	23
4. Effect of mass flux	24
5. Effect of pressure	24
6. Evaluation of heat transfer coefficient	26
Chapter 5 Proposal for Application	29
Nomenclature	30
Bibliography	33

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	4
제 3 장 실험의 장치와 절차 및 범위	7
1. 실험장치	7
2. Test section	8
3. 실험절차와 범위	12
4. 열전달계수 계산	13
5. 측정계기 정밀도	13
제 4 장 실험 결과	15
1. 와이어가 삽입된 튜브와 정상 튜브 실험결과 비교	15
2. 와이어의 영향	20
3. 열유속의 영향	23
4. 질량유속의 영향	25
5. 압력의 영향	25
6. 열전달계수의 평가	27
7. 결론	30
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	31
기호설명	32
참고문헌	34

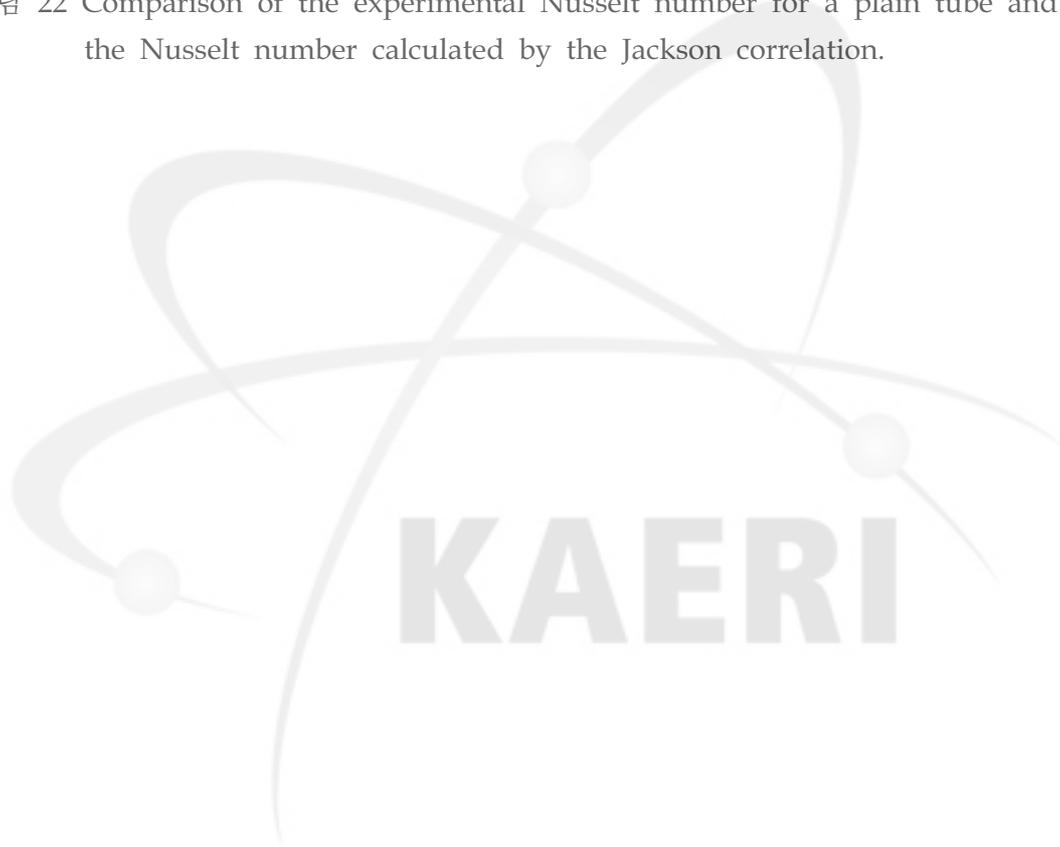
표 차례

표 1 축방향 및 원주방향 열전대 부착 위치	9
표 2 Test matrix	12
표 3 계측기 정밀도 및 측정범위	14

그림 차례

그림 1 Comparison of physical properties of water, CO ₂ , and HCFC22 at	2
그림 2 Core design concept of Super LWR	3
그림 3 Core design concept of KAERI	3
그림 4 Effect of swirl on the wall temperature profile (Shiralkar와 Griffith)	5
그림 5 Comparison between results for upward and downward flow (Shiralkar와 Griffith)	5
그림 6 Wall temperature and heat transfer coefficient for upward and downward flow	5
그림 7 Comparison of the experimental Nusselt numbers of the square annular flow geometry with and without helical wire-wrapped spacer	6
그림 8 Schematic diagram of the test facility SPHINX	7
그림 9 실험장치 전경 사진	8
그림 10 Test section detail	10
그림 11 Helical spring insert configuration	10
그림 12 Test section과 열전대 부착 위치 및 삽입된 와이어의 모양 사진(X-ray로 확인) 일부 .	11
그림 13 Comparisons of wall temperatures and heat transfer coefficients in a carbon dioxide between a plain tube and a tube with wire, ID=6.32 mm (wire d=1.3 mm) at P=7.75 MPa.	18
그림 14 Comparisons of wall temperatures and heat transfer coefficients in a carbon dioxide between a plain tube and a tube with wire, ID=6.32 mm (wire d=1.3 mm) at P=8.12 MPa.	19
그림 15 Wall temperature distribution along the spans with narrowly spaced thermocouples.	22

그림 16	Computed inner wall temperature in annulus with helical wire. ³¹	23
그림 17	열유속의 영향	24
그림 17	열유속의 영향 (계속)	25
그림 18	질량유속의 영향	26
그림 19	압력의 영향	26
그림 20	Comparison of the experimental Nusselt number and the Dittus-Boelter Nusselt number.	27
그림 21	Comparison of the experimental Nusselt number for a wired tube and the Nusselt number calculated by the Jackson correlation.	28
그림 22	Comparison of the experimental Nusselt number for a plain tube and the Nusselt number calculated by the Jackson correlation.	29



제 1 장 서 론

1950년대에 화력발전소의 열효율을 극대화하기 위해 보일러의 압력을 임계압 (22.1 MPa) 이상으로 올리고 이에 따라 온도도 올리기 위해 보일러 튜브 안의 초임계압 열전달에 대한 많은 연구가 수행되었다. 이후 이를 원자력발전에도 적용하기 위한 연구가 1950 - 60년대에 미국과 러시아에서 수행되었으나 고온내부식성 재료의 확보 문제를 포함한 제반 사정으로 연구가 중단되었다. 1990년대 초 일본의 도쿄대학에서 초임계압수냉각로(SCWR)에 대한 개념연구가 재개되어 열중성자 초임계압수냉각로와 고속중성자 초임계압수냉각로에 대한 연구를 수행하고 있다. EU¹와 캐나다²와 중국³도 일본⁴과 함께 GEN IV International Forum (GIF)을 중심으로 SCWR에 대한 연구를 본격적으로 수행하고 있다.*

노심에 관련되는 열수력 현상은 초임계압열전달과 초임계압유동불안정성과 임계유속 등이며 이러한 현상에 대한 정확한 이해와 예측방법의 확보는 SCWR의 개념을 완성하기 위해 매우 중요하다. 이 중에서 노심에서 일어나는 열전달의 정확한 예측은 노심핵연료의 건전성을 담보하기 위해 무엇보다도 중요하다. 아임계압에서 적용되는 기존의 열전달 상관식은 밀도를 제외하고는 온도에 무관하게 일정한 물성(thermodynamic and transport properties)을 가정하고 있고 무차원 수도 벌크온도나 벌크와 벽면온도의 평균을 기준으로 하고 있으므로 초임계압에서와 같이 모든 물성이 온도에 따라 급격하게 변화하는 경우(그림 1)의 열전달량을 정확히 예측할 수 없다. 초임계압에서는 벽면온도에서의 물성이 유동장에 지배적인 영향을 미치며 이에 따라 열전달도 영향을 받게 된다. 급격한 물성의 변화로 임계열유속과 유사하지만 정도는 매우 약한 열전달열화현상(heat transfer deterioration or impairment)이 일어나기도 한다. 기존의 초임계압 열전달에 관한 논문들은 대부분 초임계압 화력발전소의 보일러 튜브를 다루고 있으므로 내경이 10 mm를 넘는 비교적 대구경인 튜브에 대한 열전달에 관한 것이며 이를 기존 경수로의 부수로보다 매우 좁은[†] SCWR 노심의 부수로의 열전달 예측에 그대로 적용할 수 있는가는 의문의 여지가 있다. 따라서 좁은 유로에서 일어나는 초임계압열전달 현상을 정확히 이해하고 예측방법을 찾아내기 위한 연구가 요구된다.

* 한국의 참여는 현재 유동적임.

† 유체의 정압비열은 초임계압 부근에서 매우 크고 노심에서의 온도(엔탈피) 변화도 크다. 따라서 $Q=mc_p\Delta h$ 로 표시되는 노심에서 전달되는 열량은 적은 유량으로도 동일한 열량을 운반할 수 있다. 그러므로 효과적인 대류 열전달량을 확보하기 위해서 적절한 유속이 필요하므로 부수로는 좁아진다.

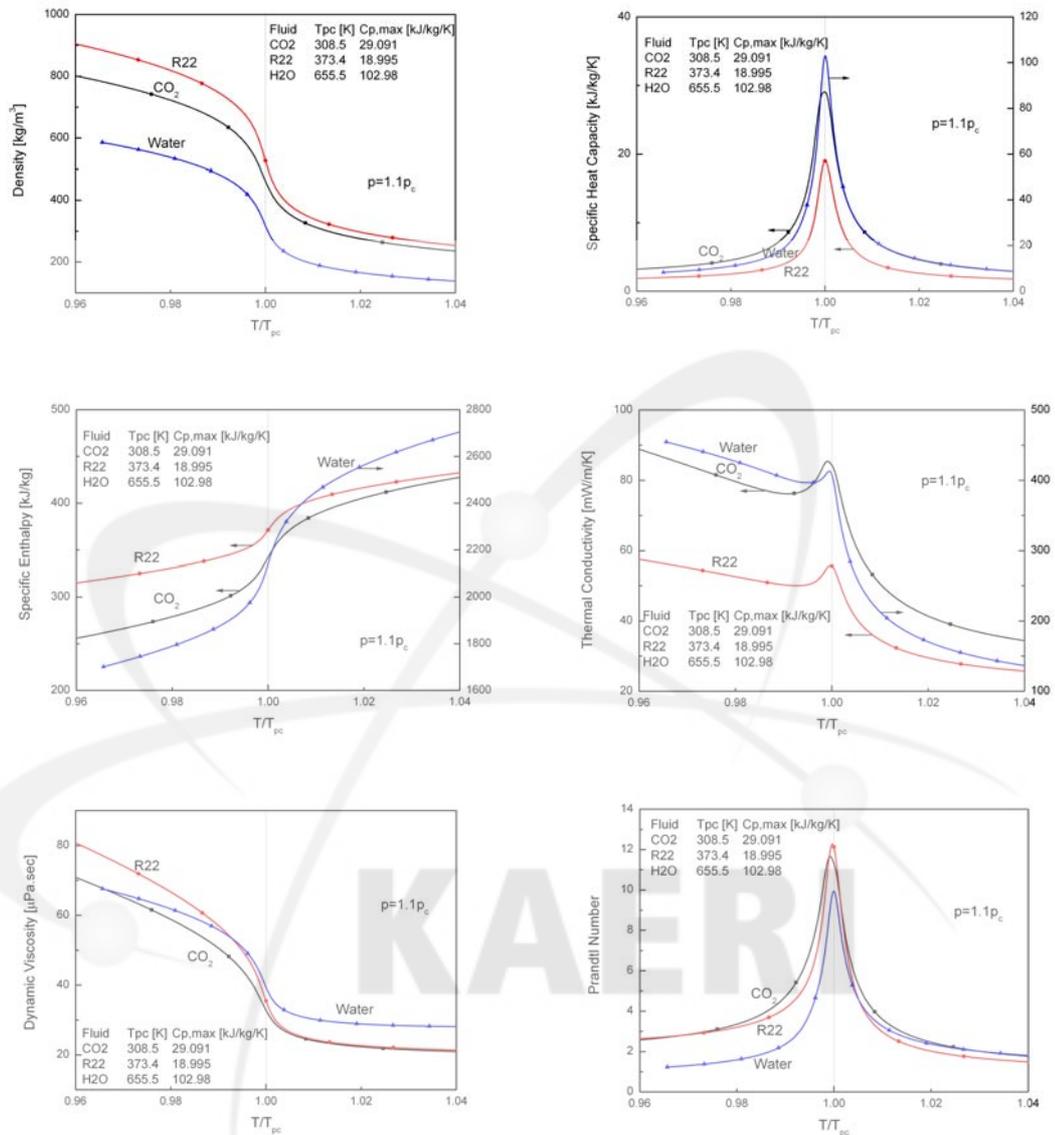


그림 1 Comparison of physical properties of water, CO₂, and HCFC22 at $p = 1.1p_{cr}$

일본의 도쿄대학에서 연구 중인 열중성자 SCWR인 Super LWR 핵연료집합체 개념⁵(그림 1) 부수로의 수력직경은 약 4.4 mm이며 한국의 SCWR 핵연료집합체 개념^{6,7}(그림 2)의 부수로의 수력직경은 6.5 mm이다. 이와 같이 매우 좁은 부수로에는 기존 경수로에서 사용하는 것과 같은 복잡한 모양보다는 가느다란 나선형 와이어가 spacer grid로 더 적합할 수도 있다.

수력직경 6.5 mm 튜브에서 열전달 데이터를 확보하기 위해 내경이 이와 가장

유사하고 시장에서 바로 구입할 수 있는 내경 6.32 mm Inconel 튜브에 대해 상향 유동실험은 이미 KAERI에서 이미 수행하였다.⁸ 와이어의 효과를 평가하기 위해 이 시편의 내부에 직경 1.3 mm의 가느다란 나선형 와이어를 삽입하여 실험을 수행하고 이 결과를 이미 수행한 와이어 없는 6.32 mm 튜브에 대한 실험결과와 비교하였다. 사각형 격자 핵연료집합체의 부수로를 모사하기 위해서는 적어도 4봉의 가열봉 주위의 열전달을 측정해야 하지만 초보적인 단계로는 튜브 또는 단일 가열봉에 대한 실험을 수행하여 기초적인 열전달 자료를 확보하는 것이 일반적이다. 여기서도 제반 여건을 고려해 부수로를 가장 실험이 용이한 튜브로 모사했으며 매질은 물 대신에 초임계압 상태에서 물과 매우 유사한 성질을 보이는 이산화탄소를 사용하였다.

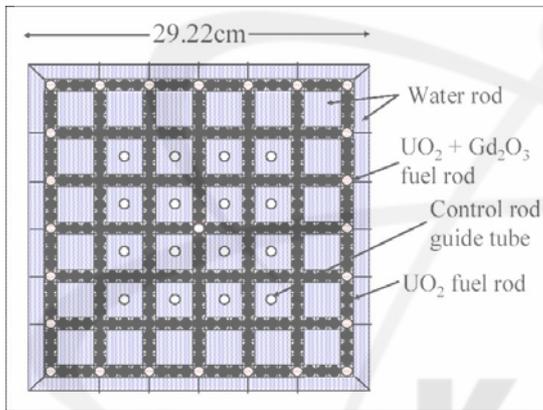


그림 2 Core design concept of Super LWR (Yamaji et al.⁵)

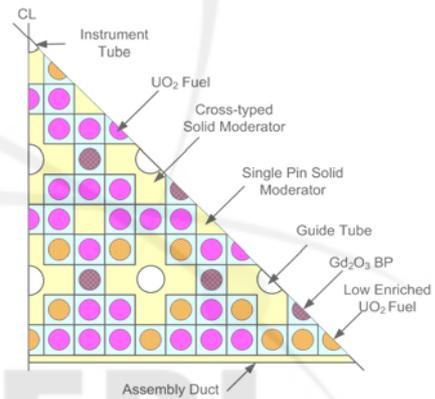


그림 3 Core design concept of KAERI (Bae et al.⁷)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

초임계압열전달 실험은 물^{9,10,11,12}, 이산화탄소^{13,14,15,16}, Freon^{17,18} 등 다양한 매질에 대해 많은 연구가 수행되었다. 국내에서도 KAERI에 설치되어 있는 이산화탄소를 매체로 이용하는 초임계압 열전달 실험장치 SPHINX를 활용하여 다양한 튜브와 환형유로에 대해 실험이 수행되었다.^{19,20,21,22,23,24} 그러나 모두 벽면이 매끄러운 경우에 한정되었으며 rib이나 wire가 장착된 경우에 대한 연구는 매우 드물며 참고할 만한 논문도 1960년대 말이나 1970년대 초에 발표된 것들이다.

Ankudinov와 Kurganov²⁵는 내경 8 mm 튜브 안에 직경 0.2 - 0.6 mm의 나선형 와이어를 피치 5 - 40 mm로 삽입하여 이들이 열전달 촉진에 미치는 영향은 연구하였다. 열전달 매질은 CO₂이다. 연구범위는 유량이 2100 - 3200 kg/m²s로 레이놀즈 수로 환산하면 $2.3 \times 10^5 \sim 3.4 \times 10^5$ 이다. 이들의 연구결과에 의하면 삽입된 와이어는 상당한 수준의 열전달 촉진 효과와 열전달열화 저지효과를 보였다.

Shiralkar와 Griffith^{26,27}는 내경 6.22 mm (1/4 inch)와 3.18 mm (1/8 inch)의 스테인리스 튜브 안에 0.34 mm (0.0135 inch) 두께 (폭은 알려지지 않음)의 인코넬 박편을 삽입한 시편을 이용하여 CO₂로 전달되는 열전달 실험을 수행하였다. 이 실험에서 레이놀즈 수의 범위는 $2.67 \times 10^5 - 8.35 \times 10^5$ 이었다. 참고로 KAERI에서 수행한 실험의 레이놀즈 수 (입구 기준)는 $1.8 \times 10^4 - 7.5 \times 10^4$ 이었다.[‡] 튜브 안에 부착된 인코넬 박편의 영향은 그림 4와 같다. 이들의 실험결과에서는 박편이 있는 경우와 없는 경우의 유량이 달라 직접 비교하기는 어려우나 박편이 있는 경우에 벽면 온도의 피크가 완화된 것으로 보아 어느 정도 영향이 있는 것으로 판단된다. 그림 5는 상향유동과 하향유동에서 열전달을 비교한 이들의 연구결과인데 여기서는 열전달열화가 상향유동 조건에서만 아니라 하향유동에서도 일어났다.²⁷ 이는 유량에 비해 열유속이 매우 커서 일어나는 현상으로 앞으로 주목하여 연구해 보아야 할 분야이다. Watts와 Chou의 실험결과나²⁸ Kim과 Bae의 실험결과²⁹(그림 6)에서는 일정한 조건의 상향유동에서 나타나는 열전달열화가 같은 조건의 하향유동에서는 일어나지 않았다. Shiralkar와 Griffith가 turbulence generator로 사용한 박편의 두께는 매우 얇아서 (박편 두께/내경=0.34/3.18=0.107) 핵연료봉 사이의 spacer grid의 영향을 보기에는 어렵다고 판단된다.

Ackerman³⁰은 ribbed tube와 plain tube에 대해 물을 매체로 한 실험을 수행하여 ribbed tube에서 열전달 열화가 억제되는 현상을 관찰하였다.

‡ 핵연료집합체에 냉각재가 유입되는 입구의 레이놀즈 수 약 50,000을 포함시키기 위한 실험 수행 범위이다.

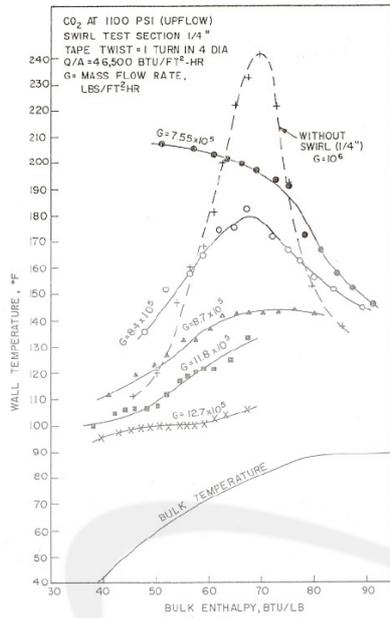


그림 4 Effect of swirl on the wall temperature profile (Shiralkar and Griffith²⁷)

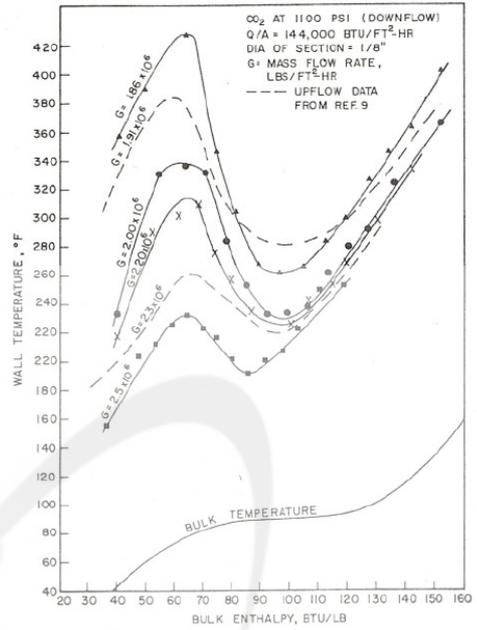


그림 5 Comparison between results for upward and downward flow (Shiralkar and Griffith²⁷)

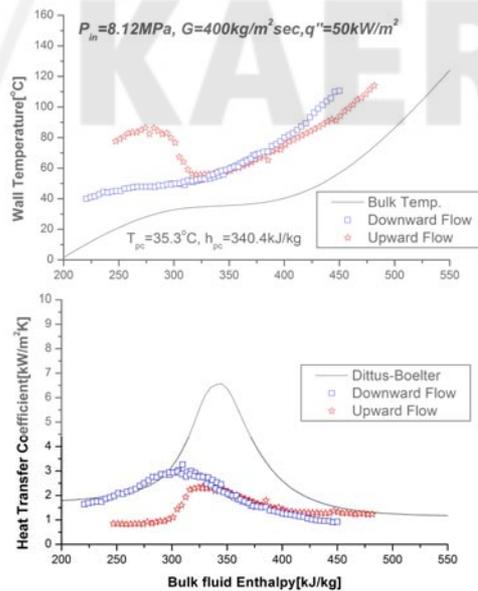


그림 6 Wall temperature and heat transfer coefficient for upward and downward flow (Kim and Bae²⁹).

Li 등³¹ 은 2.5 mm 직경의 와이어로 pitch 200 mm로 감싼 외경 10 mm 가열 봉과 한 변의 길이가 15 mm인 사각형 단면의 유로가 만드는 부수로를 흐르는 물로 전달되는 열전달에 대한 실험을 수행하였다. 예상대로 Dittus-Boelter 상관식은 실험 데이터를 잘 예측하지 못하였다. 또한 Jackson과 Hall의 상관식³²은 실험 데이터를 과소 예측한다고 발표하였다.§ 그림 7과 같이 제시한 helical wire의 영향을 보면 +25%의 열전달 증가나 -15%의 열전달 감소를 보이고 있다. 이들은 와이어가 열전달에 긍정적인 효과를 보이며 열전달 열화의 발생도 지연시킨다고 결론을 내리고 있다.

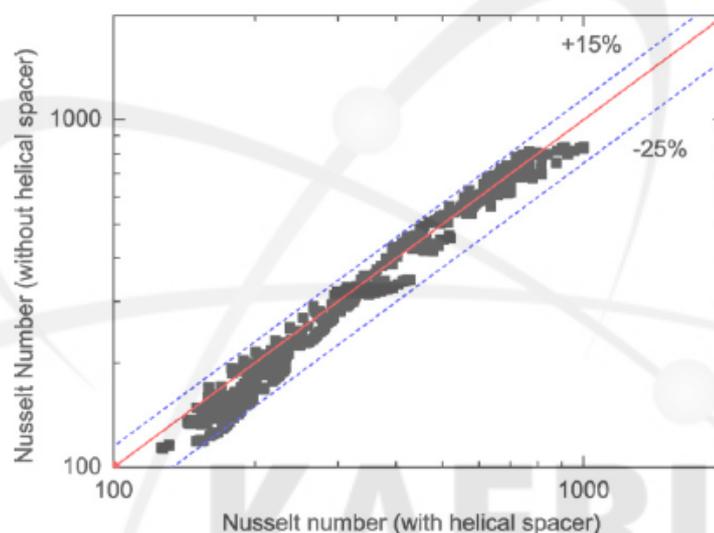


그림 7 Comparison of the experimental Nusselt numbers of the square annular flow geometry with and without helical wire-wrapped spacer (Li et al.³¹).

위에서 본 바와 같이 초임계압 상태에서 turbulence generator가 삽입된 튜브 안의 열전달에 관한 연구는 매우 한정적이며 본 연구에서 목표로 하는 연구 범위에 부합되는 연구는 없었다. 따라서 기존의 문헌연구로 KAERI 노심개념의 부수로에서 wire type spacer grid가 초임계압열전달에 미치는 영향을 분석하기는 어려우며 적절한 모델링에 대한 별도의 실험적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

§ Reference 32의 공저자인 J. D. Jackson은 최근 이 논문에서 제시한 상관식의 계수를 강제대류열전달의 경우에 0.0183에서 0.022로 바꾸어 제시하고 있다.

제 3 장 실험의 장치와 절차 및 범위

1. 실험장치

그림 8은 초임계압 CO₂ (임계압력 7.38 MPa, 임계온도 31.06℃) 열전달 실험장치 (SPHINX) 개략도이다. SPHINX의 설계압력은 12.0 MPa이며, 루프 내의 CO₂는 공기로 작동하는 압축기를 통하여 실험에 필요한 압력까지 가압이 된다. 열교환기 출구에서 test section까지 CO₂는 액체와 유사한 초임계 유체상태를 유지하고 test section의 가열영역을 지나면서 기체와 유사한 초임계 유체상태로 변하게 된다. 그 후로부터 CO₂는 열교환기 입구까지 기체와 유사한 초임계 유체상태를 유지한다. Single tube 실험을 위해 용량 6 kW 및 12 kW의 두 개의 DC power supply가 사용되었다. Single rod 실험을 위해 AC power supply가 사용되었는데, 용량은 단상인 경우 14.4 kW이며 삼상인 경우 64 kW이다. 가열된 CO₂는 총 열제거 능력이 80 kW인 나선형 열교환기에 의해 냉각이 된다. 필요한 유량의 CO₂를 순환시키기 위하여 두 대의 기어식 펌프를 설치하였다. 작은 펌프는 용량이 250 kg/hr이고 큰 펌프는 용량이 1500 kg/hr이다. 펌프 출구에 설치된 질소 충전식 accumulator는 루프 내 압력변화를 완화시키는 역할을 한다. Test section으로 들어가는 CO₂의 온도는 용량이 20 kW인 예열기에 의해 일정한 온도로 유지된다. 예열기와 test section 사

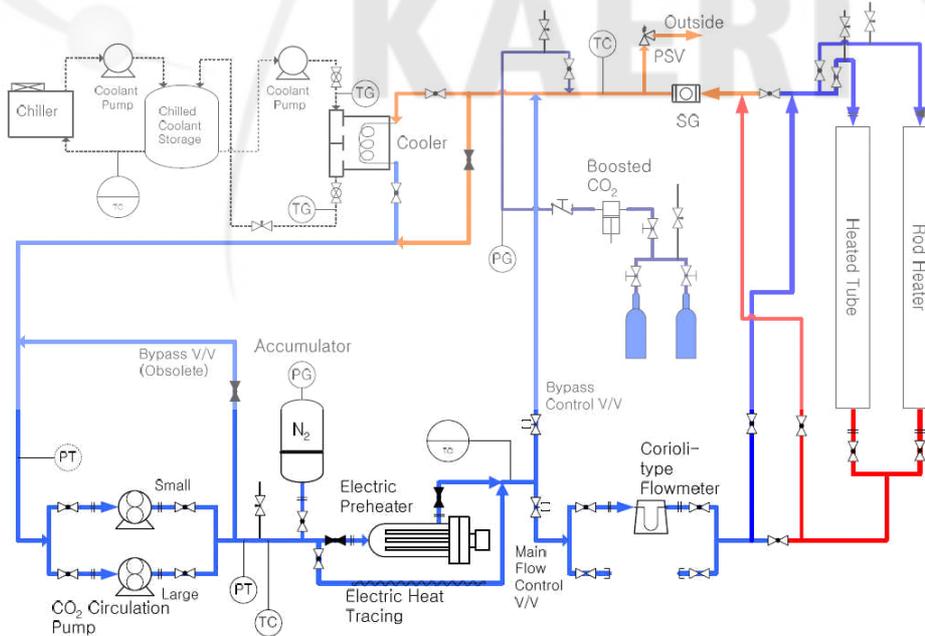


그림 8 Schematic diagram of the test facility SPHINX



그림 9 실험장치 전경 사진

이에는 Corioli type 질량유량계를 설치하였다.

Test section에서 측정된 자료는 PC-based DAS를 통해 가공하여 저장하였다. DAS는 VXI-based multiplexer와 multimeters로 구성되어 있으며 64 channel로 3000 Hz의 속도로 자료를 받을 수 있다.

실험장치의 가로x폭x높이는 5.5m x 4m x 6m이다. 그림 9는 실험장치의 전경이다.

2. Test section

KAERI에서 개념설계한 SCWR 노심의 부수로 수력직경은 6.5 mm이므로 이를 단순하게 모사하기 위한 test section은 규격제품인 내경 6.32 mm, 두께 1.6 mm Inconel 625 튜브로 만들었다 (그림 10). Inconel 625는 전기저항이 크고 열팽창률이 작아 선택하였다. Test section에는 DC power supply를 사용하여 test section을 직접 전기로 가열함으로써 power가 공급된다. Test section 양끝에는 플랜지가 달려 있고 플랜지 양끝 사이의 길이는 3000 mm이다. 양쪽의 플랜지에는 두께 10 mm의 Teflon을 설치하여 전기적으로 절연하였다. 튜브 안에 스프링 강으로 제작된 내경 1.3 mm 스프링을 pitch 100 mm로 삽입하였다 (그림 11). 삽입된 와이어의 정확한 위치를 X-ray로 관측한 결과 와이어 피치의 오차는 5 mm 이내이었다. 상향유동의 경우 와이어는 시편 하단에서 보아 시계방향으로 회전하며 유동방향으로 진행한다. 와이

어의 영향을 적절히 관찰하기 위해 하부 플랜지에서 700 mm 떨어진 곳부터 상부 플랜지에서 300 mm 떨어진 곳까지 총 2000 mm 길이의 튜브 외벽에 적절한 간격으로 총 41개의 K형 열전대를 그림 12와 같이 부착하여 튜브 외벽 온도를 측정하였다. 열전대 #18과 #33은 기능이 정지된 것이다. DC power supply 단자는 열전대 #1 상류 510 mm와 열전대 #41 하류 180 mm에 부착하여 열전대 #1의 위치에서는 열적으로 충분히 발달된 유체가 흐르게 하였다. 총 가열 길이는 2650 mm이다. 여기서 phase angle은 시편을 아래에서 올려다보았을 때 반시계방향으로 측정한다. 열전대 #1의 부착지점에서 와이어가 튜브와 접촉하는 지점을 phase angle 0°로 정의하였다. 열전대 #1-6와 #36-41은 phase angle 90°에 100 mm 간격으로 부착하였고, 열전대 #7과 #28-35는 phase angle 0°에 100 mm 또는 50 mm 간격으로 부착하였다. Phase angle 90°의 위치는 와이어와 튜브의 접촉점으로부터 약 15 mm 하류이다. 열전대 #7과 #28 사이에는 와이어의 영향을 세밀하게 분석하기 위해 열전대를 20 mm 또는 5 mm 간격으로 부착하였다. 열전대 #31은 접촉면에 부착된 #30과 180°의 phase angle을 갖게 설치하여 같은 높이에서 접촉면과 접촉면으로부터 가장 머리 떨어진 지점과의 차이를 보고자 하였다. 열전대의 부착위치를 표 1에 정리하였다.

표 1 축방향 및 원주방향 열전대 부착 위치

T/C #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12*	13	14	15
L ⁺ , mm	0	100	100	100	100	100	50	20	20	20	20	20	5	5	10
Phase angle (degree)	90	90	90	90	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T/C #	16	17	18	19	20	21*	22	23	24	25	26	27	28*	29	30
L, mm	20	20	20	10	5	5	5	5	10	20	20	20	20	50	48.5
Phase angle (degree)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0
T/C #	31*	32	33*	34	35	36	37	38	39	40	41				
L, mm	1.5	50	50	1.5	48.5	100	100	100	100	100	100				
Phase angle (degree)	180	90	270	90	90	90	90	90	90	90	90				

주 1. *로 표시된 열전대는 와이어와 튜브가 접촉하는 지점에 부착된 것임.

주 2. *표시는 직전 열전대와의 거리.

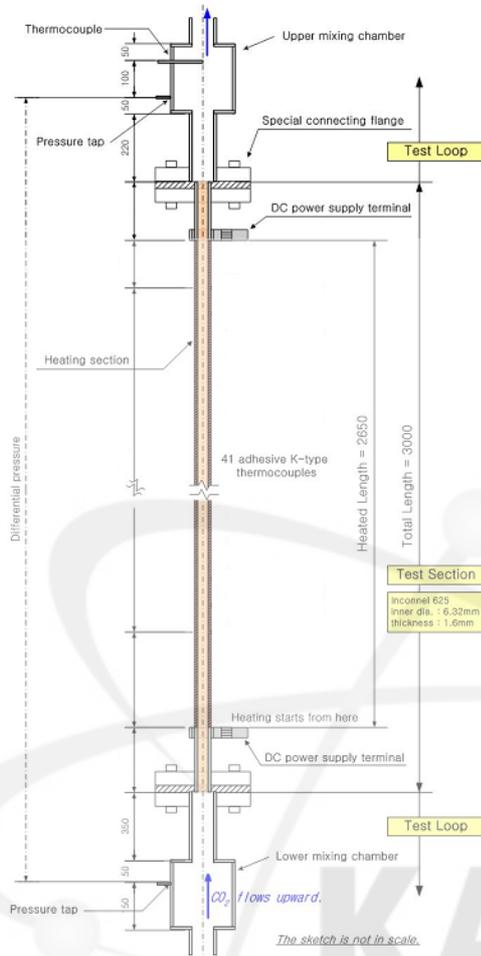


그림 10 Test section detail

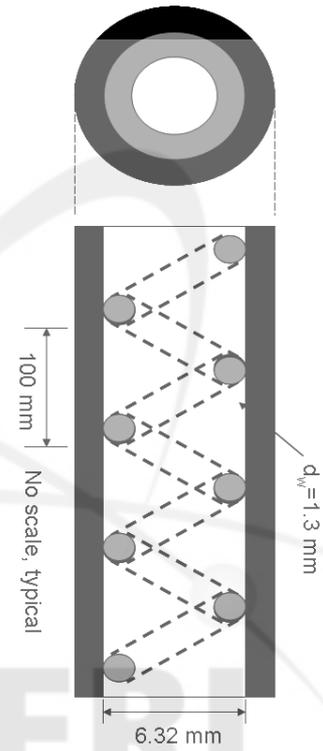


그림 11 Helical spring insert configuration

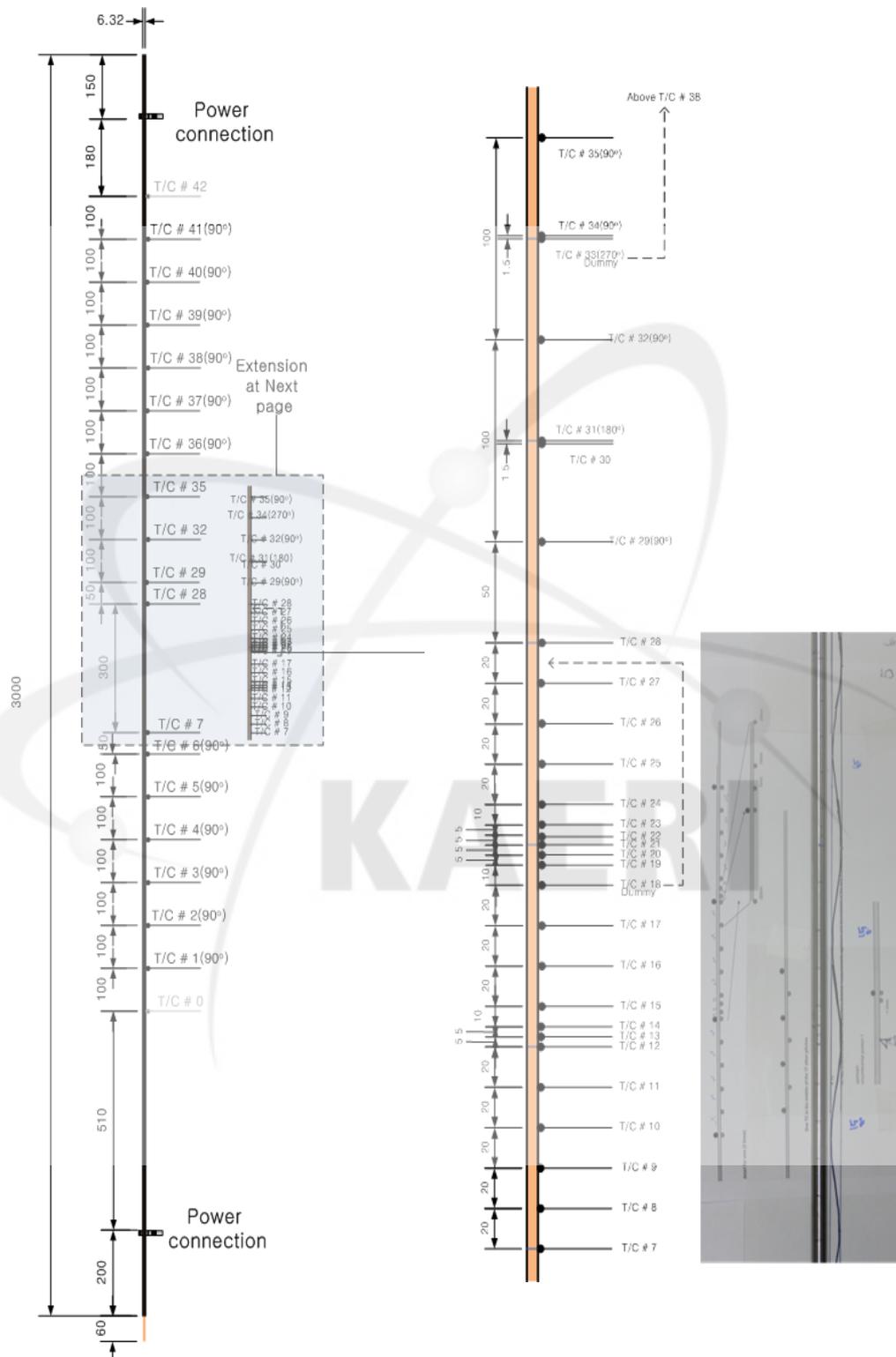


그림 12 Test section과 열전대 부착 위치 및 삽입된 와이어의 모양 사진 (X-ray로 확인) 일부 .

3. 실험절차와 범위

실험은 CO₂ 임계압력 7.38 MPa의 105%와 110%에 해당하는 7.75 MPa과 8.12 MPa에 대해 수행하였다. 질량유속 400과 1,200 kg/m²sec 두 경우와 열유속 30, 50, 70, 90 kW/m²의 네 경우를 적절히 조합하여 실험을 수행하여 각 변수의 영향을 분석하였다. 유동은 모두 상향유동이다. 비교를 위해 시험 조건은 스프링 없이 수행한 6.32 mm 튜브 실험의 실험조건과 동일하게 유지하였다. 실험조건은 표 2와 같다. 입구온도가 5℃일 때 입구 레이놀즈 수는 2.5 x 10⁴ 와 7.5 x 10⁴의 범위에 있으며 이 범위는 현재 KAERI가 제안한 노심개념이나 일본의 Super LWR 노심개념에서 부수로를 흐르는 냉각재의 노심 입구에서의 레이놀즈 수인 50,000을 포함한다. 입구온도는 5 ~ 37℃에서 변화시켜 수행했으며 이는 power supply 용량의 제한으로 한번의 실험이 원하는 엔탈피 범위를 다 포함할 수 없는 경우에 입구온도를 올려 실험을 더 수행하고 이 결과들을 이어 붙여야 하기 때문이다. 플랜지의 개스킷을 고온으로부터 보호하기 위해 출구의 벌크온도를 100℃ 이내로 또는 벽면온도를 160℃ 이내로 제한하였다. 모든 경우의 실험에서 발생할 수 있는 열전달열화를 관찰하기 위해 벌크온도가 임계온도에 도달하는 지점이 시편 안에 (가능하면 시편 중앙 부근에) 존재하도록 하였다.

표 2와 같은 실험조건을 조합하여 총 49개의 조건에서 실험을 수행하고 각 조건에서 41개씩 총 2,009개의 데이터를 얻었다.

표 2 Test matrix

Fluid	CO ₂
Flow direction	Vertical, Upward
Inside diameter D , mm	6.32 ($t=1.60$)
Wire diameter d_w mm	1.30
Pressure P Mpa (P/P_{cr})	7.75 (1.05) and 8.12 (1.1)
Inlet Temperature, °C	5 ~ 37
Mass flux G , kg/m ² sec	400, 1200
Heat flux q , kW/m ²	30 ~ 90
Inlet Reynolds number	2.5 x 10 ⁴ ~ 7.5 x 10 ⁴ (입구온도 5℃일 때)

4. 열전달계수 계산

튜브에 가해지는 열유속은 식 (1)과 같이 DC power supply에서 튜브로 공급되는 power를 전열면적으로 나눈 값이다.

$$q = \frac{\dot{Q}}{\pi D_i L_h} = \frac{V_{ps} I_{ps}}{\pi D_i L_h} \quad (1)$$

설치된 41개의 열전대는 튜브 외벽온도를 측정한다. 열전달계수를 산정하는데 필요한 튜브 내벽온도는 균일체적가열을 가정하여 식 (2)로 계산된다.

$$T_{w,i} = T_{w,o} + \frac{\dot{q}_v}{4k_w} \left[\left(\frac{D_o}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right] - \frac{\dot{q}_v}{2k_w} \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \ln \frac{D_o}{D_i} \quad (2)$$

여기에서 체적가열율은 식 (3)과 같다.

$$\dot{q}_v = \dot{Q} / \left[\frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) L_h \right] \quad (3)$$

열전달계수는 측정된 튜브의 내벽온도, 계산된 CO₂의 벌크온도, 그리고 튜브에 가해지는 열유속에 의해 식 (4)로 계산된다.

$$h = \frac{q}{(T_{w,i} - T_b)} \quad (4)$$

5. 측정계기 정밀도

측정계기의 정밀도 및 측정범위를 표 3에 나타내었다. 질량유속이 크고 열유속이 작은 경우 유사임계 부근에서 벽면온도와 벌크온도의 차이가 크지 않아 그 차이가 열전대 자체의 오차범위에 근접하는 경우에는 열전달계수 계산에 큰 불확실성이 존재할 수 있다. 이러한 실험의 어려움은 유사임계 부근에서 CO₂의 비열이 급격하게 변하기 때문에 일어나는 것으로 불확실성을 줄이기 위해서는 보다 정밀한 계측장비의 설치가 요구된다.

표 3 계측기 정밀도 및 측정범위

Measuring instrument	Range	Accuracy
K-type thermocouple	0 - 1260°C	0.75% or 2.2°C
Pressure transmitter	0 - 160 bar	0.25% of full scale
DP transmitter	0 - 6350 mm H ₂ O	0.055% of span
Mass flow meter	0 - 680 kg/hr	0.15%



제 4 장 실험 결과

1. 와이어가 삽입된 튜브와 정상 튜브 실험결과 비교

그림 13에는 압력이 7.75 MPa일 때 직경 1.30 mm의 와이어가 삽입된 내경 6.32 mm 튜브에 대해 수행한 초임계압 열전달 실험결과와 와이어가 없는 튜브에 대한 실험결과를 비교하였다. 각 그림에서 실선은 각각 벌크온도 T_b 와 다음과 같은 Dittus-Boelter 열전달상관식으로 계산한 열전달계수를 나타낸다.

$$Nu = 0.023Re_b^{0.8}Pr_b^{0.4} \quad (5)$$

예상과 같이 와이어가 삽입된 튜브에서 상당한 열전달 촉진 효과를 확인할 수 있다. 와이어가 없는 경우 $P=7.75$ MPa, $G=400$ kg/m²s에서 $q=30$ 과 50 kW/m²에서 모두 열전달 열화가 일어났으나 와이어가 삽입된 경우 열전달 열화가 사라지거나 열화의 정도가 상당히 완화되었다. 또한 열전달계수도 임계온도 부근에서 거의 2배에 달하는 증가를 보였다. 와이어가 삽입된 튜브에서 국부적으로 보이는 심한 온도 변화는 와이어 부근에서 발생하는 turbulence의 영향이며 이는 다음 더 상세히 설명한다. 이와 같은 열전달 상승효과는 유량을 1200 kg/m²s로 증가시키면 감소한다. 이는 유량의 증가로 와이어가 없는 튜브 안에서도 이미 turbulence가 충분히 존재하기 때문에 와이어로 인해 추가로 발생하는 turbulence가 상대적으로 적기 때문으로 보인다. 임계온도 부근의 열전달 상승효과는 벽면온도가 유사임계온도로부터 멀어질수록 감소한다.

모든 경우에서 벽면온도가 유사임계온도(pseudo-critical temperature**)에 도달할 때 열전달이 최대값을 보였다. 이는 이 때 정압비열이 최대값을 보이는 것과 유사 임계온도 이후에 열전도도가 급격히 감소하는 것이 원인이라고 판단된다. 그림 13에서 유량이 1200 kg/m²s로 크고 열유속이 비교적 작은 경우 임계점 부근에서 열전달계수가 많은 편차를 보이는 것은 이산화탄소를 이용한 실험에서 보이는 전형적인 현상이다. 이산화탄소는 낮은 임계온도와 압력으로 실험이 손쉬운 반면에 벌크온도와 벽면온도의 차이가 상대적으로 작아 열전대의 오차가 열전달계수에 미치는 영향이 크다.

상향유로에서 보이는 불연속점은 입구의 벌크온도가 임계온도와 1-2°C 정도의

** 주어진 압력에서 정압비열이 최대값을 보이는 점의 온도. 임계압력에서 임계온도에 해당하므로 “유사”를 앞에 덧붙임.

차이를 보일 때 일어나는 특이한 현상으로 앞으로 전산해석을 병행하여 연구해야 할 대상이다. 현재는 입구온도가 이 범위에 존재하지 않도록 조절하여 실험을 수행하고 있다.

압력이 8.12 MPa의 경우인 그림 14에서도 압력이 7.75 MPa인 경우와 매우 유사한 결과를 보였다. 다만 압력이 높아질수록 초임계압에서 나타나는 특이한 현상은 완화되었다. 그림 13과 그림 14를 자세히 비교해 보면 열전달계수가 그림 14의 경우 약간 감소했음을 알 수 있다. 8.12 MPa의 경우를 정량적으로 분석해 보자. 엔탈피가 240 kJ/kg 정도일 때 와이어가 삽입된 튜브와 정상튜브의 열전달계수 비는 1.3 - 1.5 정도이나 엔탈피가 340.9 kJ/kg일 때는 이 비율이 2.77로 증가 한다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 임계점으로부터 멀어질수록 이 비율은 점차 감소하여 1에 접근하고 이 때 열전달계수는 Dittus-Boelter 상관식으로 예측한 값과 거의 같게 된다. 이와 같이 열전달계수가 삽입된 와이어에 크게 영향을 받는 것은 초임계압에서 열전달계수의 증가는 주로 유체 물성의 변화에 기인하는 것으로 보인다. 벽면의 온도가 임계점에 도달하면 벽면에서부터 밀도가 감소하기 시작하여 점차 중앙으로 퍼져간다. 이때 감소한 밀도에 의해 증가하는 속도는 M-shape 속도분포나 acceleration에 의한 laminarization을 야기할 수 있다. Jackson³³은 buoyancy parameter Bo_b^* 가

$$Bo_b^* > \sim 5.6 \times 10^{-7} \quad (6)$$

일 때 buoyancy에 의해 Nu_F 로 표시되는 정상적인 강제대류 열전달이 10% 감소함을 이론적으로 예측하였다. 여기서

$$Bo_b^* = Gr_b^* / (Re_b^{3.425} Pr_b^{0.8}) \quad (7)$$

$$Gr_b^* = g\beta_b q_w d^4 / (k_b \nu_b^2) \quad (8)$$

$$Nu_F (\equiv Nu_b) = 0.022 Re_b^{0.82} Pr_b^{0.5} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.3} \left(\frac{c_p}{c_p} \right)^n \quad (9)$$

여기서 지수 n 은

$$n = 0.4 \text{ for } T_b < T_w < T_{pc} \text{ and for } 1.2T_{pc} < T_b < T_w$$

$$n = 0.4 + 0.2 \left(\frac{T_w}{T_{pc}} - 1 \right) \text{ for } T_b < T_{pc} < T_w$$

$$n = 0.4 + 0.2 \left(\frac{T_w}{T_{pc}} - 1 \right) \left[1 - 5 \left(\frac{T_b}{T_{pc}} - 1 \right) \right] \text{ for } T_{pc} < T_b < 1.2 T_{pc} \text{ and } T_b < T_w$$

이다. 또한 Mikielewicz³⁴는 acceleration parameter Ac 가 다음의 조건을 만족할 때 열전달 열화가 일어날 것으로 예측하였다.

$$Ac > \sim 2.9 \times 10^{-5} \quad (10)$$

여기서

$$Ac = (4q^+ / Re_b) (Re^{3/8} / Pr^{0.4}) \quad (11)$$

$$q^+ = \beta q_w'' / (Gc_p) \quad (12)$$

와이어가 없는 내경 6.32 mm 튜브에 대한 실험에서 acceleration parameter Ac 를 평가해 보면 열전달 열화가 일어나는 경우를 포함한 대부분의 조건에서 Ac 는 threshold value인 2.9×10^{-5} 보다 작은 값을 보였고 큰 값을 보이는 경우에도 입구에서부터 일부분의 구간에서만 보였으며 곧 이 threshold value보다 작은 값이 되었다. 따라서 Ac 는 적어도 이번 실험이 수행된 범위와 조건에서는 열전달 열화를 예측하는 parameter로 적절하지 않다고 판단된다.^{††} 반면에 와이어가 없는 튜브의 실험에서 열전달 열화가 일어난 경우에는 대부분 튜브 입구에서부터 일부 구간에서 Bo_b^* 의 값이 5.6×10^{-7} 보다 큰 값을 가진 후 감소하였다. 따라서 열전달 열화는 buoyancy가 지배적인 역할을 하였을 것이며 이 경우에는 M-shape 속도분포가 열전달 열화의 원인이라고 알려져 있다.³⁵ 따라서 와이어가 삽입된 튜브에서 열전달 열화가 발생하지 않는 이유는 와이어가 열전달 열화의 원인이 되는 M-shape 속도분포를 갖는 유동장을 교란시키기 때문이라고 생각할 수 있다. 이러한 논리는 전산 해석을 통한 유동장의 면밀한 분석으로 뒷받침되어야 할 것이다.

^{††} 그러나 acceleration에 의한 laminaization으로 저하된 열전달이 와이어에 의해 생성된 turbulence로 회복되는 것과 같은 효과는 어느 정도 있었을 것이다.

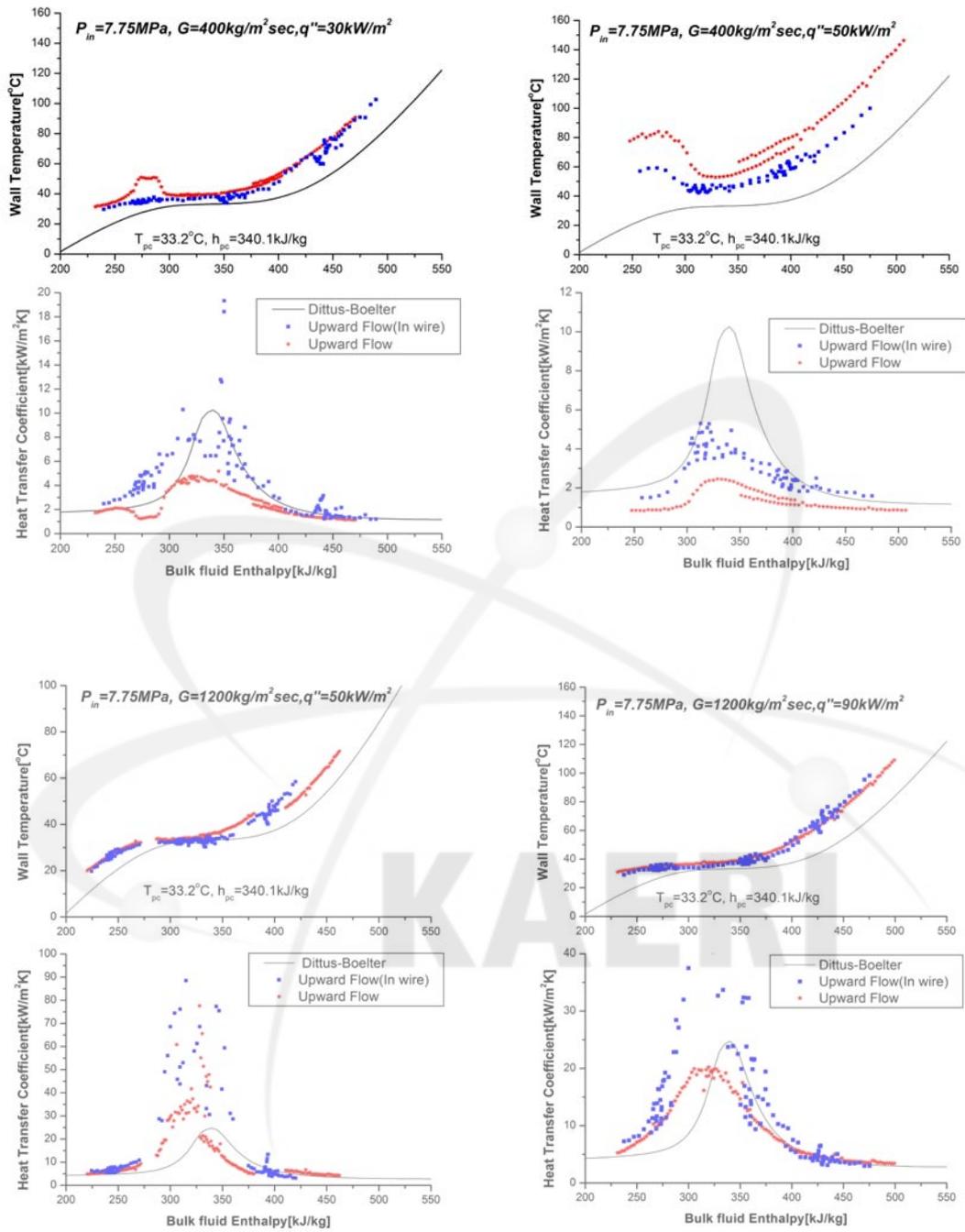


그림 13 Comparisons of wall temperatures and heat transfer coefficients in a carbon dioxide between a plain tube and a tube with wire, ID=6.32 mm (wire d=1.3 mm): at P=7.75 MPa.

a	b
c	d

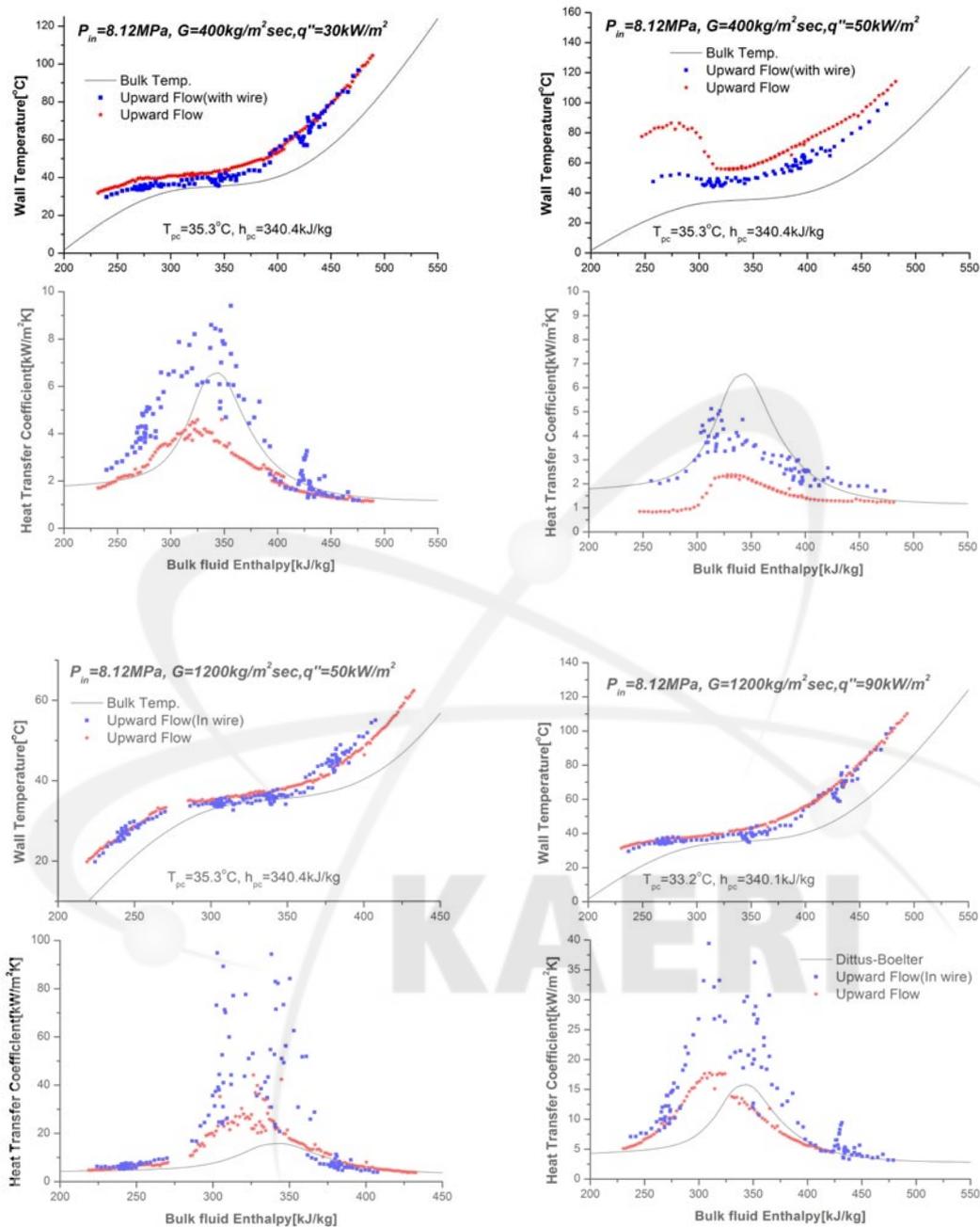


그림 14 Comparisons of wall temperatures and heat transfer coefficients in a carbon dioxide between a plain tube and a tube with wire, ID=6.32 mm (wire d=1.3 mm) at $P=8.12 \text{ MPa}$.

a	b
c	d

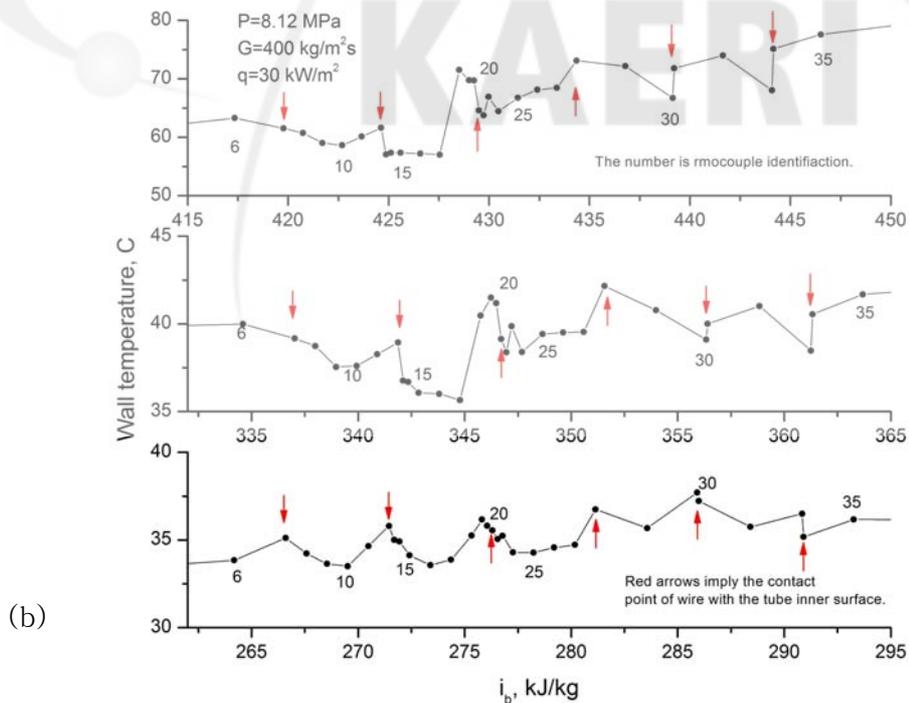
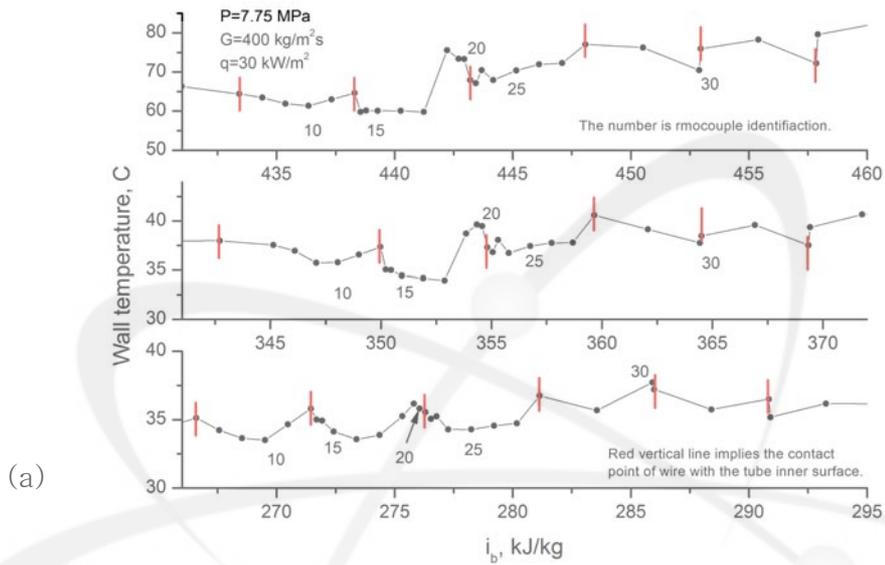
2. 와이어의 영향

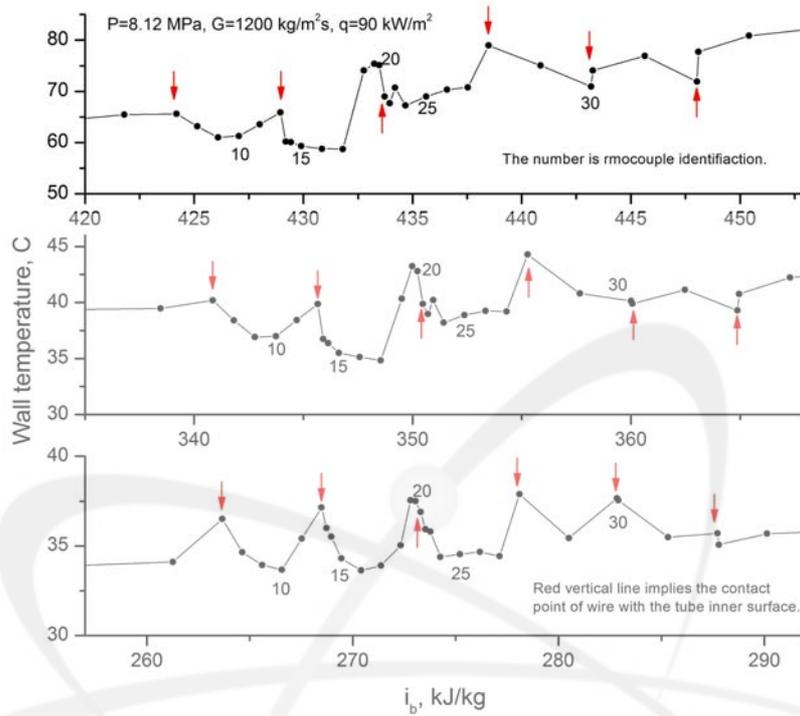
그림 15는 세 가지 실험조건에 대해 열전대가 촘촘히 부착된 구간의 튜브 벽면온도의 분포를 보여준다. 우선 $P=7.75$ MPa, $G=400$ kg/m²s, $q=30$ kW/m²의 경우를 보자. 각 그래프에는 세 개의 그래프가 포개져 있는데 이는 동일한 실험에서 입구온도를 조절하여 엔탈피 범위를 세 구간 나누어 실험한 결과이다. 그래프에 표시된 수직선은 와이어와 튜브의 접촉면 위치를 나타낸다. 열전대 #7과 #12사이(상세 1 구간)에는 20 mm 간격으로 열전대가 부착되어 있다. 이 구간에서는 접촉점에서 최대온도를 보이고 점차로 감소하여 중간 지점에서 최소값을 보인 후 다시 증가하여 다음 접촉점에서 최대값을 보여 전체적으로 아래로 처지는 포물선형 분포를 보였다. 그림 15(b)와 그림 15(c)를 비교해 보면 유량이 큰 경우 최대값과 최소값의 차이가 크다. 이는 유량이 큰 경우 레이놀즈 수가 커서 와이어를 통과하면서 더 많은 turbulence가 생성되고 와이어 후류에 생성된 큰 와류가 하류의 경계층을 교란시켜 열전달을 촉진시키기 때문으로 추정된다. 이와 같은 추정의 정당성은 전산해석을 통한 더 면밀한 분석으로 뒷받침되어야 할 것이다.

다음 구간인 열전대 #12와 #21 사이(상세 2 구간)에는 접촉점 주위에서 와이어의 영향을 더 상세히 관찰하기 위해 20 mm 간격으로 부착된 열전대 이외에 접촉점 부근에 5 mm 또는 10 mm 간격으로 열전대를 추가로 설치하였다. 접촉점 직후에는 이전 구간에서와 비슷한 경향을 보였으나 접촉점 직전에서는 온도가 급격히 상승하여 이전 구간과는 다른 경향을 보였다. 이는 접촉점에 접근할수록 정체되는 유동으로 인해 열전달이 저하되는 것으로 판단된다. 열전대 #21과 #28사이(상세 3 구간)에는 전반에는 열전대가 5mm 또는 10 mm 간격으로 추가로 설치되어 있으나 후반에는 20 mm 간격으로 설치되어 있다. 이 경우 엔탈피가 임계 엔탈피($P=7.75$ MPa일 때 340.1 kJ/kg, $P=8.12$ MPa 일 때 340.4 kg/kg)보다 작을 때는 상세 1 구간에서와 유사한 포물선형 온도분포를 보였으나 임계엔탈피보다 클 때에는 약간 찌그러진 포물선형의 온도분포를 보였다. 이는 벽면 온도가 임계온도를 지나면 급격히 상승하는 일반적인 현상이 와이어의 영향과 중첩되어 나타난 것으로 보인다. 여기서 열전대 #23에서 온도가 약간 증가하는 경향은 전산해석을 통해 분석해야 할 과제이다.

열전대 #30과 #31은 동일한 높이에서 접촉면과 그 반대편의 온도 차이를 관찰하기 위해 부착하였다. 예측대로라면 열전대 #30의 온도가 열전대 #31의 온도보다 높아야 한다. 벌크엔탈피가 임계엔탈피보다 작은 경우에는 예측대로 열전대 #30의 온도가 열전대 #31의 온도보다 약간 높았다. 그러나 벌크엔탈피가 임계엔탈피보다 큰 경우에는 이와는 반대로 열전대 #30의 온도가 열전대 #31의 온도보다 낮았다.

열전대 #30은 가열하지 않은 상태에서는 정상적인 신호를 보내고 있었으므로 이 결과는 매우 이례적인 것으로 현재는 그 원인을 정확히 알 수 없으며 더 면밀한 분석이 요구된다. 이러한 역전현상은 열전대 #33과 #34에서도 일어났으나 이는 dummy인 열전대 #33이 신뢰할 수 없는 신호를 보내는 것이 원인이다.





(c)

그림 15 Wall temperature distribution along the spans with narrowly spaced thermocouples.

Chandra 등은 질량유량 $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 열유속 30 과 70 kW/m^2 의 조건에서 wire wrap spacer가 6.32 mm ID tube 안의 열전달에 미치는 영향을 CFD로 분석하였다 (그림 16). 이들의 분석결과도 와이어에 인접한 상류와 하류에서 온도가 상승하는 현상을 보였다. 온도가 상승하는 구간은 본 연구의 실험결과와 같이 상류측이 하류측보다 넓었다.

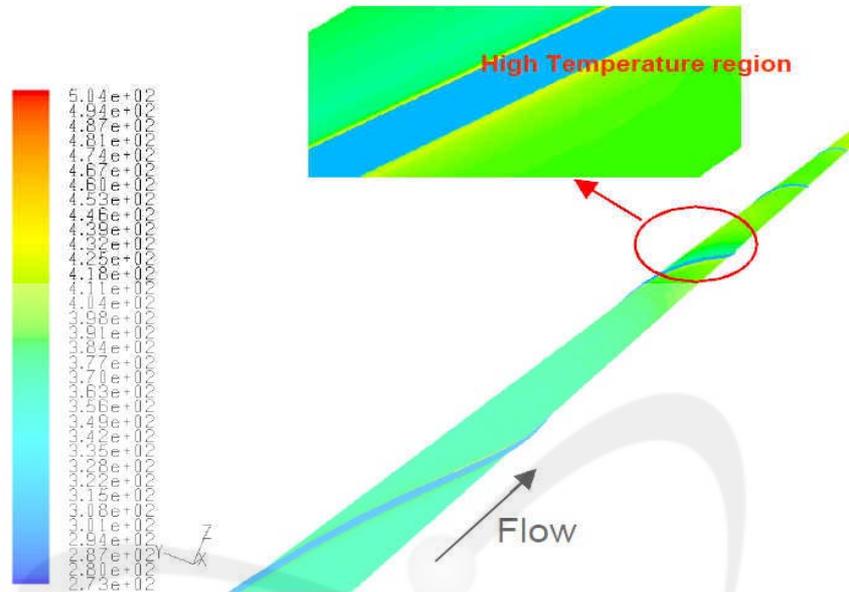


그림 16 Computed inner wall temperature in annulus with helical wire.³¹

3. 열유속의 영향

그림 16에는 압력 7.75MPa과 8.12 MPa의 경우 열유속이 와이어가 삽입된 튜브 안의 초임계압 열전달에 미치는 영향을 그래프로 표시하였다. 임계점이 튜브의 길이방향으로 중앙에 오도록 유량에 따라 열유속을 30에서 90 kW/m²사이에서 적절히 조절하였다. 임계온도 또는 임계엔탈피 부근에서 데이터의 분산이 매우 큰 것은 앞서서도 설명한 것과 같이 벌크온도와 벽면온도가 작아 불확실도가 커지기 때문이다. 이러한 현상은 유량이 클수록 더 두드러지게 나타난다. 이외에 유량이나 유속에 따르는 대체적인 경향은 와이어가 없는 튜브와 큰 차이가 없다.

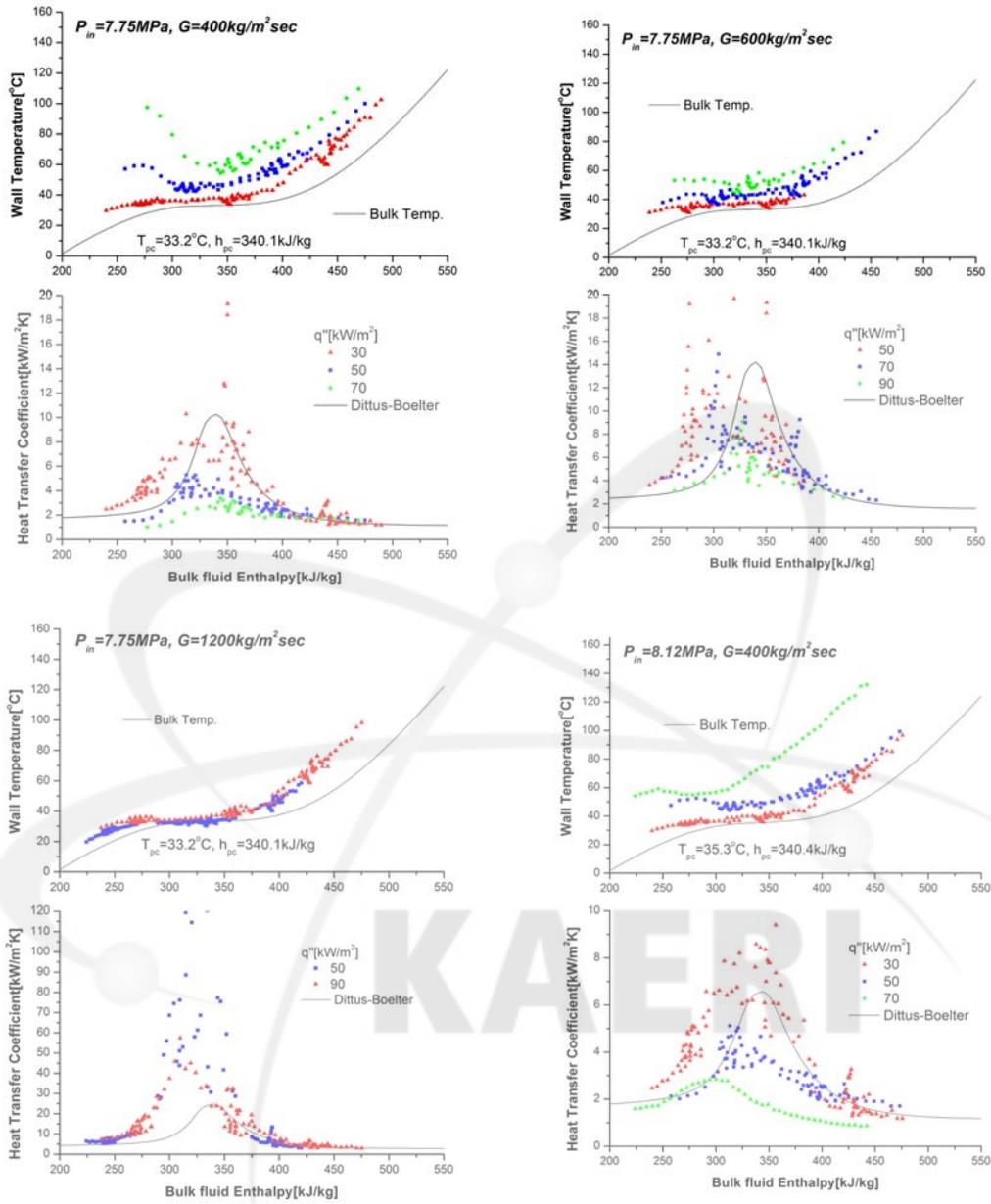


그림 16 열유속의 영향

a	b
c	d

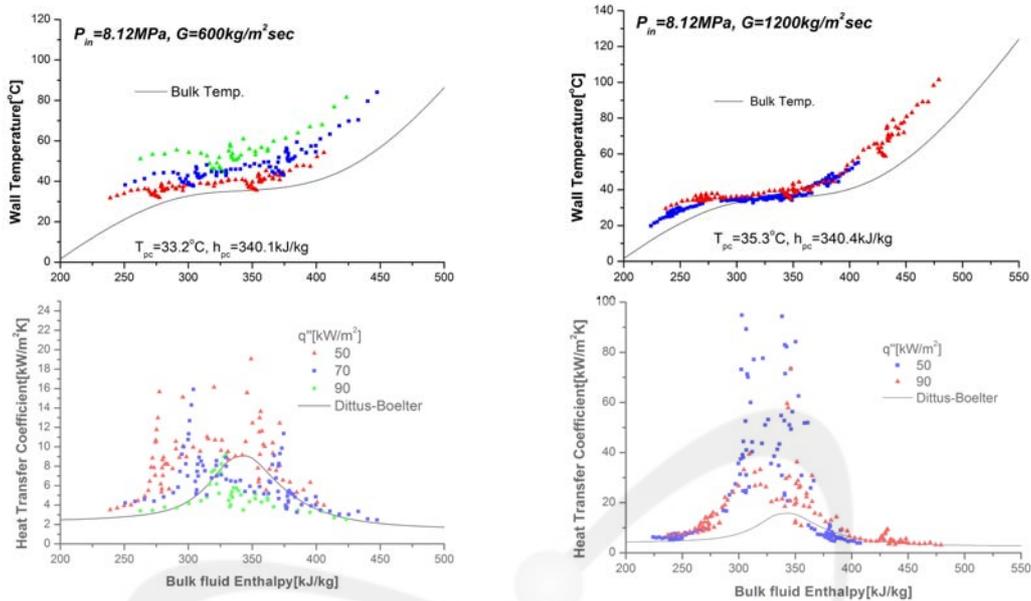


그림 17 열유속의 영향 (계속) e f

4. 질량유속의 영향

그림 18에는 $p=8.12$ MPa일 때 질량유속이 열전달에 미치는 영향을 그래프로 표시하였다. 예측대로 질량유속이 증가하면 열전달계수도 따라서 증가하였다. 실험이 수행된 조건에서는 질량유속에 따라 열전달계수가 매우 빠른 증가를 보였다. 증가는 질량유속이 $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일 때 일어나던 열전달열화 현상도 $600 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 와 $1200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일 때는 일어나지 않았다. 임계점 부근에서 열전달계수가 급격히 증가하는 것은 물리적인 현상에 의한 것이 아니며 벽면온도와 벌크온도의 차이가 열전대의 오차 범위와 같을 정도 작아짐에 따라 측정오차가 열전달계수의 계산에 크게 영향을 미치기 때문에 나타나는 현상이다. 이는 열유속이 작은 실험에서 나타나는 피할 수 없는 현상이다.

5. 압력의 영향

그림 19에서와 같이 압력이 증가할수록 열전달계수는 감소하였다. 이는 임계점에서 최대 피크 또는 최대 변화율을 보이는 물성이 임계점이상으로 압력이 증가하면 이 피크 또는 최대값이 감소하기 때문이다. 이와 같은 경향은 와이어가 없는 정상 튜브에 대한 실험에서와 같다.

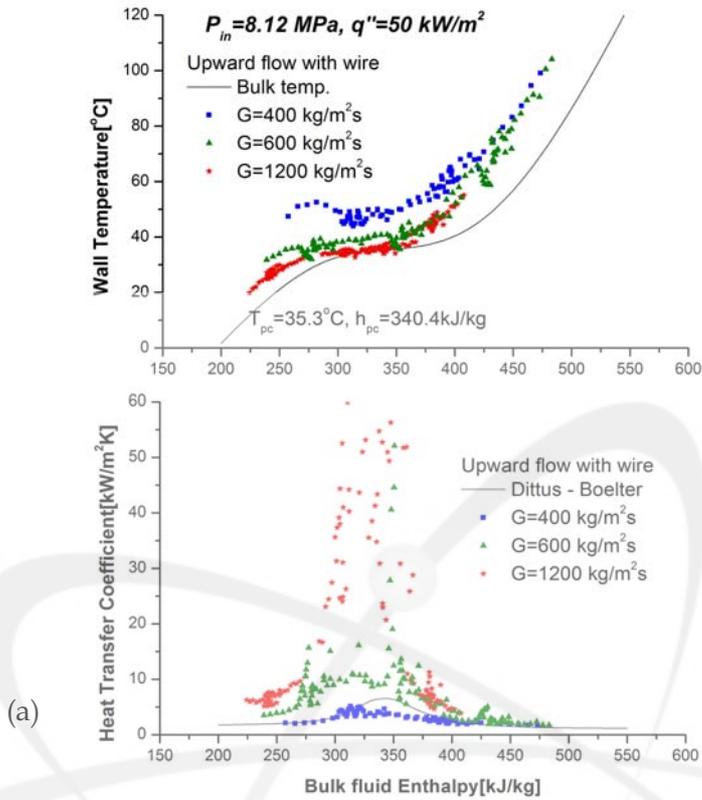


그림 18 질량유속의 영향

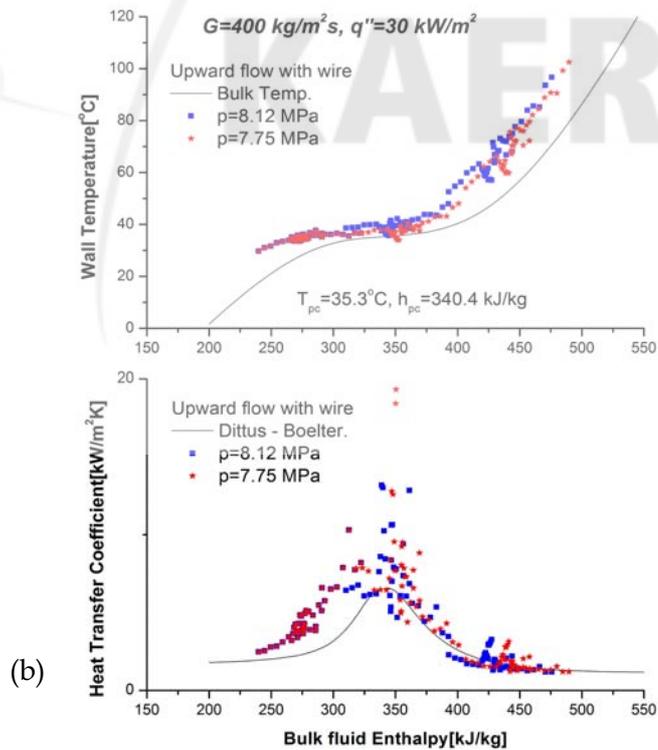


그림 19 압력의 영향

6. 열전달계수의 평가

앞의 절에서 제시한 모든 그래프에서, 이번 실험에서 얻은 초임계압 열전달계수는 Dittus-Boelter 상관식으로 계산한 값보다 실험조건에 따라 크거나 작은 값을 보였다. 그림 20는 이번 실험에서 얻은 Nusselt 수와 식 (5)의 Dittus-Boelter 상관식으로 얻은 Nusselt 수를 비교한 결과이다.

그림에서 알 수 있는 곳과 같이 많은 데이터가 25% 오차범위 안에 들지 못하였다. 오차가 +25% 방향으로 더 편향된 것으로 보아 대체로 Dittus-Boelter 상관식이 과대 예측하는 것으로 보인다. 이번 실험의 데이터는 Dittus-Boelter 상관식으로는 예측할 수 없는 것으로 판단된다.

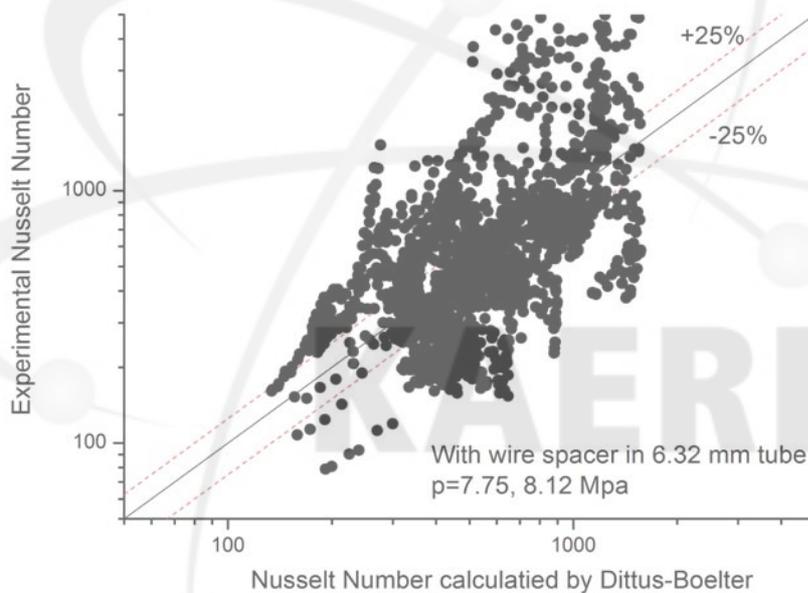


그림 20 Comparison of the experimental Nusselt number and the Dittus-Boelter Nusselt number.

그림 21은 이번 실험에서 얻은 Nusselt 수와 Jackson³³의 상관식, 식 (9)로 얻은 Nusselt 수를 비교한 결과이다. Dittus-Boelter 상관식과 달리 비교적 실험 데이터를 잘 따르고 있다. Nusselt 수가 클 때 실험 쪽으로 편향된 데이터는 임계점 부근에서 측정오차가 많이 포함된 데이터이므로 논의에서 제외한다. Jackson 상관식 쪽으로 편향된 데이터는 와이어가 튜브와 접촉하고 있는 부근에 형성되는 정체점이 열전달을 저해하기 때문이다. 이와 같은 두 부분을 제외하면 Jackson의 상관식은 실험데이

터를 비교적 정확하게 예측하고 있다. 2,009개의 데이터 중 56.2%인 1,130개의 데이터가 $\pm 25\%$ 오차범위 안에 있었다. 오차범위를 벗어난 데이터가 많은 것은 많은 열전대를 와이어와 튜브의 접촉면에 많이 배치하였기 때문으로 보인다. 이러한 이유로 오차범위를 벗어나는 데이터를 제외해도 Jackson의 상관식이 실험 데이터를 잘 예측한다고 보기는 어렵다

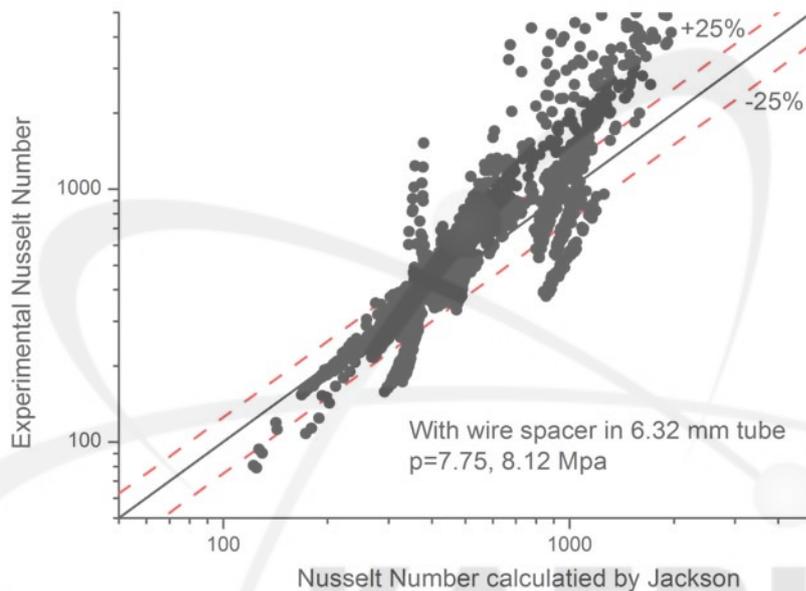


그림 21 Comparison of the experimental Nusselt number for a wired tube and the Nusselt number calculated by the Jackson correlation.³³

그림 22는 와이어가 없는 튜브에서의 실험결과이다. 작은 Nusselt 수에서는 데이터가 -25% 쪽으로 치우쳐 있는 반면 큰 Nusselt 수에서는 +25% 쪽으로 치우쳐 있다. 데이터의 분산이 크지 않아 약간의 수정을 가하면 Jackson의 상관식,³³ 식 (7)로 실험결과를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 이 그림에서와 달리 그림 21에서는 대부분의 데이터가 +25% 쪽으로 치우쳐 있어 전체적으로 열전달 상승효과가 있는 것으로 판단된다.

이번 실험에서는 새로운 상관식을 제시하기에 충분한 데이터를 얻지는 못하였다. 또한 와이어가 튜브와 접촉하는 부분과 그렇지 않은 부분이 많은 차이를 보이고 있으므로 상관식을 제시하는 것은 큰 의미가 없을 것이다. 다만 이번에 사용한

와이어가 주어진 조건에서 충분한 turbulence를 생성시켜 상당한 열전달 효과를 얻을 수 있다는 점을 확인하였다. 와이어의 직경과 피치의 최적의 조합을 찾아내는 것은 앞으로의 과제로 남아있다.

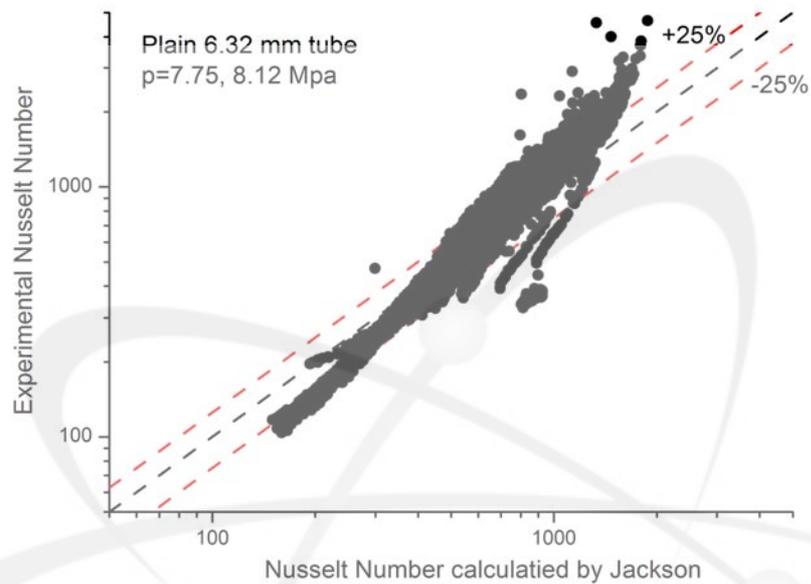


그림 22 Comparison of the experimental Nusselt number for a plain tube and the Nusselt number calculated by the Jackson correlation.

7. 결론

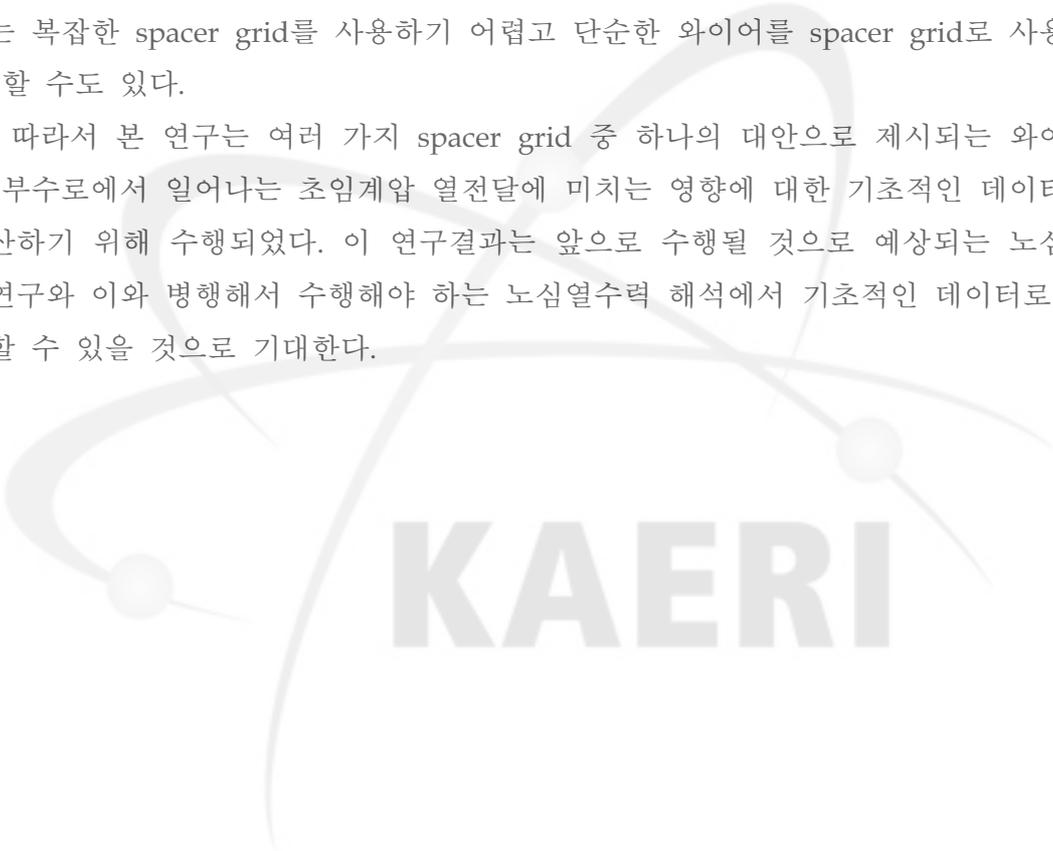
KAERI의 SCWR 노심개념은 tight square lattice를 채택하므로 부수로의 수력직경이 6.5 mm로 작다. 이렇게 좁은 부수로에는 wire를 spacer grid로 사용해야 할 수도 있다. 이 부수로와 spacer grid는 내경 6.32 mm 튜브 안에 직경 1.3 mm 와이어를 장착하여 간단히 모사하였다. 이 와이어가 부수로의 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 와이어가 장착된 튜브 안의 열전달은 단순한 튜브의 경우에 비해 유사임계온도 부근에서 거의 2배로 증가하였다. 이 증가 효과는 유사임계온도로부터 멀어질수록 감소하였다. 열전달 상승효과는 와이어 접촉면에서부터 와이어 직경의 40 - 60 배 거리의 하류까지 지속되었다. 튜브 벽면온도는 와이어 접촉지점 사이의 약 절반에 해당하는 거리까지 감소하다가 이후에는 증가하였다. 접촉점과 접촉점 사이의 온도분포는 아래로 처진 포물선 형태를 보였다. 접촉면에 인접한 상류에서는 온도가 급격히 상승하였으며 이는 유동의 정체가 원인으로 보인다. 또한 접촉면에 인접한 하류에서 온도가 바로 떨어지지 않고 약간 상승하기도 했다. 이 역시 유동의 정체가 원인일 것이다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized, light gray graphic of a particle or atom with a central nucleus and two orbiting spheres connected by curved lines. Below this graphic, the word "KAERI" is written in a large, bold, sans-serif font.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

SCWR에 대한 연구는 아직 구체적이고 장기적인 개발계획에 따라 수행되고 있지 못하며 KAERI를 중심으로 산발적인 연구만이 수행되고 있다. 그러나 이러한 산발적인 연구의 결과로 고체감속재를 사용하는 노심개념을 제시하였다. 이는 앞으로 계속 개선해 나가야 하는 개념에 지나지 않으나 핵연료집합체의 구성이나 부수로의 모양과 크기 등은 크게 변하지 않을 것으로 예상된다. 앞에서도 지적한 바와 같이 SCWR의 노심의 핵연료 배열은 square tight lattice이므로 기존의 경수로에서 사용하는 복잡한 spacer grid를 사용하기 어렵고 단순한 와이어를 spacer grid로 사용해야 할 수도 있다.

따라서 본 연구는 여러 가지 spacer grid 중 하나의 대안으로 제시되는 와이어가 부수로에서 일어나는 초임계압 열전달에 미치는 영향에 대한 기초적인 데이터를 생산하기 위해 수행되었다. 이 연구결과는 앞으로 수행될 것으로 예상되는 노심개념연구와 이와 병행해서 수행해야 하는 노심열수력 해석에서 기초적인 데이터로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.



KAERI

기호설명

Ac	acceleration parameter, $Ac = (4q^+ / Re_b)(Re_b^{3/8} / Pr_b^{0.4})$
Bo_b^*	Jackson buoyancy parameter, $Bo_b^* = Gr_b^* / (Re_b^{3.425} Pr_b^{0.8})$
Bu	Jackson buoyancy parameter, $Bu = \overline{Gr}_b / (Re_b^{2.7} \overline{Pr}_b^{0.5})$
C_p	specific heat
\overline{C}_p	$\overline{C}_p = \frac{1}{T_w - T_b} \int_{T_b}^{T_w} C_p dT = (h_w - h_b) / (T_w - T_b)$
d, D	tube diameter
G	mass flux
\overline{Gr}_b	Grashof number, $\overline{Gr}_b = \frac{\rho_b(\rho_b - \bar{\rho})gD^3}{\mu_b^2}$
Gr_b^*	Grashof number based on heat flux $Gr_b^* = g\beta_b q_w d^4 / (k_b \nu_b^2)$
I	electric current
k	thermal conductivity
L	length
Nu	Nusselt number, hD/k
p	pressure
Pr	Prandtl number, $\mu C_p / k$
\overline{Pr}_b	$\overline{Pr}_b = \mu \overline{C}_p / k$
q	heat flux
\dot{q}_v	volumetric heating rate
q^+	non-dimensional heat flux, $q^+ = \beta q_w'' / (Gc_p)$
Re	Reynolds number, $\rho Vd / \mu$
T	temperature
t	thickness
V	voltage

Greek symbols

ρ density

$\bar{\rho}$ average density, $\bar{\rho} = \frac{1}{T_w - T_b} \int_{T_b}^{T_w} \rho dT$

μ dynamic viscosity

Subscripts and superscripts

0 at constant physical properties

b mass averaged value

cr at critical condition

d, D based on diameter

F forced convection

h height

i at the inlet, inner

m spatially averaged quantity

o outer

pc at pseudo-critical temperature

v volumetric

$var p$ at variable physical properties

w at the wall, wire

참고문헌

- 1 Schulenberg, T., Starflinger, J., "European Research Project on the High Performance Light Water Reactor," 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Paper No. 54, March 8-11, Heidelberg, Germany (2009).
- 2 Boyle¹, K. P., Brady, D., Guzonas, D., Khartabil, H., Leung, L., Lo, J., Quinn, S., Suppiah, S., Zheng, W., "Canada's Generation IV National Program - Overview" 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Paper No. 74, March 8-11, Heidelberg, Germany, (2009).
- 3 Cheng, X., "R&D Activities on SCWR in China," 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Paper No.53, March 8-11, Heidelberg, Germany (2009)
- 4 Ishiwatari, Y., Oka, Y., Yamada, K., "Japanese R&D Projects on Pressure-Vessel Type SCWR," 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Paper No. 73, March 8-11, Heidelberg, Germany (2009)
- 5 Yamaji, A, Oka Y., Koshizuka, S., "Core Design of a high Temperature Reactor Cooled and Moderated by Supercritical Light Water," GENES/ANP, Sep, 15-19, Kyoto, japan, (2003).
- 6 Bae, K. M., Joo, H. K., Bae, Y. Y., " Conceptual design of a 1400 MWe supercritical water cooled reactor core with a cruciform type U/Zr solid moderator," Proceeding of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP2007), Nice, France (2007a)
- 7 Bae, K. M., Joo, H. K., Bae, Y. Y., "Enhancement of the Core Safety of a Conceptual SCWR Core," Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 10-11, (2007).
- 8 Bae Y. Y., Kim, H. Y., "Experiments on a forced convection heat transfer at supercritical pressures - 6.32 mm ID tube," KAERI/TR-3804/2009, (2009).
- 9 Yamagata, K., Nishikawa, K., Hasegawa, S., Fujii, T., Yoshida, S., "Forced convection heat transfer to supercritical water flowing in tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15 2575 - 2593 (1972).
- 10 Bishop, A. A., Sandberg, R. O., Tong, L. S., "Forced convection heat transfer to water at near-critical temperatures and supercritical pressure," WCAP-2056-P, Part- III-B, Westinghouse Electric Company, February, (1964).
- 11 Shitsman, M. E., "Deteriorated regimes of heat transfer under supercritical pressures," *Teplofizika vysokikh temperature* 1 (2) 267 - 275 (1963).
- 12 Swenson, H., Carver, J., Karakala, C., "Heat transfer to supercritical water in smooth-bore tubes," *Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME Series C* 87 477 - 484 (1965).

- 13 Krasnoshcheko, V. A., Protopopov, V. S., "Heat exchange in the supercritical region during the flow of carbon dioxide and water," *Teploenergetika* 6 (12) 26 - 30 (1959).
- 14 Petukhov, B. S., Krasnoshcheko, V. A., Protopopov, V. S., "An investigation of heat transfer to fluids flowing in pipes under supercritical conditions," Proceedings of the 1961 International Heat Transfer Conference Boulder, Colorado, USA, pp. 569 - 578 (1961).
- 15 Krasnoshcheko, V. A., Protopopov, V. S., "Experimental study of heat exchange in carbon dioxide in the supercritical range at high temperature drops," *High Temperature* 4 (3) 375 - 382 (1966).
- 16 Petukhov, B. S., Kurganov, V. A., Ankudinov, V. B., "Heat transfer and pressure drop in tubes under turbulent flow of a liquid at near-critical state parameters," *Teplofizika vysokikh temperature* 21 (8) 92 - 100 (1983).
- 17 Komita, H., Morooka, S., Yoshida, S., Mori, H., "Study on the heat transfer to the supercritical pressure fluid for supercritical water cooled power reactor development," Proceedings of the NURETH-10, Seoul, Korea, (2003).
- 18 Mori, H., Yoshida, S., Morooka, S., Komita, H., "Heat transfer study under supercritical pressure conditions for single rod test section," Proceedings of ICAPP'05, Paper No. 5303, Seoul, (2005).
- 19 Kim, H. Y., Kim, H., Song, J. H., Cho, B. H., Bae, Y. Y., "Heat transfer test in a vertical tube using CO₂ at supercritical pressures," *Journal of Nuclear Science and Technology*, 44 (3) 1 - 9 (2007).
- 20 Kim, H. Y., Kim, H., Kang, D. J., Song, J. H., Bae, Y. Y., "Experimental investigations on heat transfer to CO₂ flowing upward in a narrow annulus at supercritical pressures," *Nuclear Engineering and Technology*, 40 (2) 155 - 162. Special Issue on the 3rd International Symposium on SCWR (2008).
- 21 Kim, H., Kim, H. Y., Song, J. H., Bae, Y. Y., "Heat transfer to supercritical pressure carbon dioxide flowing upward through tubes and a narrow annulus passage," *Progress in Nuclear Energy*, 50 518 - 525 (2008).
- 22 Kim, H., Bae, Y. Y., Kim, H. Y., Song, J. H., Cho, B. H., "Experimental investigations on heat transfer characteristics in upward flow of supercritical carbon dioxide," *Nuclear Technology*, 164 119 - 129 (2008).
- 23 Kim, H. Y., Bae, Y. Y., "Experimental Study on Heat Transfer to Supercritical CO₂ in a Circular Tube," 16th Pacific Basin Nuclear Conference, Aomori, Japan, Oct. 13-18 (2008)
- 24 Bae, Y. Y., Kim, H. Y., "Convective heat transfer to CO₂ at a supercritical pressure flowing vertically upward in tubes and an annular channel," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, Issue 2, 329-339 (2009).

- 25 Ankudinov, V. B., Kurganov, V. A., "Intensification of deteriorated heat transfer in heated tubes at supercritical pressures." *High Temp.* 19 (6), 870 - 874 (1981).
- 26 Shiralkar, B. S., Griffith, P., "Deterioration in heat transfer to fluids at supercritical pressures and high heat fluxes," *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 91 (1), 27 - 36 (1969).
- 27 Shiralkar, B. S., Griffith, P., "The effect of swirl, inlet conditions, flow direction, and tube diameter on the heat transfer to fluids at supercritical pressure." *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 92 (3), 465 - 474 (1970).
- 28 Watt, M. J., Chou, C. T., "Mixed convection heat transfer to supercritical pressure water," Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Paper No. MC16, München, (1982).
- 29 Kim, H. Y., Bae, Y. Y., "Experimental Study on Heat Transfer to Supercritical CO₂ in a Circular Tube," 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC), Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008).
- 30 Ackerman, J. W., "Pseudoboiling heat transfer to supercritical pressure water in smooth and ribbed tubes, *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 92 (3), 490 - 498 (1970).
- 31 Li, H, Wang, H., Luo, Y., Gu, H., Shi., Chen., Laurien, E., Zhu, Y., "Experimental investigation on heat transfer from a heated rod with a helically wrapped wire inside a square vertical channel to water at supercritical pressures," in press, *Nuc. Eng. Design*, (2009).
- 32 Jackson, J. D., Hall, W. B., Forced convection heat transfer to fluids at supercritical pressure, *Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles*. Hemisphere Publishing Corporation, pp. 563 - 611 (1979).
- 33 Jackson, J. D., Mixed Convection Heat Transfer Seminar Material, Daejeon, Korea, Dec. (2008)
- 34 Mikielwicz, D. P., Shehata, A. M., Jackson, J. D., McEligot, D. M., "Temperature, velocity and mean turbulence structure in strongly heated internal gas flows Comparison of numerical prediction with data," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45, 4333-4352, (2002).
- 35 Kurganov, V. A. Kaptil'nyi ,A. G. "Velocity and enthalpy fields and eddy diffusivities in a heated supercritical fluid flow," *Experimental Thermal and Fluid Science* 5 (4) 465 - 78 (1992).

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식							
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/TR-3800/2009							
제목 / 부제		나선형 와이어가 삽입된 튜브 안의 초임계압 열전달 실험					
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		배윤영/수소생산원로기술개발부					
연구자 및 부서명		김환열/열수력안전연구부 유태호/중소형원자로기술개발부					
출판지	대전	발행기관	한국원자연구원		발행년	2009	
페이지	36p.	도표	있음(○), 없음()		크기	Cm.	
참고사항							
공개여부	공개(○), 비공개()		보고서종류		기술보고서		
비밀여부	대외비(), __ 급비밀						
연구위탁기관				계약번호			
초록 (15-20줄내외)							
<p>한국의 초임계압수냉각로 노심개념에서 부수로 열수력 직경은 6.5 mm 정도이다. 이렇게 좁은 부수로에는 기존의 경수로에서 채택하고 있는 매우 복잡한 형상의 spacer grid 대신에 나선형 wire가 대안이 될 수도 있다. 부수로는 규격제품인 내경 6.32 mm 인코넬 625 튜브 안에 직경 1.3 mm의 스프링 강재 나선형 wire를 삽입하여 모사하였고 매질은 CO₂이다. 실험은 CO₂ 임계압력의 105%와 110%에서 질량유속 400과 1200 kg/m²sec와 열유속 30-90 kW/m²의 범위에서 수행하였다. 입구온도가 5℃일 때 입구 레이놀즈 수는 2.5 x 10⁴ and 7.5 x 10⁴이다. 와이어가 장착된 튜브 안의 열전달은 단순한 튜브의 경우에 비해 거의 2배에 달하는 열전달 상승효과를 보였다. 열전달 상승효과는 와이어와 튜브의 접촉면에서부터 와이어 직경의 40-60배 거리의 하류까지 지속되었다. 튜브 벽면 온도는 와이어 접촉지점 사이의 약 절반에 해당하는 지점까지는 감소하다가 이후에는 증가하였다.</p>							
주제명키워드 (10단어내외)		초임계압, 강제대류열전달, 이산화탄소, 튜브, 와이어 타입 스페이스					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-3800/2009			
Title / Subtitle	Heat transfer experiments in a wire-inserted tube at supercritical pressures		
Project Manager and Department (or Main Author)	Yoon-Yeong Bae/Nuclear Hydrogen Reactor Technology Development Division		
Researcher and Department	Hwan-Yeol Kim/Thermal Hydraulics Safety Research Division		
	Taeho Yoo/Small and Medium Reactor Technology Development Division		
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI
		Publication Date	2009
Page	36p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No ()
		Size	Cm.
Note			
Open	Open(○), Closed()		Report Type TR
Classified	Restricted(), ___Class Document		
Sponsoring Org.			Contract No.
Abstract (15-20 Lines)	<p>The hydraulic diameter of a subchannel in a core concept developed at KAERI is 6.5 mm. The sub-channel is much smaller than that of the conventional PWR, and naturally a helical wire was considered as one of the candidates for a spacer. For simplicity the subchannel is simulated by a commercially available Inconel 625 tube of 6.32 mm ID with a helically-coiled spring steel wire insert of 1.3 mm OD. The medium is CO₂. The test pressures are 7.75 and 8.12 MPa corresponding to 1.05 and 1.1 times the critical pressure of CO₂, respectively. The mass flux and heat flux, which were in the range of 400 ~ 1200 kg/m²s and 30 ~ 90 kW/m² respectively, were varied at a given system pressure. The corresponding Reynolds numbers at the inlet spans between 2.5 × 10⁴ and 7.5 × 10⁴. It was observed that the heat transfer was enhanced by almost twice in most of the tested enthalpy range except for in the the region far from the pseudocritical point. The test results revealed that the wire effect was sustained in the downstream up to 40-60 times the wire diameter. The temperature decreased in the first half of the span between contact points and it increased in the second half of the span.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	Supercritical pressure, forced convection heat transfer, carbon dioxide, tube wire type spacer		