

균일 가열 수직 단일 전열봉을 이용한 재관수시 지지격자 영향에
따른 유동 가시화 실험

Spacer Grid Effect Visualization Experiments During Reflood Period
in a Uniformly Heated Vertical Single Rod

조석, 천세영, 김복득, 박종국, 백원필
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

환형 유동채널에서의 재관수시 지지격자의 영향을 관찰하기 위하여 재관수율, 냉각수 과냉각도, 초기 전열봉 온도 등을 변화하여 이에 따른 유동특성을 관찰 비교하였다. 실험에 사용한 지지격자는 혼합날개가 없는 단순형태의 지지격자와 혼합날개가 달린 형태의 두 가지를 사용하였다. 지지격자 전후에서의 재수착전선의 속도는 혼합날개가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 빠른 것으로 관찰되었고, 지지격자 전후에서의 전열봉 벽온도 거동도 상이하게 관찰되었다. 가열부의 상부는 주로 상부재관수(Top-down flooding)에 의하여 냉각되었으며, 이러한 경향은 전열봉 초기 벽면온도가 높을수록 지연되는 경향을 보였다. 본 실험은 원자력연구소에서 진행중인 6 x 6 봉다발에 대한 재관수 실험의 전단계로서, 재관수시 유동현상의 가시화를 통한 현상의 이해와 이를 바탕으로 심화 연구를 위한 기초 자료를 생산하였다.

Abstract

An experimental study has been performed to investigate an effect of spacer grid in an annulus flow channel with flat power shape single rod during the reflood phase with the variation of flooding velocity, inlet subcooling of water, and initial temperature of heater surface. Two types of spacer grid have been used. One type has swirl vane and the other has no swirl vane. Rewetting velocity through the swirl vane type spacer grid is faster than that of flat type grid and the temperature behavior of heater rod near the spacer grid is observed in a different pattern. Upper part of the heated length is cooled by top-down flooding phenomenon. The top-down flooding is mainly affected by the initial wall temperature. The present study is precursory one to 6 x 6 bundle reflood test, which will be launched at the near future by KAERI.

1. 서론

원자력발전소의 안전성 측면에서 가장 심각한 사고로 취급되는 원자로 일차계통 배관의 파단 사고시 파열부를 통하여 냉각재가 격납용기로 방출되고, 이때 노심은 정지되거나 연료봉내의 잔열 및 붕괴열에 의하여 노심온도는 계속 상승하게 되므로 PCT를 낮추기 위하여 비상노심냉각계통을 통하여 냉각재가 노심으로 주입되어야 하고 노심은 적절한 온도로 유지 되어야 한다. 비상노심냉각재의 주입으로 노심은 refill과 reflood 과정과 같은 복잡한 열전달현상을 통하여 냉각이 진행되는 데, 이에 관한 해석은 파열에 의한 연료봉손상을 방지하고자 하는 측면에서 원자로의 안전성예측에 중요한 의미는 갖는다.¹⁾

재관수열전달 실험은 단일봉, 단일관, 혹은 모의연료봉 다발을 이용하여 많은 연구가 1970년대 초부터 지속적으로 수행되어 왔으나^{2~5)} 아직도 재관수시 발생하는 이상유동에서의 천이점과 열전달계수 예측의 난점 때문에 아직 만족스러운 결과를 얻지 못하고 있으며, 더욱이 지지격자의 영향에 대하여는 더욱 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 현재 원자력연구소에서 추진중인 6 x 6 봉다발 재관수열전달 실험의 전단계 연구로서 재관수시 발생하는 열수력 현상의 관찰을 통해 각종 실험변수 및 지지격자의 영향을 비교/분석함으로써 재관수에 대한 기본적인 이해를 돕고, 6 x 6 봉다발 재관수실험을 위한 기초 실험자료를 생산하는 것을 목표로 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

그림 1과 2에 단일봉 재관수 실험장치와 실험대를 표시하였다. 실험장치는 1개의 냉각수 저장탱크, 냉각수 주입 펌프, 각종 밸브, 실험대 등으로 구성되었다. 실험 초기 및 경계조건설정 및 초기 전열봉 온도설정을 위하여 냉각수 주입배관과 우회배관을 각각 설치하였고, 주입배관과 우회배관의 동시 전환을 위하여 솔레노이드 밸브를 연동하여 사용하였다.

그림 2에서 보듯이 시험대는 하부플레넘, 상부플레넘, 그리고 가시화부로 구성되었다. 가시화부는 길이 700mm 길이의 가시화창 3개를 직렬연결하여 사용하였으며 가시화창의 재질은 열변형을 고려하여 내경 20mm, 두께 10mm의 파이렉스 tube를 사용하였다. 지지격자의 위치는 그림 2에서 보는 바와같이 가시화창 하부에 1개씩을 삽입하였으며, 벽온도 계측을 위하여 0.5mm 직경의 K-형 열전대 6개를 전열봉 외측 벽면에 삽입하였다. 실험중 발생하는 압력강하와 유체온도를 측정하기 위하여 가시화창 사이의 플렌지에 압력도관 및 열전대 설치도관을 각각 설치하였으며, 전열봉의 출력은 현장에서 손쉽게 조절할 수 있도록 설치하였다. 냉각수의 유량 측정을 위하여 코리올리 타입 유량계를 그림 1과 같이 설치하였다. 실험중 발생하는 증기는 상부플레넘에서 응축되어 상부재관수에 작용하거나, 상부 배관을 거쳐 냉각수 저장탱크로 주입되어 응축되도록 하였다. 냉각수 저장탱크는 대기에 열려있으므로 실험은 대기압 조건에서만 수행하였다. 가시화는 고속카메라를 사용하였으며 실험시 500 frames/sec로 이미지를 저장하였다.

실험방법은 초기치 설정단계, 전열봉 가열단계, 그리고 재관수 단계 등의 세 단계로 구분하여 수행하였다. 초기치 설정단계는 시험부로 냉각수를 순환시키면서 냉각수 온도, 유량 등의 설정치에 맞추는 단계이다. 원하는 변수가 설정치에 맞게 되면 냉각수를 우회배관을 통해 우회시키고 시험대를 격리시켜 냉각수를 배출하고 가열을 시작한다. 온도 설정치까지 벽면온도가 상승하면 전열봉의 출력을 적절히 조절하여 온도상승율을 낮추고 주위로의 열방출량과 발열량을 일치시켜 온도를 정상상태로 유지한다. 벽온도가 설정치에 도달하면 재관수 단계로 넘어간다. 재관수 단계에서는 영상 및 자료취득을 시작하고, 냉각수 격리밸브를 열고 우회밸브를 닫아 시험대로 냉각수를 주입한다. 이후 발열부가 완전히 냉각되면 실험을 끝마친다.

실험조건은 초기 전열봉온도 500, 600, 700℃, 주입수 온도 20, 50, 70℃, 그리고 재관수 속도 2, 5, 8 cm/s로 하였고, 상기 변수에 대해 지지격자를 바꿔가면서 실험하였다.

3. 실험결과 및 논의

3.1 재관수 가시화

그림 3에 재관수시 지지격자 전후에서의 유동패턴을 실험에 사용한 두개의 지지격자에 대하여 표시하였다. 그림에서 보는 바와같이 혼합날개가 없는 지지격자의 경우 지지격자 전후에서의 유동이 크게 변화하지 않는 반면, 혼합날개가 달린 것의 경우는 혼합날개에 의한 난류의 영향으로 지지격자 후류에서 보다 큰 유동혼합이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 혼합날개에 의한 난류의 생성과 이에따른 유동혼합은 분산류 열전달을 더욱 증진시켜 벽면온도의 상승을 막고 재수착전선의 빠른 진행에 도움을 주게 된다. 그림 4에 지지격자에 따른 재수착전선의 진행양상을 표시하였다. 혼합날개가 없는 지지격자의 경우 지지격자 상류에서 진행되는 재수착전선이 지지격자를 통과하여 하류쪽으로 단조롭게 진행되는 데 반해서, 혼합날개가 있는 경우는 지지격자의 상하류에서 공히 재수착전선에 생성되어 동시에 진행됨으로서 재수착전선의 진행이 지지격자 사이를 두고 급격히 진행되는 경향이 있다.

재관수시에는 주입된 냉각수가 가열면에 도달하면 급격한 증발로 다량의 증기가 발생하고 이로 인해 액적의 이탈과 점착이 심화되어 분산류 막비등이 발생하게 된다. 이러한 과정에서 냉각수는 수직유동채널의 축방향을 따라 마치 맥동하듯 위아래로 출렁이게 되므로 지지격자를 통한 혼합효과와 이를 통한 냉각효과는 지지격자의 위와 아래방향으로 전과된다. 그림 4의 혼합날개가 있는 지지격자의 경우에는 이러한 냉각효과를 분명히 관찰할 수 있다.

3.2 실험결과 및 주요 변수 경향

그림 5에 재관수시 채널내 유체의 온도와 전열봉 벽면온도 변화를 표시하였다. 그림 5(a)에서 보듯이 냉각수에 잠겨있는 유체온도 측정용 열전대(TE-01)는 유체의 주입온도에

맞게 유지되고 있으나, 다른 유체용 열전대(TE-02~04)에서 측정된 온도는 재관수의 시작과 함께 포화온도 부근까지 급격히 상승한 후 벽면의 냉각과 때를 같이하여 냉각된다. 본 연구에서 측정된 유체온도는 액적의 영향에 의한 액체의 온도이고 과열증기의 온도를 측정하지는 못하였고, 과열증기의 온도는 추후 실험에서 측정될 것이다. 과열증기 측정용 온도계측기는 현재 설계가 끝났으며, 제작과 실증실험만 남겨두고 있는 상태이다.

그림 5(b)에 표시되어있는 벽면 온도 거동으로부터 냉각수의 주입으로부터 시작된 하부(bottom-up)재관수와 상부(top-down)재관수의 영향을 알 수 있다. 재관수의 시작 후 수초 후부터 벽면온도는 소폭 하강하기 시작하고, 이러한 경향은 재수착전선의 접근에 따라 더욱 강해져 온도 하강율이 급격히 증가하다가, 재수착전선이 열전대를 적시면 급격한 온도하강으로 이어진다. 상부플레넘으로부터 응축증기의 하강에 의하여 TW-06이 먼저 냉각되고 이어서 TW-05가 냉각된다. TW-05와 TW-06 사이의 거리가 20 mm라는 것을 생각하면 상부로부터의 재수착속도는 하부로부터의 재수착속도에 비해 매우 느림을 알 수 있다. 또한 벽면온도가 증가함에 따라서 재관수 시작부터 상부재관수까지 소요시간이 증가하는 것으로 관찰되었고, 이러한 증가의 경향은 재관수율이 증가할수록 강하게 나타났다. 그림 6에 벽면온도 변화에 따른 재관수 시작부터 상부재관수까지 소요시간을 표시하였다. 상부재관수는 혼합날개가 있는 지지격자의 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 상대적으로 빠르게 발생하였고, 이러한 차이는 벽면온도가 증가할수록 크게 나타났다.

그림 7에 지지격자 전후에서의 벽면온도거동을 비교하여 표시하였다. 그림에서 관찰할 수 있듯이 지지격자 전의 온도(TW-02)의 온도는 비슷한 시점에서 냉각되고 있으나, 지지격자 후의 온도(TW-03)는 혼합날개가 있는 지지격자의 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 빠르게, 심지어는 TW-02보다도 빠르게 냉각되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 상부재관수에 의한 것이 아니라 지지격자의 영향 때문에 기인하며, 재수착 전선의 진행에 혼합날개로 인한 난류발생 및 열전달 증진이 중요한 작용을 하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8, 9, 10에 각 변수의 변화에 따른 재수착온도 및 속도의 변화를 표시하였다. 재관수속도가 증가할수록 재수착속도 및 온도는 증가하는 것으로 관찰되었고, 초기 벽면온도의 증가에 따라서 재수착속도는 감소하나 재수착온도는 증가한다. 주입 냉각수온도가 증가할수록 재수착속도 및 온도는 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 균일 출력분포를 가진 전열봉을 사용한 환형유동채널에서의 재관수시 발생하는 열수력특성을 지지격자와 각종변수의 영향을 통해 고찰하였다. 향후 전열봉의 출력분포를 변화하고 다른 형상의 지지격자를 사용하여 추가적인 실험이 진행될 것이고 이러한 실험자료는 6 x 6 봉다발 재관수 실험자료의 해석을 위한 기초자료로서 사용될 것이다.

본 실험을 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

1. 혼합날개가 있는 지지격자의 경우 난류의 발생을 촉진하여 지지격자 전후에서의 열전달을 증진시켜 재수착전선의 진행을 원활히 한다.
2. 상부재관수는 혼합날개가 있는 지지격자의 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 상대적

으로 빠르게 발생하였고, 이러한 차이는 벽면온도가 증가할수록 크게 관찰되었다.

3. 재관수속도가 증가할수록 재수착속도 및 온도는 증가하고, 초기 벽면온도의 증가에 따라서 재수착속도는 감소하나 재수착온도는 증가하였다. 또한 주입 냉각수온도가 증가할수록 재수착속도 및 온도는 감소하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) G. Yadigaroglu, 1978, The reflooding phase of the LOCA in PWRs, Nucl. Safety, 19(1), pp. 20~ 36.
- (2) 정문기, 박종석, 이영환, 1987, 비상노심냉각시 노심의 열수력학적 특성에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집, 11(4), pp. 597 ~ 606.
- (3) Z. Koszela, 1998, Effects of spacer grids with mixing promoters on reflood heat transfer in a PWR LOCA, Nucl. Tech., 123, pp. 156 ~ 165.
- (4) Y. Koizumi, et al., 1990, High-pressure reflooding experiments of multi-rod bundle at ROSA-IV TPTF, Nucl. Eng. Des., 120, pp. 301 ~ 310.
- (5) Y. Murao, 1978, Correlation of quench phenomena for bottom flooding during loss-of-coolant accidents, Journal of Nucl. Sci. Tech., 15(2), pp. 875 ~ 885.

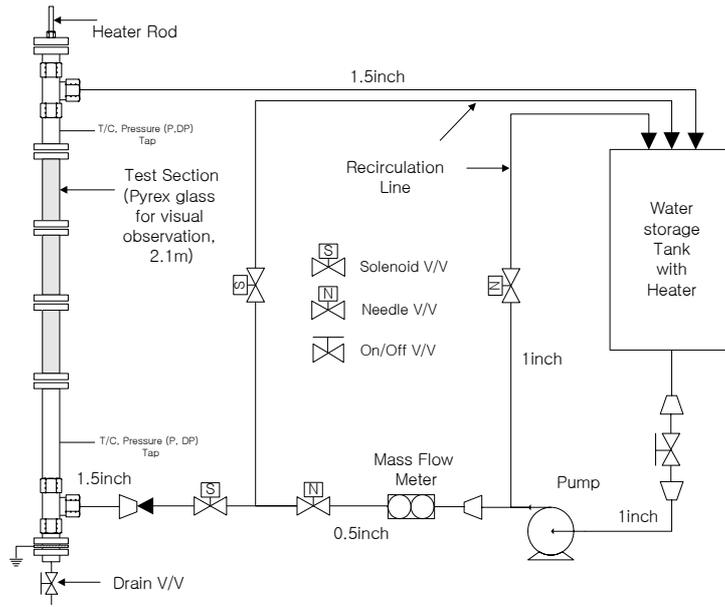


그림 1. 단일봉 재관수 실험장치

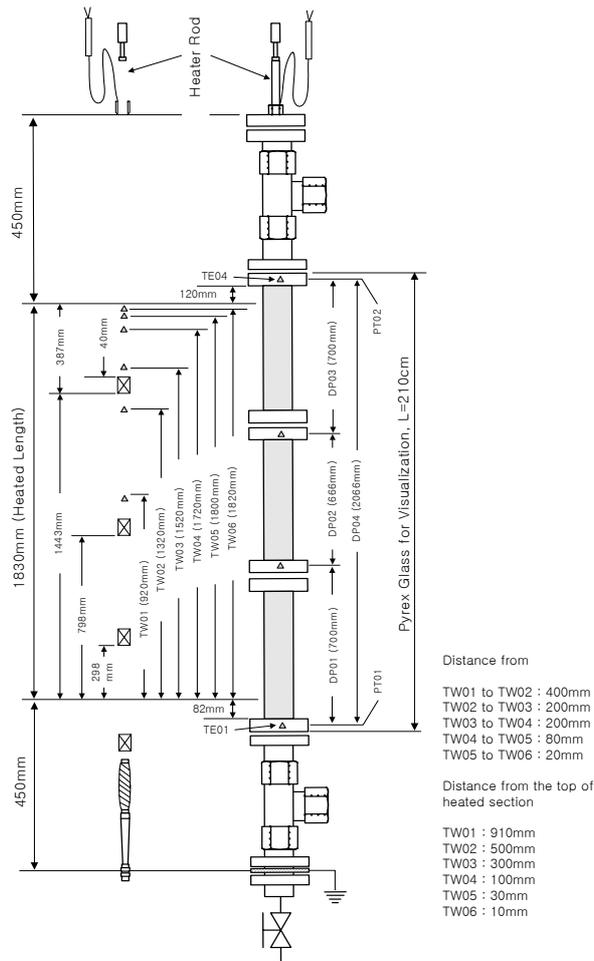


그림 2. 재관수 시험대 및 계측기 위치

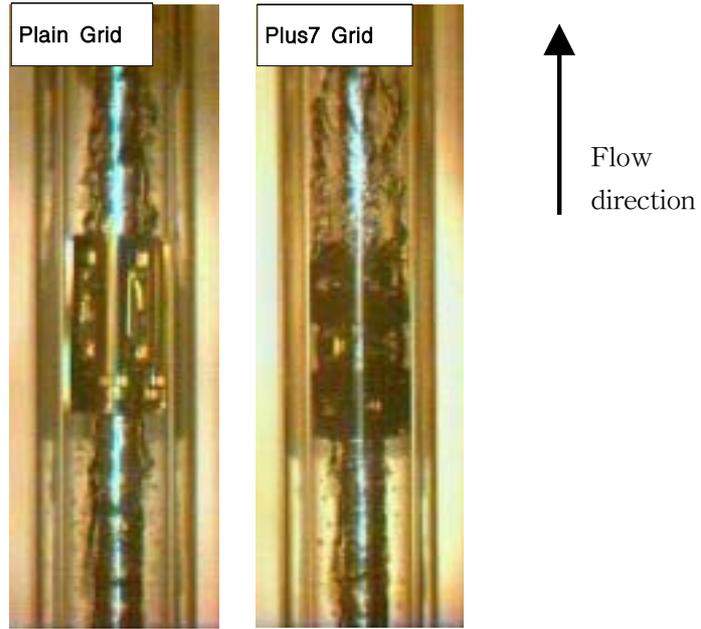


그림 3. 재관수시 지지격자에 따른 유동패턴 가시화 (재관수율: 2 cm/s, 전열봉 초기벽온도: 600°C, 냉각수온도: 50°C)

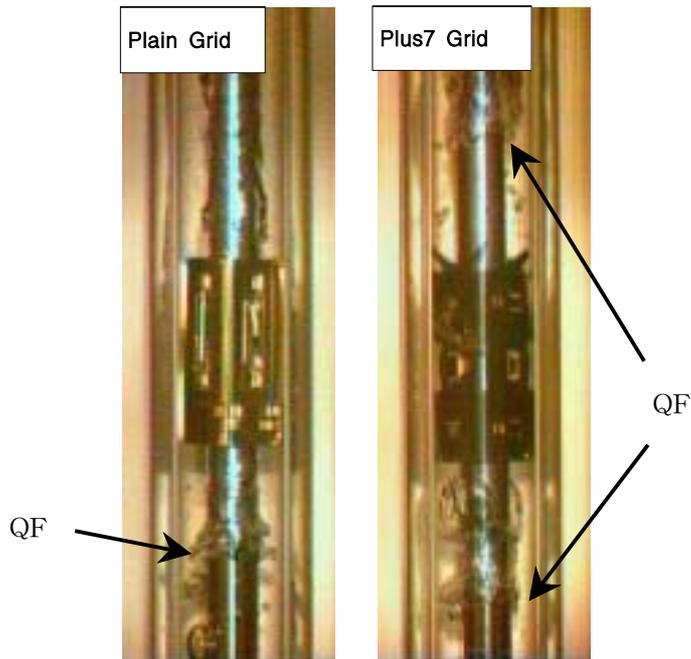
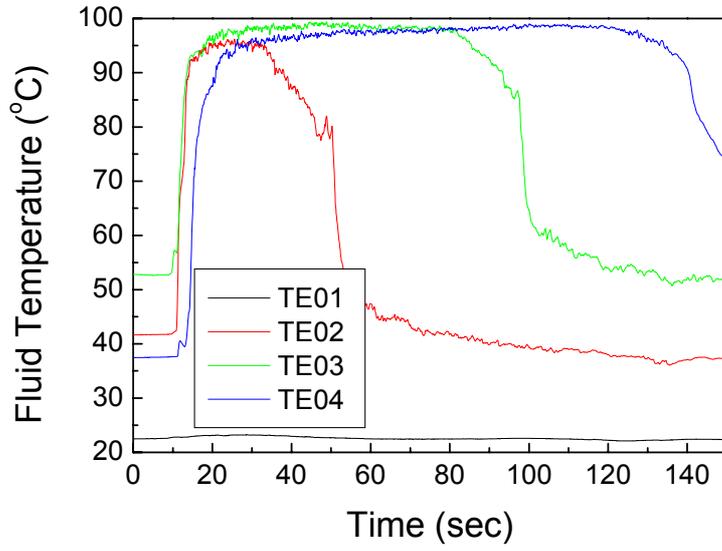
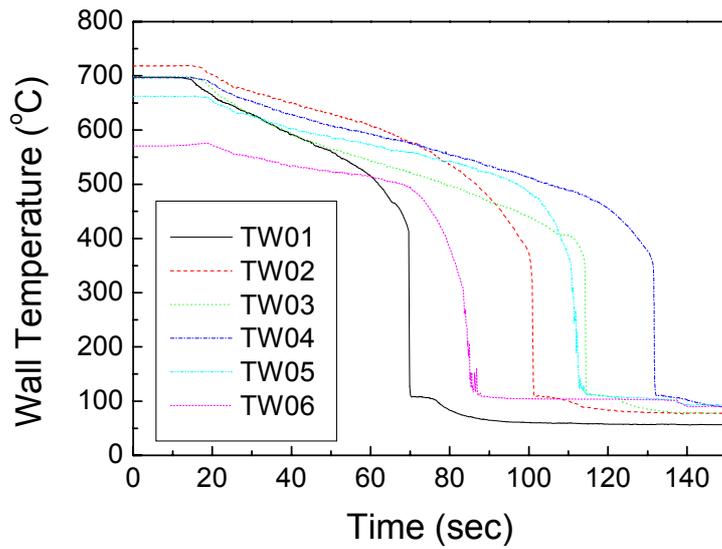


그림 4. 지지격자에 따른 재수착전선의 움직임(재관수율: 8 cm/s, 전열봉 초기벽온도: 700°C, 냉각수온도: 80°C, QF: 재수착전선)



(a) 유체 온도 거동



(b) 벽면 온도 거동

그림 5. 재관수시 채널내 유체온도 및 벽면온도 거동 (지지격자 형상: PLUS 7, 재관수율: 5 cm/s, 전열봉 초기벽온도: 700°C, 냉각수온도: 20°C)

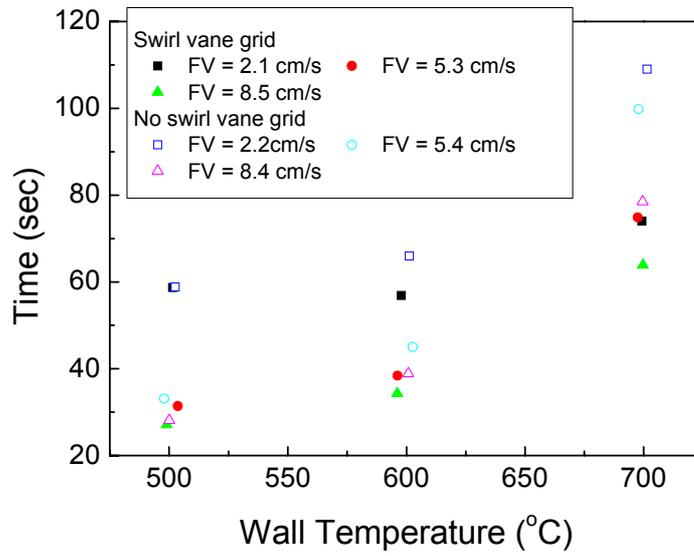


그림 6. 벽면온도에 따른 상부채관수 소요시간비교(냉각수온도: 20°C, FV: flooding velocity)

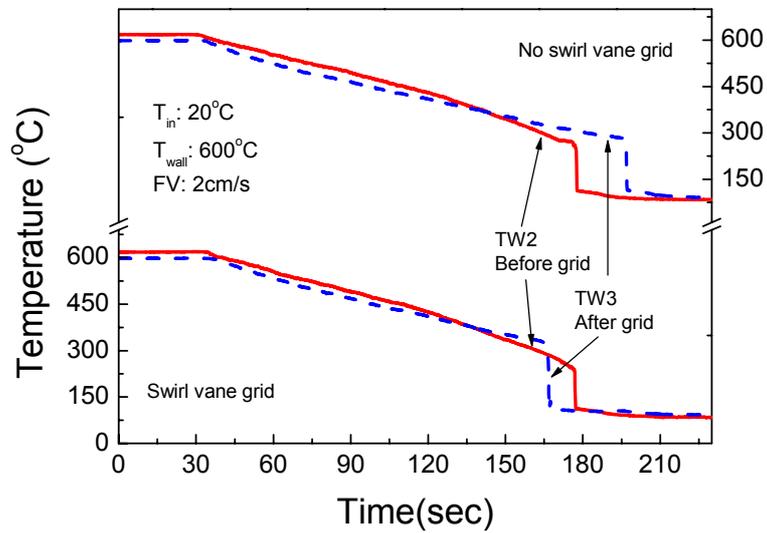
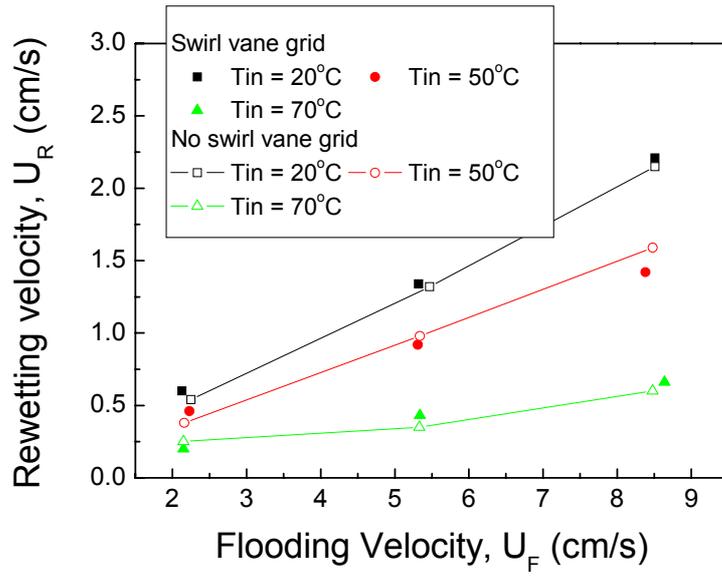
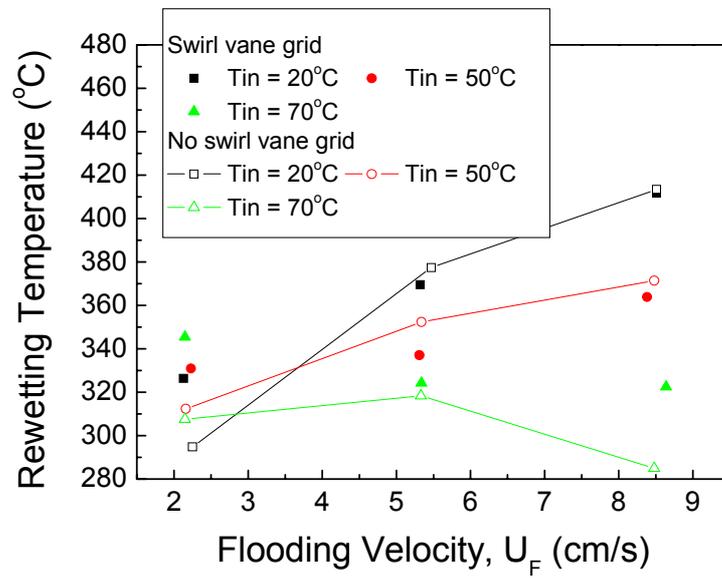


그림 7. 지지격자 전후에서의 벽면온도거동비교(채관수율: 2 cm/s, 전열봉 초기벽온도: 600°C, 냉각수온도: 20°C)

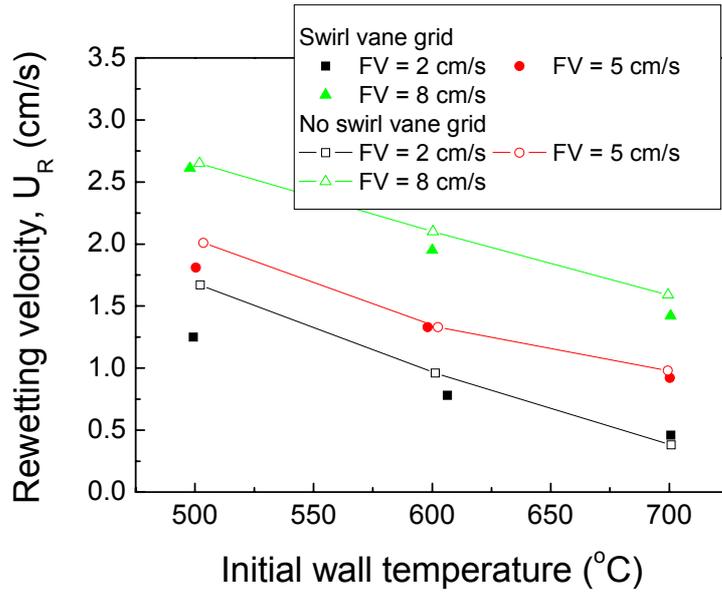


(a)

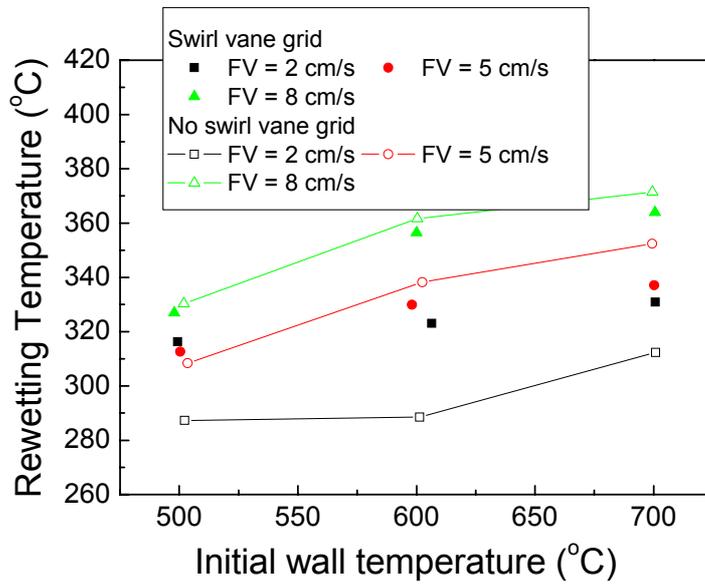


(b)

그림 8. 재관수속도 변화에 따른 재수착온도 및 재수착속도 변화비교(초기 벽면온도: 700°C)

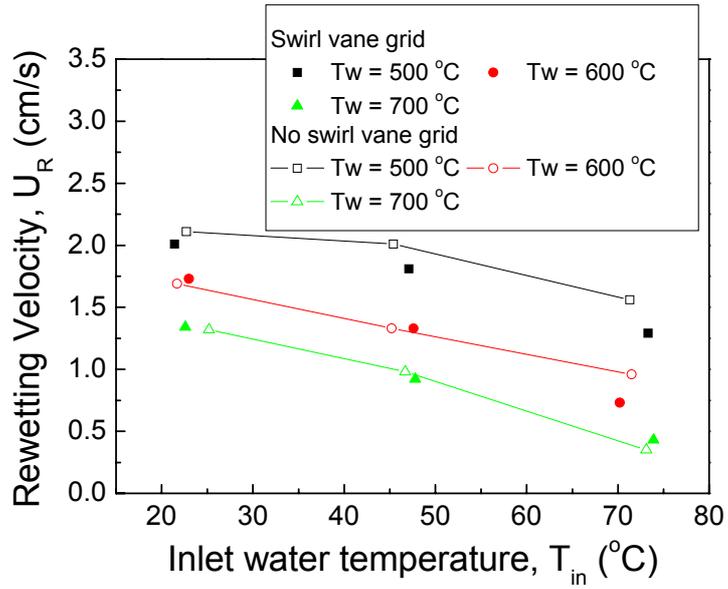


(a)

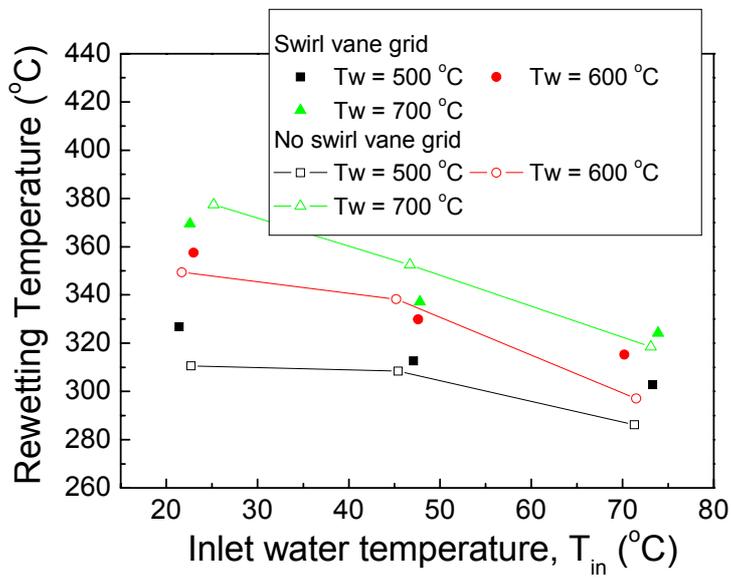


(b)

그림 9. 초기 벽면온도 변화에 따른 재수착온도 및 재수착속도 변화비교(냉각수온도: 50 $^{\circ}\text{C}$)



(a)



(b)

그림 10. 냉각수온도 변화에 따른 재수착온도 및 재수착속도 변화비교(재관수속도: 5 cm/s)