

〈論 文〉

## 와이어불이관의 핵비등 열전달촉진

김내현\* · 김정식\*\* · 남기일\*\*\*

(1993년 7월 14일 접수)

### Enhancement of Nucleate Pool Boiling of a Wire-Wrapped Tube

Nae-Hyun Kim, Jung-Sik Kim and Kee-il Nam

**Key Words :** Pool Boiling(풀비등), Enhancement(촉진), Wire-wrapped Tube(와이어불이관), Water(물), R-113

#### Abstract

In this study, experimental results of the nucleate boiling of wire-wrapped tubes are provided. Both water and R-113 were boiled. Solid stainless steel wires, stranded copper wires and stranded nylon wires were tested. Solid stainless wire is effective to enhance the boiling of water. The performance is approximately the same(or slightly better at certain conditions) as that of GEWA-T tubes. For the test range of wire diameter  $0.6 \text{ mm} \leq d \leq 2.6 \text{ mm}$ , the optimum gap width increases as the wire diameter increases. The maximum heat transfer coefficient was obtained for the 1.0 mm diameter wire, and it is 1.6 times larger than that of the GEWA-T at the heat flux of  $20 \text{ kW/m}^2$ . Solid stainless wire is also effective to enhance the boiling of R-113 at low heat fluxes. The performance of the wire-wrapped tube approaches that of GEWA-T. At high heat fluxes, however, the enhancement decreases. The reason may be attributed to the cavity shape and the high wettability of the refrigerants. stranded copper or nylon wire is effective to enhance the boiling of R-113. The performance is approximately the same(or slightly better) as that of GEWA-T tubes. Maximum heat transfer was obtained for the stranded nylon wire, and it is approximately 1.4 times larger than that for the GEWA-T at the heat flux of  $20 \text{ kW/m}^2$ . The reason may be attributed to the favorable thermal environment in the restricted regions formed by twisted wires.

———— 기 호 설 명 —————

$\Delta T$  : 벽면 과열도 ( $= T_w - T_{sat}$ ) (°C)

$d$  : 와이어직경 (mm)

$g$  : 와이어간격 (mm)

$h$  : 비등 열전달계수 ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )

$q$  : 열유속 ( $\text{W/m}^2$ )

$T_w$  : 관 벽면온도 (°C)

$T_{sat}$  : 포화온도 (°C)

#### 1. 서 론

핵비등 열전달은 원자로 내에서나 냉동기의 증발기내에서 일어나는 중요한 열전달방식으로 그 전열 성능이 매우 뛰어나다. 핵비등 열전달의 전열 성능이 뛰어난 이유는 기포가 열전달 표면에서 발생할 때 잠열을 이용하고, 이탈할 때 주위의 유체에 격

\*정회원, 금오공과대학교 기계공학과

\*\*정회원, 금오공과대학교 대학원

\*\*\*한국원자력연구소

심한 유동을 유발하기 때문이다. 핵비등을 촉진시키기 위해서는 기포의 발생을 조장하고 안정화시켜야 한다. 이는 열전달 표면에 인위적으로 작은 공동을 형성해 줌으로써 가능한데, 열전달 표면을 성형하거나 작은 입자를 표면에 소결하는 방안이 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 이 중 간단하면서도 효과적인 방법으로 와이어불이 기술이 Webb<sup>(2)</sup>와 Schmittle 등<sup>(3)</sup>에 의하여 제안되었다. 그들은 금속 또는 비금속 와이어를 평판이나 낮은 핀관(low-fin tube)에 감아서 실험하였는데, 낮은 핀관이나 나일론와이어를 사용한 경우 촉진효과가 있음을 발견하였다. Webb<sup>(2)</sup>는 그 이유를 핀관와이어에 의해 형성되는 좁은 틈새가 연속적인 비등개소(nucleation site)로 작용하기 때문이라고 설명하였다. 문헌조사 결과 그 이후로 와이어불이관에 대하여 이렇다 할 연구는 계속되지 않았다.

본 연구에서는 와이어불이관에 대하여 체계적인 실험을 수행하였다. 기저관으로는 평판을 사용하였고, 와이어불이관은 5가지 다른 직경(0.6, 1.0, 1.4, 2.0, 2.6 mm)의 스테인레스와이어를 평판에 감아 제작하였다. 실험은 와이어간격을 0.05 mm에서 1.0 mm까지 변화시켜 가며 수행하였다. 또한, 나일론와이어와 가는 구리와이어를 꼬아 만든 와이어(stranded wire)도 실험하였다. 비등액으로는 물과 R-113이 사용되었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 시험부는 직경 152 mm, 400 mm의 동관으로 제작되어 일단에는 시험 전열관이 장착되고, 다른 단에는 관 측창을 설치하여 비등현상을 관측하고 수위를 측정할 수 있도록 하였다. 시험부에서 증발한 증기는 시험부 상부에 위치한 응축기에서 응축되어 시험부로 되돌아 온다. 응축수로는 수도물을 사용하였다.

와이어불이관은 Fig. 2에 나타내었다. 기저평관으로 황동봉을 외경 19.0 mm, 내경 10.0 mm로 가공하여 사용하였다. 관의 내부에는 길이 90 mm, 직경 8 mm의 발열체를 장착하였다. 발열체는 세라믹봉에 가는 니크롬선을 감아 제작하였는데 최대 250 W를 발열할 수 있었다. 공급열량은 정밀한 전압계와 전류계를 사용하여 측정하였고 변압기를 사용하여 그 열량을 조절하였다. 시험중 포화온도는

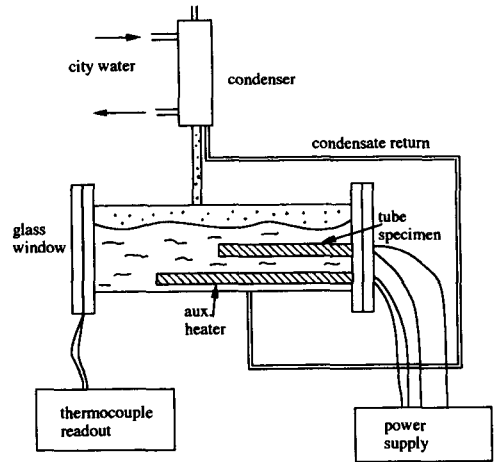


Fig. 1 Schematic drawing of the apparatus

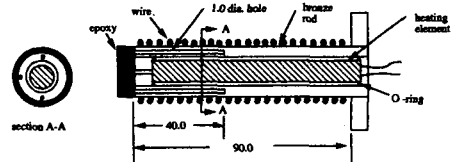


Fig. 2 Cross-sectional view of the test tube

보조히터를 사용하여 유지하였다.

관 표면온도는 관의 상부, 측부, 하부의 세곳에 관 표면으로부터 1.5 mm 떨어진 지점에 직경 1.0 mm의 구멍을 40 mm 깊이로 가공하여 열전대를 그 구멍에 삽입하여 측정하였다. 구멍에 열전대를 삽입한 후 에폭시로 시험 전열관의 측면을 절연하여 액의 침입을 막고, 열손실을 최소화하였다. 액의 온도는 열전대를 액중에 침잠시켜 측정하였는데 그 위치는 에폭시로 절연된 시험 전열관의 측면에서 1 cm 떨어진 곳이었다. 시험중 기포의 유동으로 인하여 열전대의 위치가 다소 변화했으나 열전대가 나타내는 온도는 변함이 없었다. 본 논문에서 사용된 열전대는 Cu-Co으로 직경 0.13 mm의 가는 피복선을 사용하였다.

### 2.2 시험 전열관

본 연구에서는 세 종류의 와이어 — 스테인레스와이어, 꼬은(stranded) 구리와이어, 나일론와이어 — 를 사용하였다. Fig. 3에 와이어의 사진이 나타나 있다. 꼬은 구리와이어와 나일론와이어는 관에 손쉽게 감을 수 있었다. 그러나 스테인레스와이어는 탄성이 가하여 관에 감기가 어려웠으므로 우선

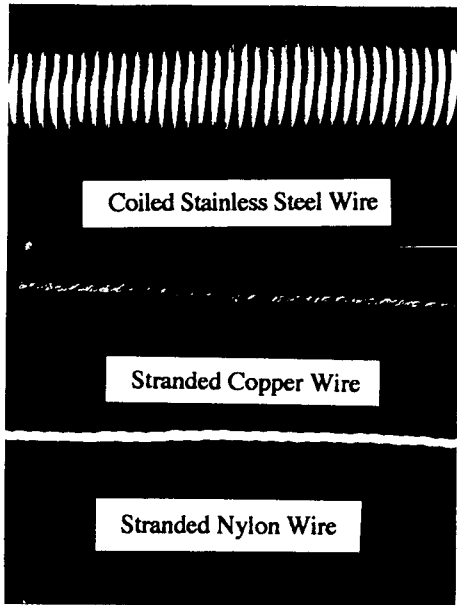


Fig. 3 Photos of the wires

스프링 형태로 제작한 후 관외측에 끼워넣는 방법을 택하였다. 본 연구에 사용된 스테인레스와이어의 직경은 0.6, 1.0, 1.4, 2.0, 2.6 mm이고 꼬은 구리 와이어는 0.4와 1.2 mm, 나일론 와이어는 1.0 mm이었다. 꼬은 구리 와이어와 나일론 와이어는 손으로 관에 감아 사용하였는데, 이 경우 와이어 간격은 적당한 굵기의 보조선을 함께 감은 후 보조선만을 풀어냄으로써 유지하였다.

스테인레스와이어의 경우 와이어 간격을 0.05 mm 부터 1.0 mm까지 변화시켜 가며 실험하여 최적 와이어 간격을 구하였다. 이러한 미세한 와이어 간격은 우선 와이어를 스프링 형태로 만들어 관외측에 끼워 넣은 후 끝이 예리한 칼을 사용하여 미세 조절하였다. 또한 각각 실험직전과 직후에 간격을 측정하여 비등 실험중의 간격변화를 검사하였다. 와이어 간격은 해상도가 0.01 mm인 광학확대경을 사용하여 측정하였는데 그 간격은  $\pm 0.02$  mm 이내로 균일하였다.

### 2.3 실험방법

매번 실험전 시험 전열관과 시험부를 아세톤으로 깨끗이 닦아낸 후 실험에 임하였다. 기저 평판도는 사포(입도 CW 800)로 사포질하여 일정한 표면거칠기를 유지하도록 하였다. 비등현상은 열전달 표면의 상태에 매우 민감하에 반응하므로 매 실험

시마다 표면의 상태를 일정하게 유지해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 Bergles와 Chyu<sup>(4)</sup>가 제안한 표면처리기법을 사용하였다. 그 방법은 우선 시험 전열관을  $30 \text{ kW/m}^2$ 의 열유속에서 한 시간 가량 비등시켜 시험 전열관과 액중의 잔류가스를 제거한 후 열유속을 천천히 0까지 감소시킨다. 다음 30분간 보조히터를 사용하여 액의 온도를 포화 온도에 유지시킨다. 그 후 시험 전열관의 열유속을 조금씩 증가시켜 가며 벽면온도와 액의 온도를 측정한다. 열유속을 변화시킨 후에는 정상상태를 얻기 위하여 5내지 10분 후에 온도를 측정하였다. 또한, 온도를 측정하기 전 보조히터를 꺼서 보조히터에 의한 시험부의 유동을 막았다. 최대 열유속에 도달한 후에는 열유속을 감소시켜 가며 측정하였다. 이와 같은 방법으로 비등의 Overshoot현상을 측정할 수 있었다. 실험중 액의 수위는 시험 전열관 위 5 cm를 유지하도록 하였고 실험은 대기압하에서 수행되었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 실험의 신뢰도 평가

관의 벽면온도는 관의 상부, 하부, 측면에 설치된 세개의 열전대를 통하여 측정되었다. 측정위치가 벽면으로부터 1.5 mm 하부에 위치하므로 벽면의 온도는 원주에 대한 열전도방정식을 풀어 외삽법으로 구하였다. 실험자료가 신뢰도를 갖기 위해서는 열유속이 원주방향으로 균일하고 열전대가 적절히 설치되어야 하는데 이는 관을 원주방향으로 회전시켰을 때 같은 원주각 위치에서 열전대에 관계없이 같은 온도를 나타내는지를 확인해 봄으로써 가능하다. 실험결과 온도들은 최대 열유속(약  $50 \text{ kW/m}^2$ )에서  $\pm 0.5 \text{ C}$  이내에서 일치함을 알 수 있었고 이 값은 열유속이 감소할 수록 줄어들었다.

실험의 불확실도(uncertainty)에 대한 해석도 수행되었다. 실험의 불확실도는 크게 온도, 열유속, 그리고 시편 가공에 대한 불확실도로 나눌 수 있는데, 이 중 온도에 대한 불확실도가 가장 커서 열전달계수로 나타내었을 때  $40 \text{ kW/m}^2$  정도의 높은 열유속에서는 약 10%,  $5 \text{ kW/m}^2$  정도의 낮은 열유속에서는 약 20% 정도로 나타났다. 기타 열유속에 대한 불확실도는 약 3%, 시편 가공에 대한 불확실도는 약 1%정도 되었다. 실험의 반복도(repeatability)를 산정하기 위하여 동일한 운전조

전에서 수회 반복실험하였는데, 반복도는 열전달계수로 나타내었을 때 10% 이내에 들었다.

3.2 원주방향의 벽면 과열도변화

Fig. 4는 열유속 50 kW/m<sup>2</sup>에서 평관과 와이어불이관( $d=2.6$  mm,  $g=0.3$  mm)의 원주방향의 벽면 과열도( $\Delta T = T_w - T_{sat}$ )를 나타낸다. 원주각은 관 상부로부터 시계방향으로 측정되었다. Fig. 4는 물과 R-113의 결과를 보여준다. 물의 경우 평관의 관의 상부가 하부보다 높은 과열도를 나타내는 반면 와이어불이관은 상부와 하부의 차이가 거의 없다. R-113의 경우는 평관과 와이어불이관 모두 원주방향으로 별 차이를 보이지 않는다. Webb과 Pais<sup>(5)</sup>는 26-fpi(fins per inch)의 낮은 핀관에 대한 R-113 비등실험에서 상부의 과열도가 하부나 측면

에 비하여 더 크다고 보고하였다.

3.3 평관 실험결과

물과 R-113에 대한 평관의 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, 벽면온도는 원주방향 값의 평균치를 사용하였다. Fig. 5에는 Rohsenow<sup>(6)</sup>의 상관식과 Stephan과 Abdelsalam의 상관식도 나타내었는데 Rohsenow의 상관식은 물에 대한 실험결과와 Stephan과 Abdelsalam 상관식은 R-113의 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Stephan과 Abdelsalam 상관식은 물에 대한 실험 결과는 다소 과소 예측함을 알 수 있다.

3.4 스테인레스 와이어 실험결과

(1) 물 : Fig. 6과 7에 열유속 4 kW/m<sup>2</sup>와 20 kW/m<sup>2</sup>에서 평관과 와이어불이관의 비등 장면을 찍은 사진이 있다. 와이어불이관은 직경 2.0 mm의 와이어를 와이어 간격이 0.2 mm로 유지한 경우이다. Fig. 6은 열유속 4 kW/m<sup>2</sup>의 비등 사진으로 평관에서는 기포가 아직 생기지 않았는데 와이어불이관에서는 이미 기포가 발생했음을 보여준다. 즉,

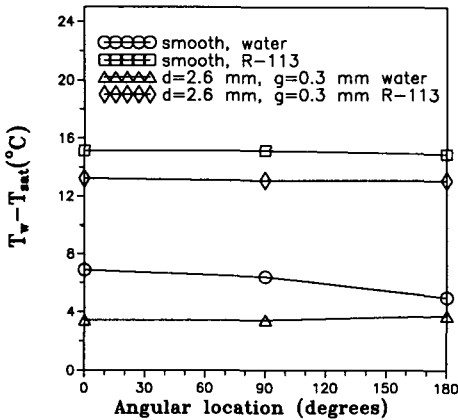


Fig. 4 Circumferential wall superheat variation

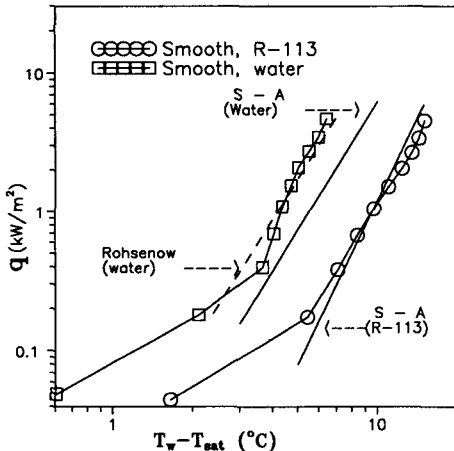
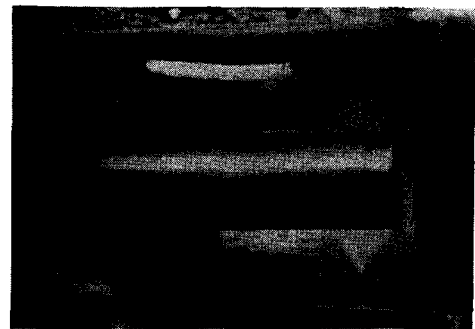


Fig. 5 Smooth tube pool boiling data



(a) Smooth tube



(b) Wire-wrapped tube

Fig. 6 Photos showing pool boiling at 4 kW/m<sup>2</sup>

와이어불이관은 평관에 비하여 훨씬 낮은 열유속에서 비등을 시작했음을 알 수 있는데, 이 사실은 비등곡선으로도 부터도 확인할 수가 있다. Fig. 6은 대표적인 와이어불이관의 핵비등 실험결과를 보여 준다. 평관의 경우 열유속이  $4 \text{ kW/m}^2$  근방에서 비등 개시점(onset of nucleate boiling point)을 확인할 수 있는데 반하여 와이어불이관은 훨씬 낮은 열유속(와이어 간격 0.4, 0.5, 0.6 mm 경우 약  $1 \text{ kW/m}^2$ )에서 비등이 시작함을 알 수 있다. 와이어 간격이 0.3 mm 보다 작은 경우는 비등 개시점을 확인할 수가 없는데 이는 이미 훨씬 낮은 열유속에서부터 비등이 시작되었기 때문으로 판단된다. 와이어불이관이 평관에 비하여 비등개시점이 낮은 이유는 와이어가 형성하는 공동의 열적환경이 비등을 유발시키기에 좋기 때문으로 판단되는데 Chyu와 Mghamis<sup>(9)</sup>는 흡진영역에서는 액체의 온도 분포곡선이 기포의 생성에 유리하도록 된다고 보고한 바 있다.

Fig. 7은 열유속  $20 \text{ kW/m}^2$ 에서의 비등사진인데 와이어불이관에서 훨씬 왕성한 비등이 일어남을 보



(a) Smooth tube



(b) Wire-wrapped tube

Fig. 7 Photos showing pool boiling at  $20 \text{ kW/m}^2$

여준다. 기포의 형태 및 크기도 서로 다른데, 평관에서는 직경이 큰 기포가 산발적으로 발생하고 와이어불이관에서는 작은 기포들이 많이 발생함을 보여 준다. 평관의 경우 전열면에서 생성된 기포는 이탈할 때까지 주위의 간섭을 받지 않고 성장할 수 있으나 와이어불이관의 경우는 주위의 와이어로 인하여 기포가 크게 성장하지 못하고 작은 상태로 이탈하게 된다. 또한 와이어불이관에서는 인접 와이어가 형성한 공동에서 많은 기포를 발생시킴을 알 수 있다.

Fig. 8은 와이어 직경 2.0 mm의 핵비등 실험결과이다. 일반적으로 비등에 사용되는 열전달 촉진관의 경우 열전달 표면적을 관의 최외곽 직경을 기준으로 계산하는데, 본 논문에서도 이러한 관례를 따랐다. 예를 들면 길이 90 mm, 외경 19 mm의 평관에 직경 2.0 mm의 와이어를 감았을 경우 이 와이어불이관의 열전달 표면적은  $\pi \times 23 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} = 6503 \text{ mm}^2$ 이 된다. Fig. 8은 와이어 간격이 감소할수록 촉진효과가 증가하다가 0.2 mm에서 최대가 되고(직경 2.0 mm 와이어의 경우) 그 이하에서는 다시 촉진효과가 감소함을 보여 준다. 와이어 간격 0.1 mm의 경우는 높은 열유속에서 성능이 평관보다 나빠지는데 그 이유는 와이어 간격이 너무 좁으면 기포가 좁은 와이어 사이를 잘 빠져 나가지 못하고 상당 시간 와이어 사이의 공동에 머무름으로써 기포의 발생 빈도수가 낮아지기 때문으로 판단된다. 와이어 간격이 0.2 mm보다 커지면 열전달

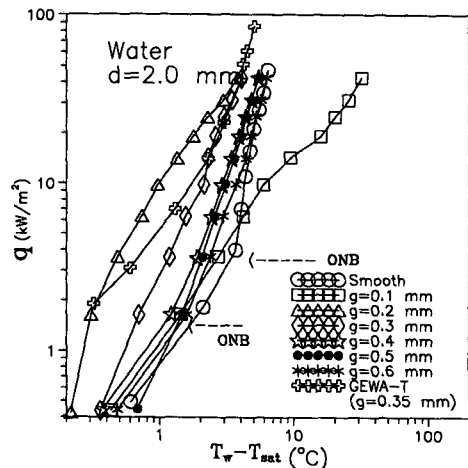


Fig. 8 Boiling performance of the stainless steel wire wrapped tube (water,  $d=2.0 \text{ mm}$ )

성능이 점점 감소하다가 평균 값에 근접하는데 이는 와이어 간격이 특정치 이상으로 커지면 와이어와 열전달 표면이 더 이상 공동을 형성치 못하고 와이어는 단지 열전달 면적을 증가시키는 역할밖에 하지 못하기 때문으로 판단된다. Fig. 8에는 또한 Ayub와 Bergles<sup>(8)</sup>가 측정한 GEWA-T의 실험자료가 나타나 있다. GEWA-T는 관의 외측에 T형의 핀이 부착된 외경 19.05 mm인 관으로 핀형상은 Fig. 12에 나타나 있다. Ayub와 Bergles는 핀 간격이 0.15 mm에서 0.55 mm까지 실험하였는데 그들은 물의 경우 핀 간격이 0.35 mm에서, R-113의 경우는 0.25 mm에서 최대 성능을 얻을 수 있다고 보고하였다. GEWA-T의 핀 간격은 T형 핀 사이의 간격을 지칭한다. Fig. 8에 나타난 GEWA-T자료는 핀 간격 0.35 mm의 경우이다. Fig. 8은 0.2 mm간격의 와이어불이관의 GEWA-T보다 성능이 우수함을 보여준다. Fig. 8은 또한 와이어 간격이 감소할수록 핵비등 곡선의 경사가 점차 완만해짐을 보여준다.

Fig. 9에는 와이어불이관의 열전달 성능에 미치는 열유속의 영향을 열전달계수로 나타내었다. 열전달계수는 열유속을 벽면 과열도로 나눈 값으로 식(1)로 정의된다.

$$h = q / (T_w - T_{sat}) \quad (1)$$

Fig. 9는 와이어 간격이 0.2 mm보다 작은 경우 열전달계수는 열유속에 무관하게 일정하고 0.2 mm보다 큰 경우에는 열유속이 감소할수록 열전달계수

가 감소함을 보여준다. 이 결과는 Fig. 8에 나타난 비등곡선의 기울기로 부터도 예측할 수 있는데 Fig. 8은 와이어 간격이 0.1, 0.2 mm인 경우는 곡선의 기울기가 대략 45°정도이고 0.2 mm이상에서는 기울기가 더 커짐을 보여준다. 열전달계수는 식(1)에 나타난 바와 같이 열유속을 벽면 과열도로 나눈 값이므로 비등곡선의 기울기가 45°이면 그 값은 열유속에 관계없이 일정하게 된다. 따라서 와이어 간격이 0.1, 0.2 mm인 경우는 열전달계수가 열유속에 관계없이 일정하고 0.2 mm보다 큰 경우는 열유속이 증가할수록 열전달계수가 증가하게 된다. 또한 좁은 간격의 (0.1, 0.2 mm) 와이어불이관의 촉진효과는 열유속이 커질수록 감소한다는 것을 의미하는데 이는 열유속이 커지면 기포가 많이 생기게 되고 좁은 와이어 간격으로는 생성된 기포가 적절하게 빠져나가지 못하기 때문으로 판단된다. Ayub와 Bergles<sup>(8)</sup>는 GEWA-T관에 대한 실험을 통하여 핀 간격이 0.15 mm와 0.55 mm사이에서 열유속이 감소할수록 열전달계수가 감소함을 보여주었다.

위와 같은 경향은 직경이 다른 스테인레스와이어를 사용하였을 때에도 유사하였다. 즉, 와이어 간격이 감소할수록 열전달계수가 증가하였다가 어떤 간격에서 최대치를 보이고 그 이하로 감소하면 열전달계수가 감소하는 경향을 보였다. Fig. 10에 열유속 37 kW/m<sup>2</sup>에서 여러 직경(0.6 mm ≤ d ≤ 2.6 mm)의 스테인레스와이어의 열전달계수가 나타나 있다. 이 그림은 시험 범위내에서 와이어직경이 증

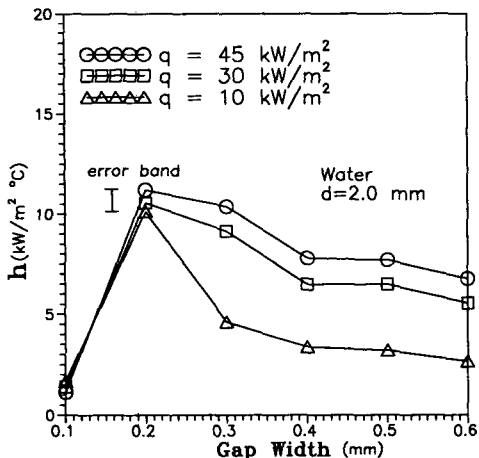


Fig. 9 Heat transfer coefficient vs. wire gap width (water, stainless steel wire, d=2.0 mm)

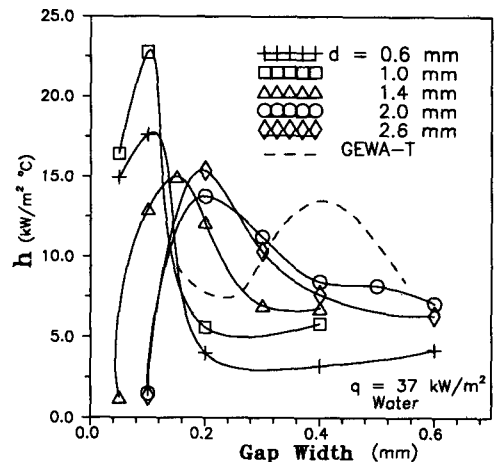


Fig. 10 Heat transfer coefficient vs. wire gap width (water, stainless steel wire)

가할수록 최적 와이어 간격이 증가함을 보여준다. 또한, 와이어직경 1.0 mm에서 열전달계수가 약 22.5 kW/(m<sup>2</sup>°C)로 최대로 됨을 알 수 있다. 다른 직경의 최대 열전달계수는 대략 15 kW/(m<sup>2</sup>°C)로 일정함을 보여준다. Fig. 10에는 Ayub와 Bergles<sup>(6)</sup>가 실험한 GEWA-T의 성능 곡선도 나타나 있다. GEWA-T의 핀 높이는 1.1 mm이다. Fig. 10은 GEWA-T의 최적 핀 간격은 대략 0.4 mm임을 보

여주는데 이 값은 본 연구의 와이어불이관의 결과 보다는 약간 크게 나타나 있다. 그러나 GEWA-T와 와이어불이관과는 핀의 형상이 다르므로 직접적인 비교에는 다소 무리가 있다고 판단된다. Fig. 10은 와이어불이관의 성능이 GEWA-T와 유사하거나 좀더 나은 것(직경 1.0 mm의 경우)을 보여준다.

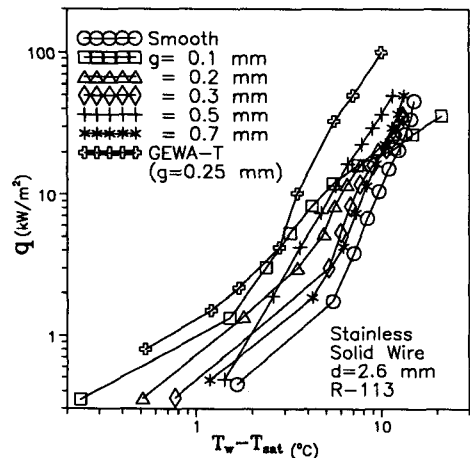
물에 대한 와이어불이관의 실험결과는 Table 1에 촉진비(enhancement ratio)로써 나타나 있다. 촉진비란 주어진 열속에서 와이어불이관과 평관의 열전달계수의 비로 정의된다. Table 1은 열유속 20 kW/m<sup>2</sup>에서 직경 1.0 mm, 와이어 간격 0.1 mm의 와이어불이관의 열전달계수가 GEWA-T의 열전달계수에 비하여 약 1.6배 더 큼을 보여준다.

(2) R-113 : Fig. 11에 직경이 2.6 mm의 스테인레스 와이어를 사용한 R-113의 실험결과가 나타나 있다. 또한 평관과 GEWA-T 자료도 나타나 있다. Fig. 11은 촉진효과가(특히 낮은 열유속에서) 현저함을 보여준다. 열유속 10 kW/m<sup>2</sup>에서 와이어불이관은 GEWA-T의 성능에 근접한다. 하지만 열유속이 증가하면 다소 감소함을 보여준다. 이와 같은 경향은 다른 직경의 와이어를 사용했을 때에도 동일하였다. Schmittle과 Starner<sup>(3)</sup>는 R-113에 대한 비등실험에서 구리(cooper)와이어를 감은 관의 성능은 평관보다 떨어진다고 보고하였다. R-113에 대한 실험결과가 Table 2에 촉진비로써 나타나 있다.

상기의 결과로부터 와이어불이관이 물에 대한 촉

**Table 1** Enhancement ratio of wire-wrapped tubes in water

Material	Dia. mm	Gap mm	kW/m <sup>2</sup>		
			5	20	45
Stainless steel	0.6	0.05	4.7	2.9	2.0
	0.6	0.1	6.8	3.5	2.3
	0.6	0.2	1.1	0.62	0.62
	1.0	0.05	7.6	3.4	2.1
	1.0	0.1	5.2	4.1	3.1
	1.0	0.2	1.3	0.84	0.84
	1.0	0.4	1.1	0.81	0.78
	1.4	0.05	0.69	0.34	0.18
	1.4	0.1	5.5	2.4	1.5
	1.4	0.2	6.1	2.9	1.7
	1.4	0.3	2.1	1.2	1.0
	1.4	0.4	1.9	1.1	1.0
	2.0	0.1	1.1	0.3	0.2
	2.0	0.2	6.3	3.5	1.6
	2.0	0.3	2.8	1.9	1.5
	2.0	0.4	1.5	1.2	1.2
	2.0	0.5	1.6	1.4	0.93
	2.0	0.6	1.4	1.0	1.0
	2.6	0.1	0.68	0.29	0.24
	2.6	0.2	9.1	3.5	2.1
2.6	0.3	3.5	1.9	1.5	
2.6	0.4	2.1	1.2	1.1	
2.6	0.6	1.4	0.94	0.96	
GEWA-T		0.35	3.9	2.6	2.4

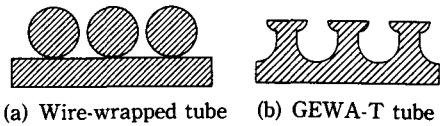


**Fig. 11** Boiling performance of the stainless steel wire wrapped tube (R-113, d=2.6 mm)

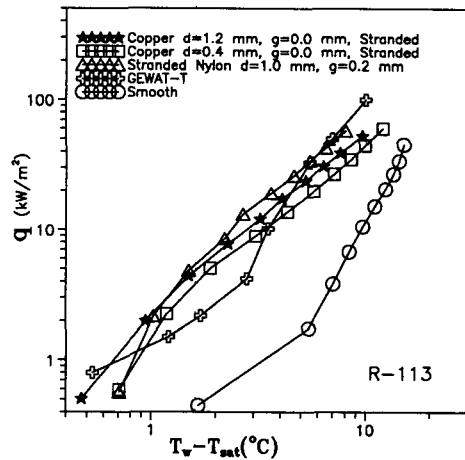
**Table 2** Enhancement ratio of wire-wrapped tubes in R-113

Material	Dia. mm	Gap mm	5 kW/m <sup>2</sup>	20 kW/m <sup>2</sup>	45 kW/m <sup>2</sup>
Stainless steel	0.6	0.2	1.0	1.0	0.97
	1.0	0.2	1.5	1.5	1.3
	1.4	0.2	2.2	2.0	1.5
	1.4	0.3	2.1	1.2	1.0
	1.4	0.4	1.9	1.1	1.0
	2.0	0.2	2.4	1.9	1.1
	2.6	0.1	2.5	1.1	0.55
	2.6	0.2	1.6	1.1	1.0
	2.6	0.3	1.5	1.2	1.1
	2.6	0.4	1.4	1.3	1.2
	2.6	0.5	2.0	1.7	1.4
	2.6	0.6	1.7	1.5	1.3
	2.6	0.7	1.2	1.2	1.2
2.6	0.8	1.3	1.2	1.3	
Stranded copper	0.4	0.0	4.0	2.1	1.5
	0.4	0.2	1.7	1.2	1.1
	1.2	0.0	4.7	2.7	1.8
Stranded nylon	1.0	0.1	3.9	2.5	0.8
	1.0	0.2	5.0	3.3	2.2
	1.0	0.6	3.4	2.3	1.6
GEWA-T		0.25	3.0	2.4	1.7

진효과는 아주 큰 반면 R-113에 대해서는 다소 줄어들음을 알 수 있다. 그 이유는 와이어에 의해서 형성되는 공동의 형상과 매체의 적심성(wettability)에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 12에 와이어불이관의 공동형상과 GEWA-T의 공동형상이 나타나 있다. 공동의 형상은 비등의 연속성과 안정성을 결정하는데 중요한 인자이고, 특별히 R-113과 같이 적심성이 강한 액체의 경우 공동의 형상은 더욱 중요하여 재돌입형상(reentrant shape)이 선호된다. Fig. 12는 GEWA-T의 경우 공동의 형상이 재돌입형상이고 와이어불이관의 경우는 아님을 보여준다.



**Fig. 12** Cavity shape of the wire-wrapped tube and the GEWA-T tube



**Fig. 13** Stranded copper wire and stranded nylon wire boiling performance

물은 R-113같이 적심성이 강한 액체가 아니므로 공동의 형상이 R-113에서 처럼 중요한 역할을 하지는 않을 것으로 판단된다.

### 3.5 꼬은 와이어불이관

가는 구리와이어를 여러가닥 꼬아서 꼬은 구리와이어를 제작하였다. 직경 0.4 mm의 꼬은 구리 와이어는 직경 0.2 mm의 가는 와이어 세가닥을 꼬아서 만들었고 1.2 mm의 꼬은 구리 와이어는 직경 0.1 mm의 가는 와이어를 30가닥 꼬아서 만들었다. Fig. 13에는 평관과 GEWA-T의 자료도 나타나 있는데 이 그림은 꼬은 구리 와이어의 성능은 GEWA-T에 근접하거나 더 좋은(낮은 열속에서) 것을 보여준다. 이 그림은 또한 두 구리 와이어의 성능이 유사함을 보여준다.

직경 1.0 mm의 나일론 와이어도 실험하였는데 Fig. 13에 0.2 mm의 와이어 간격에서의 실험 결과가 나타나 있다. 나일론 와이어는 0.2 mm에서 최적치를 보여 주었다. Fig. 13은 나일론 와이어의 성능이 꼬은 구리 와이어보다 조금 좋거나 비슷함을 보여준다. Chyu와 Mghamis<sup>(9)</sup>는 와이어가 꼬인 부분에서의 열적환경이 비등현상을 촉진하기 때문에 꼬



은 와이어가 단일 와이어보다 성능이 우월하게 된다고 보고하였다. Table 2에 꼬은 와이어에 대한 실험 결과가 정리되어 있다. 열유속  $20 \text{ kW/m}^2$ 에서 나일론와이어의 열전달계수는 GEWA-T의 열전달계수보다 약 1.4배 더 크게 나타난다.

### 3.6 비등곡선이력

비등이력은 특정한 열유속에서 순간적으로 열전달 표면온도가 감소하는 현상으로 한 곳에서 발생한 기포가 전 표면으로 전파됨으로써 발생한다. 특히 이 현상은 적심성이 강한 R-113같은 냉매를 사용하여 낮은 열유속에서 열유속을 증가시킬 때 주로 관찰된다. 이 비등곡선이력 (boiling curve hysteresis) 현상은 열유속이 어느 값 이상이 되면 사라지게 되는데 증발기의 정상 상태 운전은 이 열유속 이상에서 하는 것이 필요하다. 본 실험에서도 R-113을 매체로 했을때 비등이력현상이 발견되었다. Fig. 14에 평관과 와이어불이관에 대한 비등이력곡선이 나타나있다. Fig. 14의 와이어불이관은 와이어직경 2.6 mm, 와이어 간격 0.3 mm인 경우이다. 본 실험에서는 시험 전열관에 공급되는 전압을 0V에서 200 V까지 20V씩 단계적으로 증가시켜 가며 측정하였으므로 비등이력이 일어나는 열유속을 정확히 알 수는 없었다. 따라서 측정중 일정량의 열유속을 증가시켰을 때 비등이력현상이 일어났다면 증가된 열유속에서 비등이력현상이 일어났다고 보고 그 부분을 점선으로 나타내었다. Fig. 14는 이력현상이 일회가 아니고 여러 단계에 걸쳐서

계단식으로 일어남을 보여준다. 평관의 경우는 운전조건에 따라 일회적으로 발생하는 경우도 있었으나 와이어불이관의 경우는 항상 단계적으로 발생하였다. Ayub와 Bergles<sup>(8)</sup>도 GEWA-T에서 이력현상이 단계적으로 일어남을 발견하였다. 그들은 GEWA-T의 T형 핀이 비등이 이웃 영역으로 급속히 전파되는 것을 방해하고, 따라서 점진적인 이력현상이 발생한다고 주장했다. 이 주장은 본 연구의 와이어불이관의 경우에도 해당될 것이다.

## 4. 결 론

본 논문에는 물과 R-113을 사용한 와이어불이관의 핵비등 실험결과가 나타나 있다. 와이어로는 스테인레스와이어, 꼬은 구리와이어, 나일론와이어 등이 실험되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 스테인레스와이어는 물의 비등을 현저히 촉진시킨다. 와이어직경  $0.6 \text{ mm} \leq d \leq 2.6 \text{ mm}$ 의 실험범위에서 최대 열전달계수는 직경 1.0 mm에서 나타났고 그 값은 열유속  $20 \text{ kW/m}^2$ 에서 상용 GEWA-T보다 1.6배 높았다. 실험범위에서 최적 와이어 간격은 와이어직경이 증가할수록 증가하였다.

(2) 스테인레스 와이어는 낮은 열유속에서 R-113의 비등을 현저히 촉진시킨다. 열유속이 증가할수록 촉진율은 감소하는데 그 이유는 공동의 형상과 R-113의 적심성(wettability)에 기인한다고 판단된다.

(3) 꼬은 구리와이어와 나일론와이어는 R-113의 비등에 효과적이다. 나일론선의 경우는 열유속  $20 \text{ kW/m}^2$ 에서 상용 GEWA-T보다 1.4배 높았다. 그 이유는 와이어가 꼬인 영역에서의 열적환경이 비등현상을 촉진하기 때문으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 1992년도 한국과학재단 핵심전문과제 (과제번호 : 921-0900-020-2) 학술연구 조성비에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Webb, R. L., 1981, "The Evolution of Enhanced Surface Geometries for Nucleate Boiling," *Heat*

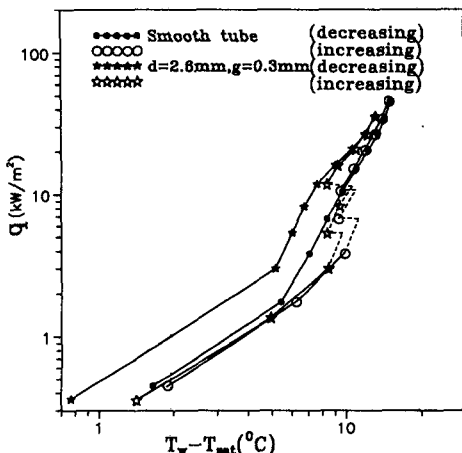


Fig. 14 Boiling curve hysteresis of the wire-wrapped tube

- Transfer Engineering*, Vol. 2, Nos. 3~4, pp. 46~69.
- (2) Webb, R. L., 1970, *Heat Transfer Surface Which Promotes Nucleate Ebullition*, U. S. Patent 3,521,708.
- (3) Schmittle, K. V. and Starner, K. E., 1978, *Heat Transfer in Pool Boiling*, U. S. Patent 4,704,753.
- (4) Bergles, A. E. and Chyu, M. C., 1982, "Characteristics of Nucleate Pool Boiling from Porous Metallic Coatings," *J. of Heat Transfer, ASME*, Vol. 104, pp. 279~285.
- (5) Webb, R. L. and Pais, C., 1992, "Nucleate Pool Boiling Data for Five Refrigerants on Plain, Integral-Fin and Enhanced Tube Geometries," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 8, pp. 1893~1904.
- (6) Rohsenow, W. M., 1952, "A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling Liquids," *Trans. of ASME*, Vol. 74, pp. 969~975.
- (7) Stephan, K. and Abdelsalam, M., 1980, "Heat Transfer Correlations for Natural Convection Boiling," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 23, pp. 73~87.
- (8) Ayub, Z. H. and Bergles, A. E., 1985, "Pool Boiling from GEWA Surfaces in Water and R-113," in *Augmentation of Heat Transfer in Energy Systems*, ed. P. J. Bishop, HTD Vol. 52, pp. 57~66.
- (9) Chyu, M. C. and Mghamis, A. M., 1991, "Nucleate Boiling on Two Cylinders in Line Contact," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 7, pp. 1783~1790.