

기상응축 열교환을 이용한 고정밀 등온 가열로 개발

홍현선[†] · 공만식 · 강환국*
고등기술연구원, *동은 에이티에스

Development of Heat-treatment Furnace with Maximum Uniform Zone using Gas-phase Condensing Heat Exchange

Hyun Seon Hong[†], Man Seek Kong, Hwan Kook Kang*

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin, 449-863, Korea
*Dongun ATS Co, Bucheon, 420-120, Korea

Abstract A horizontal tube furnace with a wide uniform-temperature zone was developed using isothermal characteristics of a heat pipe. The heat pipe heating system consists of a concentric annular shaped stainless-steel container, sodium as a working fluid and a screen mesh wick structure. The performance test of the heat pipe revealed that temperature changes along seven consecutive positions of the heat pipe outer wall were less than $\pm 0.1^\circ\text{C}$, thereby ensuring the high isothermal property. The isothermal property of the heat pipe-adapted tube furnace was investigated and compared to a conventional non-heat pipe type tube furnace. The temperature distribution measurement showed that the uniform temperature zone, in which temperature change is less than $\pm 1^\circ\text{C}$, of the heat pipe employed tube furnace system was about three times longer compared to the conventional tube furnace system.

(Received May 13, 2009; Accepted May 21, 2009)

Key words: Heat pipe, Isothermal furnace, Uniform-temperature, Wick, Sodium

1. 서 론

최근 나노 및 반도체 산업의 급격한 성장으로 LCD, PDP, 나노 fiber 등의 수요가 증가하고 있으며, 이러한 수요의 증가와 더불어 제품 제조공정에서 더욱 정밀한 로를 요구하고 있다. Fiber의 경우 나노 단위에서 조적이 이루어지기 때문에 최대 $\pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도편차를 가지는 기존의 로만으로는 균일한 제품을 얻을 수 없으며 마찬가지로 LCD, PDP의 경우에도 열처리 시 수반되는 상변화 및 결정온도 변화에 의해 제품의 불량률이 생기고 있다. 또한 열전대 검출용 로의 경우 계측 단계에서 데이터의 오류나 불량으로 인하여 제품 생산량의 50~80%의 loss가 좌우될 수 있기 때문에 생산에서 온도편차 제어는 매우 중요하고, 첨단 산업일수록 고 정밀 온도편차 제어에 대한 중요성은 커지고 있는 실정이다. 일반적인 가열로는 온도편차를 최소화하기 위해 uniform zone을 위한 sub-zone을 형성하여 온도구배를 줄이

고 있다. 하지만 sub-zone 형성 부가장치 등을 적용하는 경우에도 온도편차 감소에는 한계가 있으며 등온성을 높일수록 그 크기도 대단히 증가하여 큰 장비를 사용할 수밖에 없고, 따라서 제품의 원가 상승에 의한 가격경쟁력 및 품질과 생산성 저하의 원인이 되고 있다.

히트파이프(heat pipe)는 밀폐용기 내부의 작동 유체가 연속적으로 기-액 상변화 과정을 통하여 용기 양단사이에 열을 전달하는 장치로, 작동유체의 잠열에 의하여 열을 이동시킴으로써 통상적인 열전달 기기에 비해 매우 큰 열전달 성능을 발휘한다[1-3]. 즉, 가열부와 냉각부의 작은 온도차로도 대량의 열을 전달하는 높은 열전달 능력 때문에 히트파이프는 산업용 배기열 회수용 열교환기, 반도체 냉각장치, 전자장비의 냉각 등 200°C 미만의 저온 반도체 냉각과 열전달 장치용으로 이용되어 왔다. 한편 히트파이프는 밀폐용기 내부의 작동유체가 포화상태에서 상변화를 이루기 때문에 열원에 의하여 증발이 일어나는

[†]E-mail : hshong@iae.re.kr

증발부 또는 응축하며 열을 내놓는 응축부는 상변화 과정에서의 등온 열전달을 이루는 고유의 특성을 나타내며 히트파이프 제작 업체에서는 등온성을 히트파이프의 제작 성능 판단기준으로 파악하기도 한다. 이러한 상변화 과정에서의 등온성을 이용하면 등온의 가열벽면을 이룰 수 있으며, 이런 원리를 이용하여 80-150°C 웨이퍼 상에서 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 미만의 고정밀 등온성을 이루는 CVD 공정용 베이킹 플레이트로 개발되어 적용되고 있다.

본 연구에서는 상기의 히트파이프의 등온 특성을 이용한 고정밀 등온로를 개발하고자 하였다. 튜브형 히트파이프 적용 가열로는 국내에서 처음으로 시도되는 기술이며 히트파이프 특성상 가열로 uniform zone 내의 온도편차를 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하여 고정밀의 등온성을 달성함과 동시에 온도 편차를 줄이기 위한 부가적인 가열공간이 필요 없기 때문에 원가의 절감 및 크기 감소에 의한 냉각손실과 가열과정에서의 부하의 경감에 의한 에너지를 절감하는 효과 등의 부가적 효과가 있는 것으로 파악하고 있다. 이러한 가열로는 탁월한 등온효과로 인하여 고품질의 제품 생산용 장비를 국산화하는 것과 함께 열전대 검증용 표준화 장비, 반도체 등 첨단산업에도 적용이 가능하게 되어 최근 고온로 분야의 정밀도에 대한 산업적 수요와 이를 만족시킬 새로운 기술의 필요성이 대두되고 있는 상황에서 매우 시급히 개발되어야 할 것으로 생각된다.

한편 본 연구의 적용 대상인 600°C 이상의 튜브형 가열로에 적용하기 위해서는 로의 운전온도에서 작동유체가 임계온도 이하를 유지해야 함에 따라 통상 액체금속일 것이 요구된다. 이러한 작동유체로는 나트륨, 칼륨, 리튬 등 알칼리 금속이 추천되고 있으며[5-8], 따라서 본 연구에서는 이러한 작동유체를 이용한 환형 구조의 히트파이프 적용 고정밀 등온 가열로를 개발하기 위한 핵심기술인 워ick과 용기를 포함하는 금속의 선정, 모세관 구조물 등을 설계하고 환형 구조의 이중관형 히트파이프를 제작하였다. 제작된 환형 히트파이프에 전기적 가열장치 및 제어 장치를 설치하여 튜브로를 제작하고 작동 특성과 튜브로의 성능 및 등온 특성을 파악하고자 성능실험을 수행하였다. 또한 단순한 금속관 형태인 종래의 튜브로를 대상으로 유사한 조건의 성능 및 작동특성 실험

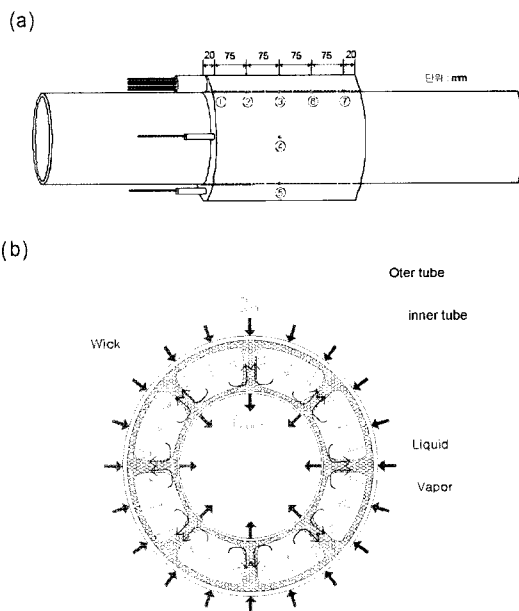


Fig. 1. Schematic of the annular heat pipe tube (a) and cross-sectional view (b).

를 수행하여 성능을 비교하였으며 전산모사해석을 통하여 튜브로 내부의 대류 및 튜브의 전도열전달에 의한 튜브로의 작동 특성을 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 이중관형 히트파이프 제조

Fig. 1은 고온로 적용을 위한 히트파이프가 부착된 원통관 및 히트파이프 이중관 내부의 모세관 구조물(wick)의 설치 구조를 보여주고 있다. 히트파이프는 직경이 다른 두 개의 튜브를 동일 중심선에 설치하여 튜브 양 벽 사이의 환상공간을 형성한 후 이 공간이 증기의 유동 공간이 되도록 하였다. 이 환상공간의 외측 튜브 외벽에 가해지는 열에 의하여 작동유체가 증기로 상변화하고 반경방향으로 따라 내측 관벽으로 이동한 후 내측관의 외벽에서 응축할 수 있게 되어 있다. 이 응축액은 이중관의 환상공간에 설치된 워ick의 모세관력에 의하여 워ick을 따라 외측관의 내벽으로 되돌아 올 수 있게 설계하였다. 따라서 내측관의 외벽과 외측관의 내벽사이에 워ick을 설치하도록 증기통로를 확보하도록 하는 워ick 구조를 설계하였다. 한편 관련연구를 검토하여 워ick의 종류는 투과율 및

공극율이 커서 모세관 한계의 증대가 용이하며 복잡한 구조의 성형이 가능한 금속망 구조(50 mesh)를 선정하였다[1, 7]. 또한 히트파이프 작동유체로는 나트륨(sodium)을 선정하였다.

본 연구에서는 STS-316재질의 용기와 동일재질의 금속망구조의 워를 사용하였다. 이 재질은 관련 연구에 의하여 나트륨과의 적합성에서 장시간 수명실험 결과에서 안정성이 확인되었으며 반복산화 870°C, 연속산화 925°C의 내사용 온도를 갖는다. 용기 벽의 두께는 STS-316의 내사용 온도인 870°C를 고려할 때, 나트륨의 포화압력이 1 bar 미만으로 진공압 상태에서 작동하게 되어 내부 압에 의한 파손 등의 문제는 없을 것으로 판단되나 안전율을 고려하여 2 bar로 설정하였으며 변형율과 후프 스트레스 등을 고려하여 벽의 두께를 외벽은 4 mm로 각각 설계하였다. Fig. 1-(a)와 같이 K형 열전대를 길이 및 원주 방향으로 5개의 열전대를 설치하여 내부 증기온도를 계측할 수 있도록 되어 있다. 이중관을 형성하는 환상공간 내부의 온도는 전 영역에 걸쳐 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 열전대 계측 오차 범위 내에서 균일한 값을 나타냄을 사전실험으로 확인하였다

2.2 히트파이프 적용 가열로의 작동특성 시뮬레이션

본 연구에서 개발한 고정밀 등온가열로는 uniform zone의 등온구간 내에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 내의 신뢰도를 가져야 하므로 실제로 로의 크기, 단열조건, 로의 재질, 열전대로 측정 시에 열전대 차체의 온도편

차 등에 의해 발생하는 측정오차와 측정실험 과정의 실험오차 등이 발생할 가능성이 매우 높다. 따라서 온도계의 보정 및 정밀측정이 요구된다. 또한 튜브 벽의 온도가 등온을 유지하는 경우에도 내부 공기의 대류 유동에 의하여 튜브를 밀폐하는 양단의 단열벽을 통한 열손실이 발생하며 이러한 대류 유동에 의하여 튜브 내부의 원주 및 길이 방향 온도분포를 결정하게 된다. 이러한 계측 및 단열 특성에 따른 내부의 유동과 열전달에 대한 특성을 파악하고자 튜브 내부의 열유동에 전산모사해석을 수행 하였다. Table 1에 히트파이프식 튜브로의 사양을 보여주며 또한 전산모사 해석에 필요한 히트파이프와 가열 조건 등을 정리하였다.

Fig. 2는 고정밀 등온가열로의 전산모사 해석으로 위한 경계조건을 나타내었다. 먼저 히트파이프 튜브

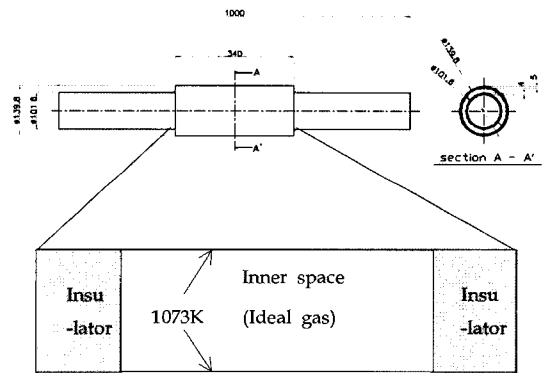


Fig. 2. Dimension of heat pipe tube furnace and boundary conditions for the computational analysis.

Table 1. Specifications of the heat pipe tube furnace and boundary conditions for the computational analysis.

Component		Specification
Container	Inner tube	ϕ 101.6 mm \times L300 mm
	Outer tube	ϕ 139.8 mm \times L300 mm
	Material	STS 316L
Wick	Structure	50 mesh, 2 layer
	Material	STS 316L
Working fluid		Sodium
Insulator	Material	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$
	Length	100 mm
Boundary conditions	Wall	Uniform temperature (1073K)
	Inside	Air / 1 atm

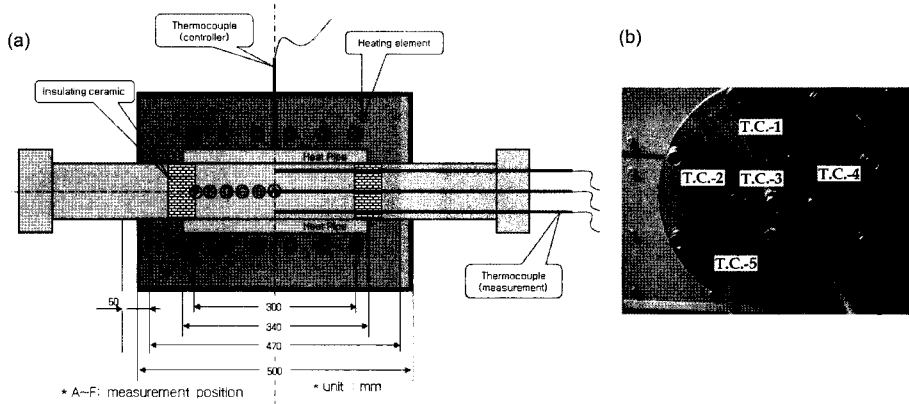


Fig. 3. Schematic diagram of the tube furnace with heat pipe tube liner and position of thermocouples.

의 경우에는 800°C의 등온 벽면 조건 그리고 튜브 양 끝 단에는 세라믹 계열의 고온 단열재가 설치된 구조로 가정하였다. 등온로 내부의 크기는 300 mm (L), 100 mm (ID)이며 내부공기는 대기압 상태의 이상기체로 가정하였다.

2.3 히트파이프적용 등온로 성능 평가

Fig. 3-(a)에 히트파이프 적용 등온로의 구조 및 온도구배 측정 위치를 나타내었다. 열전대는 K-type 을 사용하였으며 등온로 내부 공간의 온도를 반경 및 원주 방향으로 측정하기 위해서 그림 3-(b)와 같이 5개 부분, T.C.-1(상), T.C.-2(좌), T.C.-3(중앙), T.C.-4(우), T.C.-5(하)에 열전대를 위치시켰으며 각 열전대는 길이 방향으로 이동이 가능하도록 설치되어 있다. 각각의 열전대는 히트파이프의 내벽으로부터 5 mm 이격되어있다. 등온로 내부의 길이방향 온도를 측정하기 위해서 단열재에서 중앙부분으로 “E” 지점 부터 “A” 지점까지 30 mm 간격으로 측정하면서 최종적으로 중앙부분에서 온도측정을 종료하였다. 이때 온도를 측정하는 순서를 “A” 지점부터 하게 되면 다음 지점인 “B” 지점으로 이동시 외부에 노출되어 있던 낮은 온도의 열전대의 일부가 가열구간의 높은 온도구간으로 진입하게 되면서 가열구간의 온도를 미세하게 낮추는 역할을 하게 되므로 히트파이프 내부의 온도에 영향을 주지 않기 위해서 “E” 지점부터 온도 측정을 실시하였다. 또한 각 온도 측정지점에서 온도 안정화를 위해서 일정시간의 유지시간이 필요하며, 본 연구에서는 약 15분으로 정하였다.

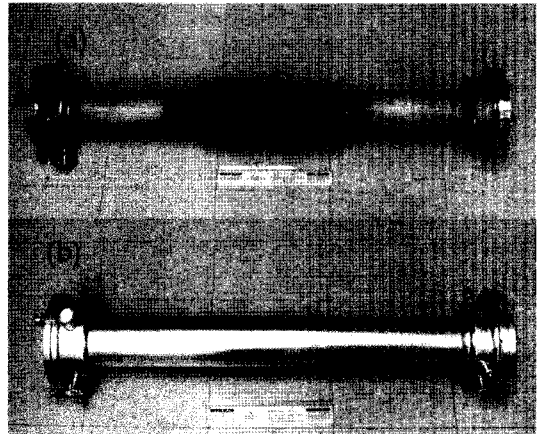


Fig. 4. Heat pipe tube liner (a) and the conventional STS tube(b) for a tube furnace.

본 연구에서는 연구결과의 객관성을 확보하기 위한 방법으로 일반 튜브(non heat-pipe tube)를 제작하여 등온로의 특성 비교실험을 실시하였다. 일반 튜브로 사이즈 및 재질은 히트파이프와 동일하게 제작하였다. Fig. 4는 이중관형 히트파이프가 적용된 튜브와 일반 튜브의 모습을 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 일반 튜브로의 가열시험 및 등온특성

본 연구에서는 고정밀 등온가열로의 등온 특성을 비교하기 위해서 동일한 크기의 일반 튜브로를 제작하였고, 동일한 가열조건 하에서 가열시험 및 등온특성을 관찰하였다. Fig. 5는 일반 튜브로의 400°C,

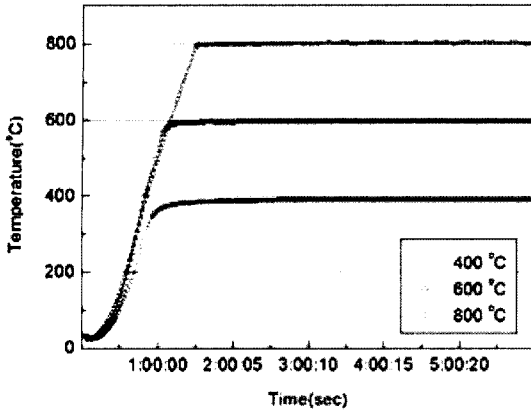


Fig. 5. Temperature variation with time of the conventional tube furnace along working temperature.

600°C, 800°C 가열양상을 나타낸 그래프로써, 400°C의 경우 약 1시간 후에, 800°C의 경우 1시간 30분 이후에 온도가 안정화되어 0.2°C의 표준편차를 가지면서 일정한 온도를 유지하고 있음을 확인하였다. Fig. 6은 일반 튜브로를 600°C로 가열하고 안정화 온도에 도달했을 때 각 구간(Fig. 3에서 A, B, C, D, E)에서 온도를 측정된 결과로서 A 지점의 온도가 가장 높고 E 지점의 온도가 가장 낮아 평균적으로 20°C(± 10°C)의 온도편차를 나타내며 포물선 형태를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 온도 분포는 반경방향으로 전기적으로 균일한 열유속으로 가열되는 금속 튜브가 중앙으로부터 대칭을 이루며 양 끝단으로의 축방향 열전달에 의한 냉각효과에 의한 것임을 알 수 있다. 이 때 튜브의 중앙으로부터 튜브 내부에서는 공기의 대류유동이, 그리고 금속 튜브의 축방향으로의 전도 열전달이 발생함에 따라 길이방향으로의 온도구배가 나타나게 되며 이 때 튜브 내부의 온도분포는 앞에서 언급한 두 가지 열전달 메카니즘이 중첩된 결과로 나타나게 된다. 한편 각 지점에서 튜브로 단면상의 up, center, down (Fig. 3-b) 위치에서의 온도편차를 확인하였는데, center, up, down의 순으로 온도가 상승하였다. 그러나 반경방향의 온도편차는 길이방향으로 전 구간에 걸쳐 2~4°C 정도로서 길이 방향에 비하여 상대적으로 편차가 작고 튜브 길이 방향을 따라 각각의 위치에서의 반경방향 온도편차도 작아 튜브로 내부의 반경방향으로의 위치에 따른 영향은 작음을 볼 수 있다. 반경방향으로 중심부 온도가 상대적으로 낮은

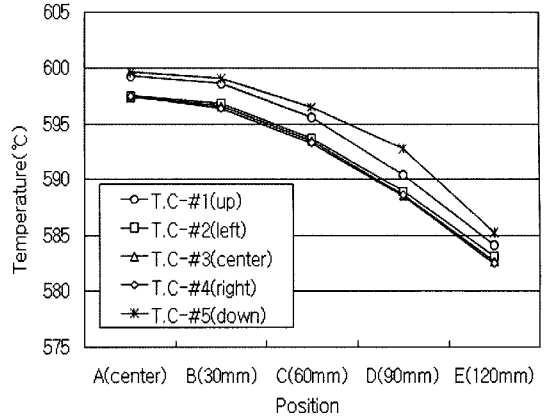


Fig. 6. Temperature distributions of the conventional tube liner at 600°C.

것은 튜브 내부 공기의 유동이 가열원인 원통 벽에서 가열된 후 축방향으로 따라 단열처리된 장입용 단열 밀폐부에 열을 전달한 후 축 중심을 따라 유동하는 결과로 파악된다. 그러나 이러한 대류 유동에 의한 냉각 효과는 축방향의 위치에 따른 반경방향의 온도차가 미소한 실험 결과를 보임으로써 상대적으로 대류의 영향보다는 가열벽의 온도분포에 지배적으로 영향을 받는 것으로 파악된다. 따라서 이러한 결과는 가열벽면의 축방향온도 분포가 튜브로의 등온성을 지배하는 인지임을 확인하게 하며, 이는 본 연구 대상인 등온 가열벽의 가열 메카니즘이 효과적인 수 있음을 파악할 수 있다. 한편 반경방향으로 down 지역의 온도가 다소 높은 것은 가열벽면으로부터 가열된 공기의 유동과정에서의 대류 열전달과 상관성이 있는 것으로 파악된다. 상기와 같이 일반 튜브로에서는 전체 가열온도구간에서 약 20°C(± 10°C)의 온도편차가 발생함을 관찰할 수 있었고, 히트파이프를 활용한 고정밀 등온로의 등온특성과 비교하기 위한 기초자료로 사용하였다.

3.2 히트파이프적용 가열로의 작동특성 시뮬레이션

Fig. 7-(a)은 공기를 포함하는 튜브 벽의 온도가 800°C로 균일한 온도로 가열할 경우 튜브 내부의 온도분포를 전산유동 해석 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 반경방향으로 중심부와 외측과의 온도편차가 약 3.3°C임을 알 수 있으며 이는 측정점의 위치를 고려할 때 열적 조건은 다소 상이하나 앞 절의

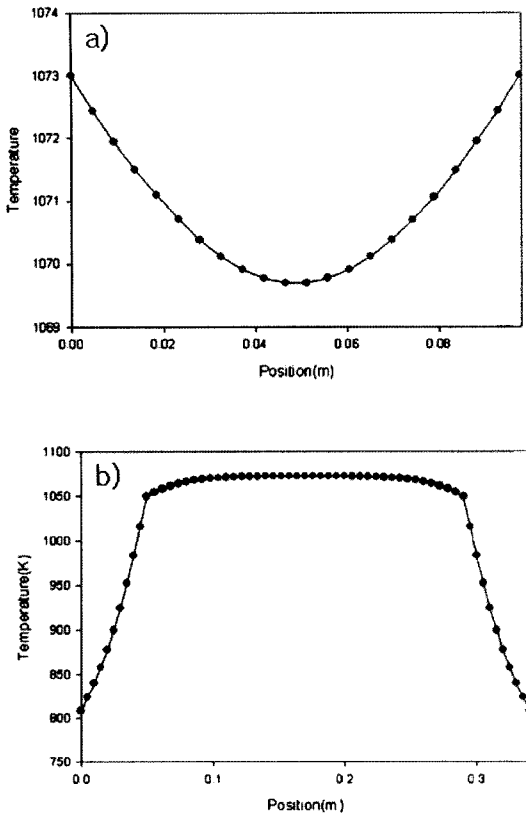


Fig. 7. The simulation results for the temperature distribution of the heat pipe tube furnace : (a) radial and (b) longitudinal.

실험적 결과와도 비교적 잘 일치한다. Fig. 7-(b)는 등온 벽면의 튜브로에서 길이 방향으로의 온도분포를 해석한 결과로 가장자리의 낮은 온도 분포대는 단열재를 제외하고 전체 구간의 10% 이내이며, uniform zone 내부의 온도는 800°C의 균일한 온도를 유지하는 것을 알 수 있다.

한편 본 연구에서의 시뮬레이션 결과는 튜브 내부를 밀폐시키는 양단의 단열 구조에 따라 내 외부의 열전달율이 변화하고 이에 따른 내부 공기의 대류 유동에 영향을 미침으로써 내부의 공기 유동에 의한 대류 냉각에 의한 영향에 의하여 등온 벽을 형성하는 경우에도 내부의 온도편차가 매우 크게 영향을 받을 수 있었다. 따라서 실제 실험 시에는 단열조건의 정밀한 제어가 중요할 것으로 판단하였다. 특히 종단면의 온도분포는 횡단면의 온도분포보다 단열처리에 의한 영향을 크게 받는 구간으로서 실제

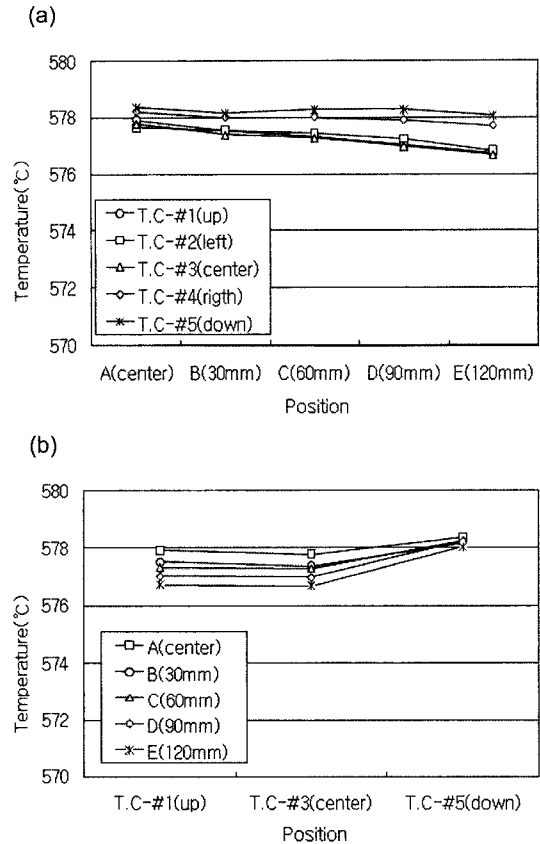


Fig. 8. Temperature distributions of the heat pipe type tube furnace at 600°C.

측정 실험에서 고려되어야 할 부분이기 때문에 이러한 시뮬레이션 결과를 등온로 제작 시에 반영하였다.

3.3 히트파이프 가열로의 가열시험 및 등온특성

Fig. 8은 이중관형 히트파이프가 설치(부착)된 고정밀 등온로의 표면온도를 600°C로 가열하고 모든 측정점의 온도가 일정한 정상상태(안정화 온도)에 도달했을 때 각 구간(그림 3에서 A, B, C, D, E)에서 온도를 측정된 결과이다. 정상상태에서 A지점에서 온도가 가장 높고 E지점에서 온도가 가장 낮았으며, down(그림 3-b) 위치의 열전대의 경우 578.4°C(A지점)에서 578.2°C(E지점)의 온도로 측정되어 제일 작은 온도편차를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 히트파이프 전체로 볼 때 작동유체가 작동하는 600°C에서 2°C(± 1°C) 이내의 온도편차를 나타남을 확인할 수 있다. 또한 각각의 온도에서 각 구간별

up, center, down 위치에서의 온도편차를 확인할 수 있는데, 600°C에서 상하(up, center) 측정점의 온도차는 0.5°C 미만의 계측 오차 범위에서 동일한 온도를 보이며 중심과 상하 온도차는 center, up, down 순으로 온도가 상승하며, 여전히 2°C(±1°C) 이내의 온도편차를 확인할 수 있다. 이러한 결과는 측정점위치를 고려할 때 앞절의 시뮬레이션 결과와도 비교적 일치하고 있다. 다만 열처리로의 중심 (A) 지역에 가까워질수록 up, center, down 사이의 온도편차는 좁아짐을 확인할 수 있다. 이것은 로의 가장자리의 단열재에 의한 열손실과 공기의 대류에 의한 것으로 사료된다. 즉, 등은 가열벽에서 가열된 원통 튜브 내부의 공기는 벽면을 따라 좌우의 단열막감재로 대류 유동하는 것으로 보이며 이에 따라 축방향으로 중심지역보다 가장자리에서 단열재로의 냉각손실이 증가함에 따라 온도가 낮아지며 온도차도 증가하는 것으로 파악된다. 그러나 이러한 효과 외에도 고온의 열복사에 의한 냉각효과도 가장자리에서 증가되기 때문에 이러한 원인에 대해서는 보다 체계적이고 엄밀한 해석이 요구되는 것으로 생각한다. 한편 전 구간에서 down 및 right 지역의 온도는 매우 일정한 온도로 수렴됨을 확인할 수 있다. 상기와 같이 본 연구에서의 히트파이프의 등온특성을 활용한 고정밀 등온로의 등온특성을 관찰할 수 있었으며, 작동유체의 작동범위인 600°C에서 ±1°C 이내의 온도편차를 가지는 것을 확인하여 일반 튜브로에서 측정된 ±10°C의 온도 구배에 비하여 월등히 향상된 등온성을 나타내는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 600°C 이상에 적용될 수 있는 나트륨을 작동유체로 하는 중고온용 히트파이프 적용 고정밀 등온 튜브 라이너를 설계, 제작하고 전기적 기열원을 포함하는 튜브로를 제작하여 작동 특성 및 성능시험을 수행하였다. 히트파이프 튜브는 환형의 이중관 구조를 이루며, 이중관의 외측 면에 설치된 기열원으로부터 열을 받아 기액 상변화 열전달에 의하여 내측 튜브의 외면에서 응축이 발생함에 따라

내측에 등온벽면을 형성하는 구조이다. 또한 튜브로의 작동 특성과 성능 개선 효과를 파악하기 위하여 등온벽면에서의 내부 열유동 해석 및 일반적인 일정 열유속 조건의 튜브로에 대한 실험 결과와도 비교하였다.

1. 일반적인 금속 튜브로 내부의 온도 분포는 내부 공기의 대류 유동과 균일한 열유속을 받는 튜브의 축방향 열전도에 의하여 중심으로부터 온도 포물선 형태의 온도가 나타났으며 반경방향보다는 축방향 온도 분포가 크게 나타났으며 이에 따라 축방향 온도 편차가 크게 발생하였다. 내부 유동 해석 결과로부터 내부공기의 대류 냉각 효과보다는 튜브의 축방향 온도분포에 의하여 지배되는 것으로 파악되었다.

2. 나트륨을 작동유체로 하는 히트파이프 적용 가열로는 600°C 이상의 조건에서 uniform zone 내의 온도편차를 ±1°C로 유지하였다. 특히 주요 온도 편차의 원인인 축방향으로의 튜브벽 온도가 등온을 유지함에 따라 축방향 온도는 ±1°C 이내의 매우 균일한 온도분포를 나타내었으며 상대적으로 내부 대류 유동 효과에 의하여 원주 방향으로의 온도 분포가 크게 나타났다. 이러한 효과는 튜브 내외부의 단열재에 지배적인 영향을 받는 것으로 파악되었다.

참고문헌

1. S. W. Chi : Heat Pipe Theory and Practice, McGraw Hill Book, Co. (1976).
2. P. D. Dunn, D. A. Reay : Heat Pipes, 4th Ed. Pergamon Press, New York (1994).
3. A. Faghri : Heat Pipe Science and Technology, 1st ed., Taylor & Francis, (1995) 19-24.
4. R. Ponnappan., and W. S. Chang : J. Thermophysics and Heat Transfer, 8(1) (1994) 164.
5. K. Y. Ko et al. : Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Eng. Conference, 1 (2000) 567.
6. S. Y. Park., and J. H. Boo : Isothermal Characteristic of a Rectangular Parallel Sodium Heat Pipes, 13th International Heat Pipe Conference, 1 (2004) 143.
7. J. H. Yoo et al. : An Experimental Study on the Operation and Performance of Sodium Heat Pipes Heat Exchanger, Proceedings of the SAREK 2004 Winter Annual Conference, (2004) 132.
8. M. N. Ivanovskii et al. : The Physical Principles of Heat Pipes, Oxford (1982).