평활관 및 열전달촉진관에서 액체질소의 관내 증발열전달 특성에 대한 연구

황지상† · 정진택* · 윤 린** · 김용찬* · 문영준* · 김동혁***

Evaporation Heat Transfer Characteristics of Liquid Nitrogen in Horizontal Plain Tubes with Wire Coil Inserts

Jee-Sang Hwang, Jin Taek Chung, Rin Yun, Yongchan Kim, Young June Moon and Dong-Hyuk Kim

Key Words: Cryogenic fluid(극저온유체), Liquid nitrogen(액체질소), Evaporation heat transfer(증발열전달), Wire coil inserts(와이어코일)

Abstract

An experiment was performed to study the evaporation heat transfer and the pressure drop characteristics of liquid nitrogen in a horizontal stainless steel tube with wire coil inserts. The inner diameter of test tube is 4.3mm and the length is 1.5m. Four wire coils having different pitch and thickness were inserted into the plain test tube. The wire coil length is 1.5m and the diameter is 3.65mm with thickness of 0.5mm and 0.9mm. Experiments were conducted at saturation temperature of -191℃ mass flux from 200 to 370 kg/m^2s and heat flux of 62 kW/m^2. Direct heating method was used to apply heat to the test section. Boiling heat transfer coefficients of both the plain and the enhanced tubes were calculated. Pressure drops between inlet and outlet side of test section were also measured, and they are used to estimate EPR(Enhancement Performance Ratio).

기호설명

A	:	관내부 표면적 (m^2)
D_i	:	관내부 직경 (mm)
D_w	:	와이어코일 외경 (mm)
G	:	질량유속 (kg/m^2s)
h	:	열전달계수 (W/m^2K)
i	:	엔탈피 (kJ/kg)
L	:	시험부 길이 (mm)
p	:	와이어코일 피치 (mm)
ΔP	:	압력강하 (kPa)
t	:	와이어코일 두께 (mm)
T	:	온도 (℃, K)
q''	:	열유속 (kW/m^2)
W	:	질량유량 (kg/s)
x	:	건도

하첨자

en	:	열전달촉진관
$exit$	:	시험부 출구
$inlet$	:	시험부 입구
i	:	관 내부
s	:	포화액체
w	:	관 벽면

† 고려대학교 대학원 기계공학과
E-mail : hyaline76@korea.ac.kr
TEL : (02)921-8512 FAX : (02)926-9290
* 고려대학교 기계공학과
** 고려대학교 공학기술연구소
*** 한국가스공사

1. 서 론

극저온유체(cryogenic fluid)는 -150℃ 이하의 상태로 존재하는 유체를 말하며, 대표적인 것으로 액체질소, 액체산소, 액체헬륨, 액화천연가스(LNG: Liquified Natural Gas) 등이 알려져 있다.[1,2] 그 중 풍부한 청정에너지로 각광받고 있는 액화천연가스의 경우 이용 및 처리 과정이 주로 극저온 상태에서 이루어지기 때문에 냉동 및 극저온기술에 대한 연구는 최근 들어 부쩍 그 효용가치가 높아지고 있다. 특히 극저온상태로 유지, 보관되는 액화천연가스를 에너지원으로 곧바로 이용하기 위해서는 극저온에 적합한 열교환시스템의 구성이 요구되며 극저온유체의 열전달 특성에 관한 연구가 수반되어야 한다.

열교환시스템에서 효율적인 성능을 얻기 위해서 직접적으로 고려할 수 있는 방안은 열교환부의 열전달 성능을 향상시키는 기술의 개발이다. 따라서 일반적인 유체의 단상영역(single phase)에서 기대할 수 있는 열전달촉진기술에 대한 연구는 일찍부터 시작되어왔다. Bergles et al.[3]은 그동안 개발되었던 열전달촉진기술을 외부 동력의 사용 유무에 따라 크게 유동력법(active technique)과 무동력법(passive technique)으로 분류하였으며, Webb[4]은 전열면을 넓히거나 유동관에 물체를 삽입하여 열전달을 증가시키는 무동력법을, 각각의 열전달 향상 원리에 따라 관내 기구삽입(insert devices), 휜가공(internally finned tubes), 거친표면가공(integral roughness) 등의 기법으로 나누어 제시한 바 있다. 이 가운데 상대적으로 제작의 용이함과 경제적인 측면의 우월성 때문에 관내 기구삽입방법이 실제로 많이 쓰이며, 관내에 와이어코일(wire coil)과 비틀림테이프(twisted tape) 등의 기구가 삽입되어 관벽면 부근 열경계층(thermal boundary layer) 및 열저항을 파괴시키는

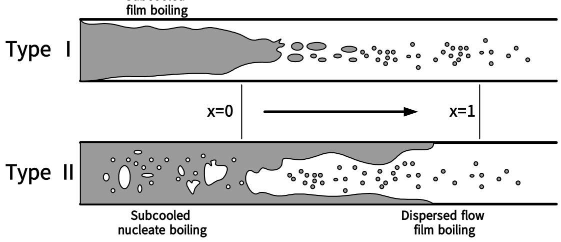

Fig. 1 Schematic representation of the two types of dispersed flow film boiling

메커니즘으로 열전달을 촉진시키게 된다.

극저온유체에서의 열전달은 Fig. 1에서 볼 수 있는 유동양식에 따른 막비등(flim boiling)영역에서의 열전달 특성을 파악하는 것이 중요하다.[5] Fuller[6]는 액체질소의 관내 유동현상을 초기 시험부 입구로 들어가는 작동유체와 관벽면 사이의 온도차에 따라 두 가지로 구분하고, 관벽면이 사전에 고온으로 유지되어 있는 상태에서 액체질소가 들어가는 경우를 Type Ⅰ, 액체질소가 흐르기 시작하여 충분한 시간이 흐른 후 관벽면이 쿨다운(cooldown) 상태에 있을 때의 유동을 Type Ⅱ라고 규정한 바 있다. Type Ⅰ의 경우는 시험부 입구에서부터 곧바로 관벽면에 증기막(vapor film)이 형성되어 열전달을 감소시키게 되며, 일반적인 관내 증발열전달 유동양식이라 할 수 있는 Type Ⅱ 역시 후반부로 갈수록 증기막이 열저항으로 작용하여 열전달계수를 떨어뜨리는 현상을 보인다. 종합하여 분산유동막비등(dispersed flow film boiling)으로 불릴 수 있는 극저온유체의 유동에서 증발열전달을 증가시키기 위해서는 관벽면에 형성된 증기막을 흐트러뜨리고 나머지 유체와 잘 섞일 수 있도록 관내 유체의 흐름을 선회유동(swirl flow)으로 변화시킬 필요가 있다. 따라서 관내 기구삽입방법을 이용해 이런 효과를 얻으려는 시도가 많이 있었다. Fuller[6]의 경우 비틀림테이프를 이용하여 본 연구와 동일한 작동유체인 액체질소의 증발열전달 실험을 수행하였으며, Mori et al.[7]은 비틀림테이프와 와이어코일을 액체질소와 액화천연가스에 모두 적용하여 실험한 바 있다. 국내에서는 액체질소를 작동유체로 각기 다른 기하학적 형상의 와이어코일을 이용한 실험이 Nam et al.[2]에 의해 이뤄졌으며 평활관에 비해 최대 200% 열전달향상 효과를 가지는 결론을 얻기도 하였다.

본 연구에서는 극저온유체인 액체질소를 이용, 와이어코일을 삽입한 열전달촉진관과 평활관의 증발열전달 및 압력강하 특성을 확인하고, 또한 각기 다른 형상의 와이어코일 실험을 통해 열전달성능에 영향을 미치는 기하학적 인자는 무엇인지 알아보고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치

액체질소를 이용한 관내 증발열전달 실험장치는 극저온의 작동유체에 곧바로 전원공급장치로 열을 가해 기화시키는 열교환시스템이 사용되었으며 그 개략도는 Fig. 2에 나타나 있다. 그 구성은 크게 액체질소 공급부, 시험부, 열 공급부, 온도, 압력, 유량 측정부, 안전장치부, 실험자료획득장치로 이루어져 있고 작동유체가 저장용기에서 나와 스테인리스 강관(stainless steel tube) 내부로 일정하게 흐르는 과정을 따르고 있다.

액체질소는 기화기, 안전밸브, 압력조정기가 부착되어 있는 160리터의 액체질소 저장용기에서 공급되며, 극저온용 니들밸브(needle valve)의 개도로 유량을 조절하여 약 1.5 MPa 상태로 유지되는 저장용기 내부압력과 대기압 사이의 압력차에 의해 외부로 빠져나오게 된다. 저장용기에서 배출된 액체질소는 온도와 압력을 통해 그 상태가 규명되며 시험부를 지난 후 측정된 온도와 압력으로 상태량 변화를 알아낼 수 있다. 시험부 양끝에는 전원공급장치가 연결되어 있어 외부에서 일정한 열을 가해 액체질소를 기화시키게 되며 시험부를 균일하게 6등분한 각 구간에서 관벽면 온도를 측정하게 되어있다. 이때의 온도는 동일 길이 구간에서 관 중심을 기준으로 대칭된 두 군데의 평균값을 취하게 된다. 시험부 입출구, 유량계 직전의 액체질소 온도와 시험부 벽면 다섯 군데에서 측정되는 관벽면 온도는 T형 열전대를 이용하였으며 온도측정에 대한 오차는 ± 0.5℃ 이다.

2.2 실험방법 및 관련 이론

본 연구에서는 시험부에 평활관과 와이어코일을 삽입한 열전달촉진관을 설치하여 각각 동일한 조건에서 증발열전달, 압력강하 성능을 측정하였다. 압력강하는 시험부 입출구에 연결된 차압계로 직접 측정하였으며, 증발열전달계수는 관벽면, 유체와의 온도차와 외부에서 유입되는 열유속을 통해 식 (1)로써 계산되었다. 여기서 T_w은 관내부 벽면의 온도를 의미하는 것으로 실제 열전대가 설치된 관외벽의 온도를 기준으로 관두께 방향의 열전도방정식을 고려한 온도값으로 환산해 주어야 한다. 시험부 외부에서 공급되는 열유속 q''은 시험부 입출구에서 측정되는 엔탈피(kJ/kg) 변화량으로 계산할 수 있으며 이는 식 (2)에 나타나 있다.

$$h = \frac{q''}{T_w - T_s} \quad (1)$$

$$q''A = W \bullet (i_{exit} - i_{inlet}) \quad (2)$$

한편, 시험부는 평활관과 와이어코일을 포함한 열전달촉진관 모두 스테인리스강 재질을, 또 시험부 외부는 외기와의 불필요한 열교환을 최소화하기 위해 폴리우레탄 재질의 단열재를 이용하였다. 본 연구에 사용된 평활관과 와이어코일의 형상, 주요 치수는 Table 1과 Fig. 3에 자세히 소개되어있다.

Table 1 Specification of wire coil inserts

Wire Coil No.	Tube I.D. (D_i)	Coil D. (D_w)	Wire D. (t)	Coil pitch (p)	t/D_w	p/D_w
Wire 1	4.3mm	3.65mm	0.5mm	6.7mm	0.14	1.84
Wire 2	4.3mm	3.65mm	0.5mm	13.4mm	0.14	3.67
Wire 3	4.3mm	3.65mm	0.9mm	6.7mm	0.25	1.84
Wire 4	4.3mm	3.65mm	0.9mm	13.4mm	0.25	3.67

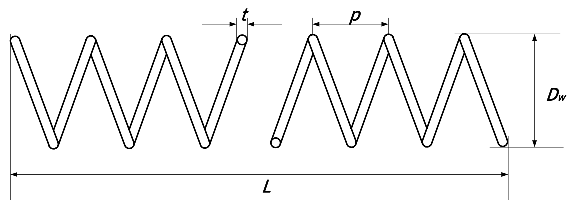

Fig. 3 Geometry of wire coil insert

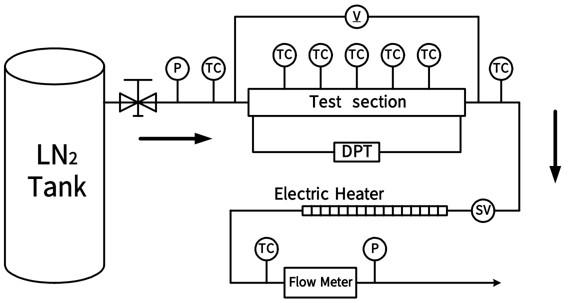

Fig. 2 Schematic diagram of a cryogenic heat exchanger system

3. 실험 결과 및 토의

3.1 열전달 특성

평활관과 와이어코일을 삽입한 열전달촉진관에서 액체질소의 증발열전달 특성에 관한 실험을 수행하였다. 질량유속은 200, 280, 370 kg/m^{2}s 세 가지 경우이고, 열유속은 62 kW/m^{2}인 조건에서 실험이 진행되었으며 각 건도에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 4~6에 나타내었다. 각 질량유속에서 평활관과 열전달촉진관 모두 건도 0.5 부근을 기점으로 열전달계수가 급격히 감소하는 경향을 보이는 것은, 관내벽에 바로 접하고 있던 액체는 기화하고 나머지 액체가 관 중심 부위에 액적 상태로 존재하는 분산유동막비등(dispersed flow film boiling)이 시험부 후반부에서 발생하기 때문으로 보인다. 즉, 증기막은 외부에서 유입되는 열이 유체로 활발히 전달되지 못하게 방해하는 역할을 수행하는 것으로 볼 수 있으며, 전반적인 유동현상은 앞에서 소개한 Type Ⅱ의 양식을 따르고 있다. 이는 실험시 유량과 온도를 측정하기 전 충분히 정상상태에 이르기까지 액체질소를 흘려보낸 까닭으로 액체질소가 시험부 입구에서부터 관벽면과의 온도차가 급격하게 크지 않았기 때문으로 분석될 수 있다.

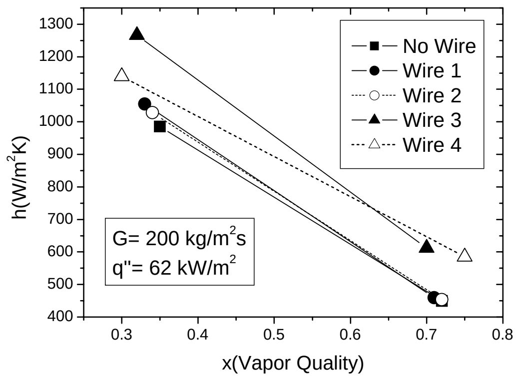

Fig. 4 Comparison of heat transfer coefficients for plain tube and wire coil insert tubes(G=200kg/m^{2}s)

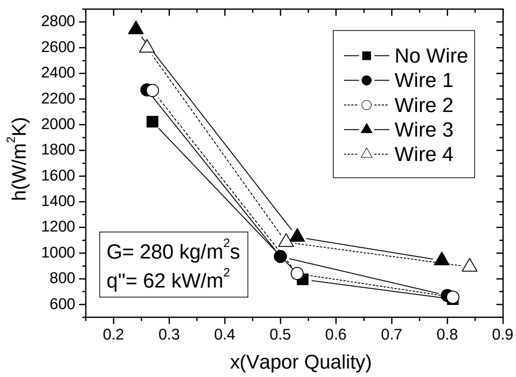

Fig. 5 Comparison of heat transfer coefficients for plain tube and wire coil insert tubes(G=280kg/m^{2}s)

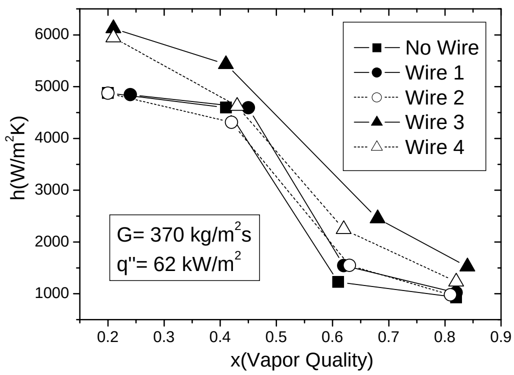

Fig. 6 Comparison of heat transfer coefficients for plain tube and wire coil insert tubes(G=370kg/m^{2}s)

질량유속이 커짐에 따라 평활관의 열전달계수는 급격히 증가하며, 와이어코일이 삽입됨에 따른 열전달 향상 정도도 증가함을 보인다. 와이어코일은 꼬인 정도와 두께에 따라 각기 다른 네 가지를 실험하였는데 피치가 작을수록, 두께가 두꺼울수록 각 유량에서 열전달계수가 골고루 향상되는 특징을 보였고, Wire 3의 경우 질량유속이 370 kg/m^{2}s일 때 최대 약 110% 정도 열전달계수가 증가되는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향을 액체질소를 이용하여 와이어코일로 유사한 실험을 진행했던 Mori et al.[(7)]와 Nam et al.[(2)]의 연구와 비교해보았다. Table 2는 각 실험에 이용된 와이어코일의 특징적인 기하학적 형상을 와이어코일의 외경으로 나누어 무차원화 한 것으로 각기 다른 형상의 와이어코일끼리 직접적인 비교를 위해 도입하였다. 밑줄 친 값은 각 실험조건에서 최대 열전달 증가량을 보였던 경우로 Nam et al.[(2)]의 경우 와이어코일 외경대비 두께가 두꺼울수록, Mori et al.[(7)]의 경우 피치가 작을수록 열전

Table 2 Comparison of wire coil inserts

	Mori et al. ('86)	Nam et al. ('00)	Present study
$t\ /\ D_w$	0.10	0.14, 0.27	0.14, 0.25
$p\ /\ D_w$	0.75, 1.50	2.80	1.84, 3.67

달향상 효과가 컸던 것으로 나타나 본 실험 결과와 동일한 경향을 보였다. 즉, 동일 질량유속 범위에서 피치가 작고 두께가 두꺼운 와이어코일이 작동유체의 유동을 선회유동으로 바꾸기에 더 유리하며, 이에 따라 열전달향상 정도도 더 우수함을 유추할 수 있다.

3.2 압력강하 특성

평활관과 각 열전달촉진관에 대한 압력강하 특성은 Fig. 7을 통해 확인하였다. 예상했던 대로 두께가 두껍고 피치가 작을수록 압력강하가 크게 나타났으며 각 코일이 열전달향상에 미치는 기여 정도에 따라 압력강하도 크게 나타나 압력강하를 고려한 적절한 와이어코일의 선택이 실제 열전달촉진관에서 중요한 기준이 됨을 알 수 있었다. 이러한 종합적인 성능의 평가는 일반적으로 열전달촉진계수(Enhancement Factor, EF), 압력강하비(Pressure Drop Ratio, PDR)와 열전달촉진 성능평가율(Enhancement Performance Ratio, EPR)로 나뉘며[8,9] 이들에 대한 식들은 식 (3~5)에 나타나있다.

$$EF = \frac{h_{en}}{h} \quad (3)$$

$$PDR = \frac{\Delta P_{en}}{\Delta P} \quad (4)$$

$$EPR = \frac{EF}{PDR} \quad (5)$$

Fig. 8은 각 와이어코일의 질량유속별 성능평가율을 나타낸 것으로 각 질량유속에서 압력강하대비 열전달성능은 다소 다르게 보인다. 예를 들어 질량유속 280 kg/m^{2}s인 구간에서의 열전달계수는 앞서 보았듯이 wire 3-4-1-2의 순서로 높은 값을 나타내나 압력강하를 고려한 성능에서는 wire

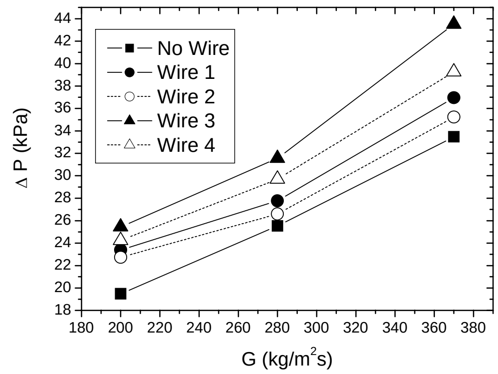

Fig. 7 Comparison of pressure drops for plain tube and wire coil insert tubes

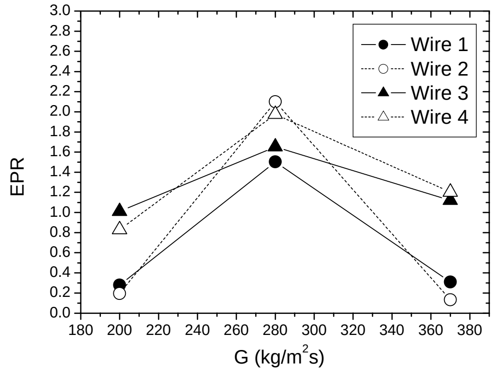

Fig. 8 Comparison of enhancement performance ratio versus mass flux for the wire coil insert tubes

2-4-3-1의 순서로 좋은 결과를 내는 것을 알 수 있다. 앞서 Table 2를 통해 열전달성능을 비교한 두 연구에서도 이와 같은 특징을 기술하였는데, Nam et al.[2]은 EPR의 계산으로, Mori et al.[7]는 압력강하에 대한 열전달계수의 비를 직접적으로 계산함으로써 열전달향상 효과가 작았던 와이어코일이 압력강하까지 함께 고려했을 때에는 오히려 최종적으로 더 우수한 성능을 가진다고 추천한 바 있다. 따라서 열전달성능과 압력강하 특성을 종합적으로 고려하기 위해서는 이와 같은 성능평가율의 변화를 고찰하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 액체질소에 대한 증발열전달 및 압력강하 특성, 열전달촉진관의 설계인자를 규명하기 위해 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평활관에서 액체질소 이상유동(two phase flow) 현상은 시험부 후반부에서 관내 벽면에 증기막이 형성되는 Type Ⅱ로 나타나며 높은 건도 영역으로 갈수록 열전달이 감소한다.

(2) 와이어코일을 삽입한 열전달 촉진관의 경우, 질량유속과 와이어코일의 형상에 따라 최대 110%의 열전달증가율을 보인다.

(3) 압력강하 특성과의 비교를 통해 열전달촉진성능평가율을 고려한 결과, 제일 큰 열전달증가를 보인 wire 3이 압력강하도 최대인 것으로 나타났으며 질량유속 280 kg/m^2s에서 wire 2가 열전달촉진성능평가율이 가장 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국가스공사 연구개발원의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Barron, R. F., 1985, Cryogenic system, 2nd edition, *Oxford University Press*, New York, pp. 3.

(2) Nam, S. C., Lee, S. C. and Park, B. D., 2000, "Performance of Evaporation Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop for Liquid Nitrogen," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 24, No. 3, pp. 363~372.

(3) Bergles, A. E., Nirmalan, V., Junkan, G. H. and Webb, R. L., 1983, "Bibliography on Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer Ⅱ," *Heat Transfer Laboratory Report HTL-31*, ISU-ERI-Ames-84221, Iowa State Univ., December.

(4) Webb, R. L., 1994, Principles of Enhanced Heat Transfer, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, pp. 166~284.

(5) Bergles, A. E., Fuller, W. D. and Hynek, S. J., 1971, "Dispersed Flow Film Boiling of Nitrogen with Swirl Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 1345.

(6) Fuller, W. D., 1968, "Swirl Flow in Dispersed Flow Film Boiling," S. M. Thesis in Mechanical Engineering, *M. I. T.*, pp. 24~25.

(7) Mori, K., Kasahara, K., Shiota, Y., Sonobe, H., Yamamoto, S. and Takemura, S., 1986, "A Study on Stream-Heating LNG Vaporizers," *Mitsui Zosen Technical Review*, Vol. 124, pp. 37~43.

(8) Reid, R. S., Pate, M. B. and Bergles, A. E., 1991, "A Comparison of Augmentation Techniques during In-Tube Evaporation of R-113," *J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 451~458.

(9) Nam, S. C., 1999, "Characteristics of Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop in Horizontal Tubes with Cryogenic Fluid," Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering, *Yeungnam Univ.*, pp. 92~93.