

평활관군 내 R-123/오일의 흐름비등

이진욱, 이재호, 김내현^{*†}

인천대학교 대학원, *인천대학교 기계공학과

Flow Boiling of R-123/Oil Mixture in a Plain Tube Bundle

Jin-Wook Lee, Jae-Ho Lee, Nae-Hyun Kim^{*†}

Graduate School of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 406-772, Korea

*Department of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 406-772, Korea

(Received June 5, 2010; revision received August 18, 2010)

ABSTRACT: The effect of oil on flow boiling of R-123 in a plain tube bundles was experimentally investigated for a range of quality and heat flux. It is shown that the heat transfer coefficient decreased as the oil concentration increased. Comparison with the previous pool boiling data reveals that the reduction of heat transfer coefficient by oil is more pronounced in pool boiling, and the difference increased with the increase of oil concentration and heat flux. Within the experimental range, the variation of mass flux or quality has negligible effect on the heat transfer coefficient.

Key words: Oil(오일), R-123(R-123), Flow boiling(흐름비등), Plain tube(평활관), Tube bundle(관군)

기 호 설 명

d_o : 평활관 외경 [m]
 G : 질량유속 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
 h : 열전달계수 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
 L : 전열관 길이 [m]
 q : 열유속 [W/m^2]
 T_{sat} : 포화온도 [K]
 T_w : 벽면온도 [K]
 w : 오일 농도
 x : 건도

1. 개 요

중대형 냉동기의 증발기에는 냉매와 함께 압축기

오일이 불가피하게 존재하게 되고 증발기를 설계하기 위해서는 오일이 전열성능에 미치는 영향을 적절히 평가하여야 한다. 증발기 내의 오일 농도는 0.5%에서 3% 정도로 알려져 있다.⁽¹⁾

중대형 냉동기의 증발기에는 성형가공관이 널리 사용되고 따라서 기존 연구들은 주로 성형가공관군에 대해 수행되었다. Gan et al.⁽²⁾은 입자가 소결된 알루미늄 관군에 대한 R-113과 R-113/오일 실험을 통하여 열전달계수 감소율은 단관보다 관군에서 더 적게 나타난다고 보고하였다. 그들은 관군에서의 대류현상이 오일의 영향을 상쇄시켜 전열성능 감소율이 줄어든다고 설명하였다. Marvillet⁽³⁾도 84개의 입자 소결 알루미늄관으로 구성된 관군에 대한 실험을 통하여 유사한 결과를 보고하였다.

Memory et al.⁽⁴⁾은 Turbo-B 형과 입자소결관군에 대하여 R-114를 사용하여 관군비등 실험을 수행하였다. Turbo-B 관군에서 열전달 계수 감소율은

[†] Corresponding author

Tel.: +82-32-835-8420; fax: +82-32-835-0793

E-mail address: knh0001@incheon.ac.kr

30% 가량(오일농도 10%, $q = 30 \text{ kW/m}^2$)되어 단관 풀비등의 열전달계수 감소율(10% 정도)보다 크게 나타났다.⁽⁵⁾ 하지만 입자소결 관군에서는 관군과 단관의 전열성능 감소율이 유사하게(오일농도 10%에서 약 40%) 나타났다.

Tatara and Payvar^(6,7)는 R-123과 R-134a를 사용하여 Turbo-BII 관군의 오일성능을 평가하였다. 소량의 오일에서도 열전달계수가 현저하게 감소하였는데 1% 오일농도에서 R-123은 30%, R-134a는 25% 감소하였다. 또한 감소율은 오일농도가 증가하거나 열유속이 감소할수록 증가하였다.

Park et al.⁽⁸⁾은 국내에서 제작된 Turbo-B형 성형 가공관군에 대하여 R-123을 사용하여 관군 비등실험을 수행하였다. 열전달계수 감소율은 1% 오일 농도에서 35%, 5% 오일 농도에서는 55%로 나타났는데 이 값들은 단관 풀비등시의 감소율(45%~65%)보다 작은 값이다.

평활관군 내 냉매 비등시 오일의 영향에 대해서는 Memory et al.⁽⁴⁾과 Zheng et al.⁽⁹⁾이 검토하였다. Memory et al.⁽⁴⁾은 R-114를 사용하여 실험을 수행하였는데 순수냉매보다 오일을 첨가한 경우 오히려 열전달계수가 증가하였다고 보고하였다. 그들은 오일 첨가시 거품(foam)이 형성되는 것을 관측하였는데 이 거품이 열전달을 증가시킨다고 설명하였다. 하지만 단관 풀비등의 경우는 오일 첨가에 따라 열전달계수가 감소하였다.⁽⁵⁾ Zheng et al.⁽⁹⁾은 평활관군 내 암모니아 비등 실험을 수행하였는데, 오일 첨가시 열전달계수는 열유속과 포화온도에 따라 순수냉매에 비해 증가하기도하고 감소하기도 하였다.

상기 연구결과로부터 단관과 관군에서 오일의 효과가 서로 다를 수 있다. 특히 평활관군의 경우는 R-114와 암모니아에 대해서만 오일의 영향이 검토되었을 뿐 신냉매인 R-123, R-134a에 대해서는 검토된 바 없다. 중대형 냉동기에 평활관군을 적용하는 예는 드물지만 평활관군 데이터는 전열축진관군의 성능을 비교 평가하는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 평활관군에 대하여 R-123/광유를 사용하여 관군비등 실험을 수행하였다. 실험은 오일농도 0~5%, 열유속 $10 \sim 40 \text{ kW/m}^2$, 건도 0.1~0.7 범위에서 수행되었다. 실험시 질량유속은 $8 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 포화온도는 26.7°C 로 고정되었다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 관군 실험장치의 개략도를 나타내었다. 냉매는 예열기에서 건도가 조절된후 시험부 하부로 유입된다. 시험부를 지난 냉매는 상부의 응축기에서 응축되고 드라이어와 필터를 거쳐 기어펌프로 유입된다. 응축기로는 7.5 kW 용량의 쉘-튜브형 열교환기 세 개를 직렬로 연결하여 사용하였다. 응축기 관내측으로는 3 RT급 항온조로부터 공급되는 저온의 브라인이 순환한다. 기어펌프와 예열기 사이에는 질량유량계가 설치되어 냉매 유량을 측정한다.

Fig. 2에 시험부의 상세도가 나타나있다. 시험부는 실제 만액식 증발기를 모사하기 위하여 6열의 관군으로 제작하였다. 각 전열관 내에는 카트리리지 히터가 장착되어 소요열량을 공급한다. 위로부터 두 번째 열의 중간에 위치한 전열관에는 열전대를 삽입하여 벽면온도를 측정하였다.

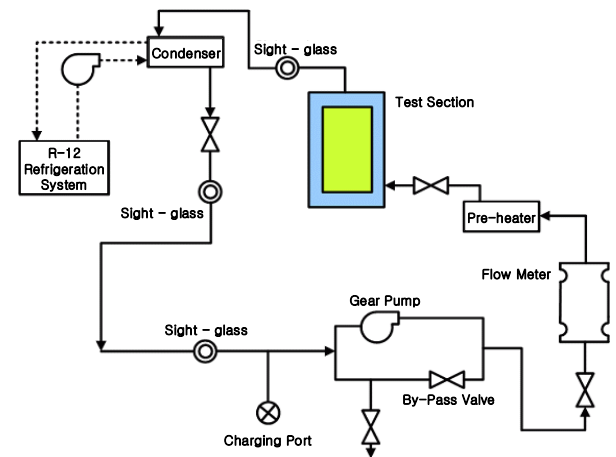


Fig. 1 Schematic drawing of the experimental apparatus.

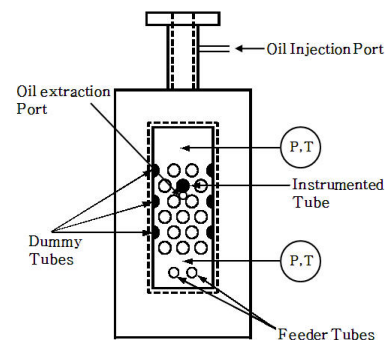


Fig. 2 Detailed drawing of the test section.

시험부 뒷판에는 직경 1.0 mm의 압력공을 두곳 가공하여 절대압력을 계측하였다. 시험부 측면에는 전열관과 같은 외경의 dummy tube를 용접하여 시험부내 유동이 실제 상황과 유사하도록 하였다. 시험부 하부에는 외경 9.5 mm의 냉매 공급관이 장착되어 있다. 냉매 공급관의 상부에는 직경 3 mm의 구멍이 6.5 mm 간격으로 가공되어 있어 이 구멍을 통하여 냉매가 공급된다.

열전대가 설치된 시험 전열관의 상세도가 Fig. 3에 보여진다. 전열관의 비등열전달 계수를 계산하기 위해서는 관벽온도를 측정하여야 한다. 관벽온도는 일반적으로 관벽사이에 열전대를 심고 이로부터 측정된 온도를 외삽하여 구한다.

본 연구에서는 외경 18.8 mm, 내경 13.5 mm의 동봉을 평활관으로 사용하였다. 시험 전열관의 내측에는 시험 전열부에 꼭 맞는 외경 13.45 mm의 히터를 장착하였다. 히터는 발열부가 시험 전열관과 길이 방향으로 일치하도록 특별 제작하였고 히터 삽입시 전열관과 히터 사이에는 thermal epoxy를 발라 열전달이 원활히 이루어지도록 하였다. 또한 시험 전열관의 앞뒤는 테프론 마개와 링으로 측부 열손실이 최소화 되도록 하였다. 열전대 구멍은 시험부 상부로부터 1.3 mm 떨어진 지점에 직경 1.0 mm, 깊이 85 mm로 상하좌우 네 곳에 가공되었다. 구멍에 열전대를 삽입할 때는 열전대를 thermal epoxy에 충분히 묻힌 후 삽입하여 열전대와 구멍 사이에 빈 공간이 없도록 하였다.

냉매의 온도는 시험부의 상하 두 곳에서 측정하였다. 온도 측정부위는 압력공과 같은 평면상에 위치하였는데 이 온도를 측정된 압력으로부터 환산한 포화온도와 비교하였을 때 이들은 0.3°C 이내에서 일치하였다. 온도 측정은 직경 0.13 mm의 가는 Cu-Co 열전대로 이루어졌다. 본 연구에서는 열전대를 관

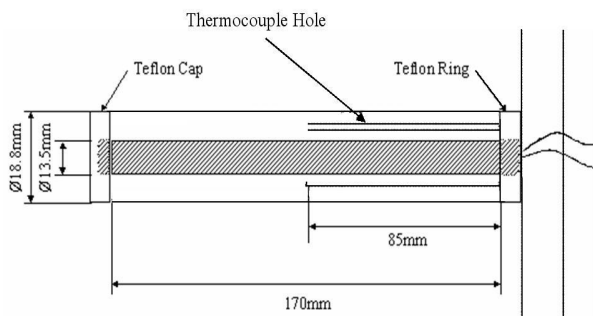


Fig. 3 Detailed sketch of the test tube.

의 중심부에 위치하도록 하고 온도를 측정하였다.

오일 주입구는 시험부 상단에 위치하였고 오일추출구는 온도측정 전열관 측면에 위치하였다. 오일 주입기는 실린더-피스톤 형으로 일정량의 오일을 주입기에 담은 후 질소통의 압력을 이용하여 시험부내로 오일을 주입하였다. 사용된 오일은 40°C에서 점도 45.8 m²/s인 알킬벤젠 오일이었다. 오일추출기는 실린더형으로 일단에는 모세관이 장착되고 다른 단은 시험부에 장착되도록 되어있다.

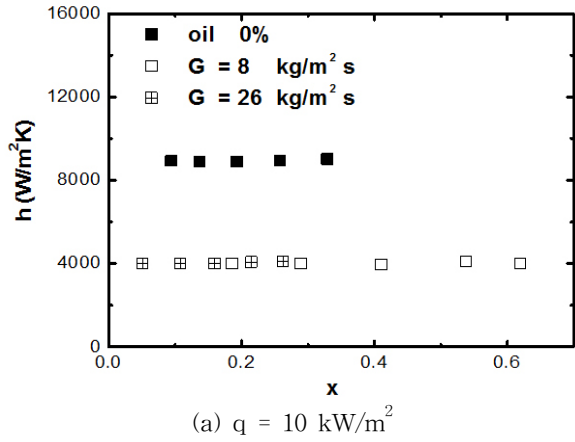
일련의 시험이 끝난 후 약 1 kg의 냉매를 미리 무게를 알고 있는 오일 추출기로 추출하였다. 냉매가 충전된 오일 추출기의 무게를 잰 후 모세관 하단의 밸브를 조금 열어 순수 냉매만 증발하도록 하였다. 매 24시간 마다 무게를 재어 변화가 일어나지 않을 때(3~5일 후) 오일 추출기의 무게를 재어 오일농도를 결정하였는데 주입된 오일 농도와 추출된 오일농도는 ±1% 이내에서 일치하였다. 열전달 계수(h)는 온도측정 전열관에 가해진 열유속(q)을 벽면과열도 ($T_w - T_{sat}$)로 나누어 구하였다. 이때 전열면적은 공칭값($\pi d_o L$)으로 계산하였다.

시험오차 해석을 Kline and McClintock⁽¹⁰⁾의 제안에 따라 수행하였다. 온도 측정의 오차는 ±0.1°C, 열유속 측정의 오차는 ±0.5%, 유량 측정의 오차는 ±1%로 열전달 계수의 오차는 열유속 40 kW/m²에서 ±2%, 열유속 10 kW/m²에서는 ±8%가 되었다.

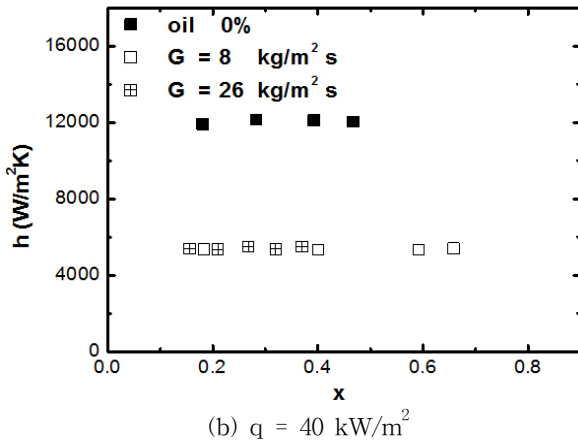
3. 결과 및 논의

3.1 질량유속과 건도의 영향

중대형 냉동기 내에서는 질량유속의 변화가 8~26 kg/m²s로 크지 않고 또한 높은 건도까지 간헐류가 유지되기 때문에 질량유속 및 건도의 변화가 열전달 계수에 미치는 영향은 크지 않다고 알려져 있다.⁽⁸⁾ Fig. 4(a)는 Park et al.⁽⁸⁾의 논문에서 인용한 그림으로 전열축진관군 내 R-123 비등시 오일 농도 5%, 열유속 10 kW/m²에서 질량유속($G = 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 와 $26 \text{ kg/m}^2\text{s}$)과 건도변화에 따른 열전달 계수를 보여준다. 이 그림은 질량유속과 건도의 변화가 열전달 계수에 미치는 영향은 무시할 만함을 보여준다. 열유속이 40 kW/m²인 Fig. 4(b)도 동일한 경향을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 질량유속을 8 kg/m²s로 고정한 채로 실험을 수행하였다.



(a) $q = 10 \text{ kW/m}^2$



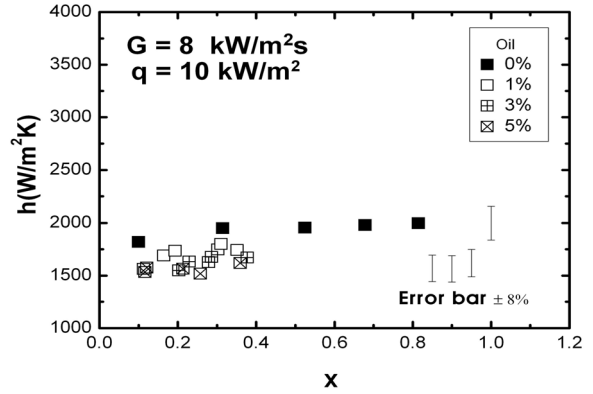
(b) $q = 40 \text{ kW/m}^2$

Fig. 4 Effect of mass velocity on the heat transfer coefficient of the enhanced bundle for R-123 at $T_{\text{sat}} = 26.7^\circ\text{C}$ and 5% oil concentration.

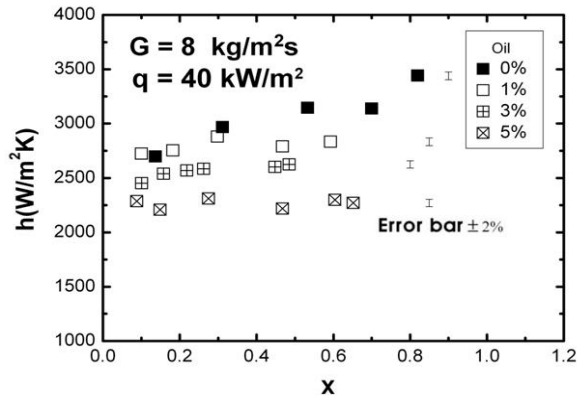
3.2 오일에 의한 열전달 계수 감소

Fig. 5는 열유속 10 kW/m^2 과 40 kW/m^2 에서 오일 첨가에 따른 열전달계수 변화를 보여준다. 질량 유속은 $8 \text{ kW/m}^2\text{s}$, 포화온도는 26.7°C 로 유지되었다. 이 그림들은 오일 농도가 증가함에 따라 열전달 계수가 감소함을 보여준다. 열유속 10 kW/m^2 의 경우 오일농도 1%에서 열전달계수가 10%가량 감소하고 5%가 되면 18%가량 감소한다. 열유속 40 kW/m^2 의 경우는 오일농도 1%에서 열전달계수가 6% 감소하고 5%가 되면 24% 감소한다. Fig. 5에 나타난 순수냉매(오일 0%) 데이터는 Kim et al.⁽¹¹⁾이 실험한 자료이다. 일단 오일 실험을 한 후에는 실험장치 내의 오일을 완전히 제거 하는 게 불가능하여 순수냉매 실험자료를 얻을 수 없었다. Fig. 6에 포화온도 26.7°C 에서 측정된 R-123 단관 풀비등 데이터⁽¹²⁾를

나타내었다. 단관의 경우도 오일 농도의 증가에 따라 열전달계수가 감소함을 알 수 있다.



(a) $q = 10 \text{ kW/m}^2$



(b) $q = 40 \text{ kW/m}^2$

Fig. 5 Effect of oil on the heat transfer coefficient of plain tube bundle for R-123 at $G = 8 \text{ kW/m}^2\text{s}$ and $T_{\text{sat}} = 26.7^\circ\text{C}$.

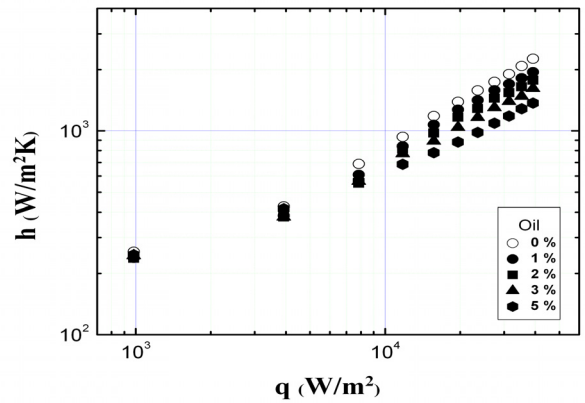


Fig. 6 Pool boiling heat transfer coefficient of the plain tube for R-123 at $T_{\text{sat}} = 26.7^\circ\text{C}$.

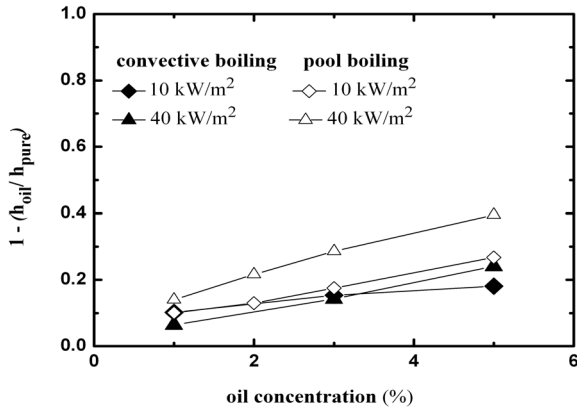


Fig. 7 Effect of oil on the convective boiling heat transfer reduction for R-123 at $G = 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ and $T_{\text{sat}} = 26.7^\circ\text{C}$. Data compared with the R-123/oil pool boiling data by Kim et al.⁽¹²⁾

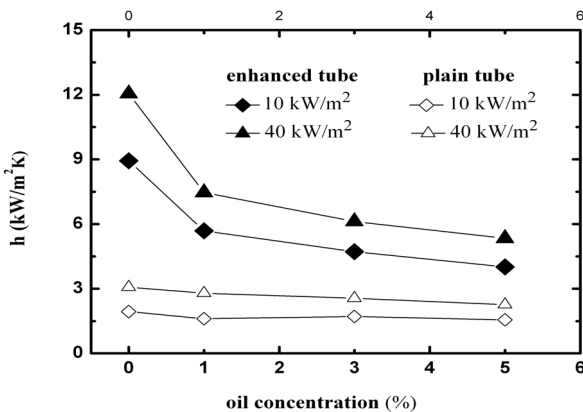


Fig. 8 Present plain tube bundle data compared with those of enhanced tube bundle⁽⁸⁾

Fig. 7에 단관과 관군에서 오일 첨가에 따른 열전달 계수 감소율을 오일 농도에 따라 나타내었다. 관군의 경우 단관보다 열전달 계수 감소율이 월등히 적음을 보여준다. 또한 그 차이는 열유속과 오일 농도가 증가할수록 커짐을 보여준다. 이는 관군의 경우 대류에 의해 관벽에 축적된 오일이 효과적으로 제거되기 때문으로 Gan et al.⁽²⁾ Park et al.⁽⁸⁾도 유사한 경향을 보고한 바 있다. 참고로 본 실험 시 거품(foam)은 관측되지 않았다. Memory et al.⁽⁴⁾은 거품 형성이 열전달을 증진시킨다고 보고하였다. 본 실험결과는 아래 식으로 상관된다.

$$\left(1 - \frac{h_{oil}}{h_{pure}}\right) = 1.03q^{0.078}w^{0.61} \quad (1)$$

Fig. 8에는 본 연구의 평활관군 열전달계수를 Park et al.⁽⁸⁾이 실험한 전열 촉진관군 데이터와 비교하였다. 오일이 첨가되지 않은 순수 R-123의 경우 전열 촉진관군의 열전달계수가 4.3배 높다. 또한 전 오일 농도 범위에서 전열촉진관군의 열전달계수가 평활관군보다 높다. 하지만 이 값은 오일의 농도가 증가할수록 감소한다.

4. 결 론

본 연구에서는 평활관군에 대하여 R-123 대류비등에 미치는 오일의 영향을 살펴보았다. 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) 오일 농도가 증가할수록 열전달계수는 감소하였다. 열전달계수 감소율은 오일 농도 1%에서 6~10%, 농도 5%에서 18~24%로 나타났다.
- (2) 오일에 의한 열전달계수 감소율은 풀비등시보다 관군 비등시 작게 나타났다. 또한 그 차이는 열유속과 오일 농도가 증가할수록 크게 나타났다.
- (3) 전 오일 농도 범위에서 전열촉진관군의 열전달계수가 평활관군보다 높다. 하지만 이 값은 오일의 농도가 증가할수록 감소한다.

참고문헌

1. Thome, J. R., 1996, Boiling of new refrigerants, A state-of-the-art review, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, pp. 435-457.
2. Gan, Y. P., Chen, X. Y. and Tian, S. R., 1993, An experimental study of nucleate boiling heat transfer from flame spraying surface of tube bundle in R113/R11-Oil mixtures, *Proceedings of the 3rd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Honolulu, Hawaii, pp. 1226-1231.
3. Marvillet, C., 1989, Influence of oil on nucleate pool boiling of refrigerants R12 and R22 from porous layer tube, *Eurotherm-Advances in Pool Boiling Heat Transfer*, Paderborn, Germany, Vol. 8, pp. 164-168.
4. Memory, S. B., Akcasayar, N., Eraydin, H. and Marto, P. J., 1995b, Nucleate pool boiling of R-114 and R-114/Oil mixtures from smooth and enhanced surfaces-II. tube bundles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1363-1376.

5. Memory, S. B., Bertsch, G. and Marto, P. J., 1993, Pool boiling of HCFC-124/Oil mixtures from smooth and Enhanced tubes, in Heat Transfer with Alternate Refrigerants, HTD-Vol. 243, pp. 9-18.
6. Tataru, R. A. and Payvar, P., 2000, Effects of oil on boiling of replacement refrigerants flowing normal to a tube bundle-part I : R-123, ASHRAE Trans., Vol. 106, No. 1, pp. 777-785.
7. Tataru, R. A. and Payvar, P., 2000, Effects of oil on boiling of replacement refrigerants flowing normal to a tube bundle-part II : R-134a, ASHRAE Trans., Vol. 106, No. 1, pp. 786-791.
8. Park, J. H., Kim, N. H., Kim, D. Y., Byun, H. W., Choi, Y. M. and Kim, S. H., 2009, Forced convective boiling of refrigerant-oil mixtures in a bundle of enhanced tubes having pores and connecting gaps, Int. J. Air-Cond. Ref., Vol. 17, No. 3, pp. 81-87.
9. Zheng, J. X., Chyu, M. C. and Ayub, Z. H., 2006, Boiling on a horizontal plain tube bundle with ammonia/lubricant mixture subjected to inlet vapor quality, Int. Heat Transfer Conference, Sydney, Australia.
10. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, The description of uncertainties in single sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-9.
11. Kim, N. H., Cho, J. P. and Youn, B., 2002, Forced convective boiling of pure refrigerants in a bundle of enhanced tubes having pores and connecting gaps, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp. 2449-2463.
12. Kim, N. H. and Kim, D. Y., 2010, Pool boiling of R-123/Oil mixtures on enhanced tubes having different pore sizes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 53, pp. 2311-2317.