

급기 예열 열교환기에서 에칭 표면 특성이 응축 열전달에 미치는 영향에 관한 연구

석성철 · 황승식 · 최규홍 · 신동훈 · 정태용^{†*}

국민대학교 대학원 기계공학과, *국민대학교 기계공학과

(2014년 1월 6일 접수, 2014년 5월 26일 수정, 2014년 5월 28일 채택)

A Study on the Effects of Etching Surface Characteristics on Condensation Heat Transfer in Pre-heating Exchanger

Sungchul Seok · Gyu Hong Choi · Seung Sik Hwang · Donghoon Shin · Tae Yong Chung^{†*}

Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Kookmin University,

*Dept. of Mechanical Engineering, Kookmin University.

(Received 6 January 2014, Revised 26 May 2014, Accepted 28 May 2014)

요약

일반 가정용 보일러의 열효율을 증진시키기 위해서 콘덴싱 보일러에 부착되는 급기 예열 열교환기의 응축 열전달에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 스테인리스의 표면에 대하여 에칭을 이용하여 표면 거칠기를 부과하였다. 그리고 열전달 성능 평가를 위해 대향유동 열교환기를 폴리카보네이트로 제작하였고 원판과 비교 실험을 수행하였다. 그 결과 에칭 처리한 모든 시편의 총괄열전달계수는 원판에 비해 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 에칭 시간이 60초인 시편에서 평균 15%까지 증가하였다. 그리고 AFM 장비를 이용하여 표면 특성에 대한 분석을 통하여 열전달 증진 요인에 대해 연구하였다.

주요어 : 총괄열전달계수, 급기 예열 열교환기, 표면 거칠기

Abstract - In order to improve the heat efficiency of the general residential boiler, we performed an experiment of condensation heat transfer to air pre-heating exchanger adhered to the condensing boiler. In this study, surface roughness was imposed on the surface of stainless steel by etching. And in order to evaluate the heat transfer performance on each plate, the counter flow heat exchanger fabricated with polycarbonate in used. As a result, on etching treated plate's overall heat transfer coefficient is higher than the original plate. And etching treated plate during 60 seconds with etchant is the to average 15% compared to bare stainless steel. And we studied the heat transfer enhancement factor through the analysis of surface characteristics using AFM.

Key words : Overall heat transfer coefficient, Pre-heating exchanger, Surface roughness

1. 서 론

최근 에너지 이용 효율 향상에 의한 에너지 절감과
연료사용량의 감소 방안이 핵심 이슈가 되고 있다.

따라서 에너지 절약에 적합한 신기술, 신소재 및 기
능성을 고려한 시스템 선정은 필수 불가결 하다고 할
수 있다. 현재 콘덴싱 보일러 시장은 공공기관 설치
의무화 정책과 함께 소비자들의 인지도 상승, 에너지
절감형에 초점이 맞춰져 있기 때문에 고효율인 콘덴
싱 보일러 수요가 가파른 상승세를 보이고 있다.

따라서 본 연구에서는 콘덴싱 보일러 안에 설치되

[†]To whom corresponding should be addressed.
Dept. of Mechanical Engineering, Kookmin University.
Tel : 02-910-4674 E-mail : ty chung@kookmin.ac.kr

는 급기 예열 열교환기의 효율을 높이기 위해서 스테인리스 재질의 표면에 에칭처리를 통하여 표면 거칠기를 증가시켰다. 원판과 에칭 처리한 시편과의 거칠기의 범위는 대략 $0.04\mu\text{m} \sim 0.6\mu\text{m}$ 이다. 그리고 표면 거칠기의 증가에 따른 스테인리스 표면에서의 열전달계수 촉진 실험을 수행하였다. 기존의 연구에서 알 수 있듯이 표면 거칠기는 난류 대류 열전달을 증진 시키는데 효율적이다.⁽¹⁾ 따라서 표면 거칠기의 정량적인 분석은 유체 유동과 열전달에 중요한 역할을 하기 때문에 지속적인 연구가 필요하다.

최초의 포괄적인 연구 중 Nikuradse.은 모래입자 거칠기를 가진 거친 관내에서의 난류유동에 관한 연구가 있었고,⁽²⁾ Ceylan.과 Kelbaliyev.에 의해서 표면 거칠기가 열전달과 압력강하, 마찰 계수에 대한 상관관계 추론에 미치는 영향에 대한 연구가 있었다.⁽³⁾ 또한 Heo 등의 연구에서는 작동유체가 R-134a이고 스테인리스 평활판에서의 관외측 응축 열전달 특성에 관한 연구가 있었다.⁽⁴⁾ 관외측 응축에서 표면 거칠기가 낮을수록 관 표면의 미세 틈 사이에 역류되는 응축액의 양이 감소되고, 매끄러운 표면에서 응축액의 배출속도를 증가시키기 때문에 열전달계수의 향상으로 이어진다는 연구 결과였다. 이때의 표면 거칠기의 범위는 $0.371\mu\text{m} \sim 1.855\mu\text{m}$ 이다. 그 밖에도 Ahn, Simonis, Garcia 등의 연구에서도 표면 거칠기와 열전달과의 상관관계에 대한 연구가 지속적으로 진행되었다.⁽⁵⁻⁷⁾

따라서 본 연구에서는 기존에 있었던 연구 내용들을 바탕으로 열전달 성능의 증진에 중점을 두고 표면 거칠기를 부과하는 방법을 사용하였다. 에칭액을 이용한 소량의 부식기법으로 기존의 표면처리 방법보다 비교적 효율적이고 한정된 거칠기 범위 내에서 열전달계수의 변화를 알아보기 위하여 비교 실험을 수행하였다. 그리고 각각의 시편에 대한 표면특성을 분석

함으로써 열전달 증진 요인에 대하여 알아보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험장치의 기본 구성도이다. 크게 고온부 측과 저온부 측으로 나뉘어져 있다. 고온부 측의 포화공기와 저온부 측의 냉각수를 대향류 방식으로 열교환을 시켜서 표면처리에 따른 총괄열전달계수의 변화를 실험을 통하여 알아보았다.

고온부 측의 포화공기 공급 장치는 전기히터에 의해서 물을 80°C 이상으로 가열을 하여 공기를 통과시켰다. 포화공기의 입구 온도는 PID 온도제어장치에 의해 80°C 로 일정하게 유지시켰고 가스 유량계에 의해 10, 15 및 20lpm 으로 변화를 주었다. 저온부 측의 냉각수는 20°C 의 일정한 온도를 유지하기 위해 항온조를 설치했고 유량계에 의해 0.08lpm 으로 일정하게 유지하였다. 그리고 시편의 각 입·출구에는 열전대를 설치하여 온도를 측정하였고 측정된 온도는 데이터로거에 실시간으로 출력되는 값을 사용하여 대수평균온도 차법으로 해석을 하여 총괄열전달계수 값을 구하였다.

본 실험의 기본조건은 Table 1과 같으며 Fig. 2는 실험대상의 상세도이다.

실험에 사용된 시편은 STS430J1L이고 양쪽에 폴리카보네이트 판넬을 장착하여 고온부·저온부 측 유체가 흐를 수 있게 하였다. 시편의 표면처리로는 SUS 에칭액을 이용하여 부식시키는 방법을 사용하였고 에칭 시간을 30, 60, 90 및 120초 총 4가지의 시편을 만들어 원판과 비교 실험을 수행하였다. 에칭액의 온도는 SUS에칭액 활성화 온도를 기준으로 $45 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 후에 에칭하였다. Table 2는 에칭액의 구성성분이다.

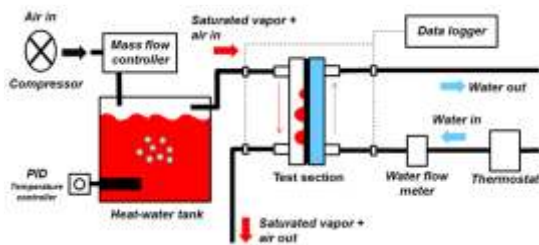


Fig. 1. Schematic diagram of counter flow exchanger and flow systems

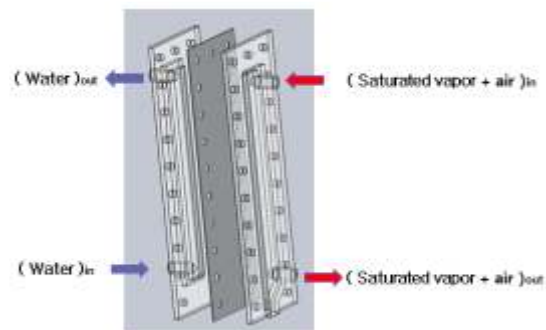


Fig. 2. Test section

Table 1. Operation conditions

Parameter	Hot side	Cold side
Inlet temperature(°C)	80	20
Flow rate(lpm)	10, 15, 20	0.08
Heat exchanger area(m ²)	4×10 ⁻³	4×10 ⁻³

Table 2. Composition analysis of etchant

Chemical species	CAS No.	wt(%)
Sulfuric acid	7664-93-9	<11
Sodium nitrate	7631-99-4	<7
Inhibitor	-	<5
Nonionic surfactant	-	>2
Water	7732-18-5	<80

3. 결과 및 분석

3.1 실험결과의 해석

고온부 측에서 저온부 측으로 전달되는 열량은 저온부 측의 냉각수가 흡수한 열량과 같으므로 열전달량 Q 는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Q = \dot{m}C_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (1)$$

여기서 Q 는 열전달량으로 저온부 측 물의 질량유량(\dot{m})과 비열, 온도차의 곱으로 계산되어진다. 여기서 ΔT 는 냉각수 입구와 출구의 온도차이다.

고온부 측의 습공기와 냉각수의 입·출구 온도 및 유량의 측정값으로부터 총괄열전달 계수의 계산은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$Q = UA\Delta T_{lm} \quad (2)$$

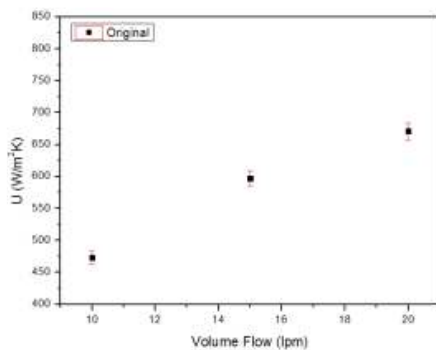


Fig. 3. Overall heat transfer coefficient of the original stainless steel plate

여기서 A 는 고온부 측과 저온부 측 사이에서 열전달이 일어나는 전열면적(0.02m×0.2m)이다. U 는 총괄열전달계수로 표면의 에칭 처리에 따른 표면 특성의 변화로 인해 달라지는 값을 실험을 통하여 산출하였다. 그리고 각각의 에칭한 시편에 대하여 원판과 비교하여 열전달계수의 변화에 대하여 알아보았다. 대수평균온도차 ΔT_{lm} 은 식 (3)과 같다.(8)

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,o} - T_{c,i}) - (T_{h,i} - T_{c,o})}{\ln \left[\frac{(T_{h,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,o})} \right]} \quad (3)$$

3.2 실험결과 및 분석

Fig. 3은 서로 다른 각각의 원판에 대한 응축 열전달 실험을 총 3회 실시한 후 산출한 평균 총괄열전달계수 값이다. 고온부와 저온부 측의 온도가 안정화된 이후에 측정하였다. 공기의 유입 유량에 따라 10lpm에서 473W/m²K, 15lpm에서 597W/m²K, 20lpm에서 671W/m²K의 값을 얻었고 본 실험으로부터 얻어지는 총괄열전달계수 값의 오차는 ±3%이다.

Fig. 4에서부터 Fig. 7까지는 에칭 시간이 30, 60, 90 및 120초일 때의 실험값을 나타낸다. 에칭 시간이 30초인 시편에서는 원판과 비교할 때 총괄열전달계수 값은 공기의 유입 유량이 증가할수록 7~11%까지 증가하였다. 60초 동안 에칭한 시편에서는 13~17% 정도 증가하였고 5가지 시편 중에서 가장 높은 열전달 성능을 나타내었다. 그리고 90초 동안 에칭한 시편은 5~8% 증가, 120초 동안 에칭한 시편은 10~11% 증가를 하였다. 이상의 결과로부터 에칭을 60초 동안 한 시편에서 원판대비 최대 17%까지 증가한 가

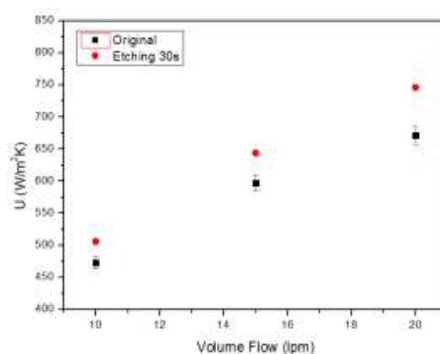


Fig. 4. Overall heat transfer coefficient compared with etching plate(30s)

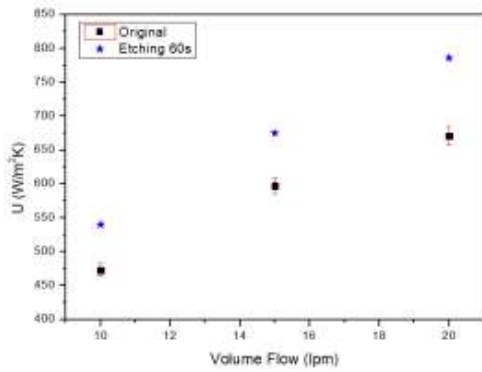


Fig. 5. Overall heat transfer coefficient compared with etching plate(60s)

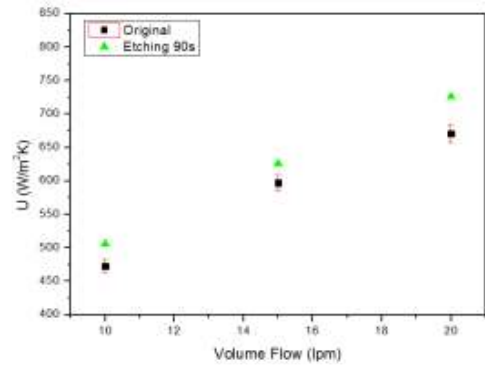


Fig. 6. Overall heat transfer coefficient compared with etching plate(90s)

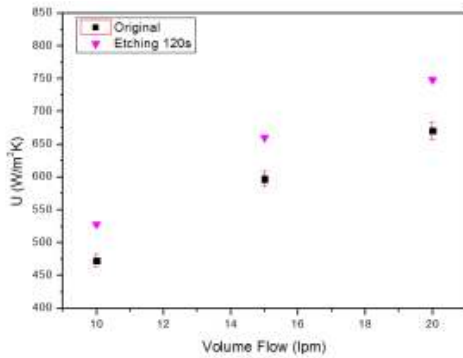


Fig. 7. Overall heat transfer coefficient compared with etching plate(120s)

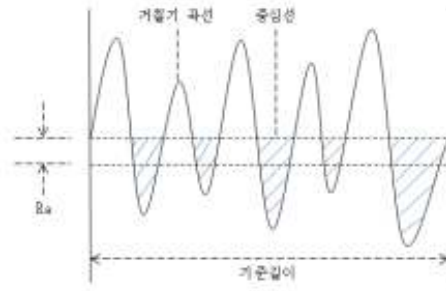


Fig. 8. Arithmetical mean deviation of the profile

장 높은 총괄열전달계수 값이 나타났다. 따라서 에칭을 한 시편의 열전달 증진 요인에 대하여 알아보기 위해서 표면 거칠기, 표면적 변화, 표면 형태 등의 표면 특성을 분석해 보았다.

3.3 표면 특성 분석

3.3.1 표면 거칠기 측정

실험결과 값의 해석을 위해서 에칭 시간에 대하여 어느 정도의 표면 거칠기 값을 갖는지 측정하였다. 본 연구에서는 Fig. 8에서 제시한 것과 같이 일반적으로 사용하는 통계적인 R_a (중심선 평균 거칠기)값을 사용하였다. R_a 값은 한 기준 길이 내의 산과 골의 높이와 깊이를 중심선을 기준으로 평균하여 없어지는 값이다. 모든 시편의 R_a 값은 AFM(Atomic Force Microscopy) 장비를 이용하여 측정하였으며 그 값은 Table 3과 같다.

에칭 시간에 따른 R_a 값은 대략 $0.04\mu\text{m} \sim 0.6\mu\text{m}$ 사이의 범위에서 점차 증가되는 경향을 보였다. 실험결과와 비교하면 R_a 값이 증가할수록 총괄열전달계수

Table 3. Surface roughness according to etching time

No.	Test section	$R_a(\mu\text{m})$
1	Original plate	0.041
2	Etching 30s	0.180
3	Etching 60s	0.304
4	Etching 90s	0.383
5	Etching 120s	0.582

값은 증가하는 경향을 보였으나 에칭 시간이 90초와 120초인 시편에서는 그 증가율이 다소 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 분석 결과를 통해 표면 거칠기가 일정값 이상으로 커지면 총괄열전달계수는 그에 비례하여 커지지 않음을 알 수 있다.

3.3.2 표면적 변화

Table 4에 이미지 처리 및 분석 프로그램의 일종인 XEI에서 얻은 전열면적 데이터를 첨부하였다. 측정된 범위는 가로, 세로 각각 $40\mu\text{m}$ 이다. 원판의 표면적이 1600mm^2 일 때 에칭을 한 시편의 표면적 증가량은 대략 14.9%~17.4%였다. 에칭 시간이 90초와 120초

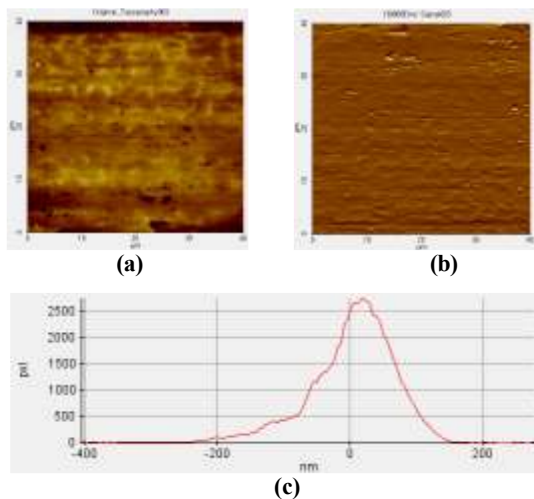


Fig. 9. Rough surface topography and region histogram of the original stainless

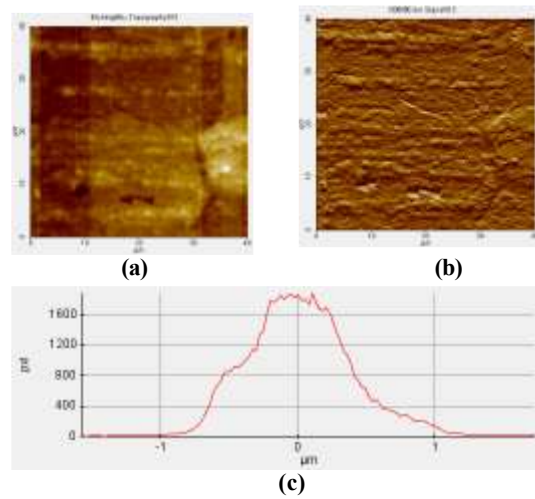


Fig. 10. Rough surface topography and region histogram of the etching plate(60s)

Table 4. Composition analysis of etchant

No.	Geometric area : 1600μm ²		
	Test section	Surface area(μm ²)	Surface area ratio(%)
1	Original	1608	100.5
2	30s	1838	114.9
3	60s	1840	115
4	90s	1878	117.4
5	120s	1858	116.1

인 시편에서의 표면적 증가율은 다른 시편과 비교하여 거의 비슷하거나 미세한 증가가 나타났다. 이러한 분석 결과를 통해 표면적의 증가는 에칭 처리 시간에 따른 값들의 편차가 작으므로 총괄열전달계수 증가에 미치는 영향의 크기를 논하기 어려움을 알 수 있다.

3.3.3 표면 형상

Fig. 9의 (a),(b)는 측정 범위에서 원판에 대한 표면 형태 및 표면 거칠기 값에 따른 픽셀(화소)의 분포도이다. 사진의 전체 픽셀은 가로 256, 세로 256 픽셀이다. 표면 거칠기는 -0.2~0.2μm 사이에서 Fig. 9의 (c)와 같은 분포를 보이고 대략 0~0.05μm 사이에서 최대 2700픽셀을 보임을 알 수 있다.

Fig. 10의 (a),(b)는 측정 범위에서 에칭을 60초 동안 한 시편의 픽셀의 분포도이다. 표면 거칠기는 -1~1μm 사이에서 Fig. 10의(c) 그림과 같은 분포를 관찰할 수 있고 대략 -0.25~0.25μm 사이에서 최대 1800 픽셀을 보임을 알 수 있다. 위 그림에서 보여 지는 것

처럼 원판의 표면에 대해 에칭 시간이 길어질수록 표면 거칠기 값이 작은 입자들의 분포가 줄어들고 큰 입자의 분포도가 커져가는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 원판의 작은 입자가 에칭을 통해 커지게 되면 총괄열전달계수가 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 스테인리스 스틸 표면에 대한 에칭 처리를 통하여 총괄열전달계수를 증가시키고자 하였다. 그리고 그 표면 분석을 함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전체적으로 원판에 비해 에칭 처리를 한 시편에서 총괄열전달계수 값은 증가하는 경향을 보였다. 에칭 시간을 30초 동안 한 시편($R_a=0.180\mu m$)에서는 평균 9%, 60초 동안 한 시편($0.304\mu m$)에서는 평균 15%, 90초($0.383\mu m$)에서는 평균 7%, 120초($0.582\mu m$)에서는 평균 11%정도 증가하였다.

(2) R_a 값이 0.04~0.6μm인 경우 실험결과에 근거하여 에칭을 60초($R_a=0.304\mu m$) 동안 한 시편이 가장 열전달 성능이 우수했다.

(3) 에칭 시간에 따른 표면 거칠기를 분석한 결과 표면 거칠기가 커지면 총괄열전달계수가 증가하지만 일정값 이상으로 커지면 총괄열전달계수는 그에 비례하여 커지지 않음을 알 수 있다.

(4) 에칭 시간이 길어질수록 표면적의 증가율은 거의 비슷하거나 다소 증가하였다. 따라서 각각의 에칭을 한 시편의 표면 형상을 분석함으로써 에칭 시간이 60초인 시편에서의 열전달 성능이 가장 우수했던 요인으로는 표면 거칠기의 크기뿐 아니라 피치도 같이 고려되어야 한다고 사료된다. 에칭 시간에 따른 표면적 변화를 분석한 결과 최대값과 최소값의 편차가 2.5%밖에 되지 않고 그 경향이 일정하지 않아 총괄 열전달계수 변화에 미치는 영향을 파악하기 어려웠다.

(5) 측정 범위에서 표면 거칠기의 픽셀 분포를 분석한 결과 에칭 시간에 따라 작은 입자가 큰 입자로 되며 이에 따라 총괄열전달계수도 증가하는 것을 알 수 있었다.

(6) 표면 형상이 총괄열전달계수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 정량적인 분석에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 국민대학교 교내연구 지원사업(2013년)과 산업통상자원부의 재원으로 에너지인력양성사업(20114010100070)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Li Xiao-wei, Meng Ji-an, Li Zhi-xin, "Roughness enhanced mechanism for turbulent convective heat transfer" International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, Vol.54, No9-10, pp.1775-1781
2. J. Nikuradse, "Laws for flow in rough pipes" VDI Forschungsheft 361 4. Series B, 1933
3. K. Ceylan, G.Kelbaliyev, "The roughness effects on friction and heat transfer in the fully developed turbulent flow in pipes" Appl. Therm. Eng.23, 2003, pp.557-570
4. Jaehyeok Heo. Rin Yun. Yongtaek Lee. Yongchan Kim., "Condensation Heat Transfer Characteristics of R-134a with Wall Thickness and Surface Roughness on Stainless Steel Horizontal Plain Tubes" Trans. of the

- KSME(B), 2006, Vol.30, No.12, pp.1203-1210
5. Ahn S.W, Son K.P, "Effects of Rib Geometries on the Friction Factors and Heat Transfer in the Channel", Trans. of the KSME(B), 2001, Vol.2, No.2, pp.241-247
6. V. Simonis, P. Poskas, V. Ragaisis, "Enhancement of heat transfer and hydraulic drag in gas-cooled helical channels with artificial roughness on convex wall", Nuclear Engineering and Design, 2012, Vol.245, pp.153-160
7. A. Garcia, J.P. Solano, P.G. Vicente, A. Viedma, "The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement : Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils", Applied Thermal Engineering, 2012, Vol.35, pp.196-201
8. Frank P.Incropera, David P.DeWitt, Theodore L.Bergman, Adrienne S.Lavine, "Introduction to Heat Transfer" WILEY, 2012, pp.698-737.