

핀-관 열교환기에서의 핀의 물 접촉각이 응축잔수량에 미치는 영향

신 종 민[†], 이 남 교, 한 성 주, 하 삼 철
LG전자 디지털 어플라이언스 연구소

The Effect of Water Contact Angles of the Fin Surfaces of the Fin-and-Tube Heat Exchangers on the Water Hold-up

Jongmin Shin[†], Nam-Gyo Lee, Sungjoo Han, Samchul Ha
Digital Appliance Lab., LG Electronics

(Received December 27, 2000; revision received April 16, 2001)

ABSTRACT: An experimental study on the behavior of the water hold-up by condensation of a fin-and-tube heat exchanger with regard to the surface characteristics, i.e., contact angles, was conducted. The static and dynamic contact angles were measured, and condensation experiments were conducted. Flow patterns on the fins with different surface characteristics were visualized. Results showed that the static contact angle is proportional to the dynamic contact angle within the range of this study. The water hold-up of the heat exchanger increases as the static or dynamic contact angle of its surfaces increases. Existence of transition of flow patterns was found as the static or dynamic angle increase. Due to the transition in the flow patterns, changes in the gradient of the water hold-up is occurred around the static angle of 80°.

Key words: Fin-and-tube heat exchanger(핀-관 열교환기), Surface characteristics(표면특성), Water hold-up(잔수량), Hydrophilicity(친수성), Contact angle(접촉각), Condensation(응축)

기 호 설 명

B_z : 부력 [N]

DCA : 동적 접촉각(dynamic contact angle) [°]

F : 시료를 지지하는 힘 [N]

g : 중력가속도 [m/s^2]

m : 물의 질량 [kg]

P : 시료와 물이 접촉한 면의 주변길이 [m]

R^2 : 상관계수

SCA : 정적 접촉각(static contact angle) [°]

WH : 잔수량(water hold-up) [kg/m^2]

그리스 문자

σ : 물의 표면장력 [mN/m]

θ : 물과 시료가 접촉하는 각도 [°]

ν : 동점성 계수 [m^2/s]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-055-260-3828; fax: +82-055-260-3507

E-mail address: shinjm@lge.com

1. 서 론

냉동공조기기에 사용되는 열교환기의 고효율화와 이에 따른 소비전력 저감화는 제품의 설계자 혹은 개발자들에게 지속적으로 요구되는 과제이다. 가정용 전기 냉동냉장고에 사용되는 증발기는 그 특성상 영하의 조건에서 운전되어야 하므로 그 표면에 착상현상이 발생하게 된다. 이러한 증발기 표면에서의 착상은 열전달 성능의 저하 및 증발기 양단의 압력강하로 인한 냉장고 성능 저하의 직접적인 원인이 되므로, 일정시간 압축기 운전 후에는 주기적으로 서리를 제거시키는 제상과정(Defrost process)이 필요하게 된다. 제상과정에서 고상(固狀)의 서리는 상변화를 겪고 액상으로 바뀌게 되는데, 이때 액상의 물은 중력에 의해 대부분 증발기 끝단에서 분리되지만, 일부는 표면장력에 의해 증발기 표면에 부착된다. 이러한 제상 후 증발기에 부착된 물은 다음 싸이클에서 압축기 운전시 다시 얼게 되고, 제상시 다시 녹여야 하므로 그 양은 소비전력과 직접적으로 비례하게 된다.⁽¹⁾ 공조기(에어컨)의 경우에서도 압축기 운전시 응축되어 증발기에 잔류하는 물방울들은 공기 유로를 막아서 압력강하를 유발하고 성능저하 및 소음증가의 원인이 된다. 또한, 운전 중 여분의 물방울이 냉기와 더불어 유출되는 현상(Carry-over)이 발생하게 되어 소비자 불만의 원인이 되기도 한다. 그러므로 냉동공조기기에 있어서 증발기에 부착되어 잔류하는 물 양의 관리는 중요한 문제이다. 이러한 증발기나 어떤 표면에 부착되어 잔류하는 물 양을 잔수량(Water Hold-Up)이라고 한다.

일반적으로 제상 후 잔수량은 열교환기의 형상뿐 아니라 열교환기 표면, 특히 핀 표면의 성질에도 크게 좌우된다. 하삼철 등^(2,3)은 동적 접촉각(Dynamic Contact Angle, DCA)이 10~40°인 친수(Hydrophilic) 표면과 90°인 알루미늄 표면에 대해 잔수량을 측정하여 압력강하의 모델을 제시하였고 표면의 친수처리에 의해 잔수량이 감소할 수 있음을 보였다. 신종민 등⁽¹⁾은 다른 성질을 가지는 표면에 물입자를 분사할 때 일정 크기의 표면에 부착될 수 있는 잔수량에 대해 조사하여 표면을 친수처리할 때 잔수량은 감소함을 보였다. 또, Seki et al.,⁽⁴⁾ Ostin et al.,⁽⁵⁾ O'Neal et al.,⁽⁶⁾ 그리고 류수길 등⁽⁷⁾은 표면의 친수특성에 따른

착상현상에 대하여 연구를 진행하였다. 그러나, 아직까지 잔수량과 표면특성과의 정량적 관계는 체계적으로 파악되어 있지 않은 것으로 알려져 있다. 그러므로 본 연구에서는 여러 가지 다른 표면특성을 갖는 증발기에 대해 일반적으로 표면특성을 논할 때 주로 사용되는 정적 접촉각(Static Contact Angle, SCA)과 동적 접촉각을 이용하여 이들 관계를 정량적으로 규명하고, 이들 변수와 잔수량과의 관계를 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시료의 준비

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 핀-관 증발기를 나타낸 것으로 동관과 알루미늄 핀으로 제작하였으며, 관의 단수와 열수는 각각 2개 및 6개이다. 곡관부를 포함한 외곽치수(W×D×H)는 360×850×150 mm이고, 관 및 핀의 전열 면적은 각각 0.1131 m² 및 0.8586 m²이다. 핀 두께 및 관 직경은 각각 0.15 mm 및 12.7 mm이고, 핀 피치는 상측 5단을 4.5 mm로, 최하측 1단을 9 mm로 제작하였다. 이와 같이 상측 5단과 하측 1단의 핀 피치를 다르게 제작한 것은 본 열교환기가 냉장고용 증발기로 사용될 때 가혹조건에서 최하단의 핀과 핀 사이가 착상에 의해 완전히 막힘을 배제하기 위함이다.

증발기는 여러 가지 다른 표면특성을 얻기 위하여 고석근 등⁽⁸⁾이 제안한 방법으로 증발기 전체를 진공 챔버에 투입하여 입력, 진공도, 그리고 처리시간을 달리하여 플라즈마 처리하였다. 각기 다른 7개 조건으로 표면처리된 증발기의 제상 후 잔수량을 측정한 다음 증발기를 분해, 절단하여

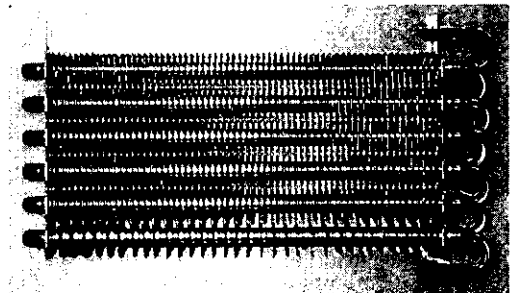


Fig. 1 Photograph of heat exchanger.

증발기의 각기 다른 위치에서 가로×세로가 5×10 mm인 12개의 시료를 만들었다. 정적 접촉각의 경우 증발기 하나당 12개의 시료를, 동적 접촉각의 경우 증발기 하나당 6개의 시료를 각각 2회 반복하여 측정, 평균하였다. 각 증발기 내에서도 정적 접촉각은 위치별로 편차를 보이는데, 각 증발기별로 위치별 표준편차는 최소 2.9°에서 최대 14.9°까지이며, 동적 접촉각의 경우 표준편차는 최소 4.6°, 최대 21.3°이었다. 이와 같은 증발기별 위치에 따른 정적 혹은 동적 접촉각의 차이는 증발기 전체를 일시에 플라즈마 처리함으로써 증발기 안쪽과 바깥쪽의 플라즈마 강도가 달라졌기 때문으로 사려된다. 마지막으로, 절단된 증발기 핀 표면에 신종민 등⁽¹⁾이 제안한 물입자 분사 시험방법으로 물입자를 분사하여, 완전 포화하였을 때 그 단면의 유동형상을 촬영하였다.

2.2 잔수량의 측정

Fig. 2에 보여지는 실험장치의 테스트부(Test Section)에 증발기를 설치하고 항온조 온도와 공기 입구측 온도 및 습도가 정상상태에 도달하면 항온조의 냉각수유량을 2.2l/min로 고정하여 응축시험을 시작한다. 입구 공기측의 시험조건은 히터와 가습기를 이용하여 건구온도 35℃, 상대습도 80±1%으로 제어하였고 냉각수온도는 6.5±1.0℃로 관리되었다. 시험이 시작되면 증발기에 응축이 발생하고 시간이 경과함에 따라 응축량은 증가하여 일정시간 후 증발기에 부착된 잔수량은 응축량과 중력에 의해 증발기에서 이탈하는 물의

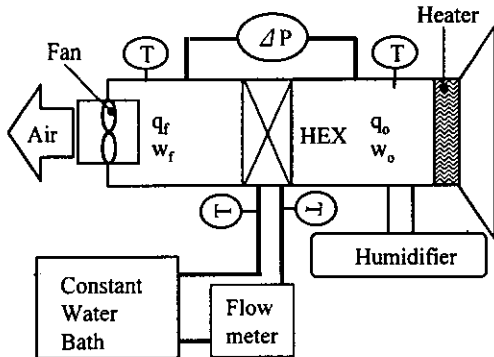


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for measurements of the water hold-up.

양이 균형을 이루어 일정량을 유지하게 된다. 잔수량은 응축이 포화되었을 때 응축수가 부착된 상태에서의 증발기 무게와 응축수를 모두 제거한 후의 증발기 무게의 차로 계산하였다. 이때 무게는 로드셀(Load cell, 제작처 : CAS, 모델명 : BCL-1L)로 측정하였다.

2.3 정적 접촉각의 측정

Fig. 3과 같이 고체, 즉, 플라즈마 처리된 알루미늄 핀, 위에 액체인 물방울을 떨어뜨리면 이 물방울은 액체, 고체, 그리고 기체(공기) 사이의 계면장력(Interfacial tension)들의 평형에 의해 고체면과 일정한 각을 이루게 되는데 이를 정적 접촉각이라 한다. 본 연구에서는 상용 정적 접촉각 측정 장비(Automatic Contact Angle Analyzer Processing System, 제작사 : ERMA, 모델명 : 360LCD/830)를 사용하여 시료 표면 위에 주사기로 0.002 ml의 물방울을 떨어뜨린 후 정지된 물방울과 핀 표면이 이루는 각도(Fig. 3에서 θ)를 측정하였다. 떨어진 물방울이 시간경과에 따른 증발로 인해 접촉각이 줄어드는 것을 방지하기 위해 물을 떨어뜨린 후 10초 이내로 측정하였다. 이때 물은 표준 백금 표면에 대해 표면장력이 72~73 mN/m인 2차 증류수를 사용하였으며, 시료로 인한 증류수의 오염을 방지하기 위해 매 회 증류수는 교체되었고, 시험은 20℃의 상온에서 진행되었다. 각 증발기의 각 측정 횟수별 정적 접촉각의 평균은 신뢰도 95%에서 표준편차가 1.5°이다.

2.4 동적 접촉각의 측정

Wilhelmy Plate Method의 원리^(9,10)를 이용한 측정장비(제작사 : KSV, 모델명 : sigma70)를 이용하여 동적 접촉각을 측정하였다. Fig. 4는 동적

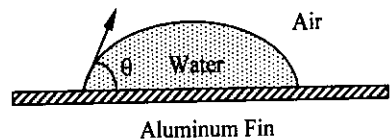


Fig. 3 Sessile water drop and its static contact angle on the surface of Aluminum fin.

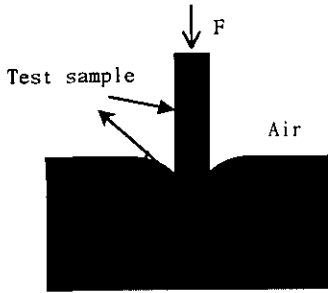


Fig. 4 Measurement of the dynamic contact angle of a test sample.

접촉각을 측정하는 원리를 설명하는 그림이다. 시료를 천천히 하강 혹은 상승시킬 때 시료에 작용하는 힘은 시료의 중력, 물에 들어간 부피만큼의 부력, 물의 표면장력에 의한 힘, 그리고 시료를 지지하는 힘으로 구별되어진다. 이들 힘이 균형을 이루게 되면 물과 일정한 곡선을 이루는 시료를 상승 혹은 하강시킨다. 이때 공기, 물, 그리고 시료 표면의 경계선에서 물의 곡선과 시료 표면이 이루는 각도를 동적 접촉각이라 한다.

Fig. 4에서 σ , θ , P , m , g , B_z , 그리고 F 는 각각 물의 표면장력, 물과 시료가 접촉하는 각도, 시료와 물이 접촉한 길이, 물의 질량, 중력가속도, 부력, 그리고 시료를 지지하는 힘을 말한다. 이것을 식으로 표현하면 아래의 식(1)과 같다.

$$(\sigma \cos \theta)P - mg + B_z = F \quad (1)$$

여기서, F 는 측정장비의 로드셀을 통해 측정되는 값이므로 위 식으로부터 미지수인 동적 접촉각, 즉 θ 값을 알 수 있게 된다. 시료를 상승시키거나 하강시킬 때 따라 θ 값은 달라지게 되는데, 본 연구에서는 시료의 하강시의 θ 값만 측정하고 상승시는 측정하지 않았다. 끝단부(edge)와 끝말림(burr)의 영향을 제거하기 위해 측정시료의 하단부 3mm, 상단 4mm는 측정하지 않고 중간 3mm 부위만 측정하였으며, 측정시 시료의 하강속도는 3mm/min로 하였다. 정적 접촉각의 측정과 마찬가지로 물은 표준 백금 표면에 대해 표면장력이 72~73 mN/m인 2차 증류수를 사용하였으며, 시료로 인한 증류수의 오염을 방지하기 위해 매회 증류수는 교체되었고, 시험은 20°C의 상온에서 진행되었다. 한편, 각 증발기의 각 측정횟수

별 동적 접촉각의 평균은 신뢰도 95%에서 표준편차가 0.9°이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응축 잔수량의 특성

Fig. 5는 3분 단위로 시간을 늘이면서 응축시험을 실시하여 측정한 증발기 단위면적당 응축에 의한 잔수량의 전형적인 형태를 보여주고 있다. 정적 접촉각이 75.8°(혹은 동적 접촉각 82.1°)인 경우의 동일조건에서의 두 차례 시험(run1과 run2)에서 증발기에서의 잔수량은 거의 같은 값을 보이고 있다. 잔수량은 정적 접촉각의 크기에 관계없이 초기에는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 한편, 잔수량이 포화되는 시간은 정적 접촉각의 크기에 따라 다른데, 정적 접촉각이 75.8°인 경우는 약 6~12분에서, 정적 접촉각이 92.1°인 경우에는 약 15~18분경에 포화되어 그 이후로는 시간의 증가에 따라 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 정적 접촉각이 커짐에 따라 포화되는 데 걸리는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 이는 표면특성이 다르면 초기 표면에서의 응축특성이 다르게 되고, 시험 전반에 걸쳐서도 표면특성에 따라 중력방향으로의 유동형태가 달라지기 때문으로 추정된다. 따라서, 본 시험에서는 충분히 포화되었을 때의 잔수량을 얻기 위해 30분 동안 시험을 진행한 후 잔수량을 측정하였다. 잔수량의 표준편차는 분산분석 결과 신뢰도

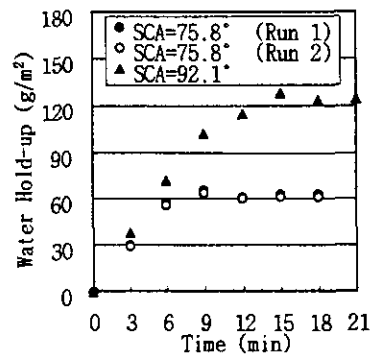


Fig. 5 Behavior of the water hold-up of heat exchangers having two different static contact angles according to the condensation time period.



(a) SCA=56.6° (b) SCA=79.4° (c) SCA=94.9°

Fig. 6 Flow patterns on the fin surfaces having different surface characteristics.

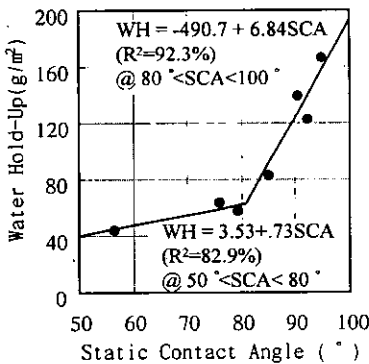
95%에서 1.0 g인 것으로 추정된다.

Fig. 6은 정적 접촉각이 56.6°, 79.4°, 그리고 94.9°인 경우, 핀의 표면에 물입자를 분사하여 완전히 포화되었을 때의 핀 표면에서의 유동형태를 보여주고 있다. 그림에서 보여지듯이 정적 접촉각이 작은 경우 물방울은 핀 상부에서는 아주 얇은 막으로 존재하고 잔수량의 대부분은 표면장력에 의해 핀의 하단부에만 매달리게 된다. 반면에 정적 접촉각이 큰 경우에는 핀의 모든 표면에 적상(Dropwise)의 물방울이 존재하게 되고 따라서 이러한 적상의 큰 물방울들에 의해 잔수량은 증가하게 된다고 판단된다. 이러한 물입자 분사에 의한 유동형상은 응축에 의한 유동형상과 거의 동일함을 보였다.

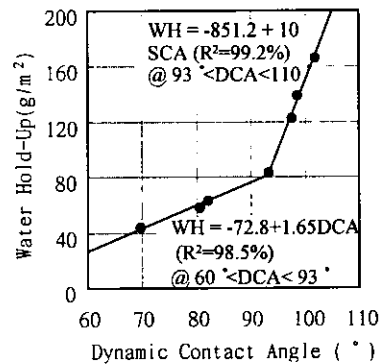
3.2 접촉각과 응축 잔수량의 관계

정적 접촉각 및 동적 접촉각과 잔수량의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에서와 같이 시험범위 내에서는 정적 혹은 동적 접촉각이 증가함에 따라 잔수량은 단순 증가함을 알 수 있는

데, 그림에서의 두 직선은 정적 접촉각과 잔수량의 관계를 보여주는 상관선이다. 정적 접촉각이 80° 이하일 때는 잔수량 증가의 기울기가 완만하나, 80° 이상일 때는 상당히 가파름을 보이고 있다. 이는 앞서 Fig. 6에서 보여지듯이 정적 접촉각 56.6°에서는 막상(Filmwise)으로 그리고 80° 부근에서는 막상과 적상이 혼재하고 그 이상의 각도에서는 적상의 물방울이 부착하게 되고 그 결과 잔수량에 있어서 정적 접촉각 80° 부근에서 물방울의 부착형상이 변화함에 따라 정적 접촉각의 증가에 따른 잔수량의 증가폭이 달라지게 되기 때문이라고 사려된다. 동적 접촉각과 잔수량의 관계도 Fig. 7(b)에서 보여지듯이, 정적 접촉각과 유사한 경향을 보인다. 그림에 주어진 식들과 같이 응축에 의한 잔수량은 정적 접촉각 혹은 동적 접촉각에 의해 예측되어질 수 있다. 하지만 응축에 의한 잔수량은 정적 혹은 동적 접촉각으로 표현되는 열교환기의 표면성질뿐 아니라 열교환기 형상, 즉, 핀 피치, 핀 끝단부 모양 등에도 영향을 받으므로 주어진 식의 일반화에는 보다 광범위한 열교환기에 대한 실험 및 검토가 있어



(a) The static contact angle



(b) The dynamic contact angle

Fig. 7 Effect of the contact angles and on the water hold-up.

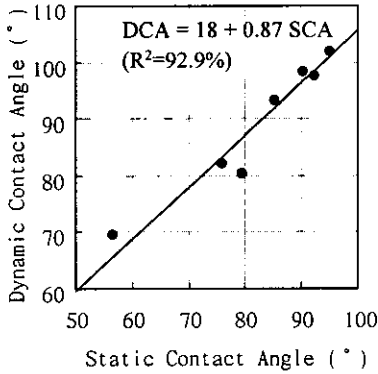


Fig. 8 The relationship between the static contact angle and dynamic contact angle.

야 한다고 판단되어진다.

정적 접촉각과 동적 접촉각은 Fig. 8에서와 같이 선형적인 관계를 보이는데 신뢰도 95%에서 상관계수, R^2 가 0.93의 높은 상관관계를 가진다. 그러나 이러한 상관식은 정적 물 접촉각이 0° 에 접근할 경우 동적 물 접촉각이 18° 가 되어 물리적으로 불합리한 면을 가지고 있다. 그러므로 이 상관식은 본 연구의 시험범위인 정적 접촉각 50° 에서 100° 까지만 유효할 것으로 판단된다.

4. 결 론

핀-관 열교환기에서 표면특성, 즉 정적 접촉각이나 동적 접촉각이 다를 때 응축에 의한 잔수량이 달라짐을 보였다. 이는 표면특성을 제어함으로써 열교환기의 응축특성, 나아가서는 압력강하나, 열전달특성을 제어할 수 있음을 의미하는 것으로 본 연구의 시험범위인 정적 접촉각 $50^\circ \sim 100^\circ$ 의 범위에서 다음의 몇 가지로 결론지을 수 있다.

(1) 정적 접촉각 혹은 동적 접촉각의 증가에 따라 잔수량은 증가하였다.

(2) 정적 접촉각이 80° 이하일 때의 핀 표면에서는 막상으로 물방울이 부착하고 따라서 정적 접촉각의 증가에 따라 잔수량 증가의 기울기는 완만하나, 80° 이상일 때는 적상의 비교적 큰 물방울이 표면에 부착하게 되고 따라서 잔수량은 정적 접촉각의 증가에 따라 상당히 가파른 증가를 보였다.

(3) 정적 물 접촉각과 동적 물 접촉각은 선형

비례의 관계를 가지고 있다.

참고문헌

1. Shin, J. M., Kim, J. B., Kim, C. H. and Ha, S. C., 2000, A Study of Water Hold-up of Two Surfaces Having Different Hydro-Characteristics, Proceedings of the 9th International Symposium on Flow Visualization, Edinburgh, UK, No. 413, pp. 413.1-413.8.
2. Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P. and Dreitsler, G. A., 1998, Condensate Drainage Characteristics of Plate Fin-and-Tube Heat Exchanger, Proceedings of the International Conference on Heat Exchangers for Sustainable Development, Lisbon, Portugal, pp. 423-430.
3. Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P. and Dreitsler, G. A., 1999, Hydraulic Performance of Wet Fin-and-Tube Heat Exchanger for Various Wettability Surfaces, Proceedings of Compact Heat Exchangers and Enhancement of Technology for the Process Industries, Banff, Canada, pp. 463-470.
4. Seki, N., Fukusako, S., Matsuo, K. and Uemura, S., 1983, Incipient Phenomena of Frost Formation, JSME(B), Vol. 50, No. 451, pp. 825-830 (In Japanese).
5. Ostin, R. and Johannesson, G., 1991, A Polymetric Approach to Counteract Frosting in Air-to-air Heat Exchanger, Heat Recovery System & CHP, Vol. 11, No. 5, pp. 415-421.
6. O'Neal, D. L., Bryant, J. A. and Parker, B., 1997, Impact of Hydrophobic Coating on the Frost Buildup and Defrost Performance of a Heat Pump Evaporator, 45th Pji International Seminar, pp. 181-187.
7. Ryu, S. G. and Lee, K. S., 1999, A Study on the Behavior of Frost Formation according to Surface Characteristics in the Fin-Tube Heat Exchanger, Journal of HVAC&R, Vol. 11, No. 3, pp. 377-383.
8. Koh, S., Han, S., Song, S., Choi, W. and

- Jung, H., 1995, Improving Wettability of Polycarbonate (PC) and Adhesion with Aluminum by Ar^+ Ion Irradiation, Journal of Material Research, Vol. 10, No. 6, p. 2390.
9. Berg, John C., 1993, Wettability, Marcel Dekker Inc., New York, USA, pp. 169-172.
10. Stenius, P., 1993, Theory of the Ring and Wilhelmy Plate Method, Laboratory of Forest Products Chemistry, Helsinki University of Technology.