

마이크로 표면주름 형상에 따른 열전달 촉진효과 기초연구

Fundamental Study on Heat Transfer Enhancement Effect of Microscale Surface Wrinkles

박희진(Hee-Jin Park)¹, 박상후(Sang-Hu Park)^{2*}

¹부산대학교 기계공학부 대학원, ²부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공 연구소

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

²School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National, Pusan 609-735, Korea

(Received June 19, 2014; revision received August 5, 2014; Accepted: August 11, 2014)

Abstract We evaluated heat transfer characteristics of microscale wrinkles using a CFD (computational fluid dynamics) analysis. In order to verify the heat transfer effect of wrinkles having various shapes, we introduce wrinkling processes to generate few different shapes of wrinkles such as macroscale (200~400 μm width), microscale (10~30 μm width), and hierarchical (microscale on macroscale wrinkle) wrinkles, using repetitive-dividing-volume (RDV) method for single-shape of wrinkles and connected method of UV-weakly polymerization with thermal curing for hierarchical structure of wrinkles. The analysis results of simplified CFD model showed that heat flux on heated plate was changed by the shape of wrinkles on the plate. The increase in heat flux of about 2.6 times was achieved in the case where hierarchical wrinkle structure was used.

Key words Surface wrinkles(표면주름), Heat transfer enhancement(열전달 촉진기술), CFD(전산유체역학), Hierarchical structure (이중구조)

* Corresponding author, E-mail: sanghu@pusan.ac.kr

기호설명

C_p : specific heat [J/kg · K]
 μ : viscosity coefficient [kgf/m · s]
 ρ : density [kg/m³]
 v_i : inlet velocity [m/s]
 T_i : inlet temperature of air [K]
 T_w : hot wall temperature [K]
 P_o : outlet relative pressure [atm]
 Q_y : heat flow rate [W]
 q_y : heat flux [W/m²]

1. 서 론

미세 표면주름이나 구조물은 자연계의 다양한 동식물을 통하여 쉽게 찾아볼 수 있으며 이러한 구조물을 통하여 여러 가지 기능을 발휘하게 된다.⁽¹⁻³⁾ 예를 들면, 연꽃잎의 표면에 마이크로 돌기형태가 소수성 특성을 가지게 하여 표면의 젖음을 방지한다든지 상어의 표피 구조가 물의 저항을 저감시킨다는 것은 잘 알려진 사실들이다. 또한 사람의 손바닥 지문과 같은 주름구조도

물속의 물체를 잘 잡기 위한 것으로 보고되었다.⁽⁴⁾ 이와 같이 정형화되고 반복적인 형태는 아니지만 자연계의 주름구조를 제작하여 공학적으로 응용하고자 하는 연구는 최근 다양하게 진행되어 왔다.⁽⁵⁻¹⁰⁾

일반적으로 미세 패턴구조는 MEMS 공정을 통하여 제작할 수 있지만 대면적화가 어렵고 또한 고가의 장비들이나 시설이 필요한 단점이 있다. 따라서 MEMS 공정이 아닌 기계적인 잔류응력이나 열응력 등을 이용하여 주름을 제작하는 방법으로 대면적화가 가능하며 일반적으로 공정비용도 저렴한 편이다. Ding 등⁽⁵⁾은 구리 격자판을 덮은 표면에 플라즈마 (O₂-plasma) 공정을 이용하여 부분적인 주름 패턴 형태를 제작하였고, Lin 등⁽⁶⁾은 표면 인장에 의한 변형률 차이를 이용하여 주름 패턴을 생성하였다. Guvendiren 등⁽⁷⁾은 고분자 필름에 수분흡수를 통한 팽창과 수축을 이용하여 주름을 제작하는 공정을 제안하였다. 이외에도 급속가열, 이온 빔 등을 이용한 표면개질로 응력 불균일을 이용한 주름제작, 반복적축공정을 이용한 연구가 보고되었다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

현재까지 보고된 주름관련 연구는 주로 제작기술에

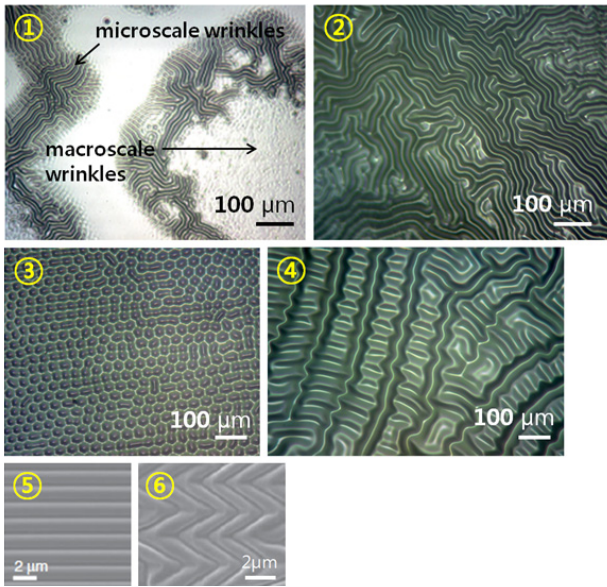


Fig. 1 Various shape of wrinkles; ①hierarchy wrinkles (microscale on macroscale wrinkles), ②microscale random wrinkles, ③dotted shape, ④directional wrinkles, ⑤, ⑥fully directional wrinkles.⁽¹¹⁾

대한 연구가 많으며 실제 응용에 대한 연구는 별로 없는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 실제 제작이 가능한 다양한 형태와 크기의 주름구조를 이용하여 열전달 촉진에 어느 정도 효과가 있는지를 해석적으로 검토해 보고자 한다. 참고로 Fig. 1의 ①~④번 주름구조는 본 연구진이 제작한 것이며 ⑤, ⑥번 주름구조는 Yang 등이 제안한 방법으로 주름방향을 제어하여 일정한 방향성을 가지도록 제작한 것이다.⁽¹¹⁾

2. 주름구조의 열전달 특성분석

2.1 해석모델 및 조건

일정한 온도를 가진 평판에 다양한 형태의 주름구조를 모델링하여 열 및 유체유동 해석을 수행하고자 한다. 해석은 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 해석 프로그램인 ANSYS CFX-13을 이용하였다.⁽¹²⁾ 해석모델은 주름이 없는 판과 세 가지 형태의 주름이 있는 판을 모델링하였다. 각 해석모델에서 해의 정밀도를 일정하게 가져가기 위하여 요소(element) 수를 거의 동일하게 모델링하였으며 요소 수는 250만 개이고 절점(node) 수는 약 10만 개 수준이다. 요소 수의 영향을 알아보기 위하여 요소 수를 주름이 없는 Case-I에 대하여 40만, 80만, 120만, 250만, 350만 개로

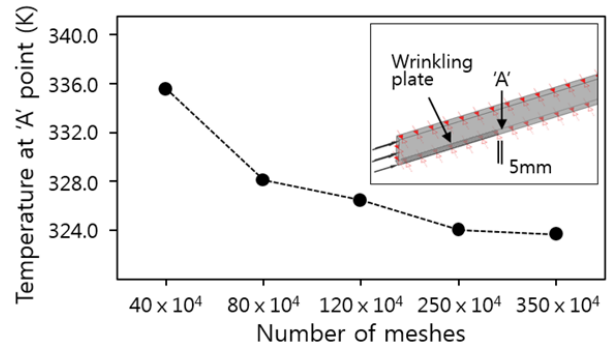


Fig. 2 Temperature variation depending on the number of meshes.

각각 나누어서 CFD 해석을 수행하여 주름평판이 끝나는 부분에서 일정거리(여기서는 약 5 mm) 떨어진 곳의 온도를 비교해 본 결과, 해의 수렴 조건인 250만 개를 선택하였다(Fig. 2 참조).

유동장의 전체 크기는 Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 주름주변의 유동거동을 고려하기 위하여 미세한 주름 높이에 비하여 1,000배 이상 크게 전체 유동장 높이를 정하고 그것에 맞추어서 적절히 폭과 길이를 설정하여 10 × 650 × 40(W × D × H) mm로 하였다. 각 모델의 주름형상은 전체적으로 사인파(sine wave) 형태를 가지며 Case-I은 폭(wavelength) 580 μm, 높이 18 μm를 가진다. Case-II의 경우는 폭 50 μm, 높이 18 μm, Case-III는 Case-I 과 II를 결합한 형태와 유사하며 높이 18 μm에 상대적으로 큰 폭을 가진 주름위에 작은 폭을 가지는 주름이 부분적으로 생성한 이중구조를 가지도록 모델링하였다. 평판의 크기는 165 mm로 비교를 위해서 모든 경우에 동일하게 하였다(Fig. 3(b) 참조).

표면적을 계산해 보면, 주름이 없는 평판이 3,000 mm²이고, Case-I, II, III가 각각 3020.9, 3033.8, 3033.5 mm²로 나타나서 평판에 비하여 Case-I과 Case-II가 각각 0.69%, 1.12% 표면적이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 형상과 크기의 주름구조에 대하여 열전달 촉진에 어떤 효과가 있는지 알아보는 것은 실제 제작이 가능하기 때문에 의미가 있다고 판단된다. 다만 주름구조 제작특성상 미세한 주름의 형상을 정밀하게 제어하기 어렵기 때문에 형상 설계변수에 대한 최적화 해석은 큰 의미가 없다고 판단된다.

해석을 위한 경계조건으로는 Fig. 3(a)와 같이 해석 모델 입구에서 25℃ 공기가 1 m/s의 일정한 속도로 들어와서 100℃ 온도를 가진 주름구조 판을 통과하도록 하였다. 해석모델의 측면부는 대칭조건을 주어서 판재가 연속성을 갖는 것으로 가정하였으며 해석에 필요한 난류모델은 k-ε 모델을 사용하였다.⁽¹³⁾ 해석조건과 물성에 대한 자세한 것은 Table 1에 나타내었다.

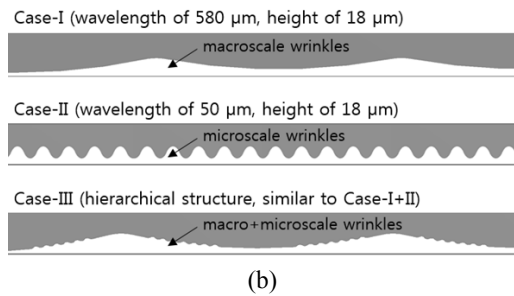
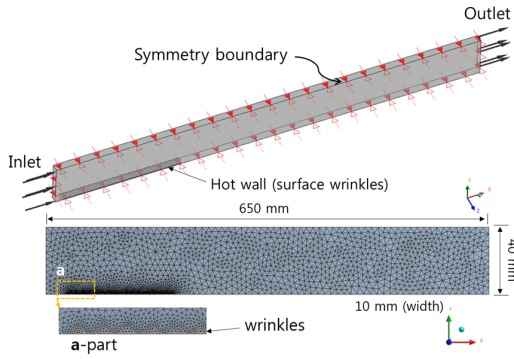


Fig. 3 (a) CFD analysis model and boundary conditions, (b) three different wrinkle-models; Case-I, II, and III.

Table 1 Summary of analysis conditions

List	Properties	
Air	ρ	1.185 kg/m ³
	Cp	1,005.4 J/kg · K
	μ	1.83e-05 kgf/m · s
Boundary conditions	v_i	1.2 m/s
	T_i	298.15 K
	T_w	375.15 K
	P_o	1 atm
Turbulence model	k-ε model	

2.2 표면 열전달 특성평가 지표

주름구조에 의한 표면 열전달 특성을 평가하기 위해서 일반적으로 열유동율(heat flow rate)과 열유속(heat flux), 온도변화 지표를 활용한다. 열유동율(Q_y)은 식(1)과 같이 표현된다.

$$Q_y = -kA \frac{dT}{dy} [W] \quad (1)$$

여기서 A 는 표면적, k 는 열전도계수, T 는 온도를 나타낸다. 열유동율을 단위면적으로 나누게 되면 단위면적

당 전달되는 열을 의미하게 되어 식(2)와 같이 열유속(q_y)으로 표현된다.

$$q_y = \frac{Q_y}{A} = -k \frac{dT}{dy} [W/m^2] \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서 y 방향은 주름이 있는 표면의 수직 방향을 나타낸 것이다. 위에서 정의한 지표를 통하여 열유동 해석에서 주름표면의 열전달 특성에 대한 영향을 확인할 수 있다.

3. 해석결과 및 토의

주름이 없는 평판과 3가지 주름구조에 대하여 Table 1과 같은 조건으로 해석한 결과 Fig. 4(a)~Fig. 4(d)와 같이 온도분포가 나타났다.

온도의 분포를 보면 주름구조가 없는 평판인 경우와 주름구조를 사용하였을 때의 분포가 확연한 차이를 보임을 알 수 있다. 주름구조가 없는 경우 (Fig. 4(a) 참조)에는 나머지 경우와 비교하여 유동에 의해 평판 표면온도가 잘 유지가 되고 유동에 의해 공기층으로 전달되는 열량도 적음을 알 수 있다. 또한 주름구조가 있는 경우에 Case-I, II, III순서로 평판의 열이 유동층에 잘 전달되어 멀리 퍼져가는 현상을 볼 수 있다. 따라서 유체유동이 주름표면에 의해 영향을 받고 있으며 Case-III과 같이 큰 주름(macroscale wrinkle)과 작은 주름(microscale wrinkle)을 결합한 경우 표면적 증가의 효과와 함께 주름주변에서 상하유속 구배 차이에 의하여 와류(vortex)가 발생할 수 있어 열전달 촉진현상에 의한 열방출 효과가 높음을 알 수 있다.^(14,15)

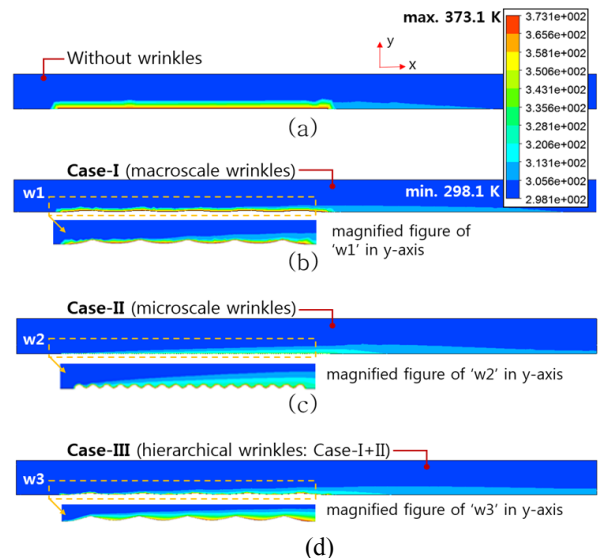


Fig. 4 Temperature distribution of air; (a) in case of without wrinkle surface, (b) Case-I, (c) Case-II, and (d) Case-III.

유동장이 끝나는 시점에서 132 mm 떨어진 곳에서 유동장의 단면(y-z 평면)에 따라 평균온도를 Fig. 5와

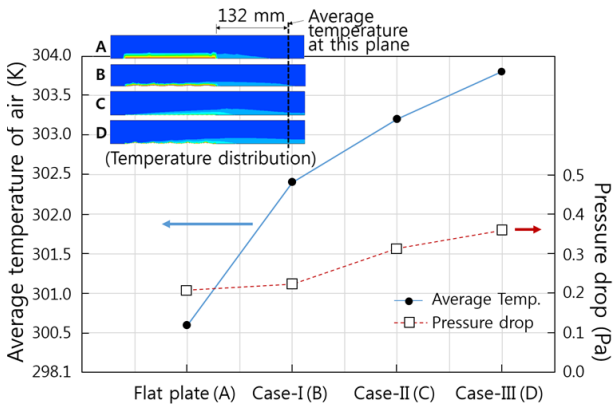


Fig. 5 Average temperature and pressure drop of each case (flat plate, Case-I, II, III).

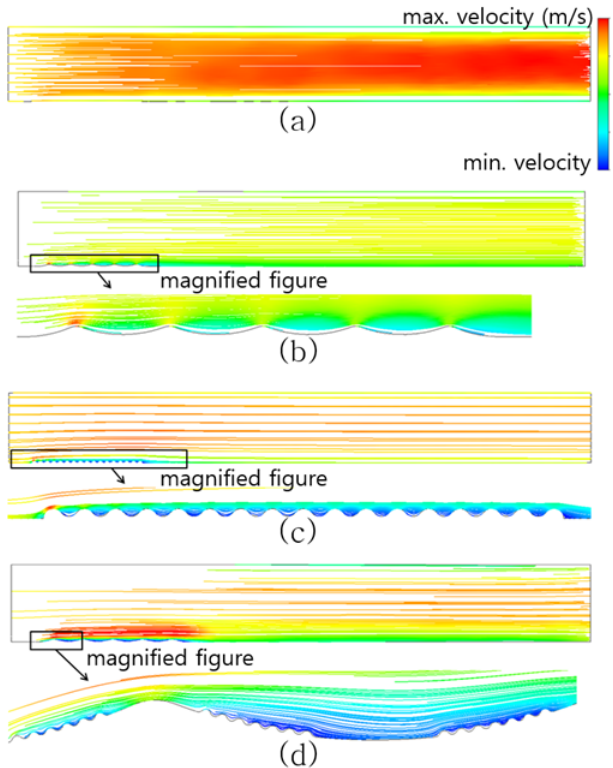


Fig. 6 Velocity distribution of air flow in case of (a) plate without wrinkles (max. velocity : 1.32 m/s, min. velocity : 0.81 m/s), (b) Case-I (max. velocity : 1.67 m/s, min. velocity : 0.38 m/s), (c) Case-II (max. velocity : 1.50 m/s, min. velocity : 0.063 m/s), and (d) Case-III (max. velocity : 1.39 m/s, min. velocity : 0.00009 m/s).

같이 비교해 보면 주름이 없는 평판의 경우 300.1 K로 계산이 되었으며, 주름형태에 따른 Case-I, II, III인 경우 각각 301.9, 302.7, 303.3 K로 Case-III가 가장 높은 것으로 나타났으며 초기 공기 유입온도와 비교해 보면 주름이 없는 평판의 경우 1.95°C, Case-III가 5.18°C의 온도 차이를 보였다. 따라서 주름구조에 의한 열전달 효율이 평판에 비하여 2.6배 더 높아짐을 알 수 있다.

주름구조에 의한 압력손실을 살펴보면, 평균 압력강하가 평판일 때 약 0.21 Pa이며 주름구조가 있는 Case-I, II, III로 갈수록 각각 0.22, 0.31, 0.37 Pa로 증가함을 알 수 있다. 평판 구조와 비교하여 최대 1.7배 정도 압력손실량이 발생된다. 이것은 앞서 기술한 바와 같이 표면주름에 의해 국부적으로 와류가 발생하여 생기는 문제인데 유동층의 평균 온도증가에 비하여 적은 값이기 때문에 실제 적용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 6(a)-Fig. 6(d)의 결과는 각 경우에 속도분포를 나타낸 것이다. 주름이 없는 평판의 경우 평판에서 멀어질수록 유속이 빨라지는 전형적인 경계층 유동을 나타내고 있으며 Case-I, II의 경우(Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)) 주름과 공기가 처음 맞는 부분에서 최대의 유속을 나타내며 전체적으로 주름부분 바로 위에서 빠른 유속을 나타내고 있다. 또한 Case-II와 III 해석결과(Fig. 6(c)와 6(d))에 나타난 것처럼 주름부분에서는 와류가 발생하여 유속이 느려짐을 알 수 있다. 그러나 이러한 소용돌이에 의해 열전달이 촉진이 되며, 특히 Case-III의 경우 작은 주름만 있는 Case-II에 비하여 표면적은 0.01% 미소하게 작음에도 불구하고 이중구조에 의해 속도 구배가 증가하게 되어 결과적으로 열전달 효과가 높아지는 것으로 사료된다. 따라서 이중 주름구조를 가지는 Case-III가 열전달 촉진에 효과적임을 알 수 있다.

주름 구조를 가진 평판에서 열유속량을 비교해 보면 Fig. 7(a)-Fig. 7(c)와 같다. 상대적으로 낮은 25°C의 유체가 100°C 열원이 시작되는 평판 위로 지나갈 때 시작점 부근에서 온도 차이가 75°C로 가장 크기 때문에 열유속 값이 높은 것으로 사료된다. 특히 주름과 맞닿는 부분부터 국부적인 유속의 증가로 인하여 급격하게 열유속량도 같이 증가함을 알 수 있다. 따라서 표면형상을 조절하여 국부적인 열전달량을 증가시키는 것이 가능함을 보였다.

평판인 경우 최대 열유속이 633.5 W/m²로 나타났으며, 주름구조가 있는 Case-I, II, III의 경우 최대 열유속이 각각 877.2, 1,751.0, 2,633.0 W/m²로 나타났다. 이중 주름구조를 가지는 Case-III에서 평판의 경우에 비하여 약 4배 이상으로 높은 국부적 열유속 크기를 나타낸다. 이것은 Fig. 7(c)에 나타난 것처럼 이중 주름구조로 인해 국부적인 표면적이 넓어지고 또한 유속의 변화가 급격하게 발생하여 열전달 효율이 증대되기 때문에 나타난 현상으로 분석된다.

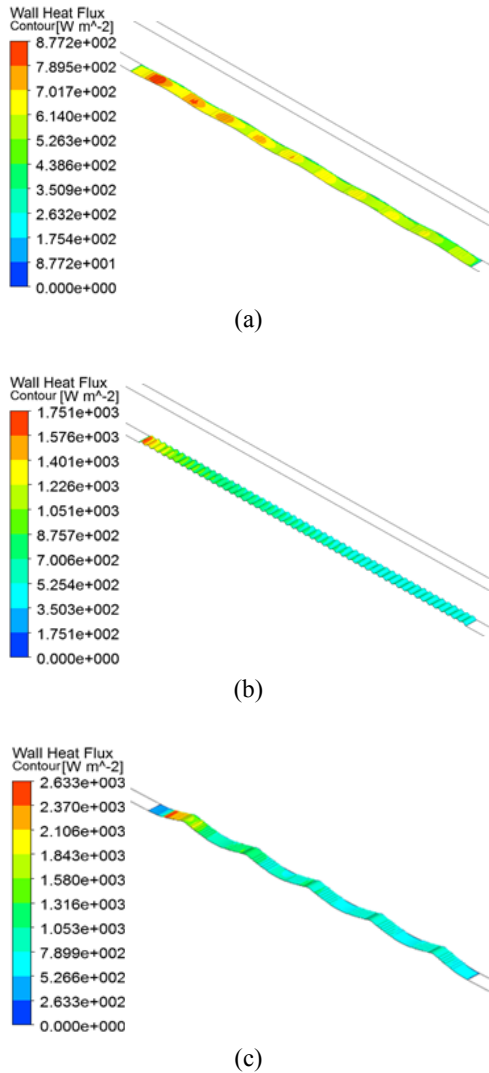


Fig. 7 Heat flux distribution in case of (a) macroscale surface wrinkles(Case-I), (b) microscale surface wrinkles(Case-II), and (c) hierarchical surface wrinkles(Case-III).

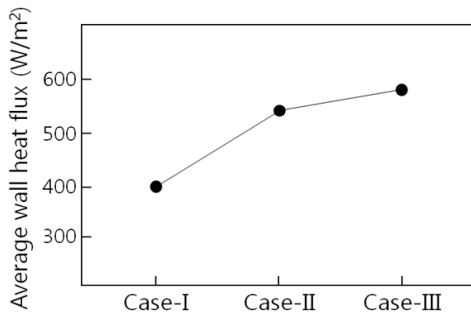


Fig. 8 Comparison of average heat flux on wall among three cases(Case-I, II, III).

그러나 열유속의 분포를 열원이 있는 전체 평판을 따라 평균값을 구해 보면 Case-I, II, III가 각각 400, 545, 582 W/m²로 나타나서 이중구조 주름인 Case-III의 경우 Case-II에 비하여 단면적은 거의 동일하지만 평균 열유속량이 6.7% 증가함을 알 수 있다(Fig. 8 참조).

4. 결 론

본 연구는 열전달 촉진을 위한 표면의 주름구조를 분석하였다. 표면구조 특성에 대한 많은 연구는 초소수성 특성과 같은 표면개질에 관한 것이며 열전달 촉진에 대한 연구는 거의 없는 편이다. 특히 저비용으로 대면적화가 가능한 주름구조를 이용한 열전달 촉진기술은 실용화가 가능한 기술이며 세 가지 주름형상을 이용한 열전달 특성 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 주름이 없는 평판과 비교할 때 주름이 있는 모든 경우에 표면적의 증가와 주름구조 부근에서 와류 발생과 유속증가로 인하여 열전달 효과가 증가됨을 알 수 있었다.
- (2) 주름의 형태에 따라 Case-I, II, III으로 나누어서 특성을 비교한 결과 이중 주름구조를 가지는 Case-III가 가장 열전달 효과가 뛰어남을 알 수 있으며, 주름이 없는 평판과 비교할 때 유동 공기의 온도 상승치가 2.6배에 달하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 주름구조에 의한 압력강하는 평판일 때와 비교해서 최대 1.7배 증가함을 알 수 있지만 주어진 모델에서 수치적으로 -0.37 Pa 정도 발생하여 큰 값은 아닌 것으로 판단된다.
- (4) 이러한 주름구조를 이용한 실질적인 적용을 위해서 향후 대면적 제작기술을 확보하고 실험적으로 성능평가가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)지원에 의하여 수행되었음을 알려드립니다.

References

1. Persson, B. N. J., 2007, Wet adhesion with application to tree frog adhesive toe pads and tires, *Journal of Physics : Condensed Matter*, Vol. 19, No. 37, pp. 1-16.
2. Genzer, J. and Groenewol, J., 2006, Soft matter with hard skin : From skin wrinkles to templating and material characterization, *Soft Matter*, Vol. 2, No. 4, pp. 310-323.

3. Chung, J. Y., Nolte, A. J., and Stafford, C. M., 2011, Surface wrinkling : a versatile platform for measuring thin-film properties, *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 3, pp. 349-368.
4. Kareklas, K., Nettle, D., and Smulders, T. V., 2013, Water-induced finger wrinkles improve handling of wet objects, *Biology Letters*, Vol. 9, Article No. 20120999.
5. Ding, W., Yang, Y., Zhao, Y., Jiang, S., Cao, Y., and Lu, C., 2013, Well-defined orthogonal surface wrinkles directed by the wrinkled boundary, *Soft Matter*, Vol. 9, No. 14, pp. 3720-3726.
6. Lin, P. C. and Yang, S., 2009, Mechanically switchable wetting on wrinkled elastomers with dual-scale roughness, *Soft Matter*, Vol. 5, No. 5, pp. 1011-1018.
7. Guvendiren, M., Yang, S., and Burdick, J. A., 2009, Swelling-induced surface patterns in hydrogels with gradient crosslinking density, *Advanced Functional Materials*, Vol. 19, No. 19, pp. 3038-3045.
8. Kim, S. J., Park, H. J., Lee, J. C., Park, S. H., Ireland, P., and Park, S. H., 2013, A simple method to generate hierarchical nanoscale structures on microwrinkles for hydrophobic applications, *Materials Letters*, Vol. 105, pp. 50-53.
9. Park, S. H., Park, H. J., Kim, S. J., and Ireland, P., 2013, Generation of periodic surface wrinkles using a single layer resin by a repetitive dividing volume(RDV) technique, *Microelectronic Engineering*, Vol. 106, pp. 13-20.
10. Park, S. H., Kim, S. J., Park, H. J., Lee, J. C., and Shin, B. S., 2013, Fabrication of high aspect ratio microscale polymer hairs having surface wrinkles, *Polymer Korea*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-4.
11. Yang, S., Khare, K., and Lin, P. C., 2010, Harnessing surface wrinkle patterns in soft matter, *Advanced Functional Materials*, Vol. 20, No. 16, pp. 2550-2564.
12. ANSYS, 2011, ANSYS CFX(release 13) User's manual, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, U.S.A.
13. Yang, Z. and Shin, T. H., 1993, New time scale based k-epsilon model for near-wall turbulence, *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 7, pp. 1191-1198.
14. Ho, C. M. and Tai, Y. C., 1998, Micro-electro-mechanical systems(MEMS) and fluid flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 579-612.
15. Hwang, S. D., Kwon, H. G., and Cho, H. H., 2010, Local heat transfer and thermal performance on periodically dimple-protrusion patterned walls for compact heat exchangers, *Energy*, Vol. 35, No. 12, pp. 5357-5364.