

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.1.069>ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

3D 프린터 마이크로채널 제작 및 액상 물의 압력강하 특성에 관한 연구

박재현 · 박희성^{*†}

* 창원대학교 대학원 기계공학과

Liquid Flow Characteristics in 3D-Printed Rectangular Microchannel

Jaehyun Park^{*} and Heesung Park^{*†}^{*} Graduate school of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.

(Received August 4, 2016 ; Revised September 6, 2016 ; Accepted September 27, 2016)

Key Words: 3D Printer(3D 프린터), Microchannel(마이크로채널), Pressure Drop(압력강하), Friction Factor(마찰계수), Water Flow(액체 물 유동), Laminar Flow(층류유동)

초록: 마이크로채널은 단위체적당 표면적비가 높기 때문에 컴퓨터 마이크로 프로세서 냉각, 정밀 화학분석 및 바이오 분야의 응용이 다양하게 적용 될 수 있어 많은 연구가 진행 중이다. 본 연구에서는 3D 프린터를 이용하여 사각 마이크로채널을 제작하였고, 실험에서 마이크로채널을 통과하는 액상 물은 탈이온수를 사용하여 유량변화에 대한 압력강하를 측정하였다. 마이크로채널의 크기는 161 μm 에서 664 μm 로 변화시켜 제작하였으며, 유동의 레이놀즈 수는 $16 < \text{Re} < 1000$ 의 범위에서 압력변화를 측정하였다. 마이크로채널의 단면을 절단한 후 전자현미경으로 관찰한 결과 형상이 직사각형의 형태에 매우 근접한 것을 볼 수 있었다. 또한 유체유동의 특성은 전통적인 유체역학의 이론과의 차이를 나타내었으나 최근의 마이크로채널 유동과 연관된 연구와는 유사하게 측정되었다. 본 연구결과 3D프린터를 이용한 사각 마이크로채널의 제작과 이를 유동특성 실험에 적용 가능하다.

Abstract: The validity of friction factor theory, based upon conventional-sized passages for microchannel flows, is an active area of research. The high surface to volume ratio of a microchannel offers many advantages over macroscale devices and processes. This study focused on the laminar flow ($16 < \text{Re} < 1000$) within rectangular microchannel. The hydraulic diameter was from 161 μm to 664 μm for single-phase liquid flow. A controllable syringe pump was used to provide flow while a differential pressure transducer was used to record the pressure drop. These results demonstrated that a 3D printer can drastically simplify custom microchannel fabrication and still support complex features, which are typically only accessible with advanced fabrication techniques.

1. 서론

마이크로 스케일 유동 기술은 유동센서, 펌프, 밸브, 박막코팅, 열교환기,⁽¹⁾ 연소기, 연료 프로세서 및 생화학 분석 기기⁽²⁾들의 개발에 집중적으로 진행되고 있다. 특히 마이크로채널의 주요 특성인 높은 면적-부피비(high surface to volume ratio)를 고려하여 유체의 이동, 혼합⁽³⁾ 및 열전달 특성⁽⁴⁻¹¹⁾을

향상시키는 기초연구도 동시에 진행되고 있다. 마이크로채널 내에서 흐르는 유동과 압력강하의 특성, 그리고 마찰계수에 대한 기존 연구자들의 연구⁽¹²⁻¹⁷⁾를 보면 Wu와 Little⁽¹⁸⁾은 질소를 사용하여 폭 130~300 μm , 높이 30~60 μm 의 사다리꼴 마이크로채널 내에서의 압력강하 특성에 관한 실험결과 마찰계수가 이론적인 계산 값에 비해 3배에서 5배가 크게 나타나고 유동천이 레이놀즈 수 400부근에서 나타난다고 하였다. 실험을 위한 마이크로채널의 제작은 주로 유리미세가공,⁽¹⁹⁾ 실리콘 금속 박판을 이용한 메탈포밍기술 등⁽²⁰⁾이 적용되고 있

† Corresponding Author, heesungpark@changwon.ac.kr
© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

으나 공정 단가절감 및 대량생산에는 여전히 많은 연구가 필요한 실정이다. 3D프린터를 이용한 마이크로채널을 제작은 기존의 제작공정단가 및 대량 생산성뿐만 아니라 형상 자유도를 크게 향상시킬 수 있을 것이라고 기대된다.^(21,22) 따라서 본 연구에서는 3D 프린터로 제작된 마이크로채널의 유동 특성을 실험적으로 고찰하고 형상정밀도와 적용성을 분석하였다.

2. 이론

3D프린터로 제작되어진 마이크로채널의 개략도는 Fig. 1에 제시하였다. 마이크로채널의 치수는 채널의 너비(D_c), 채널의 깊이(D_d), 채널의 길이(L)로 나타내었다. 마이크로채널에서의 유동현상은 거시적인 유동현상과 상당히 다른 양상을 보인다. 마이크로 스케일 환경에서는 부피 대 표면적의 비가 커짐에 따라 관성력은 작으며 마찰, 점성효과와 정전기력 등이 유동을 지배하게 된다고 알려져 있다. 그렇지만 현재까지 알려진 연구결과에서는 정량적, 정성적인 측면에서 통일된 이론 또는 실험결과가 도출된바 없으므로 기존의 전통적인 유체역학 이론을 기반으로 수식을 전개하였다. 마이크로채널 단상 층류유동에 관한 마찰계수(C_f)는 식 (1)으로 정의되며, 벽에서 발생하는 유체의 전단응력에 의해 마이크로 유동 마찰이 발생한다.

$$C_f = \frac{(\Delta P/L)D_h}{2\rho V^2} \quad (1)$$

$$D_h = \frac{2D_d D_c}{D_d + D_c} \quad (2)$$

여기서, ΔP 는 채널 사이의 압력강하량을 나타내고 있고, 식 (2)에서 D_h 는 수력학적 직경(hydraulic diameter)를 나타내고 있다. ρ 와 V 는 각각 유체의 밀도와 유체의 속도이다. 완전발달 층류유동에서 Poiseuille 수는 채널의 중형비 $\alpha = D_c / D_d$ ^(23,24)로 나타난다. 식 (3)에서 G 는 기하학적 형상 변수로 Bejan에 의해 정의되었다.^(25,26)

$$C_f Re = 4.7 + 19.64G \quad (3)$$

$$G = \frac{\alpha^2 + 1}{(\alpha + 1)^2} \quad (4)$$

마이크로채널 유동 분석에 있어서 채널의 짧은 길이 때문에 유체 역학적 유동 흐름에서 형상계수는 매우 중요한 인자이다.

$$C^* = \frac{C_{f-experim ent}}{C_{f-theory}} \quad (5)$$

마이크로채널에서 마찰계수는 이론값과 상이한 경우가 많다. 그 차이를 표현하기 위해 $fRe=C$ 인 상수값을 비교하는 C^* 를 정의하여 이론값으로부터의 편차를 비교한다.

3. 실험

3.1 3D 프린터를 이용한 마이크로채널 제작

본 연구에서 사용된 3D 프린터의 제원은 Table 1에 제시하였고, DLP(Digital Light Processing)방식⁽²⁷⁾을 채택하여 사용하였다. 이 방식은 아크릴경화수지 70%와 에폭시 30%가 포함되어있는 액체 상태의 광경화성 수지에 빔 프로젝트를 사용하여 조형하고자 하는 모양의 빛을 투사하여 수지를 경화시키는 방식이다. DLP방식의 가장 큰 장점은 정밀도와 표면조도가 우수하다는 점이다. 또한 빔 프로젝트로 빛을 투사하므로 면 단위 조형이 되어 작업속도가 균일하고 비교적 빠른 제작이 가능하다. 3D 프린터로 제작 가능한 크기는 43 mm×27 mm×180 mm이며, 평면 방향의 제작가능 최소 단위는 56 μ m이다. 또한 제작은 시간당 3 cm의 속도로 가능하다. 직사각형 마이크로채널을 제작하여 형상 정밀도를 측정하였다. Fig. 2는 본 연구에서 3D 프린터로 제작한 마이크로채널이다. 유동 실험을 위한 마이크로채널의 외부형상 정밀도는 매우 우수한 것을 볼 수 있으며 내부에 설계된 채널이 형성된 것을 볼 수 있다. 실험 완료 후 마이크로채널의 단면을 절단하여 저전압주사전자현미경(Low voltage scanning electron microscope, Merlin compact/ 0.8nm @ 15kV)을 사용하여 채널의 단면을 관찰 하였다.

Table 1 3D-printer specification (unit mm)

Build size	43(X), 27(Y), 180(Z)
X,Y-axis resolution	0.056
Z-axis resolution	0.005
Dimension	208(X), 205(Y), 335(Z),

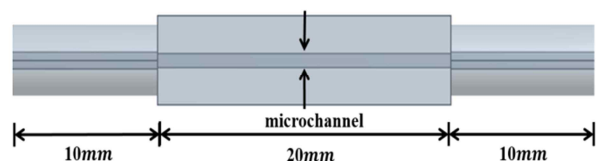


Fig. 1 Dimension of the designed microchannel

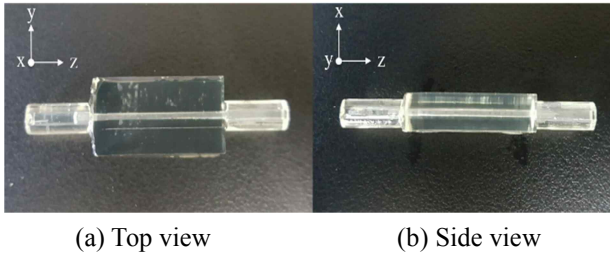


Fig. 2 3D printed microchannel manufactured in this study

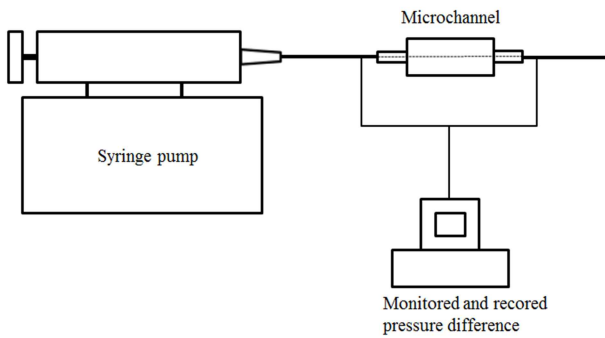


Fig. 3 Schematic of the experimental setup

3.2 마이크로채널 유동 특성

마이크로채널의 압력측정을 위한 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 미세한 유량을 정밀하게 조절하기 위하여 주사기에 유체를 넣고 모터의 회전력을 이용하는 방식으로 일정한 유량을 주입해주는 시린지(Model NE-300 Syringe Pump)를 사용하였다. 마이크로채널의 입구측과 출구측의 압력을 측정하기 위하여 디지털 마노메타(Dwyer Series 490 Digital Manometer)를 사용하였다. 측정기기의 오차를 고려하여 유량도 0.1 mL/min~ 36 mL/min의 범위에서 조절하였고, 측정된 압력의 범위는 0.4 kPa~43.8 kPa이다.

4. 결 과

Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 유체가 흐르는 채널의 단면이 직사각형의 형태로 잘 형성된 것을 확인 할 수 있다. 마이크로채널의 외형치수 제작 정밀도는 ±0.5 mm로 양호한 수준이었으며, Table 2 에는 마이크로채널 부분의 실측된 길이와 정밀도를 나타내었고, 제작된 마이크로채널이 직사각형의 근접성을 나타내었다. 형상계수가 커질수록 직사각형에 97%으로 근접하는 것을 확인하였다. 3D 프린터의 형상 제작오차는 채널의 너비와 깊이 방향에 대해 56 μm이므로 각 샘플의 측정된 길이와 설계값이 제작 오차만큼의 차이가 나타났다. 따라

Table 2 Geometric accuracy of 3D-printed microchannels

sample number		1	2	3	4
D _c (μm)	design	200	300	400	600
	measurement	155.1	287.3	430.3	648.8
	error(%)	-22.5	-4.23	7.58	8.13
D _d (μm)	design	200	300	400	600
	measurement	167.3	366.9	403.3	681.2
	error(%)	-16.4	22.3	0.83	13.5
D _h (μm)	design	200	300	400	600
	measurement	161.0	322.3	416.4	664.6
	error(%)	-19.5	7.43	4.1	10.8
Area	(%)	90.4	94.5	95.4	97

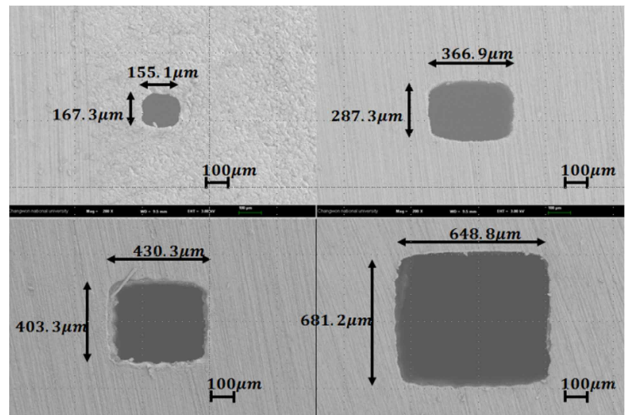


Fig. 4 Cross-sections of 3D printed microchannel array shape

서 채널의 수력학적 직경의 가공오차는 200 μm 설계오차의 경우 -19.5%였고 600 μm 설계는 10.8%로 측정되었다. 마이크로채널의 크기가 작아질수록 오차가 작아지다가 600 μm에서 다시 커진 이유는 도면이 3D 프린팅을 위하여 변환이 광원을 발생시키는 픽셀과의 일치하지 않는 경우 발생된 오차라고 생각되어진다. 더 정밀한 제작을 위해서는 3D 프린터의 형상 오차에 대해 보정하는 방법이 고안되어야 할 것이다.

Fig. 5에는 제작된 각 샘플에 0.1 mL/min~36 mL/min의 액상 물을 주입시켰을 때의 압력강하를 측정된 결과이다. 그래프에 나타난 실선은 실험결과로부터 선맞춤 한 것이다. 레이놀즈 수가 증가할수록 압력차가 증가하고 있으며, 수력학적 직경이 감소할수록 압력차가 급격히 증가한다. 이론과 실험을 비교하기 위하여 레이놀즈 수에 따른 마찰계수를 Fig. 6에 제시하였다. 형상계수와 레이놀즈 수가 커질수록 이론과 실험결과가 근접하는 것을 확인 할 수 있다. 레이놀즈 수가 낮을수록 이론값과 실험의 차이가 증가하는 경향은 표면거칠기,

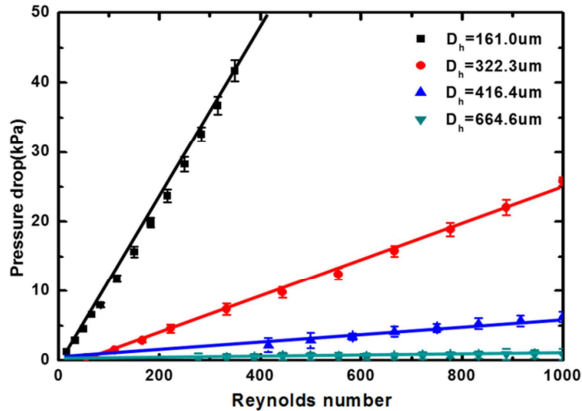


Fig. 5 Measured pressure drop as a function of Reynolds number in microchannel. Solid lines represent curve fittings

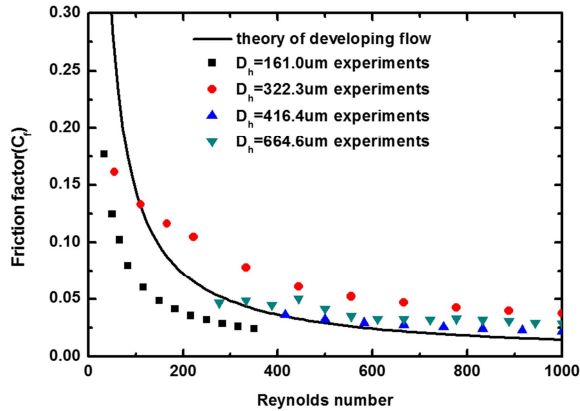


Fig. 6 Comparison between theory and experiment

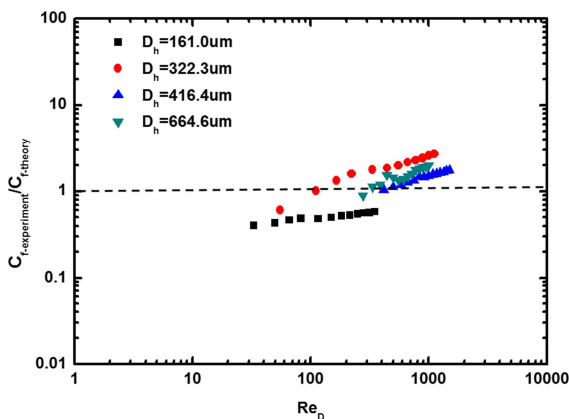


Fig. 7 Non-dimensional Poiseuille number vs. Reynolds number

점성 영향 등으로 보고된 바 있다.^(5,10) 유동마찰 계수를 이론예측과 측정값의 비율로 표현한 C^* 와 레이놀즈 수의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 주요 원인 마이크로채널 거칠기의 측정 오차와 채널의

변형등이 오차를 유발시키는 원인이 된다고 유추한 바 있다. 특히 채널의 입구와 출구가 마이크로채널내의 유체의 흐름에 영향을 줄 수 있는 가능성도 연구된바 있다.

본 연구에서 측정된 압력강하와 이론적 예측값의 차이는 0.5~2.7의 사이로 나타났다. Steinke와 Kandlikar의 연구결과와 비교하면 마이크로채널의 이론과 측정값의 불일치 특성과 매우 유사하다. 즉, 기존의 원형튜브, 화학적 식각 공정을 이용한 사각형 채널 및 다양한 형상들과 비교하여도 3D 프린터를 이용한 마이크로채널의 압력강하 불일치도는 여전히 발생하였다. 이는 마이크로채널에 대한 이론이 정확하게 정립되지 못하였기 때문이다.⁽²⁸⁾ 따라서 저자들은 제안된 3D 프린팅 기술을 바탕으로 측정된 유동현상을 이론적으로 설명할 수 있는 방안에 대해 추가적인 연구를 진행할 것이다. 그렇지만 3D 프린터를 이용하면 다양한 형상 및 크기의 마이크로채널을 낮은 가격에 제작할 수 있으므로 유동현상에 대한 연구에 크게 적용될 수 있다.

5. 결론

3D 프린터를 이용하여 마이크로채널을 제작하여 압력강하 실험을 수행하였다. 마이크로채널의 크기는 161 μm ~664 μm , 그리고 유동범위는 레이놀즈 수 16~1000사이로 변화시켰다. 본 연구결과, 3차원 마이크로채널의 제작 성능은 50~60 μm 의 공차를 나타내었으나 설계보정으로 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 마이크로채널의 유동흐름에 대한 압력강하는 유동특성에 대한 연구 등에 충분히 적용될 수 있다. 이러한 기술은 복잡한 3차원 형상의 마이크로 유체기기에 적용될 수 있어 학술적, 산업적으로 높은 파급효과가 기대된다. 따라서 저자들은 제안된 3D 프린팅 기술을 바탕으로 측정된 유동현상을 이론적으로 설명할 수 있는 방안에 대해 추가적인 연구를 진행할 것이다.

후기

본 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며(NO. 2015R1D1A3A01019588), 또한 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과이다.(NO. 2015H1C1A1035824)

참고문헌

(References)

- (1) Jeon, S., Lee, K. and Moon, D., 2011, "Numerical Study on the Performance of a Microchannel Heat Exchanger with a Novel Channel Array," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng, B*, Vol. 35, No. 11, pp. 1119~1126.
- (2) Mawatari, K., Kazoe, Y., Shimizu, H., Pihosh, Y. and Kitamori, T., 2014, "Fundamental Technologies, Unique Liquid Properties, and Application in Chemical and Bio Analysis Methods and Devices," *American Chemical Society*, 86, pp. 4068~4077.
- (3) Lee, J. and Lee, K., 2015, "Prediction of Two-phase Taylor Flow Characteristics in a Rectangular Microchannel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng, B*, Vol. 39, No. 7, pp. 557~566.
- (4) Bucci, A., Celata, G. P., Cumo, M., Serra, E. and Zummo, G., 2003, "Water Single-phase Fluid Flow and Heat Transfer in Capillary Tubes," *ICMM2003-1037*.
- (5) Mirmanto, Kenning, D. B. R. Lewis, J. S. and Karayiannis, T. G., 2012, "Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics for Single-phase Developing Flow of Water in Rectangular Microchannels," 6th European Thermal Sciences conference.
- (6) Park, H., 2009, "A Microchannel Heat Exchanger Design for Microelectronics Cooling Correlating the Heat Transfer Rate in Terms of Brinkman Number," *Microsyst Technol* 15:1373~1378.
- (7) Sahar, A. M., Oezemir, M. R., Fayyadh, E. M. Wissink, J., Mahmoud, M. M. and Karayiannis, T. G., 2016, "Single-phase Flow Pressure Drop and Heat Transfer in Rectangular Metallic Microchannels," *Applied Thermal Engineering* 93, pp. 1324~1336.
- (8) Asadi, M., Xie, G. and Sunden, B., 2014, "A Review of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Single and Two-phase Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 79, pp. 34~53.
- (9) Mohammed, H. A., Bhaskaran, G., Shuaib, N. H. and Saidur, R., 2011, "Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Microchannels Heat Exchanger using Nanofluids: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 1502~1512.
- (10) Park, H. and Punch, J., 2008, "Friction Factor and Heat Transfer in Multiple Microchannels with Uniform Flow Distribution," *International Journal of heat and Mass Transfer* 51, pp. 4535~4543.
- (11) Mun, J. and Kim, S., 2011, "Study in Heat Transfer Characteristics for Single-phase Flow in Rectangular Microchannels," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng B*, Vol. 35, No. 9, pp. 891~896.
- (12) Hrnjak, P. and Tu, X., 2007, "Single Phase Pressure Drop in Microchannels," *International Journal of heat and Fluid Flow* 28, 2-14.
- (13) Pfund, D., Rector, D., Shekarriz, A. Popescu. A. and Welty, J., 2000, "Pressure Drop Measurement in a Microchannel," *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 8.
- (14) Papautsky, I., Gale, B. K., Mohanty, S., Ameel. T. A. and Frazier, A. B., "Effects of Rectangular Microchannel Aspect Ratio on Laminar Friction Constant,".
- (15) Bahrami, M., Yovanovich, M. M. and Culham, J. R., 2005, "Pressure Drop of Fully-developed, Laminar Flow in Microchannels of Arbitrary Cross-section," *ICMM 2005-75109*.
- (16) Akbari, M., Sinton, D. and Bahrami, M., 2009, "Pressure Drop in Rectangular Microchannels as Compared with Theory Based on Arbitrary Cross Section," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 131, 041202-1.
- (17) Judy, J., Maynes, D. and Webb, B. W., 2002, "Characterization of Frictional Pressure Drop for Liquid Flows Through Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, pp. 3477~3489.
- (18) Peiyi, W. and Little, W. A., 1983, "Measurement of Friction Factors for the Flow of Gases in Very Fine Channels Used for Microminiature Joule-Thomson refrigerators," *Cryogenics*, Vol. 23, pp. 273~277.
- (19) Son, S., Han, S., Sung, I. and Kim, W., 2013, "Surface Smoothing of Blasted Glass Micro-channels using Abrasive Waterjet," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 12, pp. 1159~1165.
- (20) Joo, B., Baek, S. and Oh, S., 2006, "Micro Channel Forming with Ultrathin Metal Foil, 2006," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 2, pp. 159~163.
- (21) Connor, J. O., Punch, J., Jeffers, N. and Stafford, J., 2014, "A Dimensional Comparison Between Embedded 3D-printed and Silicon Microchannels," *Journal of Physics* 2014, 012009.
- (22) Aritome, K., Bula, W. P., Sakamoto, K., Murakami, Y. and Miyake, R., 2013, "3D Printed Microfluidic Devices and Reconfigurable Analysis System," 17th International Conference in Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences.
- (23) White, F. M., 1994, *Fluid Mechanics*, Third ed., McGraw-Hill.
- (24) Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1993, *Convective Heat and Mass Transfer*, third ed., McGraw-Hill.
- (25) Bejan, A., 1990, *Convection Heat Transfer*, Wiley.
- (26) Knight, R. W., Hall, D. J., Goodling, J. S. and Jaeger, R. C., 1992, "Heat Sink Optimization with Application

- to Microchannels," *IEEE Trans. Compon., Hybr., Manufact. Technol.* 15, pp. 832~842.
- (27) Comina, G., Suska, A. and Filippini, D., 2015, "3D Printed Unibody Lab-on-a-chip: Features Survey and Check-valves Integration," *Micromachines* 2015, Vol. 6, pp. 437~451.
- (28) Steinke, M. E. and Kandlikar, S. G., 2006, "Single-phase Liquid Friction Factors in Microchannels," *International Journal of Thermal Sciences* 45, pp. 1073~1083.