

# 금속 3D 프린팅으로 보수된 AISI H13 금형강 마모특성 평가

이성윤\*, 이인규\*, 정명식\*, 이재욱\*, 이선봉\*\*, 이상곤\*.#

\*한국생산기술연구원 극한가공기술그룹, \*\*계명대학교 기계자동차공학과

## Evaluation of Wear Characteristics of AISI H13 Tool Steel Repaired by Metal 3D Printing

Sung-Yun Lee\*, In-Kyu Lee\*, Jae-Wook Lee\*, Seon-Bong Lee\*\*, Sang-Kon Lee\*.#

\*Ultimate Manufacturing Technology Group, \*\*Korea Institute of Industrial Technology

(Received 24 March 2017; received in revised form 4 April 2017; accepted 29 May 2017)

### ABSTRACT

In hot forming process, the dies in which excessive worn or crack occurs is reused after repair. Generally hot forming dies are recycled through a welding repair method. Welding repair methods are highly dependent on the skills of engineer. It causes process defects such as dimensional defects and structural defects. Recently, the metal 3D printing method has been applied to the repair of used dies. The aim of this study is to evaluate the wear characteristics of AISI H13 tool steel repaired by 3D printing method. Three kinds of wear specimens were fabricated by using 3D printing, welding, and initial material. A pin-on-disk wear test was carried out to evaluate the wear characteristics. From the result of wear test, the wear characteristics of 3D printing method was superior to that of the welded material, and was similar to that of the initial material.

**Key Words** : 3D Printing(3차원 프린팅), AISI H13, Wear Characteristic(마모특성), Pin-on-disk Wear Test(핀 온 디스크 마모시험)

## 1. 서 론

열간단조(hot forging), 압출(extrusion), 압연(rolling) 등의 열간성형공정의 경우 작업 온도가 높고 금형의 온도변화가 심하기 때문에 금형의 수명이 짧다. 금형수명은 제품 품질, 생산성, 생산비용 등에 매우 큰 영향을 미치는 요소이다<sup>[1]</sup>. 온도 영향을 받는 금형은 연삭마모(abrasive wear)에 의해 수명이 결정되

며, 제품의 형상 및 구조가 복잡한 경우 높은 면압으로 인해 과도한 연삭마모가 발생된다. 최근까지 표면처리, 수명예측, 공정개선 등 금형수명과 관련된 하여 다양한 연구들이 수행되었다<sup>[2,3]</sup>.

일반적으로 마모가 발생한 열간성형용 금형의 경우 금형제조비용 저감을 위해 마모발생 부위에 대한 보수작업 후 재사용되고 있다. 마모부위를 용접 육성하여 재사용하는 것이 가장 대표적인 보수 방법이다. 그러나 Fig. 1에서 보듯이 용접육성의 경우 품질이 작업자의 숙련도에 의존할 뿐만 아니라 치수변화, 구조결합 등의 다양한 결함들이 빈번히 발

# Corresponding Author : sklee@kitech.re.kr

Tel: +82-53-580-0136, Fax: +82-53-580-0140

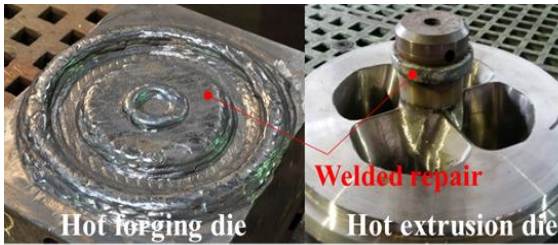


Fig. 1 Welded repair hot forming dies

생하고 있다. 또한 육성 후 과도한 기계가공이 필요한 단점도 있다.

최근 3D 프린팅 기술의 발전으로 인해 다양한 분야에 확대 적용되고 있으며, 금형관련 연구들도 활발히 수행되었다<sup>[4-21]</sup>. 3D 프린팅 기술 중 하나인 DMT(direct metal tooling)는 레이저로 용융된 모재의 미소영역에 금속 분말(powder)을 주입시켜 적층시키는 방식이며<sup>[22]</sup>, 정밀한 금속 제품 제조가 가능하다. 이로 인해 용접육성에 비해 적층면적이 작고 모재와 동일한 소재 선정이 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 3D 프린팅 적용 금형 보수방법의 타당성을 평가하기 위하여 3D 프린팅으로 보수된 열간성형용 금형소재의 마모특성을 평가하였다. 적용 소재는 가장 대표적인 열간성형용 금형소재인 AISI H13이다. 마모특성 평가를 위하여 3D프린팅, 용접육성, 그리고 원소재로 마모시험을 제작하였으며, 핀 온 디스크(pin-on-disk) 마모시험을 비교평가 하였다.

## 2. 마모시험 제작

먼저, 핀 온 디스크 마모시험을 위한 세 가지 보수방법을 적용한 마모시험을 제작하였다. 원소재 마모시험은 열처리된 AISI H13 블록을 가공하여 제작하였으며, 용접육성은 AISI H13 모재에 열간 금형강 보수에 일반적으로 사용되는 아크(arc) 용접으로 약 15mm 육성 후 시험편을 제작하였다. 3D 프린팅 적용 시험편은 Fig. 2의 DMT 장비(InssTek Inc)를 이용하여 제작하였다. Table 1에 각 시험편의 화학성분을 나타내었으며, Fig. 3에 3D 프린팅 공정의 개략도를 나타내었다. 3D 프린팅을 적용하여 용접

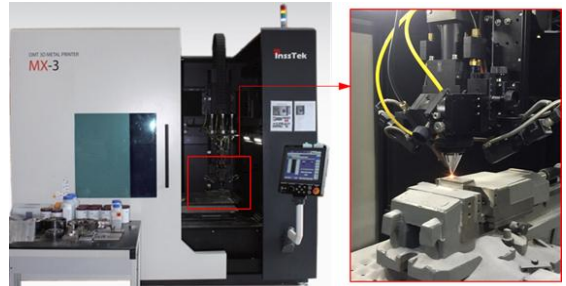


Fig. 2 3D printing machine (MX-311 DMT)

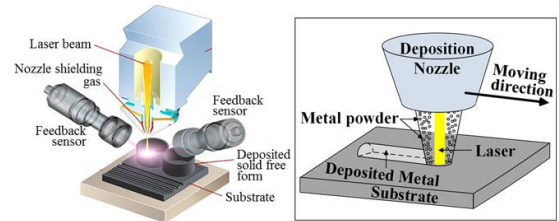


Fig. 3 Schematic diagram of 3D printing process

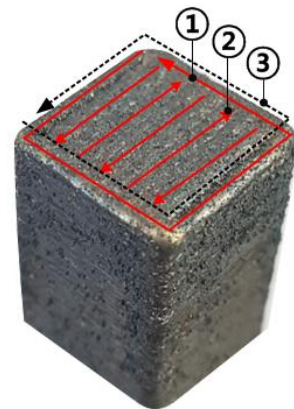


Fig. 4 Procedure of 3D printing deposition

육성과 동일하게 AISI H13 모재 표면에 약 15mm 적층 후 시험편을 가공하였다.

Fig. 4는 3D 프린팅 공정의 적층 순서를 나타낸 것이다. 우선, 적층영역의 테두리(①)를 적층한 후 내부(②)를 적층한다. 이후 두 번째 테두리(③) 적층이 이루어진다. ① ~ ③의 작업을 반복하여 요구 높이까지 적층한 후 마모시험편을 제작하였다. Fig. 5는 각 보수방법에 의해 제작된 마모시험편을 보여주고 있다.

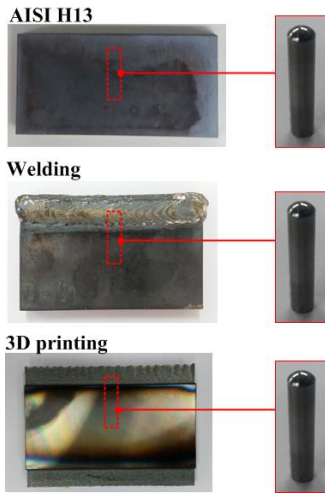


Fig. 5 Fabricated wear test specimen

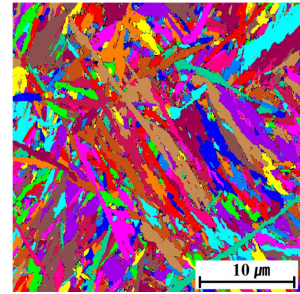
Table 1 Chemical composition(wt%) of specimens

Compositions	AISI H13	Welding	3D printing
C	0.378	0.292	0.401
Si	1.134	0.981	1.030
Mn	0.353	0.423	0.390
Cr	4.963	4.959	5.140
Mo	1.144	1.311	1.575
P	0.023	0.019	0.009
S	0.002	0.003	0.009

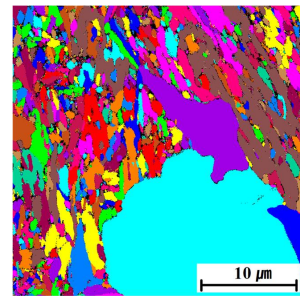
Table 2 Hardness(HRC) of wear specimens

No	AISI H13	Welding	3D printing
1	51.4	44.8	56.5
2	50.7	52.7	57.2
3	51.2	45.1	56.8
4	47.8	45.1	57.2
5	51.3	41.4	56.5
6	51.0	56.4	33.7
7	50.1	56.3	52.0
Avg.	50.5	48.8	52.8

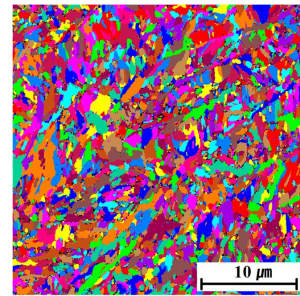
Table 1은 제작된 마모시편의 화학성분을 나타내었다. 원소재, 용접, 그리고 3D 프린팅으로 제작된 시편의 탄소함량은 각각 0.378 wt%, 0.292 wt%, 그리고 원소재는 0.401 wt%였다. 3D 프린팅 제작 시편과 원소재의 탄소함량은 서로 유사하였다.



(a) AISI H13



(b) Welding



(c) 3D printing

Fig. 6 Grain size (EBSD analysis)

Table 2는 제작된 시편의 경도(HRC)측정값을 나타낸 것이다. 모재는 산업에서 일반적으로 사용되는 열처리가 진행된 상태이며, 용접육성 및 3D 프린팅은 보수 직후의 경도를 측정하였다. 결과에서 알 수 있듯이 원소재, 용접, 그리고 3D 프린팅 시편의 평균 경도는 각각 50.5, 48.8, 그리고 52.8이었다. 용접으로 제작된 시편의 경도가 가장 낮음을 알 수 있다.

Fig. 6은 EBSD(Electron backscatter diffraction)으로 분석은 평균 결정립 크기를 나타낸 것이다. 원소재, 용접, 그리고 3D 프린팅 시편의 평균 결정립은 각

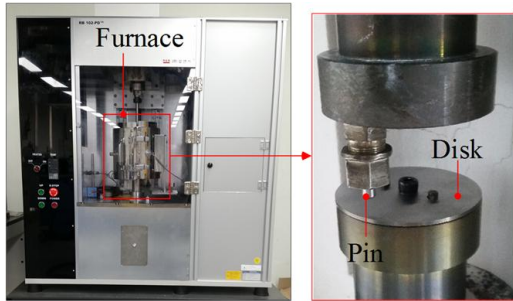


Fig. 7 Wear test machine

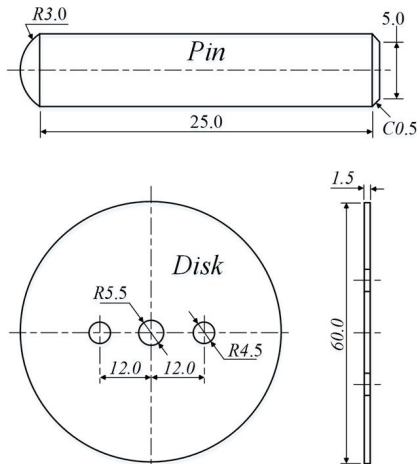


Fig. 8 Dimensions of pin and disk

2.286 $\mu\text{m}$ , 7.088 $\mu\text{m}$ , 그리고 1.127 $\mu\text{m}$ 로 용접으로 제작된 시편의 평균 결정립이 가장 조대하였다. 이는 용접공정 시 상대적으로 불균일한 냉각에 의한 것으로 판단된다.

### 3. 핀 온 디스크 마모 시험

각 시편의 마모특성 평가를 위하여 열간 핀 온 디스크 마모시험을 수행하였다. Fig. 7에서 본 연구에서 활용한 열간 핀 온 디스크 마모시험기를 나타내었다.

Fig. 8은 적용된 핀과 디스크 시편 치수를 나타내었다.

마모시험 조건은 Table 3에 나타내었다. 마모시험 온도는 열간 단조공정 및 열간 압출공정에서

Table 3 Wear test conditions

Conditions	Value
Test load	30.0 N
Sliding length	500.0 m
Test speed	120.0 mm/s
Disk material	HSS
Lubricant	without

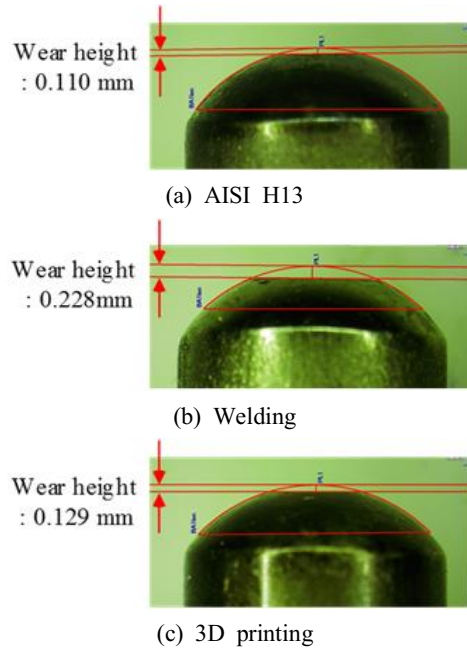


Fig. 9 Wear height of each specimen

빈번하게 사용되는 초기금형온도 400 °C로 설정하였다. 디스크 재질은 고온 마모시험 시 연삭마모를 유도하기 위해 일반적인 성형용 철강소재보다 상대적으로 강도가 높은 고속도 공구강(HSS)을 적용하였다. 이를 통해 각 시편의 상대적인 마모특성을 비교평가 하였다.

Fig. 9는 마모시험 후 각 시편의 마모 높이를 측정된 결과이다. 측정결과 원소재, 용접, 그리고 3D 프린팅으로 제작된 시편의 마모 높이는 각각 0.110mm, 0.228mm, 그리고 0.129mm로 용접으로 제작된 시편의 마모 높이가 가장 높았다. 또한 결과에서 알 수 있듯이 원소재와 3D 프린팅으로 제작된 시편은 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

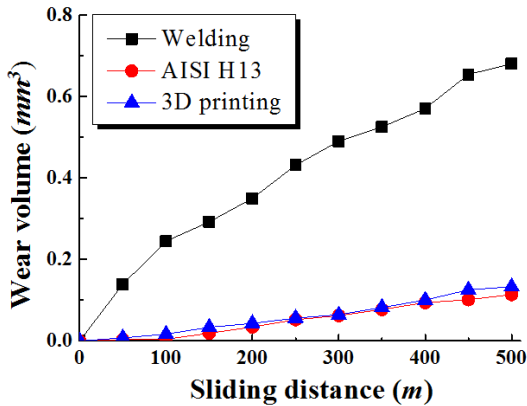


Fig. 10 Wear volumes

이상의 결과로부터 3D 프린팅으로 제작된 마모 시편은 마모특성이 원소재인 AISI H13과 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서, 과도한 마모가 발생한 열간성형용 금형에 대하여 3D 프린팅을 적용하여 금형을 재생할 경우 원소재와 유사한 마모특성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 이를 통해 기존 용접 육성을 통해 재생된 금형보다 마모 특성을 월등히 우수할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 마모면을 나타낸 것이다. 원소재와 3D 프린팅 시편의 경우 마모분에 의해 표면이 연마되는 연삭마모 양상을 나타내고 있으나, 용접으로 제작된 시편의 경우 미소균열(micro-crack)에 의한 표면 이탈이 지배적으로 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 현재 가장 활발히 적용되고 있는 용접 보수방법의 경우 마모특성이 상대적으로 매우 좋지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12는 마모시험 후 각 마모면의 평균 표면거칠기(Ra)를 나타낸 것이다. 원소재와 3D 프린팅 제작 시편의 경우 약 0.15 $\mu\text{m}$ 로 유사한 값을 나타내고 있으나 용접으로 제작된 시편의 경우 약 0.55 $\mu\text{m}$ 로 매우 높으며, 편차 또한 상대적으로 높음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3D 프린팅으로 보수된 열간성형용 금형소재(AISI H13)의 마모특성을 평가하였다. 3D 프린팅으로 제조된 시편과 원소재, 그리고 용접육

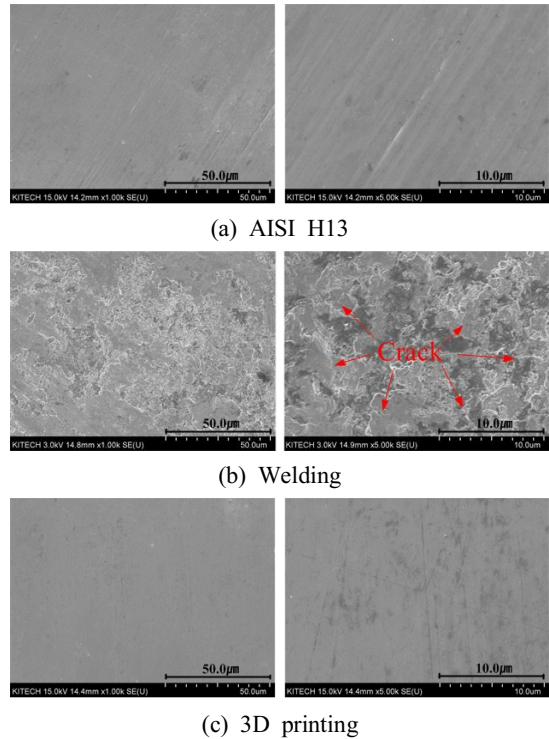


Fig. 11 Photo of worn plane

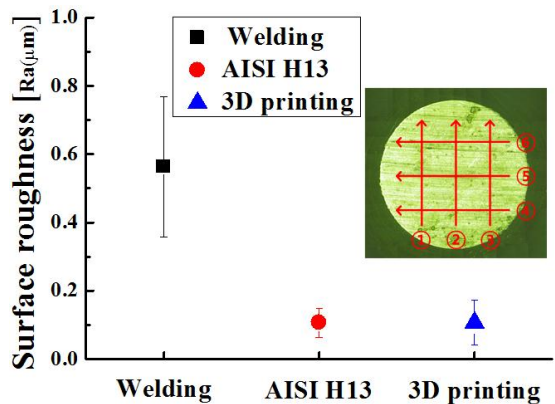


Fig. 12 Roughness of worn surface

성으로 제조된 시편의 마모특성을 평가하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

1. 원소재, 용접육성, 그리고 3D 프린팅으로 제작된 마모시편의 경도측정결과 원소재와 3D 프린팅으로 제작된 시편의 경도가 용접육성으로 제작된

시편도 높았으며, 열처리된 원소재와 유사한 경도를 나타내었다. 3D 프린팅의 경우 용접육성에 비해 공정안정성, 균일한 냉각 및 빠른 냉각으로 인해 경도가 상대적으로 높은 것으로 사료된다. 결정립 크기 또한 동일한 이유로 3D 프린팅을 적용한 시편이 보다 미세함을 알 수 있었다.

2. 3D 프린팅을 적용한 경우 마모 높이 및 마모체적이 원소재와 유사한 특성을 나타내었으며, 용접육성보다 상대적으로 우수함을 알 수 있었다. 마모면 표면 거칠기 또한 3D 프린팅을 적용한 경우가 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.
3. 용접육성을 적용한 마모시험편의 마모체적 및 표면거칠기가 가장 높게 나타났다. 이는 불균일한 결정립 크기 및 온도 편차로 상대적 취약지역에서 미소균열에 의한 표면 이탈에 의한 것으로 사료된다.
4. 3D 프린팅을 적용하여 열간성형용 금형보수를 수행할 경우 기존 용접육성을 통한 금형보수방법 보다 마모특성이 우수함을 알 수 있었으며, 향후 다양한 열간성형용 금형에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

1. Akhtar, S. S. and Arif, A. F. M., "Fatigue Failure of Extrusion Dies: Effect of Process Parameters and Design Features on Die Life", *International Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 10, No. 1, pp. 38-49, 2010.
2. Kashani, H., Amadeh, A. and Ghasemi, H., "Room and High Temperature Wear Behaviors of Nickel and Cobalt Base Weld Overlay Coatings on Hot Forging Dies", *Wear*, Vol. 262, No. 7-8, pp. 800-806, 2007.
3. Ebara, R. and Kubota, K., "Failure Analysis of Hot Forging Dies for Automotive Components", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 15, No. 7, pp. 881-893, 2008.
4. Jang, J. H., Joo, B. D., Mun, S. M., Sung, M. Y. and Moon, Y. H., "Application of Direct Laser Melting to Restore Damaged Steel Dies", *Metals and Materials International*, Vol. 17, No. 1, pp. 167-174, 2011.
5. Ahn, D. G., "Applications of Laser Assisted Metal Rapid Tooling Process to Manufacturing of Molding & Forming Tools - State of the Art", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 5, pp. 925-938, 2011.
6. Zhang, Y. Z., Liu, Y. T., Zhao, X. H. and Tang, Y. J., "The Interface Microstructure and Tensile Properties of Direct Energy Deposited TC11/Ti<sub>2</sub>AlNb Dual Alloy", *Materials & Design*, Vol. 110, No. 15, pp. 571-580, 2016.
7. Shim, D. S., Baek, G. Y., Seo, J. S., Shin, G. Y., Kim, K. P. and Lee, K. Y., "Effect of Layer Thickness Setting on Deposition Characteristics in Direct Energy Deposition (DED) Process", *Optics & Laser Technology*, Vol. 86, pp. 69-78, 2016.
8. Selcuk, C., "Laser Metal Deposition for Powder Metallurgy Parts", *Powder Metallurgy*, Vol. 54, No. 2, pp. 94-99, 2011.
9. Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J. and Hetzner, D., "The Direct Metal Deposition of H13 Tool Steel for 3-D Components", *JOM*, Vol. 49, No. 5, pp. 55-60, 1997.
10. Jang, J. H., Joo, B. D., Van Tyne, C. J. and Moon, Y. H., "Characterization of Deposited Layer Fabricated by Direct Laser Melting Process", *Metals and Materials International*, Vol. 19, No. 3, pp. 497-506, 2013.
11. Park, J. S., Park, J. H., Lee, M. G., Sung, J. H., Cha, K. J. and Kim D. H., "Effect of Energy Input on the Characteristic of AISI H13 and D2 Tool Steels Deposited by a Directed Energy Deposition Process", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 47, No. 5, pp. 2529-2535, 2016.
12. Ahn, D. G., Lee, H. J., Cho, J. R. and Guk, D.

- S., "Improvement of the Wear Resistance of Hot Forging Dies using a Locally Selective Deposition Technology with Transition Layers", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 1, pp. 257-260, 2016.
13. Park, J. S., Lee, M. G., Cho, Y. J., Sung, J. H., Jeong, M. S., Lee, S. K., Choi, Y. J. and Kim, D. H., "Effect of Heat Treatment on the Characteristics of Tool Steel Deposited by The Directed Energy Deposition Process", *Metals and Materials International*, Vol. 22, No. 1, pp. 143-147, 2016.
14. Choi, J. W. and Kim, H. C., "3D Printing Technology – A Review", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 1-8, 2015.
15. Kim, W. S., Hong, M. P, Park, J. S., Lee, Y. S., Cha, K. J., Sung, J. H., Jung, M. W. and Lee, Y. H., "Case Studies on Applications of Conformal Cooling Channel based on DMT Technology", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 9-14, 2015.
16. Olioul I. Md., Kim H. C., "An Algorithm for the Removing of Offset Loop Twists during the Tool Path Generation of FDM 3D Printer", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-8, 2017.
17. Pyo J. H., Yoo C. J., Shin J. K., Lee T. G., Shin B. S., "A Study on the Design of Hiking Boots Equipped with GPS and its Midsole Manufactured by 3D Porous Polymer Printing Method", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 83-88, 2016.
18. Kang B. S., Ahn D. G., Shin B. S., Shin J. K., "A Fundamental Study on Polymer/Metal Additive Method using a UV Laser for Consumer-oriented 3D Helmet Products", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 89-94, 2016.
19. Hwang J. D., Yang J. S., Yun S. H., Jung Y. G., "Hybrid Technology using 3D Printing and 5-axis Machining for Development of Prototype of the Eccentric Drive System", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 38-45, 2016.
20. Shim J. H., Yun W. S., Ko T. J., "Successful Examples of 3D Printing Technology-based Start-up Enterprises", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 104-110, 2016.
21. Jang J. A., Cho D. W., "A Review of the Fabrication of Soft Structures with Three-dimensional Printing Technology", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 6, pp. 142-148, 2015.
22. Carroll, B. E., Palmer, T. A. and Beese, A. M., "Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V Components Fabricated with Directed Energy Deposition Additive Manufacturing", *Acta Materialia*, Vol. 87, pp. 309-320, 2015.