

3D 프린팅으로 제작한 Ti-6Al-4V 재료의 Johnson-Cook 모델의 유동 응력 결정

박대균*, 김태호**,#, 전언찬***

* 동아대학교 기계공학과 대학원, ** 티엔에스머시닝, *** 동아대학교 기계공학과

Flow Stress Determination of Johnson-Cook Model of Ti-6Al-4V Material using 3D Printing Technique

Dae-Gyoun Park*, Tae-Ho Kim**,#, Eon-Chan Jeon***

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Dong-A Univ.,

T&SMachining, *Department of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received 19 March 2018; received in revised form 24 May 2018; accepted 31 May 2018)

ABSTRACT

This paper investigates the compressive deformation behavior of direct metal tooling (DMT), processing titanium alloy (Ti-6Al-4V) parts under high strain loading conditions. Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experiments were performed to determine the flow stress and the coefficients of the Johnson-Cook model. This model is described as a function of strain, strain rate, and temperature. SHPB experiments were performed to characterize the deformation behavior of specimens made with 3D printers, using Ti-6Al-4V material under high temperature and dynamic loading.

Key Words : 3D Printing(3D 프린팅), Constitutive Equation(구성방정식), Titanium Alloy(티타늄합금), Mechanical Properties(기계적 물성), Dynamic Behavior(동적 거동), Flow Stress(유동 응력)

1. 서 론

3D 프린터는 국내에서 꽤속조형으로 소개되었으며 초창기는 재료의 한계로 인하여 시제품 제작에 많이 이용되었다. 그러나 인플란트 제작에 금속분말을 이용한 금속 3D 프린트 장비가 개발되어 실제 인플란트 제품 제작에 사용되었다^{[1][2]}. 그리고 이온빔과 고출력 레이저를 이용한 메탈 프린트가 개발되

어 EBM(Electron Beam Melting), DMD(Direct Metal Deposition), DMT (Direct Metal Tooling) 방식으로 불려지고 있다. 그리고 이런 고출력 방식으로 다양한 금속분말 소재를 이용한 3D 프린터를 이용한 시제품 제작, 금형 수정 및 제품의 수정에 사용되고 있다.

분말을 사용하여 제작된 3D 프린터 제품의 경우 외부 표면 상태의 문제로 인하여 실제 제품으로 사용시 절삭가공을 통한 후처리가 필요하다. 그러나 기존 재료와 3D 프린터 재료의 물성 차이로 인하여 기존 재료의 절삭 조건을 적용하기 힘든 실정이다.

Corresponding Author : kth0110@gmail.com

Tel:+82-51-201-4078, Fax: +82-53-201-4041

이를 극복하기 위하여 시뮬레이션을 이용하여 절삭 조건을 선정함으로써 시간과 비용을 절감할 수 있다. 절삭공정 시뮬레이션을 통해 공구에 걸리는 절삭력, 절삭온도, 공구마모, 그리고 공작물 표면적의 잔류응력 등을 예측할 수 있다. 하지만 시뮬레이션에서 정확한 예측을 하기 위해서는 선행적으로 피삭재의 유동응력을 정확하게 기술하여야 한다. 재료의 유동응력을 기술한 모델은 다양하게 개발되어 있으나 가장 많이 사용되고 있는 모델은 Johnson-Cook 모델이다. 이 모델은 유동응력을 strain, strain rate 및 온도의 함수로 기술하고 있다^[3].

Aviral Shrot^[4] 등은 직교절삭 시험과 FEM 수치해석을 통하여 AISI 52100, 62HRC 강의 Johnson-Cook 구성방정식 상수를 결정하였으며, 황과 안등은 Johnson-Cook 구성방정식 상수를 슬롯밀링 시험을 통해 획득하였다^{[5][6]}. Mahmoud Shatla^[7] 등은 직교슬롯밀링 시험을 통하여 AISI P20 mold steel 등 3종의 금속에 대해 Flow-stress data를 획득하는 방법을 그리고 M Agmell^[8] 등은 AISI4140 강의 Johnson-Cook 모델 상수를 2차원 절삭시험과 FEM 수치해석을 통해 획득하였다. An^[9] 등은 Al6061-T6 재료의 동적 물성 획득을 위한 SHPB 장비의 설계변수를 결정하기 위한 시뮬레이션을 수행하였으며, Lee^[10] 등은 SHPB 기법을 사용하여 Al7075-T6의 고온 동적변형 거동을 수행하여 Johnson-Cook 구성방정식의 계수를 결정하였다.

그리하여 본 논문에서는 SHPB 실험을 통하여 Ti-6Al-4V 재료를 이용하여 3D 프린터로 제작한 시편의 고온, 동적 하중 하에서 변형 거동의 특성을 규명하고 절삭 시뮬레이션에 적용할 수 있는 Johnson-Cook 구성방정식의 계수 값을 구하는 것을 목표로 하였다.

2. Johnson-cook 구성방정식

재료가 소성변형을 할 때 응력-변형률의 관계는 비교적 작은 변형률 속도에서 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다. σ_0 는 항복강도, K 는 재료상수, n 은 가공경화지수를 나타내고 있다.

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (1)$$

고변형률 변형 시에는 시편 내의 온도 변화가 고려되어야 하므로 온도 상승을 고려한 유동응력(flow stress)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = \sigma_f \left[1 - \left(\frac{T - T_m}{T_m + T_r} \right)^m \right] \quad (2)$$

σ_f 는 기준응력, T_m 은 용융점, T_r 는 기준 온도, m 은 열적 연화계수를 나타내고 있다.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_m}{T_m + T_r} \right)^m \right] \quad (3)$$

Johnson-Cook 구성방정식은 식(3)과 같이 나타내고 있다. $(A + B\varepsilon^n)$ 는 재료의 변형률 경화를 나타내고 있으며, A 는 초기항복응력, B 는 경화상수, n 은 경화지수, ε 은 변형률을 나타낸다.

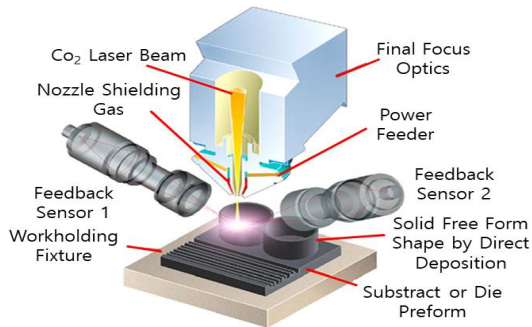
$(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0})$ 는 변형률 속도경화를 나타내며, $\dot{\varepsilon}$ 는 변형률 속도, ε_0 는 단위 변형률속도 (1mm/sec)를 나타낸다. 각각 변형률 속도가 1/sec인 경우의 응력-변형률 선도를 Ludwick의 식으로 나타내었을 경우에 해당하는 상수들이다. 변형률속도 경화계수 C 를 구하기 위하여 초기항복응력의 변화를 변형률 속도에 따라 나타낸 Log선도를 이용하게 된다.

이 때 C 는 열적연화 현상을 배제하고 등은 변형과정일 때 얻어지게 되므로 초기항복이 발생할 때 구한다. 이 구성방정식을 이용하여 고변형률 속도에서 초기 실험온도와 변형률 속도에 의한 재료의 응력과 변형률의 관계를 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 3D Printer

Fig 1은 DMT(Direct Metal Tooling)의 3D Printer의 적층원리 및 사용 장비를 나타내고 있다. 이 방식은 고출력 레이저 빔을 이용하여 금속 분말을 녹여 붙이는 방식을 통해, 3차원 CAD 데이터로부터 직접 금속 제품과 금형 등을 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 새로운 개념의 레이저 금속 성형 기술이다. 저



(a) 3D printer principle of DMT type



(b) machine of DMT type

Fig. 1 3D printer principle and machine of DMT type

렴한 일반 산업용 금속 분말을 사용하고, 조형 과정에서 금속 분말을 실시간으로 공급한다. 그리고 레이저 빔의 조사로 금속 분말이 완전히 용융된 후 급속 응고되기 때문에 매우 치밀하고 미세한 조직의 금속 제품이 만들어 진다. 그러나 표면조도가 양호하지 않고 장비가 고가라는 단점을 가지고 있다.

3.2 재료 및 시편

금속 분말 소재 적용한 3D 프린터는 시제품 제작, 금형 및 제품 수정에 사용되고 있다. 금속 분말소재로는 티타늄 합금을 많이 사용하고 있으며 재료의 강도, 내식성 및 내부식성이 높아 항공, 석유화학 및 의료분야에서 사용이 늘어나고 있다. 하지만 티타늄 합금은 난삭재 소재이기 때문에 일반적인 가공방식인 절삭가공을 이용하여 티타늄 합금을 가공할 경우 융착 현상 및 표면경화 현상으로 고속가공이 어렵다.

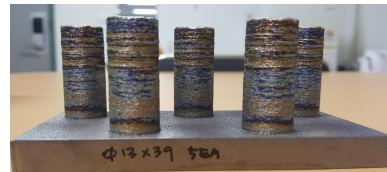


Fig. 2 Specimens produced using 3D printer



(a) 3D model

(b) specimen

Fig. 3 Specimen for SHPB test

Fig. 2는 3D Printer를 이용하여 Ti-6Al-4V 분말을 적층하여 제작한 시편으로 후가공 여유를 고려하여 제작하였다. Fig. 3은 SHPB 시험을 위한 3차원 모델과 시험편을 나타내고 있다. 직경은 $\phi 4\text{mm}$ 높이는 6mm의 크기로 제작하였다.

3.3 SHPB(Split Hopkins Pressure Bar)

SHPB실험 장치의 원리 및 시험 방법은 다음과 같다. 먼저 고속으로 충격봉을 움직여서 입력봉을 타격하면 입력봉과 출력봉 사이에 있는 시편이 압축성 탄성파가 생성된다. 생성된 압축성 탄성파는 입력봉 내에 전달되고, 입력봉과 시편의경계에 도달하게 되면 입력봉과 시편의 임피던스(Impedance) 차이에 의해 압축파 일부는 반사되고 일부는 시편을 투과하여 출력봉으로 전달된다. 이를 Fig. 4에 나타내었다^[9].

상온시험에서는 압력봉 사이에 시편을 장착한 후 충격봉으로 타격한다. 그리고 고온시험에서는 시편

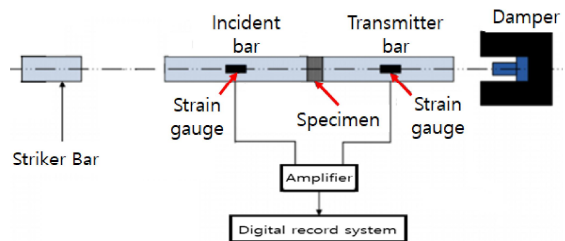


Fig. 4 Schematic of the SHPB device

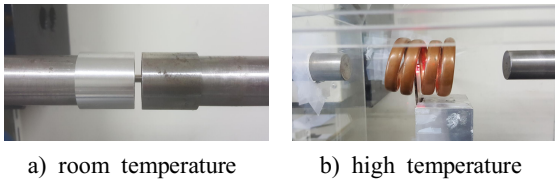


Fig. 5 specimens fixed at room temperature and high temperature in SHPB

을 가열하기 위하여 고주파 유도가열장치를 이용하여 시편 온도를 올린 후 압력봉 시편과 접촉시킨 후 충격봉으로 타격한다. 이를 Fig. 5에 나타내었다.

4. 실험결과

4.1 실험결과

변형률 속도 및 온도가 시편 재료의 동적 변형 거동에 미치는 영향을 판단하기 위하여 변형률 속도를 2100/s, 1700/s, 0.05/s, 0.0001/s로 변화시키며 시험을 수행하였다. 그리고 온도 변화에 따른 동적 변형 거동에 미치는 영향을 판단하기 위하여 속도 1800/s, 온도 342°C에서 고온시험을 수행하였다.

SHPB시험을 통하여 획득한 응력과 변형률 커브는 공칭응력과 변형률로 변환한다. 그리고 진응력과 진변형률로 변환한다. Fig. 5는 온도 속도 변화에 따른 시험형상을 나타내었다. 상온에서는 시편이 45° 각도로 파단되었으나 고온에서는 배럴 현상이 나타나면서 시편 파단현상이 발생하지 않았다. Fig. 6은 진응력과 진변형률의 그래프로 변형 속도가 증가할수록 응력값이 높아진다. 이는 변형 속도가 증가할수록 재료가 경화되어 응력값이 높아지며, 온도가 증가할수록 재료가 연화되어 응력값이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 5 Shear of deformed specimen during each condition

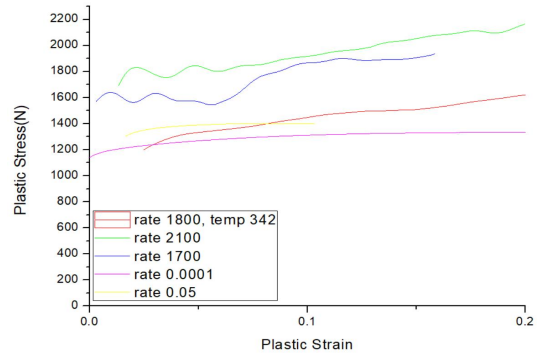


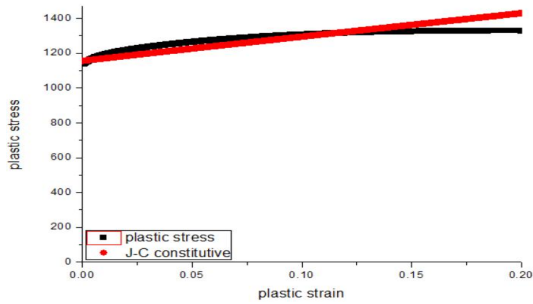
Fig. 6 Plastic strain-stress curve of Ti-6Al-4V each strain rate

4.2 구성방정식 계수값 결정

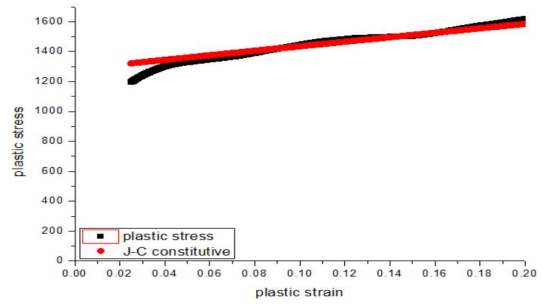
구성방정식의 계수값은 SHPB 시험을 통하여 획득한 결과값을 이용하여 기준 변형률로 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 나타낸다. 본 연구에서는 상온과 고온의 SHPB시험을 통하여 획득한 그래프를 이용하여 오리진의 커브피팅으로 계수값을 획득하였다. 이를 Table 1에 나타내었다. 커브를 피팅한 결과 데이터의 정확성을 나타내는 R²값은 0.9498로 커브 피팅이 유의하다고 판단할 수 있었다. Fig. 7은 변형률 속도 변화에 따른 SHPB시험 결과값과 예측한 계수값을 적용한 J-C 구성방정식이 나타내는 결과값을 그래프로 나타내었다. J-C 구성방정식으로 획득한 응력 변형률 커브가 시험으로 획득한 데이터와 변형률 속도변화에 따라 실험하여 얻은 결과와 구성방정식으로 산정되는 응력의 변화가 유사하게 접근되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 온도에 변화에 따른 SHPB 실험 결과와 구성방정식으로 예측한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 온도가 높아질수록 응력 증가가 낮아지고 있으며 구성방정식으로 산정되는 응력의 변화와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Johnson-Cook constitutive parameters of Ti-6Al-4V using 3D printer specimen

	A(Mpa)	B(Mpa)	n	C	m
value	1437.640	1641.456	0.9772	0.021	0.895

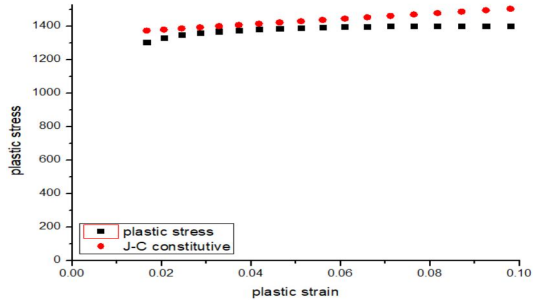


(a) rate 0.0001, temperature 22 °C



(e) rate 1800, temperature 342 °C

Fig. 7 Comparison of data using SHPB experimental data and constitutive equation coefficient



(b) rate 0.05, temperature 22 °C

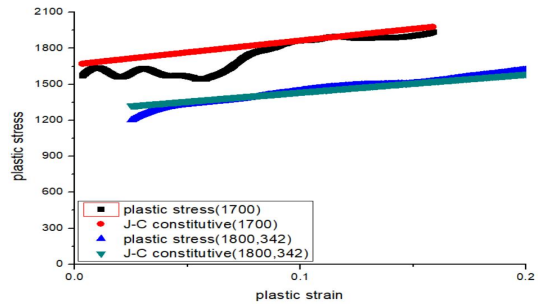
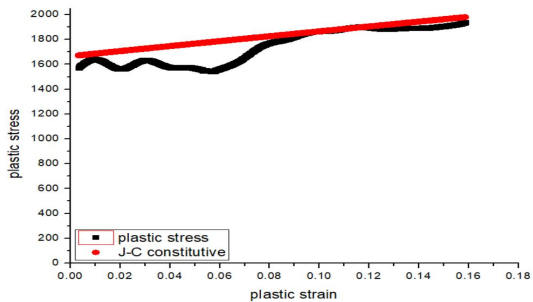
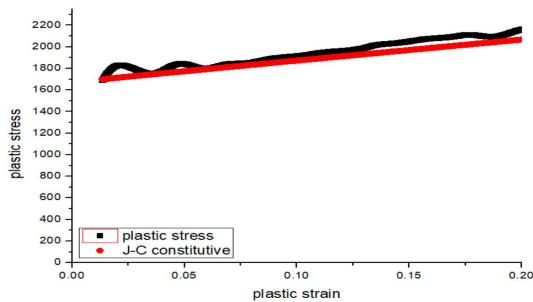


Fig. 8 Comparison of experimental plastic stresses and plastic strains to the Johnson-Cook model on temperature variation



(c) rate 1700, temperature 22 °C



(d) rate 2100, temperature 22 °C

5. 결론

본 연구는 Ti-6Al-4V 분말 재료를 이용하여 3D 프린트로 시편을 제작하였다. 그리고 이를 이용하여 SHPB 실험을 수행하였으며 구성방정식의 계수값을 구하기 위하여 획득한 데이터를 이용하여 커브피팅으로 계수값을 구하고 실험과 계수값으로 예측한 구성방정식을 비교하여 다음과 같은 결론을 획득할 수 있었다.

1. SHPB 실험으로 Ti-6Al-4V 재료를 이용하여 3D 프린트로 제작한 시편의 고온, 동적 하중 하에서 변형 거동의 특성을 규명하였다.
2. 상온에서의 유동응력은 속도가 증가할수록 경화현상으로 인하여 응력이 높아지며 온도가 높

아질수록 연화현상으로 응력이 낮아지는 것을 확인하였다.

3. SHPB 실험으로 Ti-6Al-4V 재료를 이용하여 3D 프린터로 제작한 시편의 고온, 동적 하중 하에서 변형 거동의 특성을 규명하였다.
4. Johnson-Cook(JC) 구성방정식의 변수를 A는 1437.640Mpa, B는 1641.456Mpa, n은 0.9772 C는 0.021, m은 0.895로 결정하였다.

REFERENCES

1. Oh, Y. J., Seok, S.h., Lee, S. H., Kim, K. M., Kwon, J. S., Lim, B. S. , "Evaluation of Physical Properties of Titanium Specimen Fabricated by 3D Printing Technique" Korean Society for Dental Materials, Vol. 43, No. 1, PP. 29-42, 2016.
2. Choi, J. W., Kim, H. C., "3D Printing Technologies-A Review" Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 1-8, 2015.
3. Kim, J. T., Woo, S. C., Kim, J.Y., and Kim T.W., "Compressive Deformation Behaviors of Aluminum Alloy in a SHPB Test" Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 36, No. 6, PP. 617-622, 2012.
4. Aviral Shrot, Martin Bäker, "Determination of Johnson-Cook Parameter from Machining Simulation", Computational Material Science Vol. 52, No. 1, pp. 298-304, 2012.
5. Hwang, J. h., Kim, N. S., Lee, H. G., Kim, D. C., "Determination of the Flow Stress of Zicaloy-4 under the High Strain-rate Condition Using Slot Milling Test", The Korean Society Mechanical Engineers, Vol. 37, No. 1, pp. 97-98, 2013.
6. Ahn, K. W., Kim, D. H., Kim, T. H., Jeon, E. C., "Determination and Verification of Flow Stress of Low-alloy Steel Using Cutting Test", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 5, pp. 50-56, 2014.
7. Mahmoud Shatla, , Christian Kerk, Taylan Altan, "Process Modeling in Machining. Part I: Determination of Flow Stress Data.", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 10, pp. 1511-1534, 2001.
8. Agmell, M., Ahadi, A., Stahl, J-E., "A Fully Coupled Thermomechanical Two-dimensional Simulation Model for Orthogonal Cutting: Formulation and Simulation", Journal of Engineering manufacture Vol. 223, No. 10, pp. 1735-1745, 2011.
9. An, W. J., Woo, M. A., Noh, H. G., Kang, B. S., Kim, J., "Design and Fabrication of Split Hopkinson Pressure Bar for Acquisition of Dynamic Material Property of Al6061-T6", Korean Society of Precision Engineering, Vol. 33, No. 7, pp. 587-594, 2016.
10. Lee, O. S. , Park, J. S. , Choi, H. B., Kim, H. M., "Characterization of Dynamic Deformation Behavior of Al7075-T6 at High Temperature by Using SHPB Technique", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 34, NO. 8, PP. 981-987, 2010.