https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.460

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

절삭 시뮬레이션에 사용되는 구성방정식 종류별 절삭력 예측

도재혁^a, 김태호^{b*}, 구병문^c

Prediction of Cutting Force by Type of Constitutive Equation Used in Cutting Simulation

Jae Hyeok Doh^a, Tae Ho Kim^{b*}, Byeung Mun Ku^c

^a School of Mechanical and Material Convergence Engineering, Gyeongsang National University ^b T&S Machining ^c Vehicle & Launcher System R&D Division, Hanwha-defense Co., Ltd.

ARTICLE INFO

ory:							
30	September	2022					
31	October	2022					
10	November	2022					
Metal cutting							
Cutting simulation							
Johnson-Cook constitutive equation							
S-K constitutive equation							
Stress-strain curve							
	ng ulatic utive	ary: 30 September 31 October 10 November ng nulation ok constitutive equation					

ABSTRACT

The constitutive equation shows the difference in the predicted result value related to cutting according to the coefficient value and type. Therefore, in this study, the cutting force and chip shape obtained from the cutting test for each cutting condition were applied as standards. And the simulation results applying the constitutive equation were compared. The constitutive equations used in this study are the Power-Law, Johnson-Cook, and S-K constitutive equations. Since the Power-Law constitutive equation is basically applied to the cutting simulation, it was used as the internal material property, and the Johnson-Cook constitutive equation and the S-K constitutive equation determined the coefficient value and performed simulation as a user property. As a result, it was confirmed that the tangential force and chip shape prediction in the cutting force and chip shape prediction using the S-K constitutive equation.

1. 서 론

AI70계열은 아연을 주 합금 성분으로 사용하고 좋은 내구강도와 높은 강도를 가지고 있어 항공, 우주, 군수산업에 많이 사용하고 가공성이 일정하나 용접성 및 작업성이 나쁜 특성을 가지고 있다. 그러나 자동차, 항공기와 같은 수송장비 산업에서 경량화를 통한 연료 효율성을 증대시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2]. 알루미늄 합금은 비강도가 높은 소재로 얇은 벽 구조로 가공하여도 강성과 강도를 유지할 수 있는 매우효과적인 소재이며 안전과 관련 이 있는 자동차와 항공기의 기계구조용 부품의 소재로 사용되고 있다. 알루미늄을 소재로 제품을 제작하기 위해서는 다양한 가공방 법이 있으나 특히 제품 제작에서 절삭가공을 많이 사용하고 있다. 절삭가공은 절삭속도, 이송, 절입량 등 절삭조건에 의하여영향을 받으며 결과를 획득하기 위하여 많은 시간과 비용이 소요된다. 이 를 극복하기 위하여 절삭 시뮬레이션을 사용하고 있다. 절삭 시뮬 레이션의 결과 예측에서 중요한 요소는 절삭조건, 소재 및 공구 등이 있으나 실제 절삭이 이루어지는 소재를 표현하는 방정식을 어떤 것을 사용하느냐에 따라 결과값이 많이 달라진다.

절삭에서 사용하는 소재의 구성방정식은 SHPB(split Hopkinson pressure bar)실험을 이용하여 응력-변형률 선도를 이용하여 계수

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-51-201-4075

E-mail address: kth0110@gmail.com (Tae Ho Kim).

를 결정하고 이를 소재의 물성으로 사용한다. 그러나 절삭 시뮬레이 션에서 사용하는 소재물성은 소프트웨어에 탑재되어 있는 물성을 사용하고 있으나 물성이 없는 소재의 경우 구성방정식을 적용하기 위하여 사용자 물성을 적용할 수 있어 다양하게 개발되어 있는 방정 식의 계수를 구하여 시뮬레이션에 적용하고 있다. 이중 가장 많이 사용되고 있는 모델은 Johnson-Cook 모델이다. 이 모델은 유동응 력을 strain, strain rate 및 온도의 함수로 기술하고 있다^[34].

Aviral Shrot등은 직교절삭 시험과 FEM 수치해석을 통하여 AISI 52100, 62HRC강의 Johnson-Cook 구성방정식 상수를 결 정하였으며^[5], 황과 안등은 Johnson-Cook 구성방정식 상수를 슬 롯밀링 시험을 통해 획득하였다^[6,7]. Mahmoud Shatla 등은 직교 슬롯밀링 시험을 통하여 AISI P20 mold steel 등 3 종의 금속에 대해 Flow-stress data를 획득하는 방법을 그리고 M Agmell등은 AISI4140 Johnson-Cook 강의모델 상수를 2차원 절삭시험과 FEM 수치해석을 통해 획득하였다^[8,9]. An등은 Al6061-T6 재료 의 동적 물성 획득을 위한 SHPB 장비의 설계변수를 결정하기 위 한 시뮬레이션을 수행하는 연구들이 진행되고 있다^[10]. 그리고 Ku 등은 S-K 구성방정식을 이용하여 절삭력 예측을 위한 Al 2519-T87 재료의 유동응력을 결정하였다^[11].

그래서 본 논문에서는 구성방정식의 계수 결정 및 검증하였다. 그리고 결정된 구성방정식을 절삭 시뮬레이션에 적용하여 절삭실험 으로 얻어진 실험값과 비교하고 Al 7075 재료의 절삭 시뮬레이션에 서 적용할 수 있는 구성방정식을 결정하는 것을 목표로 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 구성방정식

구성방정식은 절삭 및 소성 시뮬레이션에서 사용되는 물성으로 F는 가공 경화항(ε), G는 변형률 속도 경화항(ε), T는 열연화항 (M)의 함수로 구성되어 있다. 이를 식(1)에 나타내었다.

$$\sigma(\varepsilon \bullet \dot{\varepsilon} \bullet M) = F(\varepsilon) \bullet G(\dot{\varepsilon}) \bullet T(M) \tag{1}$$

각 항의 구성에 따라 다양한 방정식으로 구성되며 식(2)는 Johnson-Cook 구성방정식으로 (A + Bεⁿ)는 재료의 변형률 경 화를 나타내고 있으며, A는 초기항복응력, B는 경화상수, n은 경화지수, ε은 변형률을 나타낸다.

 $(1 + C \ln \frac{e}{e_0})$ 는 변형률 속도 경화를 나타내며, e 는 변형률 속 도, e_0 는 단위 변형률 속도 (1 mm/sec)를 나타낸다. 각각 변형률 속도가 sec-1인 경우의 응력-변형률 선도를 Ludwick의 식으로 나 타내었을 경우에 해당하는 상수들이다. 변형률속도 경화계수 C를 구하기 위하여 초기항복응력의 변화를 변형률 속도에 따라 나타낸 Log선도를 이용하게 된다.

이 때 C는 열연화 현상을 배제하고 등온 변형과정일 때 얻어지 게 되므로 초기항복이 발생할 때 구한다. *m*은 열연화계수이다.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^{2}] \left[1 + C\ln\left(\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right)\right]$$

$$\left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}}\right)^{m}\right]$$
(2)

식(3)은 S-K 구성방정식으로 변형률 속도항의 계수값 E에 의하 여 고속에서 응력값이 증가하는 현상을 기술할 수 있는 특징을 가 지고 있다 σ 는 유동응력, A는 항복강도, B와 C는 가공경화상수, D는 변형률 속도 경화상수, E는 고속에서 응력값이 증가하는 것 을 표현하는 변형률 속도 제어상수, m은 열연화계수, ε 은 유효소 성변형률, ε 은 변형률 속도, c_0 는 기준 변형률 속도, T는 온도, T_{melt} 는 재료의 용융온도, T_{ref} 는 실험온도를 의미한다.

S-K 구성방정식 계수값을 획득하기 위한 데이터는 상온에서 다 양한 속도를 변화시키면서 응력-변형률 선도를 획득하고 이를 진 응력-진변형률 선도로 변환 후 방정식의 계수값 선정에 적용한다. 그리고 고온에서는 충격속도를 일정하게 유지하고 온도 변화를 주 어 진응력-진변형률 선도를 획득하여 적용한다.

$$\sigma = [A + B(1 - \exp(-C\varepsilon))]$$

$$[Dln(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}) + \exp(E \cdot (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}))]$$

$$[1 - (\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}})]^m$$
(3)

식(4), (5), (6)은 Power-Law 구성방정식의 각항의 식을 나타내었 다. 식(4)의 σ_0 은 초기항복응력, ε_{cut} 는 컷오프변형, 1/n은 변형경화 지수를 나타내었다. 식(5)의 ε 는 변형률 속도로 낮은 변형률 감도와 높은 변형률 감도 사이의 전환에서 발생하는 변형률, ε_0 는 단위 변형률 속도, m_1 은 낮은변형률 감도계수이며, m_2 는 높은 변형률 감도계수이 다. 식(6)의 $c_0 \sim c_5$ 는 다항식 피팅에 대한 계수, T는 온도, T_{cut} 은 선형차단온도 T_{melt} 는 용용온도를 나타내고 있다.

구성방정식의 계수는 준정적 시험과 SHPB 시험에서 획득한 응 력-변형률 커브 데이터를 이용하여 구성방정식 계수값을 통계프로 그램 오리진 또는 매트랩과 같은 프로그램에서 비선형 커브 피팅 을 통하여 획득할 수 있다.

$$F(\varepsilon) = \sigma_0 \left[1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right]^{1/n}, \text{ if } \varepsilon < \varepsilon_{cut}$$
(4)

$$F(\varepsilon) = \sigma_0 \left[1 + \frac{\varepsilon_{cut}}{\varepsilon_0}\right]^{1/n}, \text{ if } \varepsilon < \varepsilon_{cut}$$

$$G(\varepsilon) = \left[1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right]^{1/m_1}, \text{ if } \varepsilon \leq \varepsilon_t$$

$$G(\varepsilon) = \left[1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right]^{1/m_1} \left[1 + \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_0}\right]^{1/m_1 - 1/m_2}, \quad (5)$$

$$\text{ if } \varepsilon < \varepsilon_t$$

$$T(M) = C_0 + C_1 T^1 + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 + C_5 T^5,$$

if $T < T_{cut}$

$$T(M) = T(T_{cut}) (1 - \frac{T - T_{cut}}{T_{melt} - T_{cut}}),$$

if $T \ge T_{cut}$
(6)

2.2 절삭조건 및 실험

2차원 절삭실험은 구성방정식을 적용한 시뮬레이션 결과값을 검 증하기 위하여 절삭조건에 따른 절삭력을 측정하였다. 최고 3500 rpm의 주축회전속도를 가지는 CNC선반을 이용하였다. 주축에 2차원 절삭 시편을 장착하고 공구메거진에 공구동력계를 부착하였 다. 그리고 공구동력계 상부에 공구 홀더 및 공구를 장착하여 절삭



(a) Experimental equipment



(b) Specimen

Fig. 1 Specimen and test equipment for two-dimensional cutting experiments

Table 1 Cutting conditions for comparison of cutting forces					
Case	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)			
1		0.1			
2	200	0.2			
3		0.3			
4		0.1			
5	300	0.2			
6		0.3			
7		0.1			
8	400	0.2			
9		0.3			

Table 1 Cutting conditions for comparison of cutting forces

력을 획득하였다.

Fig. 1의 (a)는 시편 및 절삭력 측정 장비가 부착되어 있는 그림 을 나타내었다. 시편은 회전하고 공구메거진이 부착되어있는 공구 가 직선적으로 이동하여 시편에 접근하여 2차원 절삭실험으로 절 삭력을 측정한다. Fig. 1의 (b)는 2차원 절삭실험에 사용된 시편을 나타내고 있다. 시편은 주축에 장착되고 절삭실험 부위는 디스크 형태로 직경 Ø50 mm, 두께는 3 mm로 제작하였다. 시편의 재료 는 Al7075 재료를 사용하였으며 공구는 대구텍 TPGN 220404 초경공구를 사용하였다.

Table 1은 구성방정식을 적용한 시뮬레이션의 결과값을 검증하 기 위한 조건으로 절삭속도와 이송의 변화를 나타내었다. 절삭조 건은 공구회사에서 제시한 절삭조건을 절삭실험에서 적용하였다.

2.3 절삭시뮬레이션

구성방정식을 적용하기 위한 시뮬레이션은 AdvantEdge FEM 7.4 버전으로 2차원 절삭 가공에서 평면변형률의 열 구조 연성 유 한요소 모델을 생성하여 사용한다. 공작물은 탄소성 거동에서 변 형률, 변형률 속도 및 온도에 의한 유동응력에 의해 결정된다고 가정하였다. 본 연구에서 사용한 소프트웨어는 절삭 전용 시뮬레 이션 프로그램으로 절삭조건인 절삭속도, 절입량, 이송속도를 입력 하여 절삭력, 칩형상, 절삭온도 등을 절삭에서 발생하는 여러 가지 물리적 데이터를 예측할 수 있다. 절삭 시뮬레이션에서 절삭력에 영향을 미치는 조건은 다양하다. 절삭조건인 이송속도, 절삭속도, 절입량과 절삭 재료 및 절삭 공구 재료 등이 절삭력에 영향을 미친 다. 그리고 절삭 공구의 각도, 마찰계수 및 격자 크기 등 기하학적 인 부분 또한 절삭력에 영향을 미친다.

본 연구에서 사용된 절삭 시뮬레이션의 일반적인 공정은 재료시험 으로 물성 데이터를 확보하고 절삭조건을 입력한 후 시뮬레이션을 수행한 후 TECPLOT으로 절삭에서 발생하는 물리적 데이터를 확인 할 수 있다. 그리고 사용자 물성 모델인 구성방정식 적용을 위해서는 포트란을 이용하여 구성방정식을 적용하기 위한 프로그램을 코딩하



Fig. 2 Change of plastic stress-plastic strain according to the speed change obtained by SHPB experiment

고 DLL 파일을 생성하고 솔버에 적용한다. 그리고 소재 물성값은 SHPB 실험을 통하여 획득한 데이터를 이용하여 계수값을 획득하고 이를 절삭 재료의 물성을 적용한 후 기본조건인 절삭조건을 입력하고 시뮬레이션을 실행한 후 물리적 데이터를 확인할 수 있다.

3. 구성방정식 계수 검증

3.1 구성방정식 계수 결정

본 연구에서는 AI7075 재료를 사용하였으며 구성방정식의 계수 값은 SHPB 시험을 통하여 획득한 결과값을 이용하여 기준 변형률 로 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 나타낸다. 본 연구에서 는 상온과 고온의 SHPB실험을 통하여 획득한 그래프를 이용하여 오리진의 커브피팅으로 계수값을 획득하였다.

Fig. 2는 실험 조건별 소성 진응력-진변형률 선도를 나타내고 있 다. 속도가 0.001 s⁻¹의 저속구간은 만능시험기를 이용하여 압축실 험을 수행하여 데이터를 획득하였다. 그리고 고속구간은 1300 s⁻¹, 1700 s⁻¹, 2000 s⁻¹, 3000 s⁻¹조건 고온구간은 고속구간을 3000 s⁻¹ 로 고정하고 200℃, 300℃에서 SHPB 압축실험을 통하여 응력-변 형률 곡선을 획득하였다. 그리고 획득한 응력-변형률 선도를 진응 력-진변형률 선도로 변환하였다. 진응력-진변형률 선도에서 탄성 구간을 제외하면 소성진응력-진변형률 곡선이 완성된다. 이를 이 용하여 기준 변형률 속도를 0.001 s⁻¹으로 비선형 커브 피팅으로 계수값을 구하였다. Table 2와 Table 3은 Johnson-Cook 구성방 정식과 S-K 구성방정식의 계수값을 나타내었다.

Table 2 Johnson-Cook constitutive equation parameters of Al7075

Parameter	value
A(Mpa)	375.748
B(Mpa)	869.6339
n	0.4011
С	0.0246
m	0.87208

Table 5 5-18 constitutive equat	ion parameters of Airors
Parameter	value
A (Mpa)	482.749
B (Mpa)	330.79
С	12.83203
D	0.00814
Е	4.36414E-8
m	1.21111

Table 3 S-K constitutive equation parameters of Al7075

3.2 구성방정식 계수 검증

구성방정식의 계수 검증은 결정된 계수를 수식에 적용하고 이를 SHPB 실험에서 얻어진 실험 데이터와 비교하였다. Fig. 3은 결정된 구성방정식이 변형률 속도 및 온도에 변화에 따른 SHPB 실험 결과와 구성방정식으로 예측한 결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 3의 (a)는 Johnson-Cook 구성방정식과 실험 결과를 비교한 그래프로 저속 변형률 속도(0.001 s⁻¹)에서 낮은 변형률 에서는 정확하게 응력값을 예측하고 있으나 변형률이 0.08이상에서는 구성방정식으로 예측한 값이 높아졌다. 그리고 고속에서는 변형률 속도가 증가하더라도 하나의 값으로 예측하고 있으며 고온에서는 실험값보다 낮은 응력값 으로 예측되었다. Fig. 3의 (b)는 S-K 구성방정식과 실험 결과를 비교한 그래프로 낮은 변형률 속도(0.001 s⁻¹)에는 Johnson-Cook 구성방정식과 동일하게 변화하였으나 변형률 속도가 고속일 때는 구간별로 구분할 수 있을 정도로 응력값을 예측하고 고온에서는



Fig. 3 Comparison of the constitutive equation by the determined coefficient and the SHPB experimental data



Fig. 4 Fx and Fy cutting forces by cutting conditions

Table 4	ŀ	Two-dimension	al	cutting	force	e by	cutting	conditions

Case	Cutting speed	Feed	Cutting experimental		
Case	(m/min)	(mm/rev)	Fx(N)	Fy(N)	
1		0.1	296.145	221.511	
2	200	0.2	493.007	319.553	
3		0.3	703.739	401.052	
4		0.1	358.171	287.203	
5	300	0.2	496.281	329.140	
6		0.3	611.145	351.155	
7		0.1	309.644	260.637	
8	400	0.2	424.687	299.172	
9		0.3	503.916	309.312	

비슷하게 응력값을 예측하고 있다.

4. 구성방정식을 적용한 절삭력 비교

4.1 절삭실험으로 획득한 절삭력

절삭실험과 시뮬레이션의 결과 데이터를 비교 분석하기 위하여 절삭실험으로 획득한 절삭력을 기준으로 하나의 값으로 결정하 기 위하여 절삭력을 평균하였다. Fig. 4는 case 02인 절삭속도 200 m/min, 이송 0.2 mm/rev 조건에서 절삭실험으로획득한 절 삭력을 나타내고 있으며 주분력(tangential force)을 Fx로 나타내 었으며 배분력(radial force)을 Fy로 나타내었다. 그리고 주분력의 평균값을 Fx_ave, 배분력의 평균값을 Fy_ave로 나타내었다. 절삭 력을 평균값으로 나타낸 이유는 절삭 시뮬레이션에서 얻어진 절삭 력과 비교하기 위하여 절삭력을 평균값으로 결정하였다.

Table 4는 절삭실험에서 얻은 절삭조건별 평균 주분력과 평균배 분력을 나타내었다. 절삭속도를 200 m/min으로 고정하고 이송을 0.1 mm/rev, 0.2 mm/rev, 0.3 mm/rev으로 변화하면 평균 주분력 은 296.145 N, 358.171 N, 309.644 N으로 변화하였다. 그리고 절삭속도를 300 m/min으로 고정하고 이송을 변화하면 평균 주분 력은 358.171 N, 496.281 N, 611.145 N으로 변화하였다. 절삭속 도를 400 m/min으로 고정하고 이송을 변화하면 평균 주분력은 309.644 N, 424.687 N, 503.916 N으로 변화하였다. 절삭속도를



Fig. 5 Fx and Fy cutting forces by cutting conditions

고정하고 이송이 변화할 때는 평균 주분력이 직선적으로 증가하였 다. 평균 배분력은 절삭속도를 200 m/min으로 고정하고 이송을 0.1 mm/rev, 0.2 mm/rev, 0.3 mm/rev으로 변화하면 평균 주분력 은 221.511 N, 319.553 N, 401.052 N으로 변화하였다. 그리고 절삭속도를 300 m/min으로 고정하고 이송을 변화하면 평균 주분 력은 287.203 N, 329.140 N, 351.155 N으로 변화하였다. 절삭속 도를 400 m/min으로 고정하고 이송을 변화하면 평균 주분력은 260.637 N, 299.172 N, 309.312 N으로 변화하였다. 평균 배분력 은 주분력 변화보다 절삭력 증가폭이 낮은 것을 확인하였다. 배분 력은 절삭속도 200 m/min에서 이송을 증가시키면 절삭력이 증가 하고 절삭속도 300 m/min, 400 m/min에서는 절삭력이 낮게 증가 하였다. 이송속도를 0.1 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 200 m/min, 300 m/min, 400 m/min으로 변화시키면 평균 주분력은 296.145 N, 358.171 N, 309.644 N으로 변화하였다. 이송속도를 0.2 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화시키면 평균 주분력은 493.007 N, 496.281 N, 424.987 N으로 변화하였다. 이송속도를 0.3 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화시키면 평균 주분력은 703.739 N, 611.145 N, 503.916 N으로 변화하였다. 이송을 0.1 mm/rev, 0.2 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화시키면 평균 주분력의 변화가 적었으니 이송을 0.3 mm/rev으로 고정하고 절삭 속도를 변화시키면 주분력이 낮아졌다.

4.2 구성방정식 변화에 따른 시뮬레이션 절삭력

절삭 시뮬레이션은 세 가지 구성방정식을 적용하여 절삭력을 분 석하고 적용 가능한 구성방정식을 결정하였다.

Fig. 6은 case 02인 절삭속도 200 m/min, 이송 0.2 mm/rev 조 건에서 S-K 구성방정식을 적용한 절삭 시뮬레이션에서 획득한 절 삭력을 나타내었다. 주분력을 Fx로 나타내었으며 배분력을 Fy로 나타내었다. 그리고 주분력의 평균값을 Fx_ave, 배분력의 평균값 을 Fy_ave로 나타내었다. 절삭실험 데이터와 비교분석을 위하여 절삭력을 평균하여 나타내었다.

Table 5는 Johnson-Cook 구성방정식을 적용한 시뮬레이션의 절삭조건별 평균 주분력과 평균 배분력을 나타내고 있다. 절삭속

constitutive equation by enanging euting conditions					
Casa	Cutting speed	Feed	J-C constitutive equation		
Case	(m/min)	(mm/rev)	Fx (N)	Fy (N)	
1		0.1	380.385	181.986	
2	200	0.2	739.582	338.414	
3		0.3	1075.02	481.994	
4		0.1	381.062	182.231	
5	300	0.2	744.954	341.624	
6		0.3	1079.230	481.754	
7		0.1	379.869	181.178	
8	400	0.2	741.610	338.939	
9		0.3	1080.300	482.962	

Table 5 Simulation cutting force by applying Johnson-Cook constitutive equation by changing cutting conditions

도를 200 m/min으로 고정하고 이송을 0.1 mm/rev, 0.2 mm/rev, 0.3 mm/rev으로 변화하면 평균 주분력은 380.385 N, 739.582 N, 1075.02 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 181.986 N, 338.414 N, 481.994 N으로 변화하였다. 그리고 절삭속도를 300 m/min으 로 고정하고 이송을 변화하면 주분력은 381.062 N, 744.954 N, 1079.230 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 182.231 N, 341.624 N, 481.754 N으로 변화하였다. 절삭속도를 400 m/min으로 고정 하고 이송을 변화하면 주분력은 379.869 N, 741.610 N, 1080.300 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 181.178 N, 338.939 N, 482.962 N으로 변화하였다. 이송속도를 0.1 mm/rev으로 고정하 고 절삭속도를 200 m/min, 300 m/min, 400 m/min으로 변화시키 면 평균 주분력은 380.385 N, 381.062 N, 379.869 N으로 변화하 였으며 평균 배분력은 181.986 N, 182.231 N, 181.178 N으로 변 화하였다. 이송속도를 0.2 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화 시키면 평균 주분력은 739.582 N, 744.954 N, 741.610 N으로 변 화하였으며, 평균 배분력은 338.414 N, 341.624 N, 338.939 N으 로 변화하였다. 이송속도를 0.3 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를

Table 6 Cutting force of cutting simulation by S-K constitutive equation

	Cutting speed	Feed	S-K constitutive equation		
Case	(m/min)	(mm/rev)	Fx (N)	Fy (N)	
1		0.1	281.736	130.579	
2	200	0.2	514.795	184.842	
3		0.3	737.182	202.718	
4		0.1	272.611	120.289	
5	300	0.2	511.096	164.682	
6		0.3	749.772	178.769	
7		0.1	269.481	113.839	
8	400	0.2	513.977	155.171	
9		0.3	711.080	165.766	

변화시키면 평균 주분력은 1075.020 N, 1079.230 N, 1080.300 N으로 변화하였으며, 평균 배분력은 481.994 N, 481.754 N, 482.962 N으로 변화하였다.

절삭속도를 고정하고 이송속도를 증가시키면 평균 주분력과 평 균 배분력 모두 직선적으로 증가하고 있으며 평균 주분력 증가량 이 평균 배분력 증가량 보다 높게 나타났다.

Table 6은 S-K 구성방정식을 적용한 시뮬레이의 절삭조건별 주 분력과 배분력을 나타내고 있다. 절삭속도를 200 m/min으로 고정 하고 이송을 0.1 mm/rev, 0.2 mm/rev, 0.3 mm/rev으로 변화하면 평균 주분력은 281.736 N, 514.795 N, 737.182 N으로 변화하였 으며 평균 배분력은 130.579 N, 184.842 N, 202.718 N으로 변화 하였다. 그리고 절삭속도를 300 m/min으로 고정하고 이송을 변화 하면 평균 주분력은 272.611 N, 511.096 N, 749.772 N으로 변화 하였으며 평균 배분력은 120.289 N, 164.682 N, 178.769 N으로 변화하였다. 절삭속도를 400 m/min으로 고정하고 이송을 변화하 면 평균 주분력은 269.481 N, 513.977 N, 711.080 N으로 변화하 였으며 평균 배분력은 113.839 N, 155.171 N, 165.766 N으로 변 화하였다. 절삭속도를 고정하고 이송속도를 증가시키면 평균 주분 력 변화는 Johnson-Cook과 비슷한 경향성을 보였으나 전체 평균 주분력은 낮게 나타났다.

이송속도를 0.1 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 200 m/min, 300 m/min, 400 m/min으로 변화시키면 평균 주분력은 281.736 N, 272.611 N, 269.481 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 130.579 N, 120.682 N, 113.839 N으로 변화하였다. 이송속도를 0.2 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화시키면 평균 주분력은 514.795 N, 511.096 N, 513.977 N으로 변화하였으며, 평균 배분 력은 184.842 N, 164.682 N, 155.171 N으로 변화하였다. 이송속 도를 0.3 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화시키면 평균 주분 력은 737.182 N, 749.772 N, 711.080 N으로 변화하였으며, 평균

Table 7 Cutting force of cutting simulation by Power-Law constitutive equation

Case Cutting sp (m/min)	Cutting speed	Feed	P-L constitutive equation		
	(m/min)	(mm/rev)	Fx (N)	Fy (N)	
1		0.1	276.335	88.329	
2	200	0.2	519.201	136.312	
3		0.3	741.255	180.231	
4		0.1	277.4	87.571	
5	300	0.2	520.637	135.494	
6		0.3	744.042	181.955	
7		0.1	278.979	88.754	
8	400	0.2	520.309	137.989	
9		0.3	745.138	182.184	



Fig. 6 Fx and Fy simulation cutting forces by cutting conditions

배분력은 202.718 N, 178.769 N, 165.766 N으로 변화하였다.

Table 7은 Power-Law 구성방정식을 적용한 시뮬레이션의 절 삭조건별 주분력과 배분력을 나타내고 있다. 절삭속도를 200 m/min으로 고정하고 이송을 0.1 mm/rev, 0.2 mm/rev, 0.3 mm/rev으로 변화하면 평균 주분력은 276.335 N, 519.201 N, 741.255 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 88.329 N, 136.312 N, 180.231 N으로 변화하였다. 그리고 절삭속도를 300 m/min으 로 고정하고 이송을 변화하면 평균 주분력은 277.4 N, 520.637 N, 744.042 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 87.571 N, 135.494 N, 181.955 N으로 변화하였다. 절삭속도를 400 m/min 으로 고정하고 이송을 변화하면 평균 주분력은 278.979 N, 520.309 N, 745.138 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 88.754 N, 137.989 N, 182.184 N으로 변화하였다.

이송속도를 0.1 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 200 m/min, 300 m/min, 400 m/min으로 변화시키면 평균 주분력은 276.335 N, 277.400 N, 278.979 N으로 변화하였으며 평균 배분력은 88.329 N, 87.571 N, 88.754 N으로 변화하였다. 이송속도를 0.2 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화시키면 평균 주분력은 519.201 N, 520.637 N, 520.309 N으로 변화하였으며, 평균 배분 력은 136.312 N, 135.494 N, 137.989 N으로 변화하였다. 이송속 도를 0.3 mm/rev으로 고정하고 절삭속도를 변화시키면 평균 주분 력은 741.255 N, 744.255 N, 745.138 N으로 변화하였으며, 평균 배분력은 180.231 N, 181.955 N, 182.184 N으로 변화하였다. 절



Fig. 7 Changes in cutting force to changes in the constitutive equation(cutting condition)

force error by constitutive equations as material properties								
	J-C con	stitutive	S-K cor	S-K constitutive		P-L constitutive		
case	equa	ation	equation		on equation		equation	
	Fx (N)	Fy(N)	Fx (N)	Fy (N)	Fx (N)	Fy (N)		
1	84.24	-39.53	-14.41	-90.93	-19.81	-133.18		
2	246.58	18.86	21.79	-134.71	26.19	-183.24		
3	371.28	80.94	33.44	-198.33	37.52	-220.82		
4	22.89	-104.97	-85.56	-166.91	-80.77	-199.63		
5	248.67	12.48	14.82	-164.46	24.36	-193.65		
6	468.09	130.60	138.63	-172.39	132.90	-169.20		
7	70.23	-79.46	-40.16	-146.80	-30.67	-171.88		
8	316.92	39.77	89.29	-144.00	95.62	-161.18		
9	576.38	173.65	207.16	-143.55	241.22	-127.13		





Fig. 8 Comparison of Fx force obtained from cutting experimentals and simulations



Fig. 9 Comparison of Fy force obtained from cutting experimentals and simulations

삭속도를 고정하고 이송속도를 증가시키면 평균 주분력 변화는 S-K 구성방정식 물성에서 얻어진 절삭력과 비슷한 절삭력과 경향 성을 보였다.

Fig. 7은 절삭조건별 절삭시뮬레이션에 적용된 구성방정식의 변 화에 따른 평균 주분력과 평균 배분력의 변화를 나타내었다. S-K 와 Power-Law 구성방정식을 물성으로 사용하여 얻은 평균 절삭 력은 비슷한 경향성을 얻었으나 Johnson-Cook 구성방정식을 물 성으로 사용하여 얻어진 평균 절삭력은 S-K와 Power-Law 구성 방정식을 물성으로 획득한 절삭력보다 높게 나타났다.





(d) Cutting experiment Fig. 10 Chip formation in case 09 condition

4.3 절삭실험과 시뮬레이션에서 획득한 절삭력 비교

절삭실험을 기준으로 구성방정식을 물성으로 적용하여 얻어진 평균 절삭력의 변화를 비교 분석하였다. Table 8은 절삭실험으로 얻은 평균 절삭력을 기준으로 시뮬레이션에서 얻어진 절삭력과의 오차를 나타내고 있다. Johnson-Cook 구성방 정식에서 얻어진 최 대 평균 주분력오차는 case 9에서 나타났다. 평균 주분력은 최대 576 N의 오차를 나타내었으며 평균 배분력은 최대 173.65 N의 오 차를 나타내었다. 그리고 S-K와 Power-Law 구성방정식에서 얻 어진 평균 주분력 오차는 case 9에서 207.16 N과 241.22 N의 오 차를 보였으며 평균 배분력은 case 3에서 -198.33 N과 -220.82 N의 오차를 나타내었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 절삭실험과 시뮬레이션에서 얻은 평균 주분력과 평균 배분력을 나타내었다. 평균 주분력의 결과는 Johnson- Cook 구성방정식을 적용한 시뮬레이션에서 가장 큰 오차를 나타내고 있 으며 S-K와 Power-Law 구성방정식을 적용한 시뮬레이션으로 예 측한 절삭력은 비슷한 경향성을 보였다. 평균 배분력은 S-K와 Power-Law 구성방정식을 적용한 시뮬레이션에서 예측한 결과보 다 Johnson-Cook 구성방정식으로 예측한 결과가 평균 배분력 예 측에 적정할 것으로 판단된다. 시뮬레이션에서 절삭력을 예측할 때는 절삭에 많은 영향을 주는 주분력을 기준으로 절삭력을 예측 하기 때문에 S-K 구성방정식으로 절삭력을 예측하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

4.4 절삭실험과 시뮬레이션에서 획득한 절삭칩 비교

절삭 칩형상을 확인하는 이유는 절삭칩의 형상이 절삭에서 표면 형상에 영향을 미치는 것과 절삭력에 영향을 확인한다.

Fig. 10은 case 09에서 절삭실험과 시뮬레이션에서 발생하는 칩 형상을 나타내었다. Fig. 10의 (a)는 Johnson-Cook 구성방정식을 적용한 시뮬레이션에서 얻어진 칩형상 유동형 칩이 발생하는 것을 확인하였으며 칩 두께가 두꺼워지면서 전단각이 낮아지고 이로 인 하여 절삭력에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Fig. 10의 (b)는 S-K 구성방정식을 적용한 시뮬레이션에서 얻어진 칩형상으로 Johnson-Cook 구성방정식과 다르게 톱니형 칩의 형태를 나타내 고 있는 것을 확인하였다. Fig. 10의 (c)는 Power-Law 방정식을 적용한 시뮬레이션에서 얻어진 칩형상으로 Johnson-Cook 구성 방정식과 동일하게 유동형 칩형태를 나타내고 있으나 전단각이 높 아지면서 절삭력이 낮아지는 것을 알 수 있었다. Fig. 10의 (d)는 절삭실험으로 얻어진 칩형상으로 전단형 칩의 형상을 하고 있었다 그래서 칩형상을 예측할 때는 S-K 구성방정식으로 절삭칩을 예측 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

5. 결 론

절삭실험을 기준으로 구성방정식을 변화시키면서 절삭 시뮬레 이션에 적용하여 얻어진 절삭력과 물리적 현상 변화를 확인한 결 과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Johnson-Cook 구성방정식에서 얻어진 최대 평균 주분력과 배 분력 오차는 case 9에서 나타났으며 평균 주분력은 최대 576 N의

오차를 나타내었으며 평균 배분력은 최대 173.65 N의 오차를 나 타내었다. 그리고 S-K와 Power-Law 구성방정식에서 얻어진 평 균 주분력 오차는 case 9에서 207.16 N과 241.22 N의 오차를 보 였으며 평균 배분력은 case 3에서 -198.33 N과 -220.82 N의 오차 를 나타내었다. 절삭력은 Johnson-Cook 구성방정식을 적용하여 획득한 결과보다 S-K와 Power-Law 구성방정식을 적용한 시뮬레 이션으로 결과를 예측하는 것이 절삭실험에서 얻어진 결과와 비슷 한 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 그리고 칩형상은 Johnson -Cook과 Power-Law 구성방정식에서 획득한 시뮬레이션 결과에 서는 유동형 칩이 생성되었으나 S-K 구성방정식을 적용한 시뮬레 이션 결과에서는 톱니형 칩이 생성되었다. 그래서 기준이 되는 절 삭실험에서 얻어진 절삭칩 형상과 비교한 결과 S-K 구성방정식을 적용한 시뮬레이션에서 획득한 칩 형상이 절삭실험과 일치하였다. 그래서 최종적으로 AI7075 재료의 절삭 예측에서는 절삭력과 칩 형상 관점에서는 S-K 구성방정식을 적용하여 시뮬레이션하여 절 삭 관련 물리량을 예측하는 것이 정확한 물리량을 획득할 수 있다 는 결론을 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R111A3044394).

References

- Mohan, K. S., Pramod, R., Shashi, K. M. E., Govindaraju, H. K., 2014, Evaluation of Fracture Toughness and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 7075, T6 with Nickel Coating, Procedia Engineering, 97 178-185, https://doi.org/10.1016/ j.proeng.2014.12.240.
- [2] Odeshi, A. G., Adesola, A.O., Badmos, A. Y., 2013, Failure of AA6061 and 2099 Aluminum Alloys under Dynamic Shock Loading, Eng. Fail. Anal., 35 302-314, https://doi.org/10.1016/ j.engfailanal.2013.02.015.
- [3] Kim, J. T., Woo, S. C., Kim, J. Y., Kim, T. W., 2012, Compressive Deformation Behaviors of Aluminum Alloy in a SHPB Test, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., 36:6 617-622, https://doi.org/ 10.3795/KSME-A.2012.36.6.617.
- [4] Park, D. G., Kim, T. H., Jeon, E. C., 2018, Flow Stress Determination of Johnson-Cook Model of Ti-6Al-4V Material using 3D Printing Technique, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 17:4 64-69, https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4.064.

- [5] Shrot, A., Bäker, M., 2012, Determination of Johnson-Cook Parameter from Machining Simulation, Comput. Mater. Sci., 52:1 298-304, https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011. 07.035.
- [6] Hwang, J. H., Kim, N. S., Lee, H. Y., Kim, D. C., 2013, Determination of the Flow Stress of Zicaloy-4 under the High Strain-rate Condition Using Slot Milling Test, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., 37:1 67-75, https://doi.org/10.3795/KSME-A. 2013.37.1.067.
- [7] Ahn, K. W., Kim, D. H., Kim, T. H., Jeon, E. C., 2014, Determination and Verification of Flow Stress of Low-alloy Steel Using Cutting Test, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 13:5 50-56, https://doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.5.050.
- [8] Shatla, M., Kerk, C., Altan, T., 2001, Process Modeling in Machining. Part I: Determination of Flow Stress Data, Int. J. Mach. Tools Manuf., 41:101511-1534, https://doi.org/10.1016/ S0890-6955(01)00016-5.
- [9] Agmell, M., Ahadi, A., Stahl, J.-E., 2011, A Fully Coupled Thermomechanical Two-dimensional Simulation Model for Orthogonal Cutting: Formulation and Simulation, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B-J. Eng. Manuf., 225:10 1735-1745, https://doi.org/10.1177/0954405411407137.
- [10] An, W. J., Woo, M. A., Noh, H. G., Kang, B. S., Kim, J., 2016, Design and Fabrication of Split Hopkinson Pressure Bar for Acquisition of Dynamic Material Property of Al6061-T6, J. Korean Soc. Precis. Eng., 33:7 587-594, https://doi.org/10.7736/ KSPE.2016.33.7.587.
- [11] Ku, B. M., Kim, T. H., Jeon, E. C., 2019, Determination of Flow Stress Coefficient in S-K Constitutive Equation of Al2519-T87 Material for Cutting Force Prediction in Cutting Simulation, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 28:5 293-299, https://doi.org /10.7735/ksmte.2019.28.5.293.



Jae Hyeok Doh

Assistant Professor in the School of Mechanical and Material Convergence Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is structural analysis, design optimization, design for additive manufacturing, uncertainty quantification, and prognostics and health management. E-mail: jdoh@gnu.ac.kr



Tae Ho Kim

Ph. D. CEO of T&S Machining. His research interest are optimization of cutting simulation, high speed material properties and cutting conditions. E-mail: kth0110@gmail.com



Byeung Mun Ku

Ph.D. Vehicle & Launcher System R&D Division of Hanwha-defense. His research interest are optimization of cutting simulation, high speed material properties and cutting conditions.

E-mail: byeungmun.ku@hanwha.com