



절삭시뮬레이션에서 절삭력 예측을 위한 Al2519-T87 재료의 S-K 구성방정식 유동응력 계수 결정

구병문^{ab}, 김태호^{c*}, 전언찬^d

Determination of Flow Stress Coefficient in S-K Constitutive Equation of Al2519-T87 Material for Cutting Force Prediction in Cutting Simulation

Byeung Mun Ku^{ab}, Tae Ho Kim^{c*}, Eon Chan Jeon^d

^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Dong-A University, 37, Nakdong-daero 550 beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

^b Vehicle & Launcher System R&D Division, 799, Gongdan-ro, Seongsan-gu, Changwon, Gyeongnam-do, 51540, Korea

^c T&SMachining, 71, Mieumsandan 5-ro 41beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46744, Korea

^d Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, 37, Nakdong-daero 550 beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 July 2019
Revised 13 August 2019
Accepted 16 September 2019

Keywords:

Al2519-T87
S-K Constitutive equation
Cutting force
Split hopkinson pressure bar (SHPB)
Cutting simulation

ABSTRACT

Al2519-T87 is a material mainly used in defense products. It is applied in armored vehicles as a bulletproof material in Korea. Al2519-T87 was generally developed as a plate material, and Johnson-Cook flow stress determination was conducted to carry out studies on welding and bulletproofing for joining. However, Johnson-Cook constitutive equation has difficulty expressing speed. An alternative is needed to address this issue. In particular, the cutting force used in manufacturing the product has a great influence on the cutting force due to speed and temperature. Therefore, in this paper, we aim to determine the flow stress of the S-K constitutive equation which can be applied in cutting simulation.

1. 서론

알루미늄 합금은 군용기, 헬리콥터, 수륙양용차량 등의 구조 부품에서 많이 사용하였다. 이는 다른 금속 소재에 비해 비중이 낮아 경량화가 가능하다. 특히 Al2519-T87 알루미늄 합금은 방탄소재로 특정 강도, 우수한 용접성 및 부식 저항 측면에서 기존의 알루미늄 합금과 달리 탁월한 성능을 보유하고 있다^[1]. 그래서 국내 외에서 방산 제품의 구조물 및 외부 방탄소재로 많이 이용되고 있다.

국내에서 Al2519-T87 알루미늄 합금에 대한 연구는 Ryu 등은 원치 마운트의 형상 변경과 용접부 강도 개선을 통하여 안전율을

향상시키고 구조해석을 통하여 구조설계 개선의 타당성 및 유효성을 입증하였다^[2]. Bae 등은 용접후 냉각속도 변화에 따른 석출물 분석과 미세조직을 통하여 용접부 강도저하를 줄일 수 있는 방법을 제시하였다^[3]. Koo는 동적 수채해석 모델을 설정하고 모재에 대한 충격시험을 수행하고 이를 이용하여 수치해석 모델을 검증하고 용접부에 대한 균열 발생 및 진전거동을 분석할 수 있는 수치해석 모델을 설정하고 용접부 충격시험 결과와 비교하였다^[4].

국외에서는 Zang 등은 변형률 변화와 온도 변화로 SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar)를 통하여 Cowper-Symonds의 구성방정식을 구하였다^[5]. Liu 등은 변형률 속도와 온도의 영향을 분석하

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

Fax: +82-51-201-4041

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

기 위하여 충격시험과 준정적 인장시험을 통하여 동적 기계적 성질을 측정하였으며, 미세구조 진화에 미치는 영향을 조사하였다⁶⁾. Ye 등은 다양한 변형률 속도와 온도에서 2519A 알루미늄 합금의 충격특성 및 미세구조에 대한 Ce의 다양한 함량의 영향을 조사하였다⁷⁾. Liang 등은 816 m/s의 속도를 갖는 발사체에 일정 각도로 충돌시켜 알루미늄 합금의 변형된 미세 구조 특성에 대하여 연구하였다⁸⁾.

Al2519-T87은 주로 판재 형태로 제작되어 구조물에 사용하기 위하여 제품 형상 제작에서 절삭을 사용하고 있다. 하지만 재료의 특수성으로 인하여 절삭에 관련한 연구는 미흡한 실정이다.

절삭은 조건 선정을 위하여 실험과 시뮬레이션을 통하여 획득할 수 있으나 최근에는 시간과 비용을 고려하여 절삭시험보다 시뮬레이션을 많이 적용하고 있다. 시뮬레이션에서 정확한 예측을 하기 위해서는 선형적으로 피삭재의 유동응력을 정확하게 기술하여야 절삭력을 정확하게 예측할 수 있다. 유동응력을 기술한 모델은 다양하게 개발되어 있으나 가장 많이 사용되고 있는 모델은 Johnson-Cook 모델이다, 하지만 가공경화, 속도 변형률 경화 및 온도연화항의 지수가 유동응력을 기술하는데 문제점을 가지고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 Shin 등은 S-K 구성방정식을 제안하였다⁹⁾. S-K 구성방정식은 속도 변형률 경화항에서 속도가 10^{-4} 이상에서 응력이 증가하는 현상을 잘 표현하였다. 그리고 온도연화항은 기준온도 이하에서도 온도에 따른 응력값 표현이 잘 되는 특징이 있다. 그래서 S-K 구성방정식을 이용하여 절삭 시뮬레이션의 물성으로 적용하면 절삭력을 정확하게 예측할 수 있다고 판단된다.

그러하여 본 논문에서는 준정적 시험과 SHPB 시험을 이용하여 S-K 구성방정식의 가공 경화항 및 변형률 속도 경화항의 계수값을 결정하고, 절삭시험과 시뮬레이션을 이용하여 S-K 구성방정식의 온도 연화 계수 결정 방법을 제안하였다. 그리고 제안한 방법으로 S-K 구성방정식의 유동응력을 결정하고 이를 검증하는 것을 목표로 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 S-K 구성방정식⁹⁾

구성방정식은 재료의 변형이 일어날 때 시뮬레이션에서 사용되는 물성으로 가공 경화, 변형률 속도 경화, 온도 연화 현상의 함수로 구성되어 있다. 일반적으로 세 가지 함수를 분리하여 구성방정식을 만들었을 때 재료의 유동응력을 비교적 잘 기술하는 것으로 알려져 있다. 식 (1)은 본 논문에서 사용된 S-K 구성방정식을 나타내고 있다. 첫 번째 항은 가공 경화, 두 번째항은 변형률 속도 경화, 세 번째항은 온도 연화 현상을 표현하고 있다⁹⁾. S-K 구성방정식

은 변형률 속도항의 계수값 E에 의하여 고속에서 응력값이 증가하는 현상을 기술할 수 있는 특징을 가지고 있다.

$$\sigma = [A + B(1 - \exp(-C\dot{\epsilon}))] [D \ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) + \exp(E \cdot (\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}))] \dots \dots \dots (1) [1 - (\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}})]^m$$

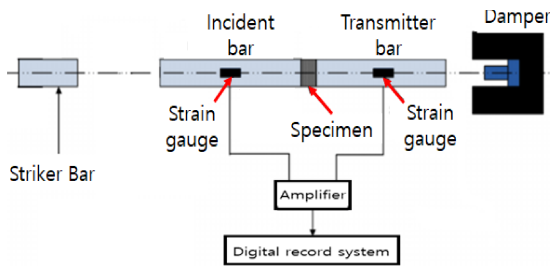
σ 는 유동응력, A는 항복강도, B와 C는 가공경화상수, D는 변형률 속도 경화상수, E는 고속에서 응력값이 증가하는 것을 표현하는 변형률 속도 제어상수, m은 온도연화지수, $\dot{\epsilon}$ 은 유효소성변형률, $\dot{\epsilon}_0$ 은 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률 속도, T는 온도, T_{melt} 는 재료의 용융온도, T_{ref} 는 실험온도를 의미한다.

S-K 구성방정식의 계수값은 소성진응력-소성진변형률 선도의 데이터를 이용하여 일반적으로 통계적인 방법으로 획득할 수 있다. 상온에서 다양한 조건의 응력-변형률 선도를 획득하고 이를 소성진응력-소성진변형률 선도로 변환한다. 그리고 고온에서는 충격속도를 일정하게 유지하고 온도의 변화를 주어 소성진응력-소성진변형률 선도를 획득한다. 이렇게 획득한 데이터를 이용하여 구성방정식 계수값을 통계프로그램 오리지널 또는 매트랩과 같은 프로그램에서 비선형 커브 피팅을 통하여 획득할 수 있다. 소성진응력-소성진변형률 선도는 다음과 같은 방법으로 획득할 수 있다. 저속에서는 준정적 시험을 통하여 획득하고 고속에서는 SHPB 시험을 통하여 획득할 수 있다.

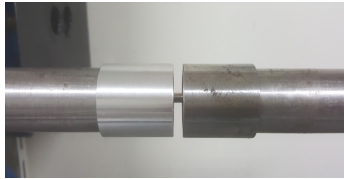
2.2 SHPB시험¹⁰⁾

SHPB시험 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 시편의 경계에 도달하게 되면 입력봉과 시편의 임피던스(Impedance) 차이에 의해 압축과 일부는 반사되고 일부는 시편을 투과하여 출력봉으로 전달된다.

봉을 통하여 전달되는 반사파와 투과파의 시간에 따른 변화는 입력봉과 출력봉의 각각 가운데 부분에 설치된 두 개의 스트레인 게이지를 통하여 측정할 수 있다. 스트레인 게이지를 통해 측정된 신호는 신호 증폭기(Signal Conditioning Amplifier)를 거쳐 오실로스코프(Oscilloscope)에서 시간에 따른 전압변화로 나타난다. 이 데이터를 이용하여 압축 시편의 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다. Fig. 1의 (a)는 SHPB 시험장치의 원리를 나타내고 있으며, Fig. 1의 (b)는 상온시험에서는 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 장착한 모습을 나타내고 있다. 본 연구에서는 상온에서 0.005 s^{-1} 에서 준정적 시험을 수행하였으며, 고속 충격시험은 912 s^{-1} , 2473 s^{-1} , 3727 s^{-1} , 5570 s^{-1} , 6252 s^{-1} 속도에서 시험을 수행하였다.



(a) Principle of SHPB test



(b) Specimen on SHPB device

Fig. 1 Schematic of the SHPB device

2.3 절삭시뮬레이션

본 논문에서 사용된 절삭 시뮬레이션인 AdvantEdge FEM은 2차원 절삭 가공에서 평면변형률의 열 구조 연성 유한요소 모델을 생성하여 사용한다. 공작물은 탄소성 거동에서 변형률, 변형률 속도 및 온도에 의한 유동응력에 의해 결정된다고 가정하였다. 칩과 공구의 경계면에 대한 모델은 쿨롱마찰 모델을 사용하였으며, 모델링 요소는 6절점 2차 삼각요소를 사용하였다. 본 논문에 사용한 소프트웨어는 절삭 전용 시뮬레이션 프로그램으로 절삭조건인 절삭속도, 절입량, 이송속도를 입력하여 절삭력 및 칩형상 등을 절삭에서 발생하는 여러 가지 결과값을 예측할 수 있다. 마찰계수와 모재 모델의 격자 크기 변화에 따라 절삭력에 영향을 미친다^[11].

Fig. 2는 AdvantEdge FEM에서 사용자 물성 모델 적용을 위한 2차원 절삭 시뮬레이션 공정을 나타내고 있다. 절삭 시뮬레이션에서 절삭력의 영향을 미치는 조건은 다양하다. 절삭조건인 이송속도, 절삭속도, 절입량, 절삭 재료와 절삭 공구 재료에 절삭력이 영향을 받는다. 그리고 절삭재료와 절삭 공구의 각도, 마찰계수 및 격자 크기 등 기하학적인 부분 또한 절삭력에 영향을 미친다.

절삭 시뮬레이션에서 사용자 물성 모델인 구성방정식 적용을 위하여 포트란을 이용하여 구성방정식을 코딩한다. 그리고 DLL 파일을 생성하기 위하여 컴파일한 후 솔버에 적용한다. 소재 물성값은 SHPB 시험을 통하여 계수값을 획득하고 계수값을 적용한 후 기본조건인 절삭조건을 입력하고 시뮬레이션을 실행한다. 그리고 시뮬레이션 종료 후 테크플롯인 후처리 프로그램을 이용하여 결과값을 확인할 수 있다.

2.4 반응표면법

반응표면법은 독립변수들의 수치 변화에 따른 종속변수의 변화

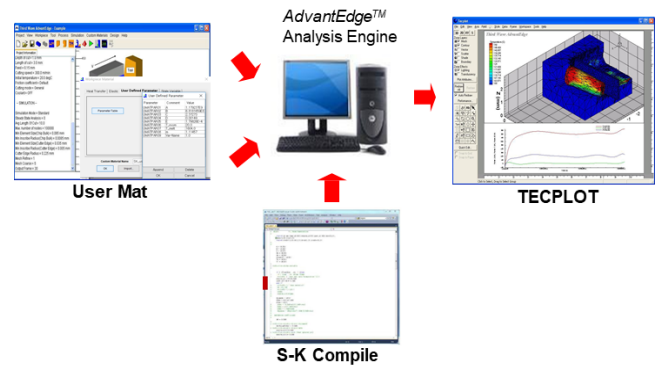


Fig. 2 Numerical analysis process of AdvantEdge

를 나타내는 반응표면의 분석을 통해 최적의 조건을 찾고, 통계적 분석을 통해 종속변수에 대한 독립 변수의 영향도를 평가할 수 있는 효과적인 실험계획법이다.

반응표면법에는 중심합성법과 Box-Behnken이 있다. 중심합성법은 반응표면설계에서 가장 일반적으로 사용하는 방법이다. 중심합성법은 효율적으로 1차, 2차항을 추정하고자 할 때와 요인 배치 실험 후추가 실험하여 곡률 반응변수를 모델화할 때 많이 사용된다. Box-Behnken은 반응표면법의 또 다른 방법으로 중심합성법과 동일하게 1차, 2차 항을 효율적으로 추정하고자 할 때, 모든 인자들이 동시에 낮은 수준 혹은 높은 수준이 아니라는 것을 확신할 때, 모든 실험이 안정된 공정 영역에서 이루어진다고 확신할 때 활용한다^[12].

종속변수는 독립변수 변화에 따른 결과값을 의미하며 독립변수는 결과값에 영향을 미치는 인자를 의미한다. 본 연구에서는 절삭력을 종속변수 설정하고 절삭프로그램에서 마찰계수, 격자크기 및 온도연화계수를 종속변수로 설정하였다.

마찰계수와 격자크기는 값이 증가할수록 절삭력이 증가하고 일정한값 이상이 되면 수렴하는 로그함수의 특징을 가진다^[11]. 그래서 마찰계수 값을 최소 0.1에서 절삭력이 수렴하는 최대 0.5까지 두 가지 조건을 선정하였으며 격자 크기는 최소 0.002 mm에서 절삭력이 수렴하는 최대 0.02 mm까지 두 가지 조건을 선정하였다. 그리고 온도연화계수는 최소 0.5에서 최대 1.5로 정하였으며 이를 이용하여 실험계획법을 수행할 수 있는 조건을 Table 1에 나타내었다.

3. 2차원 절삭실험

온도 연화 계수를 결정하기 위한 비교 절삭력을 2차원 절삭실험으로 획득하였다. 2차원 절삭실험은 최고 3500 rpm의 주축회전속도를 가지는 CNC선반(GT2100B, DOOSAN)을 이용하였다. 주축에 2차원 절삭시험편을 장착하고 공구메거진에 공구동력계를 부

Table 1 Design of Experiments for Determination of Temperature Softening Coefficient

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	friction	mesh	temp
4	1	2	1	0.5	0.02	1
11	2	2	1	0.3	0.002	1.5
8	3	2	1	0.5	0.011	1.5
5	4	2	1	0.1	0.011	0.5
3	5	2	1	0.1	0.02	1
10	6	2	1	0.3	0.02	0.5
6	7	2	1	0.5	0.011	0.5
15	8	0	1	0.3	0.011	1
9	9	2	1	0.3	0.002	0.5
2	10	2	1	0.5	0.002	1
13	11	0	1	0.3	0.011	1
7	12	2	1	0.1	0.011	1.5
14	13	0	1	0.3	0.011	1
12	14	2	1	0.3	0.02	1.5
1	15	2	1	0.1	0.002	1

착하였다. 그리고 공구동력계 상부에 공구 홀더 및 공구를 장착하여 절삭력을 획득하였다. Fig. 3은 시편 및 절삭력 측정 장비가 부착되어있는 그림을 나타내었다. 시편은 회전하고 공구머거진이 부착되어 있는 공구가 직선적으로 이동하여 시편에 접근하여 절삭력을 측정한다. Fig. 4는 2차원 절삭실험에 사용된 시편을 나타내고 있다. 시편은 주축에 장착되고 원통형상으로 직경 \varnothing 25 mm로 제작하였다. 그리고 절삭 시험 형상은 선반에서 시험하기 위하여 디스크 형태로 제작하였다. 절삭력을 측정하기 위한 디스크 두께는 1 mm, 직경은 \varnothing 50 mm로 제작하였다. Table 2는 절삭조건을 나타내고 있다. 절삭속도는 200 m/min, 이송속도는 0.2 mm/rev, 절입량은 1 mm에서 절삭시험을 실행하였다. 그리고 회전속도는 디스크 직경을 기준으로 결정하였다. Fig. 5는 Table 2의 절삭조건에서 절삭이 이루어질 때 공구동력계로 측정한 절삭력을 나타내고 있다. Fig. 5의 (a)는 주분력으로 공구에 영향을 가장 많이 주는 절삭력으로 X축방향의 절삭력이다. 측정된 절삭력을 평균을 내어 169.14 N으로 결정하였다. Fig. 5의 (b)는 배분력으로 공구 상단에서 수직으로 받는 절삭력으로 Y축 방향의 절삭력이다. X축 절삭력 결정과 동일하게 평균을 내어 64.14 N을 나타내었다. 이를 온도 연화 계수를 결정하는 기준 절삭력으로 사용하였다.

4. SHPB실험을 이용한 구성방정식 계수 결정

4.1 가공경화 및 속도 경화 계수 결정

가공경화 및 속도경화항의 계수값을 결정하기 위해서는 응력-변형률 선도가 필요하다. 속도가 0.005 s^{-1} 의 저속구간은 만능시험기를 이용하여 압축시험을 수행하여 데이터를 획득하였다. 그리고

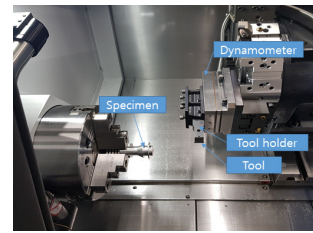


Fig. 3 Two-dimensional cutting experiment device

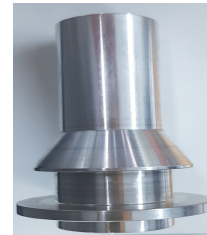
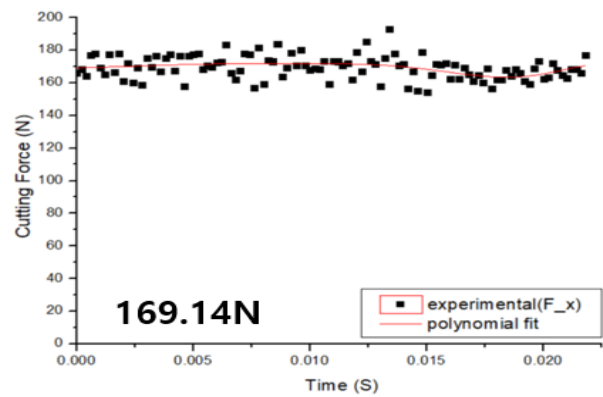


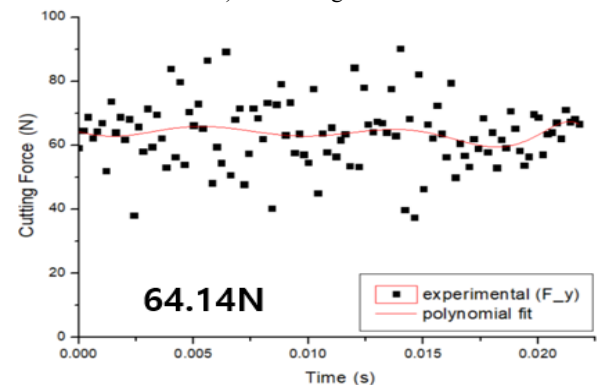
Fig. 4 Two dimensional cutting test specimens

Table 2 Cutting condition

Depth of Cut, DOC (mm)	Feedrate, fl (mm/rev)	Cutting Speed, Vc (m/min)
1	0.2	200



a) F_x cutting force



b) F_y cutting force

Fig. 5 F_x and F_y cutting forces to cutting conditions

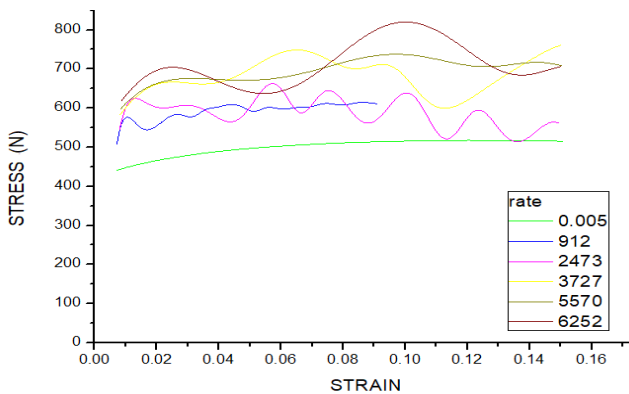


Fig. 6 Change of plastic stress-plastic strain according to the speed change obtained by experiment

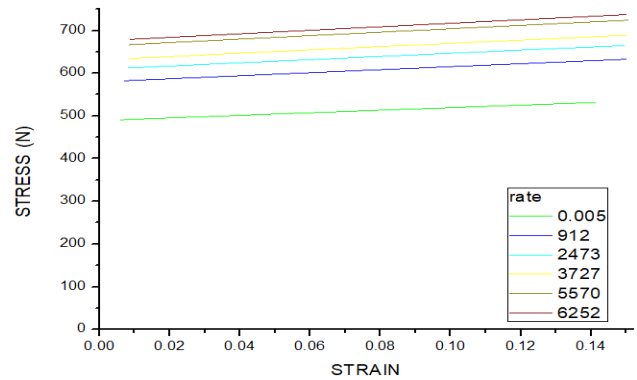


Fig. 7 Variation of plastic stress-plastic strain according to velocity change estimated using coefficient value

Table 3 Parameter in the S-K constitutive equation

Parameter	value
A (MPa)	523.092
B (MPa)	878.723
C	0.373
D	0.0122
E	2.712E-5

고속구간은 912 s⁻¹, 2473 s⁻¹, 3727 s⁻¹, 5570 s⁻¹, 6252 s⁻¹ 조건에서 SHPB 압축시험을 통하여 속도를 변화시키면서 응력-변형률 곡선을 획득하였다. 그리고 획득한 응력-변형률 선도를 진응력-진변형률 선도로 변환하였다. 이렇게 생성된 진응력-진변형률 선도에서 탄성구간을 제외하면 소성진응력-진변형률 곡선이 완성된다. 이를 이용하여 비선형 커브 피팅으로 계수값을 구할 수 있다. Fig. 6은 속도변화에 따른 소성진응력-소성진변형률 선도를 나타내고 있다. Table 3은 실험에서 획득한 소성진응력-진변형률 선도를 이용하여 획득한 가공 경화항 및 속도 경화항의 계수값을 나타내고 있다. Fig. 7은 Table 3에서 예측한 계수값을 이용하여 추정된 속도변화에 따른 응력의 변화를 나타내고 있다. 속도가 증가할수록 응력이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 고속에서는 응력증가율이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 그리하여 충격 속도 변화에 따른 응력 증가는 속도에 의한 경화현상이라고 판단하였다.

4.2 온도 연화 계수 결정

일반적인 온도연화계수는 동일한 속도에서 온도의 변화를 주어 획득한 소성응력-변형률 선도를 이용하여 구할 수 있다. 상온에서 획득한 응력값보다 온도가 높아질수록 응력값이 낮아지는 특성을 가지고 있다. 하지만 시편의 온도를 올리기 위하여 고주파 유도가 열을 시킨다. 이 때 측정 장비의 노이즈가 발생하여 정확한 응력-변형률 선도를 획득하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 그리고 입력봉과 출력봉이 시험편에 접촉하였을 때 온도가 급격하게 낮아져

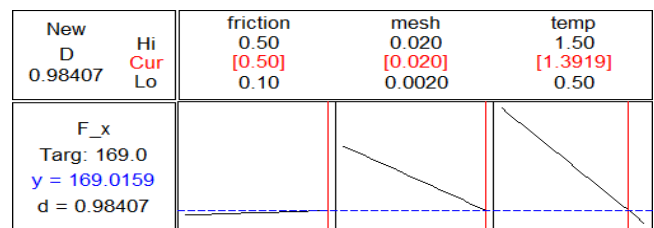


Fig. 8 Optimization of Temperature Softening Factor Using Box-Behnken Method

시편 온도 측정의 정확성에 문제점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 절삭실험과 시뮬레이션을 이용하여 온도연화계수를 결정하는 방법을 제시하였다.

절삭가공에서 절삭재료와 공구사이에 절삭이 발생할 때 열이 발생하고 이 열에 의하여 절삭력이 낮아지는 열 연화 현상이 발생한다. 그렇기 때문에 온도연화계수를 정확하게 예측할수록 절삭력을 정확하게 예측할 수 있다. 절삭가공은 온도 변화에 따라 절삭력이 민감하게 변화되며 절삭온도가 높아질수록 절삭력이 낮아지며 절삭온도가 낮아지면 절삭력이 높아지는 특징이 있다. 그래서 본 논문에서는 온도 연화 계수를 결정하기 위하여 절삭실험에서 획득한 절삭력을 기준 데이터로 시뮬레이션에서 절삭력에 변화를 주는 마찰계수와 격자크기 그리고 온도연화계수를 변수로 반응표면법의 Box-Behnken법을 사용하여 온도 연화 계수를 결정하였다.

Table 4는 절삭속도, 이송속도, 절입량을 고정하고 절삭 시뮬레이션에서 절삭력을 변화시킬 수 있는 마찰계수, 격자크기, 및 온도 연화계수를 변수값으로 만들어진 15개 조건의 절삭력 변화를 나타내고 있다. Fig. 8은 Box-Behnken법을 이용한 온도연화계수 최적화 결과를 나타내고 있다. 온도연화계수가 가장 많은 영향이 있으며 격자크기, 마찰계수 순으로 영향이 있다고 판단할 수 있었다.

Fig. 9는 격자크기를 0.02 mm로 고정하고 마찰계수와 온도 연화계수의 변화를 나타내고 있다. Fig. 10은 마찰계수를 0.5로 고정할 때 격자 크기와 온도 연화 계수의 관계를 나타내고 있다. X축

Table 4 Simulation result according to condition change

RunOrder	friction	mesh	temp	F _X (N)	F _Y (N)
1	0.1	0.002	1	215.872	11.714
2	0.5	0.011	0.5	348.911	140.078
3	0.1	0.011	1.5	160.354	11.709
4	0.3	0.011	1	242.469	61.47
5	0.3	0.02	1.5	178.072	47.612
6	0.1	0.011	0.5	273.043	17.705
7	0.3	0.011	1	242.469	61.47
8	0.3	0.002	1.5	204.041	49.477
9	0.3	0.011	1	242.469	61.47
10	0.5	0.011	1.5	211.81	88.887
11	0.5	0.02	1	178.883	14.479
12	0.3	0.002	0.5	325.662	78.108
13	0.3	0.02	0.5	309.123	78.719
14	0.1	0.02	1	180.584	14.606
15	0.5	0.002	1	277.849	109.721

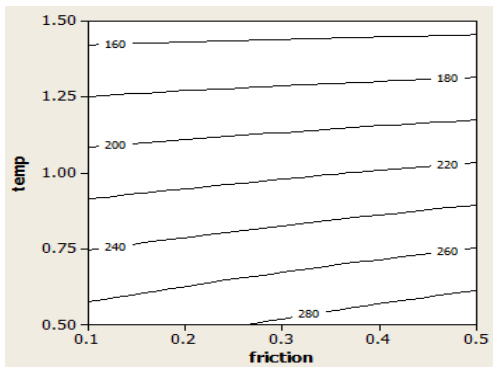


Fig. 9 Relationship between Friction Coefficient and Temperature Softening Coefficient (mesh size : 0.02 mm)

방향의 기준 절삭력 169.14 N과 비교했을 때 마찰계수보다 격자 크기에 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 절삭력에 영향을 미치지 않고 수렴하는 마찰계수 0.5, 격자 크기 0.02 mm로 고정하고 최적화를 수행하여 온도 연화 계수를 1.3919로 결정하였다. Fig. 11은 온도 변화에 따른 온도 연화의 경향성을 나타내고 있다. 상온에서 500°C까지는 응력이 급격하게 감소하면서 온도의 영향을 많이 받고 있었다. 그러나 500°C 이후에서는 이전보다 온도 영향이 낮은 것을 확인할 수 있었다.

5. 절삭조건 변화에 따른 절삭력 비교

절삭시험과 절삭 시뮬레이션을 이용하여 획득한 구성방정식의 계수값의 검증을 위하여 Table 5의 절삭조건에서 실험에서 획득한 절삭력과 절삭시뮬레이션의 절삭력을 비교하였다. 절삭조건은 절

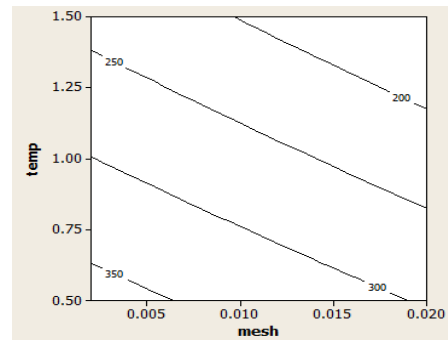


Fig. 10 Relation between Mesh Size and Temperature Softening Coefficient (Friction coefficient : 0.5)

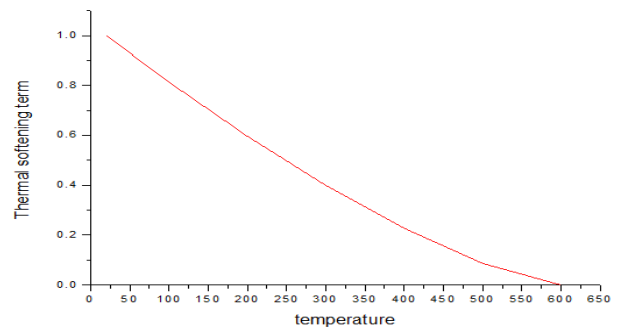


Fig. 11 Change of thermal softening term with temperature change

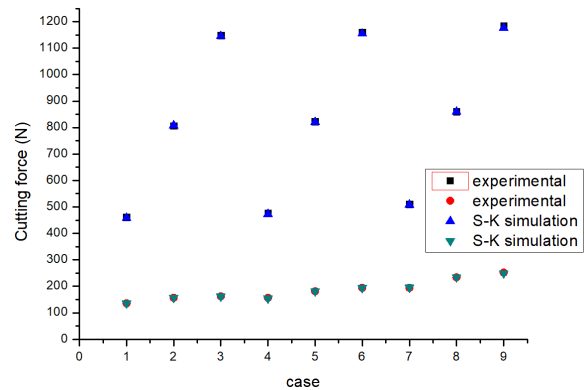


Fig. 12 Comparison of Cutting Test and Cutting Simulation Results by Cutting Conditions

Table 5 Cutting conditions for cutting tests and cutting simulations

case	Depth of Cut, DOC (mm)	Feedrate, f1 mm/rev)	Cutting Speed, Vc (m/min)
1	3	0.2	400
2	3	0.4	400
3	3	0.6	400
4	3	0.2	300
5	3	0.4	300
6	3	0.6	300
7	3	0.2	200
8	3	0.4	200
9	3	0.6	200

입량은 3 mm로 고정하고 절삭속도는 최소 200 m/min에서 100 m/min씩 증가시키면서 최대 400 m/min까지 세 가지 조건을 선정하였으며 이송속도는 최소 0.2 mm/rev에서 0.2씩 증가시키면서 최대 0.6 mm/rev까지 세 가지 조건을 선정하였다. Fig. 12은 각 조건에서 발생하는 절삭력을 비교한 결과를 나타내고 있다. 절삭속도가 낮아질수록 절삭력이 증가하고 이송속도가 증가할수록 절삭력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 절삭시험을 통하여 획득한 절삭력과 절삭시뮬레이션에서 획득한 절삭력은 1% 이내에서 결과값을 예측할 수 있었다. 이는 구성방정식의 온도연화계수를 예측하는 방법이 정당하다고 판단할 수 있었다.

6. 결론

준정적 시험과 SHPB 시험을 이용하여 S-K 구성방정식의 가공경화 및 변형률 속도 경화항의 계수값을 결정하고, 절삭시험과 시뮬레이션을 이용하여 S-K 구성방정식의 온도 연화 계수 결정 방법을 제안하였다. 그리고 제안한 방법으로 S-K 구성방정식의 유동응력을 결정하고 이를 검증하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. Al2519-T87 재료의 유동응력 결정을 위하여 상온에서 준정적실험 및 SHPB 실험을 통하여 가공경화항의 계수 A : 523.092 MPA, B : 878.723 MPa, C : 0.373 및 속도경화계수 D : 0.0122, E : 0.00002712의 계수값을 결정하였다. 그리고 절삭 시뮬레이션에서 절삭력에 영향을 미치는 마찰계수, 격자크기 및 온도 연화 계수를 변수로 Box-Behnken법을 이용하여 최적화한 결과로 온도 연화 계수 m : 1.3919로 선정하여 S-K 구성방정식의 계수를 확정할 수 있었다. 그리고 절삭조건에서 절삭시험과 시뮬레이션으로 절삭력을 비교한 결과 1% 이내에 절삭력을 예측할 수 있었다. 그래서 구성방정식의 온도연화계수를 예측하는 방법이 정당하다고 판단할 수 있었다.

References

- [1] Kathryn, A. D., Sidney, C., Charles, E. A. Jr., 2010, Comparison of Mechanical and Constitutive Response for Five Aluminum Alloys for Armor Applications, 16th US National Congress of Theoretical and Applied Mechanics. 1-2.
- [2] Ryu, J. M., Park, K. C., Kang, T. W., 2016, A Study on the Structural Design for Safety Improvement of the Winch Mount of an Armored Recovery Vehicle, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 16:1 58-62, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.16.1.058>.
- [3] Bae, J. M., Park, T. W., Baik, D. H., Kim, H. J., Chang, W. E., 2006, Precipitates Behavior and Microstructure of Friction Stir Welded 2519Al Alloy, Proceedings of the Korean Welding & Joining Society Autumn Conference, 109-111.
- [4] Koo, M. H., 2005, A Study on the Dynamic Material Properties and Shock Behavior of Al 2519-T87 Alloy Plate, Doctorate Thesis, Chungnam National University, Korea.
- [5] Zang, X. M., Li, H. J., Li, H. Z., Gao, H., Gao, Z. G., Liu, Y., Liu, B., 2008, Dynamic Property Evaluation of Aluminum Alloy 2519A by Split Hopkinson Pressure Bar, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 18 1-5.
- [6] Liu, W. H., He, Z. t., Chen, Y. Q., Tang, S. W., 2014, Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Equations of 2519A Aluminum Alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 24 2179-2186.
- [7] Ling, Y. Y., Gang, G., Junl, I., Haichun, J., Xinming, Z., 2013, Influence of Ce Addition on Impact Properties and Microstructures of 2519A Aluminum Alloy, Materials Science&Engineering A, 582 84-90, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.06.028>.
- [8] Liang, X. P., LI, H. Z., Huang, L., Hong, T., Ma, B., Liu, Y., 2012, Microstructural Evolution of 2519-T87 Aluminum Alloy Obliquely Impacted by Projectile with Velocity of 816 m/s, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22 1270-1279.
- [9] Shin, H. H., Kim, J. B., 2010, A Phenomenological Constitutive Equation to Describe Various Flow Stress Behaviors of Materials in Wide Strain Rate and Temperature Regimes, Journal of Engineering Materials and Technology, 132 1-6, <https://doi.org/10.1115/1.4000225>.
- [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, Effects of Friction Coefficient and Mesh Change on Cutting Force and Chip Shape in Cutting Simulation, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 28:3 148-155, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.3.148>.
- [12] Koo, J. Y., Cho, M. H., Kim, H., Kim, J. S., 2014, Investigation of Cutting Conditions for Stable Machining and Machinability Evaluation in Milling Process of Al7050-T7451 by Response Surface Methodology, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 23:3 284-290, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.3.284>.