

# 반응표면법을 이용한 구성방정식의 온도계수 결정과 절삭력 예측

구병문\*, 김태호\*\*,#, 박정수\*\*\*

\*한화디펜스(주), \*\*티엔에스머시닝, \*\*\*한화디펜스(주)

## Determination of the Temperature Coefficient of the Constitutive Equation using the Response-Surface Method to Predict the Cutting Force

Byeung-Mun Ku\*, Tae-Ho Kim\*\*,#, Jung-Su Park\*\*\*

\*Hanwha Defense, \*\*T&SMachining, \*\*\*Hanwha Defense

(Received 26 July 2021; received in revised form 13 August 2021; accepted 21 August 2021)

### ABSTRACT

The cutting force in a cutting simulation is determined by the cutting conditions, such as cutting speed, feed rate, and depth of cut. The cutting force changes, depending on the material and cutting conditions, and is affected by the heat generated during cutting. The physical properties for predicting the cutting force use constitutive equations as functions of the hardening term, rate-hardening term, and thermal-softening term. To accurately predict the thermal properties, it is necessary to accurately predict the thermal-softening coefficient. In this study, the thermal-softening coefficient was determined, and the cutting force was predicted, using the response-surface method with the cutting conditions and the thermal-softening coefficient as factors.

**Keywords** : Constitutive Equation(구성방정식), Response Surface Method(반응표면법), Cutting Force(절삭력), Cutting Condition(절삭조건)

### 1. 서 론

절삭 가공은 가공시 발생하는 물리적 현상을 확인하기 어렵기 때문에 다양한 시험을 통하여 확인하고 있다. 하지만 시간과 비용의 과다로 절삭 시뮬레이션으로 대체하여 물리적 현상을 확인할 수 있다. 절삭 시뮬레이션은 공구에 걸리는 절삭력, 절삭온도, 공구마모 그리고 공작물 표면의 잔류응력

등을 예측할 수 있다. 하지만 절삭 시뮬레이션에서 정확한 예측을 위하여 선행적으로 피삭재의 물성인 유동응력을 정확하게 획득하여 이를 시뮬레이션에 적용해야 정확한 물리적인 현상을 파악할 수 있다. 특히 절삭에서는 온도의 영향으로 절삭력 및 공구마모 등의 물리적 현상이 결정되기 때문에 열연화항의 계수를 특정해야 한다.

구성방정식은 경화항, 속도 경화항, 열연화항으로 구성된다. 경화항과 속도 경화항은 준정적 실험과 상온 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)을 통하여 데이터를 획득하고 열연화항은 고온에서 SHPB 시

# Corresponding Author : kth0110@gmail.com

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

험으로 데이터를 획득하고 데이터를 기준으로 각 항의 계수값을 획득하여 구성방정식을 완성한다. 시뮬레이션에서 사용되는 구성방정식은 다양하게 개발되어 있으며 Johnson-Cook, Power-Law, S-K, Drucker Prager 등이 개발되었으며 구성방정식에 따라 문제점과 장점을 가지고 있다.<sup>[1][2]</sup>

Aviral Shrot<sup>[3]</sup> 등은 직교절삭 시험과 FEM 수치해석을 통하여 AISI 52100, 62HRC강의 Johnson-Cook 구성방정식 상수를 결정하였으며 황과 안<sup>[4][5]</sup> 등은 Johnson-Cook 구성방정식 상수를 슬롯밀링 시험을 통해 획득하였다. Mahmoud Shatla<sup>[6]</sup> 등은 직교슬롯 밀링 시험을 통하여 AISI P20 mold steel 등 3종의 금속에 대해 Flow-stress data를 획득하는 방법을 그리고 M. Agmell<sup>[7]</sup> 등은 AISI 4140강의 Johnson-Cook 모델 상수를 2차원 절삭시험과 FEM 수치해석을 통해 획득하였다. An<sup>[8]</sup> 등은 Al6061-T6 재료의 동적 물성 획득을 위한 장비의 설계변수를 결정하기 위한 SHPB 시뮬레이션을 수행하였으며, Lee<sup>[9]</sup> 등은 SHPB 기법을 사용하여 Al7075-T6의 고온 동적변형 거동을 수행하여 Johnson-Cook 구성방정식의 계수를 결정하였다.

그리하여 본 논문에서는 반응표면법을 이용하여 열연화 계수를 결정하고 다양한 절삭조건에서 절삭 시험과 시뮬레이션 결과를 비교하여 시뮬레이션의 절삭력을 검증하는 것을 목표로 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 구성방정식<sup>[1]</sup>

구성방정식은 재료의 변형이 일어날 때 시뮬레이션에서 사용되는 물성으로 가공 경화항, 변형률 속도 경화항 그리고 열연화항의 함수로 구성되어 있다. 이를 식 (1)에 나타내었다.

$$\sigma = F(\epsilon) \cdot G(\dot{\epsilon}) \cdot T(M) \dots\dots\dots (1)$$

각 항의 구성에 따라 다양한 방정식으로 구성되며 식(2)는 S-K 구성방정식으로 변형률 속도항의 계수값 E에 의하여 고속에서 응력값이 증가하는 현상을 기술할 수 있는 특징을 가지고 있다.

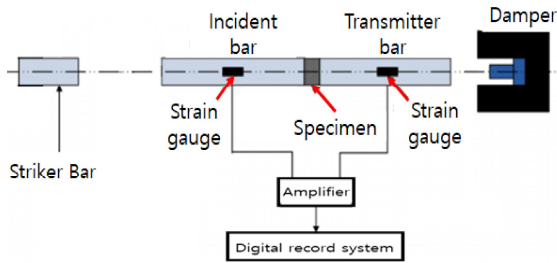
$$\sigma = [A + B(1 - \exp(-C\epsilon))] [D \ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) + \exp(E \cdot (\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}))] \dots\dots\dots (2) [1 - (\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}})]^m$$

$\sigma$ 는 유동응력,  $A$ 는 항복강도,  $B$ 와  $C$ 는 가공 경화상수,  $D$ 는 변형률 속도 경화상수,  $E$ 는 고속에서 응력값이 증가하는 것을 표현하는 변형률 속도 제어상수,  $m$ 은 열연화계수,  $\epsilon$ 은 유효소성변형률,  $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도,  $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률 속도,  $T$ 는 온도,  $T_{melt}$ 는 재료의 용융온도,  $T_{ref}$ 는 실험온도를 의미한다.

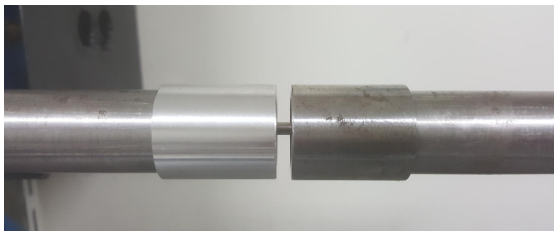
S-K 구성방정식 계수값을 획득하기 위한 데이터는 상온에서 다양한 속도를 변화시키면서 응력-변형률 선도를 획득하고 이를 진응력-진변형률 선도로 변환 후 방정식의 계수값 선정에 적용한다. 그리고 고온에서는 충격속도를 일정하게 유지하고 온도 변화를 주어 진응력-진변형률 선도를 획득하여 적용한다. 획득한 데이터를 이용하여 구성방정식 계수값을 통계프로그램 오리진 또는 매트랩과 같은 프로그램에서 비선형 커브 피팅을 통하여 획득할 수 있다. 저속에서는 준정적 실험을 통하여 획득하고 고속 및 고온에서는 SHPB 실험을 통하여 데이터를 획득할 수 있다.

### 2.2 SHPB시험<sup>[2]</sup>

SHPB시험 장치의 원리 및 실험 방법은 다음과 같다. 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 고정하고 고속으로 충격봉을 움직여서 입력봉을 타격한다. 그러면 입력봉과 출력봉 사이에 있는 시편이 압축성 탄성파가 생성되면서 입력봉 내에 전달되고, 입력봉과 시편의 경계에 도달하게 되면 입력봉과 시편의 임피던스(Impedance) 차이에 의해 압축파 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 증폭기를 거쳐 오실로스코프에서 시간에



(a) Principle of SHPB test



(b) Specimen on SHPB device

Fig. 1 Schematic of the SHPB device

따른 전압변화로 나타난다. 이 데이터를 이용하여 압축 시편의 응력-변형을 선도를 얻을 수 있다. Fig. 1의 a)는 SHPB 실험장치의 원리를 나타내고 있으며, Fig.1의 b)는 상온실험에서 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 장착한 모습을 나타내고 있다. 본 연구에서는 상온에서 0.005/s에서 준정적 실험을 수행하였으며, 고속 충격시험은 912/s, 2473/s, 3727/s, 5570/s, 6252/s 속도에서 실험을 수행하였다.

### 2.3 절삭시뮬레이션

본 논문에서 사용된 절삭 시뮬레이션인 AdvantEdge FEM은 2차원 절삭 가공에서 평면변형률의 열구조 연성 유한요소 모델을 생성하여 사용한다. 공작물은 탄소성 거동에서 변형률, 변형률 속도 및 온도에 의한 유동응력에 의해 결정된다고 가정하였다. 그리고 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 물리적 데이터를 예측할 수 있다. 그리고 마찰



Fig. 2 Numerical analysis process of AdvantEdge

계수 변화와 시뮬레이션 모델의 격자 크기 변화에 따라 절삭력에 영향을 미친다.<sup>[10]</sup>

Fig. 2는 AdvantEdge FEM에서 사용자 물성 모델 적용을 위한 2차원 절삭 시뮬레이션 공정을 나타내고 있다. 절삭 시뮬레이션에서 절삭력에 영향을 미치는 조건은 다양하다. 절삭조건인 이송속도, 절삭속도, 절입량과 절삭 재료 및 절삭 공구 재료 등이 절삭력에 영향을 미친다. 그리고 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 실험을 통하여 계수값을 획득하고 이를 절삭 재료의 물성을 적용한 후 기본조건인 절삭조건을 입력하고 시뮬레이션을 실행한다. 그리고 시뮬레이션 종료 후 테크플롯인 후처리 프로그램을 이용하여 결과값을 확인한다.

### 2.4 반응표면법

반응표면법은 독립변수들의 수치 변화에 따른 종속변수의 변화를 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 반응표면 설계에서 가장 일반적으로 사용하는 방법이다. 중심합성법은 효율적으로 1차, 2차항을 추정하고자

할 때와 요인 배치실험 후 추가 실험하여 곡률 반응변수를 모델화할 때 많이 사용된다.<sup>[11]</sup>

중속변수는 독립변수 변화에 따른 결과값을 의미하며 독립변수는 결과값에 영향을 미치는 인자를 의미한다. 본 연구에서는 절삭력을 중속변수로 설정하고 절삭프로그램에서 절삭력에 영향을 미치는 절삭조건인 절삭속도, 이송속도, 절입량 및 물성의 열연화 계수를 독립변수로 설정하였다.

절삭속도는 최소 200m/min에서 최대 300m/min으로 선정했으며 이송속도는 최소 0.2mm/rev에서 최대 0.6mm/rev으로 선정하였다. 그리고 절입량은 최소 1mm에서 최대 3mm로 선정하였으며, 열연화계수는 최소 1에서 최대 2까지로 선정하고 이를 이용하여 실험계획법을 수행할 수 있는 조건을 구하고 Table 1에 직교배열표를 나타내었다.

**Table 1 Design of Experiments for Determination of Temperature Softening Coefficient**

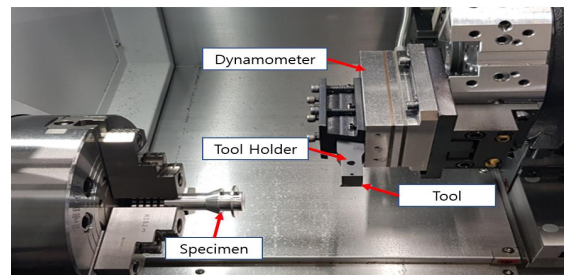
StdOrder	speed(m/min)	feed(mm/rev)	doc(mm)	Thermal
18	350	0.4	2	1.5
2	300	0.2	1	1
4	300	0.6	1	1
31	250	0.4	2	1.5
29	250	0.4	2	1.5
9	200	0.2	1	2
15	200	0.6	3	2
8	300	0.6	3	1
25	250	0.4	2	1.5
13	200	0.2	3	2
1	200	0.2	1	1
19	250	0	2	1.5
16	300	0.6	3	2
17	150	0.4	2	1.5
14	300	0.2	3	2
12	300	0.6	1	2
22	250	0.4	4	1.5
20	250	0.8	2	1.5
6	300	0.2	3	1
5	200	0.2	3	1
3	200	0.6	1	1
28	250	0.4	2	1.5
10	300	0.2	1	2
27	250	0.4	2	1.5
11	200	0.6	1	2
21	250	0.4	0	1.5
7	200	0.6	3	1
30	250	0.4	2	1.5
23	250	0.4	2	0.5
24	250	0.4	2	2.5
26	250	0.4	2	1.5

### 3. 2차원 절삭실험

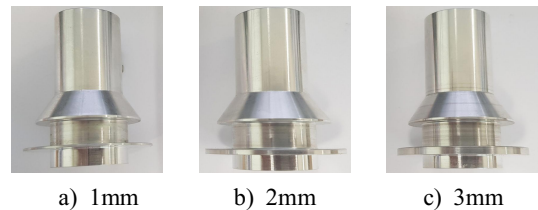
#### 3.1 절삭 실험방법 및 장치

2차원 절삭실험은 최고 3500rpm의 주축회전속도를 가지는 CNC선반(GT2100B, DOOSAN)을 이용하였다. 주축에 2차원 절삭 시편을 장착하고 공구메거진에 공구동력계를 부착하였다. 그리고 공구동력계 상부에 공구 홀더 및 공구를 장착하여 절삭력을 획득하였다. Fig. 3은 시편 및 절삭력 측정 장비가 부착되어있는 그림을 나타내었다. 시편은 회전하고 공구메거진이 부착되어있는 공구가 직선적으로 이동하여 시편에 접근하여 2차원 절삭실험으로 절삭력을 측정한다.

Fig. 4는 2차원 절삭실험에 사용된 시편을 나타내고 있다. 시편은 주축에 장착되고 원통형상으로 직경  $\varnothing$  25mm로 제작하였다. 그리고 절삭 실험 형상은 선반에서 실험하기 위하여 디스크 형태로 제작하였다. 절삭력을 측정하기 위한 디스크 직경은  $\varnothing$ 50mm 두께는 1mm, 2mm, 3mm로 제작하였다. 시편의 재료는 AL2519-T87의 재료를 사용하였으며 공구는 대구택 TPGN 220404 초경공구를 사용하였다.



**Fig. 3 Two-dimensional cutting experiment device**



**Fig. 4 Dimensions and shapes of AL2519-T87 for predicting of cutting forces by cutting conditions**

**Table 2 Cutting conditions for comparison of cutting forces**

Case	Feedrate,(mm/rev)	Cutting speed,(m/min)	Depth of cut,(mm)
1	0.2	200	1
2	0.4	200	
3	0.6	200	
4	0.2	300	
5	0.4	300	
6	0.6	300	
7	0.2	400	
8	0.4	400	
9	0.6	400	
10	0.2	200	
11	0.4	200	2
12	0.6	200	
13	0.2	300	
14	0.4	300	
15	0.6	300	
16	0.2	400	
17	0.4	400	
18	0.6	400	
19	0.2	200	
20	0.4	200	
21	0.6	200	3
22	0.2	300	
23	0.4	300	
24	0.6	300	
25	0.2	400	
26	0.4	400	
27	0.6	400	

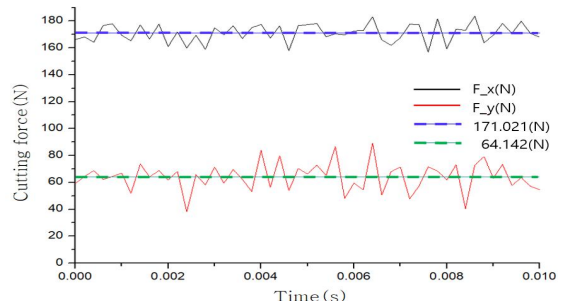
Table 2는 열연화 계수를 결정한 후 조건별 절삭력 비교를 위한 절삭조건을 나타내고 있다. 절삭속도는 200m/min에서 400m/min까지 100m/min씩 증가시키면서 3가지 조건을 선정하였으며, 이송속도는 0.2mm/rev에서 0.6mm/rev까지 0.2mm/rev씩 증가시키면서 3가지 조건을 전하였다. 마지막으로 절입량은 1mm에서 3mm까지 1mm 증가하면서 3가지 조건을 조합하여 27개의 절삭력을 실험과 시뮬레이션을 수행하고 절삭력을 비교하였다.

### 3.2 절삭력 결정

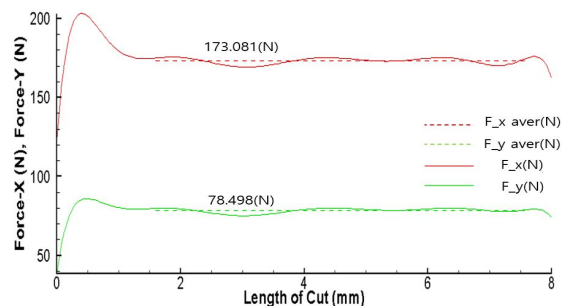
시뮬레이션 절삭력과 실험 절삭력을 비교하기 위하여 실험 절삭력은 2차원 절삭실험으로 획득하고 시뮬레이션은 시뮬레이션 수행 후 일정 구간의 데이터를 평균하여 실험과 시뮬레이션 절삭력을 구하였다.

Fig. 5는 절삭속도 200m/min, 이송속도 0.2mm/rev, 절입량 1mm의 절삭조건에서 절삭이 이

루어질 때 공구동력계로 측정하여 평균값을 구하고 이를 실험 절삭력으로 사용하였다. 주분력은 공구에 영향을 가장 많이 주는 절삭력으로 X축 방향의 절삭력이다. 이를  $F_x$ 로 표시하였다. 측정된 절삭력을 평균을 내어 171.021 N으로 결정하였다. 배분력은 공구 상단에서 수직으로 받는 절삭력으로 Y축 방향의 절삭력이다. 이를  $F_y$ 로 표시하였다. X축 절삭력 결정과 동일하게 평균을 내어 64.142N을 나타내었다. Fig. 6은 시뮬레이션으로 절삭력을 예측한 결과로 절삭 초기 칩두께가 두꺼워지면서 전단각이 줄어들고 열연화 현상이 발생하기 이전에 절삭력이 높아진다. 그러나 열연화 현상이 발생하면 전단각이 높아지고 이에 절삭력이 안정화되는 현상이 발생하였다. 그리하여 절삭이 시작되는 전반부의 20%와 후반부 10%의 절삭력을 제외하고 평균 절삭력으로 결정하였다. 주분력인  $F_x$ 는 173.081N으로 결정하였으며 배분력인  $F_y$ 는 78.498N으로 결정하여 실험과 시뮬레이션의 결과를 비교하였다.



**Fig. 5  $F_x$  and  $F_y$  cutting forces to cutting conditions**



**Fig. 6  $F_x$  and  $F_y$  simulation cutting forces to cutting conditions**

## 4. SHPB실험을 이용한 구성방정식 계수 결정

### 4.1 가공 경화 및 속도 경화 계수 결정

가공 경화항 및 속도 경화항의 계수값을 결정하기 위해서는 응력-변형률 선도가 필요하다. 속도가 0.005/s의 저속구간은 만능시험기를 이용하여 압축 실험을 수행하여 데이터를 획득하였다. 그리고 고속구간은 912/s, 2473/s, 3727/s, 5570/s, 6252/s 조건에서 SHPB 압축실험을 통하여 속도를 변화시키면서 응력-변형률 곡선을 획득하였다. 그리고 획득한 응력-변형률 선도를 진응력-진변형률 선도로 변환하였다. 진응력-진변형률 선도에서 탄성구간을 제외하면 소성진응력-진변형률 곡선이 완성된다. 이를 이용하여 비선형 커브 피팅으로 계수값을 구할 수 있다.

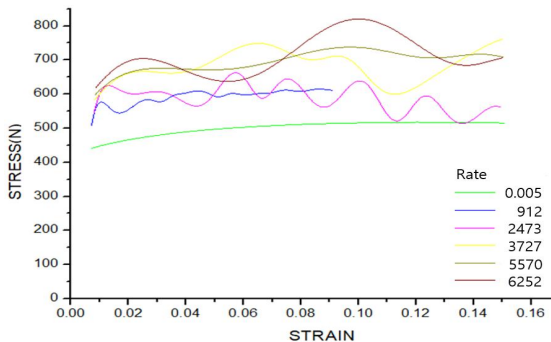


Fig. 7 Change of plastic stress-plastic strain according to the speed change obtained by experiment

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

Fig. 7은 속도변화에 따른 소성진응력-진변형률 선도를 나타내고 있다. Table 3은 시험에서 획득한 소성진응력-진변형률 선도를 이용하여 획득한 가공 경화항 및 속도 경화항의 계수값을 나타내고 있다.

### 4.2 열연화 계수 결정

일반적인 열연화 계수는 동일한 속도에서 온도의 변화를 주어 획득한 소성진응력-진변형률 선도를 이용하여 구할 수 있다. 상온에서 획득한 응력값보다 온도가 높아질수록 응력값이 낮아지는 특성을 가지고 있다. 하지만 시편의 온도를 올리기 위하여 고주파 유도가열을 시킨다. 이때 측정 장비의 노이즈가 발생하여 정확한 응력-변형률 선도를 획득하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 그리고 입력봉과 출력봉이 시편에 접촉하였을 때 온도가 급격하게 낮아져 시편 온도 측정의 정확성에 문제점을 가지고 있다. 그리하여 절삭실험과 시뮬레이션을 이용하여 열연화 계수를 결정하는 방법으로 열연화 계수를 결정하였다.

절삭가공에서 절삭재료와 공구 사이에 절삭이 이루어질 때 열이 발생하고 이 열에 의하여 절삭력이 낮아지는 열연화 현상이 발생한다. 그렇기 때문에 열연화 계수를 정확하게 예측할수록 절삭력 공구수명 등을 정확하게 예측할 수 있다. 절삭가공은 온도 변화에 따라 절삭력이 민감하게 변화되며 절삭 온도가 높아질수록 절삭력이 낮아지며 절삭온도가 낮아지면 절삭력이 높아지는 특징이 있다. 그래서 본 논문에서는 열연화 계수를 결정하기 위하여 절삭실험에서 획득한 절삭력을 기준 데이터로 결정하고 절삭조건인 절삭속도, 이송속도, 절입량 및 열연화 계수를 인자로 반응표면법의 중심합성법을 사용하여 열연화 계수를 결정하였다.

Table 4는 절삭속도, 이송속도, 절입량 및 열연화 계수를 변화시키면서 절삭 시뮬레이션에서 획득한 절삭력을 나타내고 있다.

직교배열표의 결과를 이용하여 MINITAB을 사용하여 통계 분석하였다. Table 5는 F\_x의 절삭력에 대한 분산분석의 결과값을 나타내고 있다. 조건별 실험을 통하여 획득한 절삭력을 이용하여 반응표면의 모형 구축 및 회귀식 추정을 위해 인자에 대한 반응표면 형태를 고려하는 Full quadratic형으로 예

측모델을 설정하였다. 시뮬레이션에서 얻어진 F\_x 절삭력으로 분산분석 결과는 회귀 분석을 통하여 획득한 회귀식이 99.02%로 회귀모형이 잘 이루어졌다고 판단할 수 있었다.

Table 6은 최적화 방법을 통하여 획득한 절삭조건별 열연화 계수를 나타내고 있다. 절삭조건별로 최소 1.000697에서 최대 1.795969까지 변화되는 것을 확인하였다. 그러나 조건별로 열연화 계수를 개별로 적용할 수 없기에 오차를 최소화할 수 있는 하나의 열연화 계수를 결정해야 한다. 그래서 최소자승법으로 1.47602와 평균으로 1.556281의 열연화 계수를 결정하였다.

Fig.8은 절삭조건별 예측한 열연화 계수와 이를 이용하여 최종적으로 절삭 물성에 적용할 열연화 계수를 나타내었다.

**Table 4 Simulation result according to condition change**

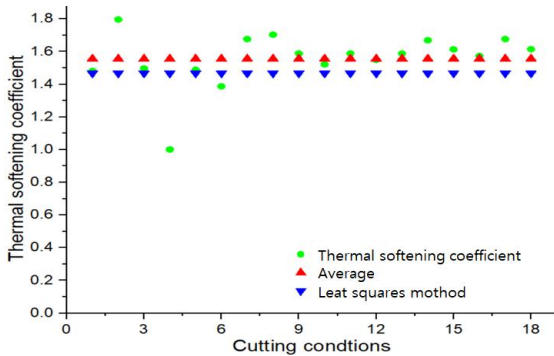
StdOrder	x-force(N)	y-force(N)
18	513.13	147.514
2	201.594	91.705
4	539.592	234.833
31	626.43	277.698
29	626.43	277.698
9	154.214	39.148
15	1045.28	296.979
8	1616.07	701.128
25	623.793	277.019
13	453.642	207.477
1	217.926	96.3709
19	0	0
16	1008.36	219.895
17	663.79	286.769
14	430.255	189.94
12	336.119	73.298
22	1249.25	553.901
20	1002.64	242.519
6	604.783	275.115
5	652.918	289.221
3	550.402	238.802
28	623.793	277.019
10	143.418	63.3132
27	624.624	276.951
11	348.426	98.9929
21	0	0
7	1651.21	716.405
30	624.624	276.951
23	1003.69	437.696
24	435.772	125.467
26	624.624	276.951

**Table 5 ANOVA table for thermal softening coefficient**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-V	P-V
Regression	8	4856434	99.02%	4856434	607054	277.75	0.000
Linear	4	4398540	89.68%	4398540	1099635	503.13	0.000
speed	1	10215	0.21%	10215	10215	4.67	0.042
feed	1	1623434	33.10%	1623434	1623434	742.79	0.000
doc	1	2324619	47.40%	2324619	2324619	1063.61	0.000
temp	1	440271	8.98%	440271	440271	201.44	0.000
Square	1	27366	0.56%	27366	27366	12.52	0.002
feed*feed	1	27366	0.56%	27366	27366	12.52	0.002
Interaction	3	430528	8.78%	430528	143509	65.66	0.000
feed*doc	1	281413	5.74%	281413	281413	128.76	0.000
temp*temp	1	78876	1.61%	78876	78876	36.09	0.000
doc*temp	1	70239	1.43%	70239	70239	32.14	0.000
Error	22	48083	0.98%	48083	2186		
lack of fit	16	48076	0.98%	48076	3005	2449.13	0.000
Pure Error	6	7	0.00%	7	1		
총계	30	4904518	100.00%				

**Table 6 Predicted of thermal softening coefficient by cutting conditions**

Case	d.o.c (mm)	speed (m/min)	feed (mm/rev)	T.S.C
1	1 mm	200	0.2	1.481785
2		200	0.4	1.795969
3		200	0.6	1.496925
4		300	0.2	1.000697
5		300	0.4	1.488915
6		300	0.6	1.387495
7	2 mm	200	0.2	1.676334
8		200	0.4	1.702934
9		200	0.6	1.587975
10		300	0.2	1.52143
11		300	0.4	1.588675
12		300	0.6	1.549145
13	3 mm	200	0.2	1.588075
14		200	0.4	1.669399
15		200	0.6	1.61311
16		300	0.2	1.57317
17		300	0.4	1.676449
18		300	0.6	1.614579



**Fig. 8 Determination of thermal softening coefficient using predicted thermal softening coefficient by cutting conditions**

### 5. 절삭조건별 예측된 절삭력

절삭 시뮬레이션은 절삭실험에서 발생하는 시간과 비용 문제를 해결하고 육안으로 확인할 수 없는 물리적인 현상을 확인하기 위하여 사용된다. Table 7은 절삭조건별 절삭실험과 열연화 계수에 따른 시뮬레이션 절삭력을 나타내었으며 Fig. 9는 절입량별로 절삭조건 변화에 의한 주분력의 변화를 나타내었다. 절입량과 이송속도를 고정하고 절삭속도의 변화에 따라 절삭력은 감소되는 경향성을 나타내고 있다. 절입량과 절삭속도를 고정하고 이송속도의 변화에 따른 절삭력은 선형적으로 증가하는 경향성을 나타내고 있다. 마지막으로 절삭속도와 이송속도를 고정하고 절입량의 변화에 따른 절삭력은 선형적으로 증가하나 증가량이 이송속도보다 낮게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

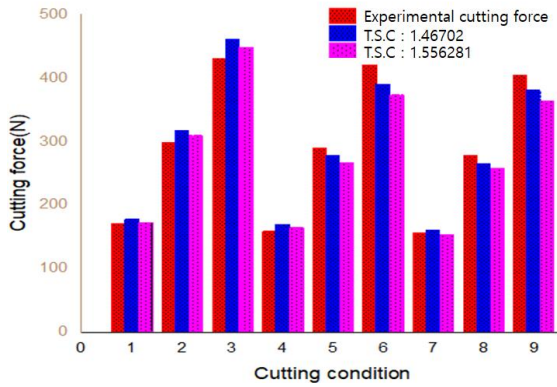
Fig. 10은 전체 절삭조건별 절삭실험과 시뮬레이션에서 획득한 절삭력의 오차를 나타내었다. 절삭속도가 200m/min일 때 이송속도에서 열연화 계수가 1.556281일 때 실험에서 획득한 절삭력과의 오차가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 절삭속도가 300m/min과 400m/min에서는 이송속도 0.2mm/min에서는 열연화 계수가 1.556281에서 오차가 적게 나타났으나 이송속도 0.4mm/rev과 0.6mm/rev에서는 열연화 계수가 1.46702에서 실험 절삭력과 오차가 적게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 두 열연화 계수를 적용한 시뮬레이션 절삭력의 경향은 절삭실험에서 확

득한 경향성과 동일한 것을 확인할 수 있었다. 열연화 계수 1.46702에서 전체 절삭조건 오차의 평균은 5.61%, 1.556281에서는 5.54%의 평균 오차를 나타내었고 공구 회사에서 제공하는 절삭조건을 검토한 결과 열연화 계수를 1.556281로 결정하여 시뮬레이션에 적용하였다.

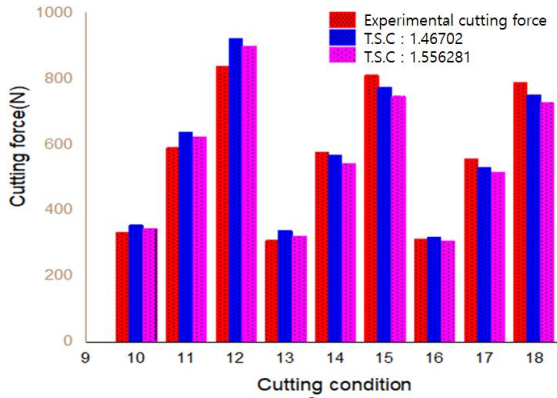
**Table 7 Cutting force of cutting simulation using predicted thermal softening coefficient and cutting force obtained through cutting experiment**

Case	Experimental cutting force		Simulation cutting force			
	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	T.S.C:1.46702		T.S.C:1.556281	
			F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)
1	171.021	64.142	177.937	80.482	173.081	78.498
2	298.319	97.316	318.174	139.711	310.227	136.152
3	430.199	128.517	460.696	200.907	448.989	196.032
4	158.679	55.321	169.347	78.252	164.827	76.241
5	290.335	80.913	278.144	87.461	266.727	79.318
6	420.778	106.352	390.907	101.871	374.313	90.234
7	156.946	49.551	160.683	68.792	153.74	63.345
8	278.812	59.286	265.318	70.913	258.449	97.88
9	404.685	76.105	381.391	91.656	365.248	73.103
10	333.261	136.913	355.999	160.73	346.054	156.776
11	590.648	185.295	625.133	271.114	624.329	273.761
12	837.743	225.102	915.517	398.371	900.576	393.385
13	308.958	103.174	339.197	156.785	322.277	149.021
14	576.791	142.958	569.289	194.332	541.936	171.32
15	811.904	163.966	752.472	173.562	748.626	180.469
16	311.597	113.266	313.679	133.816	307.481	126.69
17	556.859	131.159	522.292	137.998	516.897	135.761
18	789.399	143.031	750.705	159.873	730.496	146.206
19	509.231	210.068	533.998	241.095	519.081	235.163
20	887.14	276.98	958.658	419.921	936.493	410.641
21	1256.846	371.344	1386.44	604.646	1350.86	590.077
22	471.658	163.982	508.796	235.178	494.885	229.118
23	843.317	211.257	853.933	291.498	812.903	256.98
24	1214.803	245.355	1163.31	291.279	1122.94	270.703
25	454.279	141.086	479.23	202.253	461.221	190.035
26	834.705	187.279	795.954	212.739	775.346	203.641
27	1179.438	191.753	1140.7	263.674	1095.74	219.309

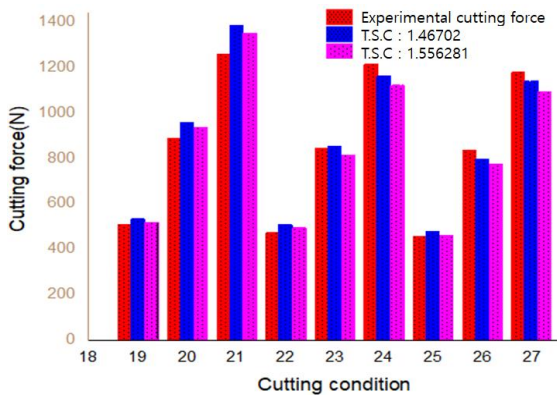




a) Depth of cut : 1mm



b) Depth of cut : 2mm



c) Depth of cut : 3mm

Fig. 9 Comparison of X axis cutting force by changes in cutting conditions

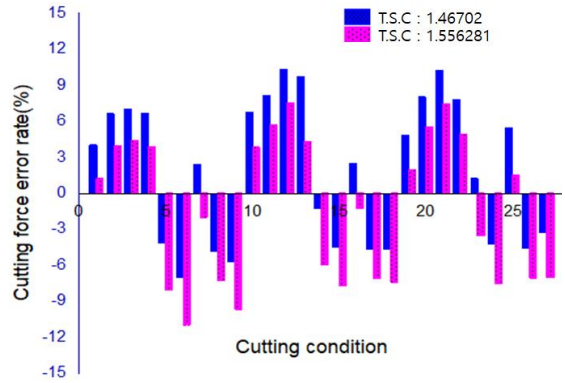


Fig. 10 Cutting force error in cutting experiments and simulations by cutting conditions

## 6. 결론

반응표면법을 이용하여 열연화 계수를 결정하고 다양한 절삭조건에서 절삭실험과 시뮬레이션의 절삭력을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상온에서 준정적 실험 및 SHPB 실험을 수행하여 가공 경화항의 계수 및 변형률 속도 경화항의 계수를 결정하고 반응표면법을 활용한 열연화 계수를 결정하여 S-K 구성방정식을 구성하였다.
2. 절삭속도, 이송속도, 절입량과 물성에 사용되는 열연화 계수를 인자로 반응표면법의 최적화를 통하여 열연화 계수 1.556281로 결정하였다. 그리고 절삭실험과 시뮬레이션의 절삭력을 이용하여 구성방정식의 열연화 계수 예측 방법이 타당하다고 판단된다.
3. AL2519-T87 재료는 절입량과 절삭력, 이송량과 절삭력은 각각 비례 관계를 보이나 절입량과 이송속도 증가량 대비 절삭력의 증가량은 감소하는 추세를 보이며 절삭속도가 증가하면 절삭력이 감소하고 절삭력의 감소량이 줄어들었다.

## REFERENCES

1. Shin, H. H., Kim, J. B., "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*, Vol. 132 pp. 1-6, 2010.
2. 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”, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 33, No. 7, pp 587-594, 2016.
  3. Shrot, A., Bäker, M., "Determination of Johnson-Cook Parameter from Machining Simulation", *Computational Material Science*, Vol. 52, No. 1, pp. 298-304, 2012.
  4. 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.
  5. 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.
  6. Shatla, M., Kerk, C., Altan, T., "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.
  7. 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.
  8. 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.
  9. 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.
  10. Ku, B. M., Kim, T. H., Jeon, E. C., “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*, Vol. 28, No. 3, pp. 148-155, 2019.
  11. Koo, J. Y., Cho, M. H., Kim, H., Kim, J. S., “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*, Vol. 23, No. 3, pp. 284-290, 2014.