

절삭실험을 이용한 저합금강의 유동응력 결정 및 검증

안광우*, 김동후**, 김태호***, 전언찬#

(#,* 동아대학교, ** OBPeng(주), ***T&S 머시닝(주))

Determination and Verification of Flow Stress of Low-alloy Steel Using Cutting Test

Kwang-Woo Ahn*, Dong-Hoo Kim**, Tae-Ho Kim***, Eon-Chan Jeon#

(Received 25 April 2014; received in revised form 26 May 2014; accepted 14 October 2014)

ABSTRACT

A technique based on the finite element method (FEM) is used in the simulation of metal cutting process. This offers the advantages of the prediction of the cutting force, the stresses, the temperature, the tool wear, and optimization of the cutting condition, the tool shape and the residual stress of the surface. However, the accuracy and reliability of prediction depend on the flow stress of the workpiece. There are various models which describe the relationship between the flow stress and the strain. The Johnson-Cook model is a well-known material model capable of doing this. Low-alloy steel is developed for a dry storage container for used nuclear fuel. Related to this, a process analysis of the plastic machining capability is necessary. For a plastic processing analysis of machining or forging, there are five parameters that must be input into the Johnson-Cook model in this paper. These are (1) the determination of the strain-hardening modulus and the strain hardening exponent through a room-temperature tensile test, (2) the determination of the thermal softening exponent through a high-temperature tensile test, (3) the determination of the cutting forces through an orthogonal cutting test at various cutting speeds, (4) the determination of the strain-rate hardening modulus comparing the orthogonal cutting test results with FEM results. (5) Finally, to validate the Johnson-Cook material parameters, a comparison of the room-temperature tensile test result with a quasi-static simulation using LS-Dyna is necessary.

Key Words : Flow stress(유동응력), Johnson-Cook model(존슨-쿡 모델), Finite element method(유한요소해석), Cutting test(절삭시험), Low-alloy steel(저합금강), Cutting simulation(절삭시뮬레이션)

1. 서 론

산업 기술의 발달과 고도로 세부화된 수요에 맞추어 신소재가 개발되고 있다. 아울러 개발된 금속 소재의 성형 및 가공을 위해 공정해석 시뮬레이션에 대한 요구도 지속적으로 증가하고 있다. 가장 보편적인 방법인 절삭가공은 소재에 물리적인 힘을 가하여 소재를 제거하는 방식으로 대부분 생

* Graduate of School of Dong-A UNIV.

Corresponding Author :
Department of Mechanical Engineering, Dong-A UNIV.
E-mail : ecjeon@dau.ac.kr

** OBPeng Co.

*** T&S Machining Co.

산현장에서 직·간접적으로 폭넓게 사용되고 있으며, 이에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁾³⁾ 그리고 절삭가공에서도 컴퓨터의 발달로 수치해석이 활발하게 이루어지고 있으며, 절삭조건, 절삭성평가 및 절삭품질 등을 미리 예측할 수 있게 되었다. 하지만 다양한 소재의 개발로 수치해석에서 필요한 피삭재 모델이 완성되지 못하고 여러 가지 모델이 사용되고 있다.⁴⁾

학계에서도 가장 널리 인정되고 있는 모델은 Johnson-Cook 모델로 이 모델은 재료의 유동응력을 단순히 strain의 함수로만 표현하는 것이 아니라 strain rate 및 발생 온도의 함수로 기술하고 있다.

Johnson-Cook 모델의 재료 상수를 결정하기 위해서는 시험이 필수적이며, 상온인장, 고온인장, 직교 절삭시험, 절삭수치해석을 통해 변형률 속도 경화계수의 산정에 사용된다. 그러나 이러한 시험 장치들은 상대적으로 매우 고가이며, 시험 자체가 매우 제한적인 환경에서 수행될 수 밖에 없는 것들도 있다. 또한 이들 시험에서 표현할 수 있는 변형률 속도의 영역 또한 제한적이다. 이에 반해 절삭가공은 유효변형률 50 ~ 1,000%, 유효 변형률 속도는 10 ~ 10⁵까지 구현할 수 있으며, 고속절삭의 경우에는 10⁷ 까지도 구현할 수 있다.⁵⁾⁷⁾

따라서 본 연구에서는 개발된 저합금강 신소재를 절삭용 수치해석모델에 적용하기 위하여 절삭시험과 수치해석을 이용하여 저합금강의 유동응력을 결정하고 절삭용 수치해석모델을 개발하며 이를 검증하는 것을 목적으로 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.

$$\sigma = \sigma_0 + K\epsilon^n \dots\dots\dots(1)$$

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

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

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

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + Cn \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \dots\dots(3)$$

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

$\left(1 + Cn \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right)$ 는 변형률 속도경화를 나타내며, $\dot{\epsilon}$ 는

변형률 속도, $\dot{\epsilon}_0$ 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 변형과 동일 때 얻어지게 되므로 초기항복이 발생할 때 구한다. 하지만 본 연구에서는 절삭시험을 통해 획득한 절삭력을 기준으로 시뮬레이션을 통하여 획득하였다. 이 구성방정식을 이용하여 고변형률 속도하에서 초기 실험온도와 변형률 속도에 의한 재료의 응력과 변형률의 관계를 구할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상온인장시험

본 연구에 사용된 재료는 사용 후 핵연료 수송·저장 용기의 Bottom부와 Shell부에 사용하기 위하여 개발된 재료로 탄소가 0.2%로 함유된 저합금강이다. 저합금강의 유동응력을 결정하기 위해서 Johnson-Cook 모델을 사용하였으며, A , B , n 의 상수를 결정하기 위하여 상온인장시험을 수행하였다. 시험에 사용된 인장시편 규격은 KS B 0801의 4호 시험편으로 직경은 14mm, 표점거리는 50mm이다. 상온 인장시험은 3회 반복 수행되었으며, 시험 방법은 KS B 0802에 따라 수행하였다.

식(3)을 다시 기술하면 식(4)로 표시할 수 있다.

$$\sigma = f_0(\epsilon)f_1(\dot{\epsilon})f_2(T) \dots\dots\dots(4)$$

여기서 $f_0(\epsilon)$ 는 변형률에 대한 민감도, $f_1(\dot{\epsilon})$ 는 변형률 속도에 대한 민감도, $f_2(T)$ 는 온도에 대한 민감도를 나타내고 있다. 상온에서 수행된 인장시험 결과를 이용하여 A , B , n 을 결정하였다. 이 때 기준변형률속도 (ϵ_0)와 기준온도(T_{ref})는 상온인장시험 조건을 그대로 사용하였는데, 그 값은 각각 0.02 min⁻¹와 23℃였고 재료의 용융점(T_{melt})은 1580℃이다. 이 값들을 위 식에 대입하면 상온인장시험의 경우, 변형률속도에 대한 민감도 ($f_1(\dot{\epsilon})$)와 온도에 대한 민감도($f_2(T)$)가 1이 되어 Johnson-Cook 물성치 모델은 다음과 같이 변형률에 대한 민감도($f_0(\epsilon)$)항만이 남게 된다.

Fig. 1은 3회 반복한 인장시험 결과에서 소성영역 부분에 대해 curve fitting 그래프이다. 상온인장은 3회 반복수행 되었는데 인장시편 직경은 14mm, 표점거리는 50mm였다. 3회의 인장시험으로 얻은 하중-변위 곡선을 진응력-진변형률 곡선으로 변환하고, 탄성영역을 제외한 후 curve fitting하여 A , B , n 을 결정하였다. 이 경우, necking 발생 후 진응력-진변형률 곡선은 necking 전의 진응력-진변형률 곡선의 추세선을 구하고, 진응력-진변형률 곡선을 fracture 시점까지 선형적으로 확장시켜 각 값을 구할 수 있었다. 3회 반복수행된 인장시험으로부터 구해진 A , B , n 값 및 그 평균값을 Table 1에 나타내었으며 평균값을 식(3)에 대입하면 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

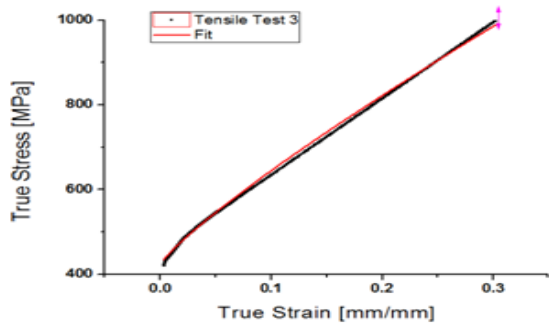
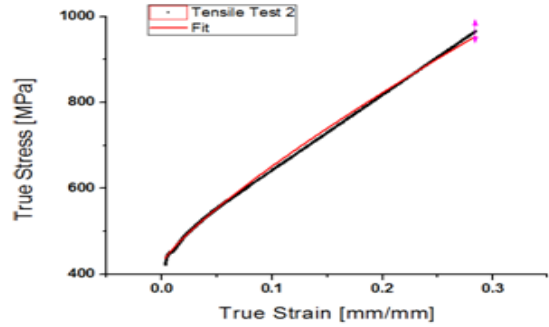
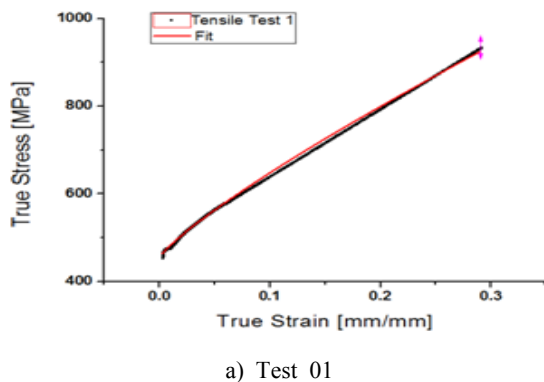


Fig. 1 Result of tensile test

$$\sigma = (423.1 + 1514.4\epsilon^{0.8278}) \left(1 + A n \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (5)$$

Table 1 A, B, n from tensile test

	A	B	n	R2
Test 1	454.4	1317.3	0.8323	0.999
Test 2	423.7	1467.6	0.8090	0.999
Test 3	422.5	1561.1	0.8465	0.999
Average	423.1	1514.4	0.8278	0.999

3.2 고온인장시험

Johnson-Cook 모델의 온도항 관련 재료상수인 열연화지수(m)을 선정하기 위하여 고온인장시험을 수행하였다. 시험에 사용된 인장시편은 ASTM E8 5D의 기준으로 하였다. 고온인장시험은 500℃, 60

0℃, 700℃, 800℃, 900℃의 온도에서 인장속도 0.2 mm/min 로 3회 반복 수행되었는데 인장시편의 직경은 6.25mm, 표점거리는 25mm였다. 식 (4)에서 변형률속도에 대한 민감도($f_1(\dot{\epsilon})$)는 고온인장시험의 경우 기준변형률속도(0.02 min⁻¹)와 인장시험의 변형률속도(0.008min⁻¹)차가 크지 않고 C는 일반적으로 충분히 작은 값을 가지므로 무시될 수 있다. 따라서 식 (5)는 다음 식 (6)과 같이 단순화될 수 있다.

$$\sigma = (423.1 + 1514.4\epsilon^{0.8278}) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (6)$$

각 온도에서 인장시험으로 얻은 하중 - 변위 곡선을 necking이 발생하기 이전까지의 변형에 대해 진응력 - 진변형률 곡선으로 변환하면 Fig. 2와 같다.

이 중 진변형률이 0.12일 때, 각 온도에서 구한 진응력의 평균값과 식(5)를 통해 구한 진응력 편차의 제곱합이 최소가 되게 하는 m 값을 구하였다. 그 결과 m 값은 0.3759로 정하였다. 진변형률이 0.12일 때 각 온도에서의 진응력은 전 구간에서의 온도별 진응력의 상대적 크기를 잘 대표하고 있어 진변형률이 0.12일 때의 분석만으로도 충분히 정확한 m 값을 준다고 할 수 있다. 하지만 보다 정확한 예측을 위하여 소성영역 전 구간에서 각 온도에서 구한 진응력의 평균값과 식 5를 통해 구한 진응력 편차의 제곱합이 최소가 되게 하는 m 값을 0.326으로 정하였다.

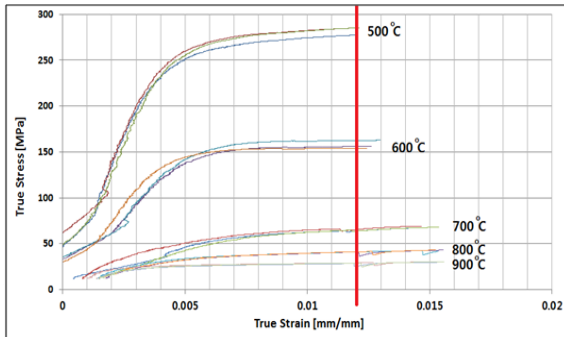


Fig. 2 Stress-strain curve at various temperature

3.3 직교 절삭 시험

소재의 변형률 속도항 관련 재료 상수인 변형률속도 경화계수 C 값을 산정하기 위하여 직교 절삭 시험을 수행하였다. 변형률 속도의 변화량을 충분히 반영할 수 있도록 절삭 조건을 산정하였으며, 절삭력을 측정하였다. 2차원 절삭 시험을 위하여 모재를 파이프 형태로 사전에 제작된 공작물과 이송방향에 수직인 절삭 공구를 준비하였다. 실험은 경사각(rake angle), 절삭깊이와 이송속도(f)는 고정하고 절삭속도만 바꾸어 가며 진행하였다.

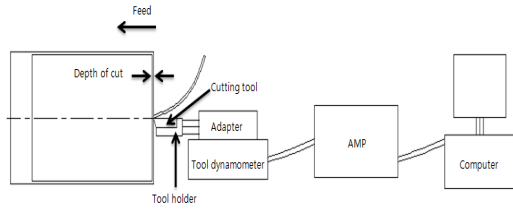
Table 2는 2차원 절삭시험 조건을 나타내고 있다. 회전당 이송속도는 동일하며 각 이송속도에 맞는 회전수와 이송속도 및 가공길이를 결정하였다.

Fig. 3은 2차원 절삭시험 공정과 시험장치를 나타내었다. 선반주축에 공작물을 장착하고 공구대 위에 공구를 장착한 공구동력계를 설치하여 절삭력을 측정하며 측정된 신호는 Charge Amplifier로 보내져 증폭되고 증폭된 신호는 A/D컨버터에 의하여 절삭력에 상당하는 전압값으로 변환된다. 변환된 신호는 PC기반의 절삭력 분석 프로그램을 이용하여 절삭력을 분석하였다. Fig. 4는 절삭실험을 위한 모재와 공구가 장착된 모습을 그림으로 나타내고 있다.

실험 결과 저속 영역 85 ~ 330 RPM에서는 과도한 버의 발생이 관측되었고, 이의 영향으로 칩의 폭이 매우 두꺼워지는 경향이 관측되었다. Fig. 5는 저속영역에서의 버의 발생 사진이다. 이 결과는 소재의 변형률을 제대로 표현하지 못하는 즉, 실험 조건을 만족하지 못하고 있다고 판단되어 변형률

Table 2 Conditions of cutting test

No	Spindle speed [rpm]	feed rate [mm/rev]	cutting speed [mm/sec]	Length of cut [mm]	Machining time [sec]
1	1260	0.105	3.2	30	14
2	620		1.6	15	14
3	330		0.8	8	13
4	160		0.4	4	13
5	85		0.2	2	13



(a) 2D cutting test procedure



(b) 2D cutting test equipment

Fig.3 Photo of experimental set up



(a) Workpiece



(b) Tool and holder



(c) Tool and workpiece on lathe

Fig.4 Photo of workpiece, tool and holder

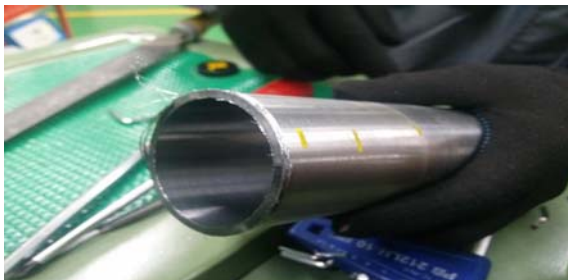


Fig.5 Photo of burr occurred at low cutting speed

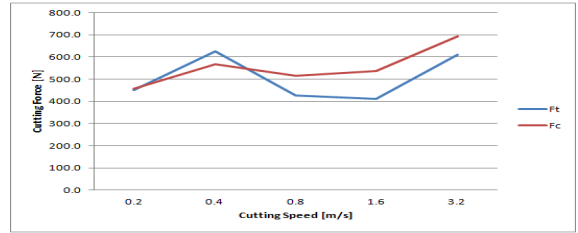


Fig.6 Relationship between cutting speed and cutting force

속도 추정에 사용할 데이터에서는 배제하였다. Fig.6은 절삭속도 변화에 따른 절삭력을 나타내고 있다. 직각절삭시험 결과는 변형률속도 경화계수 C 값을 획득하기 위한 수치해석의 기준값으로 사용된다.

3.4 절삭 수치 해석

AdvantEdge FEM 소프트웨어를 이용하여, 직각 절삭 시험 수행 조건에 대한 수치해석을 수행하였다. 변형률속도 경화계수 C 값을 변화하여 물성모델을 구성하고, 이 때 해석된 절삭력과 실험에서

Table 3 Comparison of cutting force in C at FEM and test

Cutting Speed (V) [m/min]	C	Cutting Force	
		FEM (S-Ft : N)	Test (P-Ft : N)
192	0.001	708	451
	0.023	612	
	0.1	567	
	0.18	583	
	0.25	597	
	0.32	626	
96	0.6	699	624
	0.001	861	
	0.023	805	
	0.1	693	
	0.18	645	
	0.25	662	
	0.32	681	
	0.6	735	

얻어진 절삭력 결과를 비교, 유추하여 최종적으로 C 값을 유추하고자 하였다.

절삭시험 결과 저속에서는 버의 발생이 관찰되어, 해당 시험결과는 비교용으로 사용하지 않았다. Table 3은 절삭속도 192 m/min과 96 m/min 일 때 C 값의 변화에 따라 해석된 절삭 주분력 (S-Ft) 값과 실험에 의해 상기 속도에서 획득된 절삭 주분력 (P-Ft) 값이다.

Fig. 7은 절삭속도 192 m/min에서 수치해석에서 획득한 절삭주분력과 실험에서 획득한 절삭주분력을 나타낸 그래프이며 Fig. 8은 절삭속도 96 m/min에서 수치해석에서 획득한 절삭주분력과 실험에서 획득한 절삭주분력을 나타낸 그래프이다.

수치해석에 의한 절삭력의 분포는 속도 192 m/min에서는 $C=0.1$ 에서 실험치에 최대 근접하고 있고, 속도 96 m/min에서는 $C=0.18$ 에서 실험치에 최대 근접하고 이 후의 값에서는 다시 이격되는 양상을 보이고 있다. 수치해석에 의한 절삭력이 실험의 절삭력보다 항상 큰 값을 보이는 것은 재료가 온도민감도에 많은 영향을 받고 있으나, Johnson-Cook 모델은 온도민감도에 대하여 단일 지수로 표현하기 때문에 열 연화 현상에 대해 본 소재에 대해서는 제대로 반영을 못하고 있다고 판단되었다.

상기 두 속도에 대한 해석값과 실험값의 이격도는 129%와 103%를 보이고 있고, 실험 시 절삭속도 96 m/min에서 가장 좋은 실험 결과 (칩, 절삭력 형성 등)를 보이고 있어, 본 해석에서는 $C = 0.18$ 을 변형률 속도 경화계수로 유추할 수 있었다.

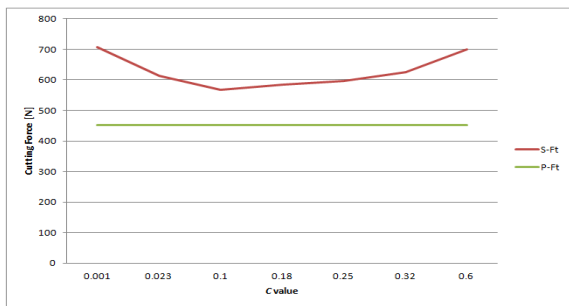


Fig. 7 Relationship between cutting force and value C at V=192 m/min

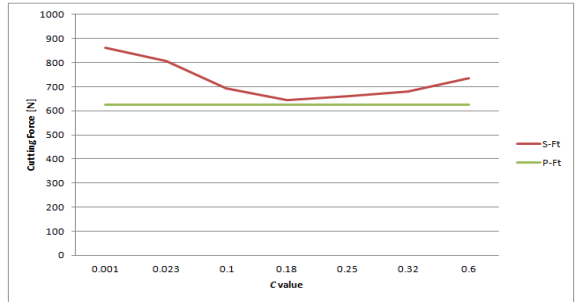


Fig. 8 Relationship between cutting force and value C at V=96 m/min

3.5 수치해석 소프트웨어를 이용한 Johnson-Cook 모델검증

상온 및 고온 인장시험, 절삭시험과 수치해석을 이용하여 Johnson-Cook 모델의 재료 상수 5개를 선정하였다. 본 연구에서 선정된 모델에 대한 검증을 위하여 비선형 수치해석 소프트웨어인 LS-Dyna를 이용하여 검증을 하였다.

검증 모델은 상온인장시험과 동일한 시편을 모델링하고, 동일한 시험 조건을 구속조건으로 부여하여 해석을 수행한 후 소성영역의 Stress-strain을 비교하였다. 상온인장시험이기 때문에 열연화계수인 m 값의 검증에는 사용할 수 없으나, m 값의 경우 시험을 통해 피팅한 값이므로 신뢰성을 가질 수 있다고 판단한다. 절삭시험과 수치해석을 통해 역산정한 변형률속도 경화계수가 주 검증하였다.

Fig. 9는 LS-Dyna 해석을 통해 획득한 소성영역에 대한 Stress-Strain Curve이다. Fig. 10은 Fig. 9의

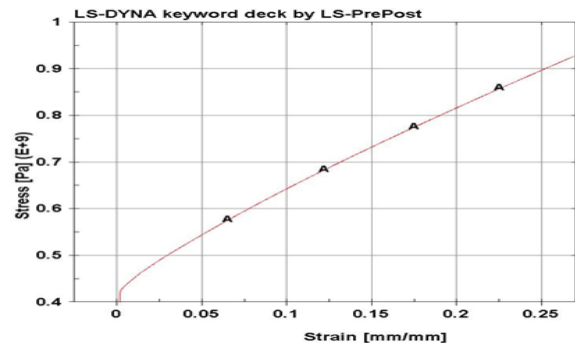


Fig. 9 Stress-strain curve from LS-Dyna simulation

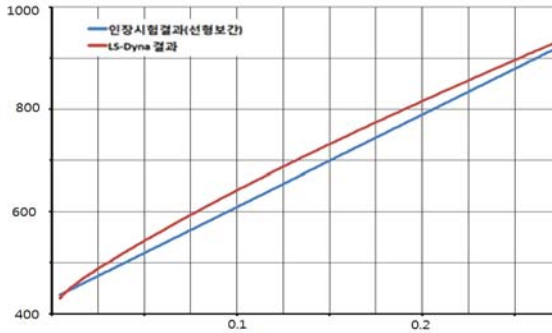


Fig. 10 Stress-strain curve overlay from tensile test and LS-Dyna simulation

그래프와 상온시험을 통해 획득한 Stress-Strain Curve를 겹쳐 평가하였으며, 두 그래프의 상관관계는 매우 밀접하다고 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서 선정된 변형률속도 경화계수는 타당하다고 판단할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 개발된 저합금강 신소재를 절삭용 수치해석모델에 적용하기 위하여 절삭시험과 수치해석을 이용하여 신소재의 유동응력을 결정하고 절삭용 수치해석모델을 개발하고 이를 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상온인장 시험을 통하여 초기 항복응력 A , 변형률 경화지수 B , 변형률 경화 지수 n 을 획득하였으며, 그 값은 $A = 423MPa$, $B = 1514MPa$, $n = 0.827$ 이다.
2. 열적연화계수의 정확한 예측을 위하여 소성영역 전 구간에서 각 온도에서 구한 진응력의 평균값과 식 5를 통해 구한 진응력 편차의 제곱합이 최소가 되게 하는 m 값을 0.326으로 정하였다.
3. 2차원 유한요소해석에서도 고속 영역에서의 결과를 위주로 실험과 비교하였으며, 사전 설정된 여러 가지 변형률 속도 경화 지수 중 $C = 0.18$ 에서 시험과 가장 근접한 절삭력을 계산할 수 있었다.

4. LS-Dyna프로그램을 이용하여 획득한 Johnson-Cook 재료 상수를 입력하여 Quasi-static 시뮬레이션을 수행하여 절삭시험과 FEM해석을 통해 획득한 변형률속도 경화계수의 검증을 통하여 신뢰성을 획득할 수 있었다.

REFERENCES

- 1) B. Hopkinson, "A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets", Phil trans. A, Vol 213, pp.437, 1914.
- 2) H. Kolsky, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at High Rate of Loading", Proc. Royal Soc. B, Vol 62, pp.676, 1949.
- 3) F. E. Hauser, J. A. Simmons, and J. E. Dorn, "Strain Rate Effects in Wave Propagation", in Response of Metals to High Velocity Deformation, Metallurgical Society Conference, Vol. 9, P.G. Shewmon and V.F. Zackay, Ed., Interscience, New York, pp.93, 1961.
- 4) Tuğrul Özel, Yigit Karpat, "Identification of Constitutive Material Model Parameters for High-strain Rate Metal Cutting Conditions Using Evolutionary Computational Algorithms", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 22, Issue 5, pp. 659-667, 2007.
- 5) Aviral Shrot, Martin Bäker, "Determination of Johnson-Cook Parameter from Machining Simulation", Computational Material Science Vol. 52 pp. 298-304, 2012,
- 6) Tuğrul Özel, Erol Zeren, "Determination of Work Material Flow Stress and Friction for FEA of Machining Using Orthogonal Cutting Tests", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 1019-1025, 2004.
- 7) Jihong Hwang, "Determination of Mechanical Properties of Materials Under Extreme Deformation Conditions Using 2-D Orthogonal Machining", Workshop of Ultra Micro Production Technology, 2013