



재료공학석사 학위논문

홉킨슨바 실험 및 수치해석에 기반한 중-고속 변형 조건에서의 Johnson-Cook 경화모델 상수 확보법

2023년 2월

서울대학교 대학원

재료공학부

정영민

홉킨슨바 실험 및 수치해석에 기반한 중-고속 변형 조건에서의 Johnson-Cook 경화모델 상수 확보법

지도 교수 이 명 규

이 논문을 재료공학석사 학위논문으로 제출함 2023년 1월

> 서울대학교 대학원 재료공학부 정 영 민

정영민의 재료공학석사 학위논문을 인준함 2023년 1월

위 원 장 _	한 흥 남	(인)
부위원장	유 웅 열	(인)
위 원	이 명 규	(인)

록 초

Johnson-Cook(JC) 경화 모델은 넓은 범위의 변형율, 변형율 속도, 온도 조건에 따른 금속재료의 소성거동을 잘 예측할 수 있다고 알려져 있다. 하지만, JC 경화 모델 상수를 결정할 때 실험적으로 일정한 조건을 부여하기에는 현실적으로 어려움이 있기 때문에 구성방정식 상수 결정을 위한 다양한 방법들이 제안되었다. 특히, 고속 실험 조건에서는 변형율 속도와 온도는 일정하지 않은 것이 대부분이며 현재까지 알려진 선행연구들은 평균값을 사용하거나 각 조건에 따른 재료거동이 완전히 독립적으로 분리되지 않는다는 가정을 적용하고 있는 실정이다. 하지만, 실제 JC 재료모델을 사용하는 전산모사에서는 비등온(non-isothermal) 조건이거나 변형율 속도가 지속적으로 변화하는 환경에 적용되어야 하므로 전사모사의 정밀도를 높이기 위해서는 소성이론에 근거한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 JC 경화모델을 사용하여 넓은 범위의 변형율 속도 조건에서 재료의 거동을 정확하게 예측하기 위한 모델 상수 확보법에 대하여 실험과 유한요소해석을 동시에 적용한 방법을 제시하고자 한다. 먼저

i

준정적 실험으로부터 얻은 변형율, 변형율 속도 관계를 초기 조건으로 하여 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 실험에 대한 전산모사 해석을 수행한다. 이후 실제 실험에서 얻은 응력-변형율 곡선과 시편 내 온도 데이터를 목적함수로 하여 JC 모델 상수를 역공학 방법(inverse analysis)에 의해 최적화하고자 한다. 최종적으로 얻어진 JC 모델 상수를 이용하여 다른 속도 및 경계조건에서의 재료변형 거동을 예측하여 제안된 물성 확보 방법을 검증하고자 한다.

본 연구에 사용된 소재는 열간 압연된 철강으로 실제 제품으로부터 얻어졌고, 복잡한 제품 형상으로 인해 준정적 인장실험을 위한 표준 시편 보다 작은 미니어쳐 시편을 제작하였다. 0.001s⁻¹, 0.01s⁻¹, 0.1s⁻¹ 의 변형율 속도로 준정적 실험을 진행했고, 고속 변형에서의 재료 물성을 확보하기 위해 변형율 속도 1000s⁻¹, 1400s⁻¹, 2000s⁻¹ 의 조건 아래 SHPB 실험을 수행하였으며, K-타입 열전대를 이용하여 고속 변형에 의한 시편 내 온도 데이터도 함께 측정하였다. 그 후 먼저 준정적 실험을 통한 변형율 속도 의존 응력-변형율 선도를 초기 조건으로 하여 JC 경화 모델을 확보하였다. 소프트웨어인 ABAQUS 의 사용자 정의 서브루틴(VUHARD)을 이용하여 JC 경화 모델에 기반한

ii

SHPB 실험에 대한 해석 모델을 구성하였으며, 이후 SHPB 실험에서 얻어진 온도 값과 응력-변형율 데이터를 목적함수로 하여, 역해석법에 의한 최적의 경화모델 상수를 결정하였다. 즉, 최종적으로 얻어진 JC 모델 상수는 고속 실험에서 얻어진 응력-변형율 곡선, 서로 다른 변형율 속도에 따른 시편 온도값과 일정 오차 범위내에서 일치할 수 있도록 결정되었음을 의미한다.

준정적 변형 조건 실험으로부터 응력, 변형율, 변형율 속도 관계를 확보하고 이를 이용해 고속 변형에서의 응력-변형률 선도로 확장한 후 SHPB 실험으로부터 얻어진 응력-변형률 선도와 변형 후 온도 데이터를 비교한 결과, 새로운 변형율 속도 민감성 항을 포함한 수정된 JC 모델 (Modified-JC; M-JC) 모델을 제시할 수 있었다. 이를 바탕으로 설계한 유한요소 해석을 통해 얻은 물성과 실제 실험에서의 물성 간의 목적함수를 최적화한 결과 M-JC 의 상수를 유효한 범위 내에서 확보하였으며, 이를 통해 전산모사 과정에서 실시간으로 변화하는 변형율 속도와 재료의 온도에 따른 기계적 거동을 구현할 수 있었다.

이를 기반으로 새로운 모양의 시편을 이용한 고속 변형 실험과 유한요소 해석을 통한 검증 결과 제안된 물성 확보 방법이 유의미함을 확인할 수 있었다.

iii

Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단의 ERC 사업의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다 (Grant No. 2019R1A5A6099595).

주요어 : 수정된 Johnson-Cook 모델, 중-고속 변형, 홉킨슨바 실험, 수치해석

학 번:2021-20351

목	차
---	---

1	•••••	론	ነ 서	제 1 경
2	배경	연구의	1 절	제
	내용	연구의	2 절	제

	제 2 장 연구방법
14	제 1 절 준정적
	제 2 절 홉킨슨
론19	제 1 항 홉킨슨
	제 2 항 홉킨슨
및 해석30	제 3 절 유한요?

	제 3 장 실험결과 및 고
결과35	제 1 절 준정적 인장
과	제 2 절 홉킨슨 바 실
	제 1 항 홉킨슨 바 /
	제 2 항 링 홉킨슨 ፣

안55	제인	함수	대한) 에	지수	민감성	유도 1	변형율	항] 3	저
				실험	SHPE	조건	변형	중-고속	항] 4	저

참고문헌......69

Abstract76)
------------	---

감사의	글	.77	I

표 목차

[표.1.1] 준정적 변형율 속도 조건에서의 구성방정식	6
[표.1.2] 동적 구성방정식	8
[표.2.1] 준정적 변형율 속도 실험조건	16
[표.2.2] 고속 변형율 속도 실험 조건	27
[표.3.1] 준정적 변형율 속도 실험에서의 JC 경화모델 상수	36
[표.3.2] 링 SHPB 실험 조건	49
[표.3.3] 링 SHPB 실험 후 시편의 변형 비율	50

그림 목차

[그림.1.1] 변형율 속도에 따른 실험법 분류4
[그림.2.1] 시편 형상 및 실험장비17
[그림.2.2] DIC 변형율 장 측정법 개요18
[그림.2.3] SHPB 실험 개요21
[그림.2.4] SHPB 실험에서 관측되는 변형율 파22
[그림.2.5] SHPB 실험 장비29
[그림.2.6] 유한요소 해석 순서도
[그림.2.7] 유한요소 모델링 및 해석 조건
[그림.3.1] 준정적 인장실험 결과 및 JC 경화곡선
[그림.3.2] SHPB 실험 결과 및 초기 설정으로 계산된 JC 경화곡선
[그림.3.3] SHPB 실험 결과 및 유한요소 해석을 통해 계산된 시편의
온도변화40
[그림.3.4] SHPB 실험 결과 및 열 연화지수 m 수정 후 유한요소
해석 결과41
[그림.3.5] 마찰계수 경계조건 수정 후 유한요소 해석 결과43
[그림.3.6] 링 압축 실험 후 시편 형상 예시46

[그림.3.7] 마찰계수 결정 곡선47
[그림.3.8] 실험 후 시편의 변형 비율에 따른 마찰계수 결정51
[그림.3.9] 변형율 속도 민감성 지수 C 경계조건 수정 후 유한요소
해석 결과53
[그림.3.10] 가정된 변형율 속도 민감성 지수 C의 함수형태57
[그림.3.11] 다양한 변형율 속도를 위한 시편 형상60
[그림.3.12] 사전 시뮬레이션을 통한 시편별 변형율 속도 분포 예상
[그림.3.13] 실험과 유한요소 해석 결과 간 힘-변위 선도 비교63
[그림.4.1] 실험-유한요소 해석 하이브리드법을 이용한 재료물성
획득

제 1장

서 론

목 차

제	1	절연구의	배경	2
제	2	절 연구의	내용1	1

제 1 절 연구의 배경

재료가 힘, 혹은 충격을 받았을 때 어떻게 변형이 일어나는지 예측하는 것은 매우 중요하다. 많은 구조물과 제품들이 이런 예측에 실패하여 무너지거나 정상적인 작동을 하지 못하는 상황이 벌어지곤 한다. 특히 고속의 변형을 겪을 때 물체의 변형을 예측하는 것은 점점 빨라지는 이동수단과 고도화되는 제품들의 기술력, 혹독해지는 사용조건에 따라 최근에 더욱 그 중요성이 부각되고 있다. 각종 운동에너지를 이용한 무기체계와 폭발 상황에 대처해야만 하는 군과 같은 집단에 있어서 이것은 가장 중요한 문제이기도 하다. 고속의 변형을 제대로 예측하지 못할 경우 안전을 위해 더 많은 재료를 투입할 수 밖에 없고, 이 때문에 산업분야에서는 과도한 재료의 낭비가, 군사분야에서는 과도한 전투하중의 증가로 인한 전투력 저하가 발생할 수 있기 때문이다.

과거에 비해 물성의 예측이 정확해진 요즘, 건축분야에서는 과거에 적용하던 안전계수에 비해 축소된 안전계수를 적용하고 있으며, 이에 따라 재료의 낭비를 막고 공기(Construction period)를 단축시켜 경제적인 이득과 낭비되지 않는 재료에서 오는 환경적인 이득을 추구할 수 있게 되었다. 이는 즉, 재료의 변형 예측의

정확도가 향상될수록 산업, 군사분야 양쪽에서도 건축분야와 동일하게 최소의 비용으로 최대의 효율을 추구할 수 있게 된다는 의미로 받아들일 수 있다.

재료의 물성을 측정하는 방법은 변형율 속도 조건에 따라 여러가지 실험법들이 존재한다[1]. 10⁻⁵/s 이하의 변형율 속도에서는 지속적인 하중과 시간에 따른 변화를 관찰하는 크립 실험을 통해 물성을 측정하고[2-4], 10⁻¹/s 이하의 준정적 변형율 속도에서는 유압 장비를 이용한 방법이 주로 쓰인다. 10²/s 이하의 중속 변형율 속도에서는 유압을 이용해 빠른 속도로 시편에 응력을 가하는 실험방법이 쓰이며, 10⁴/s 이하의 고 변형율 속도에서는 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)와 같이 Bar를 충격시키는 실험법을 주로 사용한다[5-9]. 그 이상의 초고속 영역에서는 가스건, 혹은 폭발물을 이용한 충격 실험이 쓰인다[10-12].

	Methods of Loading	in Testing	Dynamic Considerations	
 10 ^{\$} 10 ⁶ Creep	Constant Load or Stress Machine	Strain vs. time or Creep rate recorded	Inertia Negl	Î,
 10 ⁴ 10 ² Quasi-Static	Hydraulic or Screw Machine	Constant Strain rate Test	Forces ected	- Uniaxial/Plane
10 ⁰ Intermediate Strain Rate	Pneumatic or Mechanical Machine	Mechanical Response in Specimen and Machine		Increa
10 ² Bar Impact	Mechanical or Explosive Impact	Elastic - Plastic wave Propagation	Inertia	sing Stress Lev
9' 106 High Velocity Plate Impact	Light-Gas Gun or Explosive driven Plate Impact	Shock wave Propagation	Forces Important	els Pla
Strain rates (s ⁻¹)				ine Strain

물성을 측정하기 위한 실험방법의 발전과 함께 실험을 통해 획득한 물성을 이용하여 실제 재료의 거동을 예측하기 위한 방법론도 같이 발전해 왔다. 구성방정식이란 재료에 외력이 가해졌을 때 응력과 변형율 사이의 관계를 표현한 방정식을 말한다[13]. 재료의 거동을 예측하기 위해서는 재료의 물성을 정확히 표현할 수 있는 구성방정식의 존재가 필수적이다. 따라서 실험방법의 발전과 함께 재료의 거동을 설명하기 위한 구성방정식이 발전해왔다. 가장 먼저 가공 경화에 의한 응력-변형율 거동을 설명하기 위한 구성방정식들이 다음과 같이 제안되었다[14-18].

Reference	Formulation	Parameters
Ludwik	$\sigma_p = \sigma_y + B\varepsilon_p^n$	σ _y , B, n
Hollomon	$\sigma_p = \sigma_y \varepsilon_p{}^n$	σ _y , n
Voce	$\sigma_p = \sigma_y + R(1 - \exp(-b\varepsilon_p))$	σ _y , R , -b
Swift	$\sigma_p = \sigma_y (\varepsilon_y + \varepsilon_p)^n$	$\sigma_y, \varepsilon_y, n$
Prager	$\sigma_p = \sigma_y + tanh\left(\frac{E\varepsilon_p}{\sigma_y}\right)$	σ _y , Ε

표.1.1 준정적 변형율 속도 조건에서의 구성방정식

위와 같은 구성방정식들은 그러나 등온 조건에서의 준정적 변형 아래에서의 거동은 비교적 잘 예측할 수 있으나, 고속의 변형율 속도와 고온, 저온, 비등온 조건 아래의 변형을 예측하는 것에는 여러가지 한계를 보이는 것이 사실이다.

이런 고속의 변형을 겪는 재료의 물성을 예측하기 위해 여러 연구자들은 다양한 동적 구성방정식(Dynamic constitutive equation)을 연구하기 시작했다. 대표적인 동적 구성방정식으로는 Johnson-Cook 모델, Zerilli-Armstrong 모델, Rusinek-Klepaczko 모델, Preston-Tonks-Walace 모델 등이 있다[19-22].

Reference	Formulation				
Johnson-Cook	$\boldsymbol{\sigma}_{e} = \left[\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{\varepsilon}_{e}^{p})^{n}\right] \left[\boldsymbol{1} + \boldsymbol{C} \boldsymbol{l} \boldsymbol{n} \left(\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{e}^{p}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{e}}\right)\right] \left[\boldsymbol{1} - \left(\frac{\boldsymbol{T} - \boldsymbol{T}_{r}}{\boldsymbol{T} - \boldsymbol{T}_{r}}\right)^{m}\right]$				
(1983)	$\begin{bmatrix} z & z & z \\ z & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z & z & z \\ z & z $				
Zerilli-					
Armstrong	$\sigma_e = C_0 + C_1 exp(-C_3T + C_4Tln\dot{\epsilon}) + C_5\epsilon^n (for BCC)$ $\sigma_e = C_0 + C_2\epsilon^{0.5}exp(-C_3T + C_4Tln\dot{\epsilon}) (for FCC)$				
(1987)					
Rusinek- Klepaczko (2001)	$\sigma_{e} = \frac{E(T)}{E_{0}} \left[\sigma_{\mu} + \sigma^{*} \right]$ $E(T) = E_{0} \left[1 - \left\{ \left(\frac{T}{T_{m}} \right) exp \left(\theta^{*} \left(1 - \frac{T_{m}}{T} \right) \right) \right\} \right]$ $\sigma_{\mu} = B(\varepsilon_{0} + \varepsilon_{p})^{n}$ $B = B_{0} \left[\left(\frac{T}{T_{m}} \right) log \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{max}}{\dot{\varepsilon}} \right) \right]^{-\vartheta}$ $n = n_{0} \left\langle 1 - D_{2} \left(\frac{T}{T_{m}} \right) log \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{p}}{\dot{\varepsilon}_{min}} \right) \right\rangle$ $\sigma^{*} = \sigma_{0}^{*} \left\langle 1 - D_{1} \frac{T}{T_{m}} log \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{max}}{\dot{\varepsilon}_{p}} \right) \right\rangle m^{*}$ $D_{1} = \frac{1}{\left(\frac{T}{T_{m}} \right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{max}}{\dot{\varepsilon}_{p}} \right)}$				

표.1.2 동적 구성방정식

이중 Johnson-Cook 경화 모델은 넓은 범위의 변형율, 변형율 속도, 온도 조건에 따른 금속재료의 소성거동을 잘 예측할 수 있다고 알려져 있다[23-25]. JC 경화모델은 von Mises 유동응력을 기반으로 한 경화모델이며, 등가응력은 다음과 같은 경화법칙을 따른다.

$$\sigma_e = \left[A + B\left(\varepsilon_e^{pl}\right)^n\right] \left[1 + Cln\left(\frac{\varepsilon_e^{pl}}{\varepsilon_0}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \tag{1}$$

식 (1)에서 A, B, n, C, m 은 재료 상수이며, ϵ_{e}^{pl} 는 물체의 등가 소성 변형율, $\dot{\epsilon}_{e}^{pl}$ 는 물체의 등가 소성 변형율 속도, $\dot{\epsilon}_{0}$ 는 기준 변형율 속도, T 는 물체의 현재온도, T_{m} 은 물체의 녹는점, T_{r} 은 참조온도를 각각 의미한다. 대괄호로 나눠진 세 항은 각각 가공경화, 변형율 속도 경화, 열 연화 작용을 의미한다[19].

JC 경화 모델을 이용한 재료의 거동 예측 간에 넓은 범위의 경계조건으로 확장시키는 과정에서 예측 결과의 정확성이 떨어진다는 주장이 최근 대두되고 있다. 이 때문에 많은 연구자들은 다양한 방법으로 수정된 JC 경화 모델을 제시하고 있다. 대부분의 경우 가공 경화와 변형율 속도 경화 항을 수정하여 예측의 정확성을 높이고자 하였고[26-30], 일부의 경우 열 연화 항에 대해 재결정 온도를 고려한 조건을 부여하여 수정을 시도하기도 했다[31].

그러나 이런 선행 연구들에서는 이런 JC 경화 모델 적용과정에서의 오류에 대한 원인을 JC 경화 모델 자체의 한계에서 찾았고, 고속 변형 연구에 주로 쓰이는 SHPB 실험에서 사소한 고려사항이 결과 해석에 큰 영향을 미친다는 연구결과들이 있음에도[32-34] 실험 방법에서 오는 오류나 결과 해석 과정에서의 오류, 유한요소 해석 경계조건 설정의 오류 등 많은 요소들에 대한 고찰이 부족한 것이 사실이다.

JC 경화 모델 상수를 결정할 때 실험적으로 일정한 조건을 부여하기에는 현실적으로 어려움이 있기 때문에 구성방정식 상수 결정을 위한 다양한 방법들이 제안되었으나[19, 24-26], 특히 고속 실험 조건에서는 변형율 속도와 온도는 일정하지 않은 것이 대부분이며 현재까지 알려진 선행연구들은 평균값을 사용하거나 각 조건에 따른 재료거동이 완전히 독립적으로 분리되지 않는다는 가정을 적용하고 있는 실정이다. 하지만, 실제 JC 재료모델을 사용하는 전산모사에서는 비등온(Non-isothermal) 조건이거나 변형율 속도가 지속적으로 변화하는 환경에 적용되어야 하므로 전사모사의 정밀도를 높이기 위해서는 소성이론에 근거한 체계적인 연구가 필요하다.

제 2 절 연구의 내용

본 연구에서는 JC 경화모델의 준정적 변형부터 고속 변형에 이르기까지 넓은 범위의 변형율 속도 조건에서 재료의 거동을 정확하게 예측하기 위한 모델 상수 확보법에 대하여 실험과 유한요소해석을 동시에 적용한 방법을 제시하고자 한다. 먼저 준정적 실험으로부터 얻은 변형율, 변형율 속도 관계를 초기 조건으로 하여 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 실험에 대한 전산모사 해석을 수행한다. 이후 실제 실험에서 얻은 응력-변형율 곡선과 시편 내 온도 데이터를 목적함수로 하여 JC 모델 상수를 역공학 방법(inverse analysis)에 의해 최적화하고, 최종적으로 얻어진 JC 모델 상수를 이용하여 다른 속도 및 경계조건에서의 재료변형 거동을 예측하여 제안된 물성 확보 방법을 검증하였다.

먼저 첫번째 항의 가공경화 상수들을 결정하기 위해 낮은 변형율 속도에서 물체의 기계적 물성을 측정한다. 이때의 변형율 속도가 $\dot{\epsilon}_0$, 즉 기준 변형율 속도가 되며, A는 물체의 항복응력, B와 n은 물체의 등가 소성 변형율에 따른 가공 경화 지수를 나타낸다. 이 첫번째 항은 Swift 경화 모델과 형태가 같은데, 재료의 특성에 따라 Voce 경화 모델로 치환하여 사용되기도 한다[29, 30]. 본 연구에서는 철강재료를 사용하므로 일반적으로 철강재료에 더 적합하다고 알려진 Swift 경화 모델의 형태를 사용하였다. 두번째 항의 변형율 속도 민감도 C는 여러 변형율 속도로 재료의 물성을 측정하여 그 값을 결정했다. 마지막 항의 열 연화 상수 m은 통상의 경우 초기 온도조건을 변화시키며 그 값을 측정하는 경우가 많으나, 고속 변형 조건에서는 단열과정에 의해 물체의 온도가 상승하므로 측정값을 신뢰할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통해 얻은 시편의 온도변화 데이터를 기반으로 유한요소 해석을 통해 상수 m 의 값을 결정하였다.

위의 각 과정에서 유한요소 해석을 통한 각 상수들의 최적화가 동시에 적용되었으며, 이 과정을 통해 실제 재료의 거동을 더 정확히 예측할 수 있는 JC 모델 상수를 확보하는데 성공하였다.

연구방법

목 차

저] 1	절	준	정적	인기	장실]험.	••••	••••	•••••	•••••			••••	 ••••	 14
저	2	절	홉	킨슨	바	실	험					•••••		••••	 •••••	 19
	제	1	항	홉킨	슨	바	실험]0].	론.	•••••	•••••	•••••		••••	 ••••	 19
	제	2	항	홉킨	슨	바	실험]				••••	•••••	••••	 ••••	 26
저] 3	절	유	한요.	소]	모뎉]링	및	해신	넉					 	 .30

제 1 절 준정적 인장실험

본 연구에 사용된 소재는 열간 압연된 철강으로 실제 제품으로부터 얻어졌다. 복잡한 제품 형상으로 인해 준정적 인장실험을 위한 ASTM 표준규격 시편 보다 작은 미니어쳐 시편을 제작하였다. 실험에 사용된 준정적 실험 변형율 속도는 0.001s⁻¹, 0.01s⁻¹, 0.1s⁻¹ 로 하였고, 인장 실험기는 Instron 사의 상용 실험장비를 사용하였다.

준정적 실험간 정확한 변형율을 측정하기 위해 디지털 이미지 상관관계 분석(Digital Image Correlation, DIC) 기법을 적용하였다. DIC 기법은 시편 표면에 스프레이를 통해 흑백 패턴을 도포하여 형성시키고, 한쌍의 카메라를 이용하여 기계적 실험 도중 일정 시간 간격으로 사진을 찍은 후, 사진 분석을 통해 시편 표면 패턴의 변형을 추적, 시편 표면 전 영역의 변형율 장(Strain field)을 측정하는 기술이다.

기존 신율계(Extensometer) 혹은 변형율계(Strain guage) 기반의 변형율 측정은 특정 지점 또는 특정 영역의 평균적인 변형율만을 측정할 수 있었으나, DIC 기법은 시편 표면의 변형율 장 전체를

측정할 수 있으므로 보다 정확한 변형율 데이터를 측정할 수 있는 기법이다[35-37].

아래와 같이 각 변형율 속도별로 5 회씩의 실험을 반복하였고 모든 실험은 DIC 기법을 이용해 응력-변형율 선도를 측정했으며, 가장 재현성이 높은 3 회의 결과를 이용해 재료의 물성을 측정하였다.

DIC speed	Strain rate	Specimen size(mm)	Deformation speed(mm/min)		
	0.001	W:2 T:0.5 L:6	0.36		
50Hz	0.01	W:2 T:0.5 L:6	3.6		
	0.1	W:2 T:0.5 L:6	36		

표.2.1 준정적 변형율 속도 실험조건



* Thickness : 0.5mm



그림.2.1 시편 형상 및 실험장비



그림.2.2 DIC 변형율 장 측정법 개요

제 2 절 홉킨슨 바 실험

제 1 항 홉킨슨 바 실험 이론

Split Hopkinson pressure bar (SHPB) 실험은 1914 년 Hopkinson 에 의해 디자인 되어진 실험법으로써, 다양한 속도의 변형율을 구현해 고속 영역에서 재료의 물성을 측정하는 측정법으로 많은 분야에서 널리 사용되고 있는 기술이다. 충격봉(Striker bar)의 무게와 발사속도를 조절하여 다양한 변형율 속도를 구현할 수 있으며, 소재의 특성에 따라 탄성영역부터 소성영역까지, 중-고속 변형율 속도에서 고속 변형율 속도에 이르기까지 다양한 조건에서의 실험이 가능한 특징이 있다. 또한 복잡하지 않은 실험 메커니즘을 가지고 있어 다양한 상용 유한요소 해석 소프트웨어를 이용해 실험을 재현하고, 확보한 물성을 통해 새로운 상황에서 재료의 거동을 예측할 수 있는 장점이 있다.

SHPB 실험은 다음과 같은 흐름으로 진행된다. 가스건에 의해 발사된 충격봉이 입력봉(Incident bar)에 부딪히며 에너지를 전달하고, 이 에너지는 탄성파의 형태로 시편과 출력봉(Transmitted bar)으로 전달된다. 이때 각 봉에 부착된 변형율계로부터 입력, 반사, 출력 파동이 오실로스코프(Oscilloscope)에 시간에 따른

변형율의 형태로 기록된다. 이 입력파와 반사파, 그리고 출력파로부터 입력봉과 출력봉의 변위와 각 봉에 가해진 힘을 계산할 수 있고, 봉의 단면적과 봉의 영률(Young's modulus), 시편의 단면적 등을 고려하여 이로부터 시편에 가해진 응력과 변형율을 최종적으로 계산해 내는 것이 SHPB 실험의 개요이다.



그림.2.3 SHPB 실험 개요



그림.2.4 SHPB 실험에서 관측되는 변형율 파

SHPB 실험에서 시편에 가해진 응력과 변형율은 입력봉과 출력봉의 변위로부터 계산되어진다.1 차원 탄성파 전파 이론[38]에 따르면 c 를 탄성파의 전달속도라고 할 때 탄성파가 재료를 통과하는 동안의 변위 u는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u = c \int_0^t \varepsilon \, dt' \tag{2}$$

입력봉의 변위는 입력 변형율 파동으로 부터의 변위와 반사 변형율 파동으로 부터의 변위의 합으로 구할 수 있다.

$$u_1 = c \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r) dt'$$
(3)

출력봉의 변위는 출력 변형율 파동으로 부터 다음과 같이 표현된다.

$$u_2 = c \int_0^t \varepsilon_t \, dt' \tag{4}$$

변형간 시편과 각 봉이 밀착되어 있다면 시편의 변위는 입력봉의 변위 u1과 출력봉의 변위 u2의 관계로 나타낼 수 있다.

$$u_s = u_1 - u_2 \tag{5}$$

위의 관계를 이용하여 시편의 변형율 ɛ_s 을 식 (6)과 같이 계산해낼 수 있다.

$$\varepsilon_s = \frac{u_s}{l_0} = \frac{u_1 - u_2}{l_0} = \frac{c}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt'$$
(6)

E_b 는 입력봉과 출력봉의 영률(Young's modulus)이고, A_b 와 A_s
는 봉과 시편의 단면적이라고 했을 때 시편의 양쪽에서 가해지는
힘을 F₁, F₂는 다음과 같이 계산해낼 수 있다.

$$F_1 = E_b A_b (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \tag{7}$$

$$F_2 = E_b A_b \varepsilon_t \tag{8}$$

따라서 시편에 가해지는 응력 σ_s는 다음과 같이 계산되어진다.

$$\sigma_s = \frac{F_1 - F_2}{2A_s} = \frac{E_b A_b (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t)}{2A_s} \tag{9}$$

이때 시편의 길이 l_0 가 충분히 작은 경우에 아래와 같은 가정을 적용하여 응력과 변형율을 구하는 식을 단순화할 수 있다.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t - \varepsilon_i \tag{10}$$

$$\varepsilon_s = -\frac{2c}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r dt' \tag{11}$$

$$\sigma_S = \frac{E_B A_B \varepsilon_T}{A_S} \tag{12}$$

위와 같은 가정은 3/4 인치 이하의 길이를 가진 시편까지 유효하다고 알려져 있다[39]. 변형율 속도는 위의 과정을 통해 시편의 변형율을 구한 뒤 변형을 겪는데 걸린 시간으로 나눠 계산할 수 있다.

위의 과정을 통해 계산된 시편의 응력과 변형율은 모두 변형방향으로의 공칭응력이다. 종종 이 공칭응력으로부터
계산되어진 진응력-진변형율 곡선을 토대로 JC 경화 모델을 최적화 하는 경우가 있으나, 압축실험의 특성상 마찰에 의한 효과로 측정된 진응력과 시편의 등가응력 사이에는 일정수준 이상의 차이가 발생할 수 밖에 없으므로, SHPB 실험에서는 반드시 마찰에 의한 영향을 고려해야만 한다[32].

제 2 항 홉킨슨 바 실험

고속 변형에서의 재료 물성을 확보하기 위해 변형율 속도 1000s⁻¹, 1400s⁻¹, 2000s⁻¹ 의 조건 아래 SHPB 실험을 수행하였으며, K-타입 열전대를 이용하여 고속 변형에 의한 시편 내 온도 데이터도 함께 측정하였다.

원하는 변형율 속도를 달성하기 위해 충격봉의 크기와 속도를 아래의 표와 같이 변경하며 실험을 진행하였고, 준정적 실험과 동일하게 각 변형율 속도별로 5 회의 실험을 반복하여 재현성이 높은 3회의 실험결과를 통해 물성을 측정하였다.

Lubricant	Strain rate	Specimen size(mm)	Striker bar(mm)	Impact speed(m/s)
Vaseline	1000	D:12 T:6	D:19 L:456	21.5
	1400	D:12 T:6	D:19 L:456	26.3
	2000	D:12 T:6	D:19 L:304	30

표.2.2 고속 변형율 속도 실험 조건

모든 압축 실험이 그렇듯 SHPB 실험에서도 정확한 물성의 측정을 위해 마찰의 영향을 배제하는 것은 중요한조건이다. 많은 실험에서 상온, 혹은 저온의 조건에서는 액체상태의 윤활유를, 고온의 조건에서는 젤, 혹은 고체 상태의 윤활제를 사용하는 것이 더 좋은 실험결과를 보인다고 알려져 있으나[40], SHPB 실험의 경우 액체상태의 윤활유를 도포 후 실험을 진행하게 되면 도포면이 지표면에 대해 수직인 상태에서 시편이 충격을 받게 되는 실험의 특성상 중력에 의한 흘러내림이 도포면에 발생하므로 균일한 유활상태를 유지할 수 없게 되고. 이에 따라서 변형간에 시편이 회전하는 현상이 일어나게 되어 결과적으로 정확한 고속 압축 실험이 불가하게 된다. 따라서 액체상태의 윤활유가 아닌 젤 상태의 바셀린을 이용해 윤활을 했고, 정확한 실험결과를 얻을 수 있었다.





그림.2.5 SHPB 실험 장비

제 3 절 유한요소 모델링 및 해석

유한요소 해석이란 공학 및 물리학적인 현상을 해석하기 위한 수치해석 기법으로, 복잡한 형상의 연속체를 상호 연결된 유한한 불연속적인 요소로 분할하여 각 유한요소에 대한 구성방적식에 대한 해법을 결합하여 전체 연속체에 대한 해를 수치근사하여 구하는 기법을 말한다. 일반적으로 복잡한 시스템의 구조분석, 열 해석, 유체 해석, 전자기 해석 등에 쓰이며 복잡한 형상과 하중조건, 재료의 특성으로 인해 정확한 해석이 매우 어려운 문제에도 수치적인 근사법을 통해 상당히 정확한 해석을 가능하게 하는 기법이다[41]. 유한요소 해석 기법은 SHPB 실험을 전산모사하여 JC 경화모델에 기반해 해석한 결과와 실제 실험을 통해 얻어진 결과를 비교하여 정확한 JC 경화모델의 계수를 결정하기 위해 사용되었다.



그림.2.6 유한요소 해석 순서도

그림.2.6 은 본 연구에서 제안된 JC 경화 모델 상수 확보법을 요약한 순서도를 나타내고 있다. 먼저 준정적 실험을 통한 변형율 속도 의존 응력-변형율 선도를 초기 조건으로 하여 Johnson-Cook(JC) 경화 모델을 확보하였다. JC 모델은 그림. 2.7 와 같이 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAOUS 의 사용자 정의 서브루틴(VUHARD)을 이용하여 구성하였으며, 이후 SHPB 실험에서 얻어진 온도 값과 응력-변형율 데이터를 목적함수로 하여, 역해석법에 의한 최적의 경화모델 상수를 결정하였다. 즉, 최종적으로 얻어진 JC 모델 상수는 고속 실험에서 얻어진 응력-변형율 곡선, 서로 다른 변형율 속도에 따른 시편 온도값과 일정 오차 범위내에서 일치할 수 있도록 결정되었음을 의미한다. 후술하게 될 유한요소 해석의 모든 결과는 위의 순서도를 따라 결정되었으며, 해석 조건은 그림.2.7 과 같다.

Boundary condition	Element type	Critical element size	
Same as SHPB test	C3D8T	0.325×0.58×0.4	
Material	Solver and enclosis true		
Elastic	Plastic	Solver and analysis typ	
Linear elastic	Linear elastic Johnson-Cook dynamic (or VUMAT)		



제 3장

실험결과 및 고찰

목 차

제 1 절준정적 인장 실험 결과	
제 2 절홉킨슨 바 실험 결과	
제 1 항 홉킨슨 바 실험	
제 2 항 링 홉킨슨 바 실험	
제 3 항 변형율 속도 민감성 지수 C 에 대한 함수	제안55
제 4 항 중-고속 변형 조건 SHPB 실험	58

제 1 절 준정적 인장 실험 결과

준정적 실험 결과로부터 재료의 항복응력은 427MPa 로, 기준 변형율 속도를 0.001 s⁻¹로 했을 때 JC 경화 모델의 상수 B, n, C 의 값은 각각 657.8MPa, 0.6894, 0.009 로 결정되었다.

준정적 실험은 상온에서 실시되었고, 변형에 따른 시편의 온도변화가 거의 없기 때문에 열 연화 지수인 m 을 측정하기 위해서는 온도 조건별로 여러 차례의 실험이 필요하다. 하지만 미니어쳐 사이즈의 시편으로는 고로 안에서의 실험이 매우 제한되어 준정적 변형율 속도에서의 열 연화 지수는 측정이 불가하였다.

하지만 후술할 고속 변형율 속도 조건에서의 분석을 통해 열 연화 지수 m 을 결정할 수 있는 방법론을 함께 제시하여, 결과적으로 JC 경화 모델을 구성하는 모든 재료 계수들을 결정할 수 있었다.

A(MPa)	B(MPa)	n	С
427	657.8	0.6894	0.009
έ ₀ (/s)	T _r (°C)	T _m (°C)	m
0.001	23	1538	-

표.3.1 준정적 변형율 속도 실험에서의 JC 경화모델 상수



제 2 절 홉킨슨 바 실험 결과

제 1 항 홉킨슨 바 실험

그림.3.2 에서와 같이 SHPB 실험 결과와 준정적 실험으로부터 상수를 결정한(m 은 1 로 가정) J-C 경화곡선을 비교해 봤을 때 응력의 수준과 기울기의 차이가 관측되었다.

여기서 기울기의 차이는 고속변형 과정에서 단열변화에 의한 온도상승에 따른 열 연화 효과로 설명할 수 있다. J-C 경화모델의 열 연화 지수인 m 의 값을 변화시켜 기울기를 변화시킬 수 있기 때문이다. 실험간 측정한 시편의 온도변화량을 토대로 유한요소 해석을 반복 시행하여 가장 실험 데이터와 유사한 기울기를 가진 계수 m 의 값(0.65)을 결정할 수 있었다.





그림.3.2 SHPB 실험 결과 및 초기 설정으로 계산된 JC 경화곡선



그림.3.3 SHPB 실험 결과 및 유한요소 해석을 통해 계산된 시편의 온도변화



그림.3.4 SHPB 실험 결과 및 열 연화지수 m 수정 후 유한요소 해석 결과

그림.3.4 를 보면 유한요소 해석 결과와 실험 데이터 간에 응력 수준이 서로 다른 것을 볼 수 있다. 이유를 두가지로 가정해 볼 수 있는데, 먼저 주목해야 할 점은 현재 비교중인 데이터가 진응력-진변형율 곡선이었다는 것이다. 경화모델은 등가응력-등가소성변형율 곡선을 토대로 다뤄야 하기 때문에 생각해 볼 수 있는 첫번째 가정은 마찰의 영향으로 물체가 겪은 등가응력에 더 높은 충돌방향 진응력이 측정되었다는 것이다. 압축 비해 과정에서 마찰의 영향으로 시편은 변형의 반대방향으로 마찰력을 받게 되고, 시편에 가해진 등가응력보다 진응력이 더 높은 수준으로 측정될 수 있기 때문이다[32]. 두번째 가정은 변형율 속도 민감성 지수 C 가 변형율 속도에 따라 변화한다는 것이다. 이미 많은 논문[26-31]에서 기존의 J-C 경화모델이 현실에서 맞지 않는다는 것을 확인한 바 있고, 그중 다수의 연구[26-30]에서 계수 C가 변형율 속도에 따라 변화한다는 가정을 적용한 바 있다.

먼저 첫번째 가정인 마찰력에 의한 효과로 이 문제를 설명할 수 있는지 확인해보았다. 가정에 따라서 마찰계수를 고려한 유한요소 해석 결과 그림.3.5 와 같이 변형율 속도가 증가함에 따라서 계면의 마찰계수가 늘어나도록 초기조건을 부여한다면 해석결과와 실험결과가 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.



마찰계수가 일정하지 않지만 학계에 물체에 가해지는 수직방향 응력이 높을수록 계면의 마찰계수가 높아진다는 결과가 보고되어 있으므로[42] 이 가정은 가능성이 있다. 따라서 가정의 정확한 확인을 위한 실험을 계획했다.

제 2 항 링 홉킨슨 바 실험

첫번째 가정이 정확한지 확인하기 위해서는 시편과 바 사이의 마찰계수 측정이 필요하다. 하지만 일반적인 압축 시편으로 진행하는 SHPB 실험으로는 시편과 바 사이의 마찰을 측정하는 것이 쉽지 않다. 따라서 마찰계수를 측정하고 정확한 등가응력-등가소성변형율 곡선을 얻기 위해서 링 압축 실험(Ring compression test)을 도입하기로 했다. 링 압축 실험은 압축실험에서 시편과 다이 사이 계면의 마찰계수를 측정하기 위해 널리 행해지는 실험법이다. 계면의 마찰계수가 높을 때와 낮을 때 그림.3.6 과 같이 변형된 시편의 모양은 서로 다르다. 높은 마찰이 존재할 때는 계면의 미끌어짐이 거의 없이 응력이 가해지므로 배럴링(Barreling)이 발생한 듯한 모양으로 변형이 일어난다. 낮은 마찰이 존재 할 때는 계면이 미끌어짐과 동시에 응력이 가해지므로 내경이 같이 증가하며 변형이 일어난다. 이 차이로 인해 계면의 마찰이 높을수록 변형 후 내경은 줄어들고, 마찰이 낮을수록 내경은 늘어나는 경향을 보인다. 이 관계에 따라서 그림.3.7 의 마찰 교정 선도를 이용하면 압축 실험 중 시편과 다이 사이 계면의 마찰계수를 결정할 수 있다[43, 44].



그림.3.6 링 압축 실험 후 시편 형상 예시





마찬가지 원리로 링 형상 시편을 이용해 SHPB 실험을 진행한다면 바와 시편 사이 계면의 마찰계수를 결정할 수 있다.

링 형상 시편은 1 차적으로 실행한 SHPB 실험과 동일한 응력과 변형율을 겪을 수 있도록 동일한 면적과 부피를 가지도록 설계하였다.

Lubricant	Strain rate	Specimen size(mm)	Striker bar(mm)	Impact speed(m/s)
Vaseline	1000	O.D:13 I.D:5 T:6	D:19 L:456	21.5
	1400	O.D:13 I.D:5 T:6	D:19 L:456	26.3
	2000	O.D:13 I.D:5 T:6	D:19 L:304	30

표.3.2 링 SHPB 실험 조건

Condition	Strain rate	Undeformed(mm)	Deformed(mm)	Reduction(%)
SHPB	1000	O.D:13 I.D:5 T:6	O.D:13.99 I.D:5.3 T:5.11	I.D:6 T:14.8
	1400	O.D:13 I.D:5 T:6	O.D:14.73 I.D:5.51 T:4.61	I.D:10.2 T:23.2
	2000	O.D:13 I.D:5 T:6	O.D:14.58 I.D:5.45 T:4.75	I.D:9 T:20.8

표.3.3 링 SHPB 실험 후 시편의 변형 비율



그림.3.8 실험 후 시편의 변형 비율에 따른 마찰계수 결정

링 SHPB 실험 결과 시편과 바 사이 계면의 마찰계수는 변형율 속도와 관계없이 0.02 수준으로 측정되어 거의 무시할 수 있다는 결론을 얻었다. 따라서 변형율 속도에 따른 마찰계수의 영향으로 진응력이 높게 측정되었다는 첫번째 가정은 적절하지 않다는 결론을 내렸다.

마찰계수가 결정되었기 때문에 정확한 등가응력과 등가 소성 변형율을 결정할 수 있다. 이것을 기반으로 각 변형율 속도별 변형율 속도 민감성 지수 C 값을 유한요소 해석을 통해 결정할 수 있었다.



그림.3.9 변형율 속도 민감성 지수 C 경계조건 수정 후 유한요소 해석 결과

상수 C 값은 변형율 속도가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 보였으며, 이는 기존의 JC 경화 모델이 정확한 재료의 거동 예측을 제공하지 못한다는 증거가 될 수 있다. 이에 따라 변형율 속도 민감성 지수 C 에 대하여 한가지 가정을 추가하여 보다 정확한 JC 계수 결정법을 제안하고자 한다.

제 3 항 변형율 속도 민감성 지수 C에 대한 함수 제안

변형율 속도 민감성 지수 C 가 변형율 속도에 따라 변화한다는 두번째 가정을 확인하였고, 보다 정확한 JC 계수 결정법을 제안하기 위해 상수 C 의 값이 변형율 속도에 대한 함수의 형태로 변화한다고 가정하였다. 상수 C 가 변형율 속도에 따라 변화하는 함수의 형태라면 현재까지 결정된 각 변형율 속도별 C 값을 이용해 몇가지의 함수 꼴을 가정해 볼 수 있다.

$$C = a * \left(ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right)^b + c \qquad Function \ No.1$$

$$a = 2.518E^{-5}$$
, $b = 2.524$, $c = 0.007754$

먼저 변형율 속도의 로그값에 대한 지수함수의 형태를 하고있는 변형율 속도 민감성 함수를 가정했다.

$$C = a * \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^b + c \qquad Function \ No.2$$

$$a = 0.0004918, b = 0.2643, c = 0.007206$$

두번째는 변형율 속도에 대한 지수함수의 형태를 가정했으며
 $C = a * \arctan\left(b * ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}\right) + c\right) + d$ Function No.3
 $a = 0.007966, b = 2.304, c = -31.31, d = 0.02066$

마지막은 변형율 속도의 로그값에 대해 시그모이드(Sigmoid) 함수의 형태를 변형율 속도 민감성 함수로 가정했다.

위의 세가지의 함수 꼴 중 가장 개연성이 높은 함수 꼴을 찾기 위해서는 중속 변형율 속도 구간에서의 변형율 속도 민감성 계수의 값을 측정해야만 한다. 그러나 대부분의 중속 변형율 속도 실험 데이터는 그 허용오차가 준정적, 혹은 고속의 실험보다 큰 것이 대부분이며, 이런 큰 오차를 가지는 응력-변형율 선도로부터는 정확한 변형율 속도 민감성 계수를 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 중속 변형율 속도 구간의 변형율 속도 민감성 계수를 측정하기 위해 중속-고속의 변형율 속도를 겪을 수 있는 시편을 활용한 SHPB 실험을 계획했다.



그림.3.10 가정된 변형율 속도 민감성 지수 C의 함수형태

제 4 항 중-고속 변형 조건 SHPB 실험

SHPB 실험은 기본적으로 1 차원 압축 실험의 형태로, 통상적인 압축 시편을 사용할 경우 시편 전체에 동일한 응력이 가해지게 되고, 이에 따라 시편의 어느 부분이라도 동일한 응력-변형율 선도를 따라 변형이 이루어지게 된다. 링 형태의 시편을 이용한 SHPB 실험에서도 이 상황은 동일하게 적용된다.

하지만 1 차원 인장 실험에서의 노치(Notch) 시편과 같이 SHPB 실험에 사용되는 시편의 단면적에도 변화를 준다면 시편의 위치에 따라서 재료는 서로 다른 응력-변형율 선도를 따라 변형이 진행될 것이고, 힘을 가하는 시간이 동일하기 때문에 낮은 변형율을 겪은 부분은 낮은 변형율 속도를, 높은 변형율을 겪은 부분은 높은 변형율 속도를 겪게 되어, 결과적으로 이렇게 측정된 시편의 물성은 다양한 변형율 속도에서의 재료 물성을 대표하는 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

몇차례의 사전 유한요소 모델 시뮬레이션을 통해 그림.3.11 과 같이 4 가지 형태의 시편 디자인을 선정하였다. 사전 시뮬레이션 결과 각 시편이 겪게 되는 변형율 속도의 분포는 그림.3.12과 같이 같이 예상되었다.

각 시편은 중속 변형율 속도를 겪는 부분이 반드시 생기도록 디자인 되었으며, 따라서 위의 시편을 이용한 SHPB 실험 결과를 이용한다면 실험적인 측정이 제한되었던 중속 변형율 속도에서의 변형율 속도 민감성 지수 C의 함수 꼴을 결정할 수 있을 것이다.




그림.3.12 사전 시뮬레이션을 통한 시편별 변형율 속도 분포 예상

노치 시편의 SHPB 실험 결과는 일반적으로 사용되는 응력-변형율 곡선으로는 비교할 수 없다. 변형을 겪는 부분이 동일한 단면적을 가지고 있어 시편 전체적으로 동일한 응력과 변형율을 겪는 통상적인 시편 형상과 달리, 노치가 파여있으므로 시편에 부여되는 응력이 서로 차이가 있어 전체 시편에 부여되는 힘과 변위를 측정하는 실험방법의 한계로 인해 응력-변형율 선도를 그리더라도 의미가 없기 때문이다. 이에 따라서 힘-변위 선도를 통해 유한요소 해석 결과와 실험 결과를 비교해야 한다.

그림.3.13 와 같이 3 번째 형태의 C 함수를 적용한 유한요소 해석 결과가 실험 결과와 가장 유사한 경향성을 보여주는 것으로 나타났다. 이를 통해 변형율 속도 민감성 지수 C 는 준정적 변형율 속도 구간에서와 비슷한 수준으로 중속 변형율 속도 구간까지 큰 변화가 없다가 일정 이상의 변형율 속도에 이르면 급격하게 상승 후 다시 낮은 기울기를 유지하는 시그모이드(Sigmoid) 형태의 변화를 겪는다는 결론을 얻을 수 있었으며, 이는 몇가지 선행연구들과 일치하는 결과이기도 하다[45,46].



그림.3.13 실험과 유한요소 해석 결과 간 힘-변위 선도 비교

제 4장

결 론

본 연구는 준정적 인장실험으로부터 준정적 변형율 속도 아래에서 재료의 물성을, SHPB 실험과 Ring SHPB 실험으로부터 고속 변형율 속도 아래에서 재료의 물성을 측정하였고, Notch SHPB 실험으로부터 중-고속 변형율 속도 아래에서 재료의 물성을 측정하였으며 이 과정에서 유한요소 해석 방법을 결합하여 재료 물성을 예측하는 구성방정식의 파라미터 결정법의 정확도를 높였다. 이로부터 연구에 사용된 재료의 JC 파라미터를 그림.4.1 과 같이 결정할 수 있었고, 특히 변형율 속도 민감도 상수 C 가 변형율 속도에 따라서 어떤 형태로 변화하는지를 결정할 수 있었다. 이를 통해 넓은 변형율 속도에 적용할 수 있는 JC 경화모델을 획득할 수 있었고, 이 과정을 응용한다면 각종 재료에 대하여 준정적 변형율 속도에서 고속 변형율 속도까지 연속적으로 적용할 수 있는 구성방정식 파라미터를 결정할 수 있을 것으로 생각된다.



이 연구에서 제시하고 있는 성과는 크게 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 먼저 여러 온도조건에서의 실험을 통해서만 결정할 수 있다고 여겨지던 JC 경화 모델의 열 연화 지수 m 을 단열과정인 고속 변형율 속도 조건의 실험간 온도변화를 측정한 후 이를 목적함수로 유한요소 해석을 통한 역공학 방법을 통해 결정하는 방법을 제안했다.
- (2) SHPB 실험으로부터 재료의 정확한 물성을 확보하기 위해 링 SHPB 실험을 통한 마찰계수 결정법을 제안했고, 이로부터 진응력-진변형율 선도가 아닌 재료의 실제적인 물성을 대표하는 등가응력-등가소성변현율 선도를 획득하는 방법을 제안하였다.
- (3) 마지막으로 중속 변형율 속도 조건에서의 물성을 확보하기 위해 노치 시편을 이용한 SHPB 실험 방법을 제안했고, 중-고속 변형율 속도 조건에서 재료의 거동을 측정할 수 있었으며,

이로부터 변형율 속도 민감성 지수 C 가 변형율 속도가 증가함에 따라 어떤 형태로 변화하는지 제시할 수 있었다.

위와 같은 제안을 통해 제한된 조건의 실험으로도 준정적 변형율 속도 구간에서 고속 변형율 속도 구간에 이르기까지 폭넓은 변형율 속도 조건 아래에서 재료의 거동을 예측할 수 있음을 검증하였고, 이 성과를 확장시킨다면 다양한 산업 분야에서 효과적으로 재료의 거동을 예측할 수 있으리라 생각된다.

참고 문헌

- [1] Ali Abd El-Aty, Yong Xu, Shi-Hong Zhang, Sangyul Ha, Yan Ma, Dayong Chen, "Impact of high strain rate deformation on the mechanical behavior, fracture mechanisms and anisotropic response of 2060 Al-Cu-Li alloy", Journal of Advanced Research 18 (2019) 19-37.
- [2] J. E. Dorn, "Some fundamental experiments on high temperature creep", Journal of the Mechanics and Physics of Solids 3 (1955) 85-116.
- [3] E. W. Andrews, L. J. Gibson, M. F. Ashby, "The creep of cellular solids", Acta Materialia 47 (1999) 2853-2863.
- [4] Matej Pec, Holger Stünitz, Renée Heilbronner, Martyn Drury, Christian De Capitani, "Origin of pseudotachylites in slow creep experiments", Earth and Planetary Science Letters 355-356 (2012) 299-310.
- [5] Akhtar S. Khan, Yeong Sung Suh, Rehan Kazmi, "Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys", International Journal of Plasticity 20 (2004) 2233-2248.
- [6] Akhtar S. Khan, Muneer Baig, Shi-Hoon Choi, Hoe-Seok Yang, Xin Sun,
 "Quasi-static and dynamic responses of advanced high strength steels: Experiments and modeling", International Journal of Plasticity 30-31 (2012) 1-17.

- [7] W. Chen, F. Lu, M. Cheng, "Tension and compression tests of two polymers under quasi-static and dynamic loading", Polymer Testing 21 (2002) 113-121.
- [8] M. T. Tucker, M. F. Horstemeyer, W. R. Whittington, K. N. Solanki, P. M. Gullett, "The effect of varying strain rates and stress states on the plasticity, damage, and fracture of aluminum alloys", Mechanics of Materials 42 (2010) 895-907.
- [9] Jörgen Kajberg, Bengt Wikman, "Viscoplastic parameter estimation by high strain-rate experiments and inverse modelling – Speckle measurements and high-speed photography", International Journal of Solids and Structures 44 (2007) 145-164.
- [10] L. Peter Martin, J. Reed Patterson, Daniel Orlikowski, Jeffrey H. Nguyen,
 "Application of tape-cast graded impedance impactors for light-gas gun experiments", Journal of Applied Physics 102 (2007) 023507.
- [11] Ralph Menikoff, "Compaction wave profiles: Simulations of gas gun experiments", Journal of Applied Physics 90 (2001) 1754-1760.
- [12] H. Jarmakani, J. M. Mcnaney, B. Kad, D. Orlikowski, J. H. Nguyen, M. A. Meyers, "Dynamic response of single crystalline copper subjected to quasi-isentropic, gas-gun driven loading", Materials Science and Engineering: A 463 (2007) 249-262.
- [13] Kwansoo Chung, Myoung-Gyu Lee, Basics of Continuum Plasticity, Springer, 2018.

- [14] P. Ludwik, Fließvorgänge bei einfachen Beanspruchungen, in: P. Ludwik (Ed.) Elemente der Technologischen Mechanik, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1909, pp. 11-35.
- [15] Hollomon J, "Tensile deformation", Transactions of the AIME 162 (1945) 268-290.
- [16] Voce E, "The relationship between stress and strain for homogeneous deformation", Journal of the Institute of Metals 74 (1948) 537-562.
- [17] Swift H, "Plastic instablility under plane stress", Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1 (1952) 1-18.
- [18] Prager W, "The theory of plasticity: a survey of recent achievements", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 169 (1955) 41-57.
- [19] G.R. Johnson, W.H. Cook, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures", Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics (1983) 541-547.
- [20] F.J. Zerilli, R.W. Armstrong, "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations", Journal of Applied Physics 61 (1987) 1816-1825.
- [21] A. Rusinek, J.R. Klepaczko, "Shear testing of a sheet steel at wide range of strain rates and a constitutive relation with strain-rate and temperature

dependence of the flow stress", International Journal of Plasticity 17 (2001) 87-115.

- [22] D.L. Preston, D.L. Tonks, D.C. Wallace, "Model of plastic deformation for exteme loading conditions", Journal of Applied Physics 93 (2003) 211-220.
- [23] R. Al-Mezrakchi, A. Al-Ramthan, S. Alam, "Designing and modeling new generation of advanced hybrid composite sandwich structure armors for ballistic threats in defense applications", AIMS Materials Science 7 (2020) 608-631.
- [24] A. Shrot, M. Bäker, "Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations", Computational Materials Science 52 (2012) 298-304.
- [25] X. Wang, J. Shi, "Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment", International Journal of Impact Engineering 60 (2013) 67-75.
- [26] X. Wang, C. Huang, B. Zou, H. Liu, H. Zhu, J.H. Wang, "Dynamic behavior and a modified Johnson-Cook constitutive model of Inconel 718 at high strain rate and elevated temperature", Materials Science and Engineering: A 580 (2013) 385-390.
- [27] Y.C. Lin, X.M. Chen, G. Liu, "A modified Johnson–Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel", Materials Science and Engineering: A 527 (2010) 6980-6986.

- [28] D.N. Zhang, Q.Q. Shangguan, C.J. Xie, F. Liu, "A modified Johnson– Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy", Journal of Alloys and Compounds 619 (2015) 186-194.
- [29] Borja Erice, Christian C. Roth, Dirk Mohr, "Stress-state and strain-rate dependent ductile fracture of dual and complex phase steel", Mechanics of Materials 116 (2018) 11-32.
- [30] Zhihua Liu, Hao Zhao, Jianpeng Li, Zhitao Niu, Vincent Ji, "Modified Johnson–Cook Constitutive Model of 18CrNiMo7-6 Alloy Steel under Ultrasonic Surface Burnishing Process", Journal of Materials Engineering and Performance (2022).
- [31] S. Seo, O. Min, H. Yang, "Constitutive equation for Ti–6Al–4V at high temperatures measured using the SHPB technique", International Journal of Impact Engineering 31 (2004) 735-754.
- [32] H. Meng, Q. M. Li, "Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments", International Journal of Impact Engineering 28 (2003) 537-555.
- [33] Man Xu, Kay Wille, "Numerical Investigation of the Effects of Pulse Shaper, Lateral Inertia, and Friction on the Calculated Strain-Rate Sensitivity of UHP-FRC Using a Split Hopkinson Pressure Bar", Journal of Materials in Civil Engineering 28 (2016) 04016114.
- [34] W. Z. Zhong, A. Rusinek, T. Jankowiak, F. Abed, R. Bernier, G. Sutter, "Influence of interfacial friction and specimen configuration in Split

Hopkinson Pressure Bar system", Tribology International 90 (2015) 1-14.

- [35] Ma Quanjin, M. R. M. Rejab, Qayyum Halim, M. N. M. Merzuki, M. A.
 H. Darus, "Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method", Materials Today: Proceedings 27 (2020) 757-763.
- [36] B. Pan, "Recent Progress in Digital Image Correlation", Experimental Mechanics 51 (2011) 1223-1235.
- [37] Nick Mccormick, Jerry Lord, "Digital Image Correlation", Materials Today 13 (2010) 52-54.
- [38] Jan Achenbach, Wave propagation in elastic solids, Elsevier, 2012.
- [39] U. S. Lindholm, "Some experiments with the split hopkinson pressure bar*", Journal of the Mechanics and Physics of Solids 12 (1964) 317-335.
- [40] Moumita Sarkar, Nilrudra Mandal, "Solid lubricant materials for high temperature application: A review", Materials Today: Proceedings 66 (2022) 3762-3768.
- [41] Daryl L Logan, A first course in the finite element method, Cengage Learning, 2016.
- [42] T Jankowiak, A Rusinek, G List, G Sutter, F Abed, "Numerical analysis for optimizing the determination of dynamic friction coefficient", Tribology International 95 (2016) 86-94.

- [43] Hasan Sofuoglu, Jahan Rasty, "On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test", Tribology International 32 (1999) 327-335.
- [44] At Male, Mg Cockcroft, "A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation", J. Inst. Met. 93 (1964) 38.
- [45] Ding-Ni Zhang, Qian-Qian Shangguan, Can-Jun Xie, Fu Liu, "A modified Johnson–Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy", Journal of Alloys and Compounds 619 (2015) 186-194.
- [46] Jin Qiang Tan, Mei Zhan, Shuai Liu, Tao Huang, Jing Guo, He Yang,
 "A modified Johnson–Cook model for tensile flow behaviors of 7050-T7451 aluminum alloy at high strain rates", Materials Science and Engineering: A 631 (2015) 214-219.

Abstract

A Hybrid Experimental-Numerical Method for Identifying the Johnson-Cook Hardening Parameters under Intermediate to High-Strain Rate Conditions

Yeongmin Jeong Dept. of Materials Science & Engineering The Graduate School Seoul National University

In this study, we propose a method that simultaneously applies experiment and finite element analysis for identifying Johnson-Cook(JC) model constants. The determined parameters aim to accurately predict the behavior of materials under intermediate and high-speed deformation conditions. First, a finite element simulation of the Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) experiment is conducted with initial conditions from the test results of quasi-static experiments. Then, the stress-strain curves obtained from the actual high strain rate experiment and the temperature data measured from test specimens are used as objective functions for optimizing the JC model constants by inverse analysis. Finally, the proposed hybrid parameter identification procedure is validated by predicting the material deformation behavior at different strain rates and boundary conditions.

Key Words : Modified Johnson-Cook Model, High Strain Rate, Hybrid Identification Method

감사의 말

먼저 위탁교육 이라는 제도를 통해 이렇게 좋은 학교에서 원 없이 공부할 수 있는 기회를 제공해준 대한민국 육군에 감사를 전합니다. 육군의 지원 덕분에 2년간 저의 지적 역량과 전문성을 발전시킬 수 있었고, 이는 저에게 더 넓은 시야와 사고를 가질 수 있게 만들어 주었습니다. 이제 육군의 장교로서 다시 군으로 돌아가 군이 제공해준 혜택에 대해 성과 있는 복무를 통해 보답할 수 있도록 하겠습니다.

대학원에서 만난 분들 중 감사하지 않은 분이 없겠으나 먼저 전공에 대한 기초가 없는 육군 위탁교육생임에도 편견 없이 연구실의 지도학생으로 받아주시고, 2년간 열정을 다해 지도해주신 **이명규** 교수님께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 저의 장교로서의 커리어를 존중해주시고 연구적인 면과 생활적인 면 양쪽으로 세심하게 신경 써 주셔서 2년간 정말 행복한 대학원 생활이 될 수 있었던 것 같습니다. 교수님의 지도 덕에 입학 전의 저는 상상하지 못할 정도로 많은 지식을 얻을 수 있었고, 비록 초라한 연구성과이지만 제 인생에 있을 것이라 상상하지 못했던 제 이름으로 된 논문까지 집필할 수 있었음에 다시 한번 진심으로 감사함을 전합니다.

그리고 나이 많은 제로 베이스의 신입생을 따뜻하게 맞아주고 광범위한 분야에서 많은 도움을 준 연구실 구성원 들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

저의 첫 방장으로서 연구실 생활에 대한 전반적인 조언과 관심을 주었던 **정우진** 박사님(PS: 여전히 많이 드시나요..?), 졸업하신 후에 더 많은 얘기를 나누고 친해진 **최흥진** 박사님(PS: 결혼 축하 드립니다.), 많은 주제로 즐겁게 토론했던 열정 넘치는 **김찬양** 박사님(PS: 결혼은 언제쯤…?), 엄청난 출퇴근 일정으로 항상 피곤해 보였던 **이기정** 박사님(PS: 삼성… 부럽다…), 수 차례 밥 한번 먹자고 하시고 졸업할 때 까지 한번도 안 먹었던 타고난 핵인싸 **최유미** 박사님(PS: 지금도 늦지 않았음), 항상 제게도 부족한 군인이라는 자부심을 일깨워 주셨던 **이형림** 박사님(PS: 항상 꼬맹이라고 부르시던 따님 정말 귀엽고 사랑스럽던데 이쁘게 잘 자랐으면 좋겠습니다.), 상주인원인 듯 친해졌지만 생각해보니 상주인원이 아닌 **방준호** 박사님(PS: 21년 초반까지는 진짜 상주인원인줄 알았음), 이상 저보다 먼저 졸업하신 선배님들께 먼저 진심으로 감사의 인사를 전합니다.

항상 조언을 구하면 반갑게 대답해주고, 함께 운동하며 친해졌던 **동준이**(PS: 같이 공 찰 때 정말 즐거웠다.), 아버지도 군인 출신 이시라며 여러 가지 측면에서 나의 연구실 생활과 연구에 큰 도움을 주었던 **경문이**(PS: 골프는 나중에 꼭 레슨 다시 받고 ㅎㅎ), 항상 허허롭게 웃으며 재미없는 말도 잘 들어주고 웃어주던 **진흥이**(PS: 여전히 가장 일찍 출근 가장 늦게 퇴근 하던데 신혼생활을 좀 즐겨보는 건 어떻겠니 ㅎㅎ), 식성이 비슷해서 점심시간마다 의기투합해서 맛있는 음식 먹으러 가던 **서연 누나**(PS: 21년 가을에 제주도에서 다같이 말 놓자고 제안해줘서 고마워, 덕분에 연구실 사람들과 더 친해질 수 있었던 것 같아.), 1년 밖에 못 봤지만 많은 얘기를 나눴고 결국 졸업 전에 다시 보지 못해 아쉬운 **찬미**(PS: 귀국하면 꼭 연락해.), 어리다고

항상 놀렸지만 연구적으로 많은 도움을 줘서 사실은 항상 미안하고 고마웠던 천재 **성환이**(PS: 제가용? 왜용? 저는 실수 안해용!), 연구적으로 학문적으로 가장 큰 도움을 받았던 공동 1저자 **서준이**(PS: 저널 투고 잘 부탁한다 공1!), 반응이 좋아서 가장 많은 놀림의 대상이 됐었지만 사실 그만큼 추억이 많았던 **정윤이**(PS: 음주 후 경찰은 아무리 생각해도 내 인생 올 타임 레전드다 ㅋㅋㅋㅋㅋ), 어떤걸 물어봐도 항상 친절하고 상세하게 설명해주고 어떤 장난도 사람 좋게 받아주던 착한 **건진이**(PS: 카드마술 보여줘 빨리!!!), 투덜거리면서도 항상 최고의 성적을 받아와 의아했던 연구실의 또 다른 천재 **규장이**(PS: 시끄럽게 해서 미안했다… 자리까지 옮길 줄 몰랐음ㅋㅋㅋㅋ), 뭔가 짠한 가위바위보 최약체 인턴왕 **진모**(PS: 석사가… 헤드셋..?), 이름도 몰랐던 후배에서 가장 친한 후배가 된 육사 72기 **국진이**(PS: 이렇게 부를 때마다 사실 국진이 빵이 자꾸 떠오르는데 정상이냐?), 이상 예비 박사, 석사 님들 께도 연구실 생활을 즐겁게 만들어 줘서, 연구에 많은 도움을 줘서 진심으로 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

항상 장난만 친 것 같은데 어느새 훌륭하게 연구실에 적응해서 연구를 시작한 인턴 **재현이, 민광이, 중현이** 에게는 많은 도움을 주지 못해 미안하고 연구실에 잘 적응해 주어 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

그리고 기업체 연구원 이신 **김혜진, 김지영, 도영호, 이성비** 씨에게도 감사의 말을 전합니다.

다음으로는 31년간 물심 양면으로 저의 발전과 행복을 위해 많은 회생을 하셨던 부모님과 세상에 하나밖에 없는 저의 형에게 감사를 전합니다. 말 그대로 저의 행복만을 바라며 본인의 괴로움을 참아내며

회생하셨던 어머니와 아버지, 두 분의 회생 덕분에 저는 항상 행복했고 좋은 것들만 익히고 배울 수 있었습니다. 지난 2년간의 시간도 두 분의 응원으로 힘들 때 힘을 얻고, 지쳤을 때 위로를 얻으며 이제 인생에 있어 또 다른 작은 성과를 얻게 되었습니다. 앞으로도 제가 이루고 성취하게 되는 것들이 오로지 저 혼자의 힘이 아닌 두 분의 응원과 기도가 있었기에 얻게 된 것임을 잊지 않고 두 분의 아들로써 자랑이 될 수 있도록 항상 노력하겠습니다.

그리고 항상 나의 목표가 되어주는 형, 대학원 지원할 때부터 졸업할 때까지 모르는 부분에 대해 먼저 이 길을 걸었던 형의 조언을 구할 수 있어서 정말 큰 도움이 되었어. 앞으로도 형이 내 인생에 항상 앞서 걸으며 도움을 줄 것을 알기 때문에 항상 고맙다는 말 전하고 싶어.

끝으로 2년여의 석사 위탁교육 기간 중 제가 얻은 가장 소중한 보물인 제 여자친구 에게도 진심으로 감사의 말을 전하고 싶습니다. 승민아, 너가 내 여자친구가 되어준 덕에 2년동안 정말 행복할 수 있었어. 같이 골프라는 새로운 취미도 배웠고, 새로운 친구들도 많이 알게 되었고, 여러 곳을 여행하면서 행복하고 즐거웠던 추억도 많이 생겨서 너무 좋았어. 너의 덕분에 내 대학원 생활 2년이 내 인생에 가장 행복했던 시간으로 빛날 수 있었던 것 같아. 앞으로도 같이 행복하고 즐거운, 돌아봤을 때 정말 아름다웠던 순간들로 기억될 수 있는 시간 만들어 가자.

- 2023년 1월, 행복했던 2년의 대학원 생활을 마무리하며 -