

Mohr–Coulomb 파단모델을 이용한 텅스텐 합금의 충격 파단 예측

노동환¹ · Piemaan Fazily¹ · 유광현¹ · 이승보¹ · 고동균² · 성민제³ · 허 훈⁴ · 윤정환^{5, #}

Prediction of Impact Fracture for Tungsten Alloy Using the Mohr–Coulomb Fracture Model

D. Noh, P. Fazily, K. Yu, S. Lee, D. K. Ko, M. J. Sung, H. Huh, J. W. Yoon

(Received December 21, 2020 / Revised January 27, 2021 / Accepted January 27, 2021)

Abstract

A new concept of ammunition without the use of explosive gunpowder has been recently studied, which achieves performance equal to or higher than that of high explosives. Frangible Armor Piercing (FAP) is one of the concepts, which utilizes a tungsten alloy penetrator specialized for fragmentation. To investigate the fracture behavior of the tungsten alloy penetrator, Taylor impact tests were conducted at various impact velocities. Additionally, finite element analysis was performed to predict the fracture behavior of the tungsten alloy. Compression tests were also carried out at six strain rates for dynamic material properties and the dynamic hardening behavior was successfully predicted with the Lim–Huh model. Finally, the Mohr–Coulomb fracture model based on the mean stress was adopted to predict impact failure in Taylor impact simulation. The analysis predicts the deformation and fracture behaviors of the tungsten alloy successfully.

Keywords : Frangible Armor Piercing, Tungsten alloy, Taylor impact test, Dynamic hardening behavior, Fracture model

1. 서 론

기존의 고폭탄은 파편 효과를 내기 위하여 신관과 고폭화약을 내장하고 있다. 이로 인하여 취급 및 보관 시에 여러 가지 위험성이 따른다. 이러한 위험성을 탈피하기 위하여, 최근에는 신관과 고폭화약 없이 우수한 성능을 발휘함과 동시에 탄약 취급 및 저장이 획기적으로 개선된 신개념 탄약이 요구되고 있다.

신개념 탄약의 한 종류인 Frangible Armor Piercing (FAP) 는 신관과 고폭화약을 내장하고 있지 않으며, 공대공 또는 공대지 전투에 사용하기 위하여 개발된 폭발성이 없는 탄약이다. FAP는 금속탄체 내부에 파편화에 특화된 텅스텐 중합금 관통자가 조립되어

있는 구조로, 목표물에 대한 충돌 때문에 발생하는 관통자의 파편화로 인하여 고폭탄 수준의 파편을 형성한다. 이러한 파편들로 인하여 축 방향의 피해와 반경 방향의 피해를 동시에 야기하게 된다. 그러나, 기존의 텅스텐 중합금 관통자로는 이러한 파편 효과를 내기 어렵기 때문에 파편확산 관통형 텅스텐 중합금 소재를 새롭게 개발하였다. 파편화를 위하여 합금비의 재구성과 소결조건을 제어하였고, 파괴특성을 연성파괴에서 취성파괴로 변화시켰다. 본 논문에서는 이러한 파편확산 관통형 텅스텐 중합금 소재를 사용하였다.

테일러 충격 해석에서의 발사체 파단에 대한 연구는 다양하게 진행되어 왔다. Teng [1] 등은 응력삼축성에서의 컷오프 개념을 도입하여 성공적으로 발사체의 파단을 예측하였으며, Xiao [2] 등은 로데 파라미터 효과를 고려하여 AA 2024-T351의 발사체 파단을 예측하였다. Zhang [3] 등은 다섯 가지의 파단

1. 한국과학기술원 기계공학과, 박사과정
2. 풍산방산기술연구원, 책임연구원
3. 풍산방산기술연구원, 전임연구원
4. 한국과학기술원 기계공학과, 명예교수
5. 한국과학기술원 기계공학과, 교수

Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
E-mail: j.yoon@kaist.ac.kr, ORCID: 0000-0002-7616-5253

모델에 대하여 테일러 충격 해석 결과를 비교하였으며, Couque [4] 등은 기존의 텅스텐 합금에 대하여 전단 파단과 관통 효과를 연구하였다.

Wierzbicki [5] 등은 여러 파단모형을 비교하였고, 최대전단응력 파단모형이 시험 결과와 유사하다는 것을 보였으며, Stoughton과 Yoon [6] 은 최대전단응력 파단모형을 사용하여 실제 공정에서도 파단을 성공적으로 예측하였다. 그리고 최대전단응력과 수직응력을 고려한 Mohr-Coulomb 파단모형은 다양한 분야에 적용되어 왔다. 이후에 평균응력과도 선형 관계가 있다고 관찰되었고, 실제 시험 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다 [7].

본 논문에서는 관통자의 파편확산을 분석하기 위하여 다양한 변형률속도에서의 압축시험을 수행하여 텅스텐 합금의 동적 경화거동을 획득하였다. 그리고 역해석을 통하여 압축 파단 지점에서의 주응력을 계산하였으며 테일러 충격 시험의 결과를 동시에 고려하여 파단모형의 계수를 획득하였다. 최종적으로 획득한 계수들과 함께 테일러 충격 해석에 Mohr-Coulomb 파단모형의 적용 가능성을 검증하였다.

2. 텅스텐 합금의 동적 물성 평가

2.1 텅스텐 합금의 압축시험

변형률속도에 따른 진응력-변형률 선도를 획득하기 위하여 다양한 변형률속도에서의 압축시험을 수행하였다. 변형률속도가 낮은 준정적 압축시험의 경우, INSTRON 5583 시험 장치를 이용하였다. 시편은 지름 4 mm, 길이 8 mm로 제작하였으며, 변형률속도는 0.001, 0.01, 0.1, 1 s⁻¹ 로 설정하였다. 각각의 시험을 3회 진행하였으며, 높은 재현성을 보였다. 변형률속도가 높은 압축시험의 경우, Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 시험 장치를 사용하였으며, 시편 지름은 11 mm, 길이는 6 mm로 제작하였다. 변형률속도는 500, 1000 s⁻¹ 로 설정하였으며, SHPB 시험 결과로부터 공칭응력-변형률 선도를 구하기 위하여 식 (1)-(3)을 사용하였다 [8].

$$\dot{\varepsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (3)$$

여기서 C_0 와 A_0 , E_0 는 각각 봉의 응력파속도와 초기단면적 및 탄성계수를 나타내며, ε_R 과 ε_T 는 각각 반사파와 투과파의 진폭을 의미한다. L 과 A 는 각각 시편의 초기길이 및 단면적을 나타낸다. 시험에 사용한 INSTRON 5583과 SHPB 시험 장치들은 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. 최종적으로, 변형률속도에 따른 진응력-변형률 선도를 Fig. 3에 도시하였다.

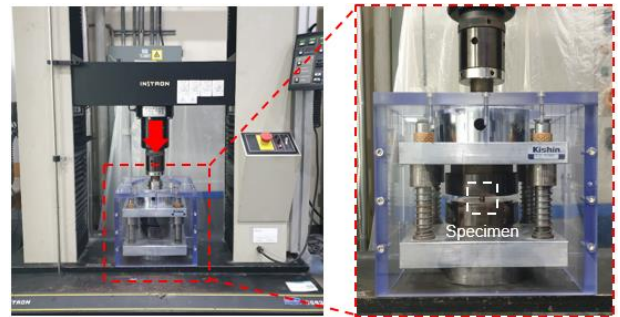


Fig. 1 INSTRON 5583 with a special device for high strength materials

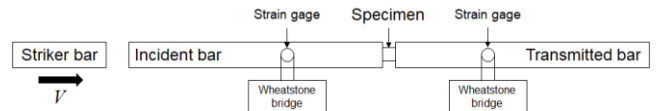


Fig. 2 Schematic view of SHPB

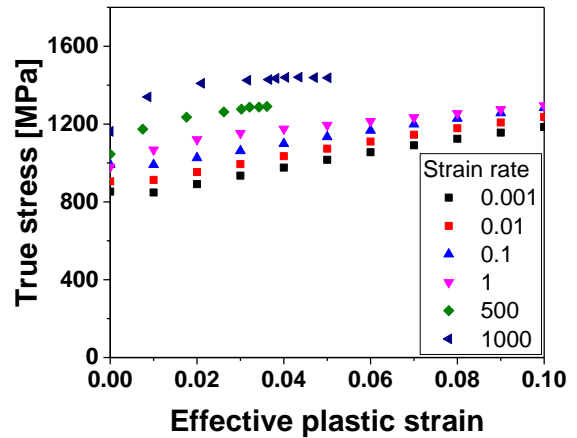


Fig. 3 True stress-strain curves of tungsten alloy at low to high strain rates

2.2 동적 경화모델의 계수 평가

본 논문에서는 텅스텐 합금의 동적 경화모델로 Lim-Huh 모델을 적용하였다 [9].

$$\sigma(\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^p) = [A - B \cdot \exp(-C \cdot \bar{\epsilon}^p)] \times \left[\frac{1 + q(\bar{\epsilon}^p) \dot{\epsilon}^m}{1 + q(\bar{\epsilon}^p) \dot{\epsilon}_r^m} \right] \quad (4)$$

이 식의 $q(\bar{\epsilon}^p)$ 을 식 (5)에 제시하였다.

$$q(\bar{\epsilon}^p) = \frac{q_1}{(\bar{\epsilon}^p + q_2)^{q_3}} \quad (5)$$

위 식에서 정적 경화거동 식에 Swift 경화식 대신에 Voce 경화식을 적용하였다. 그리고 Lim-Huh 모델 역시 열 연화 효과가 고려된 Modified Lim-Huh 모델이 있지만, 본 연구에서는 온도에 대한 데이터를 획득하지 못했기 때문에 기존의 Lim-Huh 모델을 사용하고자 한다. 기준 변형률속도는 0.001 s^{-1} 이며, 최적화 된 계수를 Table 1에 제시하였다. 그리고 예측된 선도와 시험 결과를 Fig. 4에 비교하였으며, 상당히 일치하는 경향을 보였다.

Table 1 Result of calibrated parameters

A	B	C	q_1	q_2	q_3	m
[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1668.5	873.9	6.13	0.0025	0.0157	2.7583	0.029

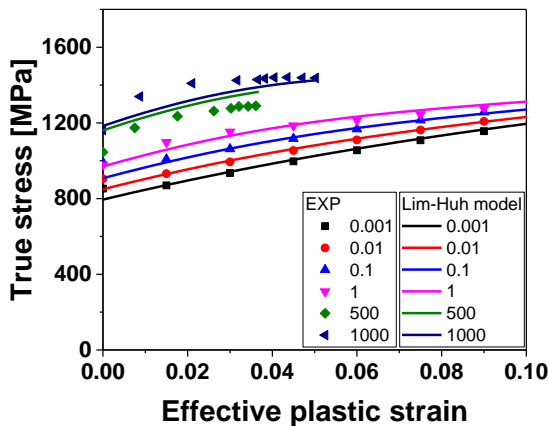


Fig. 4 Comparison between experimental results and fitted curves

3. 테일러 충격 시험 및 해석

3.1 충돌 속도에 따른 테일러 충격 시험

본 논문에서는 높은 변형률속도에서의 텅스텐 합금의 경화거동 및 파단을 분석하기 위하여 테일러 충격 시험을 수행하였다. 테일러 충격 시험기는 고압의 가스로 시편을 발사시켜 고속충돌을 구현하는 장치이며, 시험 장치 및 시험 도식을 Fig. 5에 나타내었다.

시편은 지름 10 mm, 길이 40 mm로 제작하였으며, 발사체의 충돌 속도는 104, 142, 188, 216 m/s로 설정하였다. 충돌 속도에 따른 테일러 충격 시험 결과는 Fig. 6에 도시하였으며, 시험을 진행한 후에 수거한 시편 몸통부분을 Fig. 7에서 보여 주었다.

충돌 속도가 104 m/s의 경우, 발사체의 둘째 부분에서 아주 미세한 균열이 보였다. 충돌 속도가 142 m/s부터는 뚜렷한 파편화가 시작되었으며, 188 및 216 m/s로 충돌 속도가 증가할 수록 다수의 파편이 생기기 때문에 Fig. 7과 같이 시편 몸통부분의 길이가 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 파편화 현상을 고려하면 이 텅스텐 합금은 FAP 탄두의 관통자로 적합하다고 판단되며, 특히 파단이 발사 축과 평행하게 발생하는 것을 관찰하였다.

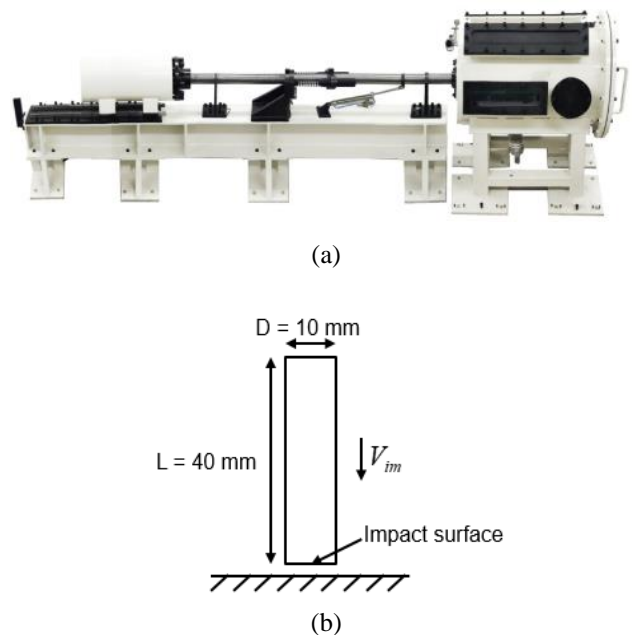


Fig. 5 Taylor impact test: (a) Single stage gas gun; and (b) Schematic view of Taylor impact test

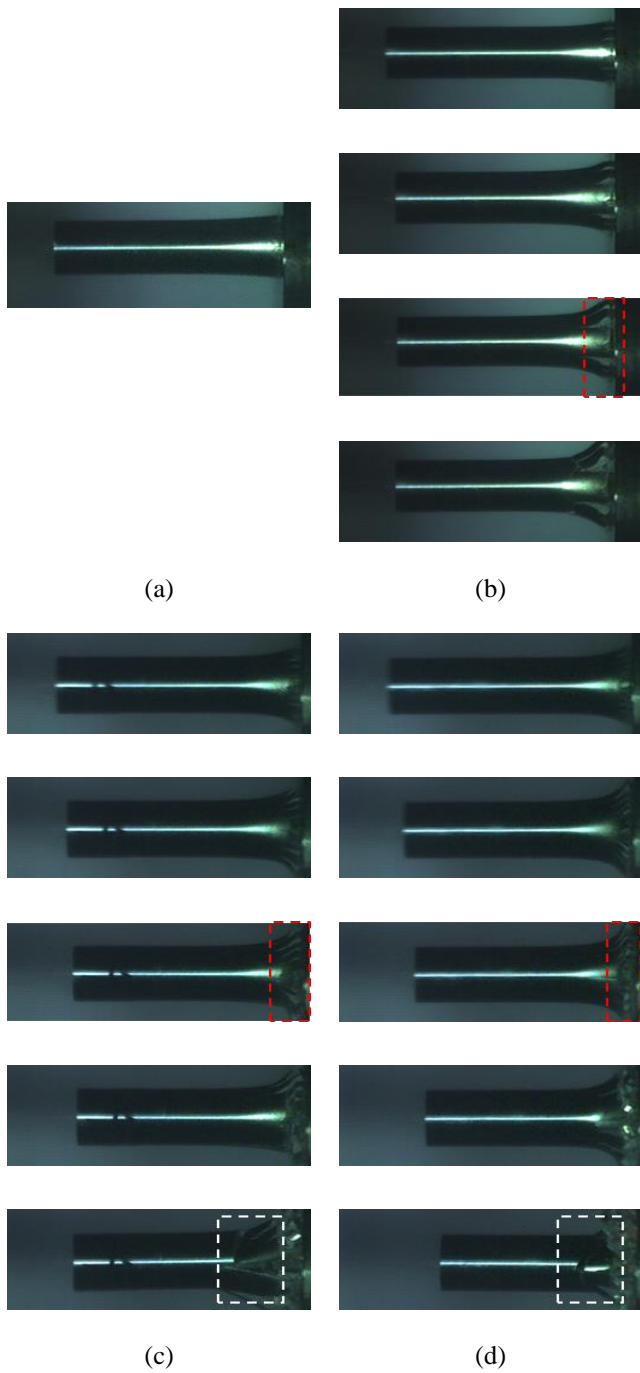


Fig. 6 Results of Taylor impact test according to impact velocity: (a) 104 m/s; (b) 142 m/s; (c) 188 m/s; and (d) 216 m/s

3.2 Mohr–Coulomb 파단모델 계수 평가

먼저, Lim–Huh 동적 경화모델이 재료의 고속 거동을 정확히 묘사하는지 확인하기 위하여, 테일러 충격 전산모사해석 결과를 최종 변형 모양에 대해 시



Fig. 7 Main parts of specimen after Taylor impact test

험 결과와 비교하였다. 상용해석코드 Abaqus 2016/Explicit을 VUMAT과 함께 사용하였으며, 축 대칭 해석을 Fig. 8과 같이 수행하였다. 마찰 계수는 0.1, 탄성계수는 300 GPa를 부여하였다. Fig. 9에 비교한 것과 같이, 충돌 속도가 104 m/s에서의 해석 결과는 시험 결과와 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이 비교를 통하여 Lim–Huh 모델이 성공적으로 적용되었다고 판단된다.

파단모델은 평균응력을 기반으로 한 Mohr–Coulomb 모델을 식 (6)과 같이 적용하였다 [7].

$$\sigma_{MC} = \sigma_{MSS} + \mu\sigma_{mean} \quad (6)$$

여기서 σ_{MC} , μ 는 구하여야 하는 재료계수이며, σ_{MSS} 는 최대전단응력, σ_{mean} 는 평균응력을 의미한다.

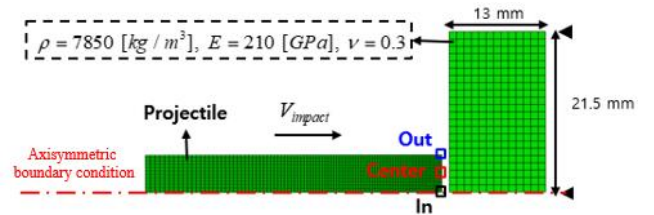


Fig. 8 Axisymmetric boundary condition for Taylor impact simulation

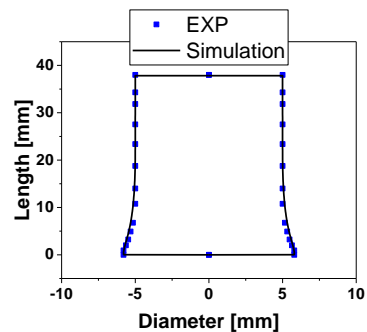


Fig. 9 Comparison between experimental and predicted final deformed shape at 104 m/s impact velocity

파단모델의 계수를 결정하기 위하여는 압축 파단 시험 결과가 필요하며, 이를 위하여 앞서 구한 진응력-변형률 선도를 사용하여 압축 해석을 수행하였다. Fig. 10과 같이 측면에서 파단이 발생하는 점을 고려하여 주응력을 같은 위치의 요소에서 획득하였다.

본 논문에서는 0.1 s⁻¹의 변형률속도를 가지는 진응력-변형률 선도를 사용하여 파단점에서의 주응력 값들을 도출하였으며, 추후에 변형률속도에 따른 파단점의 변화를 검토하고 고려할 예정이다. 역해석을 통하여 도출한 주응력으로 진단응력과 평균응력을 계산하였으며, 각각의 값은 944.97 MPa와 94.27 MPa이다. 압축시험에서 생기는 배럴링 현상에 의해 파단점에서는 압축이 아닌 인장 상태가 되는 것을 확인할 수 있었다.

이 점을 기준으로 테일러 충격 해석 결과를 고려한 역해석을 통하여 기울기 μ 를 구하였다. Fig. 11은 Fig 8에 표시된 내부 및 외부 (in and out) 점과 중앙 (center) 점 및 압축시험 결과의 최대진단응력과 평균응력의 상태를 표시하고 있다. 여기서 0.1과 0.15를 기울기의 계수로 시도해보았으며, 두 기울기의 계수 모두 104 m/s에서는 파단이 발생하지 않았고, 142 m/s에서는 파단이 발생했다.

Fig. 12에 나타난 것처럼 기울기가 0.15인 경우는 시험 결과보다 파편화가 더 많이 발생하였고, 0.1인 경우에 시험 결과와 비슷한 경향을 보였다. 따라서 0.1을 기울기로 결정하였고, 충돌 속도에 따른 테일러 충격 해석 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 테일러 시험에서 관찰된 발사체 축과 평행한 파단거동을 성공적으로 예측하였으며, 충돌 속도가 증가함에 따라 파편의 수가 증가하는 것과 동시에 발사체 몸통부분의 길이가 줄어드는 것을 확인하였다.

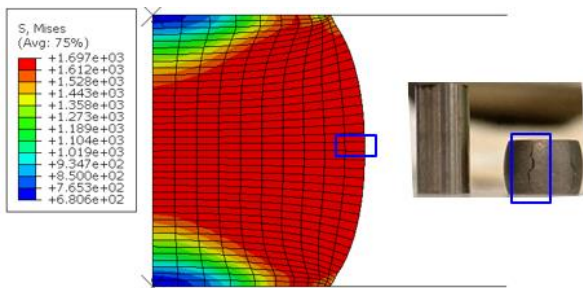


Fig. 10 Simulation result and fracture point of compression test

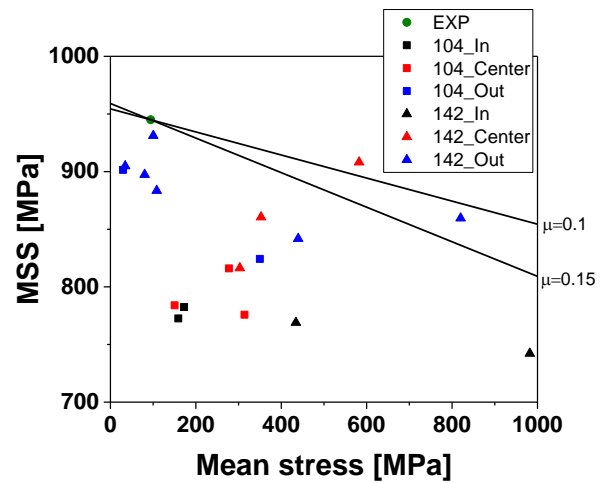


Fig. 11 Experimental and predicted maximum shear stress points at 104 and 142 m/s impact velocity

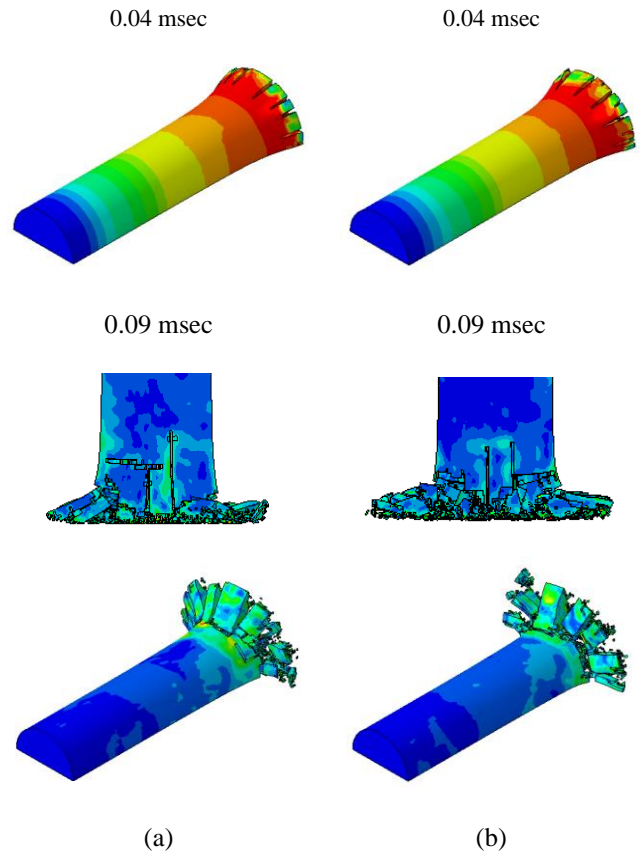


Fig. 12 Predicted Taylor impact result at 142 m/s impact velocity: (a) $\mu = 0.1$; and (b) $\mu = 0.15$

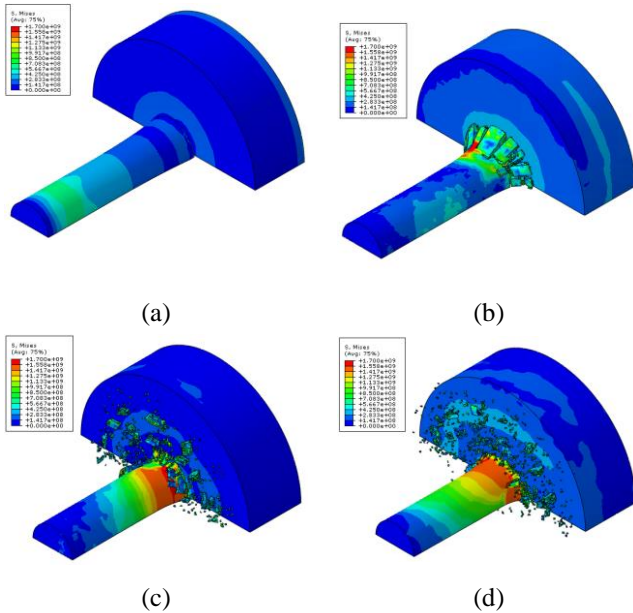


Fig. 13 Predicted Taylor impact results: (a) 104 m/s; (b) 142 m/s; (c) 188 m/s; and (d) 216 m/s

4. 결론

본 논문에서는 파편확산 관통형 텅스텐 합금의 파편화 현상을 예측하기 위해서 다양한 시험과 전산모사해석을 수행하였다. 특히, 테일러 충격 전산모사해석을 위해서는 적절한 동적 경화모델과 파단모델이 요구되며 각각의 결론은 다음과 같다.

(1) 파편확산에 특화된 텅스텐 합금의 동적 경화거동 분석을 위하여 압축시험을 수행하였다. INSTRON 5583 및 SHPB를 통하여 준정적에서부터 고속에 이르는 여러 변형률속도에서의 진응력-변형률 선도를 획득하였다. 또한 Lim-Huh 동적 경화모델을 적용하여, 변형률속도에 따른 텅스텐의 진응력-변형률 선도를 성공적으로 예측하였다. 추가적으로 파편화가 발생하지 않은 104 m/s에서의 시험 및 전산모사해석 결과를 비교하여, 동적 경화모델이 성공적으로 적용된 것을 확인하였다.

(2) 텅스텐 합금의 파단거동을 분석하기 위하여 다양한 충돌 속도에서 테일러 충격 시험을 수행하였다. 그리고 압축시험과 테일러 시험의 역해석을 통하여 Mohr-Coulomb 파단모델의 계수를 획득하였으며, 발사체의 축과 평행한 파단거동 및 충돌 속도에 따른 파편화 현상을 시험 결과와 유사하게 성공적으로 예측하였다.

후 기

본 연구는 (주) 풍산의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] X. Teng, T. Wierzbicki, S. Hiermaier, I. Rohr, 2005, Numerical prediction of fracture in the Taylor test, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 42, No. 9-10, pp. 2929-2948. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.09.039>
- [2] X. Xiao, Z. Mu, H. Pan, Y. Lou, 2018, Effect of the Lode parameter in predicting shear cracking of 2024-T351 aluminum alloy Taylor rods, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 120, pp. 185-201. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.06.008>
- [3] W. Zhang, X. K. Xiao, G. Wei, Z. Guo, 2012, AIP Conference Proceedings, Am. Inst. Phys., pp1125-1128. <https://doi.org/10.1063/1.3686477>
- [4] H. Couque, G. Nicolas, C. Altmayer, 2007, Relation between shear banding and penetration characteristics of conventional tungsten alloys, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 34, No. 3, pp. 412-423. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.12.003>
- [5] T. Wierzbicki, Y. Bao, Y. W. Lee, Y. Bai, 2005, Calibration and evaluation of seven fracture models, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 47, No. 4-5, pp. 719-743. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.03.003>
- [6] T. B. Stoughton, J. W. Yoon, 2011, A new approach for failure criterion for sheet metals, *Int. J. Plast.*, Vol. 27, No. 3, pp. 440-459. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.07.004>
- [7] J. W. Yoon, S. Zhang, T. B. Stoughton, 2017, *J. Phys.: Conference Series*, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/896/1/012110>
- [8] Shin, H. and J.-B. Kim, 2019, Evolution of specimen strain rate in split Hopkinson bar test, *Proc Inst Mech Eng Sci.*, Vol. 233, No. 13, pp. 4667-4687. <https://doi.org/10.1177/0954406218813386>
- [9] H. Huh, K. Ahn, J. H. Lim, H. W. Kim, L. J. Park, 2014, Evaluation of dynamic hardening models for BCC, FCC, and HCP metals at a wide range of strain rates, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 214, No. 7, pp. 1326-1340. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.004>