

# 경량화된 이중상 구조의 중공 형태 변화에 따른 변형을 분포 분석

이정아<sup>1</sup> · 김용주<sup>1</sup> · 정상국<sup>1</sup> · 김형섭<sup>2,3,4,#</sup>

## Analysis of Strain Distribution According to Change in the Vacancy Shape of the Lightweight Dual-Phase Structure

J. A. Lee, Y. J. Kim, S. G. Jeong, H. S. Kim

(Received June 17, 2022 / Revised August 31, 2022 / Accepted August 31, 2022)

### Abstract

A dual-phase structure refers to a material with two different phases of components or crystal structures. In this study, we analyze the stress distributions for harmonic and composite structured materials which are a kind of dual-phase structure materials. The finite element method (FEM) was used to progress compression test to analyze the strain distribution, and rather than constituted of a fully dense material, a dual-phase structure was designed to make a lightweight structure that has different shapes and volumes of vacancy in each case. As a result of each case, the dual-phase structured materials showed different stress distribution patterns and based on this, the cause was identified through the research.

**Keywords:** Dual-phase, FEM, Harmonic, Composite, Lightweight, Strain Distribution

### 1. 서 론

이중상 구조 재료는 서로 다른 두 구성 물질과 결정구조로 이뤄져 있는, 두 개의 상을 포함하는 물질이다. 이 구조 재료는 다른 구성 물성을 띄는 영역을 지닌 이형 구조와 함께 최근 여러 연구들이 진행되고 있다. [1-5] 이형 구조의 경우 이중 영역 간의 상호 작용 및 결합에서 발생하는 시너지를 바탕으로 이점을 얻을 수 있다. 대표적으로 강도와 연성 간의 트레이드 오프 효과를 이형 구조를 통해 완화시킬 수 있으며 [6,7] 이형 구조를 통해 기존 단일상에서 확인할 수 없었던 더 좋은 물성을 획득할 수 있다. [8,9]

이러한 장점을 지닌 이중상 구조 재료 중 하모닉 구조 재료는 경질의 매트릭스 안에 연질의 코어를

함유하는 구조 재료이다. 경질로만 존재하는 기존의 균일 재료의 경우 결정립의 미세화로 인해 강도는 증가하게 되지만 연성에서 손실을 일으킨다. 하지만 하모닉 구조의 경우 연질의 코어를 함유함으로써 소성 불안정성을 낮추고 높은 강도 및 연성을 획득할 수 있다. [10,11] 반면 복합구조의 경우 하모닉 구조와는 반대로 연질의 매트릭스 안에 경질의 코어를 함유하는 구조 재료이다. 복합구조의 경우 하모닉 구조 보다는 강도 및 연성 측면에서 좋은 물성을 얻지는 못하지만 이중 영역 간의 상호작용을 확인할 수 있기에 하모닉 구조를 복합구조와 함께 연구해볼 필요가 있다.

또한 고밀도의 하모닉 구조 및 복합구조에 대해 연구하기보다는 실제 산업에서 존재할 수 있는 경량화된 구조의 영향 또한 관찰해보기 위해 각각의 고밀도 구조에 모양 및 크기가 다른 중공을 만들었다. 이에 따라 변형을 분포 및 크기의 변화를 확인하고 다른 구조안에서 중공의 변화에 따라 어떤 변화 양상이 나타나는지 확인해볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 이중상

1. 포항공과대학교 신소재공학부, 대학원생

2. 포항공과대학교 신소재공학과, 교수

3. 포항공과대학교 철강대학원, 교수

4. 연세대학교 첨단기술융합연구교육원, 교수

# Corresponding Author: Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang 37673, Republic of Korea, E-mail: hskim@postech.ac.kr  
ORCID : 0000-0002-3155-583X

구조 재료인 하모닉 구조와 복합구조에서 중공의 모양 및 크기가 다름에 따라 변형률 분포 및 크기가 어떤 양상을 띄며, 이러한 양상이 띄는 원인을 분석해보았다.

## 2. 유한요소 해석 및 실험 방법

본 연구에서는 유한요소해석 소프트웨어 프로그램인 ABAQUS/Standard 2021 을 사용하여 압축시험 시뮬레이션을 진행하였다. 시편은 8 절점 육면체 요소 (C3D8R)로 구성하였으며 시편을 제외한 압축 지그는 강체 (rigid body)로 설정하였다. Fig. 1 는 3 차원 유한요소해석에서 사용된 모델을 모식화 한 것이며 (a)와 (b)는 각각 1 mm<sup>3</sup> 의 정육면체 형상 안에 검은 색 및 흰색으로 구분된 서로 다른 물성을 대입하여 하모닉 구조와 복합구조를 나타냈다. 시편과 지그의 마찰계수는 0.02 로 설정하였고 총 9 개의 정육면체 형상을 ABAQUS 기능 중 하나인 tie 조건을 사용하여 접촉시켰다. 압축시험의 경우 시편의 10%를 변형시키도록 설정하였으며 탄성-완전소성 모델을 적용하였다.

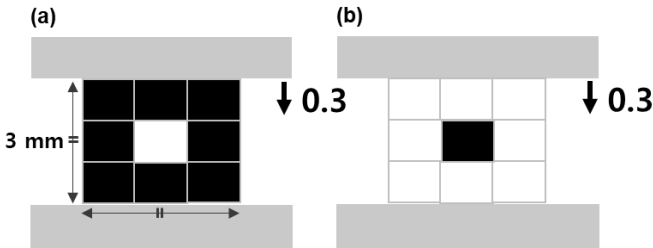


Fig. 1 A schematic diagram of the compression test. (a) is a harmonic structure and (b) is a composite structure

사용된 재료 및 물성은 Table 1 에 요약하였다. 검은색 정육면체 형상에는 경질 물성을 대입하고 흰색 정육면체 형상에는 연질 물성을 대입함으로써 하모닉 구조에는 상대적으로 경질한 물성을 가진 재료가 상대적으로 연질한 물성을 가진 재료를 둘러싸고 있는 형태를 표현하였다. 반대로 복합구조에는 상대적으로 연질한 물성을 가진 재료가 상대적으로 경질한 물성을 가진 재료를 둘러싸고 있는 형태를 표현하였다.

Fig. 2 는 유한요소해석에 사용된 모델을 나타냈다. 각각 중공의 모양 및 크기가 다르다는 것을 표현하

기 위해 (C,S)(V1,V2,V3)로 각각의 차이를 나타냈다. C 의 경우 중공의 모양이 구를 의미하며 S 의 경우 정육면체의 중공을 의미한다. 또한 V1~V3 의 경우 중공의 총 부피를 의미하며 각각 V1 (= 0.5328 mm<sup>3</sup>), V2 (= 1.944 mm<sup>3</sup>), V3 (= 4.104 mm<sup>3</sup>)의 값을 갖는다.

Table 1 Material properties of soft and hard

	Young's modulus (E)	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)
soft	104 GPa	520	732.47
hard	146 GPa	645.85	1085

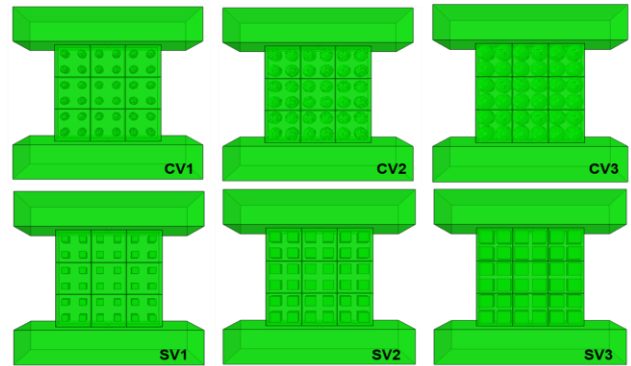


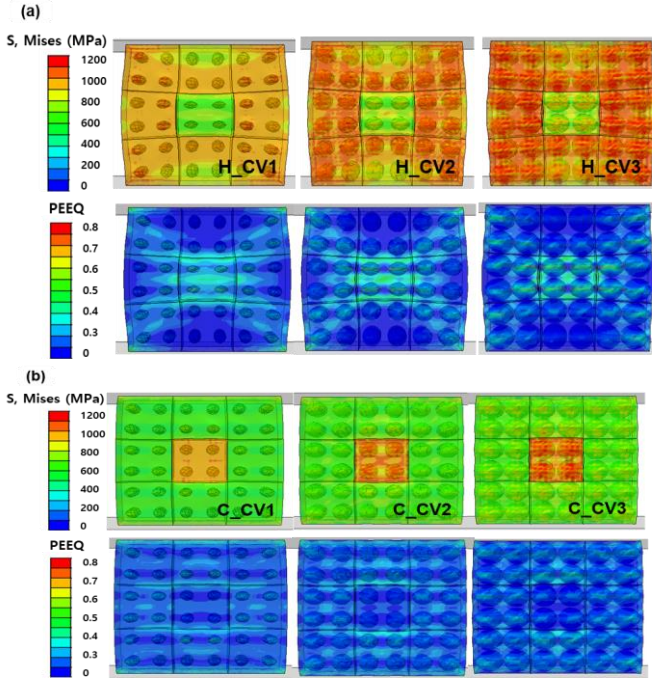
Fig. 2 Compression specimens which include various shapes and volumes of vacancy (C: sphere, S: cube, V1=0.5328 mm<sup>3</sup>, V2= 1.944 mm<sup>3</sup>, V3=4.104 mm<sup>3</sup>)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 이중상 구조의 변형률 분포

이중상 구조에서 가장 주목해야 할 점은 물성이 다른 두 구조의 경계에서 나타나는 변형률 분포이다. Fig. 3,4 에서 알 수 있듯이 두 구조의 경계에서 경질한 영역에서 연질한 영역으로 갈수록 변형률이 증가함을 알 수 있다. 이는 이중 영역 경계에서 물질이 불균일하게 변형되면서 변형률이 연질 영역에서 증가하게 되고 이는 기하적 필수 전위 (GNDs)를 생성 및 쌓이게 만든다. GNDs 의 형성은 연질 영역에서 후방 응력 (back stress)을 유발시키면서 결과적으로 이와 같은 현상은 전위 움직임을 방해함과 동시에 항복강도를 높인다. [12,13]

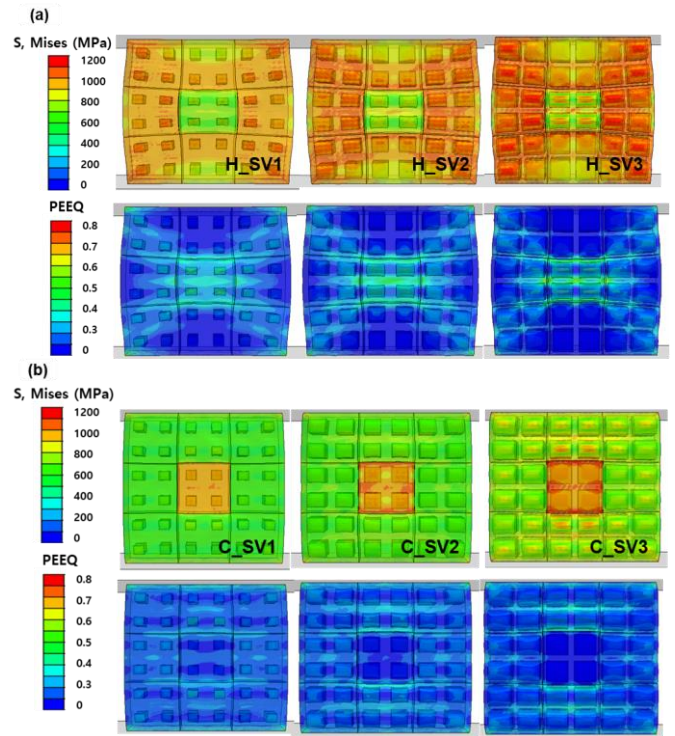
이를 바탕으로 Fig. 3의 응력 및 변형률 분포를 구형상의 중공을 가진 (a) 하모닉 구조와 (b) 복합구조에서 비교해보면 다음과 같다. (a)의 하모닉 구조



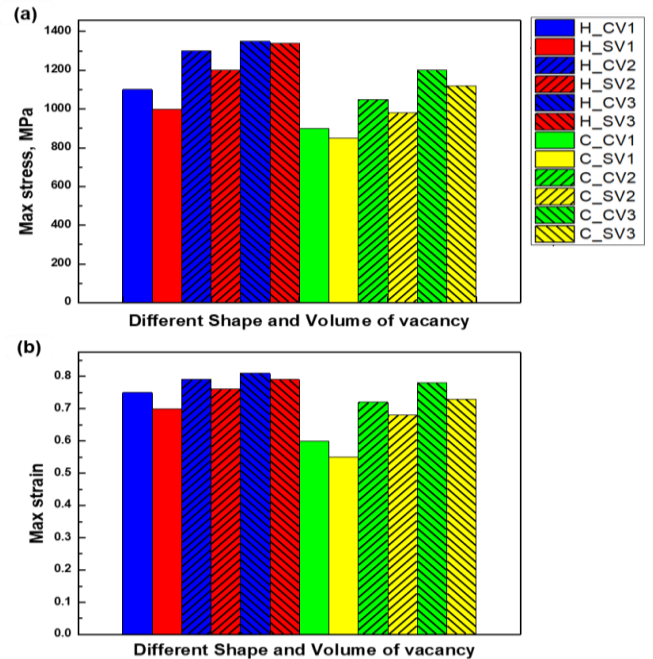
**Fig. 3** Von mises stress and equivalent plastic strain in (a) harmonic structure contained sphere shape vacancy (V1~V3) and (b) composite structure contained sphere shape vacancy (V1~V3)

에서는 연결이 중심부에 위치하여 변형률 분포가 중심부에서 높게 관찰됨을 알 수 있다. 반면 (b)의 복합 구조의 경우 경질이 중심부에 위치하여 경질 구조의 외부에서 변형률 분포가 높게 관찰됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 정육면체 형상의 중공을 가진 (a) 하모닉 구조와 (b) 복합 구조에 대한 응력 및 변형률 분포를 비교하였다. Fig. 3과 마찬가지로 하모닉 구조에서는 연결 영역이 존재하는 중심부에서, 복합구조에서는 경질 영역 외부에 변형률 분포가 높게 관찰됨을 알 수 있다. Fig. 5는 최대 응력 및 변형률을 각 구조마다 정량화하여 도식화한 그래프이다. 이 그래프를 통해 구형상의 중공을 가진 하모닉 및 복합 구조와 비교해 보았을 때 구형상의 중공을 가진 구조가 정육면체 형상의 중공을 가진 구조보다 응력 및 변형률 집중이 더 높게 나오는 것을 확인할 수 있다.



**Fig. 4** Von mises stress and equivalent plastic strain in (a) harmonic structure contained cube shape vacancy (V1~V3) and (b) composite structure contained cube shape vacancy (V1~V3)



**Fig. 5** (a) Maximum stress and (b) strain in structures contained different shape and volume of vacancy

### 3.2 하모닉 및 복합구조의 영향

Fig. 6 는 각각 하모닉 구조와 복합 구조를 (a) 같은 구 형상의 중공을 가졌을 때의 응력-변형률 관계와 (b) 같은 정육면체 형상의 중공을 가졌을 때의 응력-변형률 관계를 비교하였다. (a)와 (b) 모두 하모닉 구조가 복합 구조보다 같은 부피의 중공을 가지고 있을 때 응력이 더 높게 나옴을 알 수 있었다. 이는 하모닉 구조가 복합 구조에 비해 경질 재료의 함량이 높기 때문에 함량이 높은 경질 재료가 함량이 낮은 연질 구조에 더 많은 변형 및 응력을 가함을 알 수 있다. 따라서 하모닉 구조가 복합 구조보다 같은 부피 및 모양의 중공을 가진 형상에서 더 큰 응력을 보임을 알 수 있다.

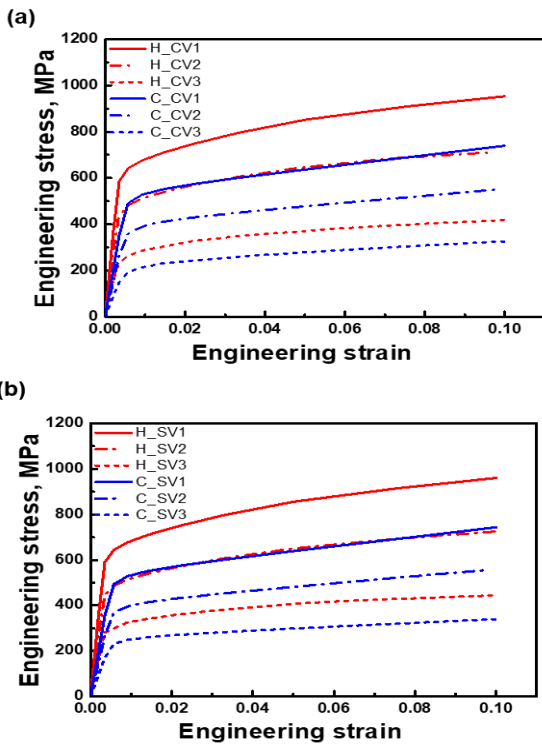


Fig. 6 (a) Comparison of harmonic and composite that both have sphere pore (b) Comparison of harmonic and composite that both have cube pore

### 3.3 중공 형상 및 부피의 영향

Fig. 7 는 (a) 같은 하모닉 구조에서 중공의 형상 및 부피를 다르게 하였을 때의 응력-변형률 관계를, (b) 같은 복합 구조에서 중공의 형상 및 부피를 다르게 하였을 때의 응력-변형률 관계를 비교하였다. 중공의 부피가 작은 V1, V2 의 경우 중공 형상의 모양을 비교하였을 때 같은 변형률 내에서 응력의 차

이가 보이지 않음을 알 수 있다. 하지만 중공의 부피가 큰 V3 에서는 정육면체 형상에서의 응력이 구 형상에서의 응력보다 더 높음을 알 수 있다. Fig. 8 의 같은 부피의 정육면체와 구에 대한 모식도를 통해, 같은 부피의 중공 형상이어도 중공의 단면적이 구 형상보다 정육면체 형상이 더 크므로 이는 이중 접합 경계면이 정육면체 형상에서 더 넓다는 것을 의미한다. 따라서 이중 접합 경계면의 증가로 인해 GNDs 의 형성 및 후방 응력의 유발율이 더 높아지는 것으로 해석할 수 있다.

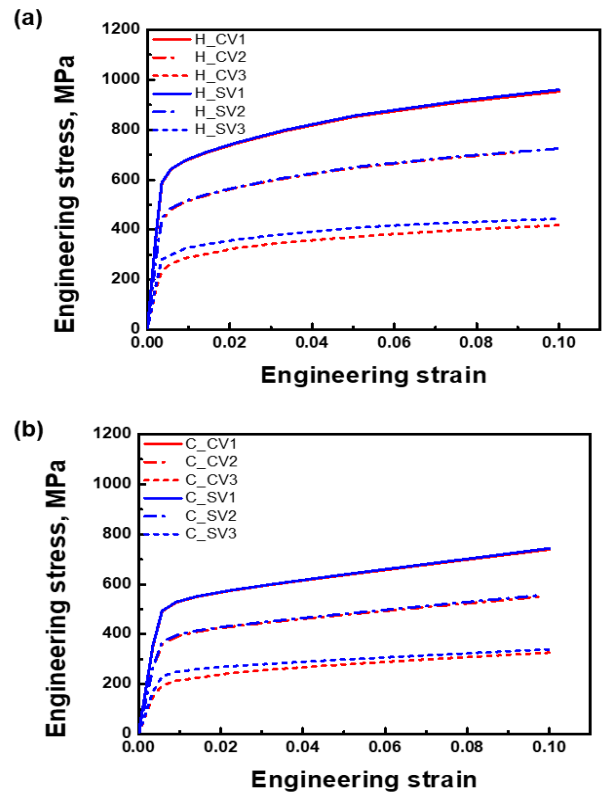


Fig. 7 (a) Comparison of sphere and cube pore in harmonic (b) Comparison of sphere and cube pore in composite

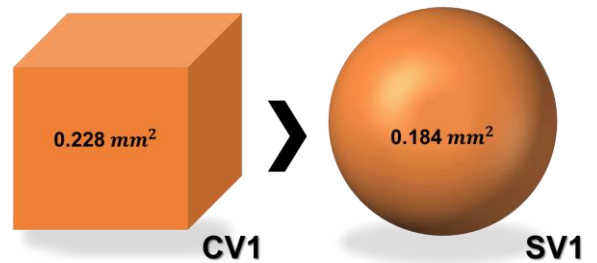


Fig. 8 Schematic of the surface area of a cube and a sphere structure in the same volume (V1)

## 4. 결 론

본 연구에서는 이중상 구조 재료에 경량화를 위한 중공이 포함되어 있을 때, 중공의 형상 및 부피를 변화시키면서 유한요소해석을 이용하여 압축시험을 실행하였다. 각 변화요소에 따른 응력 및 변형률 집중 분포와 응력-변형률 관계를 비교 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 하모닉 구조와 복합 구조에서 변형률이 경질 영역에서 보다 연질 영역에서 더 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 이는 이중 접합 경계에서 GNDs의 형성 조건을 나타낸다.

(2) 중공의 형상 및 부피 변화에 상관없이 하모닉 구조가 복합 구조보다 응력이 더 높게 관찰 되었다. 이는 경질 소재의 부피 분율이 더 크기 때문에 하모닉 구조에서 더 높은 응력이 나타남을 알 수 있었다.

(3) 중공의 부피가 큰 구조의 경우 중공의 형상이 정육면체일 경우가 구일 때보다 응력이 더 높게 나옴을 확인하였다. 이는 단면적이 더 넓은, 즉 이중 접합 경계가 더 넓은 정육면체 형상에서 GNDs의 형성 및 후방 응력 유발을 일으킬 수 있기에 구 형상보다 더 높은 응력을 나타낼 수 있음이라고 해석할 수 있다.

이러한 이중상 구조 및 경량화 구조 재료에 대한 연구는 이중 접합 경계에서 나타날 수 있는 강도 향상 메커니즘과 재료를 바꾸는 경량화 대신 중공을 이용한 구조 변형을 동시에 진행함으로써 강도 향상 및 경량화를 실제 산업에서 응용할 수 있는 밑바탕을 제공한다.

## 후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2022R1A5A1030054).

## REFERENCES

[1] S. Tamuly, S. Dixit, B. Kombariah, P. Khanikar, Strengthening mechanisms and deformation behavior of industrially-cast and lab-cast dual-phase high entropy alloy, *Met. Mater. Int.* [https://doi.org/10.1007/s12540-](https://doi.org/10.1007/s12540-22-01211-x)

22-01211-x.

- [2] K. Kishore, P. Kumar, G. Mukhopadhyay, Microstructure, tensile and fatigue behavior of resistance spot welded zinc coated dual phase and interstitial free steel, *Met. Mater. Int.* Vol. 28, pp. 945-965. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00939-8>.
- [3] S. S. Sohn, A. K. D. Silva, Y. Ikeda, F. Kormann, W. Lu, W. S. Choi, B. Gault, D. Ponge, J. Neugebauer, D. Raabe, 2018, Ultrastrong medium-entropy single-phase alloys designed via severe lattice distortion, *Adv. Mater.* Vol. 31, p. 1807142. <https://doi.org/10.1002/adma.201807142>
- [4] X. H. Du, W. P. Li, H. T. Chang, T. Yang, G. S. Duan, B. L. Wu, J. C. Huang, F. R. Chen, C. T. Liu, W. S. Chuang, Y. Lu, M. L. Sui, E. W. Huang, 2022, Dual heterogeneous structures lead to ultrahigh strength and uniform ductility in a Co-Cr-Ni medium-entropy alloy, *Nat. Commun.* Vol. 11, p. 2390. [10.1038/s41467-020-16085-z](https://doi.org/10.1038/s41467-020-16085-z).
- [5] Y. Feng, Y. Yang, Z. Xiao, X. Meng, G. Zhou, J. Leng, X. Teng, 2022, Effect of Al on the microstructure and mechanical properties of Mg-Sn-Ca-Mn wrought alloy, *Met. Mater. Int.* Vol. 28, pp. 1480-1487. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01001-x>.
- [6] L. Fu, D. Kong, C. Yang, J. Teng, Y. Lu, Y. Guo, G. Yang, X. Yan, P. Liu, M. Chen, Z. Zhang, L. Wang, X. Han, 2022, Ultra-high strength yet superplasticity in a hetero-grain-sized nanocrystalline Au nanowire, *J Mater Sci Technol.* Vol. 101, pp. 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.063>.
- [7] Q. Jia, L. Chen, Z. Xing, H. Wang, M. Jin, X. Chen, H. Choi, H. N. Han, 2022, Tailoring hetero-grained austenite via a cyclic thermomechanical process for achieving ultrahigh strength-ductility in medium-Mn steel, *Scr. Mater.* Vol. 217, p. 114767. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114767>.
- [8] T. Yang, Y. L. Zhao, B. X. Cao, J. J. Kai, C. T. Liu, 2020, Towards superior mechanical properties of hetero-structured high-entropy alloys via engineering multicomponent intermetallic nanoparticles, *Scr. Mater.* Vol. 183, pp. 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.03.023>.
- [9] Y. Cao, W. Zhang, B. Liu, M. Song, Y. Liu, 2020,

- Extraordinary tensile properties of titanium alloy with heterogeneous phase-distribution based on hetero-deformation induced hardening, *Mater. Res. Lett.* Vol. 8, pp. 254-260.  
<https://doi.org/10.1080/21663831.2020.1745919>.
- [10] Y. Zhu, K. Ameyama, P. M. Anderson, I. J. Beyerlein, H. Gao, H. S. Kim, E. Lavernia, S. Mathaudhu, H. Mughrabi, R. O. Ritchie, N. Tsuji, X. Zhang, X. Wu, 2021, Heterostructured materials: superior properties from hetero-zone interaction, *Mater. Res. Lett.* Vol. 9, pp.1-31.  
<https://doi.org/10.1080/2163831.2020.1796836>.
- [11] B. Sharma, G. Dirras, K. Ameyama, 2020, Harmonic structure design: a strategy for outstanding mechanical properties in structural materials, *Metals* Vol. 10, p. 1615.  
<https://doi.org/10.3390/met10121615>.
- [12] J. G. Kim, M. J. Jang, H. K. Park, K. G. Chin, S. H. Lee, H. S. Kim, 2019, Back-stress effect on the mechanical strength of TWIP-IF steels layered sheet, *Met. Mater. Int.* Vol. 25, pp. 912-917.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00258-7>.
- [13] O Bouaziz, H. S. Kim, J. W. Lee, Y. Estrin, 2022, Bauschinger effect or kinematic hardening: bridging microstructure and continuum mechanics, *Met. Mater. Int.* <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01227-3>.