

Eco-AI의 3축 특성분석과 특성분석을 위한 새로운 형상의 인장 시편에 관한 연구

On the Study of the Novel Type Tensile Specimen for Characterising Triaxiality of Eco-AI

함석우¹, 조재웅¹, 전성식^{1,#}
Seok Woo Ham¹, Jae Ung Cho¹, and Seong Sik Cheon^{1,#}

¹ 공주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kongju National University)
Corresponding Author / E-mail: sscheon@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9262
ORCID: 0000-0002-9907-424X

KEYWORDS: Eco-AI (친환경 알루미늄), Triaxiality (3축 특성), Novel DNC specimen (새로운 DNC 시편)

FE analyses have been performed to characterize triaxiality of Eco-AI7021-T6, one of representative environmentally-friendly materials with lightweight effect, in this study. Also, a novel shape specimen with double notched and a central hole, i.e., DNC specimen, was suggested to obtain two different values of triaxiality from one trial simultaneously. Tensile tests for the standard type specimen were conducted and true stress-true strain relationship, as well as force-displacement curve were obtained. It was revealed that two different values of triaxiality were successfully achieved from the novel DNC specimen, and the number of tests for triaxiality can be reduced with the use of the DNC specimen.

Manuscript received: July 28, 2018 / Revised: August 28, 2018 / Accepted: September 11, 2018

NOMENCLATURE

η : Triaxiality
 σ_m : Mean stress
 $\bar{\sigma}$: von Mises stress
 σ_1 : Principal stress w.r.t. x-direction
 σ_2 : Principal stress w.r.t. y-direction
 σ_3 : Principal stress w.r.t. z-direction
 θ : Angle in DNC specimen
 R_c : Radius of central hole
 R_N : Radius of notch

1. 서론

연성재료인 Eco-AI은 한국생산기술연구원에서 개발한 신소재로서 기존 Al합금 원소인 Mg을 Mg+Al₂Ca (Eco-Mg)로 대체한

Al 합금으로, 기존 Al 합금 제조시 일반적으로 사용되었던 온실가스(육불화황, SF₆)나 인체 유해가스(이산화황, SO₂)로 이루어진 보호가스가 필요없고, 기계적 특성과 성형성이 향상된 경량화 소재로 적용이 가능하다. 차량, 철도 등을 포함하는 기계구조에 Eco-AI을 적용하게 되면 제조시 환경오염을 줄일 수가 있다.¹

교통사고, 기계구조 파손과 같은 문제에서 파단예측은 중요하다. 연성 파단을 판정하는 기준으로는 전통적으로 von Mises Criterion등 사용되어왔으나, 최근에, 연성재료의 파단 거동은 재료의 내부에서 발달하는 3축 특성의 영향을 지배적으로 받는 것으로 알려짐에 따라 3축 특성을 이용한 파단 조건에 대한 관심이 집중되고 있다.^{2,3}

Bao와 Wierzbicki는 알루미늄으로 제작된 압축, 전단, 전단/인장, 인장 시편을 제작하여 3축 특성과 파단 변형률의 함수 관계를 최초로 제시하였다.⁴ Bai와 Wierzbicki는 수정된 Mohr-Coulomb (MMC, Modified Mohr-Coulomb) 항복조건을 제안하고, 이에 상응하는 3축 특성과 파단 변형률을 함수로 나타내었다.⁵ 이 파단



Fig. 1 Tensile test specimen (ASTM B557)

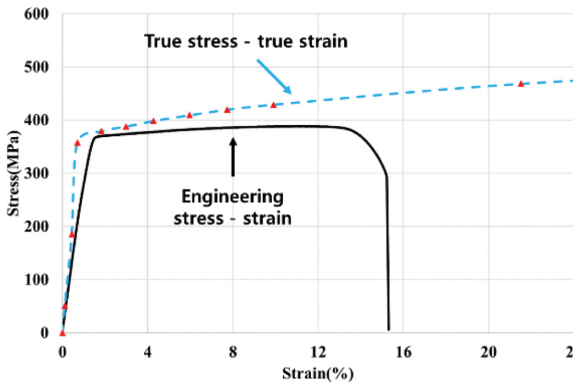


Fig. 2 Stress vs stress curves

Table 1 Mechanical properties of Eco-Al

| Material | Eco-Al7021-T6 |
|------------------------------|---------------|
| Density [kg/m ³] | 2,700 |
| Poisson's ratio | 0.3 |
| Young's modulus [GPa] | 70 |
| Yield Strength [MPa] | 359 |

조건의 타당성은 여러 연구자들에 의해 현재까지 검증되어오고 있다.⁶⁻⁸

이와 같이 3축 특성을 고려한 파단 판정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 3축 특성을 규명하기 위해서는 6가지 이상의 상대적으로 많은 종류의 시편들이 각각의 다른 값의 3축 특성하에서 시험이 진행되어야 하며, 이는 3축 특성연구가 진행되는 데 걸림돌이 되어왔다. 따라서, 필요한 정보의 데이터를 확보하면서도 효과적으로 시험 횟수를 줄일 방안이 필요하다.

본 연구는 Eco-Al의 3축 특성을 고려한 파단 특성을 분석하고 기존의 시편의 시험 수를 줄이고 보다 다양한 3축 특성 값을 얻을 수 있는 새로운 시편을 제안하고 유한요소해석을 통하여, 본 시험편의 특성을 분석하였다.

2. 인장시험

Eco-Al7021-T6의 3축 파단 특성을 분석하기 위하여 선행적으로 만능 재료시험 장비(MTS810)를 사용하여 준정적 인장시험을 진행하였다. 준정적 인장 시험은 5 mm/min의 속도로 진행되었고,

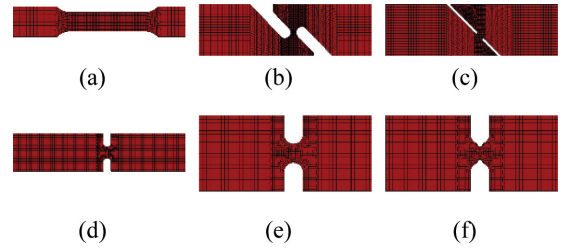


Fig. 3 Types of specimens: (a) Case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4, (e) case 5 and (f) case 6

시험 형상은 ASTM B557을 근거로 제작되었다. Fig. 1은 Eco-Al 시편의 형상을 나타낸다.

인장시험 결과는 공칭응력-공칭변형률과 진응력-진변형률 두 가지로 표기하였고, Fig. 2에 나타나있다. Eco-Al7021-T6의 항복강도는 359 MPa, 최대 인장강도는 389 MPa로 나타났다. Eco-Al7021-T6의 기계적 특성은 Table 1에 나타나 있다.

3. 유한요소 해석

3.1 3축 특성

3축 특성은 무차원 값이며 식(1)과 같이 정의되고 음수일 때 압축, 양수일 때는 인장으로 나타나게 된다. σ_m 는 식(2)와 같이 평균 응력 나타내고 $\bar{\sigma}$ 는 식(3)과 같이 Von Mises응력을 나타낸다.⁴

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \tag{1}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{2}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \tag{3}$$

3.2 기존의 시편

기존의 해석 모델은 Fig. 3과 같이 총 6종류의 시편이며, Case 1은 알루미늄 인장시험 표준인 ASTM-B557을 참고하였다. Case 2와 Case 3은 각각 0° 및 45°의 전단 시편이다. Case 4, Case 5 그리고 Case 6은 각기 다른 형상의 U-노치가 있다.⁹⁻¹¹ U-노치의 형상에 따라 다른 값의 3축 특성이 구해질 수 있다. 본 연구에서는 해석결과를 통해 시편 형상에 따른 3축 특성을 도출하였다.

3.3 새롭게 제안된 시편

새롭게 제안한 시편은 Double Notch & Central Hole (이하 DNC)시편이라 칭하고 있고, 형상은 Fig. 4와 같다.

DNC 시편은 두 부분에서 파단이 동시에 일어나게 되며, 한 번의 인장시험으로 두 가지 3축 특성 값을 얻을 수 있는 장점이 있도록 설계되었다.¹² 본 DNC 시편의 변수는 노치의 각도, 센터홀

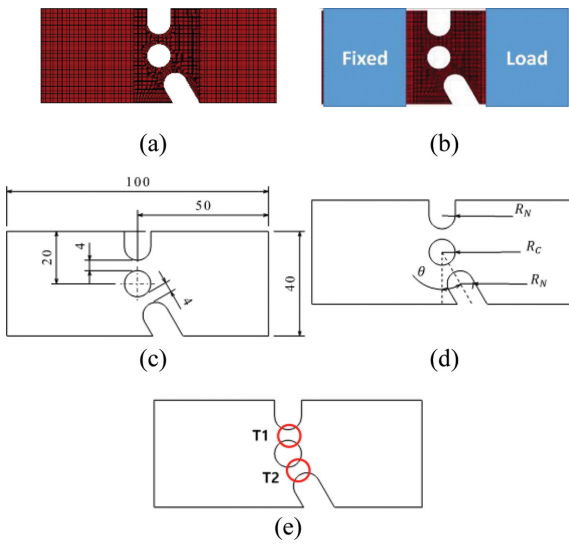


Fig. 4 DNC specimen: (a) Configuration, (b) load condition, (c) dimensions, (d) parameters and (e) locations for obtaining triaxiality 1 and 2

Table 2 Variables of DNC specimens

| Variable | Level | | | |
|--------------|-------|----|----|----|
| θ [°] | 0 | 30 | 45 | 60 |
| R_C [mm] | 6 | 8 | 10 | 12 |
| R_N [mm] | 6 | 8 | 10 | 12 |

Table 3 Triaxiality of existing specimens

| Case | Triaxiality |
|------|-------------|
| 1 | 0.370 |
| 2 | 0.088 |
| 3 | 0.441 |
| 4 | 0.582 |
| 5 | 0.545 |
| 6 | 0.570 |

의 반지름 및 노치의 반지름이다. 각 변수들이 가질 수 있는 값들은 Table 2에 정리되어 있다. 이와 같은 변수들을 조합하여 해석을 진행하면, 경우의 수가 매우 많아지게 되어 본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 3 요인 4 수준으로 정의된 직교표를 이용하여, 총 64번의 해석이 수행되었다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 기존의 시편 해석결과

각 Case별 파단점에서의 3축 특성은 Table 3과 같고, Fig. 5에 시편 각각에 따른 3축 특성의 등고선선도가 나타나 있다. 또한, Fig. 6에는 각 Case 시편의 파단 시 소성 변형률과 3축특성 선도가 나타나 있다. Fig. 7에는 Case 1에 대해 인장시험에서 발생된

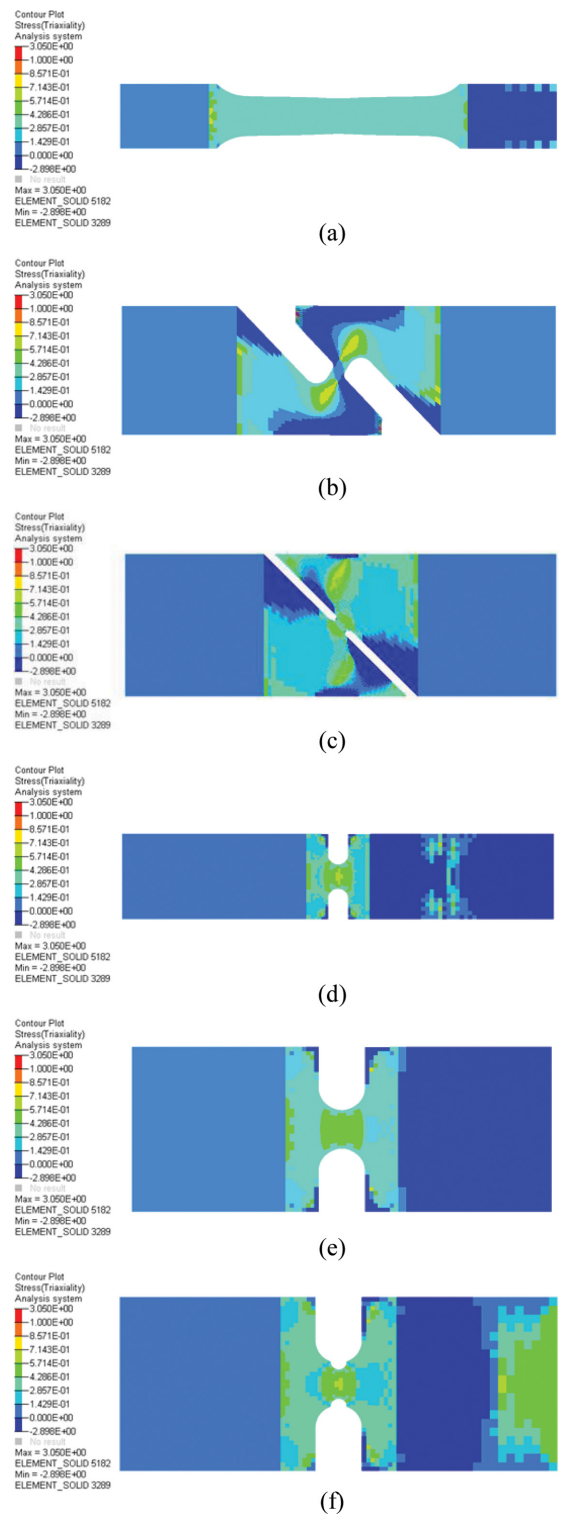


Fig. 5 Triaxiality contour plots: (a) Case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4, (e) case 5 and (f) case 6

파단 시편과, 해석에 의해 나타난 파단결과가 비교되었다.

또한, Fig. 8에는 Case 1 시편에 대한 시험과 해석결과가 비교되어져있다. 실험에서는 인장강도가 389 MPa, 최대변형률이 15.3%로 나타났고, 해석에서는 인장강도가 392 MPa, 최대변형률이 15.4%로, 오차는 각각 약 0.8%와 0.5%로 거의 무시할 만한 수준

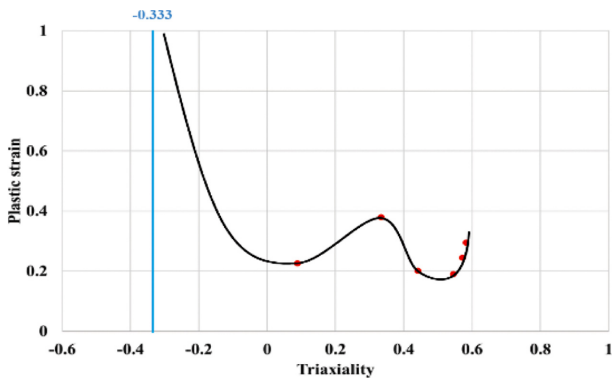


Fig. 6 Plastic strain vs triaxiality curve at failure

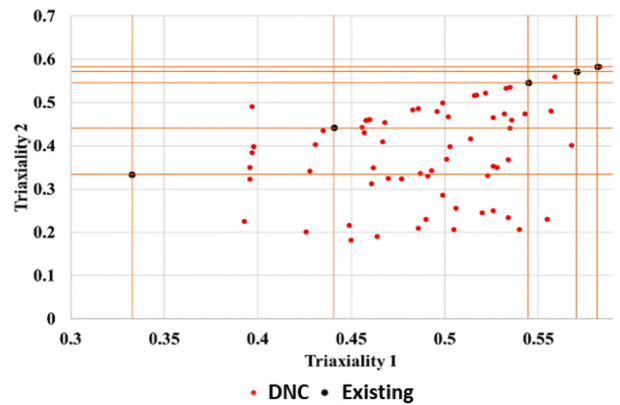


Fig. 9 Distribution of triaxiality 1, 2 and existing

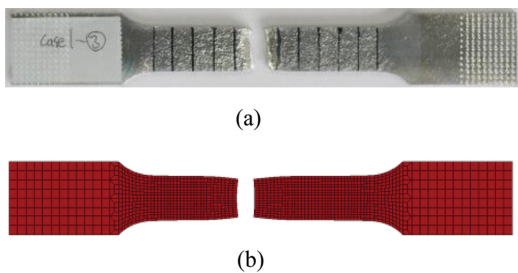


Fig. 7 Comparison of tension test and FE analysis: (a) Specimen, (b) analysis result

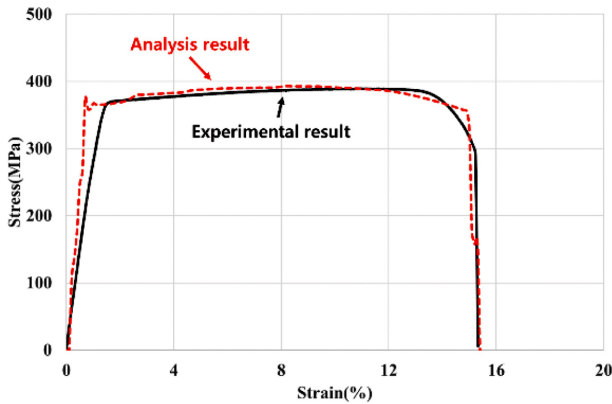


Fig. 8 Stress vs strain curve of case 1

인 것으로 사료되고 있다. 초기 탄성구간의 기울기는 약간의 차이가 있으나, 이 또한 무시할 만한 값인 것으로 나타났다.

4.2 DNC 시편 해석결과

DNC 시편 해석 결과, 3축 특성값 분포는 Fig. 9와 같다. 두 영역에서 파단이 일어나 한 번의 인장시험으로 두 개의 3축 특성값을 얻을 수 있어서 효율적으로 시편의 개수를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 참고로 Fig. 10에는 DNC 시편의 종류에 따른 3축 특성 등고선 선도가 나타나 있다.

4.3 DNC 시편에 대한 고찰

기존의 시편 영역은 0.5 부분에 치중되어 있지만, DNC 시편은

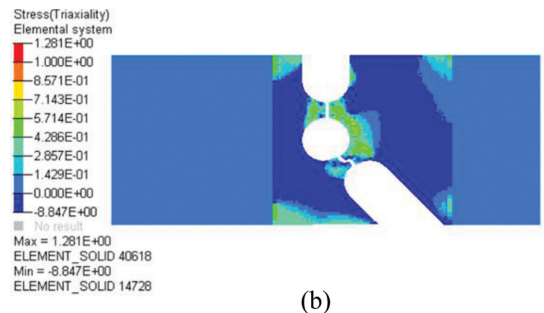
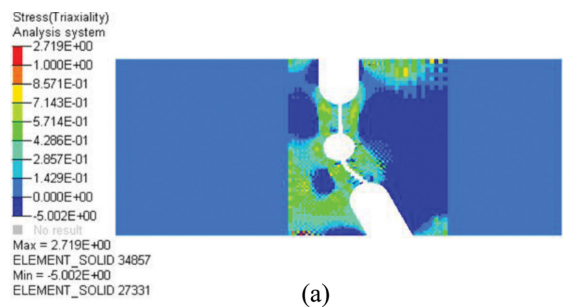


Fig. 10 Triaxiality contours: (a) 30°, 6 mm, 8 mm, (b) 45°, 10 mm, 10 mm.

변수에 따라 0.182부터 최대 0.583까지 더 넓은 폭의 3축 특성값을 얻을 수 있다. 하지만 64개의 Case를 전부 인장시험할 수 없기 때문에 인장시험 할 Case를 선택해야한다. 그 중 같은 3축 특성값이 나오는 Case는 총 16개 이고 설계목적에서 벗어나므로 제외되었다.

48개의 3축 특성값 중 기존의 시편과 3축이 비슷한 Case는 Case 2를 제외한 나머지 시편이다.

각도 θ , 센터홀의 반지름 R_c , 노치의 반지름 R_N 가 각각 30°, 6 mm, 8 mm일 때, 기존의 시편인 Case 3번과 Case 5의 3축 특성값과 비슷한 0.543과 0.473으로 나타났으며, 45°, 10 mm, 10 mm 일 때, Case 1번과 Case 3번의 3축 특성값과 비슷한 0.341과 0.428로 나타났다. 이는 기존의 시편으로 동일한 3축 특성값을 사용한다고 하였을 때, 현재로서는, 시편의 종류를 기존의 6개에서 5개로 줄일 수 있을 것으로 여겨지고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Eco-AL의 3축 특성을 고려한 파단 특성을 분석하기 위해 인장시험을 진행하여 진응력-진변형률 선도를 도출하고, 이를 이용하여 기존에 제시된 6가지 인장시험 해석을 진행하였다. 해석결과를 통해 6가지 인장시험의 파단시 소성변형률과 3축 특성 선도를 도출하여 3축 특성을 고려한 해석을 진행하였다. 또, 한 번의 시험으로 두 가지 3축 특성값을 얻을 수 있는 DNC 시편을 새롭게 제안하고 해석을 진행하였다. 3요인 4수준으로 직교배열표를 작성하여 64종류의 시편을 설계하였다. 64종류의 시편 중 16종류의 시편이 설계목적에서 벗어나므로 그것을 제외한 48종류의 시편에 대해 결과값을 분석하였다. 실험적 결과로는 392 MPa, 최대변형률이 15.3%로 나타났고, 해석적 결과로는 인장강도가 392 MPa, 최대변형률이 15.4%로 나타났다. 두 결과의 오차는 각각 약 0.8%와 0.5%로 무시할 만한 오차를 보이는 것이 확인되었다. 또한, 기존의 시편으로 3축 특성값을 얻기 위해서는 6개 종류의 시험을 해야 하지만, DNC 시편을 사용하였을 경우 5개 종류의 시편으로 줄일 수 있는 것이라 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1D1A1A01058132).

REFERENCES

1. Kim, J. D., Won, S. T., and Kang, H. K., "A Study on the Clearance Decision of Fine Blanking Tool for Eco-AL Special Parts with Various Inner Corner Shapes," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 317-318, 2013.
2. Jang, B. S. and Lee, Y. S., "Finite Element Analysis of Plastic Work Process Considering Stress Triaxiality and Lode Angle," Proc. of KSME Spring Conference, p. 169, 2017.
3. Choung, J. and Nam, W., "Formulation of Failure Strain According to Average Stress Triaxiality of Low Temperature High Strength Steel (EH36)," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 2, pp. 19-26, 2013.
4. Bao, Y. and Wierzbicki, T., "On Fracture Locus in the Equivalent Strain and Stress Triaxiality Space," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, No. 1, pp. 81-98, 2004.
5. Bai, Y. and Wierzbicki, T., "A New Model of Metal Plasticity and Fracture with Pressure and Lode Dependence," International Journal of Plasticity, Vol. 24, No. 6, pp. 1071-1096, 2008.
6. Luo, M. and Wierzbicki, T., "Numerical Failure Analysis of a Stretch-Bending Test on Dual-Phase Steel Sheets Using a Phenomenological Fracture Model," International Journal of

Solids and Structures, Vol. 47, Nos. 22-23, pp. 3084-3102, 2010.

7. Dunand, M. and Mohr, D., "On the Predictive Capabilities of the Shear Modified Gurson and the Modified Mohr-Coulomb Fracture Models Over a Wide Range of Stress Triaxialities and Lode Angles," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 59, No. 7, pp. 1374-1394, 2011.
8. Beese, A. M. and Mohr, D., "Effect of Stress Triaxiality and Lode Angle on the Kinetics of Strain-Induced Austenite-to-Martensite Transformation," Acta Materialia, Vol. 59, No. 7, pp. 2589-2600, 2011.
9. Li, W., Liao, F., Zhou, T., and Askes, H., "Ductile Fracture of Q460 Steel: EFFECTS of Stress Triaxiality and Lode Angle," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 123, pp. 1-17, 2016.
10. Bai, Y., Teng, X., and Wierzbicki, T., "On the Application of Stress Triaxiality Formula for Plane Strain Fracture Testing," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 131, No. 2, pp. 1-10, 2009.
11. Bai, Y., "Effect of Loading History on Necking and Fracture," Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge University, 2007.
12. Abushawashi, Y., Xiao, X., and Astakhov, V., "A Novel Approach for Determining Material Constitutive Parameters for a Wide Range of Triaxiality Under Plane Strain Loading Conditions," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 74, pp. 133-142, 2013.



Seok Woo Ham

Master candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kongju National University. His research interest is Mechanical design.
E-mail: wooya@smail.kongju.ac.kr



Jae Ung Cho

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kongju National University. His research interest is Design and analysis of automotive.
E-mail: jucho@kongju.ac.kr



Seong Sik Cheon

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kongju National University. His research interest is Mechanical design.
E-mail: sscheon@kongju.ac.kr