

## 유한요소법을 이용한 4단 개방냉간압출시 발생하는 세브론 크랙에 관한 연구

황현석<sup>1</sup> · 이요셉<sup>2</sup> · 전만수<sup>#</sup>

### Study on Chevron Crack Occurring in a 4-stage Open Cold Extrusion Process by Finite Element Method

H. S. Hwang, Y. S. Lee, M. S. Joun

(Received March 20, 2017 / Revised July 6, 2017 / Accepted July 20, 2017)

#### Abstract

In this paper, utilizing the theory of ductile fracture a chevron crack in a 4-stage open cold extrusion process is predicted by the finite element methods and then compared with previous experiments. The normalized Cockcroft-Latham damage model is employed and the material is identified using a tensile test based material identification technique that gives fracture information as well as flow stress at large strain. A large difference between the predicted cracks and actual experiments is observed, specifically narrower width and greater maximum height of the crack. This reveals the limitation of this approach based on the conventional theory of ductile fracture. Based on the observations and the related criticisms, a new approach for predicting the chevron crack is proposed, suggesting that either the critical damage should not be a fixed material constant, or that the conventional fracture theory should be considered with the effects of embrittlement due to accumulated plastic deformation while the duration of crack generation and plastic deformation should be reduced.

**Key Words** : Extrusion, Chevron Crack, Normalized Cockcroft-Latham Damage Model, Finite Element Analysis

## 1. 서 론

압출 및 인발 공정 중 발생하는 세브론 크랙은 제품의 표면이 아닌 중심부에서 발생하는 결함으로 공정 중이나 완성 후에도 육안으로 식별되지 않는다. 이러한 잠재적 결함을 가진 제품이 완성품으로 되었을 때는 예측할 수 없는 시점에서 파손이 되어 심각한 인명 및 경제적 피해 사고로 야기될 가능성이 매우 높다.

연성파괴의 이론[1]에 따르면, 소성가공 중 재료의 파괴는 주로 재료의 화학적 성분, 불순물의 밀도, 제조공정과 열처리 등에 의존되며, 누적된 손상도가

임계손상도에 이르면 발생한다.

Fig. 1은 압출 공정 중 발생한 세브론 크랙의 사례로써 Fig. 1(a)는 Ko 등[2]이 연구한 알루미늄 냉간 압출 중 발생한 결과이며, Fig. 1(b)는 Saanouni 등 [3]이 연구한 탄소강의 냉간 압출 중 발생한 사례이다. Fig. 1(c)는 Soyarslarn 등[4]이 연구한 베어링강의 냉간 압출 중 발생한 사례이다.

세브론 크랙 형상을 예측하기 위해 유한요소법을 이용한 선행 연구들을 살펴보면 예측형태와 실제 세브론 크랙 형상과 해석으로 예측된 세브론 크랙의 반경 비율 측면에서 차이가 난다. Fig. 2(a)는 Saanouni 등[3]이 손상도와 연계된 열탄소성유한

1. 한일단조공업㈜

2. 경상대학교 기계항공공학부

#. School of Mechanical Engineering / Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

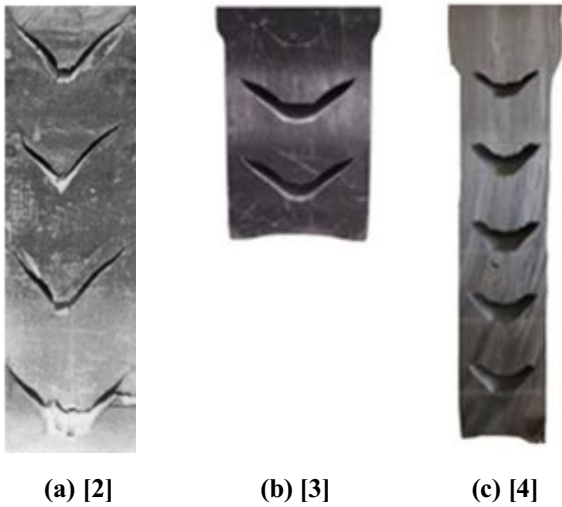


Fig. 1 Typical examples of chevron cracks occurring in extrusion process

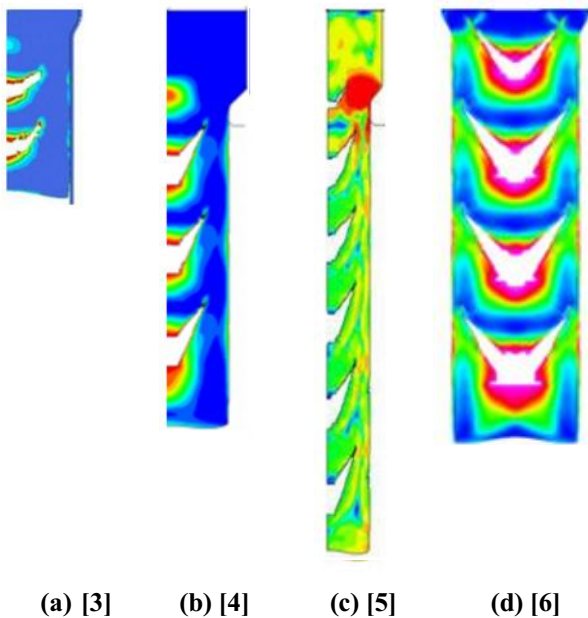


Fig. 2 Predictions of chevron cracks in the extrusion process found in the literature

요소법을 이용하여 획득한 결과이며, Fig. 2(b)는 Soyarslan 등[4]이 대변형률 초탄성 수식화(finite-strain hyperelastic-plastic formulation)에 근거하여 얻은 결과이다. Fig. 2(c)는 Labergere 등[5]이 연성손상도와 열적 효과를 고려한 열점탄소성유한요소법을 이용하여 얻은 예측결과이며, Fig. 2(d)는 Joun 등[6]이 제안한 개선된 요소경계기법을 이용하여 얻은 예측 결과이다. 유한요소법을 적용하여 예측한 연구자들



Fig. 3 Experimental chevron defects found in open-die extrusion process

[3~5]의 획득한 결과에서 응력, 손상도, 변형률 등의 값의 분포가 유사하였지만, 세브론 크랙의 형상은 Joun 등[6]이 획득한 결과가 실제 실험 형상과 가장 유사하게 나타났다.

이렇게 많은 연구자들이 세브론 크랙의 발생을 예측하기 위해서 다양한 실험 및 연구가 이루어졌으나, 유한요소해석으로 압출 공정 중 발생한 중심 파괴의 형상을 고정도로 표현하기에는 불충분했으며 실제 결함과 이론적 예측에는 여전히 차이가 있는 것이 사실이다.

이 논문에서는 4단 개방냉간압출 공정 중 발생한 세브론 크랙에 관한 수치적 분석 결과를 바탕으로 가장 널리 사용되고 있는 정규화된 Cockcroft-Latham 손상도 모델을 검토하였으며, 발전 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 문제의 정의

Fig. 3은 4단 개방냉간압출 공정 중 발생한 세브론 크랙을 나타내고 있다. 이 그림에서 3단을 제외한 단면은 중심축을 지나며, 3단의 단면은 중심에서 약

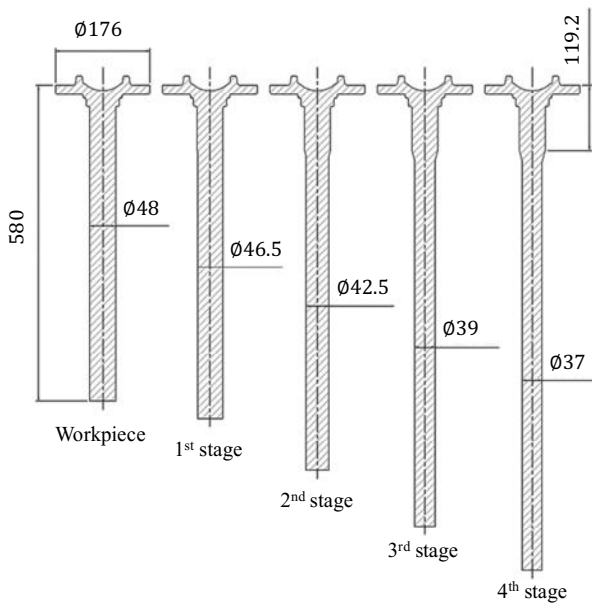


Fig. 4 Process design of the open-die extrusion process



Fig. 5 Tensile test specimen

간 벗어나 절단된 단면이다. 이 제품의 냉간압출 공정은 Fig. 4에 나타내었다.

먼저 소재의 변형거동 특성의 규명 연구를 위해 실제 인장시험을 실행하였고 그 시편을 Fig. 5에 나타내었다. 총 3개의 인장시편을 시험하였으며, 그 결과 중 평균치에 가장 가까운 하나를 선택하여 소재 물성치 획득 전용 소프트웨어인 AFDEX/MAT[7]를 이용하여 유동응력 획득을 실시하였다. AFDEX/MAT는 인장시험을 이용한 비교적 고 변형률에 관한 소재의 유동응력을 획득할 수 있는 특징을 가지고 있다.

Fig. 6은 분석 후 획득한 유동응력이며, 보는 바와 같이, 최대 유효변형률 0.76까지의 유동응력을 획득 후 그 이상의 유효변형률에 관한 유동응력은 외삽을 실시하였다. 이 때, 강도계수는 변형률의 함수이

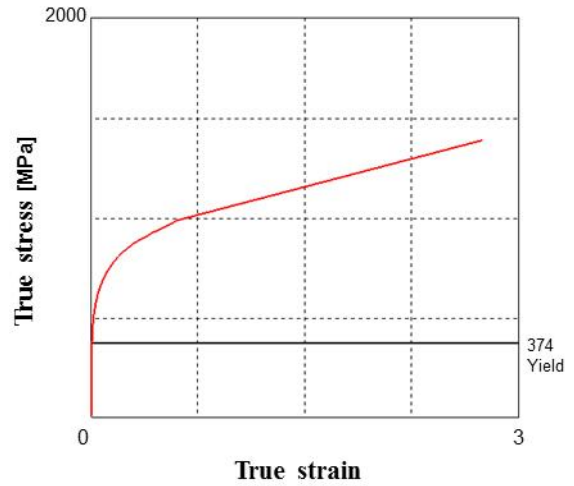
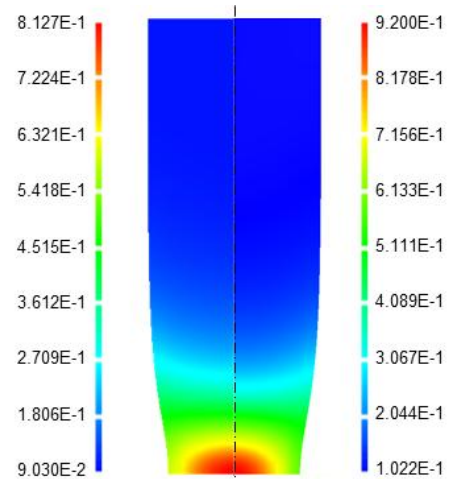


Fig. 6 Finite element identification of flow stress curve



(a) Effective strain

(b) Damage

Fig. 7 Finite element predictions of tensile test

며, 변형경화지수는 네킹을 정확하게 반영하기 위하여 네킹이 발생하는 시점에서의 진변형률과 일치시킨 것이다. 이로 인하여 실험결과와 해석결과가 네킹 이전에서는 상대적으로 큰 차이를 보일 수 있으나 소성가공에서 변형률은 대부분 변형경화지수보다 크므로 이 방법으로 획득한 유동응력 정보는 유용하다[9].

Fig. 6의 유동응력 곡선을 이용하여 인장시험을 해석한 결과, 전반적으로 실제의 인장시편의 변형 형상과 유사함을 Fig. 7에 나타내었다. 그리고 파단 시의 정규화된 Cockcroft-Latham 손상도[8]가 0.92에 이르고 있다.

Fig. 6의 유동응력을 이용하여 개선된 설계와 문제의

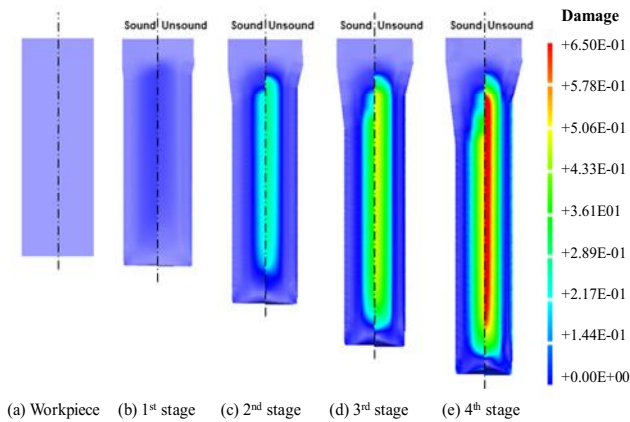


Fig. 8 Comparison of sound process with unsound process

공정에 대한 손상도 해석을 실시한 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 중심에서 손상도 값이 현저한 차이가 나타나고 있다. 실제 개선된 설계에서는 중심과 단이 발생하지 않았다. 개선된 설계는 금형 각도를 15°에서 7°로 변경하여 적용한 것이다. 그리고 4단 종료 시까지 정규화된 Cockcroft-Latham 모델의 손상도 값은 0.92에 못 미치고 있다. 파단 해석의 관점에서 볼 때, 인장시험과 연구대상의 공정 간의 상호관련성이 작음을 알 수 있다. 물론 손상도 해석은 동일 공정에서 설계 변수의 영향 등을 상대적으로 평가하는 측면에서는 유용할 수 있다.

### 3. 해석결과 비교

2장에서 정의한 문제의 공정에 대한 정규화된 Cockcroft-Latham 모델을 적용한 손상도 해석을 실시한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 임계손상도는 Fig. 3의 세브론 크랙의 형상 구현을 목적으로 0.535로 간주하여 해석을 실시하였다. 임계손상도 수치는 수치해석의 반복을 통하여 결정되었으며, 실험과 가장 유사한 결과를 예측한 것이다.

#### 3.1 기존의 연성파괴에 근거한 세브론 크랙 예측

중심부 파단 발생의 과정을 예측하여 나타낸 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 손상도가 급격하게 떨어지는 벽이 중심과 외피의 중심에 존재한다. 즉, Fig. 9(c)에서 압출재의 외경의 절반 지점에서 급격한 손상도의 변화가 발생한다. 압출에 따른 압축응력이 이 영

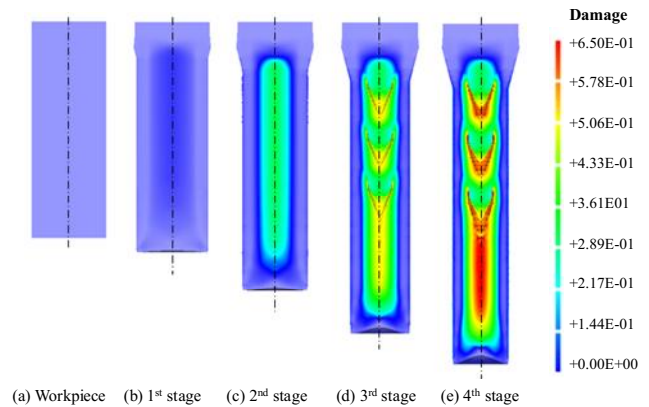


Fig. 9 Crack predicted with constant critical damage value

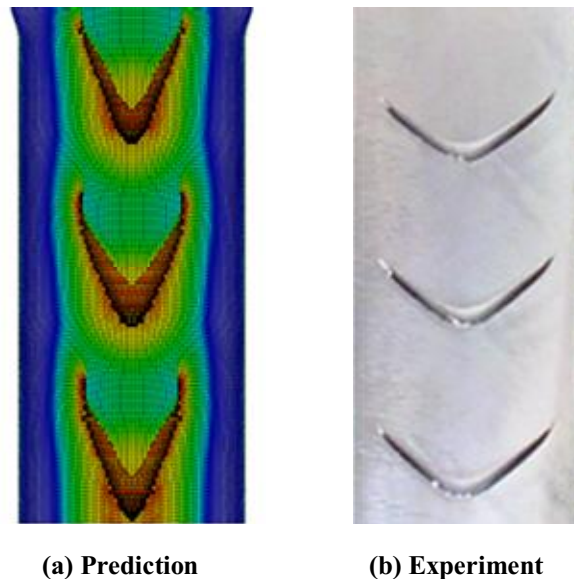


Fig.10 Comparison of experiment with prediction obtained by constant critical damage value

역에 작용하기 때문이다. 실제 이 영역에서 변형 중의 최대 주응력은 약 -2,485MPa에 이른다. 해석에서 사용된 정규화된 Cockcroft-Latham 손상도 모델에서 최대 주응력이 음수가 되면, 추가적인 손상도가 발생하지 않는다. 따라서 기존의 정규화된 Cockcroft-Latham 손상도 모델에 근거한 파단 면의 해석에서 실험과 다소 불일치하는 결과를 얻을 수 밖에 없다.

Fig. 10은 Fig. 9의 예측결과와 실험결과를 비교하여 나타내었다. 세브론 크랙이 발생하는 주기 등의 측면으로 보았을 때 유사성이 없지는 않지만, 실험에서 획득한 형상이 짧은 V자인 반면, 해석으로 획득한 현상은 긴 V자의 형상을 하고 있다.

### 3.2 수정된 연성파괴를 적용한 세브론 크랙 예측

정규화된 Cockcroft-Latham 손상도 모델은 압축상태에서의 소재의 변형은 파단에 영향을 미치지 않는 손상도 모델이다. 이 이론을 사용하는 대부분의 연구자들은 임계손상도는 재료의 물성치에 속하며, 일정하다고 간주해왔다. 그러나 임계손상도는 공정과 손상도 모델에 따라 다르다. 그 원인은 손상도 계산을 위하여 변형 증분에 곱해지는 가중치가 다르기 때문이다. 가중치는 대개 주응력의 함수와 유동응력의 함수로 간주된다. 최대 주응력에만 의존하는 Cockcroft-Latham 손상도 모델에서 이 문제는 더욱 민감하다. 예를들면, 인장시험을 이용하여 구한 Cockcroft-Latham 손상도 모델의 임계치를 나머지 두 개의 주응력의 영향도 무시할 수 없는 굽힘공정의 파단 예측 목적으로 사용하는데는 많은 문제가 따르며, 경험에 근거한 다소의 수정이 불가피하다.

실제 압축변형은 인장 시에 연성을 저하시켜, 변형률의 축적은 취성을 증가시키는 것으로 판단된다. 앞선 연구자들이 실시한 해석결과에서도 Fig. 2와 같이 세브론 크랙의 높이와 폭이 실험결과와 상당한 차이를 보인다. 이것은 최대 주응력이 변형에 지배적인 영향을 미치는 중심 부분의 초기 크랙은 연성파괴 이론에 근거하는 것으로 볼 수 있지만, 반경의 절반 부근에서 발생하는 파단은 앞으로 밝혀져야 할 연구 대상이다. 거시적 관점에서 보았을 때, Cockcroft-Latham 손상도 모델로 이 논문의 연구 대상 공정과 같은 개방 압출공정의 파단 현상을 표현할 수 없다는 사실이다. 즉, 파단현상이 압축변형과 무관하지 않다. 압축변형에 의하여 재료는 취성화되는 경향이 있으므로 반경의 절반 부근에서 발생하는 파단을 취성에 의한 재료의 파단 또는 임계손상도가 낮아지면서 발생하는 조기 연성파괴로 간주할 수 있다.

Fig. 11은 임계손상도 값을 변형의 함수로 간주하여 변화시키는 대신, 해석결과가 실험결과와 유사한 형태를 예측하도록 손상도의 초기 값을 부여하여 유도한 결과이다. 초기 손상도는 Fig. 11의 (a)에 보는 바와 같이 압축변형을 발생하지만 손상도의 누적이 작은 부분에 부여하였으며, 최대 초기 손상도는 0.29로 설정하였다. 초기 손상도를 부여하여 해석해본 결과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 파단의 전체적인 모양은 매우 유사한 결과를 나타냈으나, 예측된 파단의 높이가 실제 파단의 높이보다 다소 높게 나타났다.

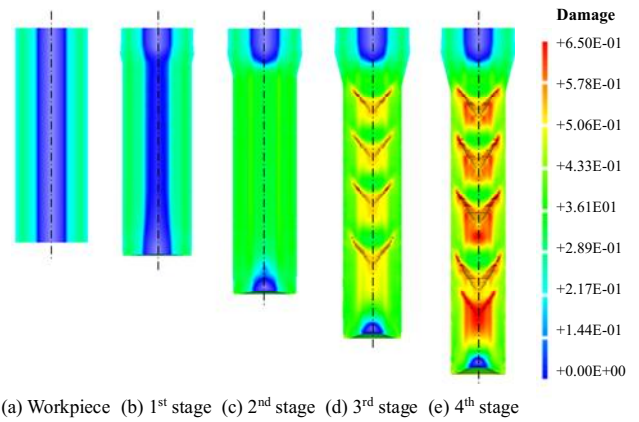


Fig.11 Crack prediction obtained by a modified critical damage value

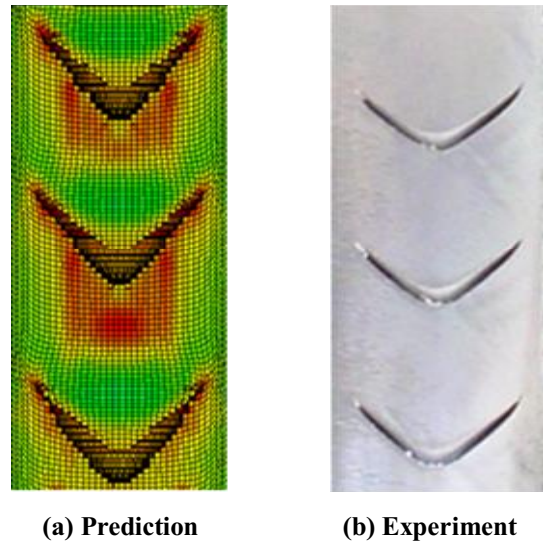


Fig.12 Comparison of experiment with prediction obtained by the modified critical damage value

결론적으로 연성파괴 이론에 의존하여 소성가공 중에 발생하는 파단을 예측하기 위해서는 임계손상도와 상태변수 간의 함수관계를 밝혀야 하며, 특히 세브론 크랙을 예측하기 위해서는 해석상에서 파단의 발생기간이 짧거나 파단 이후에 파단에 영향을 미치는 소성변형이 작아야 한다.

## 4. 결론

이 연구에서는 기존의 Cockcroft-Latham 손상도 이론을 적용하여 4단 개방냉간압출 공정 중에 발생하는 세브론 크랙을 유한요소해석을 이용하여 재현하고

자 하였다. 그러나 실제 발생한 세브론 크랙의 형태와 해석결과로 예측된 크랙의 형태는 차이가 있는 것으로 확인되었다. 이것은 최대 주응력에 의존하는 Cockcroft-Latham 손상도 모델의 한계성을 강조하고 있다.

소재의 표면 주변 영역에 초기 손상도 값을 부여하여 해석한 결과, 실제와 유사한 형상을 예측할 수 있었다. 이것은 압축변형이 실질적으로 손상도의 축적 또는 임계손상도의 하락에 직접적인 영향을 미침을 의미한다. 즉, Cockcroft-Latham 손상도 모델이 세브론 크랙의 초기 생성 시점을 예측하는데는 효과가 있지만, 세브론 크랙 그 자체를 예측하는데는 한계가 있음을 암시한다.

결론적으로 고정도의 소재파단 해석결과를 얻기 위하여 연성과파괴 이론 및 임계손상도와 상태변수 간의 함수관계를 고려하는 발전적인 적용 기술 또는 새로운 손상도 모델 등이 개발되어야 할 것이다. 특히 Cockcroft-Latham 손상도 모델과 같이 최대 주응력에 근거한 손상도 모델의 적용 시, 압축변형이 파단에 미치는 영향을 고려해야 한다. 그리고 압축변형에 따른 임계손상도의 하락 또는 압축변형에 따른 손상도의 축적이 고려되어야 할 것이며, 이에 따른 유동응력의 변화도 고려되어야 할 것으로 사료된다.

## REFERENCES

- [1] L. M. Kachanov, 1986, Introduction to Continuum Damage Mechanics, Mechanics of Elastic Stability, Kluwer Academic Publishers, USA.
- [2] D. C. Ko, B. M. Kim, 2000, The Prediction of Central Burst Defects in Extrusion and Wire Drawing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 90, No. 102, pp. 19~24.
- [3] K. Saanouni, J. F. Mariage, A. Cherouat, P. Lestriez, 2004, Numerical Prediction of Discontinuous Central Bursting in Axisymmetric Forward Extrusion by Continuum Damage Mechanics, Comput. Struct., Vol. 82, No. 27, pp. 2309~2332.
- [4] C. Soyarslan, A. E. Tekkaya, U. Akyuz, 2008, Application of Continuum Damage Mechanics in Discontinuous Crack Formation: Forward Extrusion Chevron Predictions, Z. Angew. Math. Mech., Vol. 88, No. 6, pp. 436~453.
- [5] C. Labergere, P. Lestriez, K. Saanouni, A. Rassineux, 2009, Numerical Simulation of Bursting in Extrusion Process Using Finite Viscoplasticity with Ductile Damage and Thermal Effects, Int. J. Mater. Form., Vol. 2, No. 1, pp. 88~92.
- [6] M. S. Joun, M. C. Kim, D. J. Yoon, H. J. Choi, Y. H. Son, 2011, Finite Element Analysis of Central Bursting Defects Occurring in Cold Forward Extrusion, MSEC2011, MSEC2011-50148, pp. 1~6.
- [7] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, J. H. Park, D. J. Yoon, 2008, Tensile Test Based Material Identification Program AFDEX/MAT and Its Application to Two New Pre-heat Treated Steels and a Conventional Cr-Mo Steel, Int. J. Mod. Phys. B, Vol. 22, No. 31n32, pp. 5768~5773.
- [8] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and the Workability of Metals, J. Inst. Met., Vol. 96, No. 1, pp. 33~39.
- [9] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, A New Method for Acquiring True Stress-strain Curves Over a Large Range of Strains using a Tensile Test and Finite Element Method, Mech. Mater., Vol. 40, No. 7, pp. 586~593.
- [10] AFDEX, 2005, <http://www.afdex.com>