

다단인발공정에서 후미인장응력이 중심파괴에 미치는 영향

이성원¹ · 김민철¹ · 심규하¹ · 전만수[#]

Effect of Back Tension in Multi-pass Drawing on the Central Bursting Defect

S. W. Lee, M. C. Kim, G. H. Shim, M. S. Joun

(Received May 2, 2012 / Revised July 11, 2012 / Accepted July 19, 2012)

Abstract

In this paper, the effect of back tension in multi-pass drawing or wire drawing on the central bursting defect is investigated using finite element predictions. A rigid-plastic finite element method was used together with the McClintock damage model. Central bursting defects under different back tension stress values ranging from 0% to 20% of the yield strength of the material were predicted and they were compared to understand the effect of the back tension stress values on the central bursting defect. It is found that the level of back tension has a strong influence on the cumulative damage. Thus, higher back tension raises the possibility of the central bursting defect occurring, even though it decreases the interfacial pressure between the die and the work piece.

Key Words : Finite Element Analysis, Central Bursting Defect, Multi-pass Drawing

1. 서 론

축류의 압출품이 동력전달 등의 주요 부품으로 사용되고 있지만, 중심파괴가 발생한 제품을 사용한 자동차는 예기치 못한 큰 사고로 연결될 수 있다. 따라서 압출 시에 발생할 수 있는 중심파괴 문제는 산업현장에서 중시하는 설계 시의 고려 사항이면서 동시에 품질관리 대상이 되고 있다. 선제인발의 경우에도 중심파괴 현상이 발생하고 있으며, 이러한 현상은 공정 중은 물론이고 사용 시에도 많은 문제의 원인이 되고 있다.

압출 시에 중심파괴의 발생은 Jennison[1]에 의해 최초로 보고되었으며, 그는 금형의 설계변수가 중심파괴의 발생에 영향을 미치며, 적절한 금형의 설계로 제품의 중심파괴의 발생을 방지할 수 있다고 주장하였다. 압출 시에 하중을 고려하여 중

심파괴를 예측하는 방법은 Avitzur[2]에 의해 개발되어 있으며, 그는 비경화 소재(non-strain hardening material)로 압출 시에 금형에 걸린 하중이 정상적인 공정의 하중보다 작아지면 중심파괴가 발생한다고 하였으며, 마찰계수(frictional coefficient), 압출 각도(die angle), 단면감소율(reduction ratio) 등이 중심파괴의 발생에 영향을 미친다고 주장하였다.

이러한 초기의 연구를 뒤이은 많은 연구들이 실험적 방법, 해석적 방법, 수치적 방법 등으로 다양하게 이루어졌다[3~17].

연성파괴이론[17]에 의하면, 소성변형 중 재료의 파괴는 축적된 손상도값이 손상도허용한계치, 즉 임계손상도에 도달할 때 발생한다. 따라서 파괴 현상은 임계손상도와 축적된 손상도에 의하여 결정된다. 임계손상도는 재료의 성질이며 경험적으로 볼 때 재료의 성분 및 불순물의 개재 정도

1. 경상대학교 대학원 기계공학과
교신저자: 경상대학교 공학부/공학연구원,
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

와 열처리 등에 비교적 큰 영향을 받는다. 손상도 모델은 다양하게 연구되었으나, 재료나 공정에 따라 적용 범위가 다소 한정되어 있다. 임계손상도의 획득에 관한 연구결과는 그 중요성에 비하여 매우 빈약하며, 이에 관한 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

Joun 등[18]은 요소경계 분리기법, McClintock 손상도 모델[19], 선택적 요소제거법에 근거한 개선된 세브론 크랙(chevron crack) 예측기법을 제시하였으며, 이를 이용한 세브론 크랙 생성 과정을 성공적으로 시뮬레이션하였다. 예측된 세브론 크랙의 형상은 실험 결과를 정성적으로 및 정량적으로 잘 반영하였다. 그리고 Joun 등[18]은 압출의 경우 중심파괴 형상이 세브론 형상이지만, 인발공정에서 발생하는 중심파괴는 대체적으로 컵 형상에 가깝게 나타남을 유한요소해석을 통하여 밝혔고, 그 원인을 분석하였다.

본 논문에서는 후방인장응력이 가해진 다단인발공정에서 발생하는 중심파괴에 관한 유한요소해석을 실시하였다. 후방인장응력을 추가하기 위하여 가상상태변수체적력법[20]을 사용하였다.

2. 후방인장응력과 다단인발공정에서의 중심파괴

Fig. 1(a)는 Komori[6]가 연구한 타프피치 구리(tough-pitch copper)의 다단선재인발 시에 발생한 중심파괴의 사례이며, Fig. 1(b)는 Norasethasopon 등[3] 연구한 중심파괴 사례이며, 초미세 구리선의 다단선재인발공정에서 발생한 것이다. Fig. 1(c)는 압출 공정에서 발생한 전형적인 중심파괴의 형상, 즉 세브론 형상을 나타내고 있다 [5~6]. Fig. 1로부터 다단인발공정에서 발생하는 중심파괴의 모양은 하나 또는 소수의 단에 의한 압출공정에서 발생하는 중심파괴의 모양과 크게 다르다는 점을 알 수 있다. 압출공정의 경우, 세브론 크랙이라고 불리우기에 적합한 끝이 약간 구부러진 뾰족한 ‘V’자 형태를 보이고 있으나, 다단인발공정에서 발생한 중심파괴의 형상은 압출공정에서의 중심파괴 형상과 비교적 큰 차이를 보인다. 즉, 다단인발의 경우, Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 끝이 볼록한 U자 또는 컵의 형태를 나타내고 있다. Fig. 1(b)의 경우에도 중심파괴의 상부의 볼록한 면은 대체적으로 Fig. 1(a)와 유사하다. 단, Fig. 1(b)의 경우는 중심파괴가 발생한 이후에도 추가적인 인

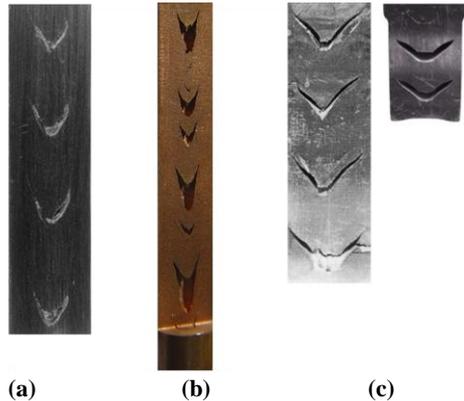
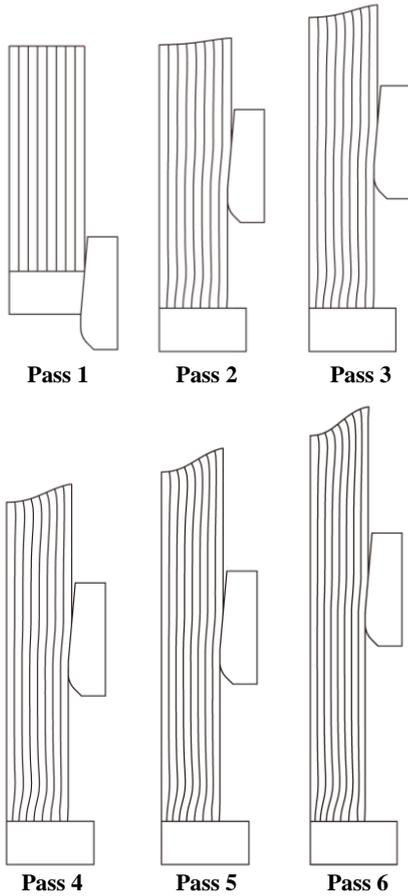


Fig. 1 Experimental results of central bursting defects found in the literature

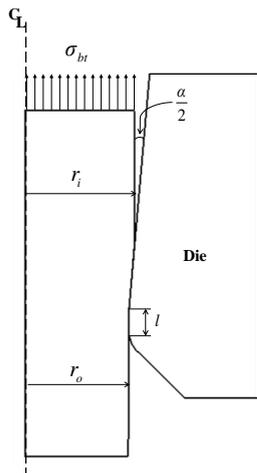
발이 이루어진 것으로 판단되며, 그 결과, 중심파괴의 하부의 오목한 면은 다소 깊은 V자를 나타내고 있다. 전반적으로 볼 때, 압출공정 중에 발생한 중심파괴의 형상은 비교적 크랙의 폭이 상대적으로 큰 반면, 다단인발공정 중에 발생한 크랙의 폭은 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 상대적으로 좁다는 사실을 알 수 있다.

Joun 등[18]이 실시한 선행연구의 분석 결과에 따르면, 많은 연구자들이 유한요소법을 이용하여 중심파괴의 형상을 예측하였으나, 대부분의 연구자들[5~7]이 예측한 압출공정 중 발생한 중심파괴의 형상이 U자이거나 압출재의 반경과 세브론 크랙의 반경의 비의 측면에서 예측결과와 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 인발공정에서 발생하는 중심파괴의 예측 연구[8~11]에서는 후방인장응력을 고려하지 않았거나 그 영향에 대한 분석을 실시하지 않았다. 특히 선재 인발의 경우, 후방인장응력이 공정의 주요 변수이다. 후방인장응력은 그 값에 비례하여 금형에 작용하는 응력을 떨어뜨리지만 손상도의 축적의 증가를 유발한다[20]. 실제 관련 업체에서 선재인발 중 파단은 생산성을 크게 떨어뜨림은 물론이고 인명 사고로 연결될 수 있으므로 매우 중요한 문제이다.

본 연구에서는 선행연구[20]에서 사용한 예제와 동일한 예제를 대상으로 중심파괴 해석을 실시하였다. 공정 중 중심파괴 예측은 선행연구에서 압출공정 중에 발생하는 중심파괴의 예측 목적으로 개발된 개선된 중심파괴 예측 기법을 사용하였다 [18]. 손상도 모델로 다음 식



(a) Process design



(b) Conceptual diagram

Fig. 2 Process design of the test six-pass drawing process

Table 1 Process information

Stage	1	2	3	4	5	6	7
r_i [mm]	7.00	6.64	6.30	5.98	5.67	5.38	5.10
r_o [mm]	6.64	6.30	5.98	5.67	5.38	5.10	4.84
l [mm]	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
α [°]	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
σ_{br} [MPa]	Case 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Case 2	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5
	Case 3	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0

$$D = \int_0^{\epsilon_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

을 사용하였으며, 이 모델은 McClintock 손상도 모델의 특별한 형태, 즉 $n=1$ 로 간주할 수 있으며, Cockcroft와 Latham 손상도 모델을 유효응력으로 나누는 것, 즉 정규화된 Cockcroft-Latham 손상도 모델이다. 여기서 ϵ_f , σ_1 , $\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}$ 등은 각각 현재의 유효변형률, 최대주응력, 유효응력, 유효변형률 매개변수이다.

Fig. 2는 본 연구에서 선택한 공정의 개념도를 나타내고 있으며, 주요 설계변수를 Table 1에 정리하였다. 사용된 소재는 SWCH10A이며, 초기항복응력, 즉 항복강도 σ_y 는 295.2MPa이다. 소재의 유동응력 정보는 인장시험의 결과로부터 획득한 것이다[21]. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 잡아 당기는 도구를 인장력이 작용하여도 소재로부터 분리되지 않은 금형으로 모델링하였으며, 그 결과 끝단부의 시뮬레이션 결과는 의미가 없다.

Table 1에 정리된 세 가지 조건에 대하여 연구를 실시하였다. Case 1은 후방인장응력 σ_{br} 이 가해지지 않은 것이다. Case 2와 Case 3에서는 후방인장응력으로 각각 초기항복응력의 10%와 20%가 가해진 것이다. 후방인장응력은 가상상태변수체적력법 [20]을 이용하여 반영되었다. 이 방법에서는 가상의 상태변수를 초기값으로 부여하고 이 값의 크기와 분포가 특별한 사용자의 요구가 없으면 공정 중 변하지 않도록 하고, 체적력을 가상상태변수의 함수로 입력함으로써 일정한 크기의 하중이 경계조건의 변화나 요소망재구성 등과 상관없이 작용하도록 한 것이다.

소재와 금형의 경계는 Coulomb 마찰법칙을 따르는 것으로 간주하였으며, 마찰계수는 0.02로 가정하였다.

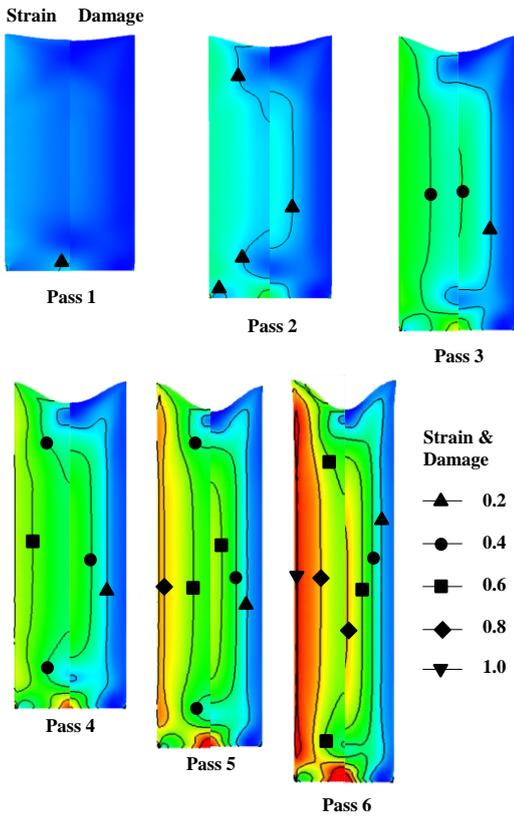


Fig. 3 Variation of strain and damage

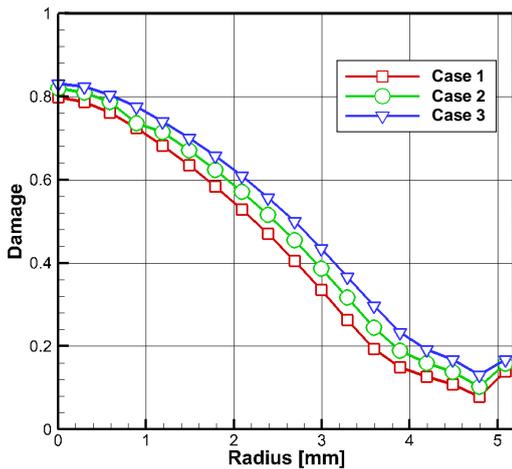


Fig. 4 Radius-damage curve after the sixth pass

해석 중 상태변수의 순화가 필수적으로 수반되는 요소망재구성을 실시하지 않았다. 초기 요소망은

Table 2 Variation of maximum damage value with increase in stage

Stage	Damage		
	Case 1	Case 2	Case 3
1	0.1306	0.1339	0.1366
2	0.2663	0.2726	0.2765
3	0.4012	0.4104	0.4157
4	0.5347	0.5481	0.5547
5	0.6674	0.6846	0.6940
6	0.7982	0.8195	0.8319

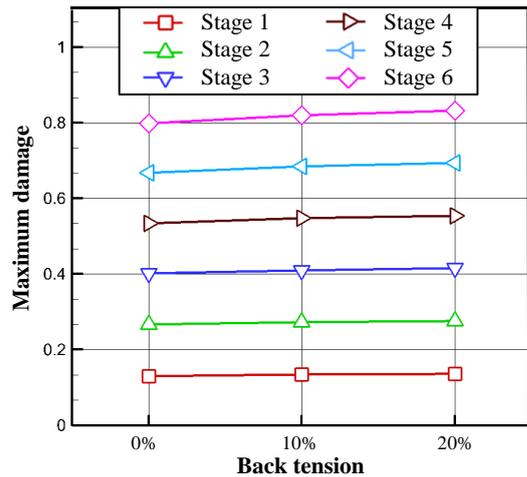


Fig. 5 Relationship between maximum damage and back tension

가로와 세로의 길이가 각각 7mm와 21mm인 소재를 가로 및 세로 방향으로 각각 35와 105 등분한 것이다.

Fig. 3에 후방인장응력이 초기항복응력의 10%인 경우의 해석 결과를 나타내었다. 좌편은 유효변형률의 분포를 나타내고 있고, 우편은 손상도의 분포를 나타내고 있다. 하부의 비정상적인 분포는 초기 인발 과정에서 발생한 것으로 끝 효과(end effect)에 기인한다. 유효변형률의 최대값은 1.03이며 표면에서 발생한 반면, 손상도의 최대값은 0.8이며 중심에서 발생하고 있다. Fig. 4는 제 6단 종료 직후의 반경-손상도 그래프를 후방인장응력의 변화와 함께 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 후방인장응력으로 인하여 손상도는 반경에 상관없이 거의 일정하게 증가함을 알 수 있

다. 후방인장력의 부과는 금형의 마모를 줄여주는 역할을[20] 하지만, 중심파괴의 측면에서는 분리하게 작용한다.

Table 2는 단의 증가에 따른 최대 손상도의 변화를 후방인장응력별로 정리한 것이며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림은 본 연구에서 시험한 소재의 초기항복응력의 20% 이하의 후방인장응력의 범위 내에서 중심에서의 최대 손상도의 크기는 후방인장응력의 크기에 선형적으로 비례함을 보여주고 있다.

한편, 20%의 후방인장응력이 가해졌을 때 5단과 6단에서의 최대 손상도의 평균, 즉 0.763을 임계손상도로 간주하여 중심파괴 시뮬레이션을 실시하였다. 이 시뮬레이션은 중심파괴의 형상을 가시화시키자는데 의미를 두고 있다. 단과 단 사이에서의 중심파괴의 성장 과정을 시뮬레이션하기 위하여 제 7단을 추가하여 해석을 실시하였다. 제 7단의 공정 설계는 Table 1에 정리된 바와 같다.

Table 2에서 보는 바와 같이 가정한 임계손상도 0.763은 Case 1에서 제 6단의 최대손상도와 큰 차이가 없다. 따라서 이 값은 Case 1의 제6단의 종료 시점에서 작은 크기의 중심파괴가 발생하도록 의도한 것이다. 반면, 이 값은 Case 3에서 어느 정도 이상 크기의 중심파괴가 발생하도록 정한 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 제 6단에서의 중심파괴는 의도한대로 예측되었다. 즉, Case 1의 경우, 중심파괴가 발생한 이후의 지속적인 손상도 축적이 동반하지 않은 결과, 매우 작은 크랙이 매우 많이 발생한 반면, Case 3는 이와 반대의 현상을 보이고 있다. Case 2의 결과는 Case 1과 Case 3의 중간적인 현상을 나타내고 있다. 즉, 인발 중의 중심파괴는 후방인장응력에 정성적으로 비례한다고 볼 수 있다.

Fig. 6으로부터 다단인발에서 후방인장응력이 중심파괴에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 중심파괴가 시작된 단의 어느 시점에서 중심파괴가 발생하느냐에 따라 중심파괴의 주기나 크기가 크게 달라짐을 알 수 있다. 중심파괴의 성장이 이루어진 단의 직전 단에서 어느 정도 이하 크기의 중심파괴는 주기를 짧게 하는 효과로 나타나며, Fig. 6(b)는 일정 크기 이상의 중심파괴가 발생할 경우 후속된 단에서 중심파괴의 크기만 증가할 뿐 주기에는 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

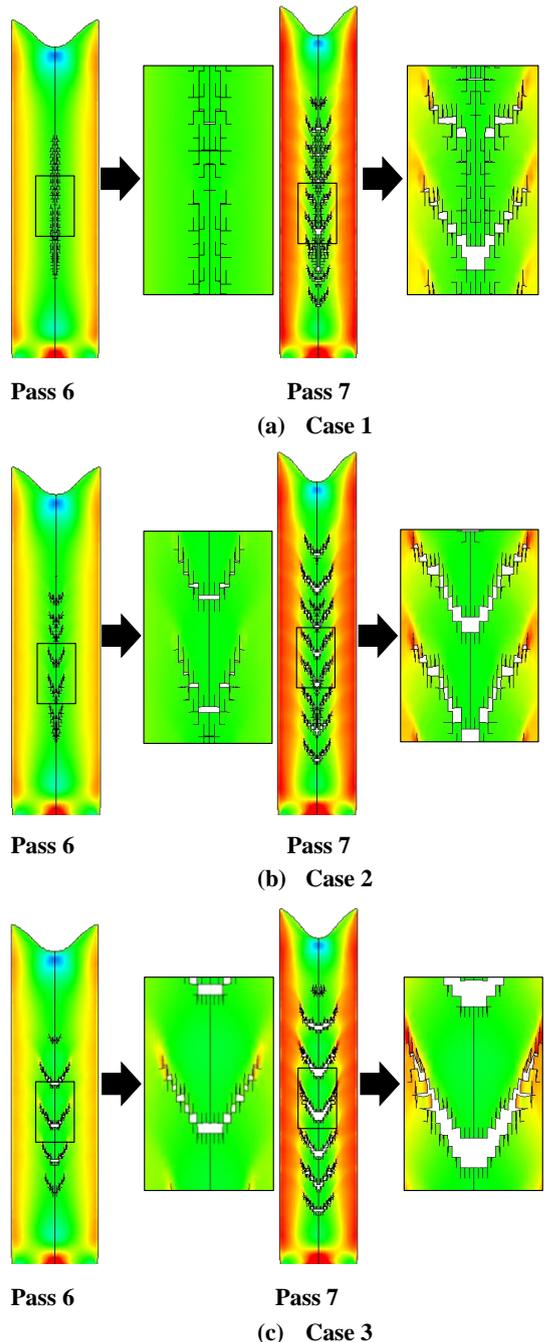


Fig. 6 Central bursting defects

3. 결론

본 논문에서는 다단인발공정에서 후방인장응력이 중심파괴에 미치는 영향을 유한요소법을 이용

하여 밝혔다. 이 목적으로 McClintock 손상도 모델이 사용되었다.

다단인발공정에서의 후방인장응력은, 중심파괴가 발생하지 않을 경우, 소재의 모든 영역에서 비슷한 크기의 손상도 증분을 발생시켰으며, 그 크기는 후방인장응력의 크기와 비례하는 특성을 보였다. 따라서 다단인발공정에서 후방인장응력은 접촉응력을 감소시키기 때문에 금형 수명 증가에는 긍정적인 영향을 주지만 중심파괴 가능성을 증가시키는 요인으로 작용한다.

다단인발공정에서 최초로 중심파괴가 발생한 단계에서 중심파괴 발생 이후에 추가적으로 축적된 손상도의 크기에 따라 중심파괴의 주기와 크기가 좌우됨이 확인되었다. 그리고 최초로 중심파괴를 발생시킨 단계에서 생성된 일정 크기 이하의 중심파괴는 짧은 주기의 중심파괴의 원인을 제공하는 것으로 나타났으며, 일정 이상의 중심파괴가 발생한 이후에는 새로운 중심파괴가 발생하지 않는 대신, 크랙의 성장이 발생하였다.

본 논문의 연구결과는 해석기술로 사용된 가상상대변수체적력법의 유용성 제시, 발전된 인발공정 시의 중심파괴 예측 기술, 인발공정에서 후방인장응력이 중심파괴에 미치는 영향의 상세 분석 등의 측면에서 그 의의가 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] H. C. Jennison, 1930, Certain Types of Defects in Copper Wire Caused by Improper Dies and Drawing Practice, Proc. Inst. Metal Div. AIME., No. 89, pp. 121~139.
- [2] B. Avitzur, 1968, Analysis of Central Bursting Defects in Extrusion and Wire Drawing, J. Eng. Ind., Trans. ASME., Vol. 90, No. 1, pp. 79~91.
- [3] S. Norasethasopon, K. Yoshida, 2008, Prediction of Chevron Crack Initiation in Inclusion Copper Shaped-Wire Drawing, Eng. Fail. Anal., Vol. 15, No. 4, pp. 378~393.
- [4] D. C. Ko, B. M. Kim, 2000, The Prediction of Central Burst Defects in Extrusion and Wire Drawing, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 90, No. 102, pp. 19~24.
- [5] K. Saanouni, J. F. Mariage, A. Cherouat, P. Lestriez, 2004, Numerical Prediction of Discontinuous Central Bursting in Axisymmetric Forward Extrusion by Continuum Damage Mechanics, Comp. Struct., Vol. 82, No. 72, pp. 2309~2332.
- [6] C. Soyarslan, A. E. Tekkaya, U. Akyuz, 2008, Application of Continuum Damage Mechanics in Discontinuous Crack Formation: Forward Extrusion Chevron Predictions, ZAMM-Z. Angew. Math. Mech., Vol. 88, No. 6, pp. 436~453.
- [7] 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, pp. 88~92.
- [8] K. Komori, 2003, Effect of Ductile Fracture Criteria on Chevron Crack Formation and Evolution in Drawing, Int. J. Mech. Sci., Vol. 45, No. 1, pp. 141~160.
- [9] H. Cho, H. H. Jo, S. G. Lee, B. M. Kim, Y. J. Kim, 2002, Effect of Reduction Ratio, Inclusion Size and Distance between Inclusions on Wire Breaks in Cu Fine Wire Drawing, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 130-131, pp. 416~420.
- [10] P. J. McAllen, P. Phelan, 2007, Numerical Analysis of Axisymmetric Wire Drawing by Means of a Coupled Damage Model, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 183, No. 2-3, pp. 210~18.
- [11] F. Ahmadi, M. Farzin, 2008, Investigating Geometric and Friction Conditions Causing Chevron Cracks in Wire Drawing Process using FEM, Steel Research Int., Vol. 79, No. 1-2, pp. 382~388.
- [12] S. E. Clift, P. Hartley, C. E. N. Sturgess, G. W. Rowe, 1990, Fracture Prediction in Plastic Deformation Processes, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No. 1, pp. 1~17.
- [13] J. C. Gelin, A. Moisan, 1990, Finite Element Analysis of Ductile Fracture and Defects Formation in Cold and Hot Forging, CIRP Ann., Vol. 39, No. 1, pp. 215~218.
- [14] K. Komori, 1999, Simulation of Chevron Crack Formation and Evolution in Drawing, Int. J. Mech.

- Sci., Vol. 41, No. 12, pp. 1499~1513.
- [15] S. G. Bae, Y. S. Yang, D. Y. Ban, C. G. Park, 2006, The Effects of Die Design and Die Series on the Surface Residual Stress of Cold Drawn Eutectoid Steel Wire, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 2, pp. 153~157.
- [16] D. H. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 1998, Process Design of Multi-Step Wire Drawing using Artificial Neural Network, Trans. Mater. Process., Vol. 7, No. 2, pp. 127~138.
- [17] L. M. Kachanov, 1986, Introduction to Continuum Damage Mechanics, Mechanics of Elastic Stability, Kluwer Academic Publishers, USA.
- [18] M. S. Joun, M. C. Kim, D. J. Yoon, H. J. Choi, Y. H. Son, 2011, MSEC 2011, ASME., New York, USA, pp. 169~174.
- [19] F. A. McClintock, 1968, A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Hole, J. Appl. Mech., Vol. 35, pp. 363~371.
- [20] M. C. Kim, J. G. Eom, S. T. Ahn, M. S. Joun, 2011, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 73~75.
- [21] 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.