

반응표면법을 이용한 냉간전조압연공정 설계변수의 영향도 분석 및 설계최적화

이형욱[#]· 이근안¹· 최석우¹· 윤덕재¹· 임성주¹· 이용신²

Analysis and Optimization of Design Parameters in a Cold Cross Rolling Process using a Response Surface Method

H. W. Lee, G. A. Lee, S. Choi, D. J. Yoon, S. J. Lim, Y-S Lee

(Received October 12, 2006)

Abstract

In this study, effects of forming angle and friction coefficient on a initiation of the Mannesmann hole defect were analyzed by using a response surface method. The maximum effective plastic strain at center point of specimen is utilized for the prediction of the starting point of crack occurrence, which is suggested by the comparison of integrals of four different ductile fracture models between the histories of the effective plastic strain at center point. It was revealed that the principal stress at the center is the dominant element to the increase of the effective plastic strain. It was also verified by the simulation results from the comparison of experiment and simulation. It is provided that the forming angle of 25 degrees and the spreading angle of 1 degree can be a proper design condition without an occurrence of internal hole defect and an excessive slip.

Key Words : RSM(Response Surface Method), Cold Cross Rolling, Forming Angle, Finite Element Analysis

1. 서 론

냉간 비조질강은 성형 후 열처리를 하지 않기 때문에, 소성가공 성형 시 제품 규격에 맞는 강도를 확보할 수 있도록 하여야 한다. 냉간 포머공정에서 그 강도나 경도를 확보하지 못할 경우, 추가공정을 통하여 그 물성을 확보해야 할 필요가 있다. 원통형상을 갖는 제품의 후공정에는 정형가공 방법 중의 하나인 전조압연공정을 사용할 수 있다. 자동차의 조향부품 중의 하나인 볼 스티드의 경우 포머공정에서 강도를 충분히 확보하지 못하는 목 부위에 이러한 전조압연공정을 적용할 수 있다.

접진성형기술의 하나인 전조압연공정은 그간

주로 열간공정을 통하여 축대칭 형상의 축류제품을 성형하거나, 단조품의 예비성형체로 사용되는 중간재를 성형하는데 많이 이용되었다. 냉간 전조압연공정은 소재의 재료유동성이 낮고, 금형과 소재의 마찰계수가 낮기 때문에 열간 전조압연공정보다 공정변수 및 설계변수에 의하여 표현되는 성형가능영역이 더 작다.

롤 타입의 전조압연공정의 설계변수는 Fig. 1에 도시하였듯이 금형의 성형각도(Forming Angle 또는 Shoulder Angle), 진행각도(Stretching Angle 또는 Spreading Angle), 압하율 등으로 나타낼 수 있다. 열간 전조압연공정에서는 성형각도를 약30°, 진행각도를 8°~9° 정도를 사용하고 있으나, 냉간 전조

1. 한국생산기술연구원, 디지털성형공정팀

2. 국민대학교, 기계자동차공학부

교신저자: 한국생산기술연구원, 디지털성형공정팀

E-mail: hwlee@kitech.re.kr

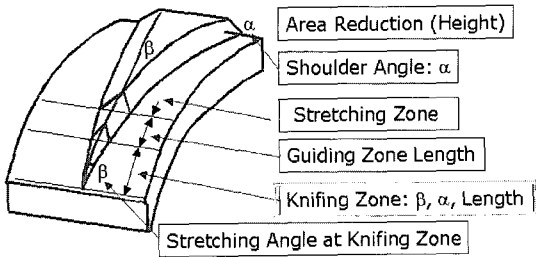


Fig. 1 Geometrical design variables of cross wedge rolling die

압연공정에서는 과도한 미끄러짐 현상으로 인하여, 성형각도는 20°에서 25°, 진행각도는 2° 미만에서 사용할 수 있다. 전조압연성형의 주요한 결함은 전조금형과 소재 사이의 낮은 마찰계수로 인한 과도한 미끄러짐, 만네스만(Mannesmann) 효과에 의한 중심부에서의 내부 홀 발생, 표면 찍힘 등이 있는데, 성형각과 진행각, 마찰계수에 의하여 미끄러짐과 내부 홀의 발생이 영향을 받는데 냉간공정에서 그 영향이 더 크다.

많은 연구자들이 열간과 냉간 전조압연공정에서의 형상결함, 금형최적화, 파이프 소재성형 등 여러 연구를 수행하였다[1~3]. 금형 형태에 따라 평판형, 롤형 금형에 대한 연구도 수행되었다. Li 등[1]은 마찰계수, 성형각도, 진행각도가 표면 미끄러짐에 대하여 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 이때, 마찰계수는 금형표면의 Sand blasting 을 통하여 변화시켰다. 그러나 마찰계수의 상승은 내부 크랙의 발생을 유도시키기 때문에 이 경우 상세한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 냉간 전조압연공정에서 내부 크랙의 형성에 대한 기준을 실험과 유한요소해석을 통하여 설정하고, 금형 성형각, 진행각, 금형과 소재의 마찰계수에 따른 내부 크랙의 형성과 표면 미끄러짐에 대한 영향을 실험계획법의 일종인 반응표면분석법을 통하여 분석하였다.

기존의 연구[3]를 통하여 금형의 성형각을 20°에서 25°사이에서 설정하였고, 진행각은 1°와 1.5°로 설정하였다. 마찰계수는 0.135에서 0.2까지로 설정하였다.

2. 실험 및 유한요소해석

냉간 전조압연실험은 롤을 수평형으로 구성하여 제작하였고, 전조 금형은 SKD11 소재를 사용하

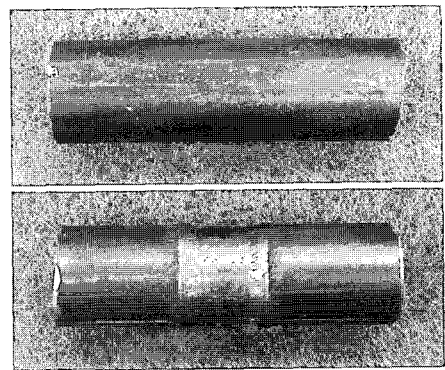
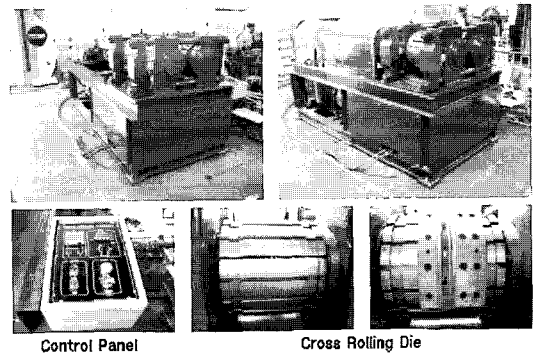


Fig. 2 Equipment of the developed cold cross wedge rolling machine

였다. 유한요소해석은 탄소성 구성방정식을 사용하였고, 소재를 3 차원 연속체 요소를 사용하여 모델링하였고, SKD11 재질의 금형은 강체 셸 요소로 모델링하였다.

2.1 실험

구성된 장치와 비조질강으로 전조압연 성형한 시편을 Fig. 2에 도시하였다.

냉간압조용으로 개발된 비조질강을 이용하여 면적감소율에 따라 성형을 하여 내부에 크랙이 생기는 시점을 파악하였다. 24% 정도까지의 면적압하율에서는 내부에 크랙이 발생하지 않았음을 초음파 탐상검사와 단면검사를 통하여 알 수 있었으며, 약 36%의 단면감소성형에서 내부에 크랙이 발생하였음을 확인하였다. 비조질강의 전조압연특성을 저탄소강인 SM20C와 비교하여 표면 경도증가율과 함께 Table 1에 도시하였다. 이때, 금형 성형각은 20°이고, 진행각은 1°이다. 실험에 의한 경도의 증가율과 S20C, S45C 탄소강의 인장강도 증가율을 Fig. 3에 도시하였다. S20C 강에 비하여

Table 1 Change of mechanical properties and initiation of internal defect by cold cross wedge rolling with respect to the area reduction ratio

Area Reduction	Mannesmann Hole		Increase of Surface Hardness	
	SM20C	Micro Alloy	SM20C	Micro Alloy
7 %	Safe	-	21.8 %	-
10 %	-	Safe	-	22.7 %
14 %	Safe	-	27.2 %	-
18 %	-	Safe	-	32.3 %
20 %	Fail	-	32.2 %	-
24 %	-	Safe	-	-
36 %	-	Fail	-	-

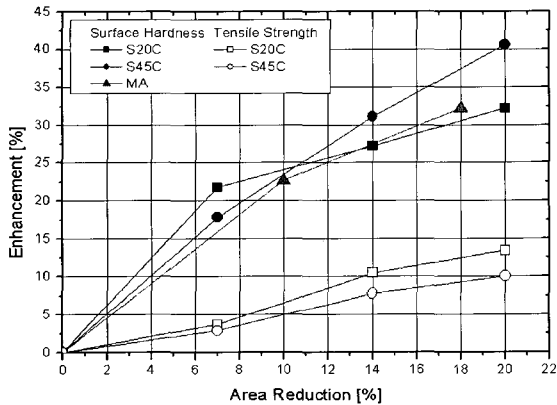


Fig. 3 Increase ratios of the surface hardness and the maximum tensile stress by CWR process with respect to the area reduction ratio

비조질강이 더 큰 면적압하율에서도 내부 크랙에 대하여 더 안전한 것을 알 수 있다. 이것은 비조질강의 표면에서의 변형경화의 증가율이 SM20C의 변형경화 증가율보다 더 커서, 중심부에서의 변형에 대한 영향이 상대적으로 더 작기 때문이라 할 수 있다.

2.2 유한요소해석

LS-Dyna 3D를 이용한 탄소성 유한요소해석 결과를 단면에서의 유효소성변형률에 대하여 Fig. 4에 도시하였고, 실험을 통한 단면의 크랙발생 모습을 동일한 금형각도에서 비교하여 같이 도시하였다. 만네스만 홀은 등근 소재가 성형중에 타원형이 되면서 소재의 중심에서 인장과 압축응력이 반복적으로 걸리게 되어 결국 중심부에서 크랙으로

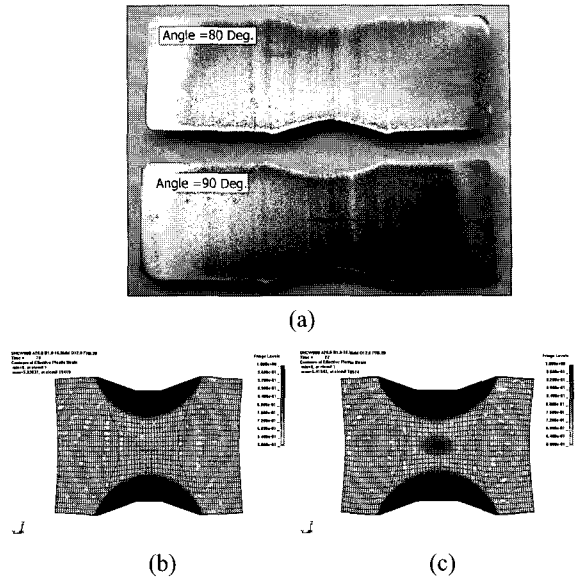


Fig. 4 Experimental result for the internal hole initiation at the area reduction of 36% and effective plastic strain distributions in cross sectional view at die angles of 80 degrees and 90 degrees from the finite element analysis

발생되는 것으로 인장, 압축, 전단이 복합적으로 작용하여 발생하는 결함이다.

본 논문에서 연성재료의 파괴를 판별하기 위하여 사용한 네 가지 모델은 Cockroft 모델, Cockroft-Latham 모델, Brozzo 모델, Oyane 모델이다. Oyane의 모델은 전조압연공정과 반대로 만네스만 홀의 발생을 성형에 사용하는 스크류 롤링성형에서도 Mori 등[3]에 의하여 유용하게 사용한 예가 있다.

네 가지 모델은 재료상수가 1 개씩 있는 모델로, 재료상수를 이용하여 크기를 1로 정규화 하여 각 모델의 경향을 비교하였다. 결함성장모델은 소재의 중심단면에서 원주방향으로 45°의 각도로 반경방향 적분점에서 계산되었다. 소재의 중심단면의 중앙점에서의 적분값을 Fig. 5에 도시하였다.

이 때 유효소성변형률도 동일하게 정규화하여같이 도시하였다. 도시된 그림에서 네 가지 모델의 증가 경향이 거의 동일하고, 유효소성변형률의 증가와도 동일한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 결함성장모델에 사용되는 주응력이 전단이나 다른 응력성분보다는 인장응력이 주로 작용하고, 유효소성변형률의 증가 역시 인장응력에 의한 증가량으로 발생된다는 것이다. 이 경우 유효소성변형률이 결함성장모델을 대표하고 있다는 것으로 볼 수 있다.

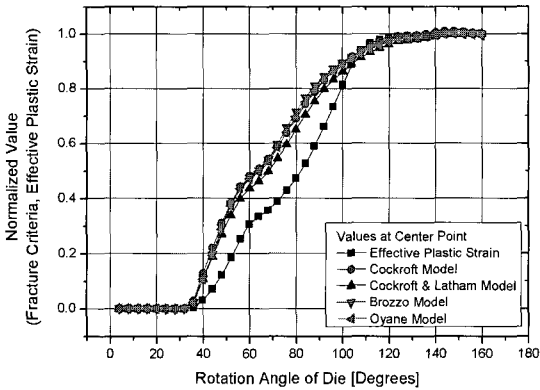


Fig. 5 Variation of integrals for four different ductile fracture models and history of effective plastic strain with respect to the rotation angle of the die

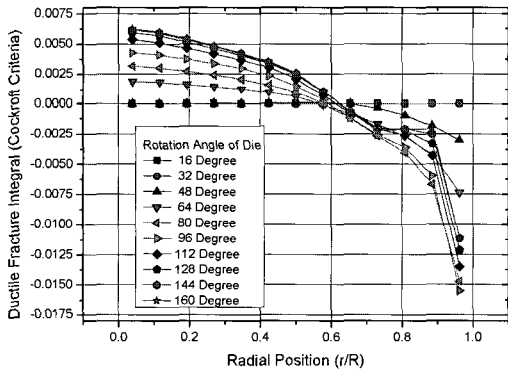


Fig. 6 Variation of the ductile fracture integral of the Cockroft criteria according to the rotation angle of the die at the cross sectional view

소재의 단면에서 각도에 따른 의존성이 나타나지 않았으며, 반경방향에 대하여 Cockroft 기준에 의한 적분값을 반경방향도 정규화하여 Fig. 6에 도시하였다. 금형의 회전에 따라 중심에서의 결합 발생이 커지는 것을 확인할 수 있으며 전단응력이 큰 표면에서의 결합성장가능성은 매우 낮아짐을 알 수 있어, 중심에서 만네스만 홀이 나타날 수 있음을 확인할 수 있었다.

이상에서 변형 중에 지속적으로 유효소성변형률이 증가하고, 크랙발생 위치를 알고 있는 전조압연공정에서 크랙의 발생시점을 판별하는 것은 유효소성변형률로 가능함을 알 수 있다. 즉 결합성장모델을 통한 에너지로 크랙의 시작을 평가하

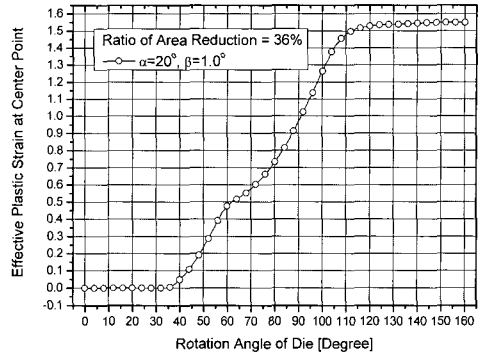


Fig. 7 History of effective plastic strain at center point from simulation result

지 않고, 간단한 방법으로 유효소성변형률 값으로 크랙의 시작을 판단하도록 하였다. 기존 연구[4]에서 SM20C 소재에 대하여 크랙발생 시기를 크랙이 발생할 시점에서의 유효소성변형률로 판별하고, 금형의 형상이 다를 때의 크랙 발생시점을 예측하여 그 유효성을 입증할 수 있었다.

Fig. 6은 해석에서 크랙이 발생하는 지점의 유효소성변형률을 금형의 회전각에 대하여 도시한 것이다. 여기서 반경방향으로 점진성형이 일어나고 있는 구간에서는 유효소성변형률이 거의 선형으로 증가됨을 알 수 있다. Fig. 7에서 크랙 시작의 기준이 되는 유효소성변형률 값은 금형회전각도 85°에서의 값인 0.84로 설정하였다.

3. 반응표면법을 이용한 설계변수영향도 분석

3.1 반응표면법을 이용한 실험계획

냉간 전조압연공정의 설계변수를 금형 성형각, 금형 진행각, 마찰계수로 3가지로 설정하였다. 본 논문에서는 스크리닝 해석을 통하여 금형 진행각은 1°로 고정하였다. 스크리닝 해석의 결과를 Fig. 8에 도시하였고, 마찰계수에 따른 미끄러짐에 대한 지도를 Fig. 9에 도시하였다. 선행해석에서 금형 진행각이 커질수록 미끄러짐이 더 많이 발생하는 것을 알 수 있었고, 그 경우 마찰계수 값이 더 커져야 함을 유추할 수 있으며, 내부에 크랙이 발생할 가능성이 더 커짐을 확인할 수 있었기 때문이다. 그러나 금형의 원주길이는 일정하기 때문에, 금형의 진행각을 너무 작게 할 수가 없고, 금형의 기계가공 시의 가공한계를 고려하여 최소 진행각을 1도로 고정하였다.

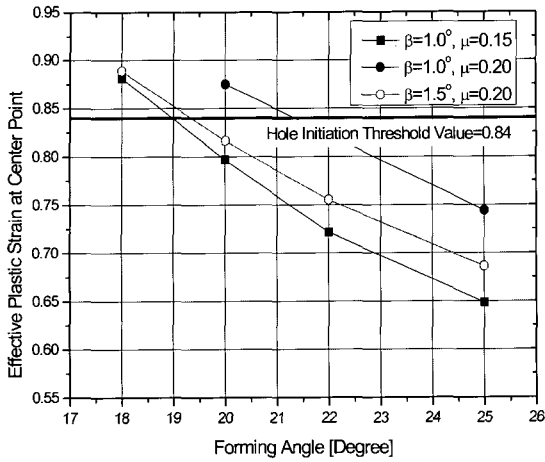


Fig. 8 Variation of effective plastic strain at center point with respect to the forming angle of cross rolling die according to the stretching angle

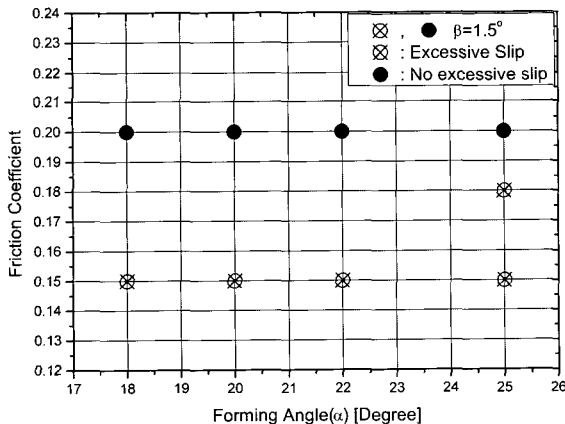
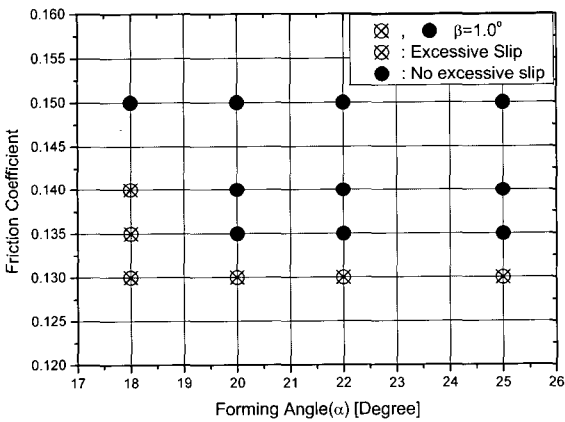


Fig. 9 Slip maps of the CWR process for SHCW80 with respect to the forming angle and the spreading angle

Table 2 Simulation data for response surface method

Standard Order	Alpha Forming Angle	Friction Coefficient	Effective Plastic Strain
1	20	0.135	0.70999
2	20	0.140	0.74578
3	20	0.150	0.79714
4	20	0.200	0.87516
5	22	0.135	0.64860
6	22	0.140	0.68570
7	22	0.150	0.72970
8	22	0.200	0.81854
9	25	0.135	0.58004
10	25	0.140	0.59686
11	25	0.150	0.64863
12	25	0.200	0.74410

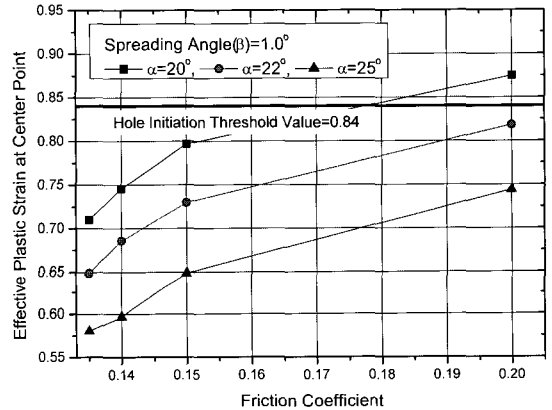


Fig.10 Variation of effective plastic strain at center point with respect to the friction coefficient

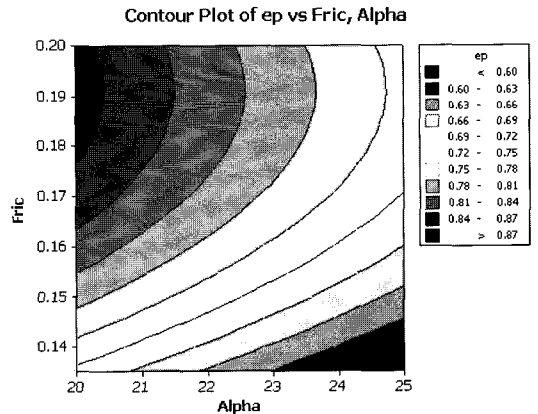


Fig.11 Contour plot of effective plastic strain(ep) vs. friction coefficient(fric) and forming angle (alpha) by response surface analysis

반응표면법에 사용된 금형의 성형각은 20°, 22°, 25°로 3수준을 사용하였고, 마찰계수는 0.135, 0.140, 0.150, 0.200으로 4수준을 설정하였다.

최적화 시킬 반응 값은 소재 중심에서의 유효소성변형률 값을 사용하였다. 초기 소재의 직경은 12mm이며, 최종 직경은 10.5mm로 단면감소율은 23.4%이다. 실험계획은 미니 탭을 이용하여 수립하였으며, 실험 데이터를 Table 2에 정리하였다. 또한 마찰계수에 따른 중심점에서의 유효소성변형률을 도시하여 Fig. 10에 나타내었다.

3.2 반응표면분석

회귀분석에서 유의하게 나타난 상수항, 성형각(Alpha), 마찰계수(Fric), 마찰계수의 이차항을 포함한 회귀식이 현상을 설명할 수 있는 정도를 의미하는 R-Sq값이 99.7%, 항의 효율성을 나타내는 R-Sq(adj)값이 99.5%로 나타났다. 이것은 본 논문에서 변수로 선정한 마찰계수와 성형각이 반응값인 유효소성변형률을 설명하는 주요인자로 적합함을 의미한다. 유효소성변형률에 대한 등고선도를 Fig. 11에 도시하였다.

크랙이 발생할 수 있는 영역은 유효소성변형률이 0.84 이상인 좌측 상단부에 치우쳐져 있는 상위 두 개의 영역이며, 이는 약 21° 이상의 성형각을 갖는 금형을 사용하면 마찰계수에 관계없이 크랙이 발생하지 않는 것을 의미한다. 소재 표면의 정도를 고려하고, 10%의 안전계수를 고려하더라도, 성형각을 최소 25°로 결정할 경우 미끄럼을 방지하면서 내부 크랙이 발생하지 않도록 할 수 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 냉간 전조압연공정에서 내부 크랙이 발생하는 시점에 대한 영향도를 설계변수 중 금형 성형각과 마찰계수를 이용하여 분석하였다. 반응 값은 유효소성변형률을 사용하였고, 그 기준 값은 실험과 유한요소해석을 통하여 결정하였다. 냉간 전조압연에서도 금형 성형각을 25° 정도로 결정하면, 소재의 과도한 미끄러짐을 방지할 수 있는 범위 내에서 내부 크랙이 발생하지 않게 할 수 있는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자본부가 지원하고 있는 청정생산기술사업 중 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 차세대 환경친화형 고강도 냉간 비조질강 제품 개발사업의 세부과제로서 수행 중이며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- [1] Q. Li, M. Lovell, 2005, On the critical interfacial friction of a two-roll CWR process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 160, pp. 245~256.
- [2] H. W. Lee, G. A. Lee, D. J. Yoon, S. M. Bae, S. Choi, 2006, Design of a cold cross-rolling process for micro-alloyed cold forging steel, AMPT('06).
- [3] K. Mori, H. Yoshimura, K. Osakada, 1998, Simplified three-dimensional simulation of rotary piercing of seamless pipe by rigid-plastic finite-element method, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80-81, pp.700~706.
- [4] 한국생산기술연구원, 2005, 고강도 냉간 비조질강의 Net Shape 성형기술개발 보고서.