

초미세 마이크로 소성성형 가공시스템 기술 개발

이낙규*, 최태훈**, 이해진**, 최석우+, 박훈재**, 나원기+

Development of Micro Metal Forming Manufacturing System

Nak-Kyu Lee*, Tae-Hoon Choi**, Hye-Jin Lee**, Seog-Ou Choi+, Hoon-Jae Park**, Won-Ki La+

Abstract

In this paper Research development about a micro metal forming manufacturing system has been developed. A micro forming system has been achieved in Japan and it's developed micro press is limited to single forming process. To coincide with the purpose to be more practical, research and development is necessary about the press which the multi forming process is possible. We set the development of the equipment including micro deep drawing, micro punching and micro restriking process to the goal. To achieve this goal, Research about micro forming process to be related to multi process forming must be preceded first. Material selection and analysis about micro forming process are accomplished in this paper. And the basis research to make actual system is accomplished.

Key Words : 마이크로 금속 성형 (Micro Metal Forming), 성형 가공 시스템 (Forming Manufacturing System), 딥 드로잉 (Deep Drawing), 펀치 반경 (Fillet radius of punch), 다공정 (Multi Processing)

1. 서론

마이크로 프레스는 수십 μm 에서 수 mm 치수를 갖으며 sub- μm 에서 수 μm 의 정밀도를 갖는 판재 또는 벌크 부품을 성형하기 위한 초정밀 성형용 프레스로서 마이크로 팩토리의 공정 모듈로 적용될 수 있는 소형의 미소기계 시스템을 뜻한다. 기존의 성형용 프레스는 주로 유압이나 기계적 방식을 이용한 Actuator를 사용하고 있으며 장비의 크기가 커서 많은 공간을 차지하게 된다. 이러한 큰 용량의

성형용 프레스를 가지고 수십 μm 에서 수 mm 치수를 갖으며 sub- μm 에서 수 μm 의 정밀도를 갖는 정밀 부품을 성형한다는 것은 비효율적이고 성형목적에 적합하지 않다고 볼 수 있다. 본 논문에서 제시하는 마이크로 성형 프레스는 Servo motor를 이용하며, Fig.1(b)에 나타난 바와 같이 Desk-top 형태로서 소요 전력과 공간을 크게 절약할 수 있다. Fig.1은 기존의 성형용 프레스와 본 논문에서 주요 목표하고 있는 마이크로 성형 프레스를 비교하기 위해 제시한 사진이다.

* 주저자, 한국생산기술연구원 디지털생산공정팀

E-Mail : nkleee@kitech.re.kr

주소: 406-130 인천 연수구 동춘동 994-32

+ 한국생산기술연구원 디지털생산공정팀

++ 한국생산기술연구원 마이크로성형팀

Table.1에 기존 성형 프레스와 마이크로 성형 프레스의 간략한 비교를 나타내었다. 물론 장비 크기, 성형품 크기, 성형품 정밀도는 성형 부품의 재질, 형상 등에 따라서 표 1의 범위를 벗어날 수도 있으며, 이와 같은 마이크로 성형 프레스와 관련된 Size 및 정밀도는 성형품의 생산량 및 기존 프레스를 제작하는 경우와의 장비 제작비용 등을 총괄적으로 감안하여 결정되어야 한다.

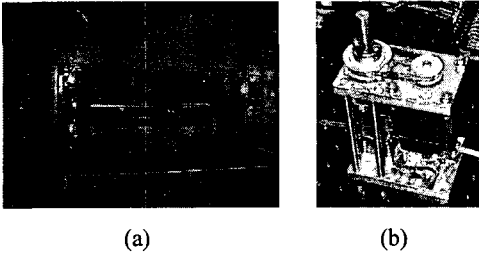


Fig.1 성형용 프레스

[(a) 기존 성형용 프레스, (b) 마이크로 성형 프레스 (일본)]

Table.1 기존 성형 프레스와 마이크로 성형 프레스의 비교

	기존 성형 프레스	마이크로 성형 프레스
장비크기	수십cm - 수m	수cm - 수십cm
성형품 크기	수cm - 수십cm	수백 μ m - 수십mm
성형품 정밀도	수십 μ m - 수백 μ m	수백nm - 수 μ m
생산성	고	고
형상	3D	3D
제어성	중	고
성형소재 종류	금속, 폴리머, Glass 등	금속, 폴리머, Glass 등
성형품 종류	자동차용 부품, 주방용품 등	초소형 전자 부품 등
설치비	고	저
부가가치	저	고

이와 같은 마이크로 프레스의 등장은 마이크로 로봇, 초소형 액츄에이터, 초소형 치차 모듈 등의 정밀 기계 부품, 초소형 필터, 초소형 고효율 열교환기 등의 유체 공학적 부품, 초소형 의료용 부품, 첨단 전자 통신 기기 등은 빠른 추세로 소형화되고 있으며, 이 분야의 시장이 큰 폭으로 확대되고 있는 상황에 기인하며, 이와 같은 변화에 대응하기 위해서는 다양한 소재에 관하여 초소형 고정밀 생산이 가능하면서 생산성이 높은 마이크로 성형 및 기계가공 기술 개발이 필요하다. 이 중, 마이크로 성형 기술은 금속, 폴리머 등 다양한 소

재의 임의의 3차원 초소형 형상 제조에 적용이 가능하고 재료 이용 효율을 극대화할 수 있는 생산성 높은 생산 기술로서 일본, 독일 등 기술 선진국에서도 개발이 진행 중인 기술이며 국내에서도 관련 연구가 활발히 진행 중이다.

성형품의 크기가 작아지게 되면, 금형의 크기와 성형 하중도 작아지게 되므로 전체적인 성형 장비의 크기가 작아지는 것이 보다 효율적이다. 이러한 마이크로 성형 장비의 소형화는 구동부의 이동 거리 최소화, 작업 공간의 효율적 이용 등의 장점을 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 장비 및 Tool이 소형화됨에 따라 관성력 감소와 시스템의 높은 고유 진동수를 얻을 수가 있으므로 이를 통해 고정밀 제어가 가능하여 성형 정밀도를 증대할 수 있다. 그리고 장비 및 전체 공정의 축소를 통하여 생산 공장의 이동성이 확보되므로 수요처에 가까운 곳에서 생산이 가능하므로 물류비 절감, 신속한 시장 개척 및 해외 시장 진출 등이 가능하다.

성형 장비의 소형화는 이와 같이 여러 가지 장점을 가지고 있지만 이를 성취하기 위해서는 고정밀을 갖는 정밀 프레임, 초미세 해상도를 갖는 고정밀 구동부, 마이크로 팩토리 내부의 다른 마이크로 장비와의 간섭을 막고 자체 구동 특성을 높이기 위한 구조 해석 및 동특성 해석, 높은 표면 조도를 갖는 정밀 Tool 등에 관한 기술이 확보되어야 한다. 또한 성형품이 미세해짐에 따라서 기계적인 정밀 제어가 필수적이다. 현재까지 국내에서는 미세한 크기를 갖는 부품 성형에 관한 연구는 진행 중이지만 장비의 소형화는 연구가 미흡한 상황이므로 본 논문에서 마이크로 성형 기술의 효율을 극대화하기 위해서 필수적인 박판 성형용 마이크로 프레스 장비 개발 및 이와 관련된 연구결과에 대해 기술하고자 한다.

2. 국내의 관련 연구동향

2.1 국외 연구동향

일본의 마이크로 팩토리 관련 연구의 시작이라고 할 수 있는 마이크로머신 프로젝트는 1991년부터 통상산업성이 주도가 되어 국가적 차원에서 지원이 이루어지고 있으며 총 10년간 2,500억원이 투입되었다. 이 프로젝트 수행을 통하여 MEL(현재 AIST)은 500mm x 700mm 내에 밀링 머신, 마이크로 선반, 마이크로 프레스, 부품 이송부, 부품 조립부 등을 갖춘 마이크로 팩토리를 개발하였으며 이를 이용하여 초소형 베어링 모듈을 생산하는데 성공하였다.

이와 같은 시스템의 세부공정 모듈로 포함된 마이크로 프레스의 실제외형은 Fig.1(b)에 나타난 바와 같으며, 시스템

의 크기는 길이 111mm, 폭 66mm, 높이 170mm의 초소형이다. 그리고 시스템 구동은 100W의 AC 서보 모터로 구동되며 최대 하중은 3kN로서 초소형 베어링 모듈의 덮개 부분에 쓰이는 1mm 직경을 갖는 판재의 굽힘 공정에 적용되었으나, 굽힘 공정에 국한되어 실제 활용도는 그리 높지 않다.

또한, TIT(Tokyo Institute of Technology)에서는 Fig.2(a)와 같이 Piezo를 이용한 Micro pump를 구동기로 하여 마이크로 펀칭 프레스를 설계하고 Fig.2(b)와 같이 구현하였다. 이때 펀칭 틀은 Fig.3(a)와 같으며 Fig.3(b)와 같이 두께 10 μ m의 Al 판재에 홀 펀칭을 수행하였다. 이때 펀칭 성형력은 1.85N이라고 보고하였다.

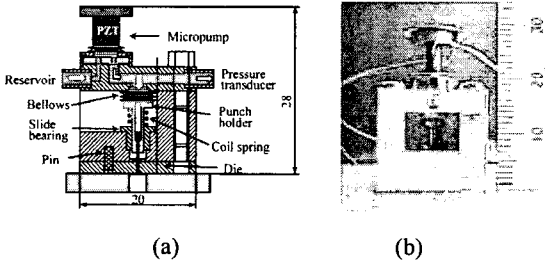


Fig.2 일본 TIT의 마이크로 프레스
 [(a) 시스템개략도, (b) 실제시스템]

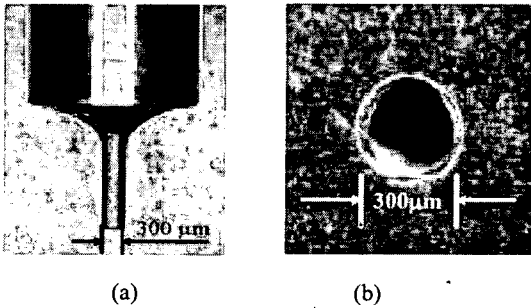


Fig.3 일본 TIT 마이크로 프레스의
 성형 틀과 펀칭된 홀 형상

2.1 국내 연구동향

국내의 마이크로 성형 기술 개발은 1999년에 본격적으로 시작이 되었다. 하지만 지금까지 개발된 기술은 초소형 부품의 성형에 관해 국한되어 있고, 이러한 마이크로 성형공정에 사용되는 장비의 소형화에 관한 연구는 거의 전무한 상황이다. 일례로 한국생산기술연구원에서 개발한 엔진 연료 분사

용 초소형 노즐을 성형할 수 있는 마이크로 부품 성형용 복합 성형 프레스의 경우 Fig.4에 나타난 바와 같이 시스템의 크기가 길이 1080mm, 너비 700mm, 높이 2050mm로 마이크로 성형장비의 개념보다는 기존의 상용화된 성형장비에 더 가깝다고 할 수 있다.

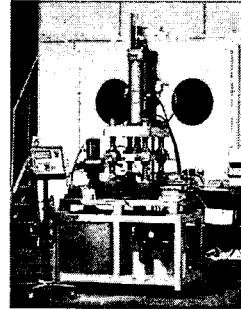


Fig.4 복합성형 프레스(KITECH)

또한, 서울대학교에서는 극박판재의 정밀 전단 성형에 관한 연구를 수행하기 위하여 Fig.5와 같이 마이크로 펀칭 시스템을 개발하였으며 이 장비를 이용해 직경 25 μ m의 홀 펀칭에 성공한 바 있다.

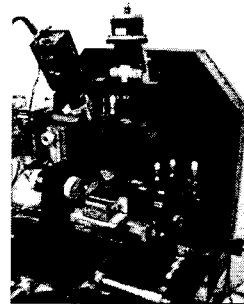


Fig.5 마이크로 홀 펀칭 프레스 시스템(서울대)

이상과 같이 국내에서는 초소형 성형에 국한하여 관련 기술이 개발되어 왔으나, 관련 시스템의 소형화에 관해서는 연구가 전무하다고 볼 수 있다.

3. 마이크로 소성성형 시스템

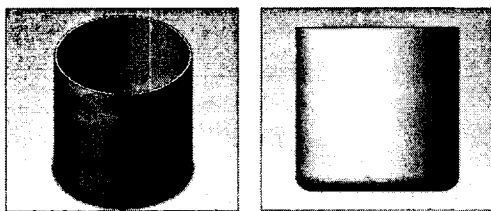
마이크로 성형 시스템 중 마이크로 성형 프레스와 관련된 연구 개발은 일본에서 주로 이루어지고 있는 상황이고, 개발된 프레스는 모두 단공정에 그치고 있다. 하지만, 보다 실용

적인 목적에 부합하기 위해서는 다공정이 가능한 프레스에 대한 연구 및 개발이 필요한 상황이다. 마이크로 성형 시스템의 소형화에 관한 연구를 진행하기 위해 본 논문에서는 박판 성형용 마이크로 프레스의 활용도를 높이기 위해 보다 다양한 형상 구현을 위한 다공정 성형이 가능한 마이크로 Deep Drawing 공정, 마이크로 펀칭 공정, 마이크로 리스트라이킹 공정 등을 포함하는 장비의 개발을 목표로 설정하였다. 이러한 다공정 마이크로 성형 시스템을 개발하기 위해서는 관련된 공정에 대한 연구가 먼저 선행되어야 한다.

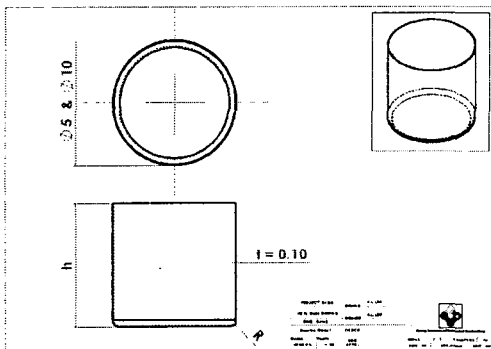
이러한 마이크로 다공정 성형 공정에 대한 연구를 진행하기 위해 본 논문에서는 마이크로 Deep drawing 공정에 대한 가공소재 선정 및 공정 해석을 수행하여 실제 시스템을 제작하기 위한 기초연구를 수행하였다.

3.1 마이크로 Deep Drawing 공정 해석

마이크로 Deep drawing 공정에 대한 해석을 수행하기 위해 성형 대상물의 형상 및 크기를 다음의 Fig.6에 나타내었다. 그리고 성형 소재로 100 μ m 두께의 순도 99.0% 알루미늄 박판을 사용하였다.



(a) Deep drawing 대상의 형상



(b) Deep drawing 대상의 크기 (도면)

Fig.6 마이크로 Deep drawing 대상의 형상 및 크기

Deep drawing 공정 해석을 수행하기 위한 Blank holder

압력(P_{BH})은 알루미늄 소재의 경우 5-10kgf/cm²에서 선정하기 때문에 해석변수로 설정을 하여 가장 적정한 압력조건을 도출해 내었다. 그리고, Fig.7에 나타난 성형대상의 Blank의 지름(D)은 Eq.1의 수식을 사용하여 구하였다.

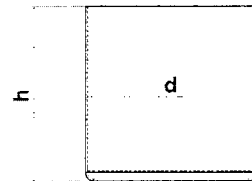


Fig.7 Blank 지름(D) 계산 대상

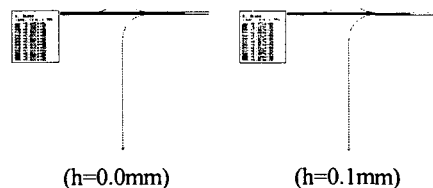
$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad \text{Eq.1}$$

Fig.6(b)의 $\Phi 5$ 와 $\Phi 10$ 의 두 경우에 대해 Eq.1을 사용하여 구한 Blank 지름(D)은 $\Phi 10.91$ 과 $\Phi 22.09$ 이며 이 결과들을 이용하여 해석을 수행하였다. Drawing 대상 외경이 $\Phi 5$ 와 $\Phi 10$ 의 두 가지 경우에 대한 중요 Drawing parameter들은 Table.2와 같다.

Table.2 Drawing Parameter

Parameter		$\Phi 5$	$\Phi 10$
Friction coefficient	Die-Blank	0.1	
	Holder-Blank	0.1	
	Punch-Blank	0.2	
Holding force		40N	
Fillet Radius of die		1.0mm	
Fillet Radius of punch		0.5mm	
Diameter of punch		4.784mm	9.784mm
Drawing velocity		1mm/sec	
Max. h/d		1.0	

위의 조건들을 가지고 상용 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 대상 외경이 $\Phi 5$ 와 $\Phi 10$ 에 대한 Drawing 공정 해석결과를 Fig.8과 Fig.9에 나타내었다.



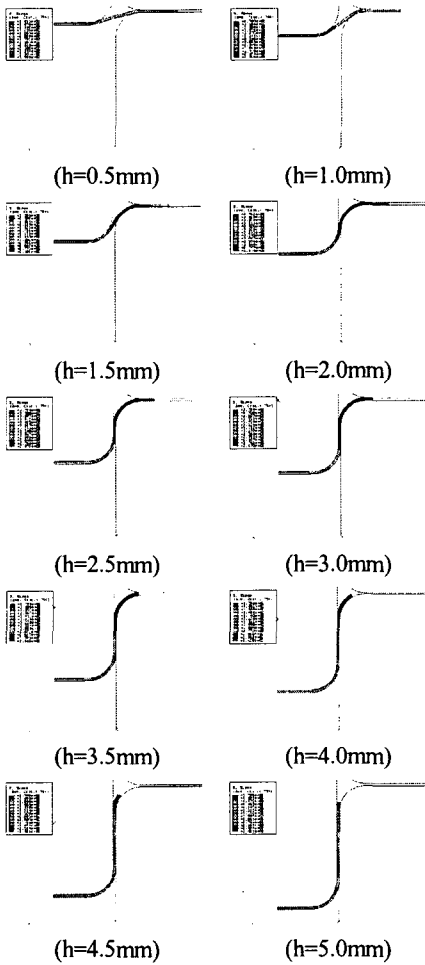


Fig.8 Drawing 대상 외경 $\Phi 5$ 에 대한 해석결과

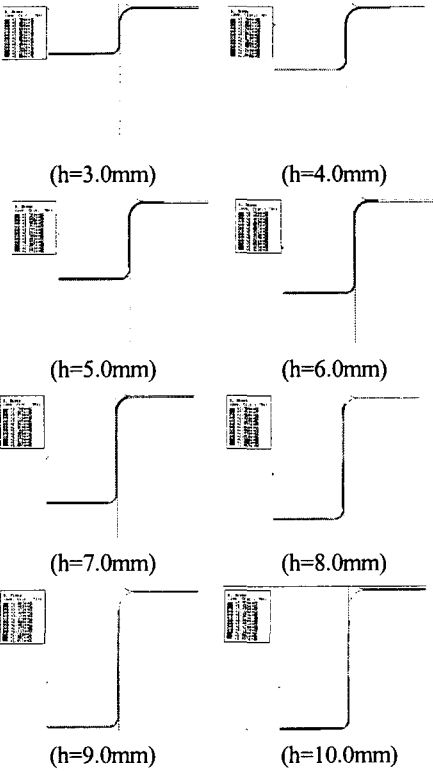
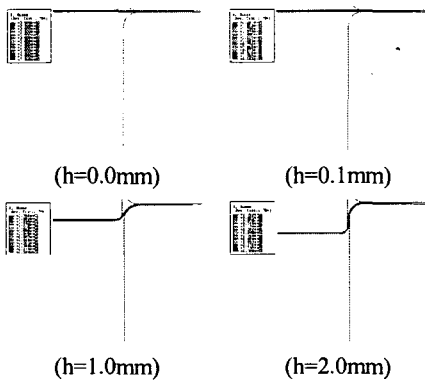
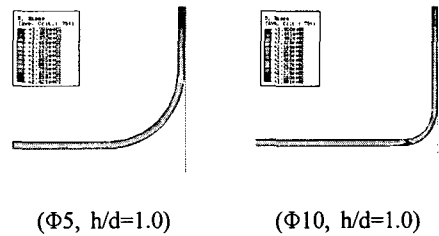


Fig.9 Drawing 대상 외경 $\Phi 10$ 에 대한 해석결과

위의 해석 결과 $\Phi 5$ 의 경우 최대 응력이 379.9MPa이고, $\Phi 10$ 의 경우에는 최대 응력이 380MPa이 나왔다. 두 가지의 경우 최대 응력은 비슷하나 아래 Fig.10에서 보이는 바와 같이 최대응력이 작용하는 부위가 $\Phi 5$ 의 경우에는 Punch와 Die사이에서 나타나고, $\Phi 10$ 의 경우에는 Punch의 Fillet 부위에서 발생함을 확인할 수 있었다.



($\Phi 5$, $h/d=1.0$) ($\Phi 10$, $h/d=1.0$)

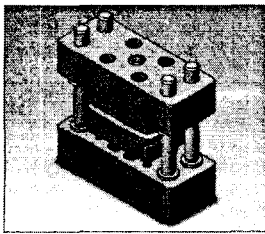
Fig.10 Punch fillet 부위의 응력집중 비교

이러한 결과는 두 가지의 경우에 모두 Punch의 Fillet radius를 모두 0.5mm로 동일하게 사용을 하였기 때문에 발

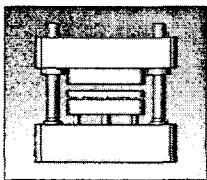
생하는 결과이다. 그러므로 $\Phi 10$ 의 경우에 Punch의 Fillet radius를 증가시켜야 Fillet부위에서 파단이 되는 현상을 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 해석을 마이크로 박판의 소성 성형공정에 적용을 하여 모든 성형 변수들이 공정에 미치는 효과에 대한 데이터를 확보한 후 실제 실험 시스템을 제작을 한다면 비용 및 시간적으로 많은 긍정적인 효과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

3.2 마이크로 소성 성형 시스템의 설계

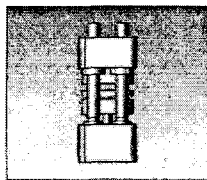
3.1절에서 수행된 해석결과들을 바탕으로 실제 시스템을 제작하기에 앞서 공정변수들에 대한 데이터를 확보하여 해석결과의 타당성 및 시스템의 적정성을 판단하기 위해 실제 시스템을 설계하였다. 시스템의 제작이 완료가 된다면 해석결과의 검증 및 실제 데이터와 해석 데이터 사이의 Tuning 작업이 이루어져서 더욱 효율적인 연구를 수행할 수 있을 것이다. 아래의 Fig.11은 3D CAD를 이용하여 마이크로 소성 성형 시스템을 설계한 모델이다.



(Iso-View)



(Front-View)



(Side-View)

Fig.11 마이크로 소성 성형 시스템의 3D Model

4. 결 론

본 논문에서는 마이크로 부품을 소성 성형방법을 이용하여 제작하기 위한 시스템 대한 연구결과를 제시하였다. 고정밀의 시스템을 구축하기 위해서는 많은 비용, 시간 및 노력이 필요하다. 그러한 연구진행상의 효율성을 증대하기 위해서는 반드시 시스템에 존재하는 변수들에 대한 명확한 규명

이 선행되어야 하므로 본 논문에서는 효율적이고 마이크로 소성 성형공정에 적합한 시스템을 구축하기 위한 선행연구 결과를 제시하여 추후에 진행될 연구의 밑바탕을 마련하였다. 그리고 이러한 해석적 방법을 이용한 연구결과의 적정성을 평가하기 위해 해석조건과 부합하는 실험 시스템을 구축하여 해석의 적정성 검토 및 해석결과와 실험결과와의 Tuning을 위한 데이터를 확보하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 “차세대 마이크로 팩토리 시스템 기술 개발 사업”의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 올립니다.

참고 문헌

1. Z. Tourki, A. Zeghloul, G. Ferron, 1996, "Sheet metal forming simulations using a new model for orthotropic plasticity", Computational Materials Science, Vol.5, pp. 255~262
2. Amit Jaisingh, K. Narasimhan, P.P. Date, S.K. Maiti, U.P. Singh, 2004, "Sensitivity analysis of a deep drawing process for miniaturized products", Journal of Materials Processing Technology, Vol.147, pp. 321~327
3. S. Berbenni, V. Favier, X. Lemoine, M. Berveiller, 2004, "A micromechanical approach to model the bake hardening effect for low carbon steels", Scripta Materialia, Vol.51, pp. 303~308
4. J. Wu, R. Balendra, Y. Qinb, 2004, "A study on the forming limits of the hydromechanical deep drawing of components with stepped geometries", Journal of Materials Processing Technology, pp. 242~246