한국공작기계학회논문집 Vol.11 No.4 2002. 8.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

축대칭 다단계 딥드로잉 공정의 성형인자에 대한 연구

여은구*, 조선형+, 이용신++

(논문접수일 2001. 11. 26, 심사완료일 2002. 4. 30)

A Study on the Formability Factors of Axisymmetric Multi-Stage Deep Drawing Processes

Eun-Gu Yoh*, Seon-Hyung Jo+, Yong-Sin Lee++

Abstract

Formability in deep drawing process depends not only on a drawability of workpiece material but also on process conditions such as die punch corner radius, lubricant conditions, punch-die clearance etc. For instance, bending resistance should be reduced by increasing die round appropriately, drawing load should be minimized by improving the lubricant condition between die and material, and blanking load should be increased by selecting a pertinent punch round and by augmenting the friction resistance in punch. In this study, a multi-stage deep drawing process is analyzed using ABAQUS. The effects of formability factors, such as die shoulder radius, punch-die clearance and friction coefficient, are investigated, and the results are also discussed in detail.

Key Words : Multi-stage Deep Drawing(다단계 딥드로잉), Die Shoulder Radius(다이곡률반경), Form-ability Factor(성형인자)

1. 서 론

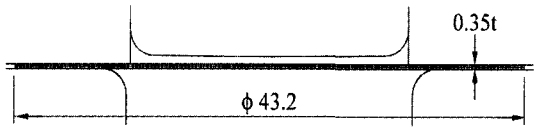
일반적인 판재 성형 분야의 일종인 딥드로잉은 이음매가 없는 용기를 성형하는 가공법으로 공정이 단순하고 대량생산이 가능하여 자동차, 항공기, 가전산업 등에 널리 이용되고 있다. 딥드로잉 성형중 재료의 변형은 소재가 펀치에 의해 다이속으로 빨려 들어가면서 플랜지(flange)부에서 원주방향으로 압축력을 받으며, 다이 모서리 반경부에서는 굽힘(bending)과 펴짐(unbending)이 이루어지면서 벽면을 형성한다. 가공소재로 사용되는 박판은 두께가 길이 혹은 폭에 비하여 치수가 훨씬 작기 때문에 딥드로잉 가공중에 생기는 원주방향의 압축응력에 대하여 주름(wrinkles)이나 파

* 주저자, 국민대학교 자동차전문대학원 (egyoh@kookmin.ac.kr)
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1번지, Tel: 02-910-4818
+ 동서울대 기계공학부
++ 국민대 기계자동차공학부

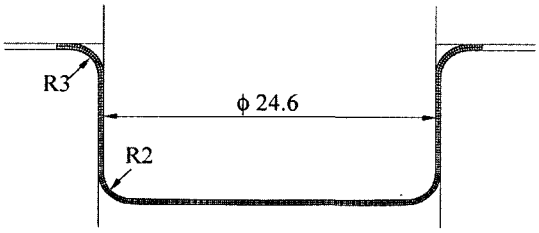
단(tears)과 같은 결함(damage)이 종종 발생한다. 그러므로 결함없는 최종제품을 만들기 위하여 고려해야될 조건으로 재료특성, 공구형상, 윤활조건, 가공속도 등의 인자들이 있으며, 이러한 것은 서로 영향을 받고있어 간단히 취급하기가 쉽지않다. 일반적으로 딥드로잉 가공의 성형성을 향상시키기 위해서는 소재 자체의 우수한 드로잉성(draw-ability)이 요구된다. 또한 성형성 향상을 위한 공정조건으로는 다이반경을 적절히 크게 함으로써 굽힘저항을 감소시키고, 다이와 소재판 사이의 윤활조건의 향상을 통하여 성형하중을 극소화하며, 펀치부에서 마찰저항의 증가 및 적절한 펀치반경(punch round)을 선택함으로써 파단하중을 증가시켜야 하는 것으로 알려져 있다.

다이 곡률반경에 관한 연구는 지금까지 활발히 진행되고 있다[1-5]. Oehler와 Kaiser[6]는 실험식에 변수의 영향을 다르게 정의하였다. 또한 Romanowski[7]는 상대두께비(relative sheet thickness, t/D)를 고려해서 실용적인 값을 구하였으며, Sellin[8]은 판두께에 대한 비율로 다이 곡률반경을 결정하였다. 펀치-다이 틈새(clearance)에 관한 연구는 Hilert가 재료별로 구분하여 펀치-다이 틈새를 나타내었고, Oehler와 Kaiser는 Guth 등의 실험을 기초로 하여 간단한 실험식을 수립하였다. 반면에 Siebel[9]은 Oehler의 실험식에 기계적 특성을 가미하여 틈새를 결정하였다.

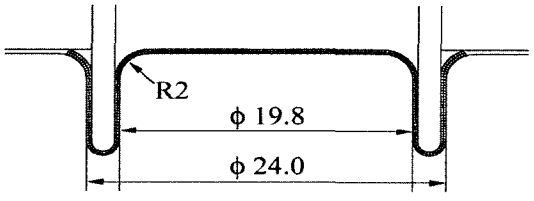
본 연구에서는 다단계 딥드로잉 공정을 ABAQUS로 모델링, 해석하여 구한 결과를 비교 분석하고, 다이반경, 틈새(clearance), 마찰계수(friction coefficiant)를 각각 변화시켜 성형성에 미치는 성형인자의 영향에 대해서 연구한 결과를 해석하고자 한다.



(a) Before process



(b) After 1st drawing process



(c) After reverse drawing process

Fig. 1 FE models for analysis

2. 유한요소해석

본 연구에서 해석하고자 하는 딥드로잉 제품은 냉장고 냉동기에 들어가는 부품으로 1차 드로잉제품을 역드로잉 공정을 통해서 완성되어진다. 이러한 다단계 딥드로잉 해석을 위하여 상용 프로그램인 ABAQUS로 모델링을 하였다. 축대칭 사각형 요소를 사용하였으며, Fig. 1에서 보이는것과

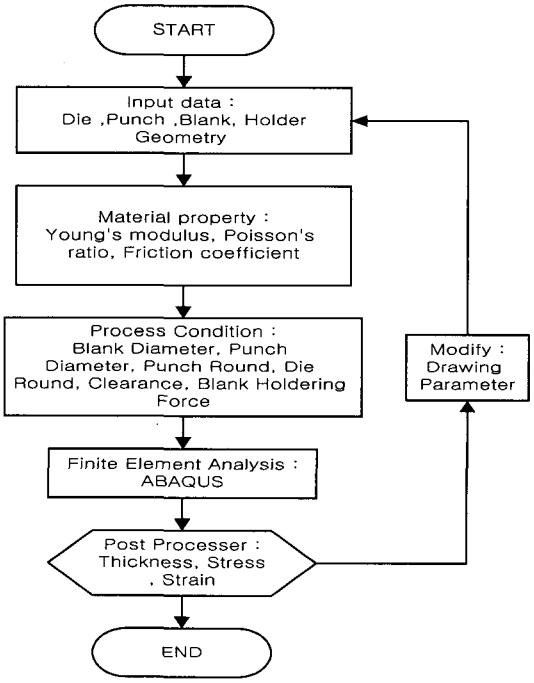


Fig. 2 Block diagram of process sequence design in axisymmetric deep drawing

Table 1 Material properties of SPCC

Young's modulus(GPa)	200
Poisson's ratio	0.3
Yield stress(MPa)	380
Tensile strength(MPa)	760
Friction coefficient	0.02 - 0.05

마찬가지로 블랭크는 탄소성체로 가정하였고, 나머지 다이, 펀치, 블랭크 홀더는 강체로 가정하였다. Fig. 1 의 (a)는 초기 공정상태, (b)는 1차 공정 후의 모습, (c)는 역드로잉 공정이 끝난 상태의 그림이다. 해석에 사용한 블랭크 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

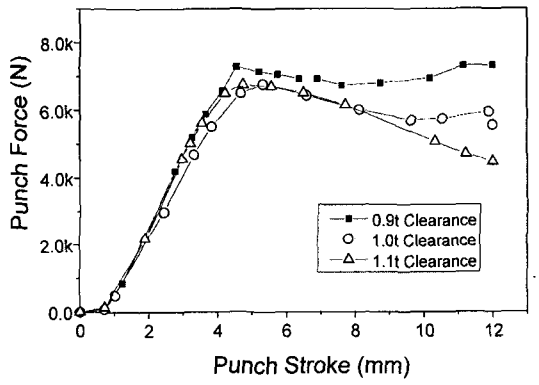
펀치의 속도는 12mm/sec 로 하였고, 해석에 사용된 블랭크의 재질은 SPCC 이다. Fig. 2는 본 연구에서 해석을 진행한 공정을 모듈별 흐름으로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

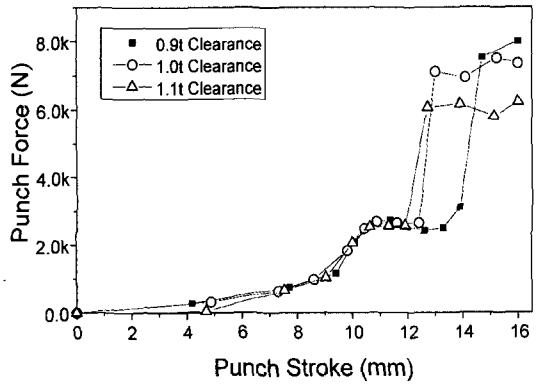
다단계 딥드로잉에서 성형성에 영향을 미치는 인자로 여러 가지가 있겠지만 본 연구에서는 펀치와 다이 사이의 틈새, 다이의 모서리반경, 윤활에 따른 마찰력의 변화에 대하여 고려해 보았다. 각 조건에 대하여 해석을 수행하였고, 펀치하중력, 성형후 재료의 두께변화를 비교하였다.

3.1 틈새 변화에 따른 성형하중과 두께변형

펀치와 다이의 틈새는 큰 저항을 받지 않고 다이 내로 원활히 소재가 유입되도록 적절한 간격을 주는 것이 주된 목

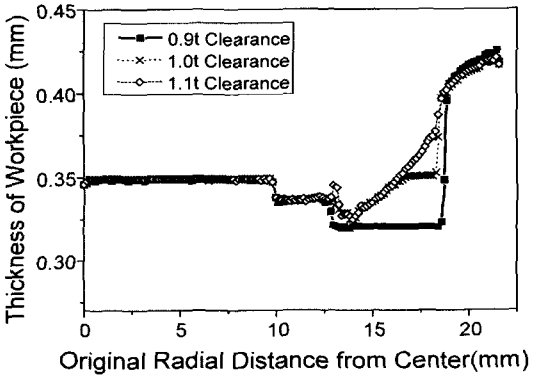


(a) 1st drawing process

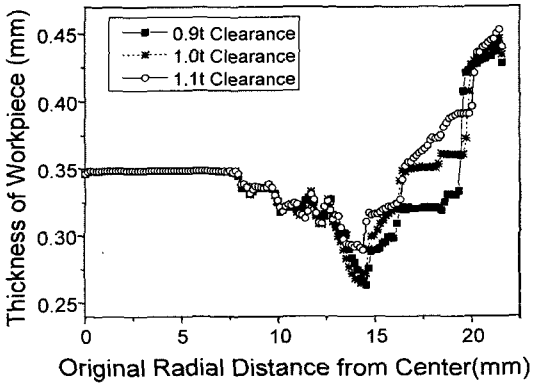


(b) reverse drawing process

Fig. 3 Comparison of punch force among the different clearance in the drawing process



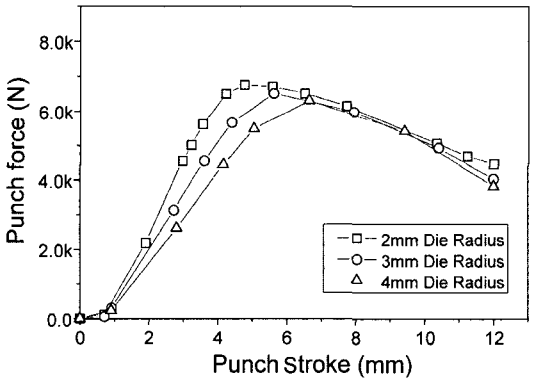
(a) 1st process drawing



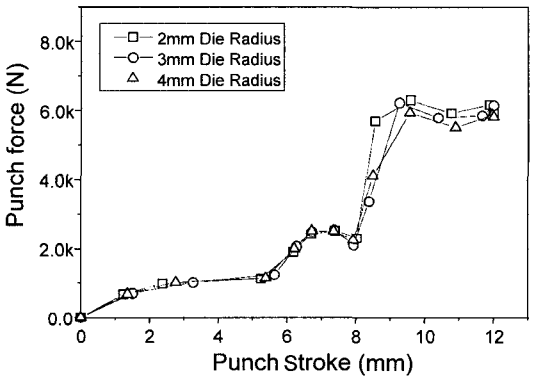
(b) reverse drawing results

Fig. 4 Comparison of blank thickness among the different clearance in the drawing process

적이다. 펀치 곡률반경부와 측벽 연결부분에서는 얇아짐(thinning)이 일어나고, 플랜지부와 측벽 연결부분에서는 두꺼워짐 현상이 일어난다. 이러한 현상으로 인하여 두꺼워진 플랜지 측벽부에서 심하게 아이어닝(ironing)되어 소착(cold welding)현상이 발생하기도 한다. 따라서 일반적인 딥드로잉의 경우 소재두께보다 어느 정도 크게 여유를 주어 가공해야 함을 알 수 있다. 그러나 너무 큰 틈새를 주면 주름이 발생할 가능성이 높으며, 최종 제품의 정도에 따라 다단계 딥드로잉의 경우 아이어닝을 하기 위해 소재두께 이하로 틈새를 주기도 한다. 본 연구에서는 소재두께에 대하여 0.9t, 1.0t, 1.1t의 세가지 경우에 대하여 해석을 하였다. Fig. 3은 틈새를 변화시켰을 때 펀치행정에 따른 드로잉력의 그래프인데, 행정의 길이가 짧고, 빠른 펀치속도로 인하여 1차 드로잉에서는 아이어닝가공이 일어나는 0.9t에서 최대 펀치력이 약간 크게 나타나고 있다. 펀치력이 최대치를 지나 감소하던 하중에 0.9t와 1.0t에서 지속적인 하중에 보여지는데 이러한 현상은 두꺼워진 플랜지 부분이 다이와 펀치사이에 끼면서 일어나는 하중력이다. 역드로잉 후반에 가서는 소재의 2차 유입이 발생하면서 역드로잉력 또한 커지는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 4는 드로잉공정이 끝났을 때 재료의 중심에서 끝단까지의 두께변형량에 대한 그래프이다. 1차 드로잉의 경우 펀치 곡률반경부와 측벽 연결부분에서 얇아짐이 일어나다가 점차 두꺼워지는데 0.9t 틈새조건과 1.0t 틈새조건은 아이어닝이 후반부에 일어남을 관찰할 수 있다. 또한 역드로잉의 경우 0.9t와 1.0t의 펀치 곡률반경부에서 국부적으로 얇아짐의 정도가 커서 결함발생의 소지가 있음을 알 수 있다. 끝으로 재료 끝단에서 약간의 아이어닝 현상이 관찰되고 있다.

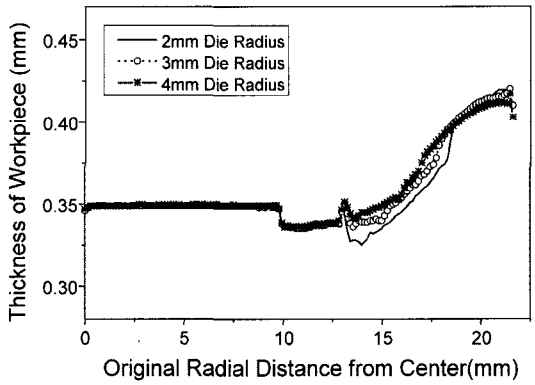


(a) 1st drawing process

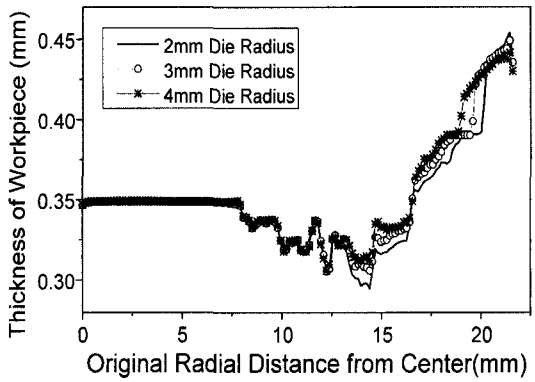


(b) reverse drawing process

Fig. 5 Comparison of punch force among the different die shoulder radius in the drawing process



(a) 1st process drawing

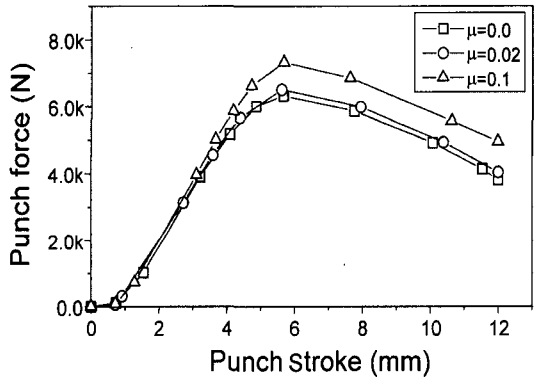


(b) reverse drawing results

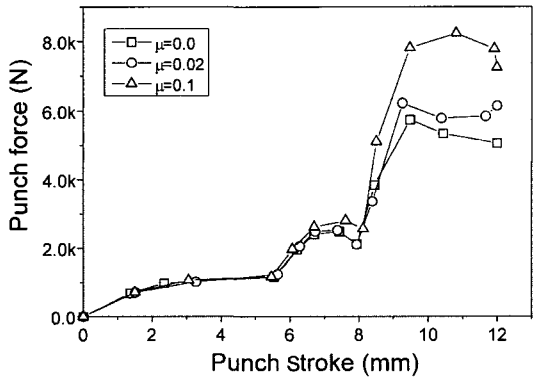
Fig. 6 Comparison of blank thickness among the different die shoulder radius in the drawing process

3.2 다이의 모서리 반경에 따른 영향

다이 모서리부에서의 변형거동은 소재가 펀치에 의해 유입될 때 소재는 굽힘과 펴짐이 이루어지며 원주방향으로 압축응력이 작용하여 직경이 줄어들고, 단면이 두터워 진다. 블랭크 홀더와 다이면 사이에서 주름이 발생되지 않도록 소재를 적절한 압력으로 눌러준다. 일반적으로 다이 모서리부의 반경은 펀치 모서리부의 반경보다 약간 크게 주며 소재 두께의 10배이상을 넘지않도록 하는데 그것은 다이 모서리부의 반경을 크게 함으로 펀치하중의 최대값을 감소시킬 수 있는 반면에 오히려 주름이 발생되어 파단을 일으키는 경향이 있기 때문이다. 반대로 다이 모서리부의 반경을 너무 작게 하면 펀치 모서리에서 드로잉 하중이 국부적으로 많이 걸려 소재가 얇아지거나 파단 또는 천공되는 현상이 발생하기 때문이다. 본 연구에서는 펀치 모서리반경을 2mm로 고정한 상태에서 다이 모서리 반경을 2mm, 3mm, 4mm로 점차 증가시키며 해석을 수행하였다. Fig. 5는 펀치행정에 따른 펀치하중값을 다이 모서리반경에 따라 비교하였는데 1차 드로잉에서 반경값이 커질수록 하중이 작아지는 경향을 확인할 수 있고 역드로잉의 경우 그 차이가 미비한 것을 관찰할 수 있다. Fig. 6은 소재의 두께와 다이 모서리반경과의 관계를 나타내고 있고 다이 모서리반경이 2mm의 경우 중심으로부터 14mm지점에서 급격히 얇아지고 있는데 이것은 다이 모서리반경이 3mm와 4mm에서는 보여지지 않고 있다. 역드로잉의 경우에도 다이 모서리반경이 2mm의 경우 1차 드로잉으로 인해 얇아진 곳이 또다시 얇아져 국부적으로 취약해진 것을 관찰할 수 있다.

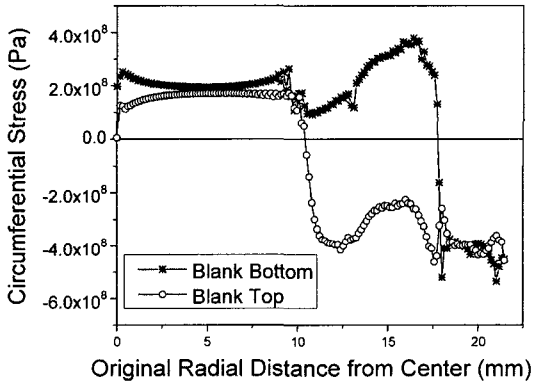


(a) 1st drawing process

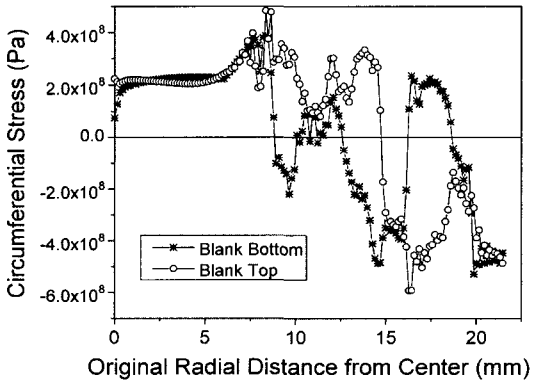


(b) reverse drawing process

Fig. 7 Comparison of punch force among the different friction coefficient in the drawing process



(a) 1st drawing process



(b) reverse drawing process

Fig. 8 Comparison of blank circumferential stress in the drawing process

3.3 마찰계수의 변화에 따른 영향

일반적으로 다이면 윤활상태가 좋아질수록 펀치하중이 작아지는데 그것은 마찰력이 줄어들기 때문이다. 윤활효과가 좋아질수록 원주방향 응력이 증가하여 블랭크 플랜지부위에 초기 두께보다 두터워지면서 주름현상이 발생할 수 있다. 이러한 결함을 보완하기 위하여 블랭크 홀더력을 상승시키기도 한다.

Fig. 7은 마찰계수의 차이에 따라 펀치력의 이력을 보여주고 있는데 마찰력이 커질수록 펀치력도 커져감을 관찰할 수 있다. Fig. 7의 (b)는 역드로잉 공정에서의 펀치이력인데 마찰계수가 0.1의 경우 펀치해정 중 9mm 지점에서부터 국부적인 넥킹이 일어난다. Fig. 8은 원주방향 응력에 대해서 다이쪽 블랭크면의 응력값과 펀치쪽 블랭크면의 응력값을 비교하였다. 소재가 펀치에 의해 유입되는 부위에서 두 면의 상태가 현저하게 구분되는데 펀치쪽 소재는 원주방향 압축하중을 받는 반면 다이쪽 소재는 원주방향 인장응력상태에 놓이게 된다. 이러한 현상은 역드로잉을 해줌으로 반전되는데 역드로잉 펀치와 접하는 부위의 소재에 압축이 걸리며 반대쪽 소재에는 인장하중이 분포한다. 얇은 박판에서 큰 폭의 인장과 압축이 같이 존재한다면 당연히 그 곳은 파손에 취약하리라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다단계 딥드로잉 가공에 있어서 틈새, 다이의 모서리 반경, 마찰력이 성형성에 어떤 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 상용 해석프로그램을 통한 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1차 드로잉과 2차 역드로잉 공정이 진행됨에 따라 소재의 플랜지부위가 초기 두께보더 더 두꺼워졌고, 이로 인해 틈새가 0.9t, 1.0t의 경우 소재 플랜지 부위에서 아이어닝 현상이 일어난다. 그러므로 가장 적은 하중으로 국부적 얇아짐의 정도를 최소화할 수 있는 틈새는 세가지 조건 중 1.1t 이다.

(2) 다이의 모서리반경을 세가지로 나누어 모사한 결과 펀치의 모서리반경과 동일한 크기로 조건을 준 2mm의 경우만 국부적 얇아짐의 정도가 심해지는 것을 관찰할 수 있었다. 3, 4mm의 조건의 모사결과는 거의 같은 값을 갖고 있었으므로 소재 플랜지부에 주름한계조건인 소재두께(0.35mm)의 10배를 넘지 않는 3mm가 가장 적당한 모서리반경이다.

(3) 마찰계수 값이 커질수록 펀치력도 커져감을 볼 수 있고, 그 값의 크기가 0.1의 경우 2차 역드로잉 최종공정에서 국부적인 네킹(necking)이 일어난다. 그러므로 윤활재를 사용하여 마찰계수의 값을 최소하하는 것이 성형성 향상에 도움이 되며 본 모사결과 마찰계수의 값이 세 가지 조건 중에 0.02가 가장 적절한 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었슴.

참 고 문 헌

(1) Takuda, H., Mori, K., Jinno, A. and N. Hatta, "Finite Element Simulation of Redrawing Processes with Ductile Fracture Criterion", *Proceedings of AEPA 96, Hiroshima, Japan*, pp. 691～696, 1996.

(2) Eary, D. F. and Reed, E. A., "Techniques of Press-working Sheet Metal", *Prentice-Hall*, 1974.

(3) Esche, S. K., Khamitkar, S., Kinzel, G. L. and Altan, T., "Process and die design for multi-step forming of round parts from sheet metal", *J. of Material Processing Technology*, Vol. 59, pp. 24～33, 1996.

(4) Yossifon, S., Sweeney, K., Ahmetoglu, M. and Altan, T., "On the acceptable blank holder force range in the deep-drawing process", J. of Materials Processing Technology, Vol. 33, pp. 175～194, 1992.

(5) 김두환, "원통형 용기의 다단계 디프드로잉에 대한 다이 곡률반경 및 틈새의 영향", 한국소성가공학회지, 제8권 제3호, pp. 262～268, 1999.

(6) Oehler, G., and Kaiser, F., "Blanking, and, Punching, and Drawing Tools", 6th ed., *Berlin Heiderlberg / New York, Springer*, 1973.

(7) Romanowski, E., "Handbook of Blanking Technology (in Germany)", *Berlin, VER Verlag Technik*, 1959.

(8) Sellin, W., "Handbook of drawing Technology", *Belin. Springer*, 1931.

(9) Siebel, E. and Beisswanger, H., "Deep Drawing", *Munchen, Carl Hanser*, 1955.