

스테인리스 강 STS305의 디프 드로잉 가공에 관한 실험적 연구

김 두 환*

(1998년 5월 27일 접수)

Experimental study on the severe deep drawing for complex cylindrical housing of STS 305 stainless steel

Doo - hwan Kim

Abstract

Recently, many automotive parts have been made with stainless steels by deep drawing processes. But there are various problems occurred in deep drawing works of stainless steels compared with low carbon steels. For the severe deep drawing of complex cylindrical housing, optimum process planning is required to eliminate intermediate annealing, improve shape accuracy and maintain surface integrity without drawing defects such as tears, wrinkles and scratches, or galling. Therefore, in this study, a sample process planning of the severe deep drawing process is applied to a complex cylindrical housing needed for a 6 multi-stepped deep drawing of type STS 305. A series of experiments are performed to investigate optimum process variables such as drawing rate, radius and clearance. Through experiments, the variations of the thickness strain distribution and hardness distribution in each drawing step are observed. Also, the effects of other factors on formability such as drawing oil, blank holding force and die geometry are examined and discussed.

Key Words : Severe Deep Drawing, Thickness Strain Distribution, Hardness Distribution Stainless Steel, Optimum Drawing Rate, Process Variables, Work Hardening

1. 서 론

스테인리스 강(stainless steel)은 일상생활에 밀접한 주방기구, 전기기구, 가정 용품에서 건축 내장용, 자동차 부품 및 화학공업용의 산업기기 등 광범위하게 사용되는 재료이다.

프레스 가공에 쓰이는 스테인리스 강판은 주로 페라이트계(ferritic types)와 오스테나이트계(austenite

types)이며, 대개 내식성, 내산화성, 용접성, 강도 등 사용 환경을 고려해서 강의 종류가 결정된다. 따라서 성형성(formability)을 우선해서 재료를 선택할 수 없기 때문에 관련된 재료에 관한 성형기술의 대책과 연구가 필요하다.

또한 일반 냉간압연 강판에 비해 스테인리스 강판은 인장강도가 높고, 가공경화 및 소착(galling) 현상이 일어나기 쉬우며, 열전도성이 나쁘기 때문에 균열(cracks), 주름 발생, 스프링 백 및 제품 외관의 표면 긁힘(scratches)

* 만도기계(주) 생산기술원

등의 성형성과 제품의 형상성에 관련된 결함(defects)들이 많이 발생된다.⁽¹⁻²⁾ 대부분 다단계 공정(multi-process)의 연속 재 드로잉(succeeding redraw)으로 구성되어 있기 때문에 각 공정간 최적 가공조건 설정, 공정수 줄이기, 중간소둔 삭제 등의 공정설계, 신 가공법 및 기초 소재에 관한 연구가 요구되고 있으며, 그와 관련 내용이 다수 보고되고 있다.⁽³⁻⁷⁾ 이러한 연구 가운데 Y. WATANABE는 스테인리스 온간 드로잉 가공법⁽⁸⁾에 관한 연구를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 STS 305의 성형 조건을 실험적으로 연구하고자 한다. 특히, 상온에서 중간 어닐링을 하지 않고 성형할 수 있는 최적 가공 조건들을 조사하고, 각 공정간의 두께 변형률분포와 가공경화(work-hardening)에 따른 경도분포 등을 비교 검토하여 제안된 성형공법의 유용성을 검증하고자 한다.

2. 재료 특성 및 성형성 조사

오스테나이트(A)계 스테인리스 강은 M계나 F계에 비해 가공성이 좋고, 프레스 성형성 및 용접성이 우수하며, 특히, 내식성, 내약품성, 내구성이 뛰어나므로 복잡한 제품 성형에 적합하다. 그러나 열팽창이 크고, 열전도율이 낮으며, 가공경화성이 있기 때문에 변형이나 스프링 백 현상이 기타 강 종에 비해 크다. 또한 냉간압연 강판 보다 1.5~2배의 변형 저항을 가지고 있어 다이에 긁힘(scratches) 및 소착(galling) 현상을 많이 일으키는 재료로 조사되었다.

STS 305는 Ni함유량이 높기 때문에 오스테나이트의 안정도가 높고, 연질로 연성(ductility)이 우수하다. 또한 이 소재는 소성변형에서 가공유기변태(deformation-induced transformation)가 일어나는 성질이 없어 시기 균열(season cracks)이 발생치 않으며, 잔류응력(residual stresses)도 적어 세로균열(stress corrosion cracking) 현상이 거의 없다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 그러므로 다단계 성형을 요하는 하우징 가공에 가장 적합한 소재라고 판단된다. 본 실험적 연구에서 실험된 STS 305 소재의 화학성분과 기계적 특성을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

박판가공(sheet metal processes)에서 성형 한계(forming limits)는 최대 드로잉할 수 있는 한계 드로잉율(Limiting Drawing Rate, LDR)로 나타내고 있으며, 초기 LDR의 값은 0.45(m_1), 재 드로잉(re-draw)이 0.76($m_2 \sim m_n$)으로 각각 발표되어 있다.^(12,13) 그러나 실제

Table 1 Chemical composition of tested specimen

Chemical composition/mass %						
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.03	0.53	1.08	0.017	0.003	11.69	17.63

Table 2 Mechanical properties of tested specimen

Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
62.1	56~59.8	141~148

로 대량생산의 응용 분야에 적용할 수 없는 실험 값이며, 대부분 경험적 한계 드로잉 율(empirical drawing limits)^(14,15)이 사용되고 있다. 본 연구에서의 최적 드로잉 율(optimum drawing rate, ODR) 실험은 LDR에 10~25%의 여유를 주어 고찰하였다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 또한 연속 재 드로잉(succeeding redraw)의 공정 수를 설정하기 위해 Romanowski에 의해 발표된 냉간압연 강판의 LDR Table^(18,19)을 이용하였다. 그러나 이 값들은 각 스테인리스 재질이나 판 두께, 최종 드로잉 율, 편차, 다이의 반경, 윤활, 형 재질 및 표면 상태, 성형 속도 등에 따라 달라질 수 있다.

그 외에 다단계의 연속 재 드로잉(succeeding redraw)을 거치는 동안 소재의 누적 가공경화(cumulative work hardening) 현상 때문에 플랜지 방향에 가공경화 된 측벽 부분이 연속 공정에서 드로잉 될 때, 성형성에 상당히

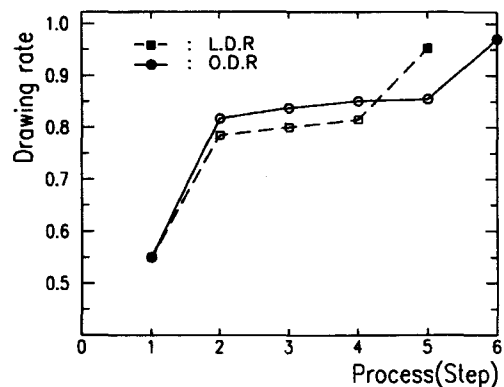


Fig. 1 Comparison of Limiting Drawing Rate (L.D.R.) with Optimum Drawing Rate (O.D.R.) in each process of severe deep drawing for complex cylindrical housing

영향을 미친다. 따라서 다단계 공정(multi-processes)일 때는 안전한 디프 드로잉(secure deep drawing)을 하기 위해서 공정간 드로잉 율 증분(drawing rate increments)을 최소화하고, 배분(balance)을 적절히 해야 함을 알 수 있다.^(20,21)

본 실험적 연구의 제품에 대한 각 공정별 한계 드로잉 율과 최적 드로잉 율을 비교해보면 다음 Fig. 1과 같다.

3. 최적 공정 설정 및 공정 변수의 영향

Fig. 2에 본 실험적 연구 대상의 디프 드로잉 제품에 대한 기하학적인 형상을 나타낸 것이다. 이 제품에 대한 공정은 (a) 1st Drawing, (b) 2nd Re-drawing ~ (f) 6th Re-drawing의 6공정의 다단계 디프 드로잉으로 구성되어 있다.

각 공정의 드로잉 반경은 중요한 공정변수 중 하나이다. 펀치 및 다이의 R형상은 반경부(shoulder radius)에서 파단(fractures or tears) 이나 특정 부분에서 두께의 얇아짐이 없어야 한다. 특히, 단면 형상 중에서 다이 반경은 성형성에 가장 큰 영향을 끼친다. 본 연구에서의 초기 드로잉 반경은 R의 형상(angular type)이며, 재 드로잉의 반경은 각 형상(radial type)으로 하였다. 그와 관련 치수는 판 두께 감소와 재 드로잉에서 발생하는 쇼크라인(Shock line) 현상 및 가공응력의 영향에 가장 적게 미치는 펀치 및 다이 반경으로 설정하였다.⁽²⁰⁾

박판 성형에 있어서 성형의 성공 여부를 좌우하는 또 하나의 중요한 공정 변수는 클리어런스이다. 오스테나이트 계는 재료 두께 보다 작게 주지 않으며, 재료와 작업 조건에 따라 최초 판 두께 보다 35~40% 정도 크게 주어야 한다는 연구가 보고 되어 있다.⁽¹⁾ 특히, STS 305 강판은 가공경화의 영향으로 플랜지부의 측벽 두께가 두꺼워지고 경도가 높아져 다이 입구 부위에 소착현상이 발생하면서

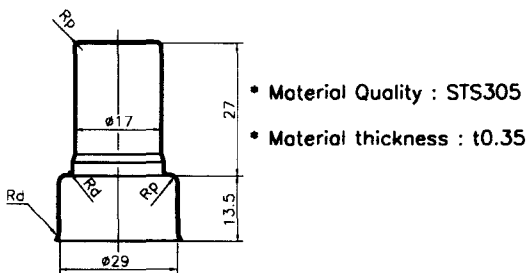


Fig. 2 Geometry of complex cylindrical housing

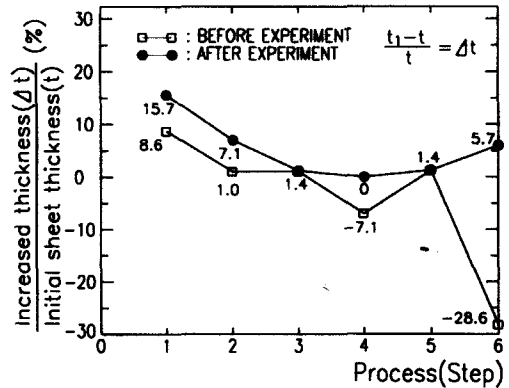


Fig. 3 Variations of punch and die clearance (per side) in each process of severe deep drawing for complex cylindrical housing

다이가 조기에 마모됨을 종종 발견하게 된다. 또한 가공경화로 인해 강도와 경도가 높아진 부분을 아이오닝 가공을 하게 되면 제품이 펀치 반경부에서 큰 인장을 받아 국부적 신장이 생기고, 심하면 파단이 된다. 따라서 아이오닝 가공이 일어나지 않도록 재료 두께 보다 크게 클리어런스를 주어야 하지만, 형상 치수의 정도(accuracy)를 고려하여 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 클리어런스를 적용 및 실험 고찰한 결과이다.

4. 하우징 성형 실험 방법

실험용 설비는 300톤 용량의 더블 크랭크 형식의 기계

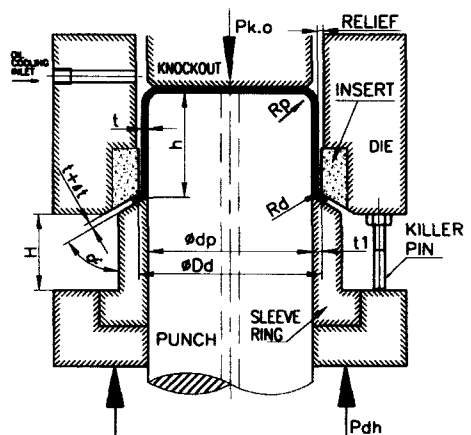


Fig. 4 Redrawing die geometry of severe deep drawing for complex cylindrical housing

식 프레스이며, 성형속도는 40spm에서 실험을 하였다. 제품 취출은 프레스 기계 내에 설치되어 있는 노크아웃 장치를 이용하였다.

본 실험의 소재는 두께가 0.35 mm이고, 블랭크 직경이 64 mm이다. 이 소재에 대한 주름의 민감도(wrinkling severity)가 0.5정도의 극 박판이기 때문에, 주름 억제를 위해 초기 드로잉에서 2톤의 높은 블랭크 홀딩 압력을 사용하였으며, 주름 발생 유무에 따라 압력 조절이 가능하도

록 하였다.

실험에 관련된 형 구조는 일반 원통형 디프 드로잉과 유사하지만, 재 드로잉 공정의 형 구조에서 스리브 링(sleeve ring)을 블랭크 홀더로 사용하였으며, 드로잉이 될 때, 소재의 유입(drawing)의 양을 조절하기 위하여 상하로 조정할 수 있는 킬리 핀(kill pin)을 설치하였고, 스리브 링과 다이 반경을 동일한 테이퍼 형상으로 실험하였다. 실험용 형 구조는 Fig. 4와 같다.⁽²¹⁾ 이 형에 사용된

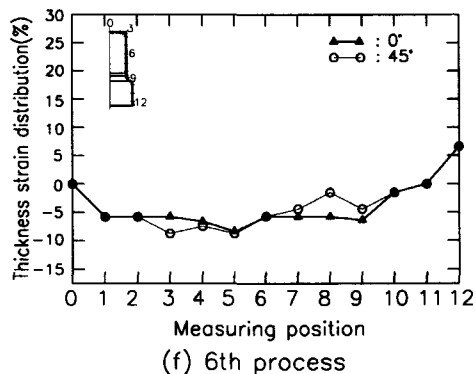
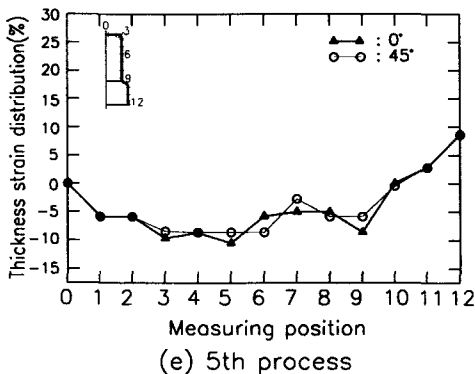
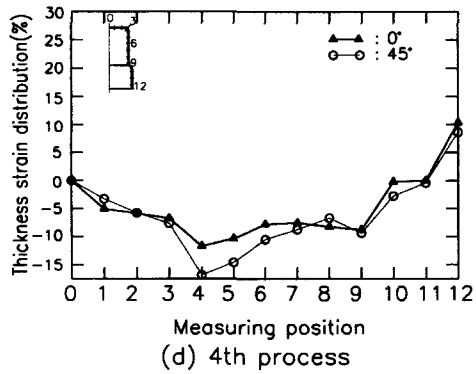
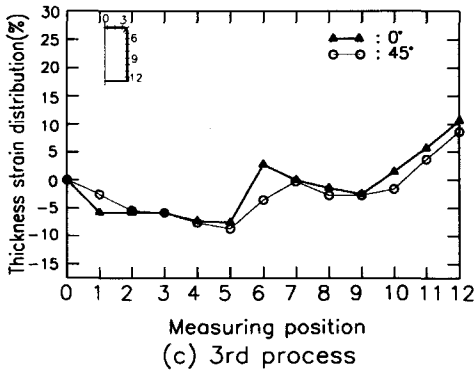
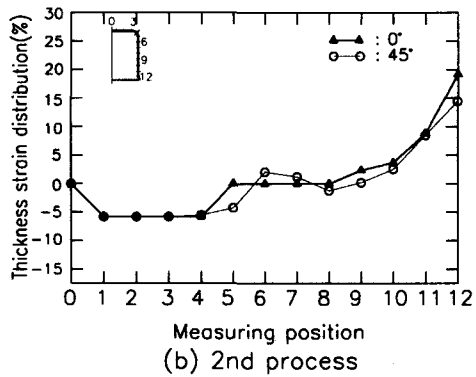
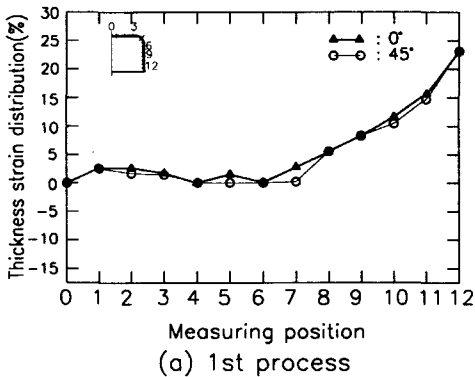


Fig. 5 Variations of thickness strain distribution in each process of severe deep drawing for complex cylindrical housing

주요 부분의 소재는 합금 공구 강과 고속도 강이며, 경도는 HRC 60으로 제작하였다.

3절에서 언급된 펀치와 다이 반경 부위의 형상은 드로잉 상태에 따라 변화시켜 가면서 실험하였다. 또한 드로잉 성을 높이기 위한 드로잉 오일은 점도(viscosity)가 80cSt, 마찰계수가 0.072인 CI (염소)계를 사용하였다.

각 공정 별의 두께 변화 분포 조사와 경도 분포 조사는 샘플을 단면으로 절개하여 포인트 마이크로 미터 측정기와 마이크로 비커스 경도기로 측벽에 대한 경도 분포를 측정, 조사하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 블랭크 홀딩 압력의 차이와 드로잉 오일의 도포량과 점도에 따라 측벽 주름과 플랜지 주름에 민감한 반응이 나타남을 관찰하였다. 점도가 높을수록 플랜지 면에 두꺼운 유막(oil film)이 형성되어 아주 심한 주름이 생기면서 펀치 반경부에서 넥킹으로 인한 파단이 발생되었다.

재 드로잉 공정에서는 소재 유입(drawing)을 조절하는 킬러 핀(killer pin)으로 다이와 스리브 링 사이의 간극을 조정함에 따라 드로잉 조건이 많은 차이를 나타내었다. 예를 들면, 간극이 지나치게 작았을 때는 소재 유입이 잘 안되어 찢어짐이 발생되었고, 너무 넓었을 때에는 주름이 심하게 발생되어 성형이 불가능함을 나타내었다.

앞의 2절에서 언급한 바와 같이 본 재료의 특성은 가공경화와 후부인장(hoop tension)으로 인한 심한 스프링백 때문에 상측 다이에 시이저(seizure) 현상이 발생되어

제품 취출이 곤란하였으며, 펀치 반경부 근처에서 국부적 신장이 일어나 취출할 때, 천공(piercing) 되는 현상도 있었다. 또 다른 문제는 다이의 입구부에 굽힘과 소착(galling) 현상⁽²²⁾이 심하여 다이 랜드(land)를 드로잉할 수 있는 최소 길이만 남기고 릴리프(relief)를 주어 유막이 차단되지 않게 하고, 스프링 백의 접촉 면적을 줄이는 동시에 마찰을 저감 시키면서 취출이 원활히 되도록 하였다. 다이의 형 소재는 초경으로 교환 및 표면처리를 하여 표면 결합을 제거 하였다. 또한 플랜지의 측벽 두께가 후육(wall thickness thickening) 되면서 심한 아이오닝 현상이 나타났다. 그 부분에 대해서 두께 변화에 상응하는 펀치, 다이의 간극을 조정하여 최적 클리어런스(Fig. 3 참조) 및 기타 드로잉 변수들을 조사하였다.

실험에서 보는 바와 같이 스테인리스 강관의 성형성에 영향을 끼치는 특성들이 많이 있지만, 그 중에서 단단계의 디프 드로잉을 거치면서 가공경화된 소재가 각 공정마다 어떤 변형 상태를 나타내는지를 고찰하였다. Fig. 5와 Fig. 6에 이와 관련 각 공정별 드로잉 율의 변화에 따른 두께 변형율분포 및 경도분포를 나타낸 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 STS 305 강관으로 고 난이도의 디프 드로잉 가공(severe deep drawing processes)을 요하는 제품을 개발하기 위해 실험용 형(proto type tooling)의 제작과 일련의 실험들을 통하여 최적 가공조건에 관련된 공정변수(process variables)들을 고찰하였고, 각 공정별 두께 변형율분포 및 경도분포를 비교 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Fig. 6에서 보는 바와 같이 오스테나이트 강관은 제1공정에서 가공경화가 가장 심하기 때문에 가능한 초기 드로잉에서 최대로 성형을 시키고, 재 드로잉 공정에서는 공정간 줄임양(% of reduction)을 최소화하여 가능한 가공경화의 영향을 적게 받도록 공정설계를 해야 함을 알 수 있었다.

(2) 성형 된 제품의 두께 변형율분포를 측정 한 결과, 우수하고 균일한 변형분포를 나타내고 있다.

(3) 펀치와 다이 사이의 클리어런스는 제품 취출시 제품 변형을 줄이고, 국부적 신장 및 소착현상을 없애기 위해 재료 두께 이상 주어야 하지만, 스프링 백에 의한 치수 변화 때문에, 정도 향상을 위해 어느 정도 아이오닝(ironing) 가공이 요구되었다.

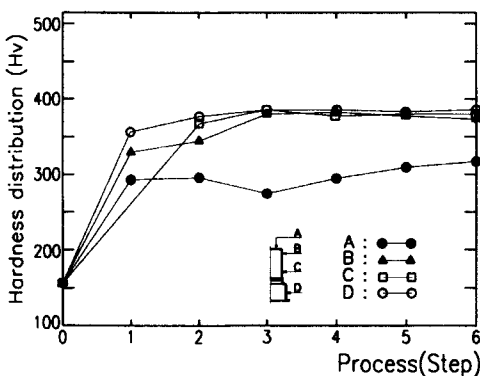


Fig. 6 Variations of hardness distribution in each process of severe deep drawing for complex cylindrical housing

(4) 펀치. 다이 반경(punch. die shoulder radius)의 형상과 R의 값에 따라 국부적 신장(necking), 균열(cracks) 및 파단(tears) 등의 결함들이 발생하였으며, 다이 반경이 드로잉성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(5) STS 304는 시기균열 및 세로균열 현상이 심하게 나타나지만, STS 305에서는 전혀 없었다.

이상과 같이 다단계로 디프 드로잉 되는 각 공정별 성형 품은 항상 예 응력 상태(pre-stressed state)와 예 변형 상태(pre-strained state)에서 가공되기 때문에 공정변수들을 잘 고려하여 최적 가공 조건을 설정해야 함을 실험을 통하여 고찰 및 검증하였다.

참고문헌

- (1) ASM INTERNATIONAL, 1988, "Metals Handbook, Ninth Edition", Volume 14, Forming and Forging, pp. 759 ~ 770.
- (2) 日刊工業新聞社 編集委員會 編, 1996, "프레스 기술", 第34卷, 第7號, pp. 18~32.
- (3) DONALD PECKNER and I.M.BERNSTEIN, 1987, "Handbook of Stainless Steels", McGraw-Hill Book Company, pp. 27-1~27-8.
- (4) S. Ishiyama, 1997, "스텐레스의 鋼板成形性" 塑性と加工, 第38卷, 第432號, pp. 28~34.
- (5) H. AOYAMA, 1992, "最近의 스텐레스 板材", 塑性と加工, 第33卷, 第375號, pp. 357~364.
- (6) K. SHINAGAWA, T. TAKEOKA, K. MORI and K. OSAKADA, 1993, "Finite Element Simulation of Warm Deep Drawing of Type 304 Stainless Steel Sheet with Deformation-Induced Transformation", Journal of the JSTP, vol. 34, no. 390, pp. 794~799.
- (7) M.J.M. BARATA MARQUES and R.M.S.O. BAPTISTA, 1990, "Theoretical and Experimental Analysis of Deep Drawing", Journal of Materials Processing Technology, vol.24, pp. 53~63.
- (8) Y. WATANABE, 1992, "스텐레스 鋼板의 溫間 絞り加工法", 塑性と加工, 第33卷, 第375號, pp. 396~403.
- (9) 太田 哲, 1990, "프레스 加工と型技術, 日刊工業新聞社", PP. 261~289.
- (10) 日本 塑性加工學會 編, 1994, コロナ社, "프레스 絞り加工", pp. 142~152.
- (11) Smith, 1993, "Structure and Properties of engineering Alloys", McGraw-Hill Book Company, pp. 312~323.
- (12) 전기찬, 1993, 반도출판사, "박판금속의 성형", pp. 162, pp. 174.
- (13) David A. Smith, 1990, "Die Design Handbook", SME, pp. 10-10~10-15.
- (14) EDWARD M. MIELNIK, 1991, "Metalworking Science and Engineering", McGraw-Hill Book Company, pp. 803~805.
- (15) 日刊工業新聞社 編集委員會 編, 1982, "프레스 型設計 チェックリスト", pp 173~174.
- (16) 太田 哲, 1990, "프레스 加工と型技術", 日刊工業新聞社, pp. 72.
- (17) 日刊工業新聞社 編集委員會 編, 1993, "新프레스 加工データブック", pp. 236~237.
- (18) K. Lange, 1985, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Book Company, pp. 20.13~20.20.
- (19) Romanowski, E., 1959, "Handbook of Blanking Technology (in Germany)", Berlin, VER Verlag Technik
- (20) 김두환, 1998, "원통형 용기의 다단계 디프 드로잉 공정설계에 관한 사례 연구", 한국소성가공학회 '98 춘계학술대회 논문집, pp. 160~167.
- (21) 김두환, 1998, "원통형 디프 드로잉 용기의 벽 두께 감소 최소화에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제7권, 제4호, pp. 393~399.
- (22) Donald F. Eary and Edward A. Reed, 1974, "Techniques of Pressworking Sheet Metal", Prentice-Hall, Inc., PP. 134, pp.142~145.