〔논문〕 한국소성가공학회지(1999), 제8권 제3호
Transactions of Materials Processing Vol. 8, No. 3, (1999)

블랭크 홀딩력 제어에 의한 스탬핑 가공성 향상 기술

김영석* · 임성언** · 손현성** · 한수식***

(1999년 1월 7일 접수)

Improvement of the Stamping Formability by BHF Control

Young-Suk Kim, Sung-Eon Lim, Hyun-Sung Son and Soo-Shik Han

Abstract

A variable blank holding force method is proposed to improve deep drawing characteristics of sheet materials. In this method, the blank holding force (BHF) is controlled throughout a drawing process so that the punch load does not exceed a critical value, which is slightly less than the fracture load. The forming process with the variable BHF is more flexible than the conventional process with the constant BHF and it could be used for improving the product's quality and drawability. In this paper we suggest a method controlling the BHF as a function of punch travel during the forming process. The optimization BHF curves are determined theoretically and experimentally. It is concluded that for the case of optimum BHF control methods the drawn cup height and the drawing formability achieved by this method are increased than those for constant BHF method. Also, as comparing the wall thickness distribution of the cup drawn by the constant BHF and the optimum BHF control, the BHF control reduce the wall thickness variation of the drawn cup at the cup wall and make the cup thickness distribution more uniformly than the constant BHF.

Key Words : Deep Drawing, Blank Holding Force, Fracture Limit, Wrinkle Limit, Blank Holding Force Control, Formability

1. 서 론

디프드로잉 공정은 판재의 스탬핑 공정에서의 대표적인 가공모드로서, 이 공정의 여러 주요 파라미터중 블랭크 홀딩력(blank holding force, BHF)은 판재성형 가공의 성공여부를 좌우하는 중요한 요소이다. 블랭크 홀딩력의 주요 목적은 블랭크 홀더와 다이 사이의 플랜지부에서 주름이 발생되는 것을 방지하고, 마찰저항력을 부여하여 재료의 유입을 제어하기 위함이다. 플랜지 주름은 디프드로잉 공정에서 컵의 플랜지 부위에 큰 압축응력이 작용됨으로써 발생하게 되는데, 이러한 주름을 방지하기 위하여 블랭크 홀딩력을 가하게 된다. 이렇게 작용되는 블랭크 홀딩력은 주름을 억제할 수 있을 정도로 충분히 커야 하지만, 컵 벽에서 파단이 발생될 수 있을 정도로 커서는 안 된다. 따라서, 파단이나 주름과 같은 불량이 발생하지 않도록 성형하는 도중에 블랭크 홀딩력을 적절히 변화 시킬 수 있다면 큰 폭의 성형한계가 예상된다.

Fig.1에 나타난 원형 컵 디프드로잉 공정에서, 원형 블랭

* 경북대학교 기계공학부
** 경북대학교 기계공학부 대학원
*** 포항제철 기술연구소

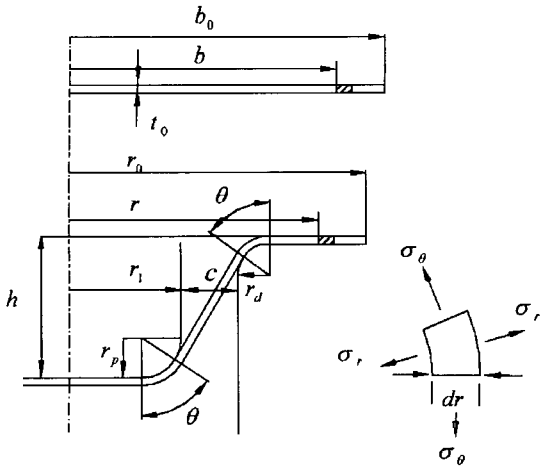

Fig. 1 Geometry of the cup drawing test and the stress state in the flange area

크 판재는 주어진 블랭크 홀딩력 하에서 펀치하강에 따라 플랜지부에서 원주 방향의 압축과 반경방향으로 드로잉 변형을 받아 원형 컵이 생성된다. 이때 주어진 재료의 한계 드로잉비를 넘어서 드로잉 되는 경우 컵 벽부에서 파단이 발생하게 되어 원하는 깊이의 컵을 성형 할 수가 없게 된다. 최근에는, 주어진 금형변수와 재료변수가 결정되어 있는 경우, 블랭크 홀딩력을 펀치 행정에 따라 파단 한계(fracture limit)와 주름 한계(wrinkle limit)내에서 적절히 조절함으로써 파단이나 주름의 발생 없이 원하는 깊이의 컵이 성형 가능하고, 성형성이 향상됨이 보고되고 있다. 이와 관련하여, Kergen[1~3]등은 블랭크 홀딩력의 폐 루프 제어를 통하여 드로잉 성형성의 향상에 관한 연구를 하였으며, Hirose[4] 등은 블랭크 홀딩력을 실시간 제어해줌으로써, 기존의 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지시킬 때에 나타났던 바디주름(body wrinkles)이나 표면처짐(surface deflection)과 같은 결함등을 제거하였다. 그리고, Wagoner[5]등은 블랭크 홀딩력이 감소하는 경우와 증가하는 두가지 경우의 디프드로잉 공정에 대한 실험적 해석을 통하여 두 형태의 스케일 모델 팬더 판넬(scale-model fender panel)에 적용하여 성공적으로 수행하였다. Wang[6]등은 사각컵 디프드로잉 공정에 있어서, 시간에 따른 블랭크홀딩압력(BHP)의 변화패턴들과 블랭크홀더를 직선부와 코너부로 분할시킨 후 각각의 위치에 따른 블랭크 홀딩압력 변화패턴들중 적절히 선택한 후 조합하여 작용시켜 줌으로써 파단과 주름 발생을 억제 시켰으며, 또한 변형률 경로의 효과도 검토하였다. Manabe[7~8] 등은 원형컵 디프드로잉 공정의 이론적 해석을 통하여 블랭크 홀딩력 제어에 의한 판재의 성형성 향상 효과와 균일한 벽 두께를 갖는 성형품을 유지하기 위한 블랭크 홀딩력 제어 방법에 대해서 논하였다.

본 연구에서는 수직 이방성 판재의 원형 컵 드로잉 공정에 대한 초등 해석적 고찰을 통해 드로잉 공정 중에 펀치력이 한계 펀치력을 넘지 않도록 최적 블랭크 홀딩력 제어 패턴을 이론적으로 구하였고, 이 최적 블랭크 홀딩력 제어 패턴을 기초로 한 실험을 통해 블랭크 홀딩력 제어에 의한 가공성 향상 효과를 검토하였다.

2. 이론적 배경

원형 컵 딥드로잉 공정에서 반경방향응력 σ_r, 원주방향응력 σ_θ, 두께방향응력 σ_z을 주응력으로 취급하고, 플랜지부의 드로잉을 평면변형 $(\varepsilon_z = 0)$이라고 가정한다. 그러면 판재의 수직 이방성만을 고려한 Hill의 2차원 항복조건식과 유동법칙으로부터 유효응력과 유효변형률은 다음과 같이 나타내진다.

$$\bar{\sigma} = (\sigma_r - \sigma_\theta)/m_1 \tag{1}$$

$$d\bar{\varepsilon} = m_1 d\varepsilon_r \tag{2}$$

여기서, $m_1 = \sqrt{2(1+R)/(1+2R)}$ 이다. 또한, 재료의 가공경화는 멱 경화 법칙을 따른다고 가정하면

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon})^n \tag{3}$$

드로잉 전후 체적 일정 조건은 다음 식으로 나타내진다.

$$\pi b^2 = \pi r^2 + 2\pi r_1 h \tag{4}$$

b는 초기 반경이며, r은 현재 드로잉 단계에서의 위치이다. 또한, h는 펀치행정 즉, 컵 높이를 나타내며 Fig.1의 기하학적인 조건으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$h = (r_d + r_p + t_0)(1-\cos\theta) + [c + r_p + r_d - (r_p + r_d + t_0)\sin\theta]\tan\theta \tag{5}$$

여기서, C는 펀치와 다이 사이의 간극이다.

2. 1 구성방정식

Fig.1에서 펀치 반경의 끝부에 작용하는 반경방향응력

σ_{rd} 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{rd} = (\sigma_r + \sigma_f + \sigma_b)e^{\mu\theta} + \sigma_{ub} \quad (6)$$

여기서, ① σ_r 은 순수 반경방향 드로잉 응력을 나타내며,

$$\sigma_r = m_1 K\left[0.5m_1 \ln(1+2h/r_1)^n \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right] \quad (7)$$

여기서, $r_0 = (b_0^2 - 2hr_1)^{1/2}$ 이다.

② σ_f 는 블랭크 홀딩력에 의한 응력이며,

$$\sigma_f = \frac{2\mu F_{BH}}{2\pi r_0 t_0} \quad (8)$$

여기서, F_{BH} 는 블랭크 홀딩력이고, μ 는 쿨롬 마찰계수이다.

③ σ_b 와 σ_{ub} 는 굽힘과 굽힘 풀림의 영향을 고려한 응력으로 바우싱거 효과를 무시하면,

$$\sigma_b = Km_2\left[0.5m_1 \ln(1+2h/r_1)\right]^n \frac{t_0}{4r_d} (= \sigma_{ub}) \quad (9)$$

여기서, $m_2 = (1+R)/(1+2R)^{1/2}$

④ $e^{\mu\theta}$ 는 다이 형상 반경에서의 벨트-풀리 마찰을 고려한 항이다.

따라서, 컵 드로잉 공정에서 펀치에 작용하는 힘은 다음과 같이 나타내진다.

$$F_d = 2\pi r_1 t_0 \cdot \sigma_{rd} \cdot \sin\theta \quad (10)$$

2. 2 파단 한계

컵 벽에서는 원주방향의 변형이 펀치에 의해서 제한을 받고 있으므로 평면변형 $(\varepsilon_\theta = 0,\ \sigma_z = 0)$조건으로 생각할 수 있다. 이 응력조건에서 컵 벽이 하중을 지지할 수 있는 한계는 확산넥킹(diffuse necking)이 발생하기 전까지이다. 평면변형조건에서 확산네킹이 발생하기 위한 조건은 Moore와 Wallace에 의하여 $\bar{\varepsilon} = (1+R)n/\sqrt{1+2R}$ 일 때이다.[9] 그 때의 펀치 두께는 $t = t_0 e^{-1}$ 이며 컵 벽이 지지할 수 있는 힘 $T_{\max}$ (critical punch force, 한계 펀치력)는 다음과 같이 나타내 진다.

$$T_{\max} = 2\pi r_1 t_0 K m_2^{(1+n)}(n/e)^n \quad (11)$$

일정한 블랭크 홀딩력을 가하고 펀치를 하강하여 갈 때 펀치력 F_d 가, 컵 벽이 지지할 수 있는 힘 $T_{\max}$ 에 이르면 컵이 파단을 하게 되는데, 이때의 블랭크 홀딩력이 파단을 피하기 위해서 가해야 하는 블랭크 홀딩력의 상한(upper limit) 즉, 한계 블랭크 홀딩력(critical blank holding force)이 된다. 그러므로, 파단 한계 블랭크 홀딩력은 식(10)과 식(11)을 등가로 놓고 구하면 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$BHF_{critical} = \frac{\pi r_0 t_0}{\mu}\left[\left(\frac{T_{\max}}{2\pi r_1 t_0 \sin\theta} - \sigma_{ub}\right)\frac{1}{e^{\mu\theta}} - (\sigma_r + \sigma_b)\right] \quad (12)$$

따라서, 식(12)로부터 펀치 행정에 따른 파단 한계 블랭크 홀딩력의 변화 패턴을 이론적으로 구할 수 있다.

2. 3 주름한계

한편 블랭크 홀딩력이 너무 약하면 플랜지 부위에서 주름이 발생하게 되는데 주름 발생 한계는 Siebel에 의하여 제안된 다음의 실험식을 사용하였다.[9~10]

$$F_H = \left\{\left(\frac{D}{d}-1\right)^2 + 0.005\frac{d}{t_0}\right\} \times \frac{\pi}{4}\left\{D^2 - (d+r_d)^2\right\}\frac{\sigma_B}{400} \quad (13)$$

여기서, σ_B 는 인장강도, $D(=2r_0)$ 는 블랭크 지름, $d(\cong 2r_1)$ 는 다이 직경을 나타낸다.

3. 이론적 해석과 실험결과의 비교

실험에 사용된 재질은 두께가 0.7 mm인 일반강판 CQ로서 기계적 성질은 Table 1, 그리고 실험 형상조건은

Table 1 Material properties of tested sheet

Yield strength σ_Y(kgf/mm²)	Tensile strength σ_B(kgf/mm²)	R-value	n-value	K-value (kgf/mm²)
17.1	30.3	1.68	0.2683	56.52

Table 2 Specifications of punch and die sets in the deep drawing test

Punch radius r_1(mm)	25
Punch shoulder radius r_p(mm)	8
Clearance c(mm)	1.2
Die shoulder radius r_d(mm)	5

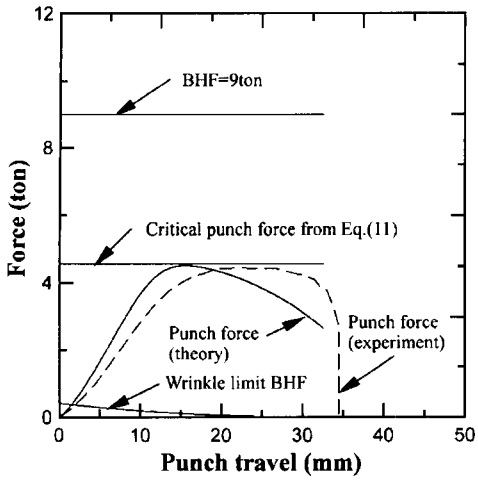

Fig. 2 Punch travel versus punch force curve by the constant BHF (9ton) on the deep drawing test

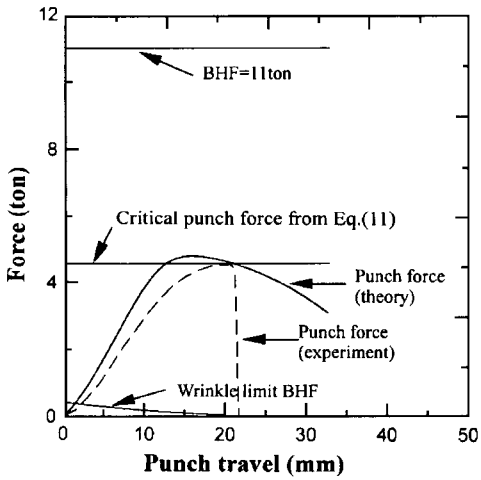

Fig. 3 Punch travel versus punch force curve by the constant BHF (11ton) on the deep drawing test

Table 2에 나타나 있다. 드로잉비는 1.9이며, 실험시 펀치 속도는 200 mm/min으로 적용하였다. 또한, 실험시에 강판의 양면에는 드로잉유(점도22cSt/38 ℃)를 도포하였으며, 이때 쿨롬 마찰계수는 0.1을 적용하였다.[11]

Fig. 2는 블랭크 홀딩력을 9톤으로 일정하게 유지시켰을 때, 실험과 식(10)으로부터 해석적으로 구한 펀치행정과 펀치력의 관계를 나타낸다. 이 경우는 파단이 발생하지 않았으며, 실험에 의한 컵 높이는 약 34 mm이다. Fig.3은 블랭크 홀딩력를 11톤으로 일정하게 유지시켰을 때의 펀치 행정과 펀치하중에 대한 해석과 실험 결과로서 실험

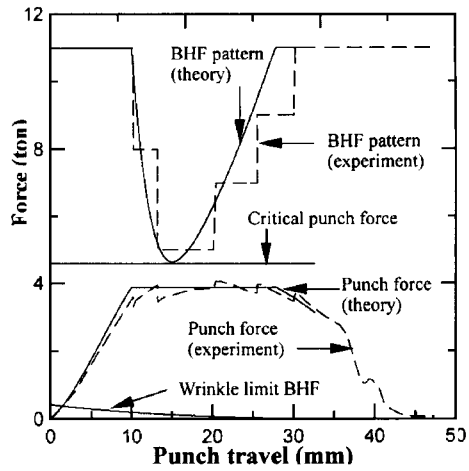

Fig. 4 Comparison of the theoretical analysis and the experimental result by the variable BHF pattern(initial BHF=11ton)

에서는 펀치하중이 펀치행정에 따라 증가하다가 갑자기 떨어지면서 파단이 발생하고 있음을 나타내고 있다. 컵 벽에서 파단 발생시 컵 높이 h 를 비교해 보면 이론적 해석에서는 약 13 mm, 실험에서는 약 21 mm로서 이론적 해석에서 보다 빨리 파단이 발생되고 있다. 하지만, 실험에서 파단이 발생될 때의 펀치하중은 해석적으로 구한 한계 펀치력 식(11)에 도달될 때 컵 벽에서 파단이 발생되고 있어, 이론적 해석과 매우 잘 일치되고 있다.

파단 발생을 억제하기 위한 한계 블랭크 홀딩력의 펀치 행정에 따른 변화 패턴은 다음과 같은 방법으로 구한다. 먼저, 한계 펀치력 또는 그 이하의 특정한 값을 정의한 후, 드로잉 초기에는 펀치력이 정의된 값에 도달할 때까지 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지시키고, 그 이후에는 펀치력이 위에서 정의된 값을 유지하도록 (12)식으로부터 한계 블랭크 홀딩력의 변화 패턴을 구한다.

Fig.4에 식(11)과 식(12)로부터 계산된 한계 펀치력과 블랭크 홀딩력의 펀치 행정에 따른 변화와 이 블랭크 홀딩력의 변화패턴을 적용한 경우의 펀치력(실선)을 나타내었다. 또한 이론적으로 계산된 블랭크 홀딩력의 연속적인 변화 패턴을 고려한 실험결과(점선)를 함께 나타내었다. 실험에서는, 블랭크 홀딩력을 이론해석에서처럼 연속적으로 변화 시키는데 제약이 있어서 수동으로 단계별로 제어하였다. 실험에서 블랭크 홀더력은 초기에 11톤을 유지한 후 5톤까지 단계별로 감소시키고, 다시11톤까지 단계적

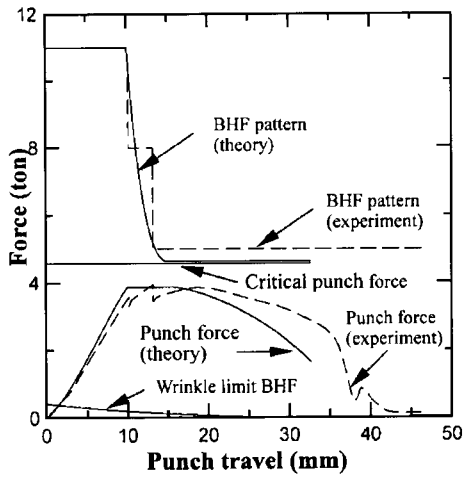

Fig. 5 Comparison of the theoretical analysis and the experimental result by the variable BHF pattern(initial BHF=11ton)

으로 상승시켜 주었다. 이 경우에 있어서 펀치력은 한계 펀치력 이하로 거의 일정하게 유지되고 있으며, 파단 발생 없이 컵 성형을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 이론적으로 도출한 포물선 형태의 블랭크 홀딩력 제어 패턴과는 다르게 블랭크 홀딩력을 처음에 11톤으로 유지한 후, 펀치력이 컵 벽이 지지할 수 있는 최대 하중 T_{max}에 도달하기 직전에 블랭크 홀딩력을 단계별로 감소시켜 디프드로잉 성형하는 경우에 대한 이론과 실험에 의한 결과를 나타낸다. 이 경우에도 블랭크 홀딩력을 펀치행정에 따라 단계적으로 감소시킴으로써 펀치하중은 컵의 파단 한계에 도달하지 않고 온전한 성형이 가능함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 2의 경우와 비교하면 BHF의 단계적 감소에 따라 전반적으로 펀치력도 낮아지고 있음을 알 수 있다. Fig. 4의 블랭크 홀딩력 제어 패턴과 Fig. 5의 블랭크 홀딩력 제어 패턴의 경우를 비교해보면, 두 경우 모두 컵의 파단 발생을 방지하기위한 목적으로 블랭크 홀딩력을 제어하여 펀치력의 상승을 억제 시키고 한계 펀치력 이하로 유지하여 컵 성형성을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다. 블랭크 홀딩력을 Fig. 4의 경우와 같이 감소한 후 다시 상승시켜주는 이유는 성형이 완료된 제품의 스프링 백(spring back) 현상의 발생을 방지하기 위함이다.[1~3,12] Fig. 4와 Fig. 5의 블랭크 홀딩력 제어패턴을 적용한 경우의 컵 성형품의 귀의 골 부분까지 컵높이를 측정해 보았더니, Fig. 4의 제어패턴이 Fig. 5의 제어패턴보다 약 1 mm정도 컵 성형성을 향상시

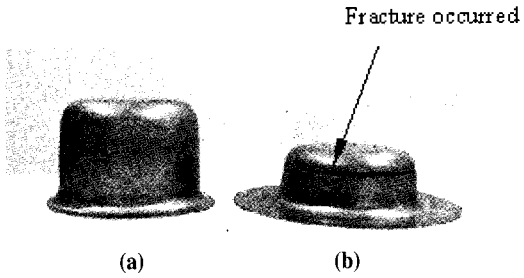

Fig. 6 Result of the deep drawing test by :
(a)the variable BHF of Fig. 5 and ;
(b)the constant BHF of 11ton

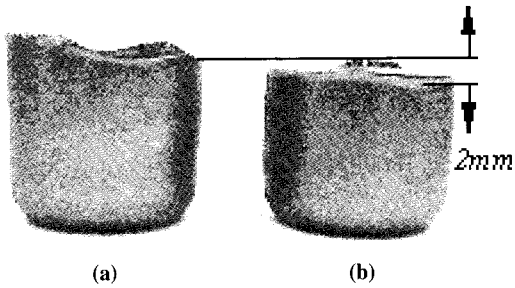

Fig. 7 Comparison of the height of the drawn cup by :
(a)the variable BHF of Fig. 4 and ;
(b)the constant BHF of 9ton on the deep drawing test

켰는데, 이것은 블랭크 홀딩력을 단계별로 감소시킨 후 다시 상승시켜준 경우가 블랭크 홀딩력을 감소 후 일정하게 유지해준 경우보다 큰 블랭크 홀딩력을 작용시키고 있어 재료가 다이속으로 보다 빨리 유입되는 것을 허용하지 않고 있기 때문이라고 생각된다. 따라서, 드로잉 초기에 큰 블랭크 홀딩력을 가해준 후 Fig. 4와 같은 방법으로 블랭크 홀딩력을 감소시키고 다시 상당히 높은 블랭크 홀딩력을 갖도록 상승시켜주면 성형성을 매우 향상시킬 수 있으며, 이러한 제어패턴을 고강도 강판이나 알루미늄 판재에 적용하면 상당한 효과를 얻을 수 있을 거라고 여겨진다.

Fig. 6은 블랭크 홀딩력를 Fig. 5와 같이 제어한 경우(Fig. 6(a))와 일정한 블랭크 홀딩력를 가한 경우(Fig. 6(b))에 각각 성형한 제품 형상을 나타내고 있는데, 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지시켰을 때(BHF=11ton)에는 컵 깊이가 약 21 mm에서 파단이 발생하였으나, 블랭크 홀딩력을 Fig. 5에서와 같이 단계별로 제어할 때에는 온전한 컵이 성형되었다.

Fig. 7은 Fig. 4와 같이 단계별로 제어를 하였을 때(Fig. 7(a))와 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지시켰을 때

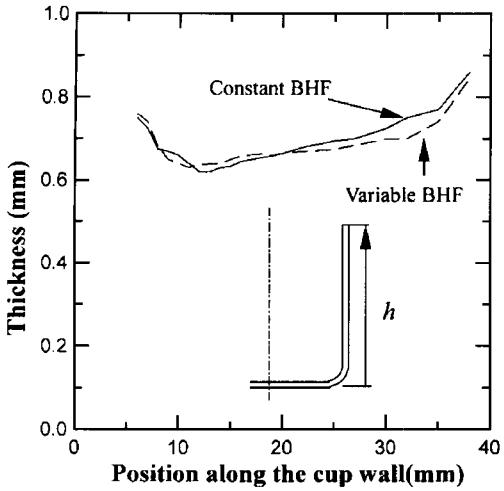

Fig. 8 Wall thickness distrbution of the drawn cup by the constant BHF of 9ton and the variable BHF of Fig. 4 on the deep drawing test

(Fig. 7(b)) 플랜지부에서 재료가 완전히 다이 내부로 빨려 들어가도록 하여 완전히 성형된 제품을 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 성형된 제품에서 귀의 골 부분까지의 컵 높이를 비교해 보면, (a)의 경우가 (b)의 경우보다 약 2 mm정도 크게 성형이 되어, 블랭크 홀딩력을 제어한 경우가 컵 높이를 깊게 할 수 있음을 보여준다. 그리고, Fig. 8은 컵 벽에서 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지한 경우와 Fig. 4와 같이 제어한 경우의 성형품의 두께 분포를 비교한 것을 보여주고 있으며,컵 벽 두께는 디지털 마이크로미터기로 5회 측정하여 평균한 값을 나타내었다. 컵 상단부에서는 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지한 경우가 보다 큰 두께를 갖고 있지만, 컵 하단부의 국부 네킹 발생 가능 영역에서는 오히려 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지한 경우가 작게 유지되고 있다. 즉, 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지 시켰을 때에는 블랭크 홀딩력을 제어한 경우보다 컵 벽에서의 두께감소가 커서 블랭크 홀딩력을 제어하는 경우보다 빨리 파단이 발생될 수 있음을 짐작케 하며 또한, 블랭크 홀딩력을 제어해줄 때, 보다 균일한 두께 분포를 갖는 제품을 얻을 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 원형 컵 디프드로잉 공정의 컵 벽에서 파단이 발생하지 않도록 주름과 파단 한계 내에서 최적 블랭크 홀딩력 제어패턴을 이론적으로 도출하였다. 실험과 이론에 의한 결과 비교에서 나타났듯이 펀치 행정에 따라 블랭크 홀딩력을 변화시키는 것에 의하여 블랭크 홀딩력이 일정하게 유지될 때보다 컵 성형성을 향상시켰으며, 파단 발생이 없는 깊은 컵의 성형이 가능함을 알 수 있었다. 또한 블랭크 홀딩력을 감소 후 상승시켜주는 경우(Fig. 4)가 블랭크 홀딩력을 감소 후 일정하게 유지시키는 경우(Fig. 5)보다 컵 성형성을 더욱더 향상시켰다. 그리고, Fig. 8의 컵 벽의 두께 비교에서 나타났듯이, 블랭크 홀딩력을 제어한 경우가 블랭크 홀딩력을 일정하게 유지하는 경우보다 성형품의 컵 벽에서의 두께 감소를 적게 할 수 있어 파단을 지연시킬 수 있으며, 또한 보다 균일한 두께 분포를 갖는 제품을 만들 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

(2) R. Kergen and P. Jodogne, 1992, "Computerized control of the blank holder Pressure on deep drawing presses", SAE Technical paper No. 920433 - SP - 897, Detroit, Feb. 24-28, pp. 51~56.

(2) M. Traversin, R. Kergen, and P. Harlet, 1996, "Finite element simulation of the closed loop control of the BHF in deep drawing", Proceeding 19th IDDRG Biennial Congress, pp. 109~118.

(3) M. Traversin and R. Kergen, 1995, "Closed loop control of the BHF in deep drawing: finite element modeling of its effects and advantages", J.Mater. Proc. Tech., Vol. 50, No.1, pp. 306~317.

(4) Y. Hirose, M. Kojima, S. Ujihara and Y. Hishida, 1992, " Development of forming technique with real - time control of blank holding force", Proceeding 17th IDDRG Biennial Congress, pp.300~307.

(5) Y. Hishida and R.H. Wagoner, 1993, "Experimental analysis of blank holding force control in sheet forming", SAE Technical Paper, No. 930285, Detroit, Michigan, March 1-5, pp.93~99.

(6) Y. W. Wang and S. A. Majlessi, 1994, "The design of an optimum binder force system for improving sheet metal formability", Proceeding 18th IDDRG Biennial Congress, pp.491~502.

(7) K. Manabe, H. Hamano and H. Nishimura, 1988, "A new variable blank holding force method in deep drawing of sheet materials", J.JSTP, Vol. 29, No. 330, pp. 740~747.

(8) K. Manabe, K. Soeda, T. Nagashima and H. Nishimura, 1992, "Adaptive control method of deep drawing using the variable blank holding force technique", J.JSTP, Vol. 33, No. 375, pp. 423~428.

(9) T. Kuwabara, 1997, "Deep drawing process", J.JSTP, Vol.38, No.436, pp.52~57.

(10) Siebel, E., 1954, "Blank holder pressure in deep drawing", Stahl and Eisen, Vol. 74, pp. 155~158.

(11) 김영석, 김기수, 1994, "변형모드별 판재의 마찰특성 비교", 한국소성가공학회지 논문집, 제 3권, 제1호, pp.51~62.

(12) M. Sunseri, J. Cao, A. P. Karafillis and M. C. Boyce, 1996, "Accommodation of springback error in channel forming using active binder force control: numerical simulations and experiments", Trans, ASME, J. Engng. Mater. Tech., Vol. 118, pp.426~435.

(13) 김영석, 1998, 소성역학-이론과 응용, 경북대 기계공학부