

사각용기 드로잉시의 플랜지 주름에 관한 실험

Experiments on the flange wrinkling for a deep-drawn rectangular container

이계섭*, 이기환(건국대학교 대학원), 박천희(건국대학교 산업대학원), 한영호(건국대학교)

K.S. Lee, K.H. Lee, C.H. Park(Graduate School, Kon-Kuk Univ.), Y.H. Hahn(Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

The tendency of wrinkling formation on the flange of a deep-drawn rectangular container was investigated experimentally under different process conditions. Such process variables as blank size, sheet thickness, blank-holding force, and depth of drawing are chosen to examine their effects on the flange wrinkles of the products. Number and amplitudes of the wrinkles are measured along the periphery of the flange and compared between each case of process condition.

Key Word : Deep-drawing(디프드로잉), Rectangular container(사각형용기), Flange wrinkling(플랜지 주름), Blank-holder(블랭크홀더).

1. 서 론

박관금속의 디프드로잉에 대한 성형성을 나타내는 여러 가지 측면, 즉 한계성형비, 주름, 이어링, 파단 등에 미치는 재료 특성과 공구형상 등의 영향에 대해 많은 해석과 실험이 수행되었으며, 특히 축대칭 원통의 디프드로잉에 대해서는 다각적인 연구가 진척되었다.

여러 디프드로잉 결함 중 주름은 그 발생 부위에 따라서 플랜지에서 나타나는 플랜지 주름과 용기의 측벽에서 발생하는 보디 주름으로 크게 대별될 수 있다. 보디 주름은 판의 두께 방향으로 응력이 작용하지 않는 상태에서 발생한다는 점이 플랜지 주름의 경우와 다르다. 보디 주름은 펀치 바닥면에서 발생하는 주름과 벽의 비접촉 부분에서 일어나는 주름으로 구별될 수 있다. 플랜지 주름은 판의 외형 치수에 비하여 두께가 극히 얇으므로 드로잉 성형중에 플랜지가 압축응력을 받게 되면 좌굴에 의해서 주름이 발생하기 쉽다. 발생한 주름은 성형품에 형상불량을 남길 뿐만 아니라, 제품을 들어낼 때 유발되는 파단, 공구의 조기 마모 및 그에 따른 제품의 표면 손상, 성형품의 강성저하 등을 수반하게 된다. 따라서 블랭크홀더나 비드 등에 의해서 주름이 발생하지 않도록 제어하는 것이 중요하다. 그림. 1(d)의 사각형 펀치에 의해 드로잉될 때, 직변 부분의 소재에는 벤딩과 스트레칭이 발생하고, 모서리 부분의 소재는 원형용기의 드로잉과 유사한 변형과정을 겪는다. 이런 상태에서 플랜지에 발생한 주름은 원형용기의 드로잉에서 플랜지에 발생한 주름의 경향과 차이가 생기게 된다.

본 연구는 직사각형 용기를 드로잉하여 직변 부분과 모서리 부분의 플랜지에 발생한 주름의 간격, 높이, 갯수에 초점을 두고, 공정변수들의 영향이 플랜지에 발생한 주름에 어떻게 나타내고 있는지 실험적으로 밝힌 후, 이 결과를 축대칭 원형용기의 연구결과[4]와 비교하였다. 드로잉 공정변수로서는 블랭크 지름, 소재의 두께, 블랭크 홀딩력, 성형깊이를 택하였다. 직사각 용기에 대한 최적소재 형상은 타원에 가깝지만, 드로잉 초기의 주름에 주안점을 두었으므로, 블랭크 형상은 제작의 편의상 원형을 택하였다. 따라서 사각형 용기의 각 위치에 따라 성형 후의 플랜지의 폭이 각각 다르다. 이런 플랜지 폭의 차이에 따라 주름 발생에 어떤 경향이 나타나는지 살펴 보았고, 사각용기의 직변 부분과 모서리 부분에서 플랜지 주름의 경향이 어떠한지도 비교하였다.

2. 이론적 배경

디프드로잉에서 발생하는 플랜지 주름에 대하여 임계 원주방향 압축응력과 발생하는 주름의 수를 예측하기 위한 노력이 여러 연구자에 의해서 행하여져 왔다. Geckeler[1]와 Senior[2]는 블랭크홀더가 없는 경우에 대하여 해석하여 임계 원주방향 압축응력과 주름의 수를 예측하였고, Yu와 Johnson[4,5]은 원형판의 2차원 탄·소성 buckling모형을 만들어 에너지 방법을 사용하여 블랭크홀더가 작용하지 않을 경우 임계 원주방향 압축응력과 주름의 수를 예측하였으며, Kawai [9-11]는 블랭크홀더가 있는 경우까지 해석한 바 있다.

Geckeler[1]에 의해 주름 발생 임계 원주방향 압축응력 σ_c 은 다음과 같이 정의가 되었다.

$$\sigma_c = 0.46 \frac{E_0 t^2}{f^2}$$

여기서, t 와 f 는 소재의 두께와 플랜지의 폭이다. Yu와 Johnson[4,5]은 해석에서 다음과 같은 무차원 변수를 지정하였다.

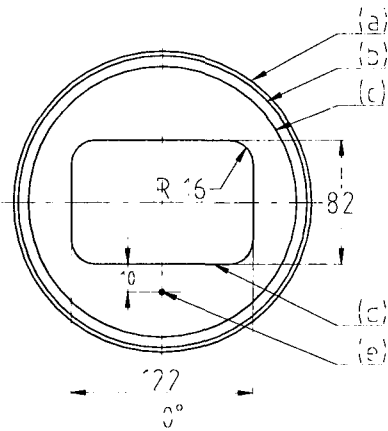
$$\xi = \frac{f}{b} \quad , \quad \zeta = \sqrt{\left(\frac{E_0}{\sigma_c}\right)} \cdot \frac{t}{b}$$

여기서, b 는 블랭크의 외경을 나타내고, E_0 는 buckling 계수이다. 이와 같은 무차원 변수를 통하여 블랭크홀더를 사용하지 않은 경우에 주름이 발생하는 임계 원주방향 압축응력을 나타내었다.

$$\xi = 0.67 \zeta + 1.2 \zeta^2$$

그리고, 예상되는 주름의 수는 아래와 같이 예측하였다.

$$n \approx \frac{0.95}{\xi} + 3$$



- (a) 초기 블랭크 형상
- (b) 성형후 블랭크 형상
- (c) 주름 높이의 측정 부위
- (d) 펀치 형상
- (e) 주름 측정시 기준점

그림. 1 펀치와 블랭크 형상

3. 실험장치 및 방법

3-1 금형 및 실험장치

실험에 사용된 사각형 용기와 블랭크 형상은 그림. 1에 나타나 있다. 이 형상에 맞게 금형 세트를 제작하여 그림. 2와 같이 프레스에 설치하였다. 실험장치는 30 ton의 쿠션장치가 있는 가압력 100 ton 용량의 유압프레스를 사용하였다. 그 장

치의 개략적인 구조는 그림. 2에 표시되어 있다.

금형의 재질은 기계구조용강 SM45C이고, 밀링가공 후 평면연삭 가공을 하였으며, 실험용 금형이므로 그 치수의 가변성을 고려하여 경화 열처리하는 행하지 않았다.

드로잉시 성형깊이를 실험변수로 변화시키기 위해 프레스에 LVDT를 설치하여 실험을 수행하였다.

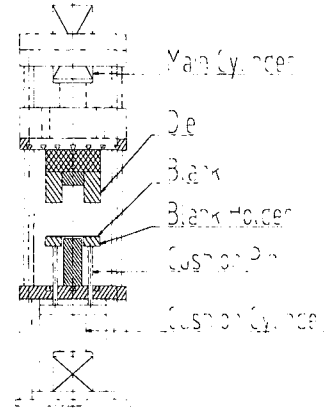


그림. 2 실험 장치 개략도

3-2 시편

시편은 일반용 냉간 압연강판(SPC1)을 시중에서 구입한 상태 그대로의 것을 사용하였다. 소재의 두께는 0.975 mm인 것과 0.8 mm인 것을 사용하였다. 소재의 물성치는 ASME에 규정한 표준시편을 레이저커팅하여 인장실험을 실행하여 얻었다. 그 결과는 표. 1에 나타나 있다.

블랭크 형상은 원형을 사용하였으며, 블랭크 직경은 240, 230, 220, 210, 200, 190, 180 mm으로 인장시편과 동일하게 레이저커팅으로 가공을 하였다.

시편 재질	일반 냉간 압연강판 (SPC1)
시편 두께	0.975 mm, 0.8 mm
인장 강도	37 kgf/mm ²
이방성 계수	$\bar{r} = 1.03$ ($r_0 = 1.16, r_{90} = 1.47, r_{45} = 0.75$)

표. 1 소재의 물성치

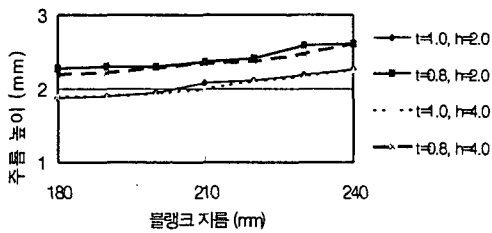
3-3 실험방법

실험변수로는 블랭크의 지름, 소재의 두께, 블랭크 홀딩력 유·무, 성형깊이 등 네 가지를 선택하였다. 성형의 깊이는 드로잉 초기의 주름을 관찰하기 위해 2 mm와 4 mm로 택하였다. 그림. 2에서 보는 것과 같이 프레스의 구조상 블랭크 홀딩력을 완전히 제거하기 힘들고 플랜지의 주름을 관찰하는데

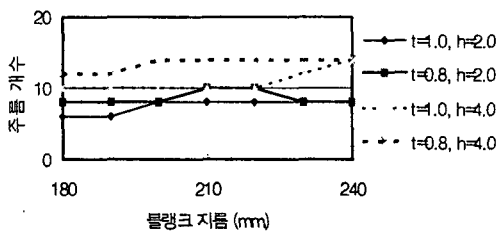
어려움이 있어서, 블랭크홀더의 각 모서리위에 한 변의 길이가 30 mm이고, 높이가 2.0, 2.8 mm인 두 가지의 정사각형 판을 설치하여 다이와 블랭크홀더 사이의 간격을 인위적으로 형성하여 그 사이에 위치하는 소재가 자유롭게 주름질 수 있도록 만들었다.

3.3 측정방법

그림. 1(c)에서 나타나 있는 것처럼, 성형된 블랭크의 외곽에서 2 mm 안쪽에서 형성된 주름의 형상을 측정하였다. 측정법위는 전체적으로 대칭적인 경향을 나타내고 있으므로 그림. 1에서 0°에서 90°까지 1°의 간격으로 측정을 하였다. 측정장비는 TRIMOS VERTICAL3 (접촉식 2차원 측정기)에 의해 기준점으로부터 측정하고자 하는 부분의 높이를 측정하였다.



(a) 주름 높이 변화 (h : 성형깊이, t : 블랭크 두께)



(b) 주름 개수 변화 (h : 성형깊이, t : 소재두께)

그림. 3 소재형상에 따른 주름의 변화

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 소재형상에 따른 주름의 변화

그림. 3은 소재에 블랭크 홀딩력을 가하고 다이와 블랭크 홀더사이의 간격을 2.8 mm로 하였을 때, 각각의 블랭크 지름에 따라 발생된 주름의 높이와 개수의 변화를 나타낸다.

그림. 4는 두께 0.8 mm 소재에 블랭크 홀딩력을 가하고 다이와 블랭크 홀더 사이의 간격을 2.8 mm로 하여 깊이 4.0 mm까지 성형했을 때 플랜지의 직변부와 모서리부에 발생한 주름의 개수를 나타내고 있다.

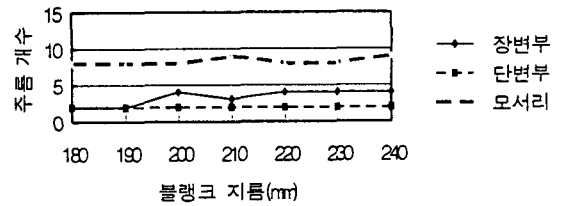
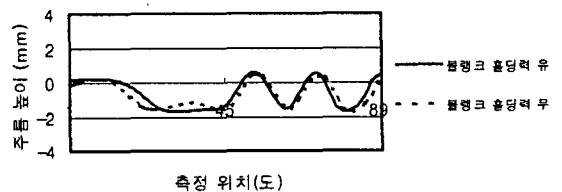


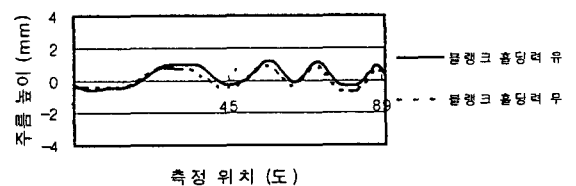
그림. 4 사각형 용기의 각 부분에 대한 주름 개수

축대칭 원형용기의 경우 성형한계비 이내에서 플랜지 폭이 좁을수록 주름 개수가 많이 발생한다는 Yu와 Johnson[4]의 이론적 결과에 비하여, 본 연구에서 실험한 사각형 용기의 경우에 그림. 3(b)에 나타나는 것처럼, 전체적인 플랜지 폭의 감소에도 불구하고 플랜지에 발생한 주름의 개수는 원형 용기의 드로잉과는 다른 결과를 나타내고 있다. 그러나, 그림. 4에서 보는 것처럼, 드로잉된 소재에서 플랜지의 폭이 넓은 직변부와 폭이 상대적으로 좁은 모서리부의 주름의 개수를 보게되면 플랜지 폭이 좁은 모서리부에서 주름의 개수가 많고, 이 경향은 Yu와 Johnson의 주름 개수의 예측과 비슷한 결과를 나타내고 있다. 직변부내에서 보게되면, 플랜지 폭이 차이가 나는 장변부와 단변부에서 주름의 빈도는 거의 동일한 빈도를 나타내고 있다. 단변부가 플랜지 폭이 좁기 때문에 장변부에 비해 주름의 빈도가 높지만 변의 길이가 짧기 때문에 개수에서는 크게 차이가 나타나지 않는다.

소재의 두께에 따른 결과는 1.0 mm보다는 0.8 mm일 때 플랜지에 더 많은 주름이 발생하는 걸로 나타났다. 그림. 3(a)에서 보는 것처럼 플랜지에 발생한 주름의 높이는 블랭크 지름이 커짐에 따라, 블랭크 소재의 두께가 얇아짐에 따라 높게 나타났다.



(a) 다이와 블랭크홀더 사이의 간격 2.0 mm



(b) 다이와 블랭크홀더 사이의 간격 2.8 mm

그림. 5 블랭크홀더의 작용 유·무에 따른 주름 높이

4-2. 블랭크홀더의 작동 유·무에 따른 결과

그림. 5는 블랭크 지름이 190 mm인 소재를 성형깊이 4.0 mm로 성형할 때, 그림. 1(c)에서 0°에서 90°까지 발생한 주름의 2차원 형상을 블랭크홀더의 작동 유·무에 따라 변화하는 결과를 나타내고 있다. 여기서 보게 되면, 다이와 블랭크홀더 사이의 간격이 2.0, 2.8 mm에서 형성한 주름은 블랭크홀더의 작동 유·무에 관계없이 발생한 주름의 경향은 동일하게 나타나고 있다. 그림. 6(a)에서 보게 되면, 블랭크홀더는 발생한 주름의 개수에도 뚜렷한 영향을 미치지 않는다. 단지 주름의 높이에서 블랭크홀더가 작용할 때보다는 작용하지 않을 때가 높게 나타나는데, 그 이유는 블랭크홀더가 작용하지 않는다 하여도 다이와 블랭크홀더사이에는 자중에 의해 조금씩 블랭크홀딩력이 작용하는데, 플랜지에 발생한 주름이 이 홀딩력을 초과하여 블랭크홀더를 밀어내기 때문에 주름의 높이가 높아진다.

이것은 주름이 발생한 후에 블랭크홀더는 플랜지에 발생하는 주름의 전체 개수나 주름의 경향에 영향을 주기보다는 주름의 높이를 억제하는데 더 중요한 역할을 한다.

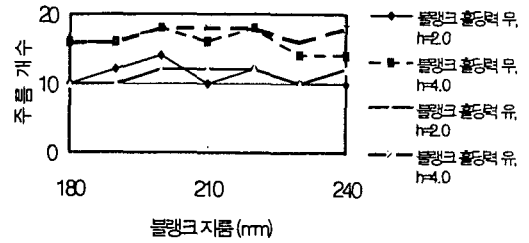
4-3. 성형깊이에 따른 결과

그림. 6은 두께 0.8 mm인 블랭크 소재를 다이와 블랭크홀더 사이의 간격을 2.0 mm로 하여 성형하는 동안 플랜지 부분에 발생하는 주름의 변화를 나타내고 있다. 전체적으로 성형깊이가 2.0 mm보다는 4.0 mm에서 플랜지에 발생한 주름의 개수가 더 많이 발생한다. 주름의 높이는 블랭크홀더가 작용을 하지 않을 경우에는 성형깊이가 4.0 mm에서 주름의 높이가 높아지고, 블랭크홀더가 작용할 경우에는 성형깊이가 2.0 mm에서 주름의 높이가 약간 높게 나타나고 있다. 그리고, 블랭크홀딩력이 작용하지 않고 성형깊이가 4.0 mm일 때 블랭크 지름이 210 mm보다 클 때 성형깊이에 따른 발생 주름의 높이가 갑자기 커진다.

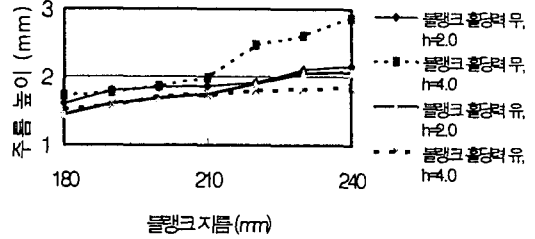
4-4. 성형된 소재에서의 플랜지 주름의 연관성

그림. 7은 두께가 0.8 mm인 블랭크 소재를 블랭크홀딩력을 가하지 않고 4.0 mm까지 성형할 경우, 사각형 용기의 직선부와 모서리부에 발생한 주름의 개수 결과를 나타낸다.

그림. 8은 블랭크 소재 두께가 0.8 mm이고, 블랭크지름이 190 mm인 소재를 성형하여 그림. 1(c)에서 나타난 것처럼, 0°에서 90°까지 발생한 주름의 2차원 형상을 나타내고 있다. 그림. 8(a), (b)에서, 장변과 단변에 형성된 주름을 비교해보면, 플랜지 폭이 좁은 단변부에서 주름의 폭이 좁게 나타나고, 더 많은 주름이 발생을 하였다. 또, 모서리부분과 나머지 직변부에서 발생하는 주름의 경향을 보게 되면, 직변 부분에서 발생한 주름보다는 모서리부분에서 발생한 주름의 폭이 작고,



(a) 주름 개수 변화 (h : 성형깊이)



(b) 주름 높이의 변화 (h : 성형깊이)

그림. 6 성형깊이에 따른 주름의 변화

주름의 개수가 많다. 그리고, 측정된 주름의 2차원 형상을 보면 형성된 주름은 모서리 부분이 시작하기 전에 골이 되고, 모서리 부분에서 새로운 주름이 형성된다. 성형깊이가 2.0 mm에서 4.0 mm로 성형되면, 모서리부분에 형성된 주름은 폭이 약간 넓어지면서 두 개의 산으로 변하게 된다. 나머지 직변부분의 주름은 거의 변화가 없다. 그림. 7에서 직변부와 모서리 부분에서 발생한 주름 개수가 나타나 있는데, 직변부보다는 모서리부에서 주름의 빈도가 높게 나타나 있다.

전체적으로 볼 때, 주름을 발생하게 하는 원주방향 압축응력이 플랜지 폭이 좁은 쪽에서 그리고, 직변부분 보다는 모서리부분에서 크게 작용을 한다. 성형이 진행되면서 모서리부분의 압축응력이 더욱더 증가를 하여 직변부분 보다 더 쉽게 주름을 발생시킨다.

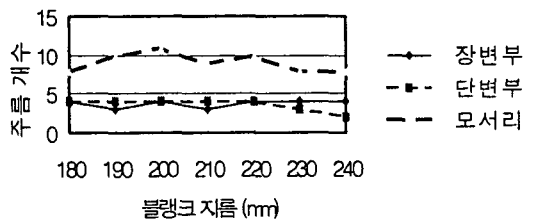
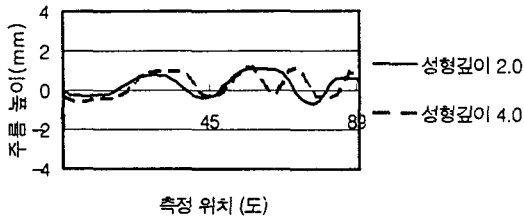


그림. 7 사각형 용기 각 부분에서 주름 개수

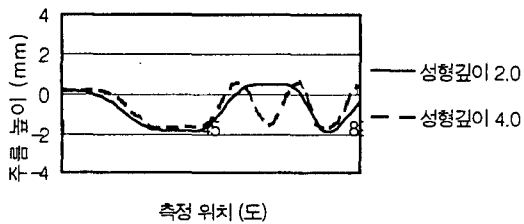
4-5. 토의

본 연구에서는 실험을 통하여 주름 발생을 관찰하기 위하여

여러 가지 공정변수를 주어서 실험을 하였고, 2차원 측정기에 의해 기준점으로부터 주름의 높이를 측정하였다. 기초실험에서 블랭크홀더를 사용하지 않을 경우 주름이 너무 크게 생겨서 드로잉을 할 수 없게 되었다. 이 점을 개선하기 위해 다이와 블랭크홀더 사이에 인위적인 간격을 주었고, 이 간격안에서 소재의 주름형성이 활발하게되어 플랜지에 발생한 주름이 육안으로 관찰하기 쉽게되었고, 전체적으로 주름의 경향을 파악하는데 도움이 되었다.



(a) 다이와 블랭크홀더 사이의 간격 2.0 mm



(b) 다이와 블랭크홀더 사이의 간격 2.8 mm

그림. 8 성형된 소재에서 주름의 2차원 형상

5. 결 론

본 연구는 원형블랭크를 사용하여 사각형 용기를 드로잉할 때 플랜지부분에 발생하는 주름의 경향을 이해하고, 성형시 공정변수들이 주름에 대해서 어떠한 영향을 주는지, 그리고 원형용기의 성형에서 플랜지부분에서 발생하는 주름의 경향과 기호할 목적으로 실험을 통하여 관찰을 하였다. 실험으로부터 얻은 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 소재의 두께가 얇고 블랭크 지름이 클 때 주름의 높이는 높으며, 블랭크 소재의 두께가 얇고 성형이 진행될수록 플랜지에 발생하는 주름의 개수는 증가한다.
- (2) 블랭크홀더는 주름이 형성된 후에는 주름의 개수에 영향을 주지 않고, 단지 주름의 높이만을 억제한다.
- (3) 원형용기의 성형에서는 플랜지 폭이 작은 경우 주름이 많

이 발생을 하는데, 사각형용기에서는 전체적으로 블랭크 지름에 관계없이 주름 개수가 거의 일정하다. 그러나 드로잉한 하나의 제품을 볼 때는 플랜지폭이 좁은 모서리부분에서 주름이 많이 생겼다.

- (4) 드로잉한 직사각형 용기에서 직변부보다는 모서리부분에서 주름을 발생하게 하는 원주방향 압축응력이 많이 받으므로 모서리에서 주름이 많이 발생을 하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. W. Geckeler, "Plastische Knicken der Wandung von Hohlzylindern und einige andern faltungserscheinungen.", Z. Angewandate Mathematik und Mechanik 8, 341-352 (1928)
- [2] B. W. Senior, "Flange Wrinkling in Deep-Drawing Operations." J. Mech. Phys. Solids, Vol. 4, 235-246 (1956)
- [3] W. Johnson and P. B. Mellor, Engineering Plasticity, Van Nostrand Reinhold, London (1973)
- [4] T. X. Yu and W. Johnson, "The Buckling of Annular Plates in Relation to the Deep-Drawing Process.", Int. J. Mech. Sci, Vol. 24, No. 3, 175-188 (1982)
- [5] T. X. Yu and L. C. Zhang, "The Plastic Wrinkling of an Annular Plate under Uniform Tension on its Inner Edge.", Int. J. Solids. Structure, Vol. 24, No. 5, 497-503 (1988)
- [6] N. Kawai, "Critical Condition of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals (1st Report, Fundamentals of Analysis and Results in case where a Blank-Holder is not used).", Bult. JSME, Vol. 4, 169-175 (1961)
- [7] N. Kawai, "Critical Condition of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals (2nd Report, Analysis and Consideration for Conditions of Blank-Holding).", Bult. JSME, Vol. 4, 175-182 (1961)
- [8] N. Kawai, "Critical Condition of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals (3rd Report, Prediction of Critical Blank-Holding Pressure).", Bult. JSME, Vol. 4, 182-192 (1961)