

## 3 차원 박판금속 성형해석에서의 블랭크 홀딩력 적용방법에 관한 연구

\*최 태훈, 허 훈, 이 충호  
한국과학기술원 기계공학과

### An Improved Scheme for the Blank Holding Force in 3-D Sheet Metal Forming Analysis

Tae Hoon Choi, Hoon Huh and Choong Ho Lee  
Department of Mechanical Engineering, KAIST

#### Abstract

Since the modified membrane element has the same external appearance as the ordinary membrane element, it is not able to apply the thickness variation of sheet metal in the blank holder to the contact treatment and the equally distributed blank holding force should be inevitably imposed on sheet metal along the periphery regardless of the contact status. But sheet metal does not contact with the blank holder at the periphery, nor the blank holding force is distributed uniformly along the boundary. To impose the blank holding force properly, the scheme is improved so that the blank holding force at each node imposed on sheet metal is dependent on the calculated thickness derivation and a state of equilibrium with the total blank holding force. The validity of the improved scheme is demonstrated with the simulation of cylindrical and rectangular cup deep drawing.

Keywords : Planar anisotropy, Modified membrane element, Sheet metal forming, Blank holding force

#### 1. 서론

박판금속 성형가공은 근대 산업의 많은 부분을 차지하는 중요한 공정으로서, 인장성형과 굽힘성형의 복합적인 조합으로 이루어진다. 성형제품의 정밀도, 생산성, 생산단가 절감 등을 위해서 박판금속 성형에 관한 해석이 절실히 요구되고 있으며, 이에따라 유한요소법을 이용한 해석에 관한 연구가 최근 수십년간 활발히 이루어지고 있다. 대부분의 박판금속 성형에서 재료는 굽힘변형을 하게 되므로, 초기 유한요소 해석에서 많이 사용되던 박막 요소는 시간과 컴퓨터 저장용량을 절약할 수 있다는 장점에도 불구하고 굽힘변형을 고려할 수 없다는 치명적인 단점을 안고 있어서 최근에는 박막 요소의 활용이 줄어들고 있다. 굽힘변형을 고려할 수 있는 쉘요소와 연속체요소는 계산의 효율성이 떨어지고 수치계산상의 집속 처리의 문제점 때문에 그 적용에 상당한 제약 받고 있다. 최근에는 이상과 같은 요소들의 장단점을 상호 보완하여 해의 정확성과 계산의 효율성을 함께 도모하고자 하는 연구들이 활발히 진행되고 있으며[1-4], 이러한 노력 중의 하나로서 Huh와 Han[5]은 굽힘을 고려할 수 있는 박막 요소를 제안하고 강소성 유한요소 수식화를 수행하였다. 이때, 박판의 변형에너지는 박막 요소의 인장변형 에너지와 굽힘변형 에너지로 나눌 수 있다고 가정하였으며, 강판의 디프트로잉 공정을 해석하므로써 제안된 수식화의 신뢰도를 입증하고 굽힘의 영향에 관한 고려가 잘 되고 있음을 확인하였다. 계속된 연구에서 저자[6]는 굽힘이 고려된 박막 요소를 사용하여 평면이방 강소성 유한요소 수식화를 유도하고, 디프트로잉 공정을 해석하였다. 최근의 산업에서 다양한 형상의 박판제품들이 요구되고 있고 제품의 설계로부터 생산까지의 기간이 단축되고 있는 것을 고려할 때, 박판성형 공정에 관한 해석에 있어서 계산의 효율성은 매우 중요한

인자이며, 따라서 이상과 같이 계산의 효율면에서 탁월한 박막 요소를 개량한 연구의 효과는 적지 않으리라 예상된다.

그러나, 박막 요소는 외형적으로 두께를 갖고 있지 않으므로 성형공정에서 두께의 변화로 인한 접촉상태를 알 수 없다. 따라서 블랭크 홀딩력이 작용되는 부위를 예측할 수 없다. 지금까지 가장 많이 사용되고 있는 블랭크 홀딩력 적용방법은 블랭크 홀더 영역에서 재료의 최외곽에 있는 절점에 블랭크 홀딩력을 적용하는 방법이다. 그러나, 실제 성형에서 재료의 최외곽 부분에서 블랭크 홀더와 접촉이 일어나지 않고, 원형컵 디프드로잉의 경우 45도 방향으로 재료가 가장 두꺼워져서 블랭크 홀딩력이 일정하게 분배되지 않으므로 이러한 적용방법은 실제와 다른 재료의 변형을 유발하게 된다. 따라서 저자의 논문[6]에서 볼 수 있는 것처럼 블랭크 홀더에 있는 재료의 외곽형태가 실험 결과와 차이가 나는 것은 블랭크 홀딩력을 적용하는 방법의 부정확성에 기인하는 것이다. 박막 요소는 외형상으로 그 두께가 없지만, 해석시에 두께가 계산되므로 블랭크 홀더에 의하여 가상적으로 압축된다고 가정하고, 그 반력이 블랭크 홀딩력과 평형을 이룰 수 있도록 하는 새로운 블랭크 홀딩력 적용방법을 제안하고자 한다. 제안된 방법으로 원형컵 디프드로잉 공정을 해석하고 실험 및 기존의 해석과 비교하였다.

## 2. 이론

그림 1에 기존의 블랭크 홀딩력을 적용하는 방법을 나타내었다. 블랭크 홀딩력은 재료의 변형과 관계없이 가장 바깥쪽에 있는 절점들에서만 작용하며, 고르게 분포한다고 가정하여  $i$  번째 절점에 작용하는 블랭크 홀딩력은 다음과 같다.

$$BHF_i = \frac{1}{2} \left( \frac{L_{i-1} + L_i}{\sum_{i=1}^{nb-1} L_i} \right) BHF \quad (1)$$

여기서,  $L_i$ 는 재료의 외곽에서  $i$  번째 절점과 이웃하는  $i+1$  번째 절점 사이의 거리이고  $nb$ 는 블랭크 홀더 영역에 포함된 절점의 수이며 BHF는 전체 블랭크 홀딩력이다. 그러나, 디프드로잉 성형공정에서 블랭크 홀더 영역에 있는 재료는 최외곽에서 가장 두꺼워지지 않으며, 평면이방성을 갖는 재료인 경우에는 방향에 따라서 두께 분포가 일정하지 않게 된다. 따라서 기존의 적용방법으로는 실제와 다른 재료의 변형을 유발하게 된다. 블랭크 홀딩력은 재료와 블랭크 홀더와의 접촉으로부터 발생하기 때문에 재료의 두께 분포의 영향을 배제할 수 없다. 박막 요소는 외견적으로는 두께가 없지만 해석상에서 매 단계마다 두께 분포를 계산하므로 블랭크 홀더에 의하여 일정한 두께보다 두꺼운 부분이 압축을 받는다고 가정하면 블랭크 홀더에 의한 재료의 반력을 구할 수 있다. 즉, 그림 2와 같이  $t_c$ 가 압축된 두께라고 가정하면,  $t_c$ 보다 두꺼운 부분에서 블랭크 홀딩력을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 블랭크 홀더에 의한 재료의 반력의 총합은 전체 블랭크 홀딩력과 같아야 평형을 이룰 수 있다. 이와 같은 개념을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{e=1}^{nbt} \int_{\Omega_e} \sigma^b(t, t_c) d\Omega = BHF \quad (2)$$

여기서  $\sigma^b$ 는 블랭크 홀더에 의하여 발생하는 압축응력으로서, 재료의 두께  $t$ 와 압축된 두께  $t_c$ 의 함수이고  $nbt$ 는  $t_c$ 보다 큰 두께를 갖는 요소의 수이다. (2)식에서 알 수 있는 것처럼  $\sigma^b$ 는  $t_c$ 에 따라서 달라지며, 이에 따라 블랭크 홀딩력과의 평형 여부가 결정된다. 따라서 이분절정법(bi-section method)에 의한 축차법을 이용하여 (2)식을 만족하는  $t_c$ 를 결정한다.

그런데, 일반적으로 한 요소 전체가  $t_c$ 보다 두꺼운 두께를 갖는 것은 아니며, 대부분의 경우 요소의 일부가 블랭크 홀더와 접촉하게 된다. 따라서, (2)식의 적분을 보다 정확하게 수행하기 위해서는 요소 내부에서 블랭크 홀더와 접촉하게 되는 부분을 예측할 수

있어야 하며, 이에 따라 절점에서의 두께 분포를 필요로 하게 된다. 해석상에서 계산된 두께 분포는 가우스 적분점에서 구한 것이므로, 최소자승법(Least square method)을 이용하여 절점에서의 두께 분포를 구하였다. 모든 절점에서의 두께를 알고 있으므로, 가정된  $t_c$ 로부터 요소 내부에서 블랭크 홀더와 접촉하는 부분을 예측할 수 있게 된다. 이때 예측된 블랭크 홀더와 재료의 가상적인 접촉 상태에 따라서 그림 3과 같이 분류하였다. 빗금친 부분이 재료의 두께가  $t_c$ 보다 두꺼운 부분으로서 블랭크 홀더와 닿고 있다고 생각할 수 있는 부분이다. 요소 내부에서 두께가  $t_c$ 와 일치하는 부분이 직선이 되는 것은 사각요소 내부에서 두께가 일차적인 분포를 이룬다고 가정하였기 때문이다. 그림 3에서처럼 예측된 접촉부분을 삼각요소로 나누어 각각의 삼각요소에서 적분을 수행하였다.  $\sigma^b$ 는 각 삼각요소의 적분점에서 다음과 같이 계산하였다.

$$\sigma^b = k(\epsilon^b + \epsilon_0)^n \quad (3)$$

여기서  $k$ ,  $n$ 은 각각 재료의 가공경화 상수 및 지수이며,  $\epsilon_0$ 는 재료의 항복응력에 의하여 결정되는 초기 변형률이다. 즉, 블랭크 홀더에 의하여 발생하는 압축응력은 재료의 인장응력과 같은 거동을 한다고 가정하였다. 이때,  $\epsilon^b$ 는 압축변형률로서 다음과 같이 결정된다.

$$\epsilon^b = \ln\left(\frac{t}{t_c}\right) \quad (4)$$

이상과 같은 방법으로 적분을 수행하여 (2)식을 만족하게 되면 가상의 압축두께  $t_c$ 는 재료의 반력과 블랭크 홀딩력이 평형상태에 있도록 하게 된다.

삼각요소에서 압축응력을 적분하여 구한 반력은 유한요소 해석을 위해서 사각요소의 각 절점으로 적절히 분배되어야 한다. 그림 4와 같이 압축응력의 적분치는 삼각요소의 무게중심에 작용한다고 가정하고 다음과 같이 형상함수를 이용하여 사각요소의 절점으로 분배하였다.

$$BRF_i^\alpha = BRF^\alpha \times N_i(s_\alpha, t_\alpha) \quad (5)$$

여기서  $BRF^\alpha$ 는 삼각요소에서 압축응력을 적분한 반력치이고  $BRF_i^\alpha$ 는 사각요소에서  $i$ 번째 절점에 분배된 반력치이며  $N_i$ 는 사각요소의 형상함수이다.  $\sum_{i=1}^4 N_i(s_\alpha, t_\alpha) = 1$ 이므로

(5)식에 의하여 분배된 사각절점에서의 반력의 합은 삼각요소에서 계산된 반력과 같게 된다. 또한 형상함수가 계산되는  $\alpha$ 번째 삼각요소의 무게중심에서의 국부좌표  $s_\alpha$ ,  $t_\alpha$ 는 일반좌표  $x_\alpha$ ,  $y_\alpha$ 로부터 최소자승법으로 계산하였다.

### 3. 수치해석 및 결과

개선된 블랭크 홀딩력의 적용방법을 이용하여 원형컵 디프드로잉 성형 공정을 해석하였다. 해석에 사용된 재료는 aluminum-killed steel이며 재료의 성질은 표. 1에 나타내었다. 기존의 블랭크 홀딩력 적용방법을 사용한 해석과 개선된 적용방법을 사용한 해석 모두에서 재료는 평면이방성을 갖는다고 생각하였다. 마찰계수는 0.24 이고 블랭크 홀딩력은 1000kgf이다. 대칭을 고려하여 전체영역의 1/4 만 해석하였다. 해석에 사용된 절점과 요소의 수는 각각 347 개와 318 개이다. 펀치행정이 50mm 일때까지 해석하였으며, 개선된 블랭크 홀딩력의 적용방법을 사용하였을 때, 압축두께  $t_c$ 를 구하기 위한 반복축차는 매 단계에서 10에서 12 축차에서 수렴하였다. 해석에 사용된 다이의 형상을 그림 5에 나타내었다.

그림 6에 펀치행정이 40mm 일때의 변형형상을 나타내었다. 그림 7은 펀치행정이 15.8mm, 30mm 일때의 재료의 변형된 외곽형태를 실험[7]과 비교한 것으로서, 개선된 블랭크 홀딩력 적용방법이 더욱 실험과 근사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 실제의 원형컵 디프드로잉 성형공정에서 45도 방향으로 재료가 많이 빨리 들어옴으로써

재료의 두께가 다른 방향보다 더 두꺼워지고 이에 따라 이 방향으로 블랭크 홀딩력이 더 많이 작용하여 귀현상을 억제하기 때문이다. 그러나 기존의 블랭크 홀딩력 적용방법은 이러한 두께분포의 변화에 따른 블랭크 홀딩력의 집중을 고려할 수 없기 때문에 실험 결과보다 더욱 과장된 귀현상을 나타내게 된다. 그림 8에 나타난 것처럼 개선된 블랭크 홀딩력 적용방법을 이용하였을 때 블랭크 홀딩력이 작용되는 부분을 그려보면 변형이 진행됨에 따라서 45도 방향으로 집중되는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 귀현상의 심화를 억제하고 실험 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

그림 9에 펀치행정에 대한 하중의 변화를 해석 결과와 실험치를 비교하였다. 블랭크 홀딩력을 적용하는 방법에 따라서 재료의 변형형상이 달라지므로 이에 따라 하중도 약간의 차이를 보임을 알 수 있으며 개선된 블랭크 홀딩력 적용방법을 이용하여 해석하였을 때 보다 실험치에 근접한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

굽힘이 고려된 개량된 박막요소를 이용한 원형컵 디프드로잉 성형 해석에서 블랭크 홀딩력을 적절하게 적용하기 위하여 재료의 두께변화를 고려한 새로운 블랭크 홀딩력 적용방법을 제안하고 3차원 평면이방 강소성 유한요소 해석에 도입하였다. 기존의 블랭크 홀딩력을 적용하였을 때 나타나던 과다한 귀현상을 억제하여 보다 실험치에 가까운 재료의 외곽형상을 얻을 수 있었으며, 이로부터 개선된 블랭크 홀딩력 적용방법이 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 또한 개선된 적용법을 이용한 해석으로부터 펀치하중도 더욱 정확하게 예측될 수 있음을 알 수 있었다.

#### REFERENCES

1. E. Onate and C. A. de Saracibar, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol.30, No.8, pp.1577-1593, 1990
2. D. Quoirin, *proc. NUMIFORM 92*, pp.527-533, 1992
3. M. Kawaka and A. Makinouchi, *proc. NUMIFORM 92*, pp. 491-496, 1992
4. T. C. Gmur and A. M. Schorderet, *Comp. Struct.*, Vol.46, No.4, pp.583-391, 1993
5. H. Huh, S. S. Han and D. Y. Yang, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.36, pp.659-671, 1994
6. 최 태훈, 허 훈, 한국소성가공학회 '97 춘계학술대회 논문집, pp.183-187
7. W. J. Chung, D. Y. Yang and Y. J. Kim, *Proc. 3<sup>rd</sup> ICTP*, pp.1135-1142, 1990

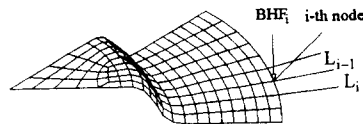


그림 1. 기존의 블랭크 홀딩력 적용방법

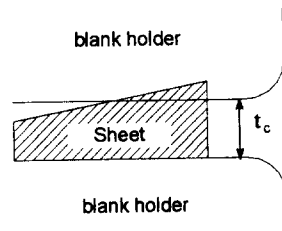


그림 2. 가상적인 압축두께

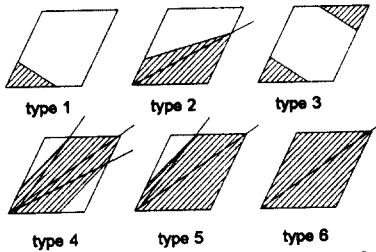


그림 3. 블랭크 홀딩력이 작용되는 양상에 따른 분류

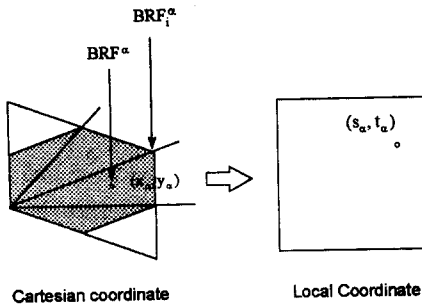


그림 4. 사각요소의 각 절점에서의 반력 계산

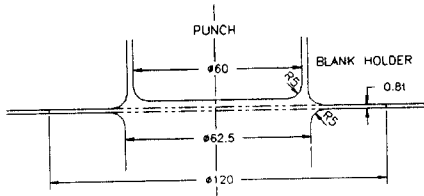


그림 5. 해석에 사용된 다이의 형상

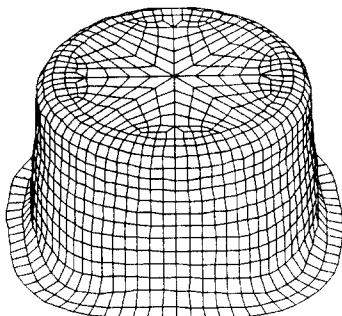


그림 6. 행정이 40mm 일때의 변형형상

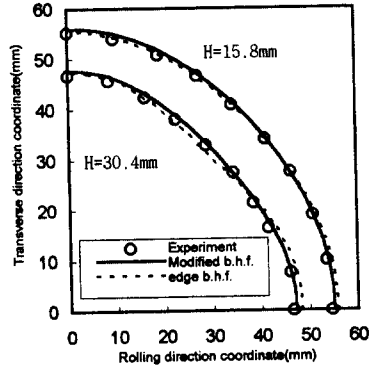


그림 7. 외곽형상의 비교

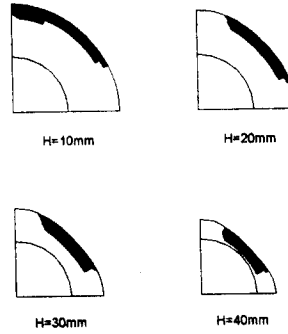


그림 8. 변형과정에서 블랭크 홀딩력이 작용하는 영역의 변화

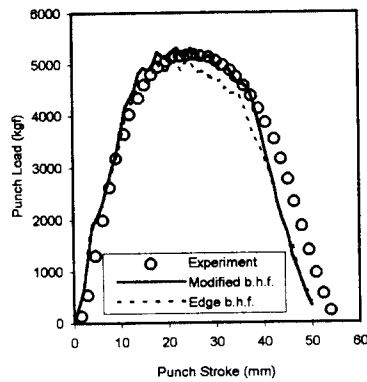


그림 9. 펀치행정에 따른 펀치반력 비교