

블랭크 홀딩력 조절을 통한 성형성 향상에 관한 수치적 연구

최현석¹ · 정완진[†]

고려대학교 대학원 기계공학과, 한국생산기술연구원 금형기술그룹¹
서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과[†]

A Numerical Study on formability improvement by adjusting blank holding force

Hyun-Seok Choi¹ · Wan-jin Chung[†]

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Korea Univ, Molds&Dies Technology R&D
Department, KITECH¹

Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and
Technology[†]

(Received December 04, 2015 / Revised February 23, 2016 / Accepted March 02, 2016)

Abstract: In sheet metal forming process, drawing is typical process. And the key factor of drawing is blank holding force (BHF). A low BHF can cause wrinkling, whereas a high BHF can cause fracture during a deep drawing process. Thus, formability can be influenced by application appropriate BHF. In this study, a variable blank holding force (VBHF) is applied to extend the forming limit by avoiding both wrinkling and fracture. To determine VBHF in drawing process, numerical simulations and statistical analysis are carried out using commercial FEM software.

Key Words: Drawing process, Variable Blank Holding Force, Finite Element Analysis, Statistical Methods

1. 서 론

금속 판재를 펀치가 다이 속으로 끌고 들어가며 이음매 없는 중공용기를 성형하는 공정을 드로잉 공정이라 한다. 성형 조건에 따라 주름과 파단 등의 불량 발생할 수 있으며, 드로잉 공정의 성형성에 영향을 주는 인자는 블랭크 홀딩력(blank holding force, BHF), 펀치와 다이의 반경, 마찰과 윤활, 블랭크의 형상 등이 있다. 공정의 진행에 따른 소재의 변형은 Fig. 1과 같이 진행된다. 먼저, 다이 상면의 제품의 테두리에 해당하는 플랜지 부위에서는 원주 방향에서 발생하는 압축응력에 따라 소재의 직경이 축소되고, 반경방향에서는 인장응력이 작용한다.

따라서 다이 속으로 유입된 소재는 펀치와 다이의 틈새에 의해 직경이 일정하게 유지되고, 수직방

향의 인장응력만 작용한다.

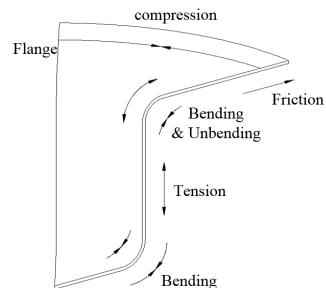


Fig. 1 Stress distributions in drawing cup

이 과정에서 플랜지부의 압축응력이 필요이상으로 크게 작용하면, 주름이 발생한다. 이러한 주름을 방지하기 위하여 소재를 눌러주는 플레이트인 블랭크 홀더(blank holder)를 설치하고, 블랭크를 눌러주는 힘인 BHF를 키워 주름을 방지할 수 있다. 그러나 BHF를 과도하게 상승시킬 경우 플랜지 부 소재

1, 고려대학교 대학원 기계공학과, 한국생산기술연구원 금형기술그룹
[†] 교신저자 : 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
Email : wjchung@seoultech.ac.kr

유입이 차단되어, 파단이 발생할 수 있다.

국외에서는 BHF와 성형성의 관계에 관한 연구가 활발히 진행 중 이다. E. Doege 등¹⁾은 주름한계와 파단한계에 관한 연구를 진행하였으며, 이와 관련하여, S. Kitayama 등²⁾은 페루프 시스템을 통해 주름과 파단이 발생하지 않는 성형한계곡선 아래에서 가변형 BHF(variable blank holding force, VBHF)을 사용하여, 성형성의 개선을 확인하였다. 또한

L. Wang 등³⁾은 최적의 BHF 선도 검출을 위하여 반응표면분석법(response surface method, RSM) 등의 통계적 분석기법을 사용하였다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석 (finite element analysis, FEA)과 통계적 기법 (statistical methods)을 통해 최적의 BHF선도를 도출하고자 한다.

2. 유한요소 해석모델 설정 및 성형조건

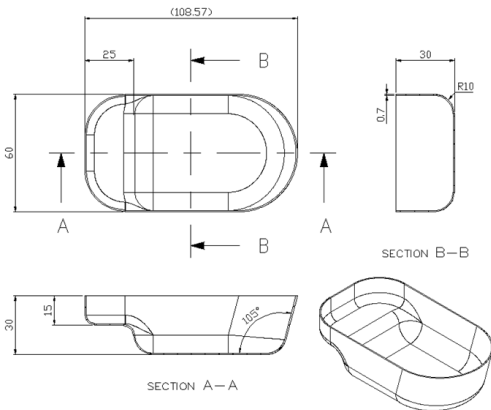


Fig. 2 Detail dimension of drawing model

본 연구에서 실험한 모델은 Fig. 2에 표기한 것과 같이, 2단 이형 사각 컵 드로잉 모델이다. 전형적인 사각 컵 모델에서 탈피하여, 한쪽 변이 반원으로 구성 되어있다. 또한 반원형 변은 측벽 부에 15°의 테이퍼가 적용되어있으며, 반대쪽 변은 계단 형의 단이 추가되어 있다. 단의 높이는 15 mm이며, 전체 성형 높이 30 mm 중 절반에 해당하는 높이이다. 또한 편지 반경과 다이 반경은 각각 10 mm, 5 mm로 설정하였고, 해석에 사용된 소재의 강종은 mild steel 0.7t이며 물성데이터는 Table 1에 표기하였다.

유한요소해석에 사용된 성형 해석 프로그램은 AUTOFORM R3.1을 사용하였다. 해석에 적용된 조

건 중 마찰계수는 0.15를 적용하였으며, 초기 mesh 크기는 2 mm, 요소 분할기능과 요소 재구성 기능은 사용하지 않았다.

Table 1 Material property of mild steel 0.7t sheet

Factor	Value
Yield strength	157.1 MPa
Tensile strength	309.7 MPa
Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
Work - hardening exponent	0.228
Anisotropy coefficient	r0=1.79, r45=1.51, r90=2.27

3. 통계적 기법을 이용한 VBHF 선도 도출

유한요소 해석에 AUTOFORM R3.1을 사용한 이유는 프로그램에 탑재된 SIGMA MODULE을 활용하기 위해서다. 이 모듈은 통계적 기법을 이용하여, 요인 분석 및 인자 최적화를 수행할 수 있는 모듈이다. 지정한 형상 인자 및 성형 조건에 대해 반복해석 후, 결과에 대하여 통계적 분석을 수행한다. 따라서 인자들이 결과에 미치는 영향을 평가하여, 최적조건을 도출해 낼 수 있다.

우선 인자들의 영향도, 즉 경향성을 평가하기 위해 모듈에 탑재된 design process를 수행하였다. 모델의 성형높이 30 mm를 각각 10 mm씩 균일하게 분할하여 제어 범위를 설정하고, 범위 별 요인을 BHF로 선택하였다. 모든 요인에 대한 BHF 조절범위는 1~30000 N으로 적용하였는데, 상한 값은 일정한 BHF(constant BHF, CBHF)인 15,000 N의 2배 값으로 설정하였다.

VBHF의 효과를 분석하기 위하여 일정한 CBHF를 적용한 모델과 그 결과를 비교 하였다. CBHF의 설정 기준은 최대편치하중의 1/4인 30000 N을 적용하였다. 모든 구간에서 time step을 0.5로 동일하게 설정하여, time step이 결과에 미치는 영향을 동일하게 하였다.

인자의 수가 3개로 반복 해석 횟수는 SIGMA MODULE이 제안하는 통계분석적 최소 해석 횟수인 50회를 수행하여 통계분석의 신뢰성을 확보하였고, 각 구간별 BHF가 성형성에 미치는 영향도를 분석하여 영향도가 큰 인자의 스트로크 구간과 BHF의 범위를 세분화하여, 최적화 해석을 추가 실시하였다.

4. 결과 및 분석

4.1. CBHF적용 해석결과

최대 주변형률($\epsilon_{1.Max}$)과 같은 주변형률에서 FLC위의 주변형률($\epsilon_{1.FLC}$)의 비를 Max. failure로 하여 성형성 평가 지수로 사용하였다.

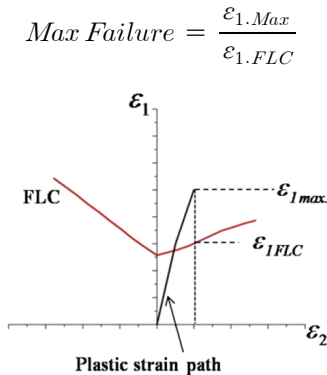


Fig 3. Forming Limit Diagram and Max. Failure

Fig. 3과 같이, Max. failure가 1보다 클 경우 요소의 변형상태가 FLC위에 있게 되므로 파단으로 판정한다.

Fig. 4는 CBHF 30000 N을 적용한 모델의 성형 완료 후 Max. failure를 도시하였다. 검정색 mesh는 Max. failure가 1을 넘는 mesh이며, 파단이 발생한 mesh 근처의 구간을 zone1로 구분하였다. Zone 1의 최대 Max. failure값은 1.0439이며 최대 성형하중은 61749 N이고, 파단 시작 시점은 스트로크 29.5 mm에서 발생하였다.

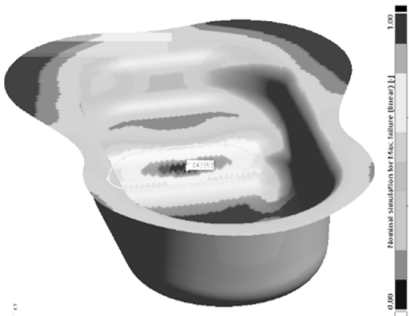


Fig. 4 Contour of Max. Failure for CBHF=30000N

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 모델의 formability를 도시한 자료다. 주름에 대한 수치는 두께를 기준으로 판정하였다. 플랜지부의 소재 유입으로 발생한 주름 판정 구간 외, 제품 내측에서 발생한 주름 구간을 zone 2로 구분하였다. Zone 2의 최대두께 mesh는 0.72057로 소재 두께 대비 약 2.8 % 정도 증가한 수치를 나타냈다.

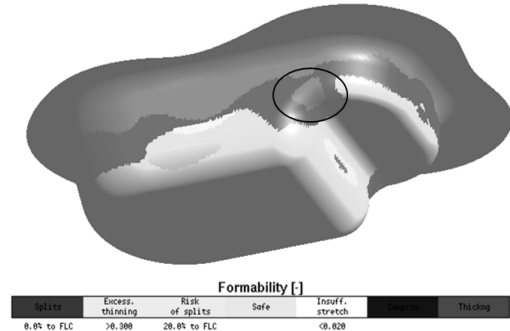


Fig. 5 Contour of Formability

4.2. SIGMA MODULE을 이용한 최적 VBHF 탐색

Table 2 Stroke and BHF by factors

Factor	Stroke [mm]	BHF[N]
BHF1	0~10	1~30000
BHF2	10~20	1~30000
BHF3	20~30	1~30000

Table 2에 SIGMA MODULE에 적용한 요인 별 스트로크 구간과 BHF의 제어 범위를 나타내었으며, Fig. 5에서 표시된 Max. failure가 발생한 zone 1에 대한 영향도 분석을 수행하였다.

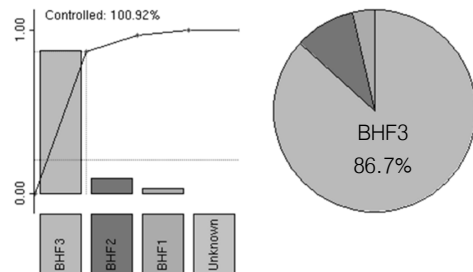


Fig. 6 Sensitivity analysis of Zone1

Fig. 6의 BHF3항목이 영향도 86.7%로써 zone 1 구간의 성형에 대한 영향도가 다른 항목에 비해 가장 높은 것으로 나타났다. Fig. 7에 근거하여 추세선

을 분석해본 결과, BHF1, 2는 경향을 나타내는 추세선이 나타나지 않은 반면 BHF3은 BHF값 증가할수록 Max. failure 또한 증가하는 결과를 나타냈다. 따라서 파단의 지표인 Max. failure를 낮추려면 BHF3 또한 낮춰야 한다는 결과를 얻을 수 있다.

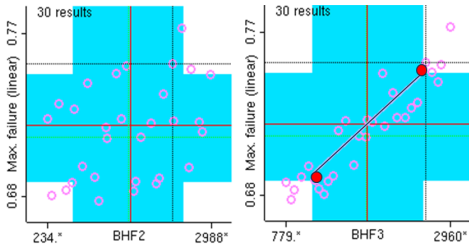


Fig. 7 Scatter diagram of Zone1

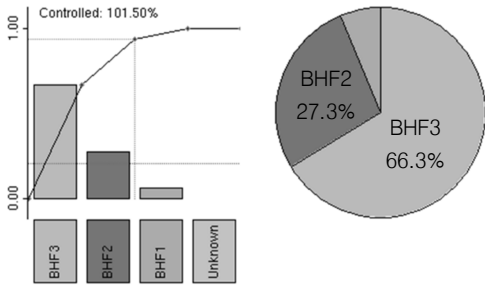


Fig. 8 Sensitivity analysis of Zone2

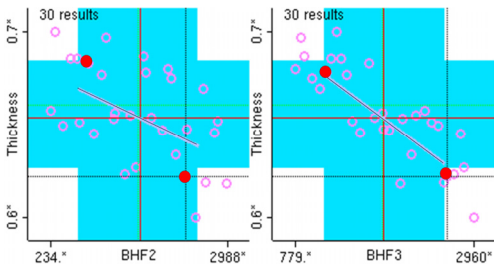


Fig. 9 Scatter diagram of Zone2

Zone 2에 대한 분석을 나타낸 Fig. 8, 9에서는 zone 1에 대한 경향과는 상반되는 경향이 나타났다. 구간에 대한 영향도는 BHF2가 27.3%, BHF3가 66.3%이며, 추세선 분석에서는 두께 값이 BHF에 반비례하는 경향을 나타내고 있었다. 따라서 주름을 줄이려면 BHF를 높여야 한다는 경향분석을 얻을 수 있었다.

앞선 경향 분석에서 zone 1과 zone 2는 서로 상반된 경향을 나타내므로, optimization process에서는

주름과 파단에 영향을 준 BHF2, 3 두 구간을 모두 변수로 설정하여 Table 3과 같이 적용하고, 해석을 수행하였다. 추세선과 민감도 분석을 통해 얻은 최소값과 최대값을 인자의 최적화 범위로 설정하였으며, zone 1과 zone 2 구간에 대한 해의 수렴범위 또한 별도로 지정하였다. 파단구간인 zone 1에 대한 해의 수렴범위는 FLC이하의 영역으로 지정하여 Max. failure 값이 1이 넘지 않도록 지정하였고, 주름 구간인 zone 2에 대한 해의 수렴범위는 두께 일정선 위의 영역으로, 소재의 두께가 두꺼워 지지 않는, 즉 주름이 지지 않는 영역으로 설정하여 반복해석을 수행하였다. 따라서 Fig. 10과 같은 VBHF선도를 도출할 수 있었으며, 그 결과값은 Table 4에 기입하였다.

Table 3 Stroke and BHF by factors

Factor	Stroke [mm]	BHF[N]
BHF1	0~10	15000
BHF2	10~20	6000~25000
BHF3	20~30	6000~25000

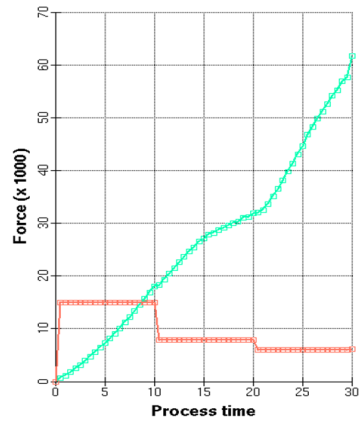


Fig. 10 VBHF Trajectory and Load curve for optimization result

Table 4 Result of process data

Factor	Max. Failure	Max. Thickness	Punching Force
CBHF	1.043695	0.720576 mm	63402.9 N
VBHF	0.962892	0.725291 mm	61749.9 N

VBHF로 해석한 결과는 파단이 발생하지 않았으며, 성형하중이 감소한 결과를 나타냈다. Max. failure 값은 CBHF대비 7.7% 정도 낮은 수치를 나타내며 FLC이내의 영역으로 파단이 발생하지 않았다.

성형하중 또한 2.6% 정도 개선된 데이터를 나타내고 있다. 하지만 주름의 지표로 설정한 소재 두께는 증가한 값을 나타내고 있다. 이는 연구에 사용한 AUTOFORM R3.1 에서는 주름에 대한 판정 기준에 대한 내용과 관련이 있다. Software가 소재 두께를 기준으로 0.001 mm라도 두꺼워지는 구간이 발생하면 formability에서는 전부 주름으로 판정한다. 하지만 실제 판재를 성형하는 과정에서 주름은 소재두께의 증가만으로 판정하기에는 기준이 너무 모호하며, 더욱 복잡한 변형 거동을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 소재두께의 10% 이상 증가할 경우를 주름으로 판정하였다. 따라서 약 3.6% 증가한 VBHF 해석 모델은 주름이 지지 않는다고 판정할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석과 통계적 기법을 적용한 software인 AUTOFORM R3.1 SIGMA MODULE을 이용하여 최적의 VBHF선도를 도출하였다. VBHF모델과 CBHF모델의 비교를 통해 결과

값을 비교하였으며, VBHF해석모델의 Max. Failure와 성형하중의 감소를 통해 성형성 개선을 확인하였다.

참고문헌

- 1) E. Doege, N. Sommer, "Optimization of the blank holder force during deep drawing of rectangular parts. Stahl und Eisen", 103(3), pp. 139-142, 1983.
- 2) S. Kitayama, S. Hamano, K. Yamazaki, T. Kubo, H. Nishikawa, Kinoshita, "A closed-loop type algorithm for determination of variable blank holder force trajectory and its application to square cup deep drawing", Int. J. Adv. Manuf. Technol., 51, pp. 507~571, 2010.
- 3) L. Wang, Lee TC, "Controlled strain path forming process with space variant blank holder force using RSM method", J. Mater. Process Technol., 167, pp. 447 - 455, 2005.
- 4) E. H. Jang, S. H. Jung, S. H. Lee, "A Numerical Study on Determination of Optimization Forming Conditions by Servo-Press", 2013.