

등가 드로비드 모델의 실험적 검증 및 차체 스탬핑 해석에 적용

문성준¹ · 이자연² · 김영탁[#]

Experimental Verification of Equivalent Drawbead Model and Application to Auto-Body Stamping Analysis

S. J. Moon, J. Y. Lee, Y. T. Keum

(Received February 25, 2009 / Revised July 14, 2009 / Accepted July 15, 2009)

Abstract

An equivalent drawbead model(EDM) for sheet metal forming analysis, which replaces complex drawbead geometries with drawbead forces in modeling the stamping dies with finite elements, is experimentally verified and applied to the numerical simulation of auto-panel stamping process. The drawbead restraining and opening forces of elliptical drawbead, circular drawbead, square drawbead, and step drawbead are obtained by performing the drawbead pulling test and compared with those of EDM and commercial code models(CCM). Better agreement with experimental measurements is found in EDM than CCM. Furthermore, the excellence of EDM is demonstrated in its application to the auto-body stamping analysis.

Key Words : Drawbead, DBRF, DBOF, Elliptical Drawbead, Circular Drawbead, Square Drawbead, Step Drawbead, Equivalent Drawbead Model

1. 서 론

유한요소 법을 이용한 박판성형 해석은 프레스 성형의 트라이아웃 과정에서 발생하는 여러 가지 문제를 사전에 파악할 수 있도록 하여 금형 설계와 개발에 소요되는 비용과 시간을 현저히 줄여 준다. 그러나 스탬핑 공정에서 사용하는 드로비드는 박판성형 시 주름, 파단, 스프링백 등의 성형 결함을 방지하는 가장 중요한 설계인자들 중의 하나임에도 명확히 규명되지 않고 있는 실정이다. 특히, 등가 드로비드로의 근사는 관련업체마다, 또 소프트웨어마다 서로 다른 드로비드력을 제시하고 있어 이에 대한 보다 명확한 정립과 검증이 필요하다.

드로비드에 관한 연구는 Nine에[1,2] 의해 드로비드 실험이 시작된 후, Wang이[3] 원형 비드의 수학적 모델을 제시하였고, Levy는[4] 저항력을 예측하기 위한 가상일의 원리를 도입하였다. 또한, Stoughton은[5] 프레스 성형에서 여러 가지 인자를 고려한 드로비드의 수학적 모델을 제시하였고, Carleer등은[6] 2차원 유한요소 해석을 이용한 등가 드로비드 모델을 제안하였으며, Lee등은[7] 혼합 등방-이동경화 식을 통해 드로비드력 산출을 하였고, Keum등은[8~10] 유한요소 해석을 위한 등가 드로비드 모델과 이를 위한 실험을 제안하였다.

본 연구에서는 등가 드로비드 모델로 산출된 드로비드력을 실험을 통해 측정된 값과 비교하여 검증하고, 리프트게이트 아우터 금형의 성형해석

1. 한양대학교 일반대학원, 자동차 공학과
2. GM대우 Die & Press, 금형기술팀
교신저자: 한양대학교 기계공학부, ytkeum@hanyang.ac.kr

에 적용하여 등가 드로비드 모델의 정확성과 응용성을 확인하고자 한다.

2. 등가 드로비드 모델

2.1 저항력

드로비드 저항력(Drawbead Restraining Force: DBRF)은 프레스 공정의 스탬핑 공정에 의해 박판이 금형의 바깥쪽에서 안쪽으로 성형 및 인출되는 과정 중 상형 펀치 다이와 하형 블랭크 홀더 사이에 있는 드로비드가 인출을 제어하면서 발생시키는 수평방향의 힘이다[1,2]. 이때 박판은 드로비드의 형상과 치수에 의해 각 구간에서 굽힘력, 되굽힘력을 반복적으로 받으며 모양과 물성이 변화되는데 이러한 힘들의 합이 드로비드 저항력이고 이 힘이 너무 크면 시편은 인출되지 않거나 파단이 발생하게 된다. 본 연구에서는 드로비드 저항력 산출을 위해 드로비드 부에서 박판이 평면변형 모드를 가진다고 가정하고, 반복적인 굽힘과 되굽힘에 의한 Bauschinger 효과와 transient 거동을 나타내기 위하여 Chaboche 단 표면 모델에 기초한 혼합 등방-이동경화 식을 이용하였으며, 드로비드 입구에서 탈출구까지 주어진 시간 증분 동안 드로비드 형상에 의한 요소의 변형경로를 변형 증분 이론에 기초한 구성방정식의 적분을 통해 박판의 경화를 구현하였다[7]. 그리고 드로비드의 형상을 수학적으로 묘사하기 위해 원형 드로비드와 박판의 접선 방정식을 개선하여 접촉각을 구하였고, 이를 사각 드로비드와 계단 드로비드의 기하학 모델에도 적용하였다[8].

2.2 상압력

드로비드 상압력(Drawbead Opening Force: DBOF)은 박판이 드로비드를 통과할 때 박판이 상형 펀치 다이를 들어 올려 다이 세트를 열리게 하는 힘이다[1~2]. 따라서 이 힘이 너무 크면 상형 펀치 다이가 들어 올려져 불완전한 성형이 된다. 본 연구에서 드로비드 상압력은 박판이 드로비드 부를 통과하면서 생기는 마찰 면압에 의한 수직력과[5] 박판이 드로비드 부를 따라 인출되면서 발생하는 탄성 복원력의 수직성분 힘의 합이다[8].

3. 검증

등가 드로비드 모델의 검증을 위해 Keum등이[9]

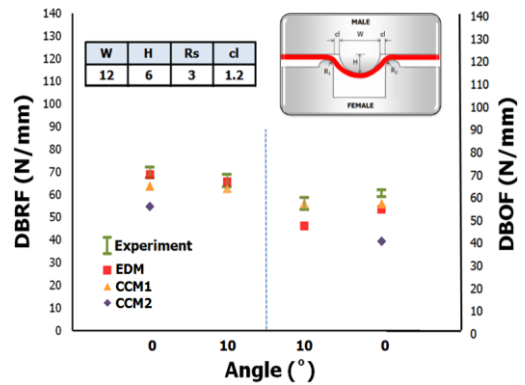


Fig. 1 Comparison of drawbead forces of circular drawbead among experiment(Experiment), equivalent drawbead model(EDM), and commercial code models (CCM 1, CCM 2)

제안한 드로비드 실험을 수행하여 얻은 드로비드력과 전술한 “2. 등가 드로비드 모델” (EDM)로 구한 드로비드력, 그리고 박판 성형해석 전용 상용 소프트웨어들이 제공하는 드로비드 모델(CCM)로 구한 드로비드력들을 서로 비교하였다.

3.1 원형 드로비드

원형 드로비드의 인출실험에서 드로비드 실험금형[10]의 경사에 따라 측정된 드로비드력들을 EDM과 CCM들로 구한 드로비드력들과 비교하여 Fig. 1에 수록하였다. 여기서 좌우의 세로축(y축)은 각각 드로비드 인출력과 상압력이고, 가로축(x축)은 실험한 금형의 경사이다. 그리고 CCM2는 경사진 금형에 대한 드로우비드력을 지원하지 않았다. 등가 드로비드 모델의 드로비드력은 실험값과 인출력 1%, 상압력 12%의 오차를 보이고, 상용 소프트웨어의 인출력과 상압력들은 10~20% 내외의 오차를 보여, 등가 드로비드 모델로부터 얻은 드로비드력들이 상용 해석 소프트웨어의 드로비드 모델로부터 얻은 드로비드력들 보다 실험치와 더 잘 일치함을 알 수 있었다.

3.2 사각 드로비드

사각 드로비드의 인출실험에서 드로비드 실험금형[10]의 경사에 따라 측정된 드로비드력들을 EDM과 CCM들로 구한 드로비드력들과 비교하여 Fig. 2에 수록하였다. 등가 드로비드 모델의 드로비드력은 실험값과 4%정도의 오차를 보이고, 상용 소프트웨어의 드로비드력들은 10~40% 내외의 오차

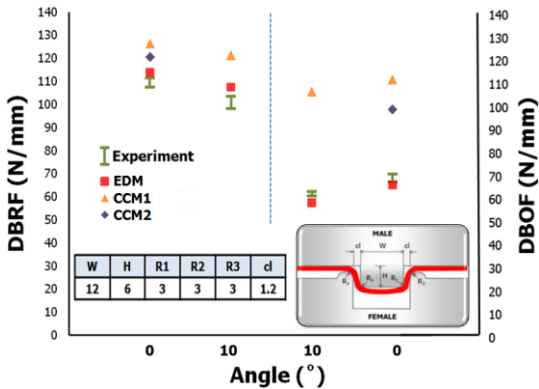


Fig. 2 Comparison of drawbead forces of square drawbead among experiment(Experiment), equivalent drawbead model(EDM), and commercial code models(CCM 1, CCM 2)

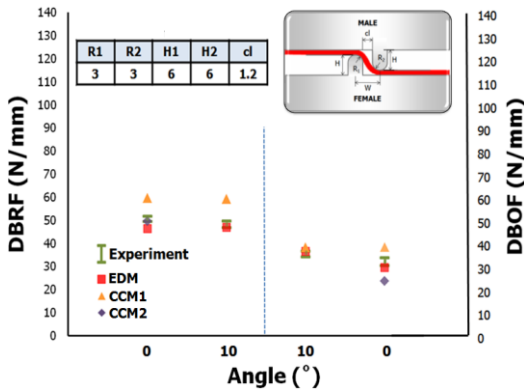


Fig. 3 Comparison of drawbead forces of step drawbead among experiment(Experiment), equivalent drawbead model(EDM), and commercial code models(CCM 1, CCM 2)

를 보여 등가 드로비드 모델이 실험치와 가장 근사함을 확인하였다.

3.3 계단 드로비드

계단 드로비드의 인출실험으로 드로비드 실험금형[10]의 경사에 따라 측정된 드로비드력들을 EDM과 CCM들로 구한 드로비드력들과 비교하여 Fig. 3에 수록하였다. 등가 드로비드 모델의 드로비드력은 실험값과 8%정도의 오차를 보이고, 상용 소프트웨어의 드로비드력들은 20%내외의 오차를 보여 등가 드로비드 모델이 실제와 가장 근사함을 알았다.

4. 적용

등가 드로비드 모델로부터 구한 드로비드력과 상용코드들에서 구한 드로비드력들을 각각 리프트게이트 아우터 패널의 스탬핑 공정 성형해석에 적용하였고, 해석결과에서 두께 변형률과 드로인양을 트라이아웃 패널의 것들과 비교하였다.

4.1 해석조건

리프트게이트 아우터 금형의 스탬핑 공정 성형해석을 위해 다이와 블랭크 홀더 및 펀치는 3, 4 절점의 강체 요소로, 블랭크 박판은 초기 크기 2mm×2mm, 두께방향으로 적분점 5개를 갖는 4절점 쉘 요소로 모델링 하였고, remesh 기법을 통해 요소의 크기가 최적화가 되도록 하였다(Fig. 4와 Table 1 참조). 블랭크 홀딩력은 110ton을, 펀치 속도와 블랭크 홀더 속도는 각각 5m/s, 2m/s를 적용시켰다. 금형과 블랭크 사이의 마찰계수는 마찰실험을 통해 구한 $\mu=0.11$ 을 적용하였다.

4.2 드로비드 레이아웃

Fig. 5는 리프트게이트 아우터 패널의 드로비드 배치도이다. 드로비드들은 가운데 중심선을 대칭으로 좌우에 위치되었고, 보는 바와 같이 원형 비드와 타원형 비드가 0도부터 7도까지 경사진 다

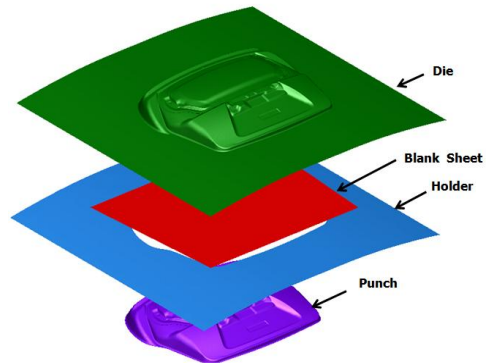


Fig. 4 Tool layout for liftgate outer draw-forming

Table 1 Number of finite elements for analyzing draw-forming process of liftgate outer panel

Tools	Holder	3-node and 4-node rigid elements	16,172
	Punch		95,067
Die	111,238		
Blank Sheet (SPCEN, 0.65mm, Bare)		3-node shell elements	52,106

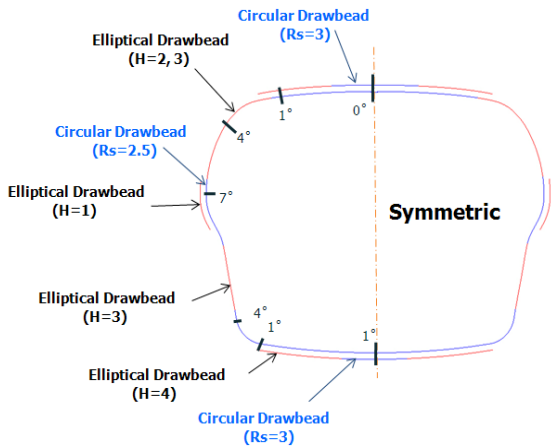
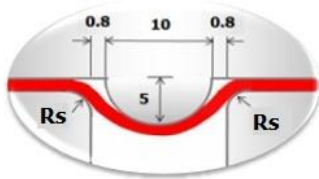
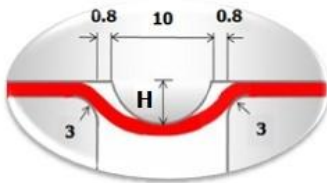


Fig. 5 Layout of drawbeads in liftgate draw die (H: drawbead height, Rs: radius of shoulder)



(a) Circular Drawbead (Rs=3, 2.5)



(b) Elliptical Drawbead (H=4, 3, 2, 1)

Fig. 6 Schematic view of drawbeads shown in Fig. 5

이페이스에 단일 혹은 이중 비드로 배치되어 있다. 이들 드로비드의 종류와 크기 그리고 설치조건에 따른 드로우비드력들을 각각 등가 드로비드 모델과 상업용 성형해석 코드로부터 산출하여 (Table 2 참조) 리프트게이트 아우터 패널의 스탬핑 공정 성형해석에 적용하였다.

4.3 두께 변형률

등가 드로비드 모델과 상업용 성형해석 코드로부터 구한 드로비드력을 적용하여 리프트게이트 금형의 성형해석을 수행한 후 두께 변형률을 측정하고 실측치와 비교하였다.

Table 2 Drawbead forces determined by equivalent drawbead model(EDM) and commercial code models(CCM 1, CCM 2)

Drawbead Type	Angle [°]	Drawbead forces [N/mm]					
		EDM		CCM 1		CCM 2	
		DBRF	DBOF	DBRF	DBOF	DBRF	DBOF
Circular (H=5, Rs=2.5)	0	79.3	77.1	68.2	59.3	64.3	47.9
	1	78.9	76.4	68.2	59.5		
Circular (H=5, Rs=3)	1	62.4	64.7	55.8	49.0	52.6	39.0
	2	62.1	64.2	55.8	49.2		
	3	61.8	63.7	55.8	49.4		
	4	61.6	63.2	55.8	49.6		
	5	61.3	62.7	55.8	49.8		
	6	61.1	62.3	55.8	50.0		
	7	60.8	61.8	55.8	50.3		
Elliptical (H=4, Rs=3)	1	52.0	55.1	42.2	37.1	39.5	27.1
	2	51.7	54.5	42.2	37.2		
	5	51.1	52.9	42.3	37.5		
	6	51.0	52.5	42.4	37.6		
Elliptical (H=3.5, Rs=3)	6.5	46.7	47.1	36.2	32.4	33.4	22.3
Elliptical (H=3, Rs=3)	2	42.7	43.6	30.2	27.7	27.7	18.4
	3	42.5	43.0	30.2	27.7		
	4	42.4	42.4	30.2	27.7		
	5.5	42.5	41.9	30.2	27.8		
Elliptical (H=2.5, Rs=3)	4.5	38.2	36.7	24.7	24.0	22.3	15.3
Elliptical (H=2, Rs=3)	5	34.3	31.2	19.7	20.8	17.4	12.9

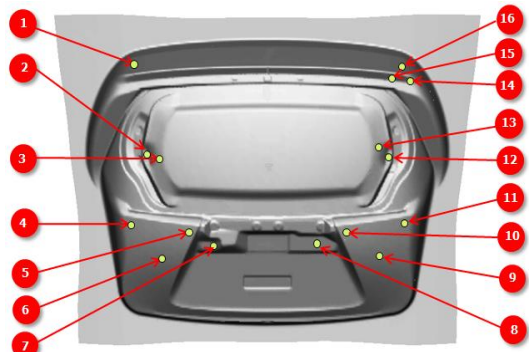


Fig. 7 Positions in liftgate draw panel for measuring thickness strains

Table 3 Comparison of thinning and relative error among equivalent drawbead model(EDM) and commercial code models(CCM 1,CCM 2)

Position No.		1	2	3	4	5	6	7	8
Tryout	Thinning	0.210	0.108	0.117	0.108	0.105	0.095	0.043	0.122
EDM	Thinning	0.212	0.085	0.056	0.108	0.097	0.077	0.082	0.057
	Error [%]	03	27	68	0	09	20	41	74
CCM 1	Thinning	0.174	0.054	0.048	0.086	0.089	0.074	0.085	0.049
	Error [%]	45	61	78	24	18	23	44	83
CCM 2	Thinning	0.155	0.059	0.044	0.084	0.088	0.073	0.080	0.052
	Error [%]	70	55	82	28	19	25	38	79
Position No.		9	10	11	12	13	14	15	16
Tryout	Thinning	0.095	0.110	0.088	0.088	0.103	0.152	0.167	0.223
EDM	Thinning	0.063	0.085	0.081	0.096	0.055	0.151	0.147	0.211
	Error [%]	35	29	09	08	54	0	23	16
CCM 1	Thinning	0.049	0.078	0.069	0.074	0.046	0.141	0.133	0.186
	Error [%]	50	36	21	16	64	12	40	48
CCM 2	Thinning	0.050	0.076	0.057	0.074	0.043	0.125	0.124	0.167
	Error [%]	50	38	34	16	67	31	51	72



Fig. 8 Positions in liftgate draw panel for measuring draw-in amounts

Table 3은 리프트게이트 성형해석에 Table2의 드로비드력들을 각각 적용한 결과로, 성형이 취약한 16지점의(Fig. 7 참조) 두께변형률(thinning)과 실측치(Tryout) 사이의 상대오차(Error)를 보여준다. 등가 드로비드 모델로 구한 드로비드력을 적용한 경우는 최대 7.4%, 평균 2.6%의 상대오차를, 그리고 상업용 코드의 드로우 비드 모델을 적용한 경

Table 4 Comparison of relative errors of draw-in amounts among equivalent drawbead model(EDM) and commercial code models (CCM 1, CCM 2)

Position No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Draw-in [mm]	Tryout	30	33	24	35	25	50	60	53	25	33	20
	EDM	21	9	6	10	11	2	1	2	6	-1	10
Error [mm]	CCM 1	29	15	10	15	15	2	2	4	8	-1	14
	CCM 2	30	16	11	15	15	8	3	5	8	2	15
Position No.		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Draw-in [mm]	Tryout	20	33	22	40	32	32	22	25	24	33	30
	EDM	9	-3	9	13	13	11	11	20	5	9	21
Error [mm]	CCM 1	14	-1	11	15	17	17	15	24	9	15	29
	CCM 2	15	1	11	17	16	16	15	25	10	16	32

우는 최대 8.3%, 평균 4.2%~4.7%의 상대오차를 보였다.

4.4 드로인양

드로비드력의 차이가 드로인양에 미치는 영향을 평가하기 위하여 리프트게이트 금형의 드로비드 위치를 고려하여 Fig. 8에서 보는 바와 같이 패널 가장자리의 22개 지점에서 빨려 들어 간 거리를 측정하였다. Table 4는 22개 지점에서 드로인 실측치(Tryout)와 드로비드력을 적용하여 얻은 성형해석 결과와의 상대오차(Error)를 보여 준다. 측정지점 번호22에서 모든 드로비드력들은 최대의 상대오차를 보였으며, 등가 드로비드 모델에서 21mm, 상업용 코드의 드로비드 모델에서 29mm~32mm였다. 드로인양의 평균 상대오차는 등가 드로비드 모델이 9.8mm, 상업용 코드의 드로비드 모델이 13.4mm~14.2mm였다.

5. 결론

박관성형을 고정도로 성형해석하기 위한 연구의 일환으로 등가 드로비드 모델을 개발하고 실험적으로 검증한 후, 등가 드로비드 모델을 리프트게이트 아우터 패널의 성형해석에 적용한 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 원형 등가 드로비드 모델의 드로비드력은 상압력 12%, 인출력 1% 정도의 오차를 갖는다.

(2) 사각 등가 드로비드 모델의 드로우비드력은 4% 정도의 오차를 보인다.

(3) 계단 등가 드로비드 모델은 8% 정도의 오차로 드로우비드력을 예측한다.

(4) 리프트게이트 패널의 스탬핑 공정 성형해석에 등가 드로비드 모델과 기존 상업용 코드의 드로비드 모델들을 각각 적용하여 정확도를 비교한 결과, Thinning과 드로인양의 정확도가 37~59%, 27~47% 각각 개선시켰음을 확인하였다.

후 기

본 연구결과에 이르기까지 후원해 주신 ㈜GM대우 자동차 Die & Press의 최오영 부장님, 이형진 부장님, 권성오 차장님, 그리고 KIMS의 이명규 박사님께 진심으로 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. D. Nine, 1978, Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, Mechanics of Sheet Metal Forming, pp. 179~211.
- [2] H. D. Nine, 1982, New Drawbead Concepts for sheet Metal Forming, American Society for Metals, Vol. 2, No. 3, pp. 185~192.
- [3] N. M. Wang, 1982, A Mathematical Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, J. Appl. Metal Working, Vol. 2, No. 3, pp. 193~199.
- [4] B. S. Levy, 1982, Development of a Predictive Model for Draw Bead Restraining Force Utilizing Work of Nine and Wang, J. Appl. Metal Working, Vol. 3, No. 1, pp. 38~44.
- [5] T. B. Stoughton, 1988, Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, 15th IDDRG, pp. 205~215.
- [6] B. D. Carleer, T. Meinders, and H. Huetink, 1996, Equivalent Drawbead Model in Finite Element Simulations, Numerical Simulations of 3-D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET'96), pp. 25~31.
- [7] M. G. Lee, K. Chung, R. H. Wagoner, Y. T. Keum, 2008, A numerical method for rapid estimation of drawbead restraining force based on non-linear, anisotropic constitutive equations, Int. J. Solid. Struct., Vol. 45, No. 11-12, pp. 3375~3391.
- [8] Y. T. Keum, J. H. Kim, B. Y. Ghoo, 2001, Expert Drawbead Models for Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes, Int. J. Solid. Struct., Vol. 38, No. 30-31, pp. 5335~5353.
- [9] S. J. Moon, Y. T. Keum, R. H. Wagoner, 2007, Study on the Characteristics of Drawbead Forces in Automotive Stamping Dies, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 6, pp. 457~462.
- [10] S. J. Moon, M. G. Lee, Y. T. Keum, 2008, Experimental Drawbead Dies for Measuring Drawbead Forces, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 7, pp. 217~219.