

접촉 압력에 의한 마찰 특성 변화가 U 드로우 굽힘에서의 스프링백에 미치는 영향

한수식[#]

Influence of Frictional Behavior Depending on Contact Pressure on Springback at U Draw Bending

S. S. Han

(Received May 19, 2011 / Revised July 14, 2011 / Accepted July 15, 2011)

Abstract

Variation of contact pressure causes change of friction coefficient, which in turn changes stress distribution in the sheet being formed and final springback. In the present study, U-draw bending experiments were carried out under constant blank holding force(BHF) and different blank sizes, and finite element analysis was conducted with and without considering contact pressure effect on friction. When the BHF was sufficiently high, the degree of springback was different between constant blank holding pressure condition and that with varying blank holding pressure. Finite element analysis considering the influence of contact pressure effect on friction could explain the occurrence of springback.

Key Words : High Strength Steel, Blank Holding Pressure, Stress Distribution, Finite Element Analysis, Coated Steel Sheet

1. 서 론

자동차 차체 경량화와 충돌 안정성 확보를 위하여 고강도 강판의 사용이 지속적으로 증가하고 있다. 고강도 강판의 높은 강도와 사용 두께의 감소는 성형 후 제품의 스프링백 발생을 증가시키고 있다. 고강도 강판 사용시 발생하는 스프링백 현상은 피할 수 없는 사항이기 때문에 성형 해석 등을 통하여 스프링백의 발생량을 예측하고 이것을 보정하기 위하여 제품이나 금형의 형상 변경 또는 성형 공법의 변경 등을 시행한다. 이와 같은 방법을 통하여 스프링백에 대한 보정을 수행하기 위하여서는 주어진 성형 조건에서의 스프링백 발생에 대한 정확한 예측이 이루어져야 한다.

성형 후 스프링백 발생을 정확히 예측하고 이를 보정하는 방법을 찾기 위한 노력이 오랫동안 많은

연구자들에 의하여 이루어져 왔다. 그 결과 V 굽힘 시험, U 굽힘 시험, L 굽힘 시험 그리고 S 레일 성형 시험 등과 같은 스프링백 특성을 분석하기 위한 다양한 시험법들이 사용되었다[1~5]. 그리고 시험과 유한 요소 해석을 통하여 금형의 형상과 공정 변수들이 스프링백에 미치는 영향이 분석되었다[6~9]. 그 결과 스프링백에 대한 유한 요소 해석에서 유한 요소의 종류, 시간 적분 알고리즘의 종류 등이 해석 결과에 영향을 미치는 것으로 나타났다[10~11]. 스프링백의 유한 요소 해석에 중요한 영향을 미치는 인자 가운데 하나로서는 소재의 거동을 모사하는 적절한 구성 방정식이 사용되어야 한다. 스프링백 해석 결과는 소재의 인자에 의하여서도 민감하게 영향을 받는데 소재의 소성 이방성, 탄성 특성, 항복 함수 그리고 바우징거 효과등이 영향을 주는 것으로 나타났다[12~14].

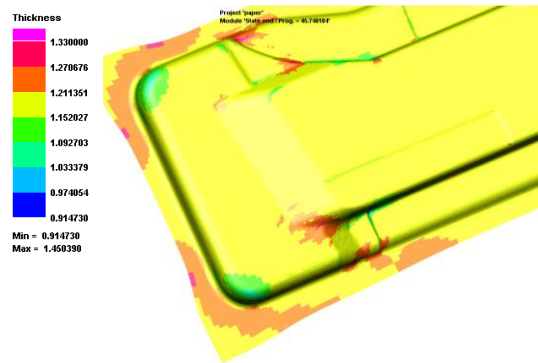
[#] 교신저자: 금오공과대학교 기계공학과,
E-mail:sshan@kumoh.ac.kr

이러한 모든 노력들은 대부분 성형 후 제품의 응력 분포를 정확히 예측하기 위하여 이루어진 것들이다. 유한 요소 해석에서 응력 분포의 예측에 영향을 주는 인자로서 마찰 특성과 같은 경계 조건도 중요한 역할을 한다. 성형 해석에서 일반적으로 마찰 계수는 고정된 값을 사용하고 있다. 그러나 마찰 시험 결과, 마찰 계수는 접촉 압력에 따라 변화하며 고강도강 성형과 같은 높은 접촉 압력을 갖는 성형 조건에서는 그 변화가 무시할 수 없을 만큼 큰 것으로 나타났다[15].

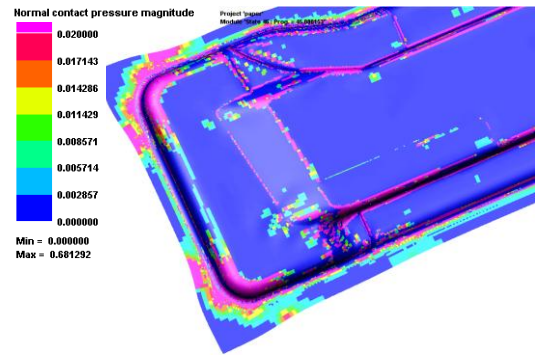
본 연구에서는 고강도강의 U 드로우 굽힘 성형 시험에 대하여 각각의 블랭크 홀더력 조건에서 성형 시험 중 블랭크 홀더 부분의 접촉 압력이 일정한 조건과 접촉 압력이 변화하는 조건으로 시험을 수행하여 스프링백 발생량을 비교하였다. 그리고 일정 마찰 계수를 사용한 조건과 접촉 압력에 따른 마찰 계수의 변화를 고려한 조건에 대하여 해당 성형 시험을 유한 요소 해석하여 성형 시험 결과에 대한 원인을 분석하였고 고강도강의 스프링백 해석에 있어서 사용 마찰 모델의 적정성을 검토하였다.

2. 접촉 압력의 변화

자동차 부품의 성형시 부위별로 발생하는 금형과 판재의 접촉 압력은 균일하지 않다. 일반적으로 다이나 펀치의 곡률부에서 접촉 압력이 크게 나타나며 평탄한 부위에서의 접촉 압력은 작게 나타난다. 통상적으로 성형 중 블랭크 홀더에 작용하는 블랭크 홀더력은 일정하게 유지된다. 성형이 진행됨에 따라서 소재는 다이 공동부내로 유입되어 플랜지 부분에서 소재와 다이 접촉 면적은 감소하게 된다. 이러한 접촉 면적 감소는 소재와 금형의 접촉 압력 증가를 가져 온다. 성형 말기에는 대부분의 소재가 다이 공동부로 유입되어 버리기 때문에 플랜지 부분에 잔류하는 소재의 양은 매우 적으므로 이 부분의 접촉 압력 변화는 매우 크다. 그리고 플랜지 부분으로부터의 소재 유입이 균일하지 않기 때문에 성형의 진행에 따라 플랜지 부분의 소재 두께 분포가 변화하게 되며 두께가 증가하는 부분에서의 접촉 압력이 증가하게 된다. 이러한 접촉 압력의 변화는 마찰 특성의 변화를 가져오게 되고[15] 이로 인하여서 성형 제품의 응력 분포도 영향을 받게 될 것이다.



(a)



(b)

Fig. 1 Distribution of thickness(a) and normal contact pressure(b) for panel side member stamping

Fig. 1 은 고강도강 적용 부품에 대하여 성형 말기의 두께 분포와 접촉 압력의 분포를 나타내고 있다.

3. U 굽힘 시험과 성형 해석

성형중 접촉 압력의 변화에 따른 마찰 특성의 변화가 판재 성형에서 응력 분포의 변화를 발생시키고 이로 인하여 스프링백에 영향을 미치는지를 확인하기 위하여 U 드로우 굽힘 성형 시험과 이에 대한 유한 요소 해석을 수행하였다. U 드로우 굽힘 성형 시험과 성형 해석에 사용된 다이 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

3.1 U 드로우 굽힘 성형 시험

U 드로우 굽힘 성형 시험은 표 1에 나타난 바와 같이 2가지 블랭크 길이 조건에 대하여 수행

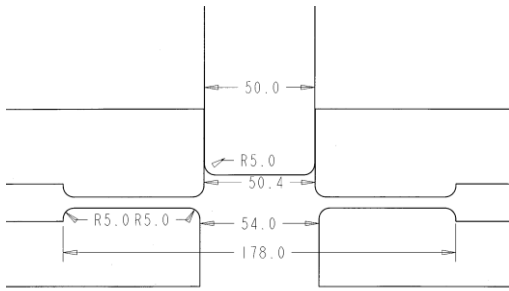


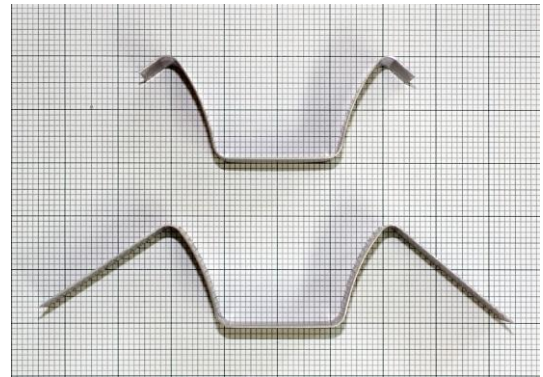
Fig. 2 Tool geometry for U-draw bending

Table 1 U-draw bending testing conditions

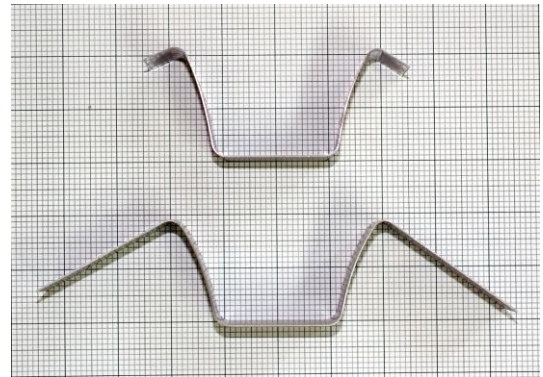
Testing Condition	Blank		Blank Holding Force (kN)	Final Contact Pressure at Flange (MPa)
	Width (mm)	Length (mm)		
#1	45	280	9.814	1.913
#2		180	9.814	7.652
#3		280	39.256	9.913
#4		180	39.256	39.653

하였다. 표에 나타난 성형 최종 단계에서 플랜지 부분의 접촉 압력은 성형 시험 후 플랜지 부분의 측정된 면적과 블랭크 홀더력을 이용하여 산출한 결과이다. Fig. 2와 같은 형상의 금형을 이용한 U 드로우 굽힘 성형 시험에서는 블랭크 길이가 충분히 길면 성형이 진행됨에 따라 소재가 다이 공동부로 유입되더라도 블랭크 홀더 부위의 접촉 압력은 일정하게 유지된다. 그러나 블랭크 길이가 일정 길이보다 짧으면 성형이 진행됨에 따라 소재가 다이 공동부로 유입되게 되고 그 결과 플랜지 부분에서 소재와 금형의 접촉 면적이 감소하게 된다. 이로 인하여 블랭크 홀더에 작용하는 블랭크 홀더력이 일정하게 유지되더라도 플랜지 부분에서의 접촉 압력은 연속적으로 증가하게 된다. 대부분의 판재 성형 공정은 성형 중 이와 유사한 접촉 압력의 변화를 경험하게 된다. U 드로우 굽힘 성형 시험에는 DP590 0.6tGA 고강도 강판을 사용하였으며 철강사에서 방청유로 사용하고 있는 P340를 도유한 후 성형 깊이를 50mm로 하여 각각 시험 조건에 대해 성형 시험을 수행하였다.

Fig. 3은 각각의 시험 조건에서 성형된 시편의 변형된 형상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 블랭크 홀더력이 증가한 경우 스프링백 발생량이 약간 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 성형 조건에 따른 스프링백의 변화 정도를 사진으로



(a) BHF=9.814 kN



(b) BHF=39.256 kN

Fig. 3 Deformed shapes of specimens for each blank holding force

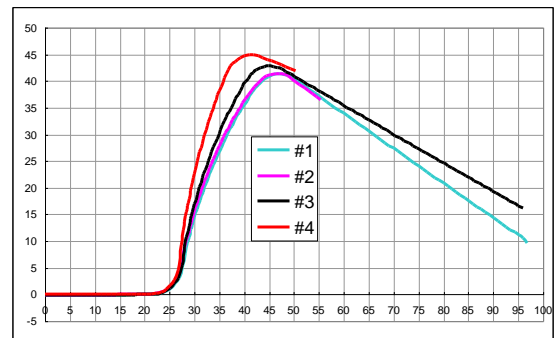


Fig. 4 Measured cross section of specimens for each testing condition(Experiment).

정확히 비교하는 것이 곤란하여 변형된 형상을 3차원 측정기로 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 블랭크 홀더력이 9.814kN인 시험 조건에서는 성형중 플랜지 부분의 접촉

압력이 일정한 경우(#1)와 접촉 압력이 연속적으로 증가하는 경우(#2)의 성형 후 스프링백에 의하여 변형된 형상에는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

블랭크 홀더력이 39.256kN인 경우에는 전체적으로 스프링백 발생량이 감소한 것으로 나타났다. 그리고 성형중 플랜지 부분의 접촉 압력이 일정한 경우(#3)에 비하여 성형의 진행에 따라 접촉 압력이 증가하는 경우(#4)의 스프링백 발생량이 보다 더 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 시험 결과는 접촉 압력에 따른 판재의 마찰 계수 변화로부터 설명할 수 있다. Fig. 5는 고강도 GA 도금 강판에 대하여 접촉 압력에 따른 마찰 계수의 변화를 나타낸 것이다[15]. 그리고 그래프에 각각의 시험 조건에 대하여 최종 성형 단계의 플랜지 부분의 접촉 압력을 표시하였다. 블랭크 홀더력이 작은 경우에는 성형중 접촉 압력이 일정한 경우와 변화하는 각각의 시험 조건(#1, #2)에서의 마찰 계수 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 블랭크 홀더력이 큰 경우에는 성형중 접촉 압력이 일정한 경우와 변화하는 경우(#3, #4) 마찰 계수의 차이는 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있다. U 굽힘 성형 시험의 경우 성형 말기에 블랭크 홀더력을 증가시키면 스프링 백이 감소하게 되는데[9] 이와 같은 마찰 계수의 차이는 성형 말기에 블랭크 홀더력을 증가시키는 것과 동일한 효과를 가져오게 되었고 이로 인하여 블랭크 홀더력이 큰 경우, 접촉 압력이 증가하는 성형 조건에서 스프링백 발생량이 감소하는 것으로 판단 된다.

3.2 U 드로우 굽힘 성형 해석

U 드로우 굽힘 성형 시험 결과에서 나타난 스프링백 발생량의 차이가 이러한 접촉 압력에 따른 마찰 계수의 변화로 인하여 발생한 것인지 확인하기 위하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석 조건은 표 1의 시험 조건과 동일한 조건으로 하였다. 해석에는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 Pamstamp 2G V2009를 사용하였으며 해석 프로그램의 기능 중에서 접촉 압력에 따른 마찰 계수의 변화를 고려할 수 있는 마찰 조건과 일정한 마찰 계수를 사용하는 마찰 조건을 사용하여 U 드로우 굽힘 공정을 각각 해석하였다. 이때 접촉 압력에 따른 마찰 계수의 변화 값은 Fig. 5에 나타난 것을 그대로 사용하였으며 접촉 압력이

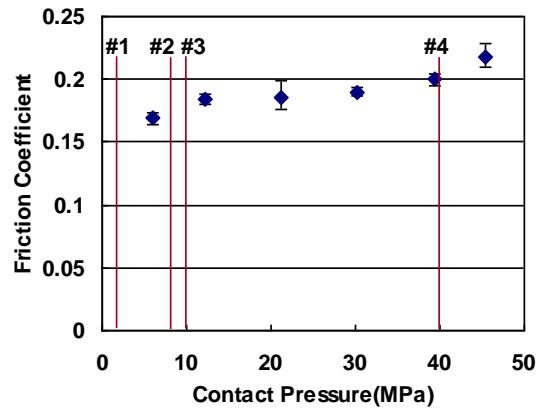


Fig. 5 Variation of friction coefficient according to contact pressure(DP590, GA)[15] and position of each testing condition

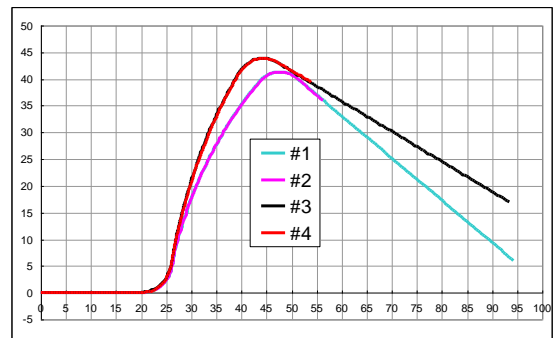


Fig. 6 Cross sections of specimens for each testing condition(Finite element analysis): with constant friction coefficient

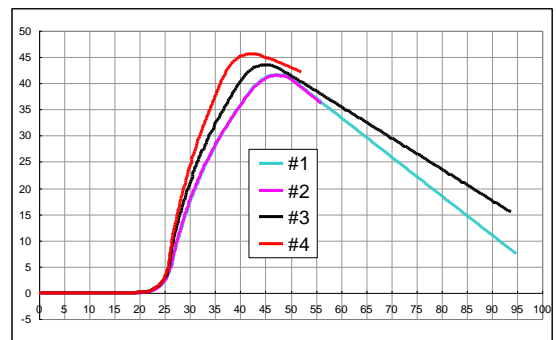


Fig. 7 Cross sections of specimens for each testing condition(Finite element analysis): with considering contact pressure effect on friction

영(zero)인 경우의 마찰 계수는 가장 낮은 시험 압력 조건에서 구한 마찰 계수 값을 적용하였다. 일정 마찰 계수를 사용하는 조건에서의 마찰 계수는 접촉 압력 10MPa와 20MPa의 평균 값을 적용하였다.

Fig. 6과 7에 일정 마찰 계수를 사용한 조건과 압력에 따른 마찰 계수의 변화를 고려한 조건에 대하여 해석된 결과를 각각 나타내었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 접촉 압력에 대한 마찰 특성의 변화를 고려하지 않은 경우에는 블랭크 길이에 상관없이 스프링백 발생량이 일정하게 나타나 블랭크 홀더력이 높은 경우의 성형 시험에서 보여준 블랭크 길이에 따른 스프링백 발생량의 차이를 모사할 수 없음을 알 수 있다. 그러나 성형 해석에서 마찰 특성에 대한 접촉 압력의 영향을 고려한 경우에는 Fig. 7의 결과와 같이 블랭크 홀더력이 높은 경우, 성형 시험 결과에서 보여준 블랭크 길이에 따른 스프링백 발생량의 차이를 유한 요소 해석이 모사하고 있다. 이러한 해석 결과로부터 접촉 압력의 변화에 따른 마찰 계수의 변화가 U 드로우 굽힘 시험시 발생하는 블랭크 크기의 변화에 따른 스프링백 발생량 차이의 직접적인 원인임을 알 수 있다.

대부분의 고강도강 성형에서는 스프링백 발생량을 최소화하기 위하여 가능한 한 높은 블랭크 홀더력을 적용하여 성형하려 한다. 그리고 성형시 플랜지 부분의 소재는 다이 공동부로 유입되기 때문에 플랜지 부분의 접촉 압력은 성형이 진행됨에 따라 증가하게 된다. 이것은 U 드로우 굽힘 성형 시험 조건 #4와 유사하다. 이러한 성형 조건을 고려할 때 고강도강 적용 부품의 성형 해석에서 접촉 압력에 따른 마찰 특성의 변화를 고려하면 스프링백의 발생 경향에 대한 예측의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

성형중 접촉 압력이 일정한 성형 조건과 변화하는 성형 조건에 대하여 U 드로우 굽힘 시험과 이에 대한 성형 해석을 수행하여 스프링백의 발생량을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) U 드로우 시험 결과 블랭크 홀더력이 작은 경우에는 성형시 접촉 압력이 변화하는 경우와 일정한 경우, 스프링백 발생량의 차이는 거의 없는 것으로 나타났으나 블랭크 홀더력이 큰 경우

에는 스프링백 발생량의 차이가 나타났다.

(2) U 드로우 굽힘 시험을 유한 요소 해석을 통하여 모사한 결과 접촉 압력에 의한 마찰 특성의 변화가 성형 제품의 응력 분포에 영향을 주어 이러한 스프링백 발생량의 차이를 나타내는 원인임을 확인할 수 있었다.

(3) 이상 연구 결과를 종합해볼 때 고강도강 적용 부품과 같이 높은 성형력이 필요한 제품의 성형 해석에서 스프링백 발생에 대한 예측의 정확성을 향상시키기 위하여 접촉 압력에 따른 마찰 특성의 변화를 고려하여 해석하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] NUMISHEET93, C.o., 1993. In: Proceedings of 2nd International Conference NUMISHEET 1993, Isehara, Japan.
- [2] NUMISHEET96, C.o., 1996. In: Proceedings of 3rd International Conference NUMISHEET 1996, Dearborn, USA.
- [3] Y. E. Ling, H. P. Lee, B. T. Cheok, 2005, Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal, J. Mater. Process. Technol., Vol. 168, No. 2, pp. 296~302.
- [4] H. Livatyali, T. Altan, 2001, Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods. Part 1: Experimental investigations, J. Mater. Process. Technol., Vol. 117, No. 1~2, pp. 262~268.
- [5] Mkaddem Ali, Saidane Delphine, 2007, Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 189, No. 1~3, pp. 325~333.
- [6] R. Wagoner, W. Carden, W. Carden, D. Matlock, 1997, Springback after drawing and bending of metal sheets, IPMM'97, Intelligent Systems Applications, Vol.1, pp. 1~10.
- [7] B. G. Kim, I. S. Lee, Y. T. Keum, 2009, Study on

- the springback reduction of automotive advanced high strength steel panel, Transactions of Materials Processing, Vol. 18, No. 6, pp. 488~493.
- [8] A. P. Karafillis, M. C. Boyce, 1992, Tooling design in sheet metal forming using springback calculations, Int. J. Mech. Sci., Vol.34, pp. 113~131.
- [9] S. S. Han, K. C. Park, J. B. Nam, 1999, A study on shape fixability of press formed parts, Transactions of Materials Processing, Vol. 8, No. 1, pp. 38~46.
- [10] S. Q. Lee, D. Y. Yang, 1998, An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80~81, pp. 60~67.
- [11] W. L. Xu, C. H. Ma, C. H. Li, W. J. Feng, 2004, Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming, J. Mater. Process. Technol., Vol.151, No. 1~3, pp. 217~222.
- [12] Gau Jenn-Terng, Kinzel Gary L., 2001, An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions, J. Mater. Process. Technol., Vol. 108, No. 3, pp. 369~375.
- [13] Geng Lumin, Wagoner RH., 2002, Role of plastic anisotropy and its evolution on springback, Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, No. 1, pp. 123~148.
- [14] Dongjuan Zhang, Zhenshan Cui, Xueyu Ruan, Yuqiang Li., 2006, Sheet springback prediction based on non-linear combined hardening rule and Barlat89's yielding function, Comput. Mater. Sci., Vol. 38, No. 2, pp. 256~262.
- [15] S. S. Han, 2011, Contact Pressure Effect on Frictional Behavior of Sheet Steel for Automotive Stamping, Transactions of Materials Processing, Vol. 20, No. 2, pp. 99~103.