

초고강도강판의 성형성에 미치는 슬라이드 모션 제어와 마찰특성의 영향

송재선¹ · 윤국태¹ · 허재영¹ · 박춘달¹ · 김용환[#]

Effect of Slide Motion Control and Friction Characteristics on Formability of Ultra High Strength Steel

J. S. Song, K. T. Youn, J. Y. Heo, C. D. Park, Y. H. Kim

(Received December 5, 2017 / Revised January 11, 2018 / Accepted January 19, 2018)

Abstract

Although the application of high strength steel is increasing to cope with the various updated regulations of automobiles, high strength steel sheets are difficult to formulate due to the high tensile strength and low elongation of those materials. In this study, the slide motion was controlled using a servo press in order to improve the formability of the process of manufacturing ultra-high strength steel of above 1.2GPa. Also, the friction characteristics of the slid motion were investigated through a high speed friction test. The slide motion was optimized by adjusting the number of steps, the rising start position and the rise height of the slide. At the same time, it is noted that the optimal slide motion increased the forming depth by about 40%. From the results of the high speed friction test, the application of the slide motion reduces friction resistance, thereby improving friction characteristics and improving formability.

Keywords: Ultra High Strength Steel, Servo Press, Slide Motion, Formability, High Speed Friction Test

1. 서 론

최근 자동차의 연비향상과 배기가스 규제의 강화와 더불어 차량의 충돌안전 규제의 강화로 경량화를 위한 중량감소와 차체의 강성을 강화하기 위하여 고강도 강판의 적용이 증가하고 있다.

이러한 고강도 강판은 높은 인장강도와 낮은 연신을 때문에 성형이 어렵고 용접성이 떨어지며 급형의 수명이 저하되어 일부 부품에 대해 특정공법만으로 기존의 문제점을 전부 해결하지 못한채 생산하고 있는 실정이며, 특히 인장강도 1GPa 이상의 초고강도강판의 경우 핫스탬핑이나 롤포밍으로 성

형되던 기존의 공정이 아닌 프레스가공으로 성형하기에는 아직까지 기술적 난제가 존재하고 있다. 또한 인장강도 1GPa 이상의 초고강도강판의 치수정밀도 향상을 위해서 가장 큰 문제인 스프링백에 대해서는 많은 검토가 진행되고 있으나, 실용적 측면에서 적용하려면, 복잡한 형상에 대한 성형성과 치수정밀도 등의 연구가 좀 더 필요한 실정이다[1-3].

난성형 소재의 성형성, 급형의 수명 향상 및 소음 진동 저감을 위해 도입된 서보프레스는 최적조건 설정의 검토에 많은 시간을 필요로 하고 있어 도입이 급속도로 진행되었음에도 불구하고 성형성과 치수 정밀도 등에 미치는 서보프레스의 각종 슬라이

1. 대구기계부품연구원 뿌리산업혁신본부
Corresponding Author : Chungnam National University
E-mail : yonghkim@cnu.ac.kr

드 모션의 영향에 대한 연구가 미미한 상태이다[4]. 슬라이드의 상승과 하강을 반복하는 스텝 모션의 경우 그 스텝 위치의 적정 배치에 의하여 기존의 슬라이드모션과 비교하여 성형성이 향상 할 수 있음이 보고되고 있고, 이러한 특성을 이용하면 자동차 차체부품의 드로잉 가공에서 서보프레스의 모션 설정에 의한 성형성의 향상은 실용적으로 가치가 높고, 더불어 공정수의 삭감으로 금형비를 절감할 수 있기 때문에 실용화 가능성이 높다[5-8].

서보프레스의 슬라이드모션 적용을 통한 재유효의 효과로 성형성이 향상된다고 다수의 연구에서 보고되고 있으나, 마찰특성을 단순 평면마찰시험으로 파악하기는 어렵다. 금형과 소재의 경도, 거칠기, 윤활상태 등 다양한 인자들의 복합적 작용에 의해 마찰 특성에 영향을 받고 있으며, 이러한 마찰특성을 단순 평면마찰시험을 통한 마찰계수의 정량화로 나타내기에는 매우 어렵다[9]. 접촉압력이 높게 나타나는 초고강도강판의 성형성에 영향을 미치는 마찰특성을 정확히 파악하기 위해서는 고하중의 마찰시험을 통한 마찰특성의 연구가 필요하다. 또한, 현재까지 보고된 대부분의 저속 마찰시험을 통한 마찰특성에 관한 연구로는 빠른 속도로 진행되는 프레스 성형을 모사하여 마찰특성을 파악하기에는 한계가 있으므로 프레스 성형속도와 유사한 속도의 모사가 가능한 고속의 마찰시험을 통한 성형의 마찰특성에 대한 연구도 필요하다.

이에 본 연구에서는 인장과 압축이 동시에 작용되는 복합적인 형상의 성형을 대상으로 인장강도 1.2GPa 이상의 초고강도강판 드로잉 가공에 대해서 성형성 향상을 목적으로 서보프레스 슬라이드 모션을 최적화 하였으며, 고속의 마찰시험을 통해 서보프레스의 슬라이드모션 제어가 성형 중 마찰특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 시험조건의 설정

슬라이드 모션이 성형성에 미치는 영향을 검토하기 위해 시험에 사용된 프레스는 AC서보모터 구동방식의 C-Frame Single Action 전동식 서보프레스로 최대 스트로크수는 40spm(stroke per minute)이고, 시험편은 두께 1.0t, 폭 130mm, 인장강도 1.2GPa 이상의 초고강도강판으로 사용하였으며, 금형은 SKD11 소재로 표면에 CrN코팅을 하였고, 펀치와 다이의 어깨부 R

은 8mm, 성형 중 주름억제를 위하여 2kgf/cm²의 홀딩 포스를 부가하였다. 그리고 동점도 46cSt(centi-Stroke)의 윤활유를 시편의 양면에 도포하였다.

실시한 시험의 슬라이드 모션은 일정속도로 하사점까지 한번에 하강하는 1-step성형(crank motion)과 일정속도로 하강하지만 성형 중 슬라이드의 상승을 통해 여러 단계를 거쳐 하사점까지 하강하는 Multi-step성형(program motion)으로 두가지의 형태이며, 성형공정의 개략적인 개념은 Fig. 1과 같다.

본 연구에 적용된 Multi-step성형의 스텝 수는 하강되는 스텝을 의미 즉, 스텝 수가 1인 경우는 성형도중 상승 없이 하강만 1회 이루어지는 경우로 1-step성형인 Crank 모션을 의미하고, Fig. 2와 같이 스텝 수가 2인 경우는 상승 1회 하강 2회(하강-상승-하강)로 이루어져 성형이 2단계로 진행되고, 스텝 수가 3인 경우 상승이 2회 하강이 3회(하강-상승-하강-상승-하강)로 이루어져 성형이 3단계로 진행되는 슬라이드 모션을 의미한다. 또한, 슬라이드 모션의 두 번째 단계인 Step2는 상승이 시작되는 단계로 Pulse가 주어지는 첫 번째 단계 즉, Step2=1st pulse step을 의미한다.

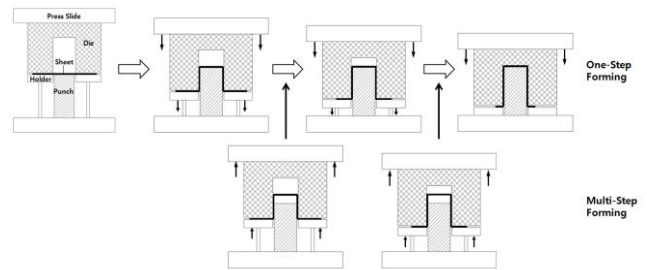


Fig. 1 The schematic of servo press forming process

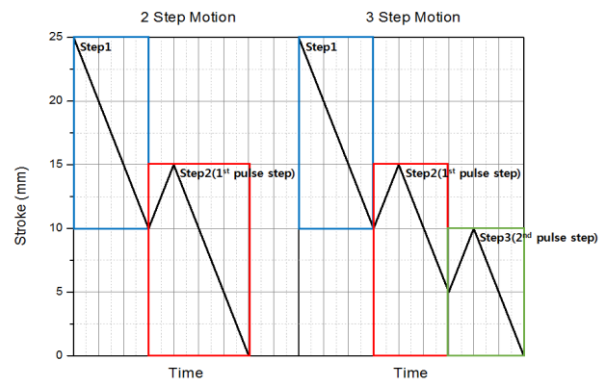


Fig. 2 The schematic of step motion

Table 1 Slide motion definitions for servo press

Motion type	SPM	No. Step	Pulse start point(mm)		Pulse height (mm)
			1 st	2 nd	
Crank #1	30	1	-	-	-
Crank #2	20	1	-	-	-
Crank #3	10	1	-	-	-
Crank #4	5	1	-	-	-
Program #1	30	2	5	-	5
Program #2	30	2	10	-	5
Program #3	30	2	15	-	5
Program #4	30	2	20	-	5
Program #5	30	3	10	5	5
Program #6	30	3	15	10	5
Program #7	30	3	15	5	5
Program #5-1	30	3	10	5	1
Program #5-2	30	3	10	5	3
Program #5-3	30	3	10	5	7

본 연구에 적용된 시험의 조건을 Table 1과 Fig. 3에 나타내었으며, 적용된 슬라이드 모션 중 Crank 모션은 성형 중 슬라이드의 위치변화가 없는 일반적인 기계/유압식 프레스와 동일한 1-step 모션으로 Crank #1은 30spm으로 고속, Crank #2는 20spm으로 중속 그리고 Crank #3, #4는 각각 저속의 10spm, 5spm으로 성형속도를 변경하여 설정하였다.

성형도중에 슬라이드를 상승시킨 Multi-step 모션인 Program 모션은 30spm의 고속으로 성형을 진행하였다. Program #1~#4 모션은 2-step 모션으로 1회의 Pulse를 적용하였으며, 1st pulse step의 시작 위치를 하사점으로부터 #1은 상방 5mm, #2는 상방 10mm, #3은 상방 15mm, #4는 상방 20mm에서 각각 5mm 상승하도록 설정하였다.

Program #5~#7 모션은 3-step 모션으로 2회의 Pulse를 적용하였으며, 1st pulse step의 시작 위치를 하사점으로부터 #5는 상방 10mm, #6은 상방 15mm, #7은 상방 15mm 위치에서 각각 5mm 상승하도록 설정하였고, 2nd pulse step의 시작 위치를 하사점으로부터 #5는 상방 5mm, #6은 상방 10mm, #7은 상방 5mm 위치에서 각각 5mm 상승하도록 설정하였다.

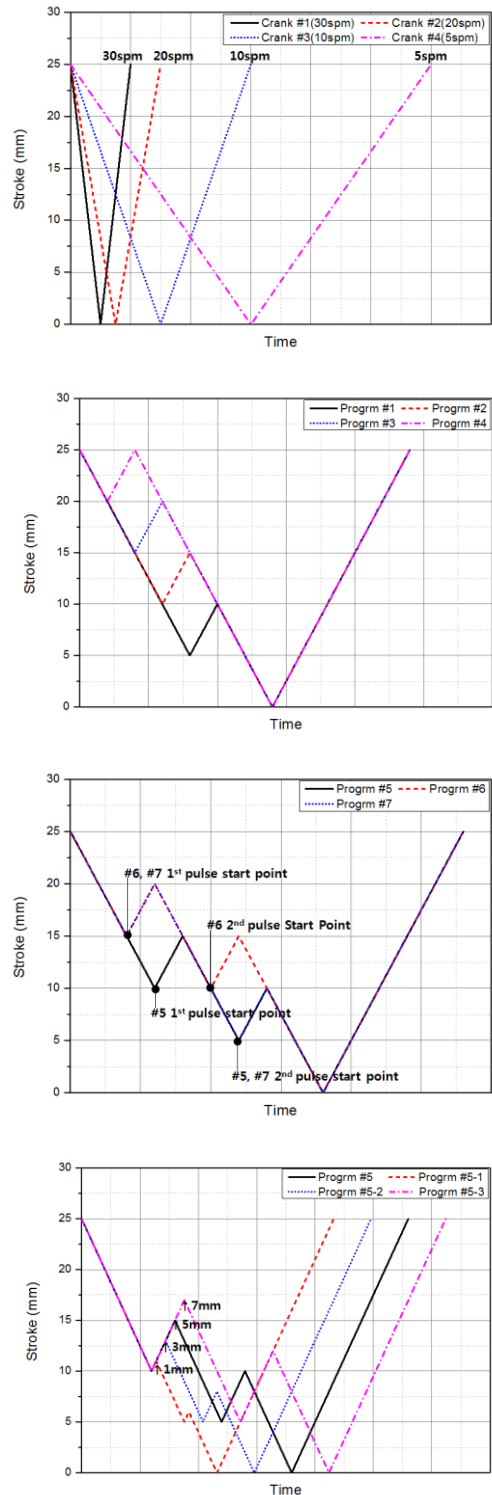


Fig. 3 The schematic of servo press slide motion

Program #5-1~#5-3 모션의 각 Pulse step 시작 위치는 Program #5 모션과 동일하나 상승 높이를 #5-1은 1mm, #5-2는 3mm, #5-3은 7mm로 다르게 설정하였다.

Table 2 Forming limit stroke according to the spm

Stroke \ SPM	15mm	18mm	19mm	20mm
30	○	○	X	X
20	○	○	X	X
10	○	○	△	X
5	○	○	○	△
Note		Limit stroke		

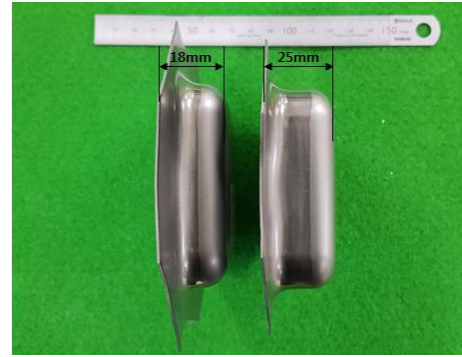


Fig. 4 Comparison of forming height

3. 결과 및 고찰

3.1 성형시험 결과

서보프레스의 슬라이드 모션 제어를 통해 성형성을 향상시키기 위하여 우선 일반적인 기계/유압식 프레스와 동일한 1-step의 Crank 모션으로부터 크랙 없이 성형 가능한 성형한계깊이를 선정하였다. 그리고, 초기 블랭크 형상 및 크기로 성형이 가능한 최대 성형깊이까지의 성형을 목표로 슬라이드 모션을 설정하였다.

성형시험에 적용된 초고강도강판에 성형속도를 30spm~5spm으로 조절(crank #1~#4)하여 성형을 진행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 상대적으로 성형속도가 빠른 30spm, 20spm의 경우 성형깊이 18mm가 한계 깊이로 더 이상 성형이 불가하였고, 성형속도가 느려질 수록 성형한계깊이가 1~2mm 증가되는 것을 확인 하였다. 느린 성형속도의 경우 성형한계깊이가 다소 증가되나, 재현성 시험을 위해 진행된 일부 시험편에서 미세한 크랙이 발견되었고, 생산성 등을 고려할 때 느린속도에서의 증가된 성형깊이를 성형한계깊이로 설정에는 어려움이 있어 본 연구에서는 성형한계깊이를 18mm로 선정 후 시험편의 폭으로부터 성형이 가능한 깊이인 25mm의 성형깊이까지 성형을 목표로 하였다.

슬라이드의 모션 제어를 통하여 2-step의 성형(program #1~#4)시 Fig. 5과 같이 슬라이드 모션 형태와 관계없이 성형깊이 25mm의 성형이 불가하였다. 상승이 시작되는 위치가 하사점에 가까울수록 성형 특성이 좋다고 보고되고 있으나, Program #1 모션의 경우 상승 개시위치 즉, Pulse의 시작 위치가 성형한계깊이 18mm보다 깊은 20mm에서 시작되므로 상승 전 파단이 발생하여 성형조건에는 부적합하였다.

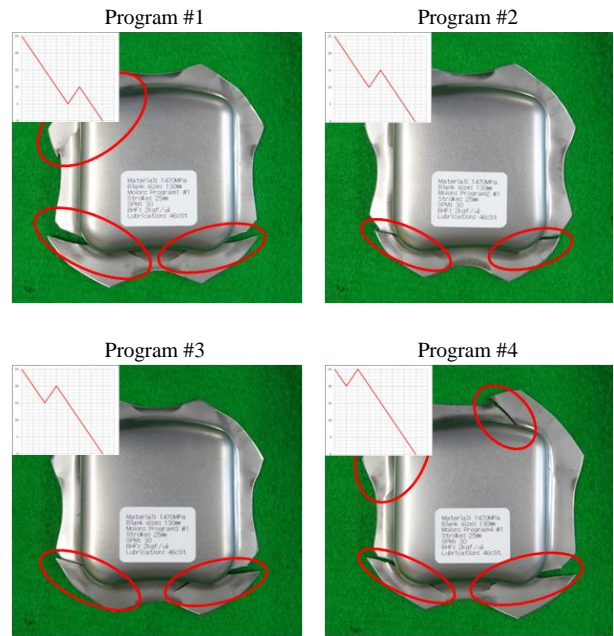


Fig. 5 Results of 2-step forming

Table 3 Effect of pulse start point(PSP) & number of step on formability

No. Step \ PSP	5mm	10mm	15mm	20mm
	2-step	X	X	X
3-step	-	○	X	X

Table 3과 같이 스텝의 수, Pulse 시작 위치 등 슬라이드 모션 설정으로 성형깊이 25mm의 성형이 가능함으로써, 적절한 모션의 설정이 성형한계깊이 향상 등 성형성 향상에 큰 요인으로 작용될 수 있음을 알 수 있다. 적절한 모션의 형태인 스텝 수와 더불어 중요한 것이 Pulse의 형태를 결정하는 시작위치와 상승

높이이며, 이 조건의 설정에 따른 결과를 Fig. 6과 Table 4에 나타내었고, 설정조건에 따라 스텝의 수가 동일함에도 불구하고 성형 결과 크랙이 발생되지 않고 성형이 된 것은 한 조건 밖에 없음을 알 수 있다.

각 Pulse step의 시작위치에 따른 비교를 위한 슬라이드 모션 설정의 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, Program #5 모션에 비해 Program #6 모션의 경우 Step3의 하강 이동량이 크고, Program #7 모션의 경우 Step2의 하강 이동량이 커서 성형시 불리한 조건으로 작용 되었을 것이며, 이는 성형시 발생하는 마찰저항의 영향으로 판단된다.

또한, 동일한 스텝 수의 조건에서 상승되는 이동량이 증가할수록 Table 4와 같이 성형 성공률이 증가하였으며, 상승 이동량이 5mm에서 성형이 완벽하게 됨을 알 수 있다. 상승 이동량이 1mm, 3mm의 경우 슬라이드 모션 적용의 재운할 효과를 나타내기에는 부족한 이동량이고, 5mm보다 높을 경우 탄성회복량의 증가로 하강시 마찰 저항이 증가되어 오히려 성형성에 안 좋은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 3-Step 모션(2nd pulse step)과 상승 높이 5mm가 최적의 성형조건으로 판단된다.

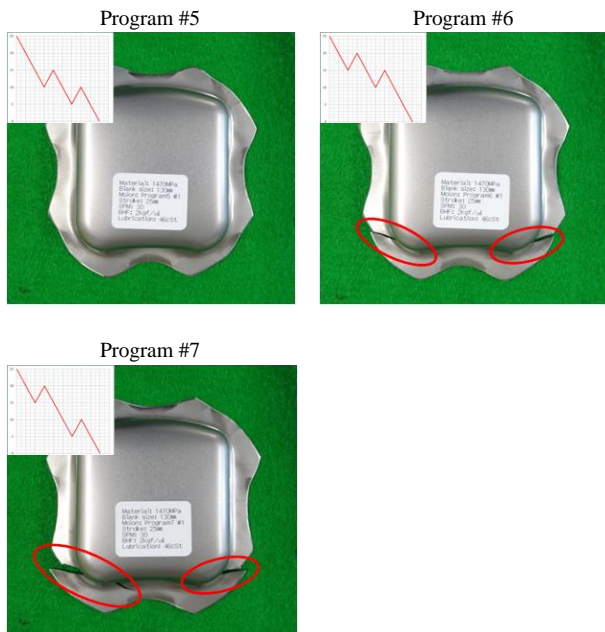


Fig. 6 Results of 3-step forming

Table 4 Effect of pulse height on formability

Pulse height	1mm	3mm	5mm	7mm
Forming success rate	40%	70%	100%	40%

3.2. 고속마찰시험 결과

서보프레스의 슬라이드 모션 설정이 마찰특성을 좋게하여 성형성이 향상되는 것으로 보고되고 있으나 그 이유가 명확하게 증명되지는 않았다. 이에 본 연구에서는 슬라이드 모션제어를 통해 나타나는 마찰특성을 성형시험과 동일한 슬라이드 모션과 성형속도의 마찰시험을 통해 슬라이드모션 제어와 성형성과의 관계를 분석하였다.

일반적으로 마찰시험은 인출속도와 소재를 누르는 압력에 의존하는 시험으로 마찰시험 후 도출되는 결과는 작용하중과 인출속도에 대하여 인출거리에 따른 마찰계수로 나타난다. 마찰계수는 시험 시작 전에는 움직임이 없는 상태로 0에서 시작하여 시험시작 후 점진적으로 증가하여 일정거리 인출 후 일정한 값의 마찰계수를 나타낸다.

마찰시험과 드로잉 성형을 비교하여보면 성형소재(blank)가 금형(die) 사이에 존재하면서 금형이 성형소재와 접촉 발생하기 전까지 미끄럼은 없는 상태이며, 금형과 성형소재가 닿는 순간부터 소재의 미끄러짐이 발생하므로 이는 마찰시험과 유사한 형태라 할 수 있다. 즉, 금형사이로 소재가 미끄러짐이 시작하면서부터 일정구간 성형시까지의 점진적 마찰계수의 증가로 마찰저항이 서서히 증가하게 되고, 그 후 마찰계수가 일정하게 유지되어 마찰저항이 발생하는 상태로 성형이 진행된다. 소재와 금형간의 마찰계수 증가는 마찰저항이 커짐을 의미하고, 마찰계수가 일정한 값으로 유지되는 구간보다 점진적으로 증가하는 구간에서 성형시 마찰저항이 상대적으로 작게 발생하게 된다.

Fig. 7에 인출 속도(low speed: 6.7mm/s, high speed: 250mm/s)에 따른 마찰시험의 결과를 나타내었으며, 인출거리-마찰계수의 관계에서 보이듯이 시험시작 후 마찰계수가 점진적으로 증가하는 Region I과 일정한 마찰계수로 유지하는 Region II로 구분할 수 있고, 저속마찰의 경우 고속마찰에 비해 Region I의 영역이 약 10배 수준으로 상당히 길게 나타났다.

Region I의 영역이 Region II에 비해 마찰저항이 상대적으로 작기 때문에 성형이 진행되는 동안 이 영역이 길게 나타나는 것이 성형성 향상에 도움이 되고 있으며, 이는 본 연구의 성형시험결과에서 저속으로 성형시 성형한계깊이가 증가함으로 확인하였다. 즉, 성형 중 마찰저항이 점진적으로 증가하는 Region I의 영역을 길게 가져간 경우 상대적으로

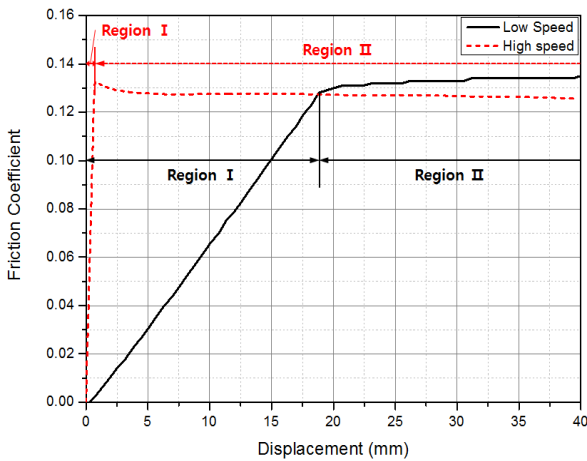


Fig. 7 Friction characteristic according to the speed

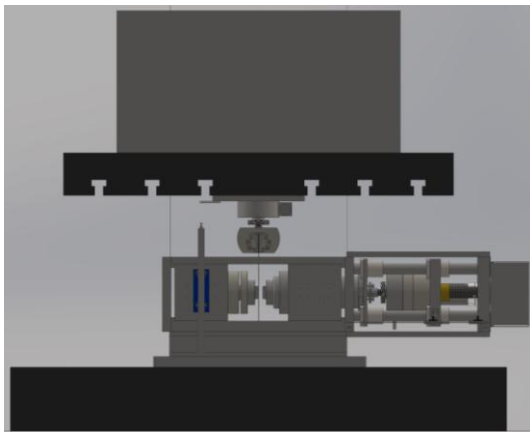
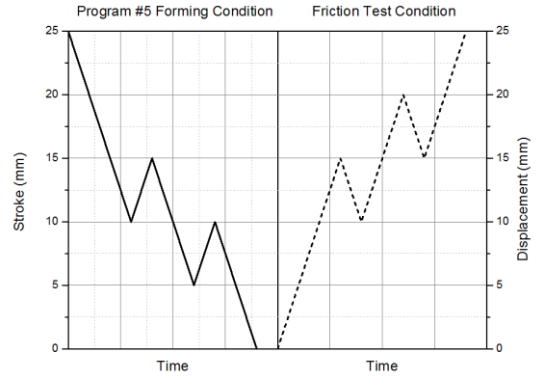


Fig. 8 The schematic of high speed friction test machine

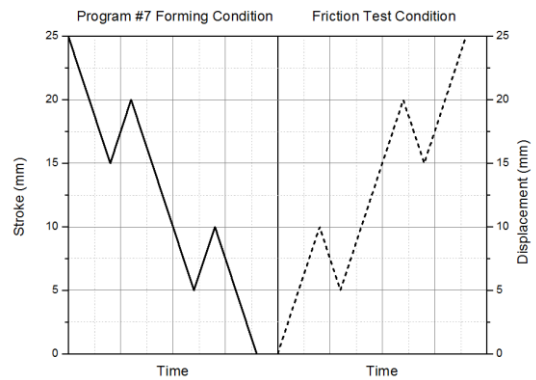
마찰저항이 작고 이 상태를 오래 유지하면서 성형이 진행되면 성형성이 향상된다.

일반적인 마찰시험은 수평방향의 평면으로 한번에 인출하여 시험이 진행되나, 본 연구에서 적용된 고속마찰시험은 성형시험에 사용된 서보프레스를 이용하여 수직방향 인출되도록 시험하였고, 위치 및 속도를 정밀하게 제어 가능한 서보프레스를 사용하고 있기 때문에 Fig. 8 과 같이 해당 프레스의 사양에 적합한 장치를 고안하였다.

성형시험에서 크랙없이 성형된 슬라이드 모션인 Program #5 모션과 동일한 스텝 수를 갖지만 크랙이 발생한 슬라이드 모션인 Program #7 모션의 조건에 대하여 마찰 시험을 진행하였다. 마찰 시험은 성형시험의 하강·상승 이동량과 동일한 미끄럼 거리에 대하여 Fig. 9 와 같이 상하방향으로 3 단계를 거쳐



(a) program #5 test condition



(b) program #7 test condition

Fig. 9 High speed friction test condition of slide motion

인출하는 마찰시험 조건을 설정하였으며, 성형시험의 속도와 동일한 30spm의 고속으로 시편을 인출하였다. 단, 고하중의 마찰시험을 통한 마찰특성의 분석이 필요하나 슬라이드 모션의 구현에 대한 마찰특성의 영향을 파악하고자 저하중에서 마찰시험을 실시하였다.

Program #5 성형 조건에서의 고속마찰시험 조건

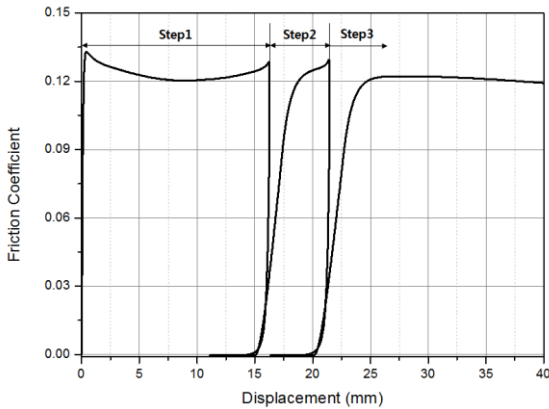
: 15mm 상방인출→5mm 하방인출→10mm 상방인출→5mm 하방인출→10mm 상방인출

Program #7 성형조건에서의 고속마찰시험 조건

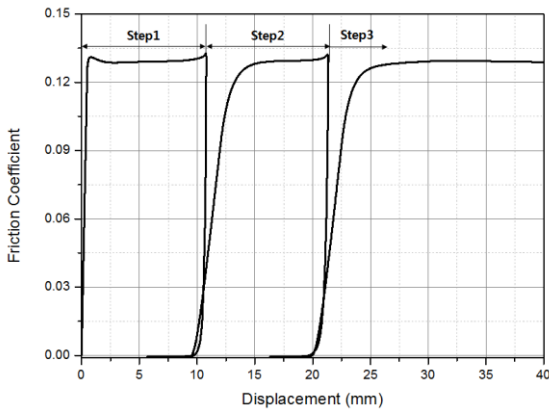
: 10mm 상방인출→5mm 하방인출→15mm 상방인출→5mm 하방인출→10mm 상방인출

Fig. 10 에 3-step의 슬라이드 모션을 갖는 성형조건과 동일한 인출거리의 고속마찰시험 결과를 나타내었다. 슬라이드 모션이 적용된 고속마찰시험 결과 상방으로 인출 시 거리의 증가와 함께 마찰계수는 증가하지만, 반대방향으로 후퇴시 즉, 성형조건에서 소재와 금형간의 미끄럼이 없는 경우로 마찰계수는

0 으로 초기화가 되고, 다시 인출시 마찰계수가 점진적으로 증가하는 Region I의 영역을 재형성하여 마찰저항이 감소되며, 또한 단계를 거듭할수록 최대 마찰계수가 감소하는 경향이 나타났다. 다만, 구체적인 윤활유의 거동은 분명하지는 않다.



(a) program #5 condition



(b) program #7 condition

Fig. 10 Results of high speed friction test for slide motion

각 단계에서의 성형은 마찰계수가 0 에서 점진적으로 상승하는 구간 즉, 단계별 성형초기에 마찰저항이 작은 상태인 Region I의 영역이 3 회씩 나타나고 있으며, 두 조건 모두 Step1 은 성형한계값이 이내이므로 마찰저항이 상대적으로 큰 Region II의 영역이 존재함에도 성형 중 크랙이 발생되지 않고, Region II의 영역의 존재가 성형성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 또한, Step3 에서 하사점인 25mm 까지 성형시에는 Region I의 영역에서 성형이 진행되었다.

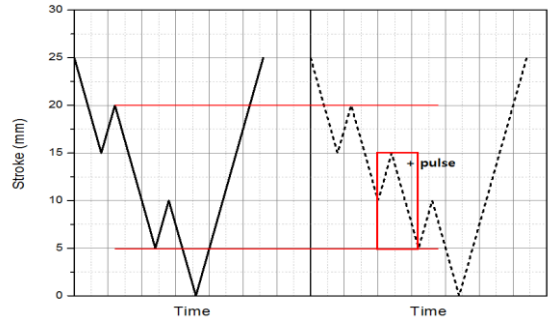


Fig. 11 The schematic of new slide motion

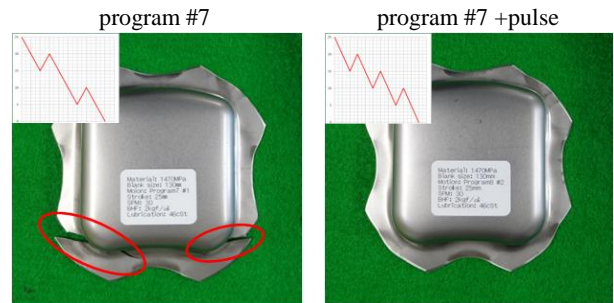


Fig. 12 Results of new condition

Fig. 10(a) Program #5 와 동일한 슬라이드 조건의 경우 Step2 의 성형시 일정한 마찰저항을 갖는 Region II의 영역 발생 전에 다시 스텝 하강하여 Region I의 영역 내에서만 Step2 의 성형이 진행되지만, Fig. 10(b) Program #7 과 동일한 슬라이드 조건의 경우 일정한 값의 마찰계수를 유지하여 마찰저항이 높은 Region II의 영역이 존재하는 상태에서 Step2 의 성형이 진행되었다. Program #7 의 성형조건이 Program #5 의 성형조건에 비해 Step2 의 성형깊이가 깊어 Step2 에서 일정마찰계수가 유지되는 Region II의 영역이 발생하고, 이에 의한 마찰저항이 증가하여 Fig. 6 과 같이 성형시 크랙이 발생한 것으로 판단된다.

Region II의 영역 발생 전 슬라이드의 상승으로 Region I의 영역을 형성한 것이 성형성 향상에 영향을 미치고 있음을 검증하고자 Fig. 11과 같이 Program #7 모션 Step2에 Pulse를 추가하여 성형시험을 진행하였고, 그 결과 Fig. 12와 같이 크랙없이 성형 됨을 확인하였으며, 성형의 깊이가 깊어질수록 Region II의 영역 발생 전 Region I의 낮은 마찰저항 영역을 형성함으로써 성형성을 향상 시킬 수 있다. 마찰저항이 크게 발생하는 구간에 Pulse를 적용함으로써 마찰 저항을 최소화 시킬 수 있으며, 마찰

시험을 통해 슬라이드 모션을 최적화 시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 서보프레스의 다양한 슬라이드모션의 공정변수가 초고장력강판의 성형성에 미치는 영향에 대한 실험적 분석을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 1.2GPa 이상의 초고강도강판을 인장과 압축이 동시에 작용되는 복합적인 모드의 드로잉 성형에 있어서 3-Step 모션(2nd pulse step)과 상승 높이가 5mm가 최적의 성형조건으로 도출되었으며, 적절한 슬라이드 모션의 설정으로 성형한계깊이를 약 40% 정도 향상 시켰다.

(2) 상승높이가 5mm 이하로 상승높이가 낮으면 슬라이드 모션 적용에 의한 재윤회 효과를 나타내기에는 이동량이 부족하고, 5mm보다 높을 경우 탄성회복량의 증가로 오히려 하강시 마찰 저항이 증가되어 성형성에 안 좋은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(3) 성형속도가 느릴수록 마찰계수가 점진적으로 증가하는 영역이 빠른 성형속도에 비해 길게 나타나며, 이 영역이 마찰이 발생하는 전구간에서 상대적으로 마찰저항이 작기 때문에 성형이 진행되는 동안 이 영역을 길게 유지하는 것이 성형성 향상에 도움이 된다.

(4) 성형속도와 동일한 속도의 고속마찰시험을 통해 마찰계수가 점진적으로 증가하는 구간 즉, 상대적으로 마찰저항이 작은 영역에서 성형시 성형성이 향상되었으며, 슬라이드 모션제어를 통한 Step 의 설정시 마찰계수가 일정한 값으로 유지되는 구간 발생 전 슬라이드 상승을 통해 마찰계수가 점진적으로 증가하는 구간을 재형성하여 마찰저항이 낮은 상태에서 성형이 진행되면 성형성 향상에 좋은 효과를 나타낼 수 있다. 또한 슬라이드 모션을 설정함에 있어 마찰시험의 결과를 바탕으로 모션이 적용될 위치를 최적화 할 수 있다.

후 기

본 연구의 일부는 산업기술혁신사업(제조기반산업 핵심기술개발사업) (#10053026) 및 WC300 R&D 지원

사업(#S2315965)을 통해 연구한 내용이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] M. Y. Demeri, 2013, Advanced High-Strength Steel: Science, Technology, Application, ASM International
- [2] J. S. Song, K. T. Youn, C. D. Park, J. Y. Heo, Y. H. Kim, 2017, Evaluation of Servo Press Slide Motion for Springback Reduction of High Strength Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 26, No. 5, pp. 277~285.
- [3] K. H. Kang, S. H. Kim, H. C. Ro, 2016, Change in Springback Tendency during Forming of a Hat-type Product with High Strength Steel using a Digital Servo Press, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 1, pp. 21~28.
- [4] N. Shinomiya, N. Shirakawa, 2013, Estimation of Numerical Control Servo Press Motion for Deep Drawing, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 54, No. 629, pp. 78~82.
- [5] Y. Tamai, Y. Yamasaki, A. Yoshitake, T. Imura, 2010, Improving Deep Drawability of Steel Sheet by Motion Control of Servo Press, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 51, No. 592, pp. 68~72.
- [6] N. Shinomiya, N. Shirakawa, 2013, Estimation of Numerical Control Servo Press Motion for Deep Drawing, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 54, No. 629, pp. 78~82.
- [7] N. Shinomiya, N. Shirakawa, 2015, Improved form Accuracy Throught Slide Motion Control in Impact Extrusion of Square Cups, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 56, No. 654, pp. 47~52.
- [8] J. E. Kim, J. Y. Heo, I. C. Yoon, J. S. Song, K. T. Youn, C. D. Park, 2015, Evaluation of Friction Characteristics for High-Strength-Steel Sheets Depending on Condition, Trans. Mater. Process., Vol. 24, No. 6, pp. 381~386.