

자동변속기용 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 두께 최적화를 위한 유한요소해석

이주석¹ · 윤종현[#] · 이정환¹ · 김선현² · 홍의창³

Finite Element Analysis for Optimizing the Initial Thickness of an Under-drive Brake Piston used in a Automatic Transmission

J. S. Lee, J. H. Yoon, J. H. Lee, S. H. Kim, E. C. Hong

(Received November 6, 2013 / Revised February 6, 2013 / Accepted February 14, 2013)

Abstract

The under-drive brake piston is an important component in automotive transmissions. It changes the velocity by controlling the gear ratio. It has been traditionally manufactured by hot forging. Recently, there has been an effort to replace this traditional manufacturing method with cold forging in order to improve the dimensional accuracy and decrease the surface roughness. Cold forging uses a smaller amount of initial material and also has a shorter cycle time since the forged surface can be the final surface without the need of post-processing such as machining or grinding. In the current study, finite element analysis was conducted to evaluate a process design using an initial plate with reduced thickness. This smaller thickness decreases the amount of material needed for the part as well as the machining to produce the final product.

Key Words : Automatic Transmission, Under-drive Brake Piston, Finite Element Analysis, Machining, Light-weight Design

1. 서 론

전 세계적인 경기 불황에 따라 자동차 산업의 규모나 형태가 변화하고 있다. 그 중에서 제조원가의 70%를 차지하고 있는 자동차 부품의 품질, 가격, 기술 등이 자동차 산업의 경쟁력을 확보하는 중요한 요인이 되고 있다. 자동차 부품의 생산공정에 있어 단조(forging)공정은 대표적인 성형 방법의 하나이며, 조향 장치와 자동변속기, 엔진블록 등 내구성 및 정밀성이 확보되어야 하는 부품의 생산 분야에서 널리 사용되고 있다. 자동변속기의 주요부품 중 하나인 언더 드라이브 브레이크 피스톤(under-

drive brake piston)은 변속 시 엔진의 동력을 허브로 전달하는 부품으로서 일반적으로 열간 단조를 통하여 제품이 생산 되어왔다. 열간 단조의 경우, 초기 소재를 동적 재결정 이상의 온도(1150~1200°C)로 승온시킨 뒤 성형이 이루어지기 때문에 소재의 유동성은 향상되지만 정밀한 치수 만족이 어려우며 투입되는 소재의 양도 온간 및 냉간에 비해 증가되는 단점을 갖는다. 또한 단조 후 기계 가공 시, 가공량이 증가하여 작업시간이 급격히 늘어날 뿐만 아니라 가공 툴(tool)의 수명이 매우 짧아지는 단점을 갖는다. 최근에는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 열간 단조의 생산 방식을 냉간 단조로 전환하고자

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. ㈜오토인더스트리

3. ㈜호창MF

Corresponding Author: KIMS, E-mail: jhyoon@kims.re.kr

하는 연구가 증가하고 있다. 냉간 단조에서는 열간 단조에 비해 소재의 높은 항복점과 강도, 낮은 연신율로 인하여 동일한 외력이 가해졌을 시 과도한 성형하중이 발생하게 되며, 금형의 파손 및 제품의 균열이 발생하게 된다. 이러한 이유로 인하여 냉간 단조를 이용한 제품의 성형에서는 예비성형 공정을 통해 작업이 이루어진다. Ryu et al.[1]은 플로팅 금형(floating die)을 이용한 3단계의 냉간 단조 공정을 유한요소해석을 통하여 제시하였다. Yoon et al. [2]은 기존의 공정에서 사용되던 4.0mm SCM415 판재를 10% 두께를 감소한 3.6mm 판재에서 2단계 공정의 냉간 단조를 실시하여 성형해석 및 실험을 진행하였으며 Lee et al.[3]는 2차원 해석과 3차원 해석의 연계 해석을 통하여 5단계의 공정으로 이루어진 냉간 단조를 실시하였다. 1단계에서 4단계까지는 축대칭형상으로 2D 해석을 이용하여 피어싱 공정(piercing process)을 실시하였으며, 5단계의 경우에는 절삭 공정과 유사한 헤딩 공정(heading process)으로 성형해석 시 요소망(element)의 접힘(folding)이 빈번하게 발생하게 되어 해석의 정확성을 높이기 위하여 3D를 이용하여 해석을 진행하였다. 이와 같이 제품의 구조상 성형 해석이 난해할 경우 2D와 3D의 연계 해석을 통하여 신뢰성이 높은 결과를 안정적으로 연계 하였으며 특정경계 및 국부적인 영역의 형상변화를 더욱 정확하게 예측하였다. Merklein et al.[4]는 판재와 벌크 소재를 혼합한 다양한 방법의 냉간 단조 성형방법을 제시 하였고 유한요소해석 및 실제 실험을 통하여 결과를 비교하였다. Yeo et al.[5]는 자동차 엔진의 연료분사장치인 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 유한요소해석을 통해 최적화 기법을 적용하여 성형공정을 평가하였다. Min et al.[6]은 SM20C 소재를 사용하여 자동차용 스티어링 요크(steering yoke)를 기존 열간 단조에서 냉간 단조로 변경한 후 실제 실험과 유한요소해석을 통해 기계적 특성 향상 및 가공량 감소와 더불어 비용 절감의 효과를 확인하였다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 자동차 변속기의 주요 부품인 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 냉간 단조를 위한 판단조 공법을 검토하였으며, 초기 판재의 두께를 최적화하기 위하여 유한요소해석을 이용하여 판단조 공정을 분석하였다. 이를 바탕으로 기계 가공량을 최소화 할 수 있는 최적의 소재두께를 제안하고자 하였다.

2. 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 냉간 단조

열간 단조 공법으로 생산되어 오던 언더 드라이브 브레이크 피스톤은 최근 냉간 단조 공법을 적용하면서 부품의 기계적 특성이 향상되었을 뿐만 아니라 소재의 투입 중량이 감소되었다. 또한, 불필요한 투입 소재를 줄임으로써 단조 공정 후에 수행하는 기계 가공 시간을 줄일 수 있다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 냉간 단조 공정은 다음과 같다. 6.0mm의 S55C 열연강판을 사용하여 블랭킹(blanking) 및 피어싱(piercing)을 실시하여 기본적인 디스크 형태로 가공한 뒤, 블랭킹으로 발생한 소재의 응력 제거와 고탄소강의 연화(softening)를 위하여 구상화 열처리(spheroidizing)를 실시한다. 판재를 이용하여 냉간 단조 공정으로 성형하는 방식의 경우 소재 유동의 제한으로 인하여 모서리 부위에 미충진 구간이 발생하게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방안으로서 Fig. 2와 같이 상, 하 운동을 하는 펀치의 구조를 방사형으로 전환하여 소재의 유동성이 낮은 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 모서리부에 소재의 충전율을 높였다. 상부 금형의 방사형 운동은 분리형 금형을 이용하여 가능하도록 고안되었다[7].

분리형 금형을 이용한 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 판단조 공정은 Fig. 3과 같이 총 3단계에 걸쳐 성형이 이루어진다. 1공정에서는 상부 펀치가 원추형의 펀치 가이드를 따라 상사점에서 하사점으로 사선 운동을 한다. 이 때, 분리형 금형이 서로 벌어지면서 소재를 원주 방향으로 유동시키며 성형이 이루어지며, 2공정에서는 일체형 금형을 이용한 일반적 냉간 단조 성형 방법으로 제품의 형상 및 크기에 맞게 성형이 이루어지며, 마지막 3공정에서는 정밀한 치수 만족을 위하여 최종 제품의 형상에 맞게 성형이 이루어 질 수 있도록 사이징(sizing) 공정이 실시된다.

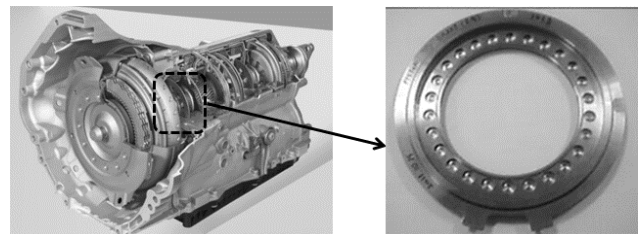


Fig. 1 Under-drive brake piston

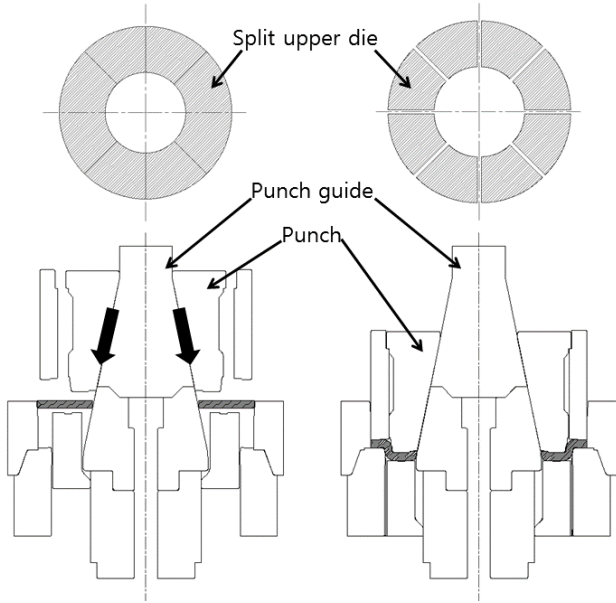


Fig. 2 Schematic structure of split-die in cold forming process

Simulation program	DEFORM-3D (1/8 symmetric)
Number of elements	40,000
Material	S55C
Friction coefficient	0.12

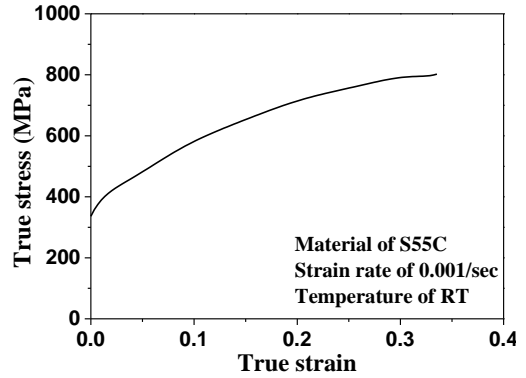


Fig. 4 True stress-strain curve for S55C plate

3. 두께 최적화를 위한 유한요소해석

3.1 성형해석 조건

유한요소해석을 위한 상용 프로그램으로 DEFORM-3D를 사용하였으며, 판단조 공정을 위한 소재는 두께 6.0mm의 S55C 열연강판을 사용하였다. S55C 판재의 기계적 물성을 얻기 위하여 상온에서 준정적 인장실험을 실시하였다. 인장시편은 실제 공정과 동일한 조건을 구현하기 위하여 구상화 열처리 된 소재를 사용하였으며 ASTM A370-10의 규격에 따라 가공하였다. 시편 가공 이후 인스트론(instron) 장비를 이용하여 변형률 속도 0.001/sec로 인장실험을 실시하여 Fig. 4와 같은 진변형률-진응력 곡선(true strain-true stress curve)을 획득하였다. 상세한 유한요소해석 조건은 Table 1과 같다.

3.2 판단조공정의 유한요소해석

Fig. 5는 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 최종 제품 형상을 나타낸 것으로서, 단조 공정 후에 황삭(rough grinding)과 정삭(finish grinding)을 통하여 가공된다. 언더 드라이브 브레이크 피스톤과 같이 복잡한 형상의 판단조품은 Fig. 5에서 제시된 바와 같이, 구간별로 최소 2.4mm 에서 최대 6.2mm의 두께 분포를 갖고 있으므로 기계 가공 시 기계 가공량의 차이도 두 배 이상 발생하게 된다. 이는 가공 톨의

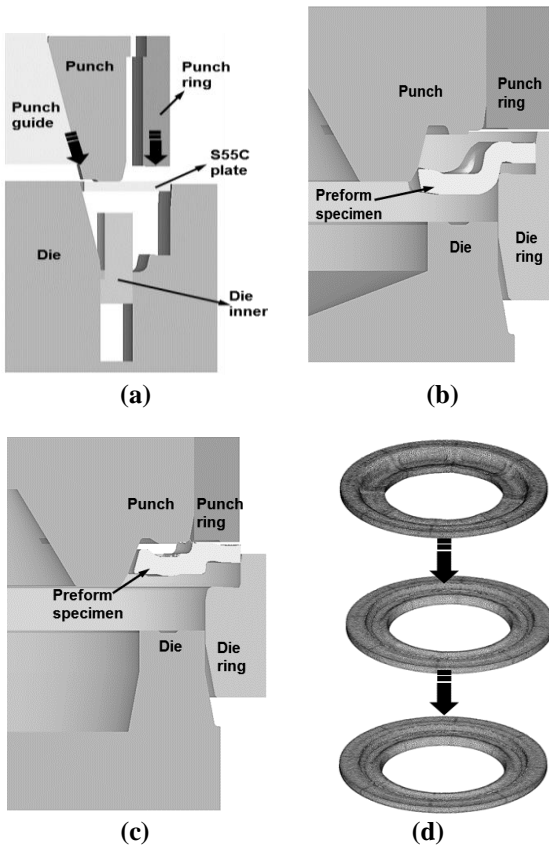


Fig. 3 Cold forging process: (a) 1st process; (b) 2nd process; (c) 3rd process; (d) modeling products by process

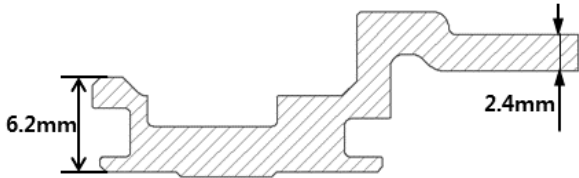
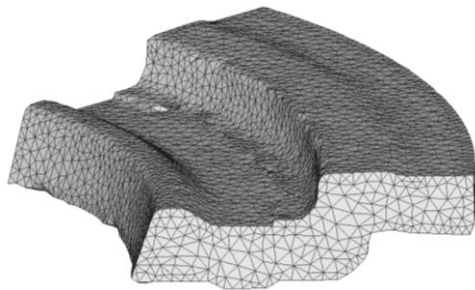
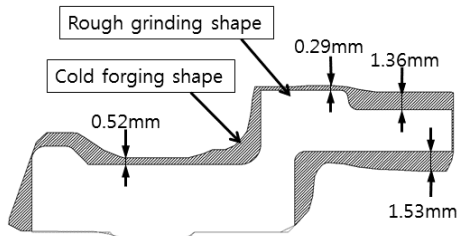


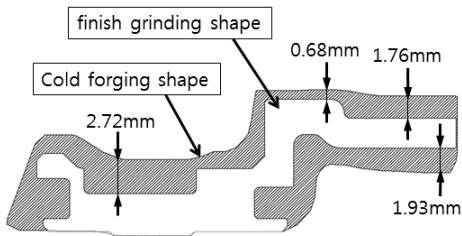
Fig. 5 Schematic design of under-drive brake piston



(a)



(b)

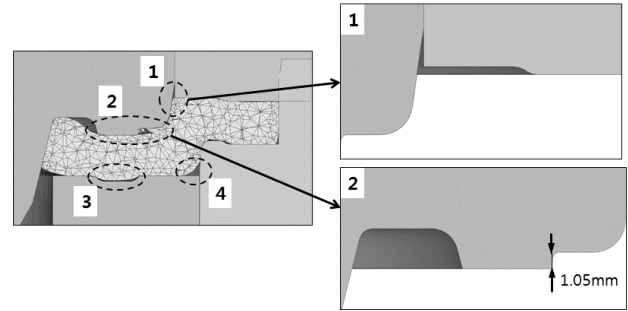


(c)

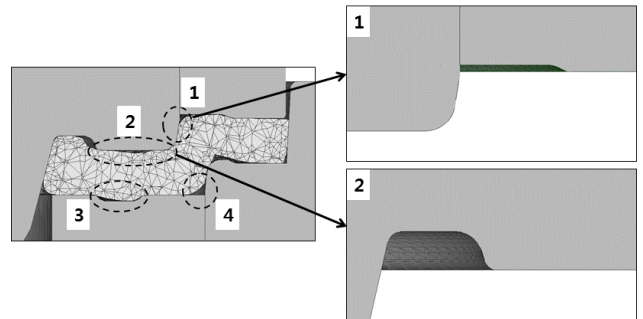
Fig. 6 Comparison of deformed shapes in forged with mechanical grinding line: (a) forged part; (b) rough grinding (b) finish grinding

수명을 단축시킬 뿐만 아니라 기계 가공 시간을 급격히 증가시켜 전체 공정의 효율을 떨어뜨리게 된다.

Fig. 6는 6.0mm 판재를 적용한 냉간 단조 성형해석 결과로서 단조품과 기계 가공된 최종 제품의 형상을 비교하였다. 가공되는 두께의 차이는 황삭 가공 시, 최소 0.29mm에서 정삭 가공 시, 최대 2.72mm까지 나타난다. 이를 전체 가공량으로 환산할 경우, 황삭 및 정삭 가공에서 각각 213g, 394g으로 투

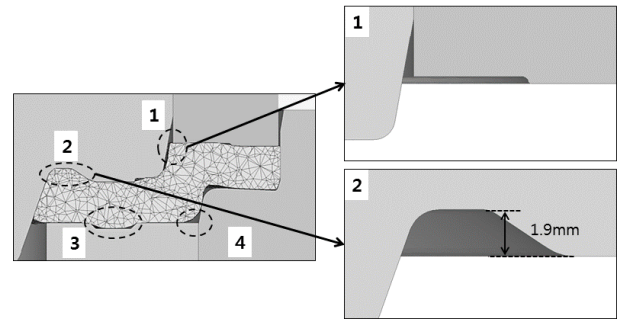


(a)

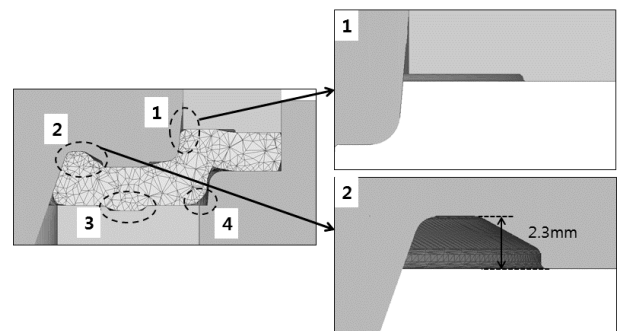


(b)

Fig. 7 Design modification of punch and die in 2nd forging process: (a) initial die; (b) modified die



(a)



(b)

Fig. 8 Design modification of punch and die in 3rd forging process: (a) initial die; (b) modified die

입증량의 약 28%와 52%를 차지한다. 따라서 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 재료 회수율을 높이고 기계 가공 시간의 효율을 높이기 위한 방안으로서 초기 두께의 최적화가 필수적이라고 판단하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 기존 6.0mm의 소재 두께를 3%(5.8mm), 5%(5.7mm)로 감소하여 초기 소재의 투입 중량 및 기계 가공량을 감소하는 방안을 모색하였다.

3.3 유한요소해석을 이용한 두께 최적화

열연강판의 두께를 3%, 5% 감소시켜 균일하게 생산하는 것은 현실적으로 불가능한 일이지만, 두께 최적화를 위한 선행연구로서 두께를 수치적으로 제어하여 판단조의 가능성을 검토하였다. 초기 판재의 두께를 감소시켰으므로 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 모서리 부에 결육(underfill)이 심각하게 발생하게 된다. 따라서, Fig. 7과 같이 2, 3공정에서 펀치 형상을 변경하였다. 기존 6.0mm 판재를 이용한 냉간 단조 2공정에서 상부 펀치는 Fig. 7(a)와 같이 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 하단부 형상을 성형하기 위하여 1.05mm 돌출되어 있는 형상으로 설계 되었다. 하지만 기존 6.0mm의 두께에서 3%, 5% 두께가 감소한 판재를 적용함에 따라 전체적인 소재의 유동량이 적어졌기 때문에 기존 상부 펀치와 같이 돌출된 형태로 성형을 진행하였을 경우에는 Fig. 7(a)의 3번 부분으로 소재 유동이 응집되게 되어 1번, 4번과 같은 모서리 부분에서는 결육이 심화되는 것을 관찰하였다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 상부 금형을 Fig. 7(b)의 2번과 같이 일자형의 수평한 구조로 형상을 변경하여 소재 유동이 응집되는 것을 최소화 하였으며 Fig. 7(b)의 1번과 같이 상부 펀치의 외경을 확장하여 모서리 부에 소재 유동이 집중되도록 유도하였다.

3공정 역시 2공정에서와 마찬가지로 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 두께 감소에 따라 소재의 유동량은 줄어들어 기존의 금형을 그대로 사용시, Fig. 8 (b)의 4번 모서리 부에서 심각한 결육이 발생되었다. 그리하여 2번의 형상과 같이 내경 부분을 0.4 mm확장하여 소재의 유동을 넓어진 내경 부분으로 유도하였고, 1번과 같이 외경을 확장함으로써 단조 후 성형 형상과 기계가공 형상 간의 두께 차이를 최대한 줄여 가공량 최소화를 모색하였으며, 1,4번과 같은 모서리 부에 유동을 집중시켜 결육 발생을

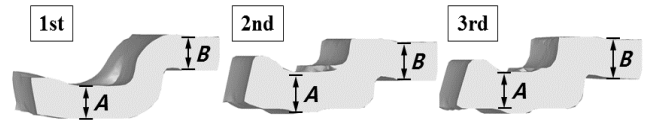


Fig. 9 Comparison of deformed shape in cold forging process

Table 2 Comparison of thickness in deformed shape

		1 st process	2 nd process	3 rd process
A	Initial plate (6.0 mm)	5.97 mm	5.86 mm	5.70 mm
	3% reduction (5.8 mm)	5.96 mm	5.86 mm	5.46 mm
	5% reduction (5.7 mm)	5.81 mm	5.78 mm	5.39 mm
B	Initial plate (6.0 mm)	6.02 mm	6.09 mm	6.05 mm
	3% reduction (5.8 mm)	5.99 mm	5.97 mm	5.35 mm
	5% reduction (5.7 mm)	5.87 mm	5.86 mm	5.35 mm

Table 3 Load prediction of forging process

	1 st process	2 nd process	3 rd process
Initial plate (6.0 mm)	886 ton	890 ton	883 ton
3% reduction (5.8 mm)	830 ton	908 ton	933 ton
5% reduction (5.7 mm)	821 ton	950 ton	955 ton

방지하였다.

유한요소해석을 이용한 냉간 단조 공정별 성형은 Fig. 9와 같다. Table 3에서 보는 바와 같이 전체적으로 기존 6.0mm 판재의 두께가 3%, 5% 감소함에 따라 성형 형상의 두께 치수는 국부적으로 변화하는 것을 확인하였다. 1공정에서 언더 브레이크 피스톤의 내, 외경부 두께는 3% 감소 시, 각각 0.01mm와

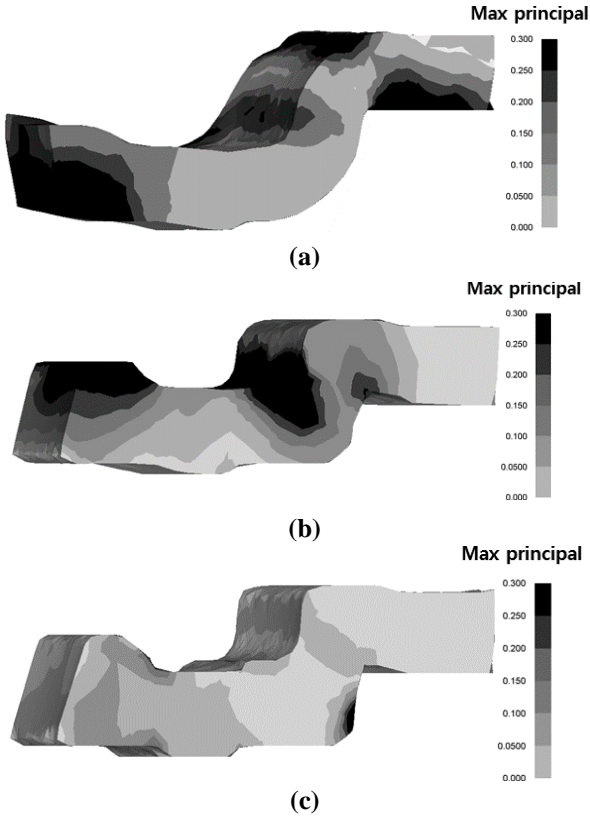


Fig.10 Comparison of deformed shape and maximum principal strain in 5% reduction of plate thickness: (a) 1st process; (b) 2nd process; (c) 3rd process

0.03mm 감소하여 기존 6.0mm 두께를 성형한 이후 형상의 치수와 비교하였을 시, 감소량은 현저히 적었으며 5% 감소 시에는 내, 외경부 두께가 각각 0.16mm와 0.15mm 감소하여 성형 형상의 두께 치수가 감소 되는 비율이 3%에 비해서는 높게 나타났으나 큰 변화를 가져 오지는 못하였다. 이는 1공정 경우 기존 금형을 그대로 사용해서 성형을 진행하였기 때문에 판재의 두께를 3%와 5% 줄인 경우에서도 그 변화가 미약하게 나타났다.

2공정에서는 Fig. 7 (b)와 같이 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 모서리 부 소재 유동을 집중하는 형태로 금형 수정이 이루어졌기 때문에 판재 두께의 감소에 따른 성형 형상의 두께 치수 변화는 3% 두께 감소 시에는 내, 외경부에서 모두 0.1mm 이내로 두께가 감소하여 치수적으로 큰 변화는 없었으며, 5% 감소 시에는 내경부에서 0.08mm, 외경부에서는 0.13mm 두께가 감소하였다. 초기 판재의 두께 감소에 따른

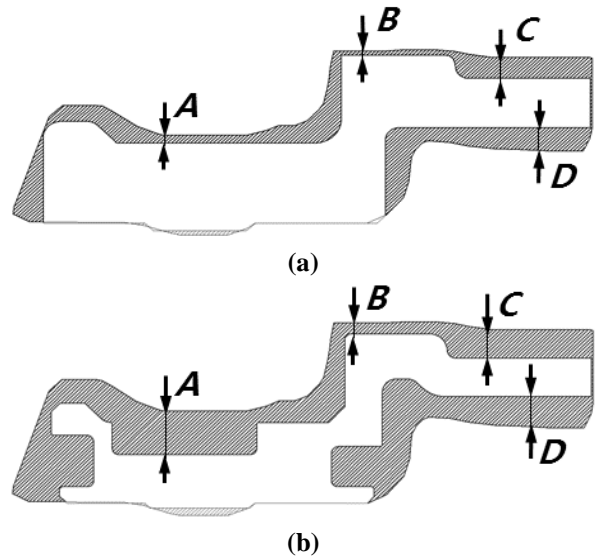


Fig.11 Comparison of deformed shapes with mechanical machining line: (a) rough grinding; (b) finish grinding

Table 4 Comparison of dimensions in forged shape with rough grinding and finish grinding

		Initial plate (6.0mm)	3% reduction (5.8mm)	5% reduction (5.7mm)
Rough grinding	A	0.52mm	0.31mm	0.17mm
	B	0.29mm	0.27mm	0.18mm
	C	1.36mm	0.93mm	0.93mm
	D	1.53mm	1.17mm	1.16mm
Finish grinding	A	2.72mm	2.51mm	2.37mm
	B	0.38mm	0.68mm	0.58mm
	C	1.76mm	1.33mm	1.34mm
	D	1.93mm	1.57mm	1.56mm

Table 5 Comparison of weight reduction

	Initial plate (6.0mm)	3% reduction (5.8mm)	5% reduction (5.7mm)
Rough grinding	213 g	190 g	175 g
Finish grinding	394 g	371 g	356 g

단조 성형 형상은 3공정에서 가장 크게 나타나고 있다. 이는 Fig. 8(b)의 2번과 같이 상부 펀치의 캐비티(cavity) 높이를 1.9mm에서 2.3mm로 확장시키면서 소재 유동이 Fig. 8(b)의 2번 영역으로 집중되었기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 8(b)의 1번 부 모서리 부 결육을 방지하고, 기계 가공라인에 근접한 정밀 성형을 위하여 상부 펀치 링(ring)에 기존 6.0mm 판재를 성형하였을 때 보다 증가된 stroke를 부여 하였다. Table 3은 유한요소해석을 통하여 냉간 단조 후 각 공정별 성형 하중을 나타내었다. 65ton 하중이 감소하는 것을 알 수 있으며, 2공정에는 890ton 보다 18ton, 60ton 증가하였고, 3공정에서는 883ton에 비하여 50ton, 72ton의 하중이 증가하는 것으로 예측하였다. 따라서, 기존 6.0mm 판재를 적용하여 성형하였을 경우와 비교하여 3%, 5% 두께가 감소된 판재를 적용하였을 경우, 현재 사용되고 있는 1000ton 프레스의 가용범위 이내로 성형이 이루어 지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 기존 6.0mm 판재 두께에서 5% 감소시킨 소재에 대한 각 공정의 주 변형률(principal strain) 분포를 나타내고 있으며 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 내경부와 직각 단차부에 변형률이 집중되고 있는 것을 확인할 수 있다. 0에서 0.3까지 변형률이 분포하고 있으며 Fig. 4의 진변형률-진응력곡선에서 인장실험을 통해 얻어진 최대 주 변형률은 0.33으로 파단에 의한 영향은 없는 것으로 예상된다. 또한 실제 냉간 단조의 각 공정 사이에 760°C 200분간 소둔(annealing)처리를 실시하여 냉간 단조품에서 발생할 수 있는 파단을 억제하고자 하였다.

Fig. 11은 기존 6.0mm 판재 두께에서 냉간 단조 후 황삭 및 정삭 기계 가공 시, 성형 형상의 비교를 나타내었고, 보다 정량적인 비교를 위하여 Table 4와 같이 각 구간별 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 치수를 나타내었다.

또한, 이를 가공양으로 환산 하였을 경우 변화량은 Table 5에서 나타내었다. 6.0mm 두께의 판재를 적용하였을 때, 냉간 단조 후, 최종 제품의 생산을 위한 기계 가공양은 정삭 및 황삭 기계 가공 시, 각각 213g, 394g으로 측정되었다. 이와 비교하여 3% 두께가 감소된 판재를 적용하였을 때의 기계 가공량은 황삭 및 정삭 기계가공을 기준으로 각각 190g, 371g, 그리고 5% 두께가 감소된 경우는 175g, 356g으로 감소하는 경향을 보인다.

이러한 결과를 바탕으로 판재 두께가 5% 이상 감소시킨 판재, 즉 기존 6.0mm 판재의 두께를 7%와 9% 감소시킨 판재를 적용하여 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 냉간 단조를 수행해본 결과, 상단 및 하단부에 수직으로 성형이 되는 모서리 부에 심각한 결육이 발생하였으며, 1000ton을 초과하는 성형 하중이 발생하여 현재 시스템에서 구현이 불가능한 것으로 판단하였다. 따라서, 기존 성형 장비 및 금형을 유지하는 상태에서의 초기 판재의 최적 두께는 5.7mm 인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 언더 드라이브 브레이크 피스톤의 냉간 단조 후 기계 가공 시, 기계 가공양을 최소화하기 위하여 기존 6.0mm 두께의 S55C 판재를 3%(5.8mm)와 5%(5.7mm)로 두께를 감소시켜 냉간 단조 공정 및 금형 설계를 수행하였다. 유한요소 해석을 이용하여 초기 판재의 공정별 변형 형상을 예측하였으며, 이를 바탕으로 3%와 5% 판재 두께를 감소시킨 경우의 성형 형상과 이에 따른 가공양을 계산하였다. 또한 현재 사용중인 성형 장비(1000ton knuckle press)와 금형을 최대한 활용하여 성형 효율을 높이기 위한 최적의 판재 두께로서 기존의 6.0mm에서 5.7mm의 판재를 제안하였다.

REFERENCES

- [1] C. H. Ryu, M. S. Joun, 2001, Finite Element Simulation of Cold Forging Process Having a Floating Die, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 112, No. 1, pp. 121~126.
- [2] J. H. Yoon, H. Y. Jeon, J. H. Lee, 2013, Process Design of Cold Forging with Thick Plate for Seat Recliner Parts, *Mater. Design*, Vol. 49, pp. 449~455.
- [3] M. C. Lee, M. S. Joun, 2008, Rigid-plastic finite Element Analysis of Multi-stage Automatic Cold Forging Process by Combined Analyses of Two-Dimensional and Three-Dimensional Approaches, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 3, pp. 155~160.
- [4] M. Merklein, J. Koch, S. Opel, T. Schneider, 2011, Fundamental Investigations on the Material Flow at Combined Sheet and Bulk Metal Forming Processes,

- CIRP Ann-Manuf. Technol., Vol. 60, No. 1, pp. 283~286.
- [5] H. T. Yeo, K. H. Park, K. D. Hur, 2006, Evaluation of the Forging Process by Application of Optimization Technology, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 3, pp. 225~231.
- [6] D. K. Min, M. E. Kim, 2003, A Study on Precision Cold Forging Process Improvements for the Steering Yoke of Automobiles by the Rigid-plastic Finite-Element Method, J. Mater. Process. Technol., Vol. 138, No. 1, pp. 339~342.
- [7] E. C. Hong, S. H. Kim, 2013, The Mold Apparatus for Manufacturing Under-drive Brake Piston and Control Method Thereof, Patent KR, No. 10-1019566.