

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.4.423

열간단조 플랜지 금형의 형상에 따른 충전 및 응력해석

김 준 형* · 김 철**

* 경북대학교 기계공학부

Analysis of Filling and Stresses in the Hot Forging Process Depending on Flange Die Shapes

Junhyoung Kim* and Cheol Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received September 14, 2009 ; Revised February 10, 2010 ; Accepted February 18, 2010)

Key Words: Forging Die(단조금형), Preform(예비성형), Metal Flow(단류), Heat Transfer(열전달)

초록: 표면의 균열, 겹침결합, 금형의 코너반경이 작아 재료의 유동성이 낮을 때 발생하는 콜드셋, 부분충진 등의 단조결함이 없는 자동차용 단조 플랜지를 생산하기 위해서 열전달, 단류선 흐름, 응력분포를 고려하여 형단조 공정과 금형에 대한 해석을 수행하였다. 축박기(up-set) 단조, 예비성형, 최종성형, 단조압력으로 구성된 단조과정은 유한요소법으로 해석되었다. 예비성형과 상하 금형의 높이비율이 단조공정과 금형에 미치는 영향을 평가하여 예비금형의 각 10°와 최종 금형의 상하비율 1.5:1이 단조결함이 없는 결과를 나타내었다. 이를 반영한 새로 설계된 금형은 재료강도, 완전충진, 하중한계 13,000 KN 이라는 공정변수를 모두 만족시켰다. 이론 입증을 위해서 개선된 금형과 플랜지가 제작되었으며, 단조결함이 발견되지 않았다.

Abstract: Hot closed-forging process and the die used for forming an automotive flange were analyzed from the viewpoints of heat transfer, grain-flow lines, and stresses to obtain a forged product without defects such as surface cracks, laps, cold shots, and partial filling. The forging process including up-set, pre-forging, final forging and pressing forces was investigated using finite element analysis. The influence of the preform die and the ratio of the heights of the upper die to lower die on the forging process and die were investigated and a die shape (10° for the preform die, and 1.5:1 ratio for the final die) suitable to achieve successful forging was determined on the basis of a parametric study. All parametric design requirements such as strength, full filling, and a load limit of 13,000 KN were satisfied for this newly developed flange die. New dies and flanges were fabricated and investigated. Defects such as partial filling and surface cracks were not observed.

1. 서 론

단조가공은 기계적 성질이 우수한 제품을 대량 생산 할 수 있기 때문에 커넥팅로드, 기어, 플랜지 등의 생산에 주로 이용되며, 소재의 온도에 따라 열간단조, 온간단조, 냉간단조로 구분된다. 자동차용 플랜지는 열간 단조공정에 의해 제작되며, 우수한 기계적 특성을 가지기 위해서는 단류선(metal flow line), 소재, 접힘(folding) 및 표면결합들의 예방과 개선이 요구된다. 금형설계 기술은 개발기간, 개발비, 제품품질, 금형수명 및 생산성에 직접 영향을 미치며 전체 공정 중 단조공정의 개발에 소요되는 시간과 경비가 매우 크

다. 단조공정 설계기술은 주로 시행착오적 경험으로부터 발전되어 왔으며, 최근 경험적 지식을 정량적으로 체계화 하려는 연구가 진행되었다.

Petrov 등⁽¹⁾은 알루미늄 단조 시 유한요소해석 결과와 실험값을 비교하여 겹침결합(lap formation)의 크기와 금형형상과의 관계를 제시하였다. 단조결합을 줄이기 위해서 다단계의 예비성형을 거치지도 하는데, Cho 등⁽²⁾은 비축대칭 와서 캠 볼트 제작을 위해서 다단계의 예비형상을 거치게 하는 4 단 냉간 단조공정을 DEFORM-3D로 해석하여 실험결과와 비교하였다. Yeom 등⁽³⁾은 디젤엔진에 사용되는 알루미늄 접합피스톤의 크라운, 스커트부의 단조품 가공을 위한 단조기 용량, 소재의 초기형상치수, 예비성형체의 설계 등에 관한 연구를 DEFORM-2D를 사용하여 수행하였다. Monaghan⁽⁴⁾

† Corresponding Author, kimchul@knu.ac.kr

은 절삭법과 냉간 단조법을 조합하여 성형하는 공정을 위한 금형을 설계하였고, Biswas와 Rao⁽⁵⁾는 재료의 양을 줄이기 위해서 플래시를 최소화하는 금속유동을 해석하였다. 열전달은 고려되지 않았다.

열간 단조연구로는 단조하중과 금형마멸 감소를 위해 단조공정해석을 한 후 적층 플라스틱에 의한 유동가시화 실험을 하여 해석과정을 검증하였고,⁽⁶⁾ 단조해석 코드인 POSFORM을 이용하여 2단계 열간단조공정을 해석하고, 유동 및 온도 연계해석이 중요함을 밝히고 최적화를 시도한 연구가 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 또한 특정부품의 문제점 해결을 위해서 DEFORM-3D에 의한 자동차 샤프의 하부암(arm) 커넥터나 베어링 허브의 열간단조 FEM 해석도 시도 되었으며,^(10,11) 최근에는 원통형 하우스의 열간 단조공정 개발을 위해서 3차원 강소성 FEM 기법이 개발되었다.⁽¹²⁾ 이와 같은 연구들은 단조금형의 열변형을 고려하지 않았거나, 소재의 충진을 목적으로 하였기 때문에 예비성형 금형의 변화로 인한 최종금형의 응력과 성형하중을 고려하지 않는 경우가 많다.

기존의 열간단조 공정에 관한 연구는 예비성형성과 다단 공정에 집중되어 있으며, 본 논문의 핵심인 플랜지 최종금형 편치의 상하비율에 대한 연구는 매우 드물다. 대개 공정의 다단화는 생산비용의 증가를 초래하기 때문에 최적화를 위한 지나친 다단화는 지양하는 것이 좋다. 플랜지 성형은 소재의 흐름이 상하보다 좌우로 많이 이동하기 때문에 소재의 미충진 문제가 생긴다. 본 논문에서는 금형에 소재를 완전히 충진시키고 금형의 응력을 낮추기 위해 예비 및 최종 금형의 상하 비율을 조절하며 DEFORM을 사용하여 열간 단조 해석을 수행하였다.

2. 열간 단조 공정

단조공정 시 재료의 변형으로 인한 소성열이 발생한다. 일반적으로 냉간단조의 소성열은 소재와 금형의 온도상승을 야기하나, 상승된 온도가 유동에 미치는 영향은 매우 적다고 알려져 있다. 반면 열간단조는 소성열과 소재/금형간의 열전달에 의한 온도 변화가 소재의 유동에 직접 영향을 주게 되어 열간단조 금형과 소재간의 열전달에 대한 비등온해석(non-isothermal)이 필수적이다.

단조품의 소재는 1,200°C로 가열된 SM45C로 $\Phi 60 \times 100\text{mm}$ 를 사용하였고, 금형은 300°C의 SKD 61이며 재료특성은 Table 1에 나타나있다. 온도변화에 따른 재료상수의 변화를 고려하기 위해서 Fig. 1에 나타난 유동응력을 사용하였다. 대기온도는 20°C, 단조용 프레스 주변의 대기는 거의 정지 상태인 자유대류 상태에 가까워서 대류 열전달계수를 $2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 적용하였고,⁽¹³⁾ 프레스는 1.5 stroke/sec의 기계식 프레스(HFP-1300톤, 최대 스트로크 225mm)를 사용하였으며, 최대 성형하중은 13,000KN으로 제한하였다. 하금형은 고정되어 있고 상금형만 아래로 내려와 성형이 된다. 대변형이 일어나는 소성해석에서는 탄성영역을 무시할 수 있고 금형이 축대칭이기 때문에 소재는 강소성 모델로 가정하고 2D 축대칭 조건을 사용하였다.

실제 생산현장의 열간단조공정과 동일하게 소재는 1,200°C로 가열된 후 5초간 대기과 대류 열전달이 일어난 후 업셋팅, 예비성형, 최종성형 순으로 진행된다. 각 가열로에서 업셋팅 공정에 들어가기 전까지의 시간은 5초이며, 나머지 공정간의 이동시간은 무시하였다. 금형과 소재간의 열전도해석에 사용된 온도에 따라 변하는 열전도계수는 DEFORM-2D (SFTC)의 재료 라이브러리의 값이 사용되었다. 이에 따르면 금형의 재료인 SKD61은 온도에 관계없이 열전도계수가 $24.6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이고, SM45C는 100°C에서는 $50.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이고 1,200°C에서는 $29.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. 열전달해석의 경계조건은 상하금형이 열려 있을 때는 모든 표면에 대류열전달, 소재의 표면도 대류열전달 조건이고 금형 및 소재 내부는 전도열전달이며, 닫혀있을 때 내부는 전도열전달이고 금형 외부 표면만 대류열전달이 일어나도록 하였다.

Table 2에는 단조공정변수의 값이 표시되어 있다. 이중 열간 단조공정에서 마찰은 윤활제의 사용유무에 따라서 크게 다르며, 윤활제를 사용할 경우 0.1~0.4의 마찰계수를 가지며, 사용하지 않을 경우 0.7~1.0의 값을 갖는다. 열간 단조의 경우 공정이 진행됨에 따라 마찰계수가 증가하는데 일반적으로는 0.3의 값이 많이 사용된다.^(8,10,11) 본 연구에서도 마찰계수로 0.3을 사용하였다. 사용된 시간당 및 총 스트로크는 실제로 플랜지 제작 현장에서 사용하는 값들이다.

Table 1 Material properties⁽¹⁴⁾

Material	Yield strength	Possion's ratio
SM45C	490 MPa	0.29
SKD61	1,650 MPa	0.30

Table 2 Forging conditions

Non-isothermal variables	Values
Friction coefficient	0.3
Stroke/sec	1.5
Total stroke (mm)	225
No. of element	2,130

Table 3 Analysis cases

	예비금형각	상하비율
Case1	7°	1.50:1
Case2	7°	1.67:1
Case3	7°	2.00:1
Case4	10°	1.50:1
Case5	10°	1.67:1
Case6	10°	2.00:1
Case7	13°	1.50:1
Case8	13°	1.67:1
Case9	13°	2.00:1

3. 단조 공정 해석

3.1 성형해석

열간단조에서는 재료의 유동이 소재의 완충과예비금형 응력, 최종금형 응력, 성형 하중 등 공정 전체에 영향을 미친다. 업셋팅 공정은 초기 소재의 재질을 치밀하게 하고 단류선을 형성하는 목적을 가지는 필수 공정이다. 예비성형은 재료의 형상이 복잡할 경우 최종성형을 하기 전에 최종형상에 유사하게 성형함으로써 유동을 원활하게 하여 금형에 충전이 일어나게 한다.

본 연구에서는 예비성형금형 형상과 최종금형 펀치의 상하 비율에 따른 금속유동의 변화를 해석하여 소재의 결함을 예측하고 소재가 충전되는 조건을 찾아내었다. 플랜지의 경우 예비 상금형의 각도를 주지 않으면 완충이 일어나지 않고 버어(burr)가 발생하는데 이것을 해결하기위해 Fig.1과 Table 3에 나타나듯이 예비금형의 각도를 7°, 10°, 13°로 변경하면서 최종금형 펀치의 상하 비율(A:B)을 1.5:1, 1.67:1, 2:1로 변경하여 9가지 경우에 대해서 성형해석을 진행하였다.

1,150C°로 가열된 소재는 열팽창에 의해 $\Phi 60.84 \times 101.4\text{mm}$ 로 팽창한다. 5초간 대기과 열전달이 일어난 후 업셋팅 공정을 거쳐 높이 75mm 까지 성형되며 예비성형에서는 중앙부 두께 7.2mm, 최종성형 공정에서는 플래시 두께가 3.5mm 될 때까지 누른다. Fig. 3은 각 경우의 소재 흐름을 나타낸다. 예비금형의 각도가 7°와 10°인 경우에는 Case 2와 Case 6인 경우를 제외하고는 충전이 일어났으며, 10° 및 13°에서는 소재의 결함을 발견할 수 없었다. 하지만 예비금형의 각도가 7°인 경우 유동이 부자연스러움을 볼 수 있으며 이것은 단조품의 기계적 결함으로 이어진다. 13°인 경우에는 금형 상하비율과 관계없이 충전이

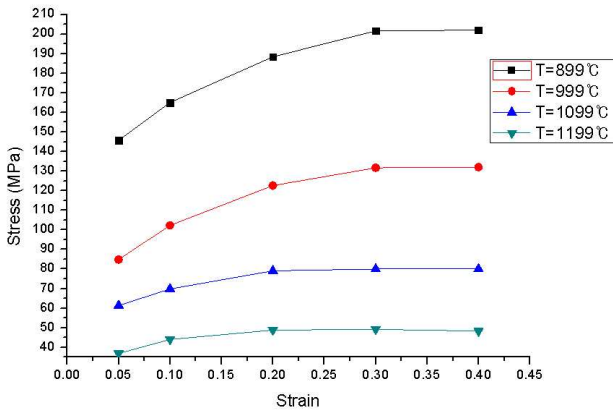


Fig. 1 Flow stresses of SM45C with temperature and strain

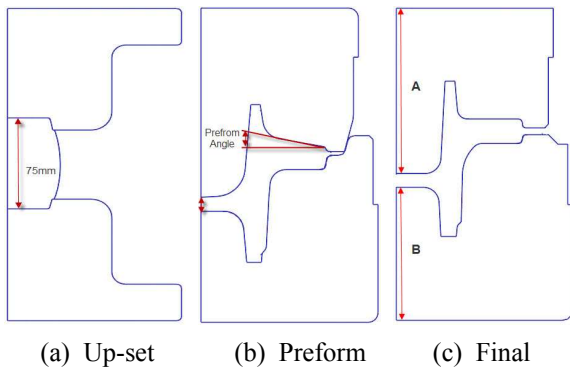


Fig. 2 Three stages of the forging process

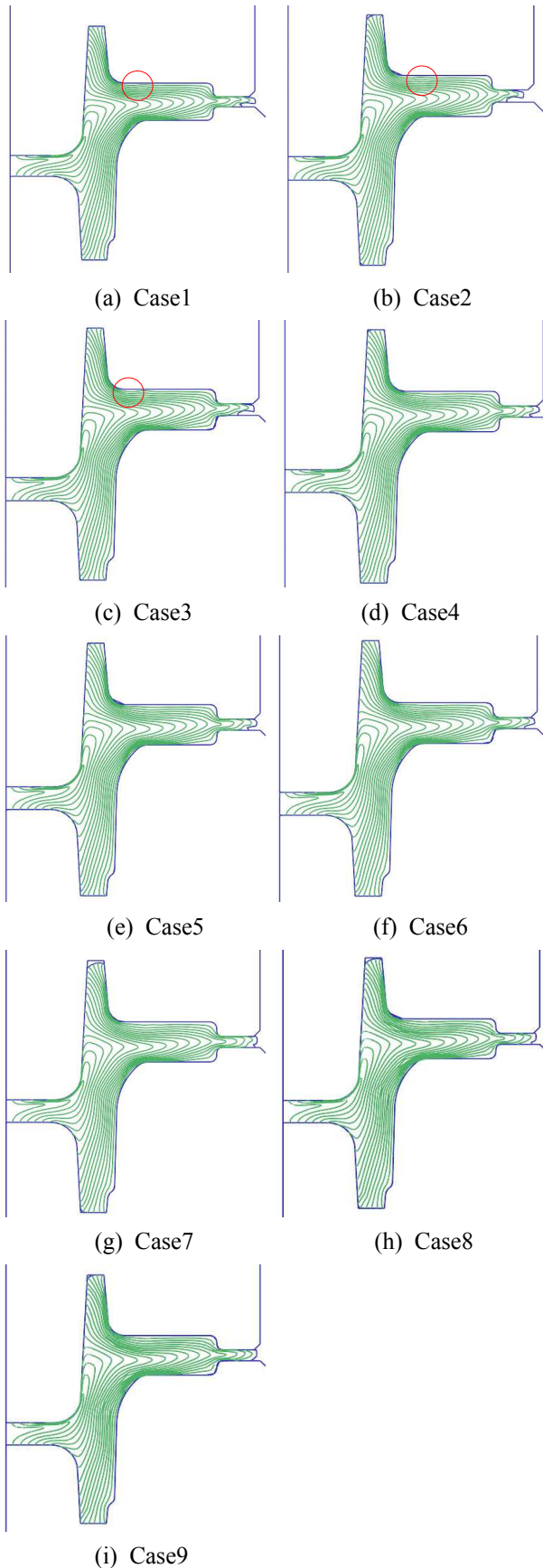


Fig. 3 Grain flow lines of each case

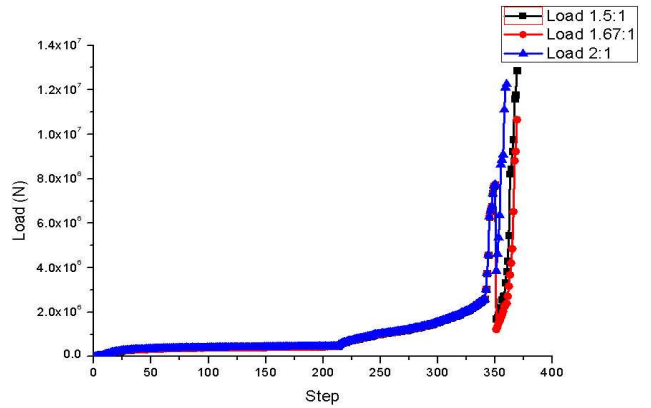


Fig. 4 Forging press forces on the preform die with a angle 7° (Cases 1, 2, and 3)

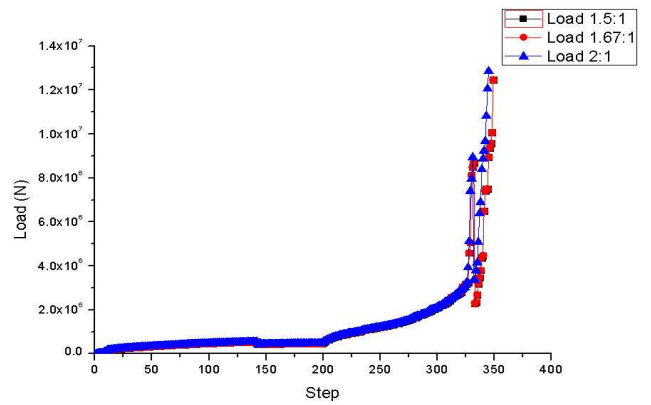


Fig. 5 Forging press forces on the preform die with a angle 10° (Cases 4, 5, and 6)

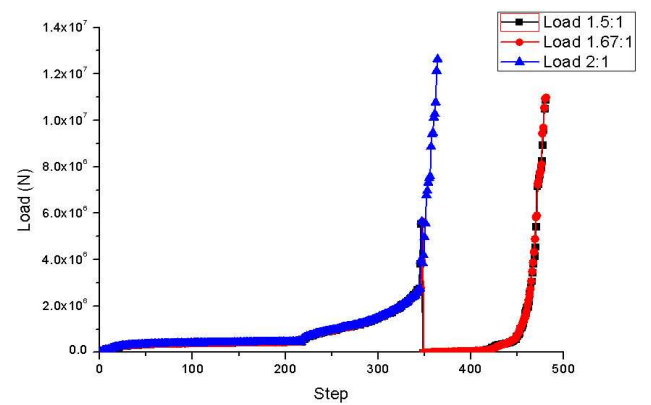


Fig. 6 Forging press forces on the preform die with a angle 13° (Cases 7, 8, and 9)

일어나지 않았으나, 10° 인 경우에는 소재 유동이 원활한 것을 확인할 수 있다.

3.2 하중해석

단조공정에서 성형하중은 프레스의 용량에 의

해서 제한되며 본 연구에서는 13,000KN으로 제한하였다. 프레스 용량이 크다면 금형의 허용 강도 내에서는 더 큰 변형을 할 수 있다. 하지만 작은 용량의 프레스로 가공할 수 있는 제품을 큰 용량의 프레스로 가공하는 것은 비효율적이며 무리한 하중으로 인해 금형이 과도한 응력을 받을 수 있기 때문에 적절한 필요하중을 구하여야 한다. 업셋팅 공정의 하중은 전체공정 중에서 작은 영역을 차지하기 때문에 생략하였다.

Figs. 4,5는 예비금형의 각도에 따른 최종금형의 상하비율에 대한 성형하중을 나타내며, Table 4는 공정별 최대 성형하중을 나타낸다. 하중의 형태는 최종금형의 상하 비율이 1.5:1인 경우와 1.67:1인 경우 유사하게 나타났으며 2:1의 비율에서는 스텝이 줄어들었다. 9가지 경우에서 예비성형, 최종성형 모두 성형하중을 만족하였으나 성형정도에 따라서 차이가 나타났다. 예비성형에서는 가장 성형이 적게 일어난 Case 7,8,9에서 작은 성형하중이 필요하였다. 특히, Fig. 6의 Case 7,8에서는 최종성형 시 다른 경우보다 작은 하중에서 성형이 시작되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 예비금형의 각도에 따라 흐름이 변하고 다양한 최종금형의 상하비율로 인해서 소재와 금형의 접촉부분이 달라져 생긴 것으로 판단된다. Table 4를 보면, 소재의 완충이 일어난 Case 1,3,4,5,6에서는 13,000KN에 가까운 최종성형하중이 필요하나 완충이 일어나지 않은 경우에는 최종 성형하중이 작음을 알 수 있다.

Table 4 Maximum load on the preform and final process

	예비성형 하중(KN)	최종성형 하중(KN)
Case1	7,750	12,900
Case2	7,750	10,700
Case3	7,750	12,300
Case4	8,690	12,500
Case5	8,690	12,700
Case6	8,690	12,900
Case7	5,580	10,900
Case8	5,580	11,000
Case9	5,580	12,600

4. 금형 해석 및 제작

4.1 예비금형 해석

소재가 최종금형에 충진이 되더라도 소재를 성형하는 금형이 과도한 응력으로 파손이 일어난다면 소재의 치수나 금형형상을 변경해야 한다. 예비금형 및 최종금형이 받는 응력이 작을수록 금형의 사용횟수는 증가하고 경제적이다. 금형의 강도해석에 필요한 하중은 성형해석 중의 소재의 반력으로부터 얻어지며, 온도 분포의 영향은 작아서 금형해석 시 고려되지 않았다.

업셋팅 공정에서는 소재의 변형정도가 작고 성형하중이 낮기 때문에 전체적인 금형의 응력분포가 700MPa 이하로 나타난다. Fig. 7을 보면 7°, 10°, 13° 각도의 예비금형의 전체적인 응력분포는 1,000MPa로 낮게 나타나지만 7°, 13°에서는 소재의 변형이 심한 하금형의 안쪽 부분에서 1,500MPa의 응력집중이 발생하였다. 예비금형 각도가 10°일 경우 국부적으로 1,300MPa의 작은 응력이

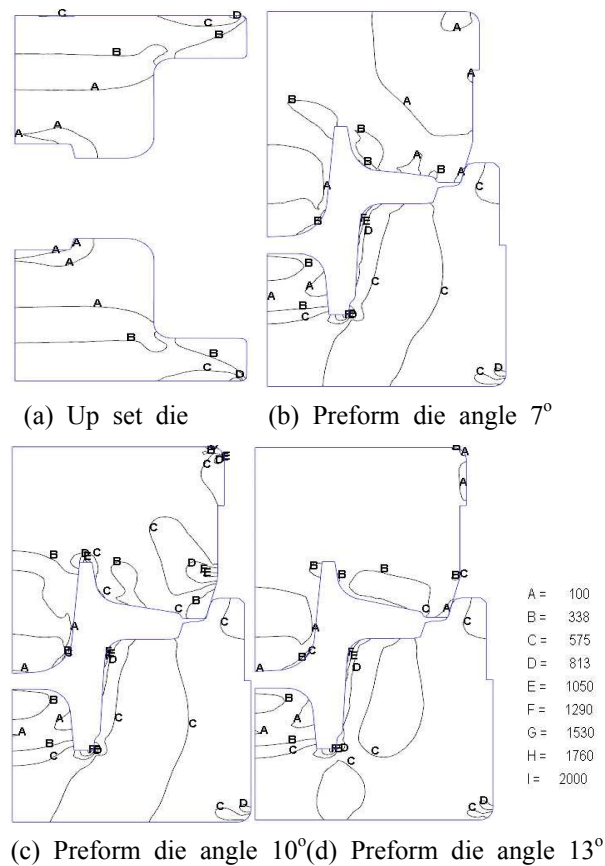


Fig. 7 Up-set and preform die stresses distribution at the preform die angles of 7°,10° and 13°

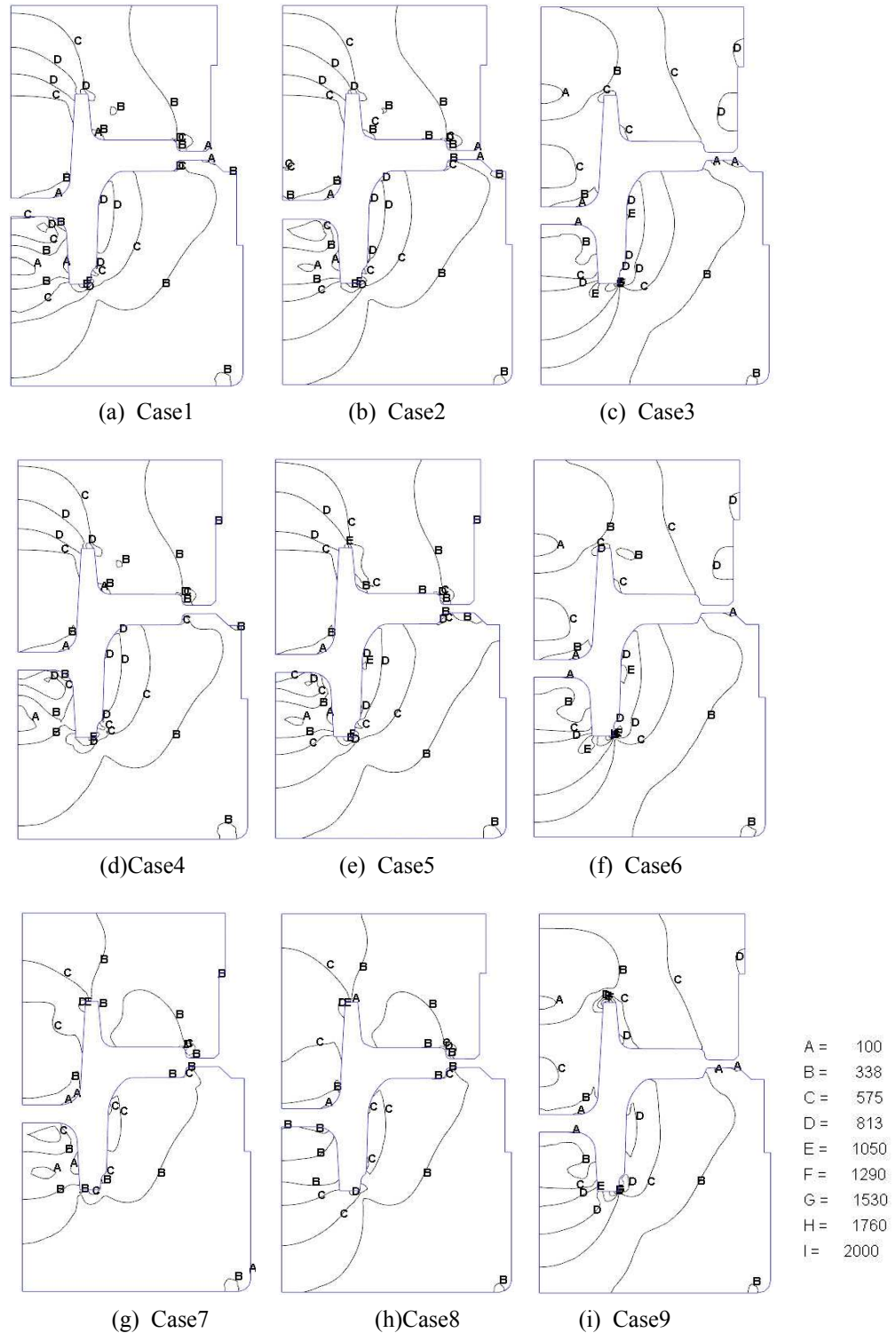


Fig. 8 Final die stress distribution at each case

발생하여 다른 금형에 비해 낮은 응력 집중을 보이며, 7°, 13°인 경우보다 상금형에 더 큰 응력(1,450MPa)이 국부적으로 분포하나 이는 항복강도 1,650MPa의 87%로 금형에 파손을 일으킬 만

한 응력은 아니다.

4.2 최종금형 해석

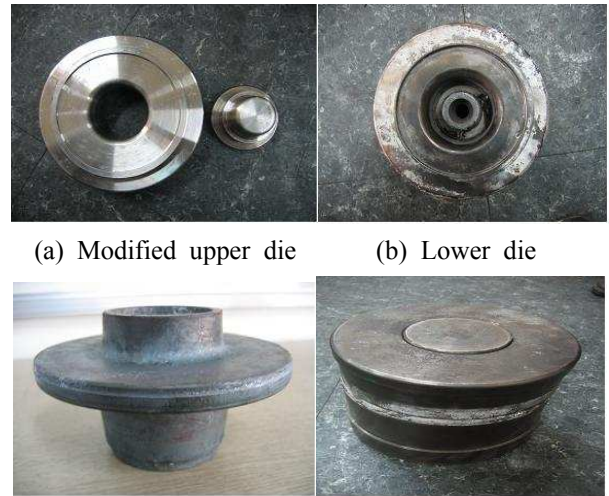
단조공정의 특성상 공정이 진행될수록 가공경

Table 5 Maximum stress in each case

	예비금형응력 (MPa)	최종금형응력 (MPa)
Case1	1580	1420
Case2	1580	1440
Case3	1580	1720
Case4	1350	1310
Case5	1350	1430
Case6	1350	1860
Case7	1480	1160
Case8	1480	1180
Case9	1480	1590

화에 의해서 큰 성형하중이 필요하게 되고 이것은 단조금형에 큰 응력을 가하게 된다. 때문에 예비금형의 형상과 최종금형의 상하 비율을 조절하여 예비금형과 최종금형이 받는 하중을 줄일 필요가 있다. 예비금형의 각도와 최종금형의 상하 비율을 고려한 최종금형의 응력해석 결과인 Fig. 8을 보면 예비금형각도와 최종금형의 상하 비율에 관계없이 전반적인 응력분포는 1,000MPa 이하로 나타나지만 금형의 안쪽 모서리 부분에서 응력집중이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 예비금형각 7°, 10°에서는 응력집중이 크게 차이 나지 않았지만 13°일 때는 최종 금형에 가해지는 응력집중이 낮게 나타났다.

Fig. 8의 Case 3,6,9(상하비율이 2:1)를 보면 상하 방향으로 소재의 밀림이 증가하면서 금형 내부에서 응력집중이 크게 일어났으며, 상하비율이 줄어들수록 소재의 상하 흐름과 좌우 흐름이 한쪽으로 치우치지 않게 되어 최종금형에 가해지는 응력집중 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다. 예비금형각이 13°인 Case 7,8,9에서는 다른 경우보다 금형 응력이 낮게 나타났으며 이것은 최종 성형 시 가해지는 하중이 낮으며 충전이 일어나지 않았기 때문이다. Table 5를 보면 예비금형의 각도가 서로 다른 Case1,4,7 간의 응력차보다 Case 1,3, Case 4,5, Case 7,9 간의 응력 차이가 더 크다. 이것은 최종 금형에 가해지는 응력은 예비금형의 각도에 의한 영향 보다는 최종금형의 상하 비율에 따라서 더 크게 좌우되는 것을 의미한다.



(a) Modified upper die (b) Lower die
(c) Flange prototype (d) Assembled upper/lower dies
Fig. 9 Redesigned die and fabricated flanges based on the case 4

4.3 금형 및 플랜지의 제작

가장 우수한 해석결과를 보인 Case 4(상하비율 1.5:1, 예비금형각 10°)에 근거하여 Fig. 9와 같이 예비 및 최종 금형을 제작하였다. 이 수정된 금형을 이용하여 플랜지를 제작한 결과, 미충진이나 결육과 같은 결함이 전혀 발생되지 않았다. 또한 플랜지 절개단면을 현미경으로 검사한 결과, 탈탄층 깊이는 0.18~0.31 mm로 양호하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 Deform-2D를 사용하여 자동차용 플랜지 열간 단조공정을 소재와 금형간의 열전달을 고려한 성형 및 금형 해석을 통하여 예비성형 금형의 형상 및 최종금형의 상하 비율이 성형과 금형에 미치는 영향을 알아보았다.

자동차용 플랜지의 열간 단조성형의 경우 예비금형의 형상보다 최종금형의 상하비율이 성형하중에 큰 영향을 미치며, 예비금형의 각도와 관계없이 최종금형의 상하비율이 1.5:1인 경우 성형하중이 가장 낮게 나타났다. 예비금형의 각도가 10°일 경우 예비 및 최종 금형의 응력집중이 작게 일어나며 7°나 13° 경우보다 충전에 유리한 흐름을 가진다. 또한 예비금형의 형상이 소재 흐름에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

상하 비율이 1.67:1과 1.5:1인 금형이 예비금형과 최종금형에서 더 낮은 응력을 보이며, 예비금형각도가 10°이며 최종금형의 상하 비율이 1.67:1

과 1.5:1인 경우 결함이 없으며, 성형하중 13,000 KN 이하에서 항복응력 이하의 금형응력을 보이며 충진이 일어난다. 1.5:1인 경우 성형하중이 12,500KN이며 최종 금형의 최대응력이 1,310MPa로 가장 낮게 나와 미 충진 및 소재의 결속 결함이 해결되어 최적의 조건을 가진다.

후 기

본 연구는 중소기업선도형기술혁신개발지원사업으로 수행되었으며, 금형 및 플랜지를 제작 지원한 (주)태광금속에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Petrov, P., Perfilov, V. and Sebnov, S., 2006, "Prevention of Lap Formation in near Net Shape Isothermal Forging Technology of Part of Irregular Shape Made of Aluminium Alloy A92618," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 218~223.
- (2) Cho, H. Y., Kim, Y. T., Kim, K. W. and Kim, W. J., 2008, "Finite Element Analysis for Multi-stage Forging Process Design of Bolt with Nonaxisymmetric Washer Cam," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 585~595.
- (3) Yeom, S. H., Nam, K. O., Hwang, D. S., Kwon, H. S. and Hong, S. I., 2006, "A Study on the Process Development of Mono Steel Forged Piston for Diesel Engine," *Trans. of KSAE*, Vol. 14, No. 3, pp. 44~50.
- (4) Monaghan, J., 2001, "A Finite Element Analysis of Cold-Forging Dies Using Two and Three Dimensional Models," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, No. 1-3, pp. 286~292.
- (5) Biswas, S. K. and Rao, K. V. J., 1985, "Flow of Metal into the Flash Gap in the Last Stages of a Plane-strain Closed-die Forging Operation," *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 319~331.
- (6) Kim, H. Y., Kim, J. J. and Kim N. S., 1993, "An Analysis of Hot Closed-die Forging to Reduce Forging Load and Die Wear," *Proc. of the KSME Spring Annual Meeting (1)*, pp.839~844.
- (7) Joun, M. S., Hwang, S. M. and Moon, H. G., 1995, "Automatic Computer Simulation of Multi-stage Hot Forging Processes Flow, Temperature and Die Analyses," *Proc. of the KSME Spring Annual Meeting (1)*, pp. 337~340.
- (8) Lee, S. R., Lee, Y. G., Park, C. H. and Yang, D. Y., 2000, "Optimal Design of Preform in Hot Forging," *Proc. of the KSME Spring Annual Meeting (A)* pp. 780~785.
- (9) Park, J. G., Park, J. H., Choi, S. G., Na, K. H. and Kim, Y. S., 2006, "Application of FE Analysis for Optimal Design of Caulking Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 257~279.
- (10) Park, J. G., Hwang, H. S., Lee, S. J., Hong, S. C., Lim, S. H., Lee, K. S. and Lee, K. J., 2003, "FE Analysis of Hot Forging Process and Microstructure Prediction for Lower Arm Connector," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 7, pp. 1243~1250.
- (11) Byun, H. S., Kim, B. M. and Ko, D. C., 2005, "A Study on Transfer Process Design on Hot Forging of Bearing Hub," *Proc. of KSPE Autumn Annual Meeting (1)*, pp. 999~1002.
- (12) Kim, Y. S., Yang, S. H., Shan, D., Choi, S. O., Lee, S. M. and You, B. S., 2006, "Three-Dimensional Rigid-Plastic FEM Simulation of Metal Forming Process," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 15, No. 3, pp. 275~279.
- (13) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th Ed., John Wiley and Sons, N.J., p. 8.
- (14) <http://www.matweb.com/>