



자동차 엔진용 Thrust Washer 생산을 위한 판형 소재의 단조 공정기술개발 및 이를 위한 유한요소해석

강봉기^a, 윤중현^a, 정주노^a, 정현환^{a*}, 이원석^b, 한수희^b, 최원만^b

Development of A Plate-type Cold Forging Manufacturing Process and Finite Element Analysis for Producing Thrust Washer of Automotive Engine

Bongki Kang^a, Joonghyun Yoon^a, Joono Cheong^a, Hyunhwan Jeong^{a*}
Wonseok Lee^b, Suhee Han^b, Wonman Choi^b

^a Department of Electro-Mechanical System Engineering, Korea University,
2511, Sejong-ro, Jochiwon-eup, Sejong 30019, Korea

^b Doowon Industry, 130, Eungam 2-gil, Yeondong-myeon, Sejong 30067, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 November 2017
Revised 29 December 2017
Accepted 8 January 2018

Keywords:

Thrust washer
Cold forging
Forging process
Forging analysis
Deformation analysis
Progress pressing

ABSTRACT

In this paper, we present a study on the development of the manufacturing process of thrust washers for an automobile. The thrust washers are manufactured using the progressive cold forging method. The proposed progressive cold forging method requires less manufacturing cost and processing time compared with the previous conventional manufacturing method, through the elimination of some cutting and grinding processes. The proposed cold forging method uses the single plate material that is used in multi-step forging process (progressive method). In order to estimate the plastic deformation of the product due to cold forging, we conduct a finite-element analysis and compare the predicted deformation with the experimental results. The effectiveness of the proposed manufacturing process is verified by comparing the simulation and experimental results. Finally, we suggest a new stereotyped design of the single plate type cold forging process, based on the data obtained by performing simulation and experiments.

1. 서론

프레스 공법은 제품의 경쟁력을 높이기 위해 제품 개발 기간 단축에 대한 요구를 만족하게 할 뿐 아니라 생산성을 향상하고 비용 절감과 등의 장점으로 제조 산업 전반에 걸쳐 다양한 분야에서 사용되었다. 프레스를 이용한 냉간 단조품의 정밀도는 금형의 수명과 함께 제품 경쟁력에 있어 중요한 부분을 차지한다. 이에 따라 정밀도 향상을 위한 냉간 단조 성형 공법 및 해석에 관한 연구가 다양하

게 이루어지고 있다. Juneja, B. L.은 냉간 성형 공정에서 재료의 변형과 금형의 압력을 결정하는 수학적 해결책을 제시하였다^[1]. 냉간 단조로 생산하는 스퍼기어의 치수 정밀도 향상을 위해 유한요소해석과 압축실험모델을 이용하였고^[2], 미세 성형품의 정밀 냉간 단조를 위한 치수 변화를 유한요소해석을 통해 분석한 연구가 진행되었으며^[3], 냉간 단조에서 요구되는 최적 하중 예측을 위해 유한요소해석 기술이 연구되었다^[4]. 그 외에도 정밀도를 높이기 위한 다양한 방법이 제시되었다^[5,6]. 이처럼 냉간 단조품의 정밀도를 높이

* Corresponding author. Tel.: +82-44-860-1448

Fax: +82-44-865-1820

E-mail address: hyunhwanjeong@korea.ac.kr (Hyunhwan Jeong).

기 위해선 치수 변화에 대한 명확한 분석이 필요하며 이를 위한 유한요소해석이 요구된다.

냉간 단조의 성형예측 및 단조 해석을 위해 유한요소해석 기법을 적용한 다양한 연구 또한 진행되었다. 정밀 냉간 단조 공정의 개발을 위하여 냉간 단조용 금형의 변형모드에 따른 탄성 변형량의 측정 및 유한요소해석과⁷⁾ 무절삭 정밀 단조 제품에 대한 분석에 활용하고자 한 냉간 단조용 금형의 탄성 변형에 관한 연구가 진행되었고⁸⁾, 유한요소해석을 사용하여 용접 파이프의 냉간 성형 공정을 개발하였다⁹⁾. 자동차 센터 힌지 성형을 위한 고강도 강판의 탄소성 유한요소해석을 이용한 블랭크 설계를 도출하였다¹⁰⁾.

또한 Chung은 유한요소해석 시뮬레이션을 통하여 판형 소재의 단조 공정을 연구하였다¹¹⁾. 이 외에도 많은 연구가 유한요소해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 이루어졌다¹²⁻¹⁵⁾.

단조 공정에서 가장 중요한 비중을 차지하는 것은 금형이다. 따라서 금형 수명에 관한 연구도 활발히 진행되었다. 냉간 단조 금형의 내구성 향상에 대한 공구 수명 예측방법 및 단조 제품의 품질 향상에 관해 연구되었고¹⁶⁻¹⁸⁾, 부피 계산을 이용한 변형된 스퍼기어의 정밀한 성형을 할 수 있는 연구가 진행되었다¹⁹⁾. 또한 작동 온도, 동적 응력 및 변형률을 고려한 금형의 수명 평가 방법이 연구되었고²⁰⁾, 고속도 공구강 중 SKH9의 경도와 변형률의 특성을 검토하여 이에 대한 상관관계를 연구도 수행되었다²¹⁾.

이와 같이 제품의 정밀도를 향상하기 위해 냉간 단조에 의한 소재 변형의 연구가 수행되었고 금형의 수명을 늘리는 연구들이 진행되었지만, 대부분의 연구가 단일 소재를 중심으로 이루어졌으며 판형 소재를 이용한 연속 공정에 관한 연구는 거의 전무한 수준이다. 따라서 본 논문에서는 steel과 aluminium이 접합된 A22E^[24-26] 평판 소재를 이용하여 Thrust washer의 생산을 위한 새로운 생산 공정을 설계하고, 단조 공정상 발생하는 판형 소재 및 금형의 변화량 해석을 기반으로 설계된 공정의 타당성을 검증할 것이다.

본 논문에서는 먼저 자동차 엔진용 Thrust washer 생산을 위해 기존 공정을 대체하는 새로운 연속 단조 공정을 제시하고, 3장에서는 제안된 연속 단조 공정으로 인한 소재의 변형량을 유한요소해석 기법을 통해 예측 및 해석하려 한다. 이를 바탕으로 4장에서는 실제 공정 실험을 통해 해석의 타당성을 검증할 것이다. 검증 결과를 바탕으로 개선된 금형을 설계하고 결과를 도출하고자 한다.

2. 공정 기술 개발 및 금형 설계

본 논문에서 제안하는 공법은 기존의 복잡한 연삭과정을 판형 소재를 이용한 프로그레시브 단조 공정으로 대체하는 것이다. Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 공정을 이용하여 생산할 자동차용 Thrust

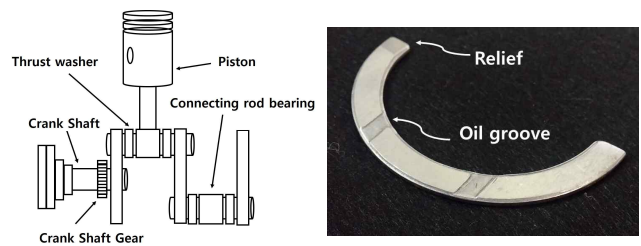
washer이다. Thrust washer는 샤프트를 따라 구성요소가 정렬되도록 회전 메커니즘에서 축 방향의 힘을 전달 및 해소하는 역할을 한다. 이때 오일홀과 릴리프가 추가 가공되어야 하며 이는 오일을 머금어 회전 윤활을 위한 것이다.

Fig. 2에서 보는 것과 같이 기존의 12단계의 공정 중 연삭 가공 공정인 외경 면취, 내경 가공, 오일홀 가공, 릴리프가공(Fig. 2 (1)(2)(3)(4) 참조)과 블랭킹, 디버링연마, 세척, 레벨작업을(Fig. 2 (5)(6)(7)(8) 참조) 판 단조 프로그레시브 가공을 통해 하나의 단일 공정으로 단순화한다.

본 논문에서 제안한 전체 공정 중 연마공정을 대체하는 단조 공정은 총 4단계의 판 단조 프로그레시브를 거치도록 설계되었다. 4단계 중 초기 3개의 단계에서는 제품의 외형을 성형하고 마치

Table 1 Standard property of Thrust washer

Forging plan	0.12mm
Grinding of Steel side	0.5±0.15
Depth of Oil groove	0.4±0.1
Depth of relief	0.5±0.1
External diameter	0.2mm
Tensile strength	153 N/mm ²
hardness	50 HV
Shearing strength	91 N/mm ²



(a) Thrust washer in engine (b) Structure of Thrust washer

Fig. 1 Thrust washer

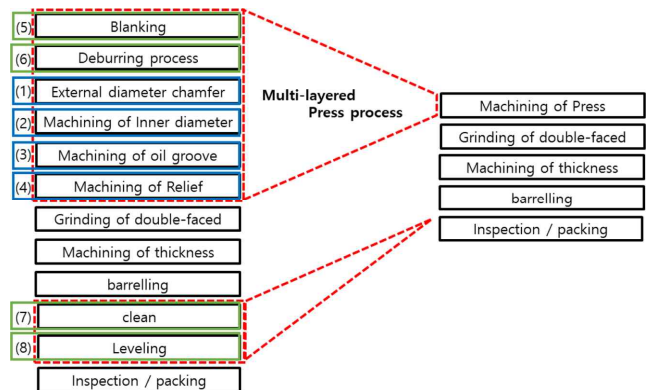


Fig. 2 Comparison between multi-layered press process and machining process

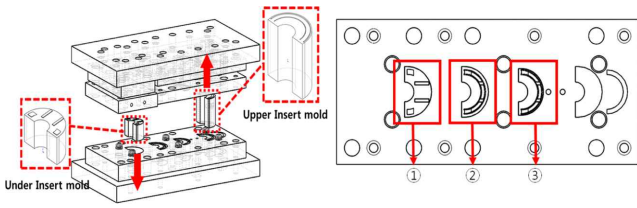


Fig. 3 Mold design for progressive forging

막 단계에서 타공을 통해 최종제품이 생산되도록 프로그레시브 단조 과정을 설계하였다. 1단계에서는 오일홀과 릴리프를 성형한다. 그리고 2단계에서는 내측과 외측의 면취 형상을 성형한다. 3단계에서는 1단계와 2단계에서 수행된 성형과정을 반복하여 최종 제품의 형상으로 성형한다. Fig. 1은 최종 성형이 완료된 Thrust washer의 외형도를 나타내며 Table 1은 Thrust washer의 표준 가공 규격을 나타낸다.

Fig. 3은 제안한 판 단조 프로그레시브 공정을 위한 금형의 설계도를 보여준다. 금형의 상형금형은 외형 면취만을 성형하도록 설계하였고 하형 금형은 오일홀과 릴리프형상을 가공하도록 설계하였으며 각 프로그레시브 단계는 성형 형상을 갖는 인서트 삽입되는 형태로 설계하였다.

3. 유한요소해석

제안한 공정에서 사용되는 판형 소재의 프로그레시브 단조 공정의 성형성을 확인하기 위하여 유한요소해석을 수행한다. 제안한 판형 소재의 프로그레시브 단조 공법 경우 성형의 단계에서 발생하는 소재의 변형이 이어지는 단조 단계의 성형에 영향을 미치게 함으로 최종 결과물의 완성도에 영향을 미친다. 따라서 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 각 단조 성형단계별 소재의 변형량 예측하고 최종 성형 결과를 예측하고 분석한다.

3.1 FEM simulation setup

수행되는 유한요소해석 시뮬레이션에서는 제안한 공정의 단조성형 단계를 그대로 모사하여, 각 단계별 결과물이 단조 공정에서 발생하는 하중에 의해 누적되는 변형량을 시뮬레이션한다. 유한요소해석은 FEM tool인 ANSYS의 explicit simulation 조건을 적용하여 수행하였으며 제안한 판 단조 프로그레시브 공정의 환경을 경계조건으로 반영하여 수행한다^{22,23}.

Fig. 4는 제안한 공정의 각 단계에 해당하는 과정을 위한 FEM 시뮬레이션의 예시를 나타낸다. 제안한 공정의 유한요소해석을 위해 설계한 금형을 각 단계별로 모델링하여 시뮬레이션에 적용하였으며, 소재 또한 공정에서 사용되는 A22E 소재의 bonding 조건을 적용하여 모델링하였다.

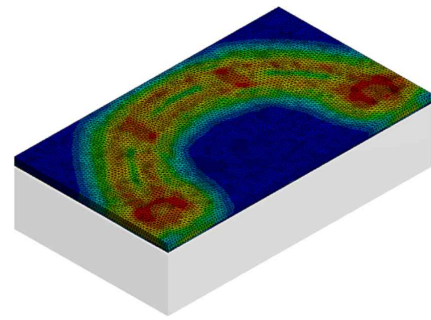


Fig. 4 FEM Simulation Example (Stress distribution of 3rd step)

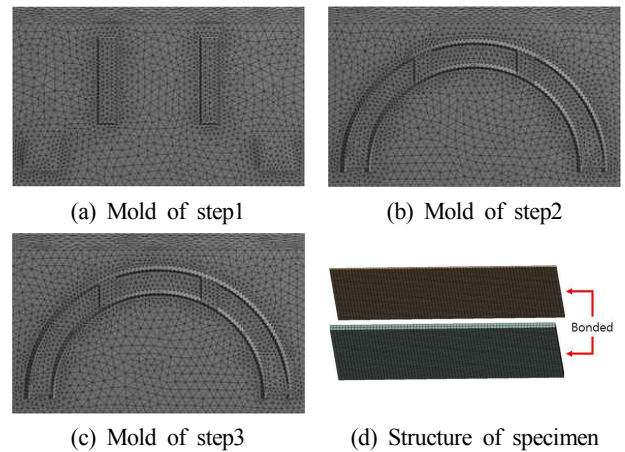


Fig. 5 Press mold and specimen (simulation model)

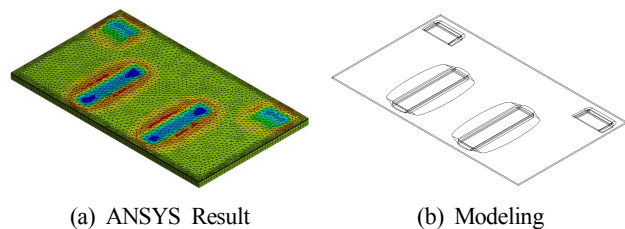


Fig. 6 Modeling method of specimen for next step processing

Fig. 5의 (a)-(c)는 각 단조 성형단계별 금형의 3차원 모델링 및 mesh 생성을 보여주며, Fig. 5의 (d)는 사용된 A22E 소재의 이중 (AL6001과 SM45C) 간 접합에 대한 3차원 모델이다. 소재의 경우 성형단계별 누적 변형량을 유한요소해석을 수행하여야 하므로, 각 단계의 해석결과를 3차원 재 모델링하여 다음 단계의 소재로 사용 한다(Fig. 6 참조).

시뮬레이션에 적용된 3차원 금형 및 소재 모델의 mesh 특성은 소재와 금형의 주요 변형량을 확인하기 위하여, Table 2과 같이 설정하였다. Table 2는 각 성형단계에 따라 mesh의 최대길이, 최소길이 그리고 mesh의 수 mesh의 node 수를 나타낸다.

제안한 공정에서 사용되는 소재는 A22E의 소재로 base metal인 steel (SM45C)과 core metal인 aluminium (AL 6061)을 이중 접합한 소재로 두께는 2.15 mm이다. 그리고 금형의 소재로는

Table 2 Mesh setup of FEM simulation

	Max length (mm)	Min length (mm)	Mesh nodes	Mesh Element
step 1	0.58684	0.092776	19,537	38,217
step 2	2.6525	0.0063723	42,023	166,905
step 3	4.3166	0.12884	45,238	166,881

Table 3 Material properties of FEM simulation

	AL6061	SM45C	SKH55
Density	2.7 g/cm ³	7.85 g/cm ³	8.14 g/cm ³
Coefficient of Expansion	23.6 μm/m°C	11.5 μm/m°C	11.4 μm/m°C
Poisson's Ratio	0.33	0.29	0.285
Tensile strength	310 MPa	625 MPa	1158 MPa
Yield strength	276 MPa	530 MPa	1034 MPa
Brinell hardness	102 HBW	179 HBW	739 HBW
Knoop hardness	120 HK	200 HK	847 HK
Rockwell hardness	60 HRB	9 HRC	64.8 HRC
Bulk modulus	67.804 GPa	163 GPa	160.4 GPa
Shear modulus	26 GPa	80 GPa	80.5 GPa

Table 4 Boundary condition of the press in FEM simulation

	Press condition
Between press and specimen	160 mm
Press length	161.25 mm
Total Process time	0.48 sec
before press time	0.19 sec
hold press time	0.08 sec
Average process velocity	848.6842 mm/sec

SKH55 소재를 사용하였다. Table 3은 유한요소해석을 위해 사용된 각 소재의 물성치 특성을 나타낸다^[22-24].

제한한 공정과 동일한 시뮬레이션 환경을 구성하기 위하여, 단조 공정에 사용되는 너클형 프레스의 단조 운동 곡선을 해석하여 모델링하였다. Fig. 7은 제한된 단조 공정 해석의 너클형 프레스의 상하 운동 곡선을 모델링한 그래프이며 Table 4는 프레스의 운동을 해석한 수치를 나타낸다.

Table 4는 금형 사이의 거리와 단조 거리, 총 시간과 소재를 압축하기 전 시간 그리고 압축하는 시간을 나타내며 소재를 누르기 전까지의 시간과 단조 거리를 이용하여 속도를 구하였다. 이러한 수치를 이용하여 시뮬레이션에 적용하였다.

Fig. 8은 유한요소 해석을 위한 경계조건을 나타낸다. 실제 단조 공정의 경계조건을 그대로 반영하여, 금형과 소재 사이에 frictional body-interaction 경계조건을 설정하고 금형과 소재가 일치되도록 displacement 및 소재의 bonding 조건을 설정하였다. 또한, 단계

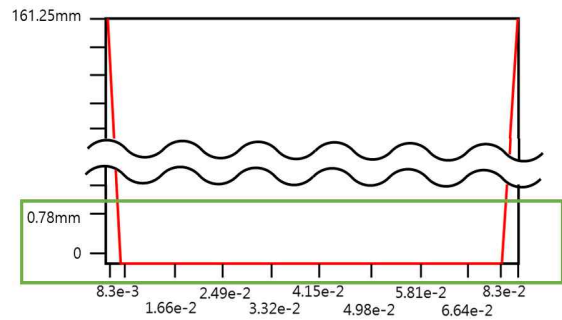


Fig. 7 Simulation time graph

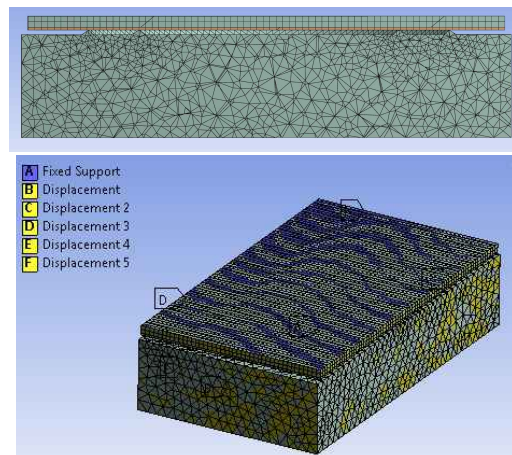


Fig. 8 Boundary condition of FEM simulation

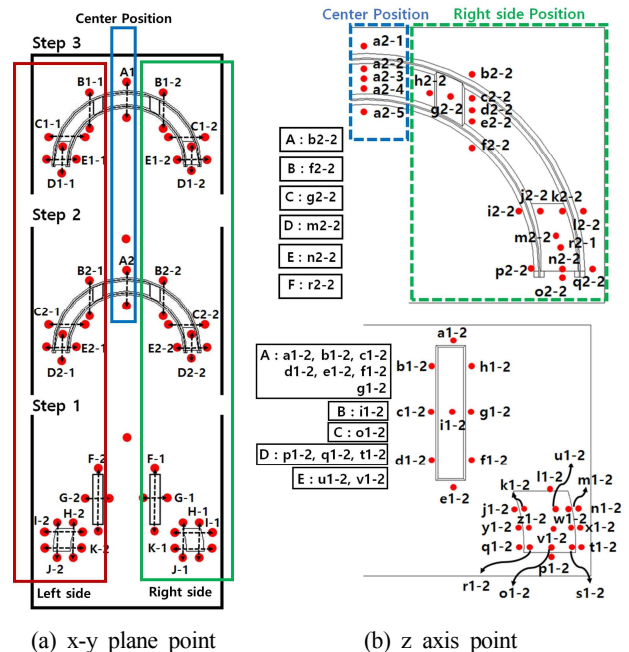


Fig. 9 Measuring point

별 소재 변형량을 확인하기 위해 소재의 평면 방향 (X-Y축)과 소재의 두께 방향 (Z축)의 두 종류로 구분하여 유한요소해석 시뮬레이션을 수행한다.

Fig. 9는 소재의 변형량을 측정하기 위한 주요 측정점을 나타낸 그림이다. Fig. 9(a)는 소재의 평면 방향 측정을 위한 측정점들이고 (b)는 소재의 두께 방향 측정을 위한 측정점이다. 금형의 형상이 좌우 대칭 형태로 설계되었으므로 좌측과 우측의 변형량이 동일함을 가정한다.

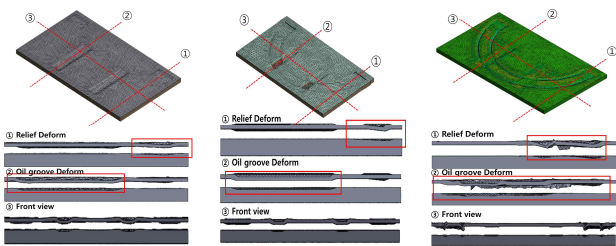
3.2 Simulation Result

Fig. 10의 (a)는 오일홈과 릴리프에 의한 소재 변형량의 시뮬레이션 결과를 보여주며, (b)와 (c)의 경우 각각 두 번째와 세 번째 성형단계의 누적된 변형량을 보여준다. 그림에서 나타나듯이 성형 단계별 주요 성형부에 대한 시뮬레이션 결과를 볼 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각 측정점에 대한 시뮬레이션 변화량을 나타낸 결과이다. Fig. 11은 x-y축의 각 성형단계별 누적 변형량에 대한 결과이고 Fig. 12의 는 결과는 z축 방향으로의 성형단계별 누적 변형량을 나타낸다. 각 그림에서 (a), (b), (c)에 해당하는 결과는 각각 1단계 2단계 3단계의 단계별 누적 결과를 나타낸다.

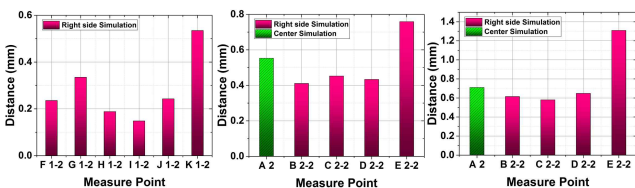
Fig. 11의 (a)의 1차 성형단계에서는 오일홈 부분인 점 F는 0.23564 mm의 변형량이 발생하고 릴리프의 넓이 방향인 점 K는 0.53484 mm의 변형량을 나타낸다. (b)의 2차 성형단계에서는 오일홈 부분이 0.41052 mm로 0.17 mm만큼 증가하였고, 릴리프 부는 0.75897 mm로 0.22413 mm만큼 증가하였다 (c)인 3차 성형 단계에서도 오일홈과 릴리프의 변화량이 각각 0.61482 mm와 1.30971 mm로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 순차적으로 성형단계에 따라 x-y축 방향의 변화량은 지속적으로 증가하며 릴리프의 점 K의 변형량이 크게 나타난다.

Fig. 12의 (a)의 박스 A는 오일홈 부위 주변으로 오일홈의 성형



(a) Result for step1 (b) Result for step2 (c) Result for step3

Fig. 10 Simulation result for each step



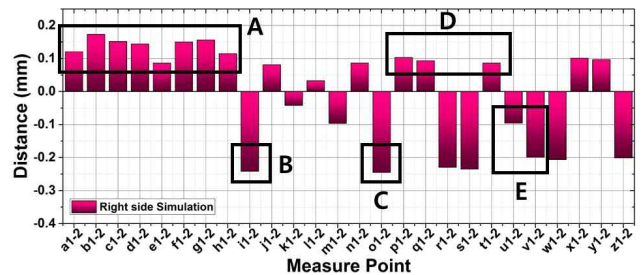
(a) step1 simulation (b) step2 simulation (c) step3 simulation

Fig. 11 Simulation result of x-y plane

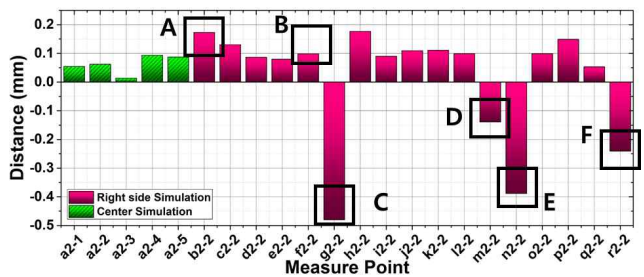
하중에 의한 반력에 의해 돌출된 변형량을 나타내며 B는 오일홈의 깊이 방향 성형의 변형량이다. 전체 면적을 동일한 깊이로 단조 압축 성형하는 오일홈과 달리 릴리프는 위치에 따른 압착 깊이의 기울기를 가진다. 따라서 릴리프 금형의 위치에 따라 소재 깊이 방향의 변형량이 다르다.

Fig. 12의 (a)에서 박스 C의 측정점 o 1-2는 릴리프의 끝단 부의 측정점이고 박스 E의 측정점 u 1-2는 시작점 그리고 v 1-2는 이 두 점 사이의 중간 부분이다. 그림(b)와 (c)의 박스 A와 B는 오일홈 주변의 돌출된 변화량이고 C는 오일홈의 깊이 방향의 변형량이다. 박스 D의 측정점 m 2-2는 릴리프의 시작점, 박스 E의 n 2-2는 릴리프의 끝단이고 박스 F의 r 2-2는 릴리프의 중간부분으로 박스 D, E, F는 각도에 따른 릴리프의 깊이 방향 변형량으로 각도에 따라 점차 증가하는 형태를 보인다. 박스C와 E는 각각의 기준치인 0.5 mm와 0.45 mm에 근사한 변형량으로 2차 성형단계의 C는 0.4803 mm이며 E는 0.3886 mm이며 3차 성형단계의 C는 0.4964 mm이고 E는 0.4375 mm을 나타낸다.

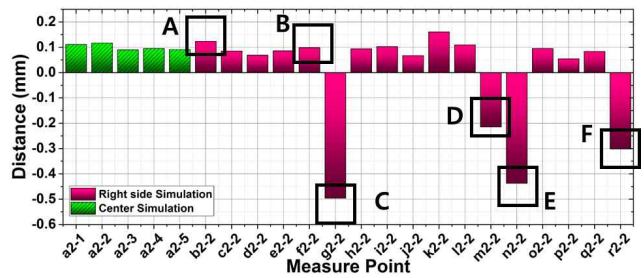
Fig. 12(b)의 그림에서 돌출된 방향의 측정점 b 2-2의 변형량이 Fig. 12(c)에서 보다 큰 값을 갖는다. 이는 두 번째 성형단계의 변



(a) z axis step1 simulation



(b) z axis step2 simulation



(c) z axis step3 simulation

Fig. 12 Simulation result of z axis

Table 5 Summary of simulation result

	step1(mm)		step2(mm)
A : a1-2	0.12049	A : b2-2	0.17307
A : b1-2	0.17323	B : f2-2	0.09877
A : c1-2	0.15147	C : g2-2	-0.48034
A : d1-2	0.1442	D : m2-2	-0.13927
A : e1-2	0.08624	E : n2-2	-0.38861
A : f1-2	0.15026	F : r2-2	-0.24059
A : g1-2	0.1559		step3(mm)
B : i1-2	-0.24172	A : b2-2	0.12313
C : o1-2	-0.24519	B : f2-2	0.09799
D : p1-2	0.10298	C : g2-2	-0.49643
D : q1-2	0.09361	D : m2-2	-0.21492
D : t1-2	0.08619	E : n2-2	-0.4375
E : u1-2	-0.09633	F : r2-2	-0.30215
E : v1-2	-0.19854	-	-

형된 소재가 세 번째 성형단계에서 두 번째와 동일한 금형 형태로 성형을 함에 따라 돌출된 부위가 평면형상의 금형에 다시 압착되고 두 번째와 세 번째 공정 사이의 간극에 의한 빈 공정(평면 압축 공정)에 기인한 결과이다. Table 5는 각 프로그래시브 단조 성형단계별 주요 측정점의 변형량을 정리한 표이다.

4. 실험

유한요소해석 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션과 동일한 실제 판 단조 프로그래시브 단조 공정의 실험을 수행한다. Fig. 13(a)은 실험에 사용된 판형 시편을 나타내며 Fig. 13(b)의 프로그래시브 단조 공정을 위한 금형을 보여준다.

본 실험에는 250톤의 너클형 프레스를 사용하였으며, 시편의 크기를 X축을 258 mm와 256 mm, Y축을 74 mm의 크기로 설정하였다.

또한 Fig. 13(a)에서 볼 수 있듯 시편은 X축 방향은 2 mm Y축 방향으로는 1 mm 간격으로 나누고 레이저 각인을 사용하여 소재 표면에 2 mm × 1 mm의 격자무늬를 각인하였다.

Fig. 14와 같이 금형을 통한 소재 성형 전에 격자점의 위치와 소재 성형 후 격자점의 위치를 3차원 측정기를 사용하여 각 실험별 소재의 변화를 측정하였다. 실험은 x-y방향과 z축 방향으로 성형단계별 변형량을 측정하였다.

4.1 측정 변화량

Fig. 15는 x-y축 방향으로 Fig. 16는 z축 방향의 변화량을 나타낸 결과이다. Fig. 15(a)부터 (c)는 x-y축 방향으로 시뮬레이션과 동일한 각 성형단계별 누적 변형량을 나타내며, (a)는 놓리는 각도

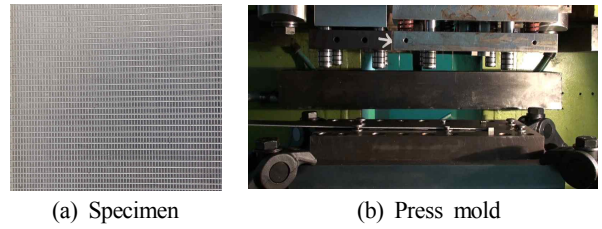


Fig. 13 Test system setup

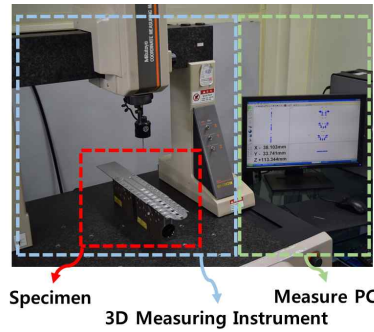


Fig. 14 Measurement system setup

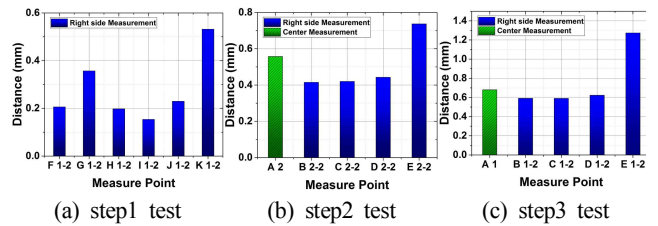


Fig. 15 Accumulate test result of x-y plane

가 큰 릴리프가 가장 큰 변화량을 나타낸다. (b)와(c)에서 내/외면 취의 둘레를 따라 점 A, B, C는 유사한 수치로 증가함을 보인다.

Fig. 16(a)의 박스 A와 B는 오일홈 부위의 변화량을 나타내며 C, D, E는 릴리프 주변의 변화량을 나타낸다. Fig. 16(b-c)의 박스 A, B 그리고 C는 오일홈의 변형량을 그리고 D와 E는 릴리프의 변형량을 나타낸다. Table 6은 주요 변형 부위의 측정점에 대한 z축방향 결과를 정리한 표이다.

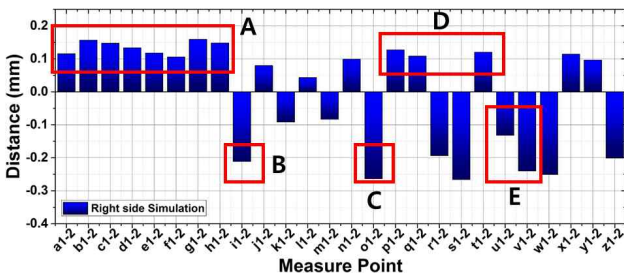
Table 6의 결과를 보면 두 번째 공정의 시뮬레이션의 돌출된 값이 세 번째 공정의 시뮬레이션에서 평평한 부위에 압착되어 돌출된 값이 작아진 것을 확인할 수 있다. 또한 공정에 따라 형상의 깊이 변화가 발생함을 확인할 수 있다. 오일홈의 경우 1차 공정의 결과 (i1-2)와 2차 공정(g2-2) 그리고 3차 공정(g2-2)의 결과를 비교할 때, 1차와 2차 공정과 비교하면 3차 공정의 경우 매우 적은 형상변형이 발생함을 확인할 수 있다.

4.2 실험과 시뮬레이션의 비교

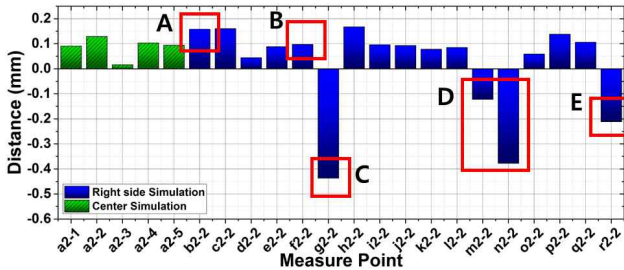
제안한 공정과 금형을 통하여 유한요소해석기법을 적용한 시뮬레이션과 실제 프레스를 이용한 실험의 두 가지 결과를 비교하고 타당성을 검증한다. Fig. 17과 18은 전체 데이터를 이용한 x-y축

Table 6 Summary of experimental result

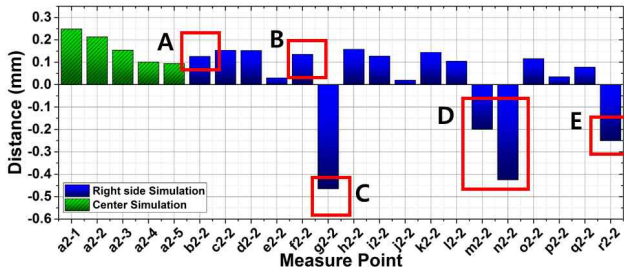
	step1 (mm)		step2 (mm)
A : a1-2	0.115	A : b2-2	0.158
A : b1-2	0.156	B : f2-2	0.097
A : c1-2	0.147	C : g2-2	-0.437
A : d1-2	0.133	D : m2-2	-0.12248
A : e1-2	0.117	E : n2-2	-0.37748
A : f1-2	0.105	F : r2-2	-0.21148
A : g1-2	0.159		step3(mm)
B : i1-2	-0.211	A : b2-2	0.12648
C : o1-2	-0.263	B : f2-2	0.13552
D : p1-2	0.127	C : g2-2	-0.465
D : q1-2	0.108	D : m2-2	-0.19948
D : t1-2	0.12	E : n2-2	-0.425
E : u1-2	-0.132	F : r2-2	-0.25048
E : v1-2	-0.24	-	-



(a) z axis step1 test



(b) z axis step2 test



(c) z axis step3 test

Fig. 16 Accumulate test result of z axis

방향과 z축 방향의 누적된 변형량을 나타낸다. Fig. 17의 그래프를 보면 전체적으로 고르게 증가하는 양상을 가지며 Fig. 18은 깊이 방향의 z축은 오일흡과 릴리프 부의 길이가 0.5 mm와 0.4 mm

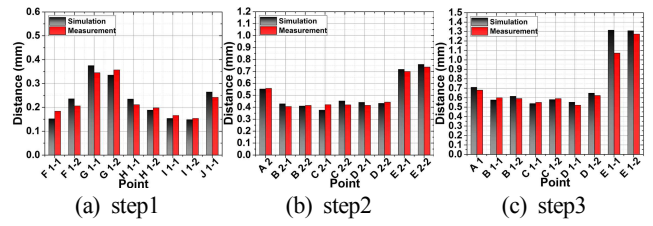
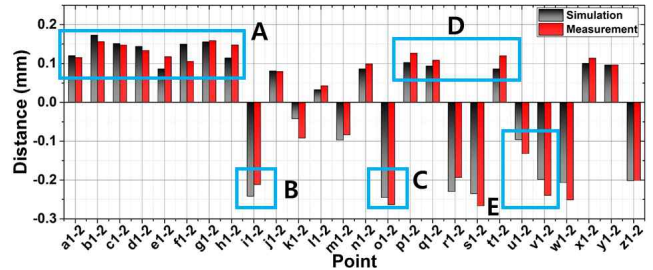
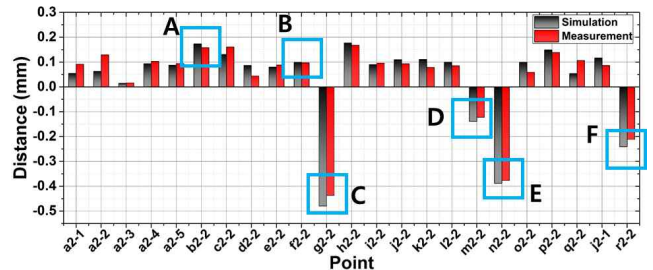


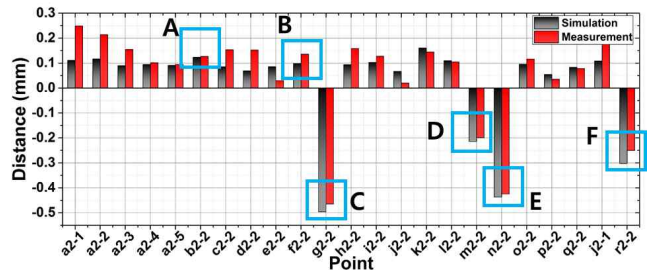
Fig. 17 Comparison result on x-y plane



(a) z axis step1



(b) z axis step2



(c) z axis step3

Fig. 18 Comparison result on z axis

내외로 변형된 것을 확인할 수 있다.

이는 오차범위를 감안 하면 실험과 시뮬레이션의 결과가 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 압착 성형부 주위의 돌출된 변형량은 성형단계에 따라 차이를 가진다. 이는 금형 설계에 있어, 각 성형단계 사이에서 소재가 형상이 없는 단조 과정을 거치면서 재압착에 의하여 변형된 결과이다.

Table 7은 소재의 두께 방향에 실험과 시뮬레이션의 중요 측정 결과에 대한 비교 값이다. Table 7의 각 점들은 각 공정에서 유사 점들을 나타내며 첫 번째 공정의 실험과 시뮬레이션의 차이 값은 평균 0.027527 mm이고 두 번째 공정에서의 차이는 0.019535 mm이며 세 번째 공정에서의 차이는 0.02532 mm로 전체적으로 약 0.02 mm의 차이 값을 가진다. 또한 두 번째 성형단계와 세 번

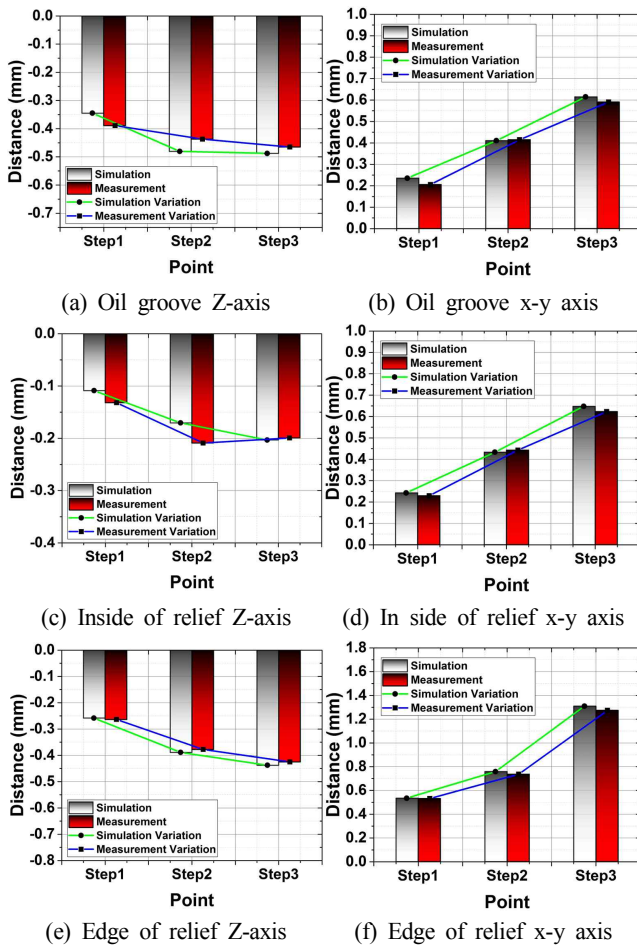


Fig. 19 Comparison result for each step

제 성형단계의 유사 부위의 성형을 보면 대체적으로 증가하는 양상을 보이며, 박스 B의 f2-2의 값은 시뮬레이션에선 비슷한 값을 가지나 실험에서는 0.03 mm 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 박스 A의 점 b2-2의 값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 변형으로 인해 소재가 밀려남에 따라 돌출된 부위가 다시 압착되어 다른 결과를 가진다.

따라서 z축은 최종 결과물의 형상 정밀도에 영향을 미치며 x-y축은 각 공정 간의 성형 위치 정밀도에 영향을 준다. Fig. 19는 z축과 x-y축의 주요점들을 비교한 그래프이다. (a)와 (b)는 오일홈 부의 비교 그래프이고 (c), (d), (e), (f)는 릴리프의 비교 그래프로 기울기를 가지는 형태로 가공되는 릴리프의 특성상 (c)와 (d)는 릴리프의 시작점 (e)와 (f)는 릴리프의 끝단을 비교한다.

Fig. 19(a), (c), (e)의 z축 방향 결과를 보면 첫 번째 성형단계 이후 두 번째 와 세 번째 성형단계에서의 변형량은 10^{-2} mm 정도로 작은 값을 가진다. 그에 비해 (b)(d)(f)의 결과는 x-y의 결과로 계속 증가하는 양상을 가져 최대 1.3 mm까지 증가한다. 따라서 기존 금형의 3차 성형단계는 제품생산에 불필요하며 공정 사이의 거리도 줄여 소재의 변형을 최소화해야 한다는 결과

Table 7 Comparison between simulation and experimentation

step 1				
	simulation [mm]	test [mm]	error [mm]	error [%]
A: a1-2	0.12049	0.115	0.00549	4.773
B: e1-2	0.08624	0.117	-0.03076	26.290
C: i1-2	-0.24172	-0.211	-0.03072	14.559
D: u1-2	-0.09633	-0.132	0.03567	27.022
E: o1-2	-0.24519	-0.263	0.01781	6.771
F: w 1-2	-0.20629	-0.251	0.04471	17.812
Average			0.027527	
step 2				
A: b2-2	0.17307	0.158	0.01507	9.537
B: f2-2	0.09877	0.097	0.00177	1.824
C: g2-2	-0.48034	-0.437	-0.04334	9.917
D: m2-2	-0.13927	-0.12248	-0.01679	13.708
E: n2-2	-0.38861	-0.37748	-0.01113	2.948
F: r2-2	-0.24059	-0.21148	-0.02911	13.764
Average			0.019535	
step 3				
A: b2-2	0.12313	0.12648	-0.00335	2.648
B: f2-2	0.09799	0.13552	-0.03753	27.693
C: g2-2	-0.49643	-0.465	-0.03143	6.759
D: m2-2	-0.21492	-0.19948	-0.01544	7.740
E: n2-2	-0.4375	-0.425	-0.0125	2.9411
F: r2-2	-0.30215	-0.25048	-0.05167	2.628
Average			0.02532	

를 가진다.

4.3 개선 금형 설계 및 해석

앞서 본 논문에서 제안한 새로운 Thrust washer 생산 공정의 단조 공정에 대한 유한요소해석기법과 실제 금형 실험을 통한 결과를 토대로 새로운 금형을 설계하고 그 성능을 유한요소해석기법을 통해 확인한다.

Fig. 20은 새로운 프로그레시브 단조 공정을 위한 금형의 설계이다. 그림에서 보는 바와 같이, 각 성형단계의 단조 형상 간격을 최소화하고, 형상가공을 2단계로 축소하였으며, 1단계 타공 공정을 삽입하였다. 타공 공정에서는 형상가공을 위한 단조 공정에서 발생하는 소재의 변형을 타공 부분으로 분산시켜 소재의 변형을 최소화하도록 고안되었다.

이렇게 새로 설계된 금형을 바탕으로, 가공성에 대한 유한요소해석 기법을 수행하였다. Fig. 21은 각 형상 성형 단조 공정별 소재의

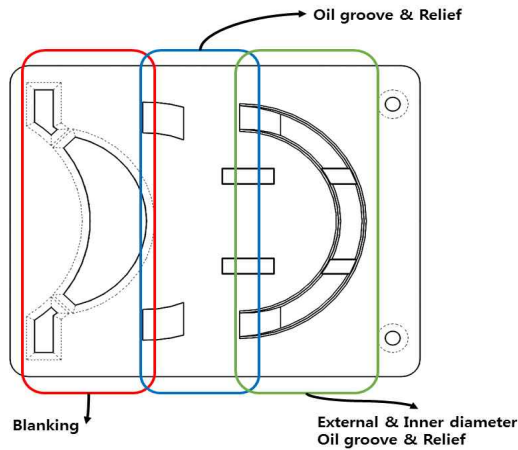


Fig. 20 Design of new mold

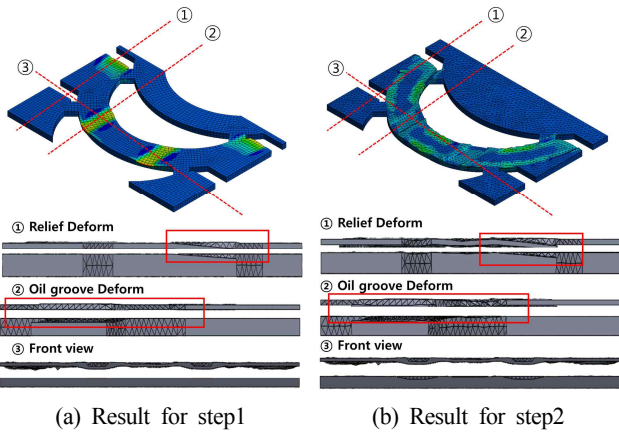
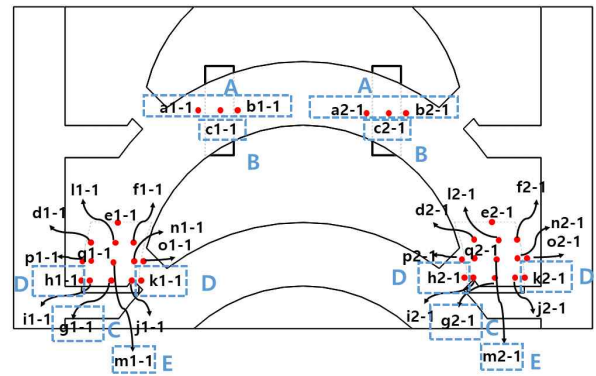


Fig. 21 Accumulate result of z plane measurement

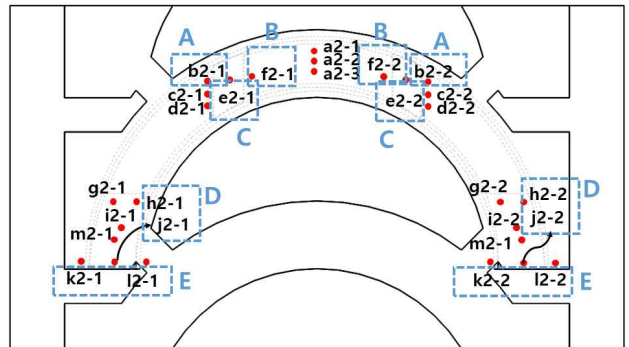
변화를 시뮬레이션한 유한요소해석 결과이다.

Fig. 21의 (a)는 첫 번째 단조 성형(오일홈, 릴리프 성형)에 의한 소재 변형량의 시뮬레이션 결과를 보여주고, (b)의 경우 두 번째 성형단계(내/외 면취 포함)에서 최종 변화량에 대한 결과를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 성형단계별 주요 성형부의 단면에 대한 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다.

Fig. 22와 Fig. 23는 유한요소해석 시뮬레이션에서 단계별 소재의 변형에 대한 측정점을 나타내고 있다. Fig. 22는 소재의 높이(z축) 방향의 측정점으로 (a)의 경우 첫 번째 성형단계의 측정점을, (b)의 경우 두 번째 성형단계의 측정점을 나타낸다. Fig. 23은 소재의 평면(x-y축) 방향의 변형량을 확인하기 위한 측정점을 보여준다. Fig. 24와 Fig. 25는 각 측정점에 대한 변형량을 나타낸 결과이다. Fig. 24는 x-y축 방향의 소재 변형량의 결과이며, 내/외면취가 없는 첫 번째 성형단계의 변화량(Fig. 24(a))에선 A점의 변화량이 미세하며, 두 번째 성형단계보다 넓게 성형되는 릴리프부의 변화량이 많은 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 24(b)의 경우 내/외면취의 영향에 따라 전체적으로 소재 변화량이 증가하며 B점 주변의 변화



(a) z axis step1



(b) z axis step2

Fig. 22 Measuring point of new mold on z axis

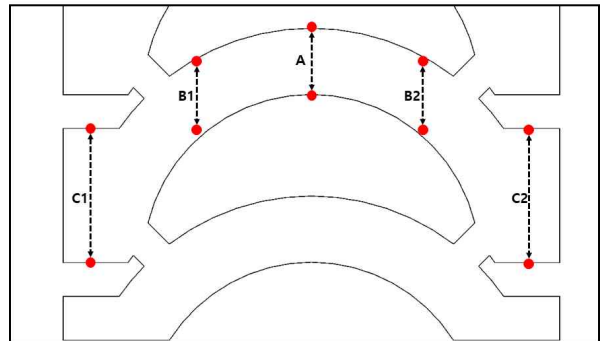


Fig. 23 Measuring point of new mold on x-y plane

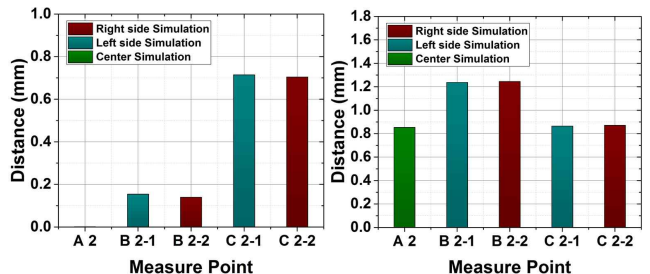
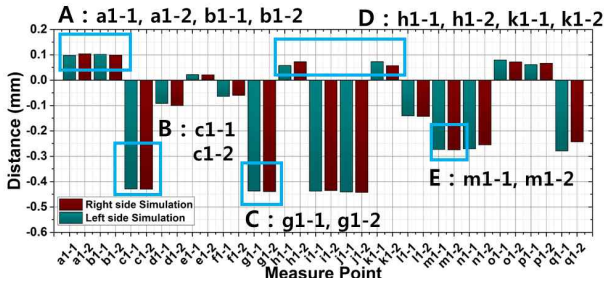


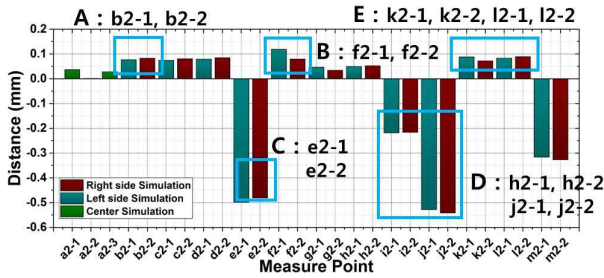
Fig. 24 Simulation result of new mold on x-y plane

가 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 25는 소재의 두께(z축) 방향의 변형량에 대한 해석결과를

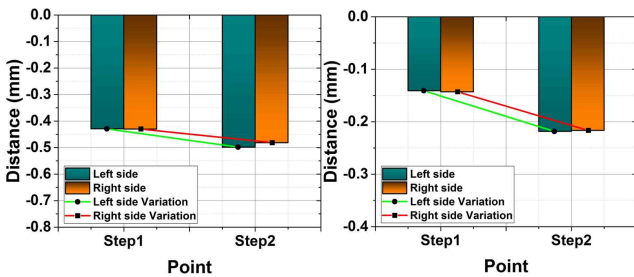


(a) z plane step1 test



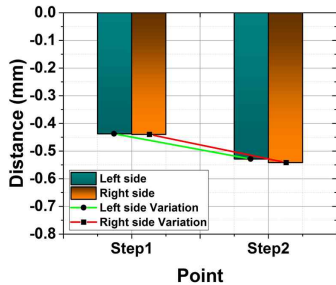
(b) z plane step2 test

Fig. 25 Simulation result on z axis



(a) Oil groove

(b) Inside of relief



(c) Edge of relief

Fig. 26 Comparison of deformation for each step on z axis

보여준다. Fig. 25(a)의 1차 성형 공정 결과에서 보이는 바와 같이 오일홈 부분의 경우 약 0.42 mm의 변형이 발생하고 릴리프 부의 경우, 약 0.43993 mm의 변형이 발생한다.

Fig. 25(a)의 2차 공정 결과에서는 오일홈 부에서 0.05 mm의 소재 변형이 더 발생하며, 릴리프 부에서 0.1018 mm의 변형이 추가로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 두 공정을 통해서 오일홈과 릴리프의 변형량이 최종 목표 기준을 만족함을 확인할 수 있다.

Table 8 Simulation result of new mold

	step1(mm)		step2(mm)
A : a1-1	0.09727	A : b2-1	0.07701
A : a1-2	0.10436	A : b2-2	0.08303
A : b1-1	0.10241	B : f2-1	0.11905
A : b1-2	0.09856	B : f2-2	0.07962
B : c1-1	-0.42919	C : e2-1	-0.49828
B : c1-2	-0.4301	C : e2-2	-0.48145
C : g1-1	-0.41748	D : h2-1	0.05249
C : g1-2	-0.43993	D : h2-2	0.05281
D : h1-1	0.05787	D : J2-1	-0.52847
D : h1-2	0.07277	D : J2-2	-0.5418
D : k1-1	0.07325	E : K2-1	0.08782
D : k1-2	0.05752	E : K2-2	0.07264
E : m1-1	-0.27332	E : l2-2	0.08347
E : m1-2	-0.2746	E : l2-2	0.07264

Fig. 26은 성형단계별 주요 측정점의 누적 변형량을 보여준다. Fig. 26(a)는 오일홈 성형부 Fig. 26(b)와 (c)는 릴리프 형상의 측정 위치에 따른 가공형상의 변형량을 보여준다. Fig. 26(b)는 릴리프형상 안쪽의 깊이 방향의 변형량 그리고 Fig. 26(c)는 릴리프 형상의 끝단 형상 변화량을 나타낸다. Table 8은 주요 변형 부위의 측정점에 대한 결과를 정리한 표이다.

5. 결론

본 논문에서는 자동차 엔진용 Thrust washer 생산을 위한 공정 기술개발과 유한요소해석을 진행하였다. 공정기술개발을 통해 기존에 12개의 공정에서 5개의 공정으로 단순화하는 공정기술을 개발하고, 이에 따른 프레스 공정의 금형을 개발하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한 실제 공정을 이용한 측정값과 유한요소해석결과의 비교를 진행하여 본 공정과 금형의 타당성을 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 최적의 공정을 위한 새로운 형태의 금형을 설계하고 유한요소해석을 통해 그 성능을 검증하였다.

향후 본 연구팀은 새로 설계한 금형 제작과 실제 실험을 통해 본 유한요소해석의 결과를 검증하고 실제 생산을 위한 환경을 구축할 것이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화 산업육성사업(R&D, R0005558)”으로 수행된 연구결과입니다.

References

- [1] Juneja, B. L., 1973, Forging of Rectangular plates, *Journal of Machine Tool Design and Research*, 13:3 141-153.
- [2] Lee, Y. S., Kwon, Y. N., Kwon, Y. C., Lee, J. H., 2005, A Study on the Improving the Dimensional Accuracy of Cold Forged Spur Gear, *Proc. The Korean Society of Mechanical Engineering* 592-597.
- [3] Lee, Y. S., Kwon, Y. N., Lee, J. H., 2004, FE Techniques for the Accurate Prediction of Part Dimension in Cold Forging, *Journal of Transactions of Materials Processing*, 13:1 3-8.
- [4] Khaleed, HMT., Samad, Z., Othman, A R., Mujeebu, MA., Arshad, M R., Ab-kadir, A R., Ab-Hussaini, M., Abdulah, A B., 2010, Finite Element Analysis and Experimental Validation of Flashless Cold Forging of Propeller Hubs and Blade of Autonomous Underwater Vehicle, *Journal of Engineer Manufacture* 224: B 1455-1467.
- [5] Abdullah, A. B., Ling, K. S., Samad, Z., 2008, The Effect of Corner Radii and Part Orientation on Stress Distribution of Cold Forging Die, *American Journal of Applied Sciences*, 5:4 296-300.
- [6] Cheng, W., Chi, C., Wang, Y., Lin, P., Liang, W., Chen, L., 2014, Volume Calculation of the Spur Gear Billet for Cold Precision With Average Circle Method. *Journal of Coal Sci Technol*, 1:4 456-462.
- [7] Lee, D. K., Lee, Y. S., Lee, J. H., 2002, Measurement and FEM Analysis of Elastic Deformation According to the Forging Stages in Cold Forging Die, *Proc. The Korean Society of Transactions of Materials Processing* 112-116.
- [8] Lee, Y. S., Lee, D. K., Lee, J. H., 2002, A Study on the Experimental and Theoretical Analysis About the Elastic Deflections of Die for Cold Forging, *Journal of Transactions of Materials Processing* 11:2 171-178.
- [9] Yu, G., Zhao, J., Wang, C., Zhai, R., Ma, R., 2017, Development of a Cold Stamping Process for Forming Single-Welded Elbows, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88:5-8 1911-1921.
- [10] Lee, Y. S., Kwon, Y. N., Kwon, Y. C., Lee, J. H., 2010, Blank Design of SPFH590 Steel Sheet for Stamping of Center Hinge of Automotive via Analysis of Transfer Forming Process With Multi-Stages, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27:5 75-84.
- [11] Chung, W. J., Ki, B. S., Lee, S. W., Ryu, M. S., Joun, M. S., 2014, Finite Element Simulation of Plate or Sheet Metal Forming Processes Using Tetrahedral MINI-Elements, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28:1 237-243.
- [12] Sheu, J. S., Yu, C. H., 2009, Preform and Forging Process Designs Based on Geometrical Features Using 2D and 3D FEM Simulations, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44:3-4 244-254.
- [13] Markov, O. E., Perig, A. V., Karkova, M. A., Zlygoriev, V. N., 2016, Development of a New Process for Forging Plates Using Intensive Plastic Deformation, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83: 9-12 2159-2174.
- [14] Han, X., Hua, L., 2011, Prediction of Contact Pressure, Slip Distance and Wear in Cold Rotary Forging Using Finite Element Methods, *Journal of Tribology International*, 44 1742-1753.
- [15] Eiasazadeh, H., Hamed, M., Halvae, A., 2010, New Parametric Study of Nugget Size in Resistance Spot Welding Process Using Finite Element Method, *Journal of Materials and Design*, 31 149-157.
- [16] Skov-Hansen, P., Bay, N., Gronbaek, J., Brondsted, P., 1999, Fatigue in Cold-Forging Dies: Tool Life Analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 95 40-48.
- [17] Fu, M. W., Lu, J., Chan, W. L., 2009, Die Fatigue Life Improvement Through the Rational Design of Metal-forming System, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 1074-1084.
- [18] Wagner, K., Volkl, R., Engel, U., 2008, Tool Life Enhancement in Cold Forging by Locally Optimized Surfaces, *Journal of Materials Processing Technology* 201 2-8.
- [19] Cheng, W. J., Chi, C. Z., PengLin, Y. W., ChenLi, W. L., 2014, Volume Calculation of the Spur Gear Billet for Cold Precision Forging With Average Circle Method, *Journal of Coal Science & Technology*, 1:4 456-462.
- [20] Akhtar, S. S., Arif, A. F. M., 2010, Fatigue Failure of Extrusion Dies: Effect of Process Parameters and Design Features on Die Life, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 10 38-49.
- [21] Kim, J. K., Park, J. H., Sung, J. H., Kim, H. S., Jeon, E. C., Park, Y. C., 2006, A Study on Characteristic of Hardness and Strain of High Speed Steel, *Conference on the Korean Society of Mechanical Engineers* 96-100.
- [22] ANSYS 17.0, 2016, ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide, ANSYS Inc..
- [23] ANSYS, 2015, Workbench User's Guide, ANSYS Inc..
- [24] KS, 2007, Carbon Steels for Machine Structural Use, KS D 3752, Korean Agency for Technology and Standards, Seoul.
- [25] KS, 2008, High Speed Tool Steels, KS D 3522, Korean Agency for Technology and Standards, Seoul.
- [26] KS, 2012, Aluminium and Aluminium Alloy Sheets and Plates, Strips and Coiled Sheets, KS D 6701, Korean Agency for Technology and Standards, Seoul.