

신경망을 이용한 정밀 베벨기어의 온간단조 예비성형체 설계

김동환*, 김병민#

Preform Design of the Bevel Gear for the Warm Forging using Artificial Neural Network

Dong Hwan Kim*, Byung Min Kim#

ABSTRACT

In this paper, the warm forging process sequence has been determined to manufacture the warm forged product for the precision bevel gear used as the differential gear unit of a commercial automobile. The preform shape of bevel gear influences the dimensional accuracy and stiffness of final product. So, the design parameters related preform shape such as aspect ratio and chamfer length having an influence the formability of forged product are analyzed. Then the optimal conditions of design parameters have been selected by artificial neural network (ANN). Finally, to verify the optimal preform shape, the experiments of the warm forging of the bevel gear have been executed. The proposed method can give more systematic and economically feasible means for designing preform shape in metal forming process.

Key Words : Preform design (예비성형체 설계), Artificial neural network (신경망), Bevel gear (베벨기어), Warm forging (온간단조), Finite volume method (유한체적법)

1. 서론

냉간단조 및 열간단조의 중간온도에서 성형되는 온간단조 방법은 열간단조에 비해 낮은 온도에서 성형되기 때문에 산화파괴의 발생이 거의 없으며, 고온 가열에 따른 치수변형이 적기 때문에 정밀도가 우수한 제품의 성형이 가능하다. 또한 냉간단조에 비해 온간단조의 온도영역에서는 소재의 변형저항이 낮으므로 성형한계를 증가시킬 수 있다. 최근의 정밀단조 기술은 고품질, 복잡한 형상 및

향상된 기계적 성질의 제품을 생산하기 위해 온간단조에 의해 10~60 μ m 이내의 고정밀의 제품을 생산하고 있다. 이러한 고정밀의 단조 제품을 생산하기 위해서는 공정의 최적화를 위해 시행착오적인 시뮬레이션 절차는 반드시 필요하고, 이로 인한 시행착오를 줄이기 위해 설계 이전에 급속성형 및 설계자의 설계목적에 미치는 공정변수의 영향을 아는 것이 필수적이다. 따라서, 신경망과 같은 설계기법과의 연계를 통해서 설계의 효율성을 향상시킬 수 있다¹⁻³.

접수일: 2002년 12월 3일; 게재승인일: 2003년 4월 11일

* 진주국제대학교 자동차공학과

교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

Email: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: (051) 051-3074

현재 자동차 수요의 감소에 따른 자동차 업계의 경쟁이 치열해지고 소비자의 욕구가 저소음, 저 가격 및 내구성 향상으로 변화하고 있다. 이러한 변화에 따라 자동차 업계에서는 자동차 부품의 원가 절감을 위한 공정 개선 및 내구성 향상을 위한 부품 생산 방법 개선에 치중하고 있다. 베벨기어는 자동차 산업에서 주로 대량 생산을 하고 있다. 일반적으로 모든 상용차의 차동 기어 장치에는 2개의 사이드 기어와 2개의 피니언 기어가 세트로 사용되는 자동차 부품으로, 사이드 기어와 피니언을 한 쌍으로 하여 변속기에서 감속된 회전력을 좌우 차축에 분배하는 역할을 한다(Fig. 1).

이러한, 베벨기어는 글리슨사(Gleason Co.)의 전용장비로 가공하여 생산되어지고 있으며, 전용장비에 의해 가공하기 위해서 원소재를 원하는 형상으로 열간단조하여 예비성형체를 만든 후 가공하기 때문에 대량 생산을 위한 가공 및 단조 설비가 많이 소요되고 생산비용이 많이 든다. 또한, 이러한 방법으로 생산된 베벨기어는 금속 조직의 흐름이 끊어져서 강도가 저하되고, 가공 커터(cutter) 흔적에 의해 표면 조도가 저하되어 구동시 소음이 발생하는 문제점이 발생한다.

기어(gear)류의 온간단조 제품은 단류선의 단속이 없어 강도를 향상시킬 수 있으며, 기계가공에 비해 생산속도의 증가 및 소재 손실을 줄일 수 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다. Meidert⁴ 등은 복합 구동 장치를 사용하여 베벨기어의 냉간단조 가능성을 조사하였다. 이후에 Westphal⁵ 등은 Meidert 등이 연구하여 개발한 수치적인 모델링 접근 방법을 냉간단조된 사이드 베벨기어의 형상으

로 검증하였다. Doege⁶ 등은 베벨기어 단조 금형을 제작하여 단조 베벨기어의 품질을 평가하였다. Meidert⁷ 등은 2차원 유한요소 수치 해석 기법과 plasticine을 사용하여 베벨기어의 냉간단조 공정 설계를 실시하였다. 2차원 유한요소 수치 해석 기법을 통해서 단조 펀치 응력을 감소하기 위하여 펀치 형상을 개선하였으며, 플라스틱인(plasticine) 실험을 실시하여 2차원 해석 결과를 검증하였다. Doege와 Nagel⁸는 베벨기어 생산 공정의 FE 분석 결과와 실험 결과를 비교하였다.

이전의 베벨기어 단조에 관한 연구에서는, 2차원 또는 3차원 유한 요소 해석 기법을 통해서 냉간 또는 온간단조 가능성만을 연구하였으며, 정밀 온간단조 공법으로 베벨기어에 대한 공정 설계에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 상용 자동차 차동기어 장치에 사용되는 정밀 베벨기어를 온간단조 공정으로 성형하기 위하여 공정순서 결정 및 베벨기어의 예비성형체의 설계변수를 파악하였다. 또한 최적화 기법을 이용하여 최적의 예비성형체를 설계하고, 베벨기어 온간단조 성형실험을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 설계조건 및 순서

차동 기어 장치에 사용되는 베벨기어는 자동차의 양쪽 바퀴의 회전수를 분배하여 자동차가 회전할 때 미끄러지지 않고 원활히 주행할 수 있도록 하는 부품으로 자동차 안전에 중요한 역할을 담당한다. 따라서, 온간단조를 통해 성형된 제품은 치형 접촉부의 강도 및 내피로성이 우수해야 하며, 제품의 경쟁력 강화를 위한 생산성 및 치수 정밀도가 높아야 한다. 본 연구에서 온간단조 공정으로 성형할 베벨기어는 직선형 베벨기어로서 압력각이 22.5°이고, 모듈이 6.5, 잇수가 11개인 피니언 기어

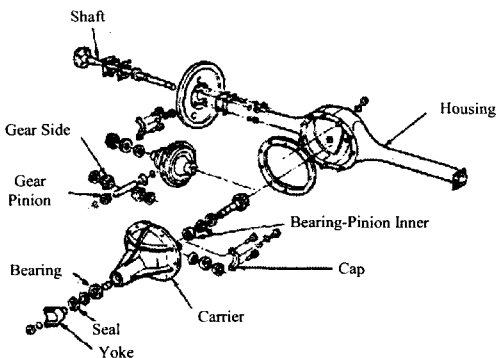


Fig. 1 Schematic of differential gear unit for rear axle driven truck and bus

Table 1 Stress strain properties of SCM 420H with respect to the temperature and strain

T	700 ℃		800 ℃		900 ℃		1000 ℃	
	C	m	C	m	C	m	C	m
0.10	23.28	0.022	19.41	0.051	15.54	0.080	11.67	0.109
0.30	30.04	0.035	24.90	0.056	19.76	0.077	14.62	0.098
0.50	30.93	0.033	25.73	0.054	20.53	0.075	15.53	0.096
0.70	29.32	0.036	24.54	0.058	19.76	0.080	14.98	0.102

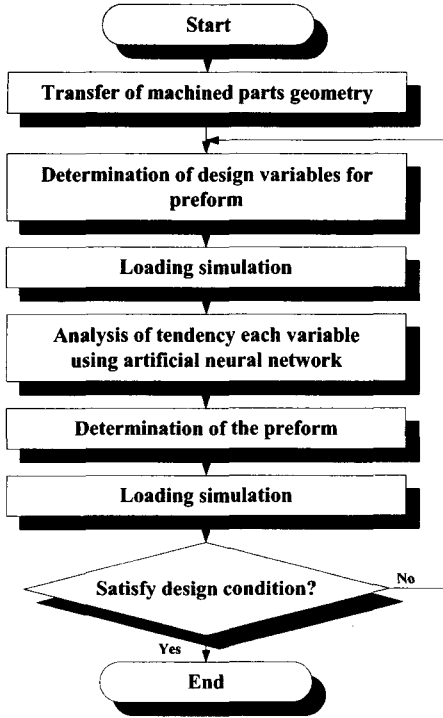


Fig. 2 The flow chart of the preform design for warm forging of bevel gear

를 대상으로 연구를 수행하였다. 소재는 크롬-몰리브덴 강인 SCM 420H를 사용하였으며, 소재의 응력-변형률 관계를 Table 1에 나타내었다.

정밀도가 요구되는 제품의 온간단조 성형을 위해서는 최종 제품의 성형성에 가장 큰 영향을 주는 예비성형체의 최적의 설계가 요구되어 지고, 설계 변수의 영향을 분석하는 것은 공정설계 과정에서 중요한 단계이다. 본 연구에서는 이러한 예비성형체에 대해 성형해석을 통한 결과를 바탕으로 신경망으로 설계변수의 영향을 분석하였다. 신경망을 이용한 온간단조 베벨기어의 최적의 예비성형체를 설계하기 위해 설계순서는 Fig. 2에 나타내었다. 먼저, 실제 자동차 차동기어 장치에 사용되는 베벨기어의 기계도면으로부터 단조공정이 가능하고, 최소한의 기계가공을 요구하는 온간단조 도면을 작성하였다. 온간단조 도면에 대한 온간단조 성형이 가능할 수 있는 공정수 및 공정순서를 결정하였다. 최종 단조 제품의 성형을 위한 예비성형체를 설계하기 위해 주요 설계변수를 파악하고, 각 설계변수에 대해 성형 해석을 수행하였으며, 수행된 결과를 바

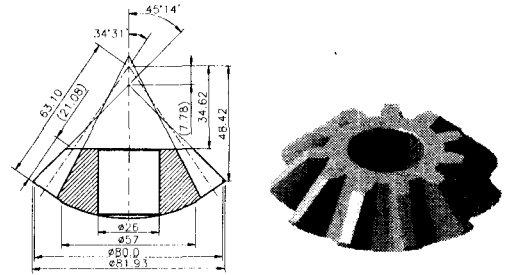


Fig. 3 The machined drawing of the bevel gear

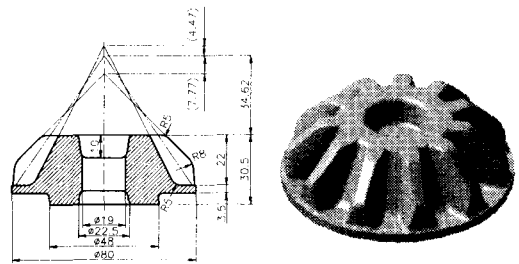


Fig. 4 The warm forged drawing of the bevel gear

탕으로 신경망을 통해 각 설계변수의 영향을 분석하고, 최적의 온간단조 제품의 성형을 위한 예비성형체를 설계하였다. 또한 설계된 조건에 대해 성형 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

3 베벨기어의 온간단조 예비성형체 설계

3.1 단조 도면의 작성 및 공정순서 결정

본 연구의 피니언 베벨기어를 3차원 측정기를 이용하여 측정된 기계도면은 Fig. 3과 같다. 온간 베벨기어의 단조도면은 절삭 가공된 사이드 베벨기어와 피니언 베벨기어 2차원 형상의 도면을 피치원을 기준으로 조립하여 조립된 형상에서 치형 접촉부를 제외한 비접촉부를 단조가 가능한 형상으로 수정하였다. 이렇게 수정된 2차원 도면을 기초로 3차원 형상의 절삭 가공 기어를 수정하여 3차원 형상의 단조 도면을 작성하였다. Fig. 4에 최종 단조 도면을 나타내었다.

베벨기어의 온간단조 공정순서는 3단계로 이루어진다. 초기소재의 절단면의 진원도 및 평행도 불량을 방지하고 치수정밀도 향상을 위한 예비업세팅 공정, 최종 제품 성형시 미충만 체적을 보완하고, 응력 집중에 의한 금형의 손상을 줄일 수 있는 예

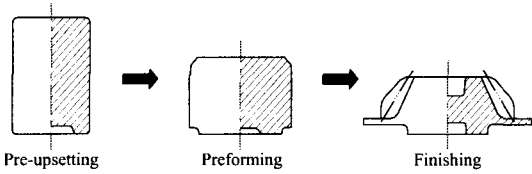


Fig. 5 Process sequence of the bevel gear for warm forging

비성형체를 성형하는 예비성형 공정과, 최종 온간 단조제품을 성형하는 최종 단조공정으로 공정을 설계하였다. Fig. 5에 베벨기어의 온간단조 공정 순서를 나타내었다.

3.2 최적의 예비성형체 설계

최종 제품의 치수 정밀도 및 강도 향상을 위해 최적의 예비성형체를 설계하는 것은 중요하다. 특히, 베벨기어 같은 동력을 치형에서 받는 제품은 치형부는 균일한 변형에 의한 강도를 향상시키는 것이 요구되어진다. 또한, 치수 정밀도 향상을 위해 단조공정에서 완전 충전 되어야 하며, 단조 금형의 수명 향상을 위해서 성형에너지를 줄일 수 있는 설계가 이루어져야 한다.

예비성형체의 설계변수는 Fig. 6과 같이 지름과 높이에 대한 형상비(aspect ratio)와 모서리부의 챔퍼(chamfer) 길이를 설계변수로 선정하였다. 각 설계변수는 체적에 대한 종속변수이기 때문에 하나의 변수를 고정하고, 다른 변수에 대한 성형해석을 수행하여 미충만 체적, 성형에너지 및 변형률 편차를 평가하여 설계조건과 비교하였다.

최종 온간단조 제품의 체적은 $108650 \times 10^5 \text{mm}^3$ 이다. 온간단조에서의 성형온도는 재료의 성형성 및 단조장비의 하중과 사용재료가 산화 스케일이 발생하지 않는 온도 범위에서 소재는 850°C 로, 금형(YXR 33)의 온도는 350°C 로 선정하였다.

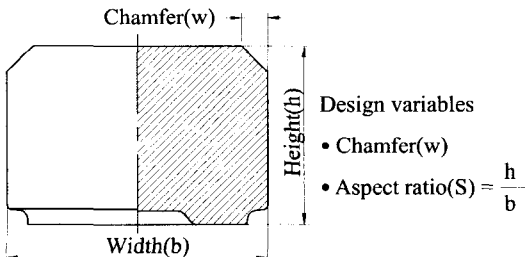


Fig. 6 Design variables for preform of bevel gear

3.2.1 형상비에 대한 해석 및 결과

먼저, 형상비에 따른 최종 베벨기어의 성형성을 비교하기 위해서 해석은 상용 유한체적 해석코드인 SUPERFORGE⁹를 사용하였다. 해석 조건은 챔퍼 길이를 0.0mm 로 고정하고, 형상비 1.0, 1.5, 2, 2.5에 대해 성형해석을 수행하였다. 각 형상비에 대한 지름과 높이는 Table 2에 나타내었다.

각 조건에 대한 해석 결과는 Table 3에 나타내었다. 형상비가 1.0과 1.5에서는 완전 충전 하는 것을 알 수 있었으며, 형상비 2일 때는 Fig. 7과 같이 미충만 하는 것을 알 수 있었으며, 계산된 미충만 체적은 253.6mm^3 이었다. 또한, 형상비 2.5일 때는 미충만 체적이 3468.9mm^3 으로 크게 증가하는 것을 알 수 있었다.

베벨기어의 온간단조 성형에너지는 형상비가 클수록 증가하는 것을 알 수 있었으며, 해석 조건에서 형상비 1.0이 가장 작은 것을 알 수 있었다. 해석 결과로부터 최적의 형상비를 결정하기 위해 신경망 학습을 통해 설계변수의 영향을 파악하였

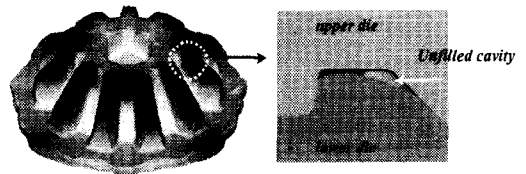


Fig. 7 Unfilled cavity when aspect ratio is 2

Table 2 Analysis conditions for each aspect ratio

	1 case	2 case	3 case	4 case
Aspect ratio(S)	1.0	1.5	2.0	2.5
Height(h:mm)	48.2	38.7	32.0	27.5
Width(b:mm)	52.0	58.1	63.9	68.8

Table 3 Analysis results for each aspect ratio

	1 case	2 case	3 case	4 case
Aspect ratio(S)	1.0	1.5	2.0	2.5
Unfilling cavity volume(mm ³)	Filling	Filling	253.6	3468.8
Forming energy(kJ)	18730.9	16746.7	14302.0	13080.6

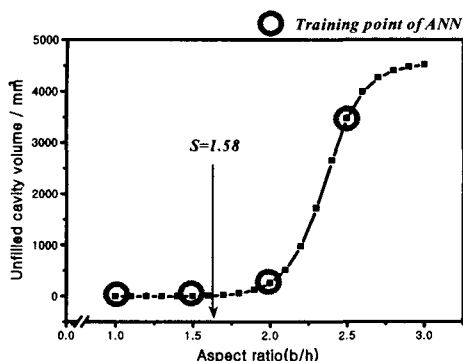


Fig. 8 Prediction of unfilled cavity volume for aspect ratio using ANN

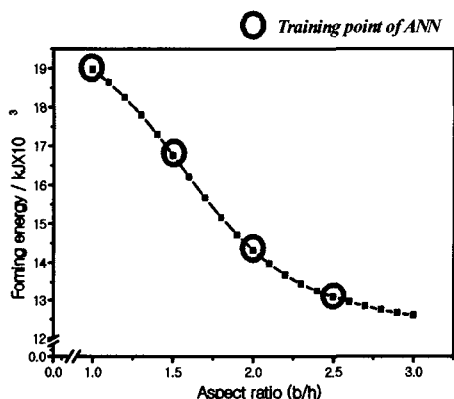


Fig. 9 Prediction of forming energy for aspect ratio using ANN

다. 신경망으로 학습한 결과 형상비 1.58보다 작은 범위에서 완전 충만이 가능한 것으로 나타났으며, 성형에너지는 형상비가 클수록 작아지는 것을 알 수 있었다. 따라서, 정밀도가 우수한 제품의 온간단조 성형을 위해서는 형상비가 1.58일 때 치수 정밀도가 우수하고, 성형 에너지가 가장 작은 것으로 나타났다. 형상비에 따른 미충만 체적에 대한 신경망으로 학습된 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 성형 에너지에 대한 학습결과는 Fig. 9에 나타내었다.

3.2.2 챔퍼 길이에 대한 해석 및 결과

베벨기어의 치형부는 동력을 전달하기 때문에 전체적인 균일한 강도가 요구되고, 이러한 강도를 위해서는 균일한 변형이 이루어져야 한다. 예비성형체의 챔퍼 길이에 따라 베벨기어의 치의 변형을

Table 4 Analysis conditions for each chamfer

	1 case	2 case	3 case	4 case
Chamfer(w:mm)	0.0	4.0	8.0	12.0
Aspect ratio(S)	1.58	1.58	1.58	1.58
Height(h:mm)	37.4	37.6	38.1	38.8
Width(b:mm)	59.1	59.4	60.1	61.3

분포에 많은 영향을 미친다. 따라서, 균일한 변형률 분포를 위해 최적의 형상비 1.58을 기준으로 챔퍼 길이를 0.0, 4.0, 8.0, 12.0mm로 변화하여 성형 해석을 수행하였다. Table 4에 챔퍼 길이에 대한 성형성 평가를 위한 성형 해석 조건을 나타내었다. 베벨기어의 치의 균일한 변형 정도를 평가하기 위해서 변형률 편차를 사용하였다. 변형률 편차(ϵ_D)는 다음과 같이 나타낸다.

$$\epsilon_D = \bar{\epsilon}_{\max} - \bar{\epsilon}_{ave} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_{\max}$ 는 베벨기어 치형부의 최대 유효변형을 나타내고, $\bar{\epsilon}_{ave}$ 는 치형부의 평균 유효변형을 나타낸다. 치형부 변형률 편차의 평가 범위를 Fig. 10에 나타내었다.

각 챔퍼 길이에 대한 해석 결과는 Table 5에 나타내었다. 해석 조건 모두 동일하게 완전 충만하는 것을 알 수 있었으나, 성형에너지는 챔퍼 길이가 길면 길수록 작게 나타났다. 특히, 변형률 편차는 챔퍼가 4.0mm일 때 가장 작은 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 최적의 챔퍼 길이를 구하기 위해 신경망을 이용하여 미 해석 챔퍼 길이에 대한 변형률 편차를 예측하였다. 예측 결과, 챔퍼가 4.5mm일 때 변형률 편차가 가장 작은 것으로 나타났으며, 성형에너지는 챔퍼가 길이가 길수록 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 치의 균일한 강도를 유지하기



Fig. 10 Effective strain part calculated for deviation strain

Table 5 Analysis results for each chamfer length

	1 case	2 case	3 case	4 case
Chamfer(w:mm)	0.0	4.0	8.0	12.0
Unfilling cavity volume(mm ³)	Filling	Filling	Filling	Filling
Forming energy(kJ)	16192.6	15347.0	15196.4	14799.7
Deviation strain	0.619	0.447	0.461	0.485

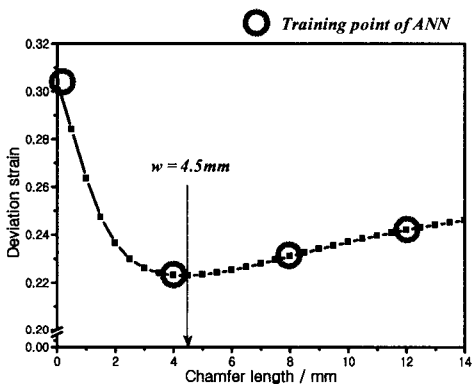


Fig. 11 Prediction of deviation strain for chamfer using ANN

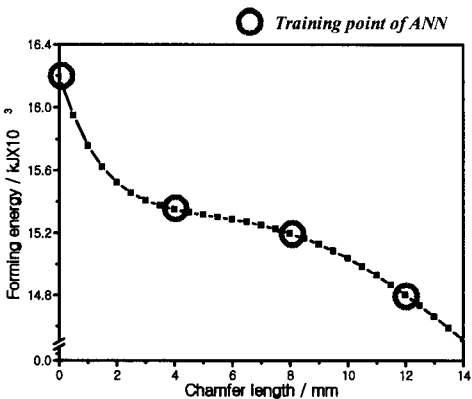


Fig. 12 Prediction of forming energy for chamber lengths using ANN

캠퍼 길이는 4.5mm를 설계하는 것이 좋음을 예측할 수 있다. 신경망을 통해 학습된 캠퍼 길이에 대한 변형률 편차 결과는 Fig. 11에 나타내었고, 성형 에너지에 대한 학습 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

4. 베벨기어 온간단조 적용 및 검증

4.1 최적 예비성형체에 대한 해석

이상의 결과로부터 온간단조 베벨기어의 최적 예비성형체는 형상비가 1.58, 캠퍼 길이는 4.5mm임을 예측하였고, 예측된 예비성형체를 성형해석을 통해 검증하였다. 해석결과 예비성형체가 다이 공동부를 완전 충전함을 확인하였고, 성형하중 및 베벨기어의 치 변형률 분포가 신경망을 통해 예측된 결과와 상당히 유사한 것으로 나타났다. 최적 예비성형체에 대한 성형해석 결과는 Table 6에 비교하였으며, 해석결과를 Fig. 13에 나타내었다.

Table 6 Comparison of analysis with prediction result

	Prediction	Analysis
Unfilling cavity volume(mm ³)	Filling	Filling
Forming energy(kJ)	15317.0	15335.0
Deviation strain	0.223	0.225

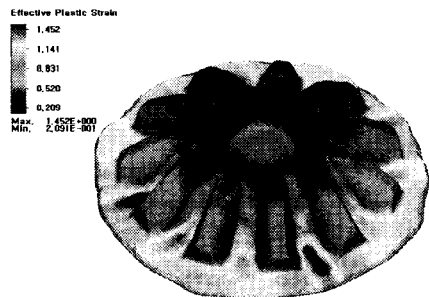
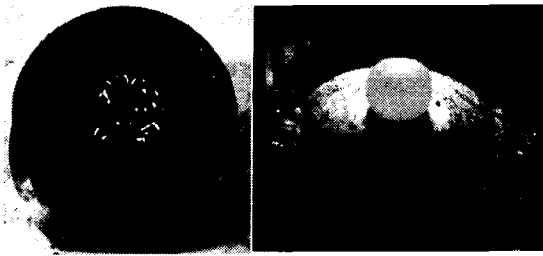


Fig. 13 Analysis results for optimal preform shape

4.2 베벨기어 성형 실험

4.2.1 베벨기어 온간단조 금형 제작

정밀 베벨기어의 온간단조 시험을 위해 금형을 제작하였다. 금형은 상부 펀치와 하부 다이로 구성되어 있으며, 베벨기어의 치형부 성형에 필요한 금형인 상부 펀치는 치형부 가공을 위하여 3D 모델링 데이터를 활용하여 방전 가공용 전극을 제작하였다. 방전 가공용 전극은 황삭 가공, 정삭 가공 및 사상 가공용 전극 3개를 순동(copper) 봉재를 사용하여 제작하였다. 방전가공은 먼저 황삭 가공용 전



(a) Upper die (b) Preform shape

Fig. 14 The upper die for warm forged bevel gear

극을 이용하여 방전한 후, 정삭 및 사상 방전 가공을 실시하였다. 방전 가공이 완료된 후 열처리를 실시하였으며, 열처리 후 특수 래핑기를 이용하여 래핑을 실시하였다. 정밀 베벨기어 시험을 위하여 제작한 상부 펀치를 Fig. 14(a)에 나타내었다.

4.2.2 실험 장치 및 조건

설계된 베벨기어 온간단조 예비성형체의 해석 결과를 검증하기 위해서 성형시험을 수행하였다. 실험 장치는 1200ton 유압프레스를 사용하였으며, 최종 공정에서 하중의 측정이 가능한 장비를 사용하였다. 또한 금형은 상하부에 열선을 설치하여 성형 중에 온도가 균일하게 유지되도록 하였다. 온간단조 성형 시험에서 윤활제는 수용성 윤활제인 Deltaforge #31을 금형에 분사하였고, 실험은 실험의 정확성을 위하여 해석조건과 동일한 조건으로 5회 반복 수행하였다¹⁰. Fig. 14(b)에 베벨기어의 온간단조로 성형된 예비성형체 나타내었으며, 최종 온간단조 베벨기어 제품을 Fig. 15에 나타내었다.



Fig. 15 The warm forged bevel gear

4.2.3 성형실험 결과

베벨기어의 온간단조 성형실험 결과, 해석 결과와 동일하게 완전 충만되었으며, 3차원 측정을 통

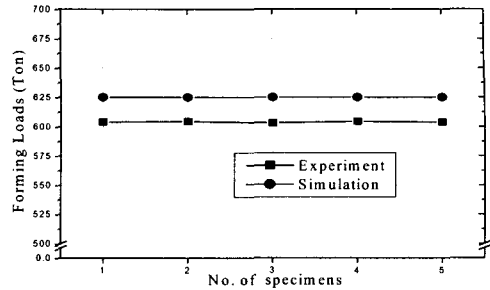


Fig. 16 Comparison experiment with simulation for forming load

해 치수정도가 KS B 1405기준으로 2급수준으로 우수한 것으로 측정되었다. 또한, 베벨기어 온간단조 성형하중은 604ton으로 해석의 624ton과 비교하여 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. Fig. 16은 베벨기어 성형하중에 대한 해석과 실험 결과를 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 기계가공으로 제조되는 차동 기어 장치에 피니언으로 사용되는 베벨기어를 온간단조 공정으로 전환하기 위해 최종 단조제품의 치수정도 및 치형부의 강도를 향상시킬 수 있는 온간단조 예비성형체를 설계하였고, 성형 해석 및 신경망 해석을 통해 설계된 예비성형체의 타당성을 검증하기 위해서 베벨기어의 온간단조 성형실험을 수행하였다. 연구 결과를 정리하면 아래와 같다.

(1) 베벨기어와 같은 복잡한 형상의 단조공정 성형은 예비성형체의 설계변수의 선정에 따라 치수정밀도 및 기어 강도에 많은 영향을 미치는 것을 온간단조 성형해석을 통해 알 수 있었다.

(2) 온간단조 베벨기어의 예비성형체는 형상비가 클수록 성형에너지가 낮고, 형상비가 1.58보다 작은 조건에서 다이 공동부를 완전 충만함을 알 수 있었고, 예비성형체의 챔퍼 길이가 길수록 성형에너지가 낮지만, 치형부 균일 강도를 유지하기 위해서는 챔퍼 길이가 4.5mm로 설계되어야 한다.

(3) 온간단조 베벨기어 성형실험으로 신경망을 이용한 예비성형체 설계의 타당성을 검증하였고, 이러한 예비성형체의 설계방법은 기존의 시행착오

적 방법에서 벗어나 체계적인 공정 및 예비성형체 설계 방향을 제시한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터의 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Dean, T. A., "Concepts and practice in precision forging," 7th Int. Congress Cold Forging, Birmingham, pp. 15-23, 1985.
2. Doege, E. and Thalemann, J., "Near-net-shape forming in sheet metal forming and forging," Annals of CIRP, Vol. 38/2, 1989.
3. Kim, D. H., Kim, D. J., Kim, H. K., Kim, B. M., Choi, J. C., "Process design of a hot forged product using the artificial neural network and the statistical desing of experiments," Journal of the KSPE, Vol. 15, No. 9, pp. 15-24, 1998.
4. Meidert, M., Knoerr, M. and Altan, T., "Investigation of physical and numerical modelling of bevel gear forming," Report No. B-91-13, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, Columbus, OH, May 1991.
5. Westphal, K., Knoerr, M., Altan, T., "Computer-aided design of cold forging punches," Report No. B-D-92-08, engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, Columbus, OH, March 1992.
6. Doege, E. and Weber, F., "Jot forging of precision parts," Journal of Mat. Proc. Tech., Vol. 35, pp. 569-481, 1992.
7. Meidert, M., Knoerr, M., Wesphal, K. and Altan, T., "Numerical and physical modelling of cold forging of bevel gears," Journal of Mat. Proc. Tech., Vol. 33, pp. 75-93, 1992
8. Doege, E. and Nagele, H., "FE simulation of the precision forging process of bevel gears," Annals of the CIRP, Vol. 43, pp. 241-244, 1994.
9. Doege, E. and Behrens, B. A., "Reduce process chains due to the precision forging of gears," Journal of Mat. Proc. Tech., Vol. 71, p. 14, 1997.
10. Jeong, D. J., Kim, D. J., Kim, B. M., "Evaluation of friction shear factor by the lubricating methods in warm forging," Journal of the KSTP, Vol. 10, No. 4, pp. 319-328, 2001.