

## 자동차용 차동 베벨기어의 최적 예비성형체 설계

김 동 환<sup>1)</sup> · 정 구 섭<sup>1)</sup> · 김 병 민<sup>\*2)</sup>

진주국제대학교 자동차공학과<sup>1)</sup> · 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소<sup>2)</sup>

### The Optimal Preform Design for Automotive Differential Bevel Gear

Donghwan Kim<sup>1)</sup> · Kuseob Chung<sup>1)</sup> · Byungmin Kim<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Automotive Engineering, Jinju International University, Jinju 660-759, Korea

<sup>2)</sup>Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Busan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 14 July 2003 / Accepted 14 November 2003)

**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. The aspect ratio and chamfer length are considered as design parameters to achieve adequate metal distribution in the finish forging operation. 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 the preform shape in metal forming process.

**Key words** : Preform design(예비성형체 설계), Artificial neural network(신경망), Bevel gear(베벨 기어), Warm forging(온간 단조), Finite volume method(유한 체적법)

### 1. 서론

최근의 정밀단조 기술은 고품질, 복잡한 형상 및 향상된 기계적 성질의 제품을 생산하기 위해 온간 단조에 의해 10~60 $\mu$ 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 금속성형 및 설계자의 설계목적에 미치는 공정변수의 영향을 아는 것이 필수적이다. 따라서 설계의 효율성을 향상시키기 위해서는 신경망과 같은 설계기법과의 연계가 필요하다.<sup>1-3)</sup>

현재 자동차 수요의 감소에 따른 자동차 업계의 경쟁이 치열해지고 소비자의 욕구가 저소음, 저가격 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. Fig. 1에 나타난 바와 같이 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 좌·우 차축에 분배 역할을 한다.

이러한, 베벨기어는 글리슨사(Gleason Co.)의 전용장비로 가공하여 생산되어지고 있으며, 전용장비에 의해 가공하기 위해서 원소재를 원하는 형상

\*To whom correspondence should be addressed.  
bmkim@pusan.ac.kr

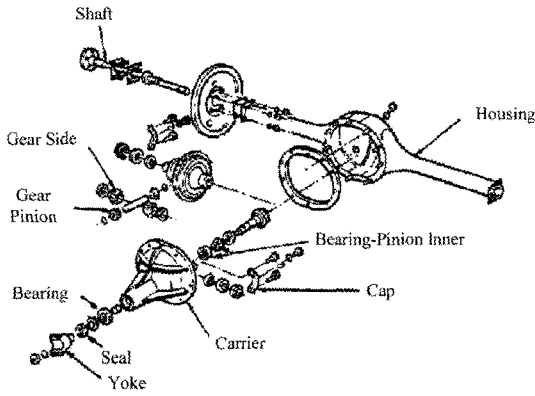


Fig. 1 Schematic of differential gear unit for rear axle driven truck and bus

으로 열간 단조하여 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.

기존의 연구를 보면, Meidert<sup>4)</sup> 등은 복합 구동 장치를 사용하여 베벨기어의 냉간 단조 가능성을 조사하였다. 이후에 Westphal<sup>5)</sup> 등은 Meidert 등이 연구하여 개발한 수치적인 모델링접근 방법을 냉간 단조된 사이드 베벨기어의 형상으로 검증하였다. Doege<sup>6)</sup> 등은 베벨기어 단조 금형을 제작하여 단조 베벨기어의 품질을 평가하였다. Meidert<sup>7)</sup> 등은 2차원 유한요소 수치 해석 기법과 세공용 찰흙(plasticine)을 사용하여 베벨기어의 냉간 단조 공정 설계를 실시하였다. 2차원 유한요소 수치 해석 기법을 통해서 단조 펀치 응력을 감소하기 위하여 펀치 형상을 개선하였으며, 세공용 찰흙 실험을 실시하여 2차원 해석 결과를 검증하였다. Doege와 Nagele<sup>8)</sup>는 베벨기어 생산 공정의 FE 분석 결과와 실험 결과를 비교하였다.

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

본 연구에서는 상용 자동차 차동기어 장치에 사용

되는 정밀 베벨기어를 온간 단조 공정으로 성형하기 위하여 공정순서 결정 및 베벨기어의 예비성형체의 설계변수를 파악하였다. 또한 최적화 기법을 이용하여 최적의 예비성형체를 설계하고, 베벨기어 온간 단조 성형 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

## 2. 설계조건

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 온간 단조를 통해 성형된 제품은 치형 접촉부의 강도 및 내피로성이 우수해야 하며, 제품의 경쟁력 강화를 위한 생산성 및 치수 정밀도가 높아야 한다. 본 연구에서 온간 단조 공정으로 성형할 베벨기어는 직선형 베벨기어로서 압력각이 22.5°이고, 모듈이 6.5, 잇수가 11개인 피니언 기어를 대상으로 연구를 수행하였다. 소재는 크롬-몰리브덴 강인 SCM 420H를 사용하였으며, 소재의 응력-변형률 관계( $\sigma = C\epsilon^m$ )를 Table 1에 나타내었다. 정밀도가 요구되는 제품의 온간 단조 성형을 위해서는 최종 제품의 성형성에 가장 큰 영향을 주는 예비성형체의 최적 설계가 요구되어 지고, 설계변수의 영향을 분석하는 것은 공정설계 과정에서 중요한 단계이다.

본 연구에서는 이러한 예비성형체에 대해 성형해석을 통한 결과를 바탕으로 신경망으로 설계변수의 영향을 분석하였다. 먼저, 실제 자동차 차동기어 장치에 사용되는 베벨기어의 기계도면으로부터 단조 공정이 가능하고, 최소한의 기계가공을 요구하는 온간 단조 도면을 작성하였다. 온간 단조 도면에 대한 온간 단조 성형이 가능할 수 있는 공정 수 및 공정순서를 결정하였다. 최종 단조 제품의 성형을 위

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

Strain \ T	700°C		800°C		900°C		1000°C	
	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

한 예비성형체를 설계하기 위해 주요 설계변수를 파악하고, 각 설계변수에 대해 성형 해석을 수행하였으며, 수행된 결과를 바탕으로 신경망을 통해 각 설계변수의 영향을 분석하고, 최적의 온간 단조 제품의 성형을 위한 예비성형체를 설계하였다. 또한 설계된 조건에 대해 성형 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

### 3. 베벨기어의 온간 단조 예비성형체 설계

본 연구의 피니언 베벨기어를 3차원 측정기를 이용하여 측정된 기계도면은 Fig. 2와 같다. 온간 베벨기어의 단조도면은 절삭 가공된 사이드 베벨기어와 피니언 베벨기어 2차원 형상의 도면을 피치원을 기준으로 조립하여 조립된 형상에서 치형 접촉부를 제외한 비 접촉부를 단조가 가능한 형상으로 수정하였다. 이렇게 수정된 2차원 도면을 기초로 3차원 형상의 절삭 가공 기어를 수정하여 3차원 형상의 단조도면을 작성하였다. Fig. 2에 최종 단조도면을 나타내었다. 베벨기어의 온간 단조 공정순서는 4단계로 이루어진다. 초기소재의 절단면의 진원도 및 평행도 불량을 방지하고 치수정밀도 향상을 위한 예비 업세팅 공정, 최종 제품 성형시 미충만 체적을 보완하고, 응력 집중에 의한 금형의 손상을 줄일 수 있

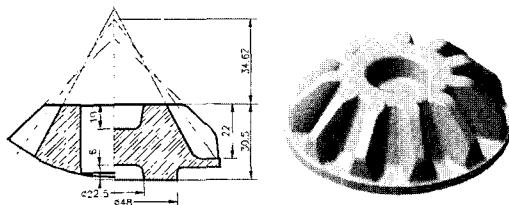


Fig. 2 Schematic of automobile differential gear unit for rear axle driven truck and bus machined (left) and forged (right) drawing for the warm forged bevel gear

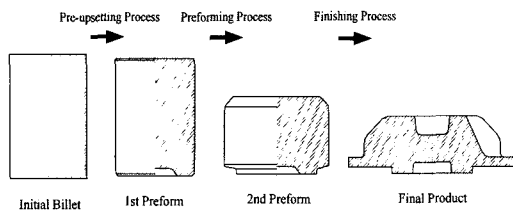


Fig. 3 Process sequence for bevel gear in warm forging process

는 예비성형공정 그리고 최종 온간 단조제품을 성형하는 최종 단조 공정으로 공정을 설계하였다. Fig. 3에 베벨기어의 온간 단조 공정 순서를 나타내었다.

#### 3.1 2<sup>nd</sup> 예비성형체 설계

Fig. 3의 2<sup>nd</sup> 예비성형체의 설계변수는 Fig. 4와 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 성형 해석을 수행하여 미충만 체적, 성형에너지 및 변형을 편차를 평가하여 설계조건과 비교하였다. 최종 온간 단조 제품 체적은  $108650 \times 10^5 \text{mm}^3$ 이다. 온간 단조에서의 성형온도는 재료의 성형성 및 단조장비의 하중과 사용재료가 산화 스케일이 발생하지 않는 온도 범위에서 소재는 850°C로, 금형(YXR 33)의 온도는 350°C로 선정하였다.

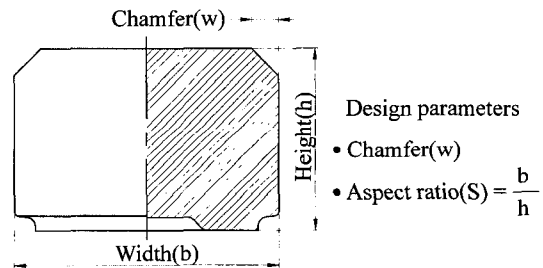


Fig. 4 Design parameters for 2nd preform shape of bevel gear

#### 3.1.1 형상비에 대한 해석 및 결과

먼저, 형상비에 따른 최종 베벨기어의 성형성을 비교하기 위해서 해석은 상용 유한체적 해석코드인 SUPERFORGE<sup>9)</sup>를 사용하였다. 해석 조건은 챔퍼 길이를 0.0mm로 고정하고, 형상비 1.0, 1.5, 2, 2.5에 대해 성형해석을 수행하였다. 형상비에 대한 해석 조건(지름과 높이) 및 해석 결과를 Table 2에 나타내었다.

형상비가 1.0과 1.5에서는 완전 충전하였으나, 형상비 2일 때는 Fig. 5와 같이 미충만 하는 것을 알 수 있었으며, 계산된 미충만 체적은 253.6mm<sup>3</sup>이었다. 또한, 형상비 2.5일 때는 미충만 체적이 3468.9mm<sup>3</sup>으로 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 형상비에 따른 미

Table 2 Analysis conditions and results for each aspect ratio in 2<sup>nd</sup> process

	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
Unfilling cavity volume(mm <sup>3</sup> )	Filling	Filling	253.6	3468.8
Forming energy(kJ)	18730.9	16746.7	14302.0	13080.6

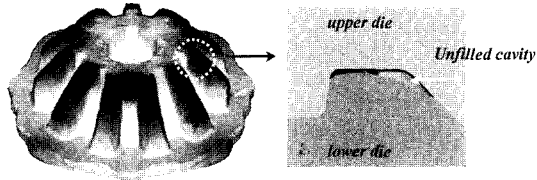


Fig. 5 Unfilled cavity when aspect ratio is 2

충만 체적에 대한 신경망으로 학습된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 형상비 1.58 이하에서 완전 충만됨을 예측하였다.

### 3.1.2 챔퍼 길에 따른 해석 및 결과

베벨기어의 치형부는 동력을 전달하기 때문에 전체적인 균일한 강도가 요구되고, 이러한 강도를 위해서는 균일한 변형이 이루어져야 한다.

예비성형체의 챔퍼 길이는 베벨기어의 치의 변형을 분포에 많은 영향을 미친다. 따라서 균일한 변형을 분포를 위해 최적의 형상비 1.58을 기준으로 챔퍼 길이를 0.0, 4.0, 8.0, 12.0mm로 변화하여 성형 해석을 수행한 후, 아래의 식 (1)을 이용하여 변형률 편차량( $\epsilon_D$ )을 평가하였다.

$$\epsilon_D = \bar{\epsilon}_{max} - \bar{\epsilon}_{ave}$$

$$\text{where, } \bar{\epsilon}_{ave} = \frac{\sum \bar{\epsilon}_i \cdot V_i}{\sum V_i} \quad (1)$$

치형부 평균 변형률( $\bar{\epsilon}_{ave}$ )은 치형부 각 요소의 변형률과 체적을 곱하고 이를 누적한 후, 치형부 체적으로 나누어 계산하였고, 최대 변형률( $\bar{\epsilon}_{max}$ )과 평균 변형률의 차로써 변형률 편차량을 계산하였다. Table 3에 챔퍼 길이에 대한 성형성 평가를 위한 성형 해석 조건을 나타내었다.

각 챔퍼 길이에 대한 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었고, Table 3에 요약하였다. 해석 조건 모두 동일하

Table 3 Analysis conditions and results for each chamfer length in 2<sup>nd</sup> process

	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
Unfilling cavity volume(mm <sup>3</sup> )	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

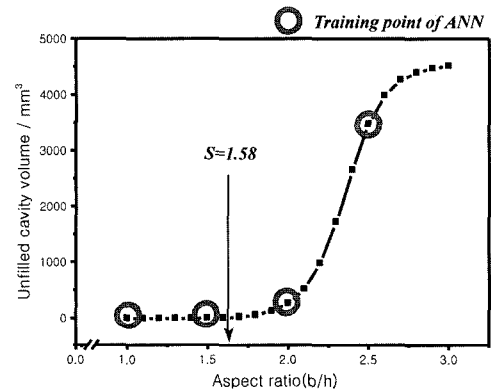


Fig. 6 Prediction of unfilled cavity volume for aspect ratio using ANN

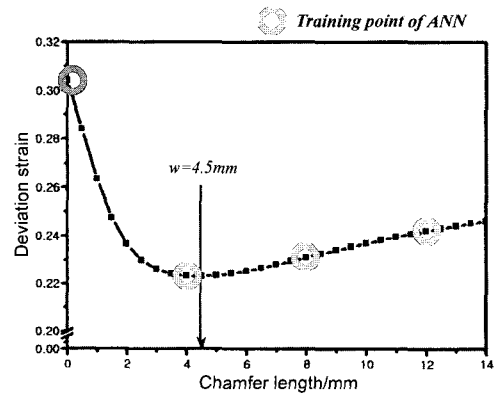


Fig. 7 Prediction of deviation strain for chamfer length using ANN (s=1.58)

게 완전 충만하는 것을 알 수 있었으나, 성형에너지는 챔퍼 길이가 길수록 작게 나타났다. 특히, 변형률 편차는 챔퍼가 4.0mm일 때 가장 작은 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 신경망을 이용한 최적의 챔퍼 길이는 챔퍼가 4.5mm일 때 변형률 편차가 가

장 적고, 성형에너지는 챔퍼의 길이가 길수록 감소함을 알 수 있었으며, 치의 균일한 강도를 유지하기 위한 챔퍼 길이는 4.5mm로 설계하는 것이 좋음을 예측할 수 있었다.

### 3.2 1<sup>st</sup> 예비성형체 설계

동일한 방법으로 Fig. 3의 2<sup>nd</sup> 예비성형체 형상 (aspect ratio : 1.58, chamfer length : 4.5mm)을 얻기 위한 1<sup>st</sup> 예비성형체 설계를 수행하였다. Fig. 8에는 1<sup>st</sup> 예비성형체 설계를 위한 설계변수를 나타내었고, 설계변수 조건 및 결과를 Table 4에 나타내었다. Fig. 9에 1<sup>st</sup> 예비성형 후 형상비에 따른 변형률 분포를 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이, 성형가능 범위 내에서 형상비가 클수록 내·외부간의 변형률 편차가 적고, Table 4의 해석 결과로부터, 형상비가 클수록 성형 에너지가 최소화됨을 알 수 있었다.

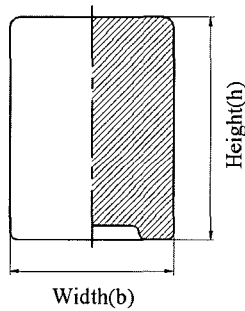


Fig. 8 Design parameters for 1<sup>st</sup> preform shape of bevel gear

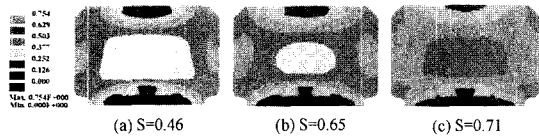


Fig. 9 Effective strain distribution for 1<sup>st</sup> process

Table 4 Analysis conditions and results for aspect ratio in 1<sup>st</sup> process

	1 case	2 case	3 case
Aspect ratio(S)	0.46	0.65	0.71
Height(h:mm)	40.0	45	46.5
Width(b:mm)	87.6	69.2	65.1
Forming energy(kJ)	18597.7	13747.6	11300.3
Deviation strain	0.251	0.203	0.171

## 4. 해석 결과 및 고찰

### 4.1 최적 예비성형체 해석 및 검증

온간 단조 베벨기어의 최적 예비성형체는 1<sup>st</sup> 공정의 형상비를 0.71 그리고 2<sup>nd</sup> 공정의 형상비가 1.58, 챔퍼 길이는 4.5mm 임을 예측하였고, 예측된 조건으로 해석한 결과, Fig. 10에 나타낸 바와 같이 예비성형체가 다이 공동부를 완전 충전하고 성형하중 및 베벨기어의 치 변형률 분포가 신경망을 통해 예측된 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

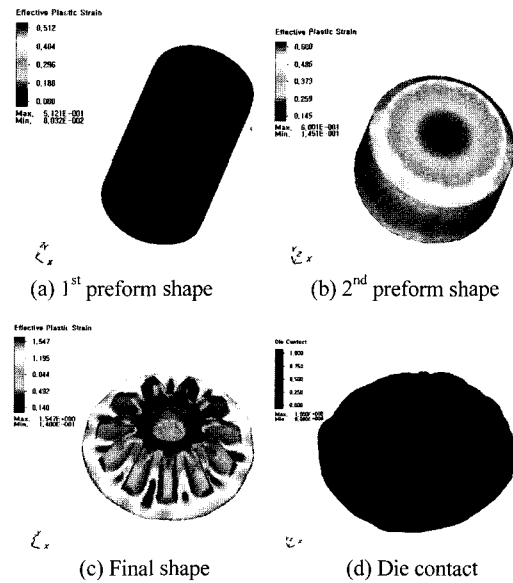
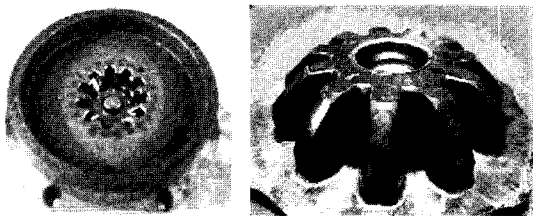


Fig. 10 Verification and analysis results for optimal preform design of bevel gear

### 4.2 최적 예비성형체 실험 및 검증

정밀 베벨기어의 온간 단조 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 전극을 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. 11(a)에 나타내었다. 설계된 베벨기어 온간 단조 예비성형체의 해석결과를 검증하기 위해서 성형시험을 수행하였다. 실험 장치는 1200 ton 유압프레스를 사용하였으며, 최종 공정에서 하중의 측정이 가능한 장비를 사용하였다. 또한 금형은 상하부에 열선을 설치하여 성형중에 온도가 균일하게 유지되도록 하였다. 온간 단조 성형 시험에서 윤활제는 수용성 윤활제인 Deltaforge #31을 금형에 분사하였고, 실험의 정확성을 위하여 해석조건과 동일한 조건으로 5회 반복 수행하였다.<sup>10)</sup> 최종 온간 단조 베벨기어 제품을 Fig. 11(b)에 나타내었다.



(a) The upper punch (b) The warm forged bevel gear  
Fig. 11 The experimental results using a select condition for warm forged bevel gear

### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 기계가공으로 제조되는 자동차용 차동 기어 장치에 피니언으로 사용되는 베벨기어를 온간 단조 공정으로 전환하기 위해 최종 단조제품의 치수정도 및 치형부의 강도를 향상시킬 수 있는 온간 단조 예비성형체를 설계하였고, 성형 해석 및 신경망 해석을 통해 설계된 예비성형체의 타당성을 검증하기 위해서 베벨기어의 온간 단조 성형 실험을 수행하였다.

- 1) 베벨기어와 같은 복잡한 형상의 단조공정 성형은 예비성형체의 설계변수 선정에 따라 치수정도 및 기어 강도에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, 신경망 해석을 통하여 첫 번째 예비성형체의 형상비를 0.71 그리고 두 번째 예비성형체 형상비를 1.58, 챔퍼 길이를 4.5mm로 하는 것이 다이 공동부를 완전히 채우면서 치형 강도에 유리함을 예측하였다.
- 2) 온간 단조 베벨기어 성형 실험으로 신경망을 이

용한 예비성형체 설계의 타당성을 검증하였고, 이러한 예비성형체의 설계방법은 기존의 시행착오적 방법에서 벗어나 체계적인 공정 및 예비성형체 설계 방향을 제시한 것으로 사료된다.

### References

- 1) T. A. Dean, "Concepts and Practice in Precision Forging," 7th Int. Congress Cold Forging, Birmingham, pp.15-23, 1985.
- 2) E. Doege, J. Thalemann, "Near-net-shape Forming in Sheet Metal Forming and Forging," Annals of CIRP, Vol.38/2, 1989.
- 3) D. H. Kim, D. J. Kim, H. K. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, "Process Design of a Hot Forged Product using the Artificial Neural Network and the Statistical Design of Experiments," KSPE, Vol.15, No.9, pp.15-24, 1998.
- 4) M. Meidert, M. Knoerr, T. Altan, "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) K. Westphal, M. Knoerr, T. Altan, "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) E. Doege, F. Weber, "Jot Forging of Precision Parts," J. of Mat. Proc. Tech., Vol.35, pp.569-481, 1992.
- 7) M. Meidert, M. Knoerr, K. Westphal, T. Altan, "Numerical and Physical Modelling of Cold Forging of Bevel Gears," J. of Mat. Proc. Tech., Vol.33, pp.75-93, 1992.
- 8) E. Doege, H. Nagele, "FE Simulation of the Precision Forging Process of Bevel Gears," Annals of the CIRP, Vol.43, pp.241-244, 1994.
- 9) E. Doege, B. A. Behrens, "Reduce Process Chains Due to the Precision Forging of Gears," J. Mat. Proc. Tech., Vol.71, p.14, 1997.
- 10) D. J. Jeong, D. J. Kim, B. M. Kim, "Evaluation of Friction Shear Factor by the Lubricating Methods in Warm Forging," KSTP, Vol.10, No.4, p.319. 2001.