

2단계공정을 이용한 헬리컬기어 압출에 관한 연구

정성윤*, 박준홍**, 김창호***, 장영준****, 김 철#

A Study on the Extrusion Using Two-Step Processes for Manufacturing Helical Gear

Sung Yuen Jung*, Joon Hong Park**, Chang Ho Kim***, Young June Chang**** and Chul Kim#

ABSTRACT

In this study, focusing on reducing a load in forming helical gears, the extrusion using two-step processes for manufacturing helical gear is proposed. The process is composed of the extrusion step in which spur gear to be used as a preform in next step is formed, and the torsion step in which the preform of spur gear is formed to helical gear. Upper-bound theory for the two-step process is applied and compared with the results of experiment. The result of upper-bound solution has a good agreement with that of the experiment and the FE analysis. The newly proposed method can be used as an advanced forming technique to remarkably reduce a forming load, to prolong a tool life, and to replace the conventional forming process of helical gears. Results obtained from the extrusion using two-step processes enable the designer and manufacturer of helical gear to be more efficient in this field.

Key Words : Helical gear (헬리컬 기어), Extrusion (압출), Spur gear (스퍼어 기어), Upper-bound analysis (상계해석)

기호설명

A_{extr} : 스퍼어 기어의 축직각 단면적
 C : 클리어런스(스퍼어 기어와 헬리컬 기어 금형 간의 틈새) (mm)
 E_e : 방전갭(mm)
 E_l : 래핑여유량(mm)
 E_r : 탄성 복원량(mm)
 E_{si} : i 번째 속도 불연속변에서의 에너지 소비율 (kgf · mm/sec)

e_h : 헬리컬 기어의 전위량(mm)
 e_{hd} : 헬리컬 기어용 금형의 치형 전위량(mm)
 e_{he} : 헬리컬 기어용 금형의 전극 치형 전위량 (mm)
 e_s : 스퍼어 기어의 전위량(mm)
 e_{sd} : 스퍼어 기어용 금형의 치형 전위량(mm)
 e_{se} : 스퍼어 기어용 금형의 전극 치형 전위량 (mm)
 k : 소재의 전단 강도(kgf/mm²)

접수일: 2007년 4월 5일; 게재승인일: 2007년 5월 30일

- * 부산대학교 기계기술연구소
- ** 동아대학교 신소재RIC센터
- *** 동의대학교 기계공학과
- **** 부산대학교 기계공학부
- # 부산대학교 기계기술연구소

E-mail: chulki@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2489

- m : 마찰 상수
- N : 기어 잇수
- R_0 : 중공 반경(mm)
- R_b : 치저원 반경(mm)
- R_s : 기어의 피치 반경(mm)
- R_t : 기어의 이끝 반경(mm)
- t_b : 기어의 치저원에서 치 두께(mm)
- t_r : 기어의 임의의 r반경에서 치 두께(mm)
- t_s : 기어의 피치 반경에서 치 두께(mm)
- t_t : 기어의 이끝에서 치 두께(mm)
- U_r : 반경방향 속도
- U_θ : 접선 방향 속도
- U_z : 축방향 속도
- W : 헬리컬 기어 치폭(mm)
- W_{ht} : 헬리컬 기어 치형부 길이(mm)
- α_s : 기어의 피치선상에서 압력각
- α_r : 임의의 반경 r에서 압력각
- Γ_i : i 번째 속도 불연속면
- σ_f : 유동 응력(kgf/mm²)
- Ψ_r : 임의의 반경 r에서 나선 각
- Ψ_s : 피치곡선상에서의 나선 각

1. 서론

기어는 용도가 대단히 많고 종류가 다양한 기계 부품 중의 하나이다. 강력한 전달력과 정확한 속도 비를 가지고 회전운동을 전하기 위하여 사용되는 기계부품으로 최근 자동차 산업의 발달로 부품가공의 정밀도와 생산성 향상이 급속도로 이루어지고 있다. 기어의 제조 방법으로는 호빙, 셰이빙, 밀링 등과 같은 절삭가공법과 주조, 분말야금, 소성가공 등의 비절삭가공법이 있으며, 고정밀도를 필요로 하는 기어는 현재 절삭가공에 의하여 대부분 생산되고 있다. 그러나 소성가공에 의해 성형된 기어는 절삭가공에 의해 제조된 기어에 비하여 재료 및 비용 절감과 강도 증가를 기대할 수 있으므로, 최근 기어 제조에 있어서 소성가공에 의한 기어성형방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

압출공정에 의한 기어 성형에 대한 연구로서 Samanta등¹에 의해서 스퍼어 기어와 헬리컬 기어의 냉간 압출공정이 제시되었으며, Choi등^{2, 3}은 헬리컬

기어의 새로운 냉간 압출법을 제안하여 상세해석하고, 전극설계 및 금형강도를 평가하였다. 또한 Yang⁴등은 헬리컬 기어의 성형은 매우 높은 성형하중과 빠른 작업속도 때문에 다이 속으로 치형을 갖는 펀치의 안내운동이 실현되기 어렵다. 이로 인하여 헬리컬 기어의 냉간 단조에 대해 안내형 공정이 아닌 구속형 공정에 대해서 단조 실험과 반복경계조건을 이용한 3차원 유한요소해석을 하였다. 또한 Choi^{5, 6}등은 헬리컬 기어의 안내형과 구속형 냉간 단조에 대하여 금형구조 및 동적가용 속도장을 제안하여 상세해석 결과와 실험 결과를 비교하였다.

상기의 연구에서 헬리컬 기어의 냉간 성형을 위한 여러 가지 실험 방법과 해석 방법이 제시되었지만, 헬리컬 기어의 냉간 성형은 가혹한 하중조건에서 성형이 이루어지므로 금형의 손상이 여전히 우려되며, 이로 인하여 헬리컬 기어의 냉간 성형이 실제 산업 현장에 적용되기가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 헬리컬 기어를 냉간 성형할 때 가혹한 하중 조건을 해결하기 위하여 2단계 헬리컬 기어 성형 공정을 제시하고자 한다. 이는 예비성형체인 스퍼어 기어를 압출하는 단계와 스퍼어 기어를 헬리컬 기어로 비트는 단계로 이루어져 있으며 공정간에 풀림처리가 수행된다. 전술한 성형방법의 공정에 대한 상세해수도, 전극 및 금형설계를 통하여 헬리컬 기어 제품의 대량생산이 가능함을 예측하였고 이를 토대로 헬리컬 기어를 제조하였다.

2. 2단계공정을 이용한 헬리컬기어 공정설계

2.1 기존의 헬리컬 기어 성형

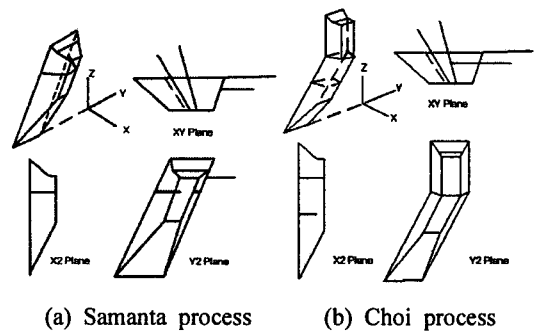


Fig. 1 Forming method of helical gear

Fig. 1 (a)는 Samanta등이 제시한 방법으로 반경

방향의 인벌루트(involute) 치형 형상과 축방향의 나선 각도(helix angle) 성형이 동시에 이루어진다. 이때 금형에 과도한 압력이 동시에 걸리므로 이를 Choi등은 Fig. 1 (b)와 같이 반경 방향의 인벌루트 치형이 먼저 성형되어진 후 축방향의 나선 각도만큼 성형 시키는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 인벌루트 성형 시 가공경화를 받은 소재가 헬리컬 기어성형 시 금형의 치저부에 과도한 압력을 가함으로써 금형의 수명을 단축시켰다.

2.2 2단계 공정을 이용한 헬리컬기어 성형

2.1에서 기술한 바와 같이 헬리컬 기어를 냉간 성형할 때 금형에 과도한 압력이 걸리므로 이를 해결하기 위한 2단계 공정을 이용한 헬리컬 기어의 성형은 Fig. 2에서 나타난 스퍼어 기어 금형을 통하여 압출성형공정에서 유동방향으로 요철을 성형한 다음, 이를 다시 금속재의 요철부위에 이끌고 피치 및 이뿌리를 성형한 후, Fig. 3과 같은 헬리컬기어의 금형을 통하여 스퍼어 기어의 치열에 소정의 나

선각을 형성하고 녹아웃시킨다.

2단계 헬리컬 기어의 성형을 통해 원하는 치수나 기계적 성질을 가진 기어제품을 생산하기 위해서는 최종기어 제품의 치수, 비틀림 량과 탄성회복 량을 고려한 금형의 나선(helix) 각도조절, 용이한 취출 및 성형을 위한 금형, 예비성형체와의 공차결정등과 같은 금형설계 기술이 요구된다.

3. 스퍼어기어를 헬리컬기어로 비트는 공정의 상계해석

헬리컬 기어를 냉간성형할 때 가혹한 하중조건을 해결하기 위해 수행되는 2단계 헬리컬 기어 성형공정 중 예비성형체인 스퍼어 기어를 압출하는 공정은 이미 많은 연구가 수행되어졌으므로 본 연구에서는 스퍼어 기어 예비성형체로부터 헬리컬기어로 비트는 압출공정에 대한 상계해석하였다. Fig. 4로부터 동적가용속도장을 구하여 이를 Table 1에 나타내었고 각 영역에 따른 속도장을 이용하여 속도불연속면에서 에너지를 구하였다.

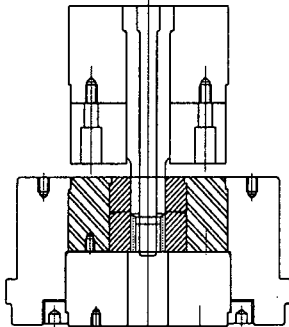


Fig. 2 Extrusion die set for spur gears

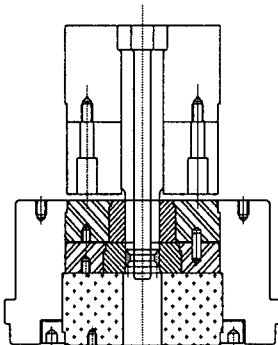


Fig. 3 Extrusion die set for helical gears from the spur gears

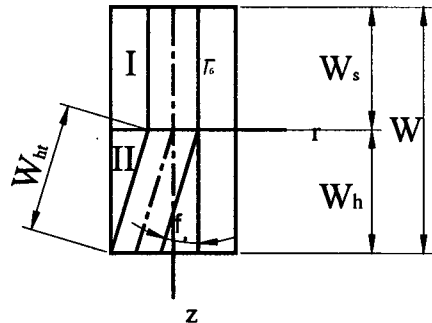
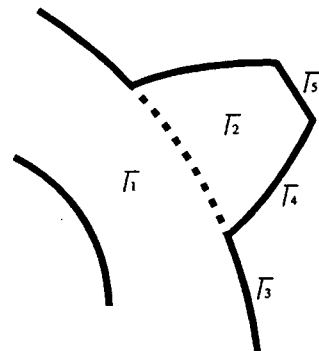


Fig. 4 Schematic drawing for kinematically admissible velocity field

Table 1 Kinematically admissible velocity field for torsion of helical gears

I 영역	II 영역
$U_r=0$	$U_r=0$
$U_\theta=0$	$U_\theta = U_z \tan \psi_r = \tan \psi_r$
$U_z=1$	$U_z=1$

나선 각도와 치형상의 반경과의 관계는 식 (1)로 표현되어지며 속도불연속면(Γ_1)은 중앙중공부(R_0)에서 치저부(R_b)까지 축에 직각인 면으로, 편치와 마찰에너지 손실은 식 (2)로 계산된다.

$$\frac{\tan \Psi_r}{R} = \frac{\tan \Psi_s}{R_s} = \frac{\tan \Psi_b}{R_b},$$

$$\tan \Psi_R = R \frac{\tan \Psi_s}{R_s} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{s1} &= \int_{R_0}^{R_s} mk \cdot \tan \Psi_R \cdot 2\pi R \cdot dR \\ &= \int_{R_0}^{R_s} 2\pi mk \cdot R^2 \cdot \frac{\tan \Psi_s}{R_s} dR \\ &= \frac{2}{3} \pi mk \cdot \frac{\tan \Psi_s}{R_s} \cdot (R_b^3 - R_0^3) \end{aligned} \quad (2)$$

속도불연속면(Γ_2)는 치저부(R_b)에서 치끝(R_t)까지 축의 직각인 면으로, 편치와의 마찰에너지 손실은 식 (3)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{s2} &= \int_{R_b}^{R_t} N \cdot mk \cdot \tan \Psi_R \cdot t_R dR \\ &= N \cdot mk \cdot \frac{\tan \Psi_s}{R_s} \cdot \int_{R_b}^{R_t} R \cdot t_R dR \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서, $\int_{R_b}^{R_t} R \cdot t_R dR \quad f(R) = R \cdot t_R$ 수치 적분으로 구한다.

속도불연속면(Γ_3)는 치저부(R_b)면상에서 축의 평행인 면으로, 편치와의 마찰에너지 손실은 식 (4)로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{s3} &= N \cdot mk \cdot \sqrt{(1 + \tan \Psi_b^2)} \cdot \\ &W_{ht}(R_b \cdot a_n - t_{Rb}) \end{aligned} \quad (4)$$

속도불연속면(Γ_4)는 치형옆면상에서 축의 평행인 면으로, 편치와의 마찰에너지 손실은 식 (5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{s4} &= \int_{R_b}^{R_t} N \cdot W_{ht} \cdot mk \cdot f(R) dR \\ &= N \cdot W_{ht} \cdot mk \cdot 2 \int_{R_b}^{R_t} f(R) dR \end{aligned} \quad (5)$$

속도불연속면(Γ_5)는 치끝(R_b)에서 축의 평행인 면으로, 편치와의 마찰에너지 손실은 식 (6)으로 표현된다.

$$E_{s5} = N \cdot mk \cdot \sqrt{(1 + \tan \Psi^2)} \cdot W_{ht} \cdot t_{Rt} \quad (6)$$

헬리컬 기어를 성형하기 위한 편치 하중은 식 (7)으로 표현할 수 있다.

$$L_{total} = (E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} + E_{s4} + E_{s5}) / A_{gear} \quad (7)$$

4. 2단계공정을 이용한 헬리컬기어 금형설계

2단계 공정을 이용한 헬리컬 기어 압출을 위한 금형 제작을 위해서는 Fig. 5의 순서도와 같이 최종 제품인 헬리컬 기어, 헬리컬 기어 금형, 헬리컬 기어 금형용 전극, 헬리컬 기어에서 소재로 사용될 스퍼어 기어, 스퍼어 기어용 금형, 그리고 스퍼어 기어 금형용 전극들이 설계되어야 한다. 이를 위해 각 기어 형상은 음셋량으로 설계가 되어야 하나, 표준기어(standard gear)가 아니면 제작이 힘들기 때문에 식 (8) ~ (10)에 의해 전위량으로 결정하였다.

헬리컬 기어 냉간 압출 가공후에 탄성 복원되어지는 것을 고려하여 그 양만큼 전위량으로 하여 헬리컬 기어 금형의 내부 치형부가 식 (8)에 의해 설계되었다.

$$e_{hd} = e_h - E_r \cdot R_s \quad (8)$$

헬리컬 기어용 금형을 위한 전극은 Fig. 6과 같이 방전량 및 래핑여유량을 고려하여 식 (9)에 의해 결정된다.

$$e_{he} = e_{hd} - (E_e + E_i) \quad (9)$$

헬리컬 기어 금형에 스퍼어기어 소재가 원만히 삽입이 되기 위해서는 식 (10)에 의해 클리어런스를 고려하여 스퍼어기어를 설계한다.

$$e_s = e_{hd} - C \quad (10)$$

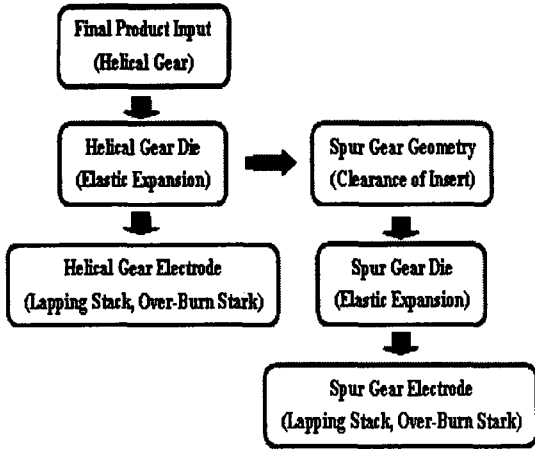


Fig. 5 A procedure of die design

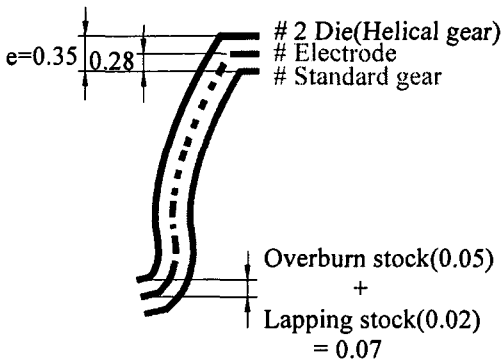


Fig. 6 Schematic drawing for lapping stock and Over-burn stock

5. 실험 및 고찰

스퍼어 기어 예비성형체로부터 헬리컬 기어로 비트는 압출 공정에 대한 이론적인 상계해석의 검증을 위하여 4장에서 기술한 금형설계에 의해 실금형을 제작하여 헬리컬 기어를 성형하였다. 또한 DEFORM을 이용한 유한요소해석도 병행하여 수행하였다. Fig. 7은 헬리컬 기어성형을 위해 300ton 유압프레스에 장착된 다이세트를 보여주는데 헬리컬 기어 성형 실험에 사용된 스퍼어기어 도입부, 헬리컬 기어 압출부, 취출부의 다이를 Fig. 8에 나타내었다. 2단계 공정을 이용한 헬리컬 기어의 성형을 위하여 SCM415 소재를 사용하였으며, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.⁷

$$\sigma_f = 768.06\epsilon^{0.139} \quad [MPa] \quad (11)$$

편치 소재는 SKD61, 인서트 소재는 초경, 보강링의 소재는 SKD61로 하였으며, 스퍼어 기어 및 헬리컬 기어 금형들의 제원은 Table 2에 나타내었다.

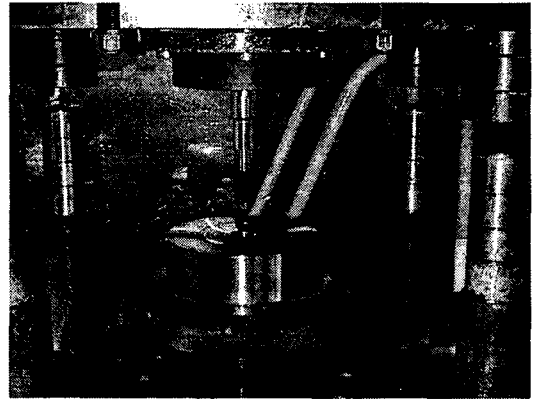


Fig. 7 Die set for helical gears

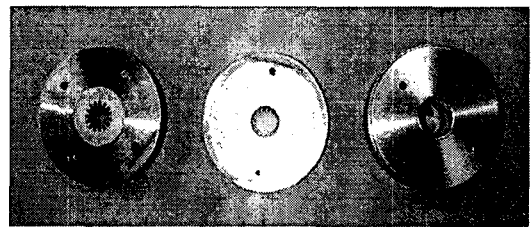


Fig. 8 Extrusion Die for the helical gear

Table 2 The specification of gears

	spur gear	helical gear
No. of teeth	15	15
Module	1.75	1.75
Pressure angle	20°	20°
Standard P.C.D	φ 26.25	φ 26.25
Helix angle	.	10°
Addendum modification	.	0.35

Fig. 9는 상기의 다이세트를 통하여 압출된 스퍼어 기어 예비성형체의 사진을 보여주며 스퍼어

기어 예비성형체를 이용하여 비트는 압출 공정을 수행한 후 성형된 자동차 트랜스미션에 사용되는 헬리컬 기어제품(잇수15개, 모듈1.75, 압력각20°, 나선각도 10°)을 Fig. 10에 나타내었다.

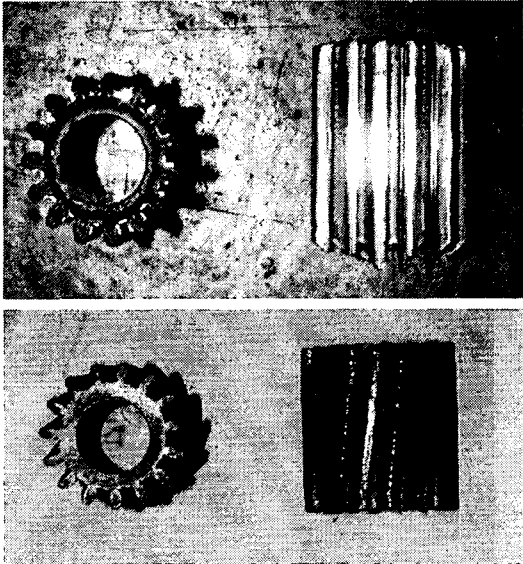


Fig. 9 A helical gear extruded from the spur gear

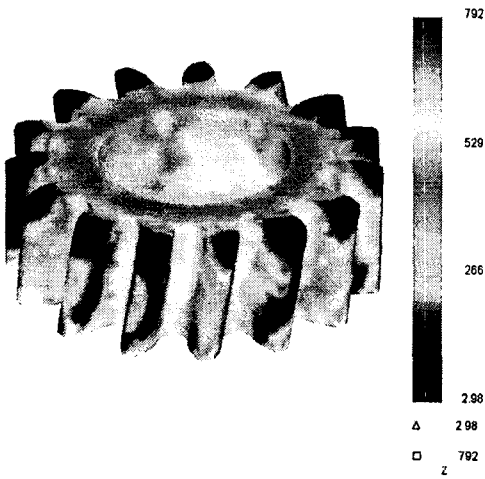
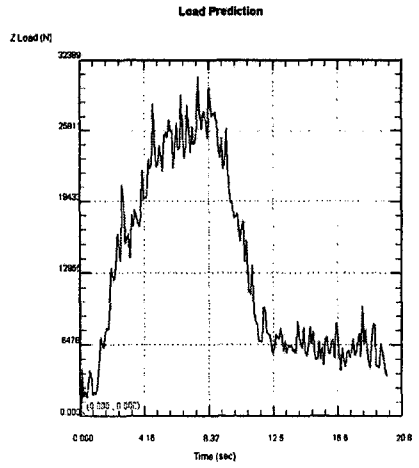
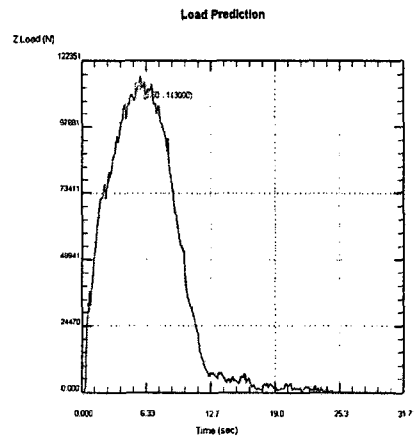


Fig. 10 The effective stress of FEM analysis for extrusion of the helical gear in case of helix angle, 10°



(a)



(b)

Fig. 11 The load of FEM analysis for extrusion of the helical gear ; (a) in case of helix angle, 10°, (b) in case of helix angle, 30°

Table 3 Comparison of the loads according to the helix angle

Helix angle	Load (UBT)	Load (FEM)	Load (Experiment)
10°	3.07ton	3.1ton	2.9ton
30°	10.85ton	11.3ton	10.2ton

헬리컬기어 금형의 탄성회복량은 파치원에 대하여 0.24%를 적용하여 식 (1)에 의해 전위량이 -0.0328mm로 계산되어졌고, 헬리컬기어 금형을 제작하기 위한 전극은 방전값과 랩핑여유량을 고려하여 식 (2)에 의해 전위량을 -0.0572mm로 결정했다.

또한 2단계공정을 이용한 헬리컬 기어의 변형양상과 하중을 예측하기 위해 유한요소해석용 Tool인 DEFORM으로 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 10과 Fig. 11 각각 나타내었다. 이들로부터 유효응력 및 유효변형률은 치저부 및 실린더부에 비해 치형부가 매우 큼을 알 수 있는데 이는 금형의 치형 끝 부분에 압력과 변형이 최대로 뒬을 알 수 있었고, 스퍼어기어 예비성형체가 탄성회복량, 방전값과 랩핑여유량 및 클리어언스를 고려한 금형세트에 의해 비틀어지는 실험을 통하여 측정된 하중과 식 (1) ~ (6)에 의해 계산된 이론적인 상계하중 값을 Table 3에 나타내었다.

6. 결론

본 연구에서는 기존의 헬리컬 기어 성형 공정과는 달리 2단계 공정을 이용하여 헬리컬 기어를 성형하고자 하였다. 이를 위하여 2단계 성형공정 중 스퍼어 기어를 헬리컬기어로 비트는 공정의 상계해석 및 유한요소해석과 압출된 스퍼어 기어를 예비성형체로 하여 탄성회복량, 방전값, 랩핑여유량을 고려한 금형을 제작하여 헬리컬기어로 비트는 공정의 실험을 수행했다. 스퍼어 기어를 헬리컬 기어로 비트는 공정의 상계해석 결과는 실험 및 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 또한 2단계 공정을 이용한 헬리컬기어 압출공정은 기존의 성형방법에 의해 야기되는 과도한 하중으로 인한 금형 파손을 방지할 수 있으므로 금형의 수명을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서 검증된 2단계 공정을 이용한 헬리컬 기어 압출 공정이 절삭 및 기존의 공정으로 헬리컬 기어를 생산하는 현장에 적용된다면 헬리컬 기어의 금형수명의 향상에 따라 대량 생산이 가능하게 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Samanta, S. K., "Helical gear: A noble method of manufacturing it," Proc. 4th North American

- Metalworking Research Conf., Battele's Columbus Labs, Society of Manufacturing Engineers, pp. 199-205, 1976.
2. Choi, J. C., Cho, H. Y., Kwon, H. H. and Lee, E. H., "A New Cold Extrusion Process of Helical Gear and its Upper Bound Analysis," J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 12-28, 1992.
3. Choi, J. C., Cho, H. Y. and Kwon, H. H., "A new extrusion process for helical-gears : experimental study," J. Mater. Process. Technol., Vol. 44, Issues 1-2, pp. 35-53, 1994.
4. Park, Y. B. and Yang, D. Y., "Finite element analysis for precision cold forging of helical gear using recurrent boundary conditions," IMechE Proc. Inst. Mech. Eng., Part B, Vol. 212, No. 3, pp. 231 - 240, 1998.
5. Choi, J. C., Choi, Y. and Tak, S. J., "The forging of helical gears (I) : experiments and upper-bound analysis," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 40, No. 4, pp. 325-337, 1998.
6. Choi, J. C., Choi, Y. and Tak, S. J., "The forging of helical gears (II) : comparisons of the forging processes," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 6, pp. 725-739, 1999.
7. Choi, J. C. and Choi, Y., "Precision forging of spur gears with inside relief," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, Issue 10, pp. 1575-1588, 1999.