

냉간단조에 의한 헬리컬기어의 새로운 성형방법과 이의 상계해석에 관하여

최 재찬, 조 해용*, 권 혁홍**

부산대학교 기계설계공학과

* 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학과 대학원

냉간단조에 의한 새로운 헬리컬기어 성형공정이 제시되었다. 원형봉재로 부터 헬리컬기어를 압출함에 있어서 압출압력을 계산하기 위하여 상계정리를 적용하여 수치계산하고, 수치해석 결과와 압출하려는 기어의 금형을 설계·제작하여 실험한 결과를 비교·검토하고자 한다. 이론해석상 다이형상으로 인벌류트곡선을 사용한 이론해는 실험결과와 잘 일치하였다. 그리고, 다이의 형상을 평기어부와 헬리컬기어부의 이중구조로 된 신공정이 헬리컬기어부로부터 된 사만타공정과 비교해서 금형강도를 향상시킴으로써 다이수명은 증가되었고, 자동차 변속기용으로 헬리컬기어는 KS 기어급수 4~5 급의 정밀도에 해당하는 기어를 가공했다. 이는 사만타공정의 정밀도 보다 향상된 결과를 얻었다.

1. 서 론

기어의 가공법은 절삭가공법과 비절삭기어 가공법이 있다. 절삭가공법에는 호빙가공, 기어 세이빙, 세이핑 등과 같은 여러가지 방법이 있으나 일반적으로 자동차용 기어는 호빙가공한 다음 세이빙가공을 거쳐 버어닝 연마 혹은 래핑과 같은 공정이 많이 이용되고 있다. 이와같은 절삭기어 가공법 외에 기어주조법과 분말야금, 단조, 압연 및 압출과 같은 금속성형공정을 이용한 소성가공에 의한 기어성형법 등이 있으나 주조법은 품질과 생산성 면에서 불리하여 많이 이용되지 못하고 최근 들어 고도의 정밀성, 다량생산화를 지향하는 경향에 따라 소성가공에 의한 기어의 성형법 개발과 그 성형공정의 개선 문제와 이에 대한 새로운 해석방법의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Dean 등(1)은 정밀 단조법에 의한 평기어 성형시의 치형상에 대하여 온도의 영향과 공구의 하중을 조사하여 금형설계시에 치와 모듈의 수정량을 제시하였으며, Badawy(2)와 Sabroff(3)는 밀폐 단조에 의하여 스파이럴 베벨기어 성형시의 치형형상을 계산하고 컴퓨터에 의하여 금형을 설계·제작하였다. Kondo(4)는 분할유동(divided flow)을 이용하여 평기어를 정밀단조법으로 가공하고, 공구하중을 상계법으로 해석하였다. Dohmann 과 Traudt(5)는 냉간단조에 의한 헬리

컬기어 성형시의 금속유동과 공구하중을 슬래브법으로 해석하였다.

1970년 Mill(6)이 헬리컬기어를 정수압출에 의해 가공하였으나, 이 방법은 성형 방법상 다량생산에의 적용이 곤란하였다. 이후 1974년 Samanta(7)에 의하여 평기어와 헬리컬기어의 냉간압출공정이 제시되었으며, 이는 자동차의 스타트 피니언(start pinion)의 생산에 적용되어 정밀공차 등이 같은 종류의 절삭기어에 비하여 만족할 만한 수준으로 만들어 지진 못하였지만, 가공 시간과 비용을 크게 줄일 수 있었다.

Choi 등(8)은 전방압출 및 튜브압출에 있어서 임의 형상의 다이에 대하여 해석하였고, Yang 등(9)은 축방향 속도가 단면내에서 일정하다는 가정하에 등각사상을 사용하여 상사형 단면, 일반적 3차원 단면형체의 압출 및 타원형의 비틀림 압출을 효과적으로 해석하였다. Kiuchi 등(10)은 핀과 같은 3차원 비축대칭 압출에 대한 일반화된 동적가속도장을 제시하였고, 泉澤正良등(11)은 냉간압출 가공법에 의한 헬리컬기어의 치선까지 성형되어진 기어를 얻기 위한 필요한 제조조건을 탄소강 S15C소재를 이용한 실험에 의해 검토하였다.

이후 Omori 등(12)은 성형대상으로 자동차의 변속기에 사용되는 롱 피니언(long pinion) 헬리컬기어를 초경금형을 사용하여 알루미늄, 동, S15C, S30C, SCM318H의 재료로써 금형과 성형품의 치수차이(전사정도)를 예측하는 기술의 가능성

을 보였다. Choi 등⁽¹³⁾은 냉간압출에 의한 헬리컬기어(그림 1(a))의 제조에 관한 연구논문을 보고한 바가 있다.

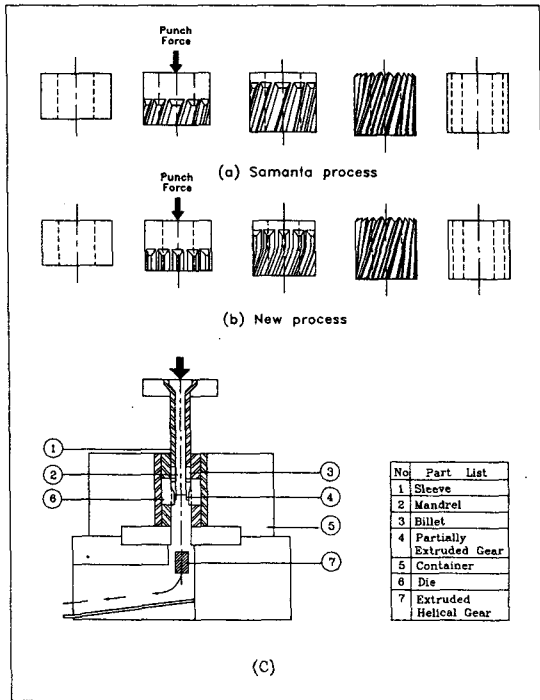


그림 1 헬리컬기어의 압출성형에 대한 (a) 사만타공정 (b) 새로운 성형공정에서 소재의 변형과정도 (c) 기어압출장치

본 연구에서는 그림 1(b)와 같이 소재는 내부에 서로 다른 나선각의 치형을 지닌 압출다이로 보내져서, 맨드렐을 에워싸는 슬리브펀치에 의해 압출력이 소재에 전달되는⁽¹⁴⁾ 새로운 공정에 대한 연구를 시도하였다. 여기서, 펀치는 소재가 압출다이를 통하여 부분적으로 전진함에 따라 압출력을 소재에 전달하기 위해서 사용되는데, 최종적인 압출작업은 압출공정이 반복되어지기 때문에, 다이내로 삽입된 다음에 계속되는 소재가 다이내로 삽입됨에 따라 압출력이 최초의 소재에 전달되어 수행되는 것이다. 이 경우 최초의 소재는 압출이 진행됨에 따라 처음에 만들고자 하는 헬리컬기어에 앞서 나선각이 0° 인 평기어로 성형된 다음, 비틀림가공이 시작되어 만들고자 하는 나선각을 가진 헬리컬기어로 성형되어진다. 따라서 인벌류트 치형을 갖는 헬리컬기어 압출의 상계해석에 있어서 다이의 치형형상을 실제의 형상인 인벌류트곡선으로 하여 평기어에서 비틀림가공하는 경우에 대해 적용할 수 있는 상계해법을 제시하고, 비틀림가공 압출제품의 응용 및 산업화를 위한 연구를 하였다. 이를 위하여 원형에서 임의의 형상으로 비틀림 가공하는 경우에 적용할 수 있는 동적가속 속도장을 유도하여 이론적인 해석을 하고, 새로운 헬리컬

형상의 금형을 제작한 후 실험을 행하여 비틀림가공의 성형성 연구와 일련의 가공방식에 대한 연구를 수행하였다.

2. 이론 해석

2.1 기본 가정

금속을 소성가공할 경우 그 금속의 기계적 성질 및 가공재료와 금형간의 마찰력 등이 변형에 필요한 하중, 유동특성에 영향을 미친다. 금속의 유동현상은 매우 복잡하므로 실제 현상과 똑같은 속도장을 찾아내기란 매우 어렵다. 그래서 적당한 가정을 도입하여 실제현상에 근사적인 모델을 선정하여 해석한다. 3차원 압출시 재료의 유동은 압출축방향 속도성분 뿐만 아니라 축방향 주위의 회전 및 반경방향 속도성분도 있는데, 여기에 비틀림 압출시의 회전유동이 추가되면 더욱 복잡하게 된다. 따라서, 금속 변형영역을 몇 개의 요소로 구분하여 각 변형요소들이 경계조건을 만족하는 범위 내에서 적당한 가정을 하여 실제 현상에 근사한 모델을 선정하여야 한다. 이를 위해서 다음 몇가지 기본적인 가정이 필요하다.

- i) 재료는 등방성, 비압축성이고 강소성체이며, Von Mises의 유동법칙을 따른다.
- ii) 다이, 펀치 및 다이 구속장치는 완전 강체로서 어떠한 변형이나 체적변화가 없다.
- iii) 다이 입구와 출구의 단면은 강소성의 경계이며, 압출축에 수직인 평면이다.
- iv) 회전방향 성분은 반경방향에 선형으로 분포하며, 다이 내의 압출축에 수직인 단면상의 압출축방향 속도성분은 일정하다.

2.2 각 변형영역의 각도계산

그림 2(a)와 같이 여섯개의 변형영역으로 소성변형이 진행되고 있는 구간 5개(영역 II, III, IV, V, VI)와 소성변형이 아직 진행되지 않은 영역 I로 구분한다. 영역 I의 전방유동은 강체(rigid body)운동을 하는 소재부이고, 영역 II는 원추형 성형부, 영역 III은 평기어 성형부, 영역 IV는 기초원과 치저원 사이의 평기어 성형부, 영역 V는 평기어 강체부이고, 영역 VI는 헬리컬기어 강체부로서 축방향속도는 영역 V와 같고 회전운동이 추가된 강체부이다.

기어의 1/2 피치에 대하여 치저부(기초원부) 변형영역의 각도를 θ_1 , 인벌류트부 변형영역의 각도를 θ_2 , 그리고 치선부 변형영역의 각도를 θ_3 라 하면 다이의 형상은 그림 2와 같으며 (a)는 압출축방향 단면의 형상을 나타내고, (b), (c), (d) 및 (e)는 압출이 진행된 지점에서 압출축(Z)에 수직인 단면의 형상을 나타낸 것이다. 그림 2(f)에서 평기어와 헬리컬기어의 모듈이 같으므로 헬리컬기어 성형부의 축직각 단면은 평기어 성형부의 축직각 단면과 치형형상이 동일하다. 실제 기초원 이하의 필렛부분은 형상이 매우 복잡하므로

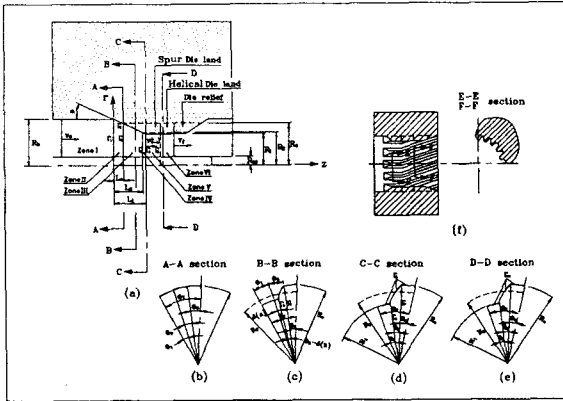


그림 2 다이의 치형성형부에 대한 (a) 길이방향 단면도 (b)~(e) 횡단면도 (f) 상세도

형상함수의 정의 시에는 필렛의 형상을 그림 2(d)와 같이 반경방향에 직선으로 가정한다.

그림 3은 수치해석을 위한 메시 생성형태와 금형내에서 압출이 진행되면서 평기어에서 헬리컬기어로 변형되는 형태를 $\frac{1}{2}$ 피치에 대하여 나타낸 것이다.

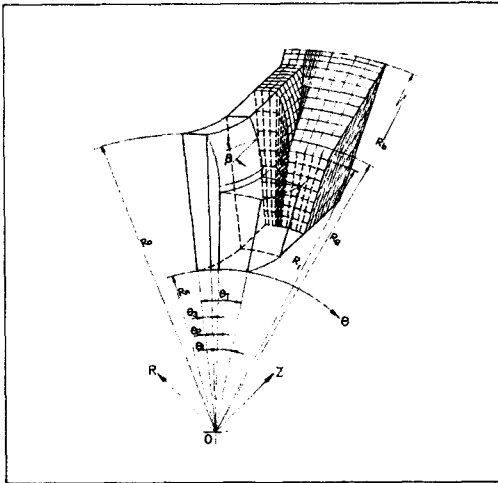


그림 3 수치해를 위한 메시 생성과 다이에서의 기어치형의 모형도

그림 4에서 기어의 축직각압력각을 ϕ 라 하고, 피치원상의 이두께 반을 t_{RP} 라 하면 식 (1)과 같다.

$$t_{RP} = \pi M/4 + e \tan \phi \quad (1)$$

여기서, e는 기어의 전위량을 나타낸다. 그리고, 치선에서의 이두께의 반을 t_o 라 하면

$$t_o = R_o \left(\frac{t_{RP}}{R_p} + \text{inv} \phi - \text{inv} \phi_{R0} \right) \quad (2)$$

와 같이 되고, 치선에서의 압력각 ϕ_{R0} 는 식 (3)으로 된다.

$$\phi_{R0} = \cos^{-1} (R_g/R_o) \quad (3)$$

그런데, $t_o = \theta_3 \cdot R_o$ 이므로

$$\theta_3 = \frac{t_o}{R_o} \quad (4)$$

가 된다. 인벌류트 함수로부터 θ_2 는

$$\theta_2 (= \text{inv}(\phi_{R0})) = \tan \phi_{R0} - \phi_{R0} \quad (5)$$

로 되고, 그림 2(b)에서 $\frac{1}{2}$ 피치의 각을 θ_T 라 하면

$$\theta_T = \frac{\pi}{N} \quad (6)$$

가 된다. 따라서, 기초원부의 각도 θ_1 은

$$\theta_1 = \theta_T - (\theta_2 + \theta_3) \quad (7)$$

으로 계산된다.

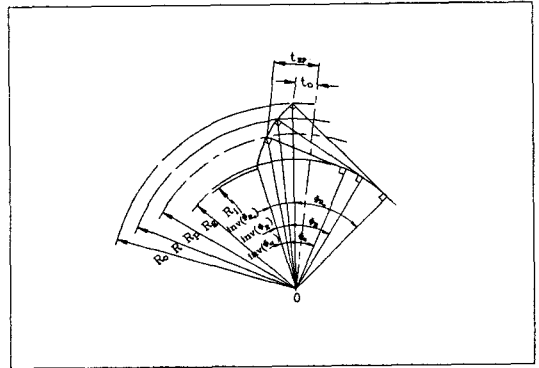


그림 4 각 반경에 대한 압력각과 치선, 피치원에서의 치두께

2.3 형상함수의 정의와 동적가용 속도장

그림 2(a)에서 다이랜드부($Z = L_i$)에 이르면 성형되는 영역의 축방향 압출속도성분을 $V(L_i)$ 라 하고, 평기어를 거쳐 헬리컬 다이랜드를 빠져 나가는 속도성분을 V_f 라 정의한다. 이 때, 속도성분 V_f 는 평기어의 축방향 속도성분 $V(L_i)$ 와 헬리컬기어의 회전방향 속도성분의 합성으로 된다.

다이의 형상함수는 그림 2(b), (c), (d) 및 (e)와 같이 압출축방향으로 세 영역으로 나누고, 이들 각각의 영역에 대하여 다시 치저부(기초원부), 필렛부, 인벌류트부, 치선부의 변형영역으로 나눈다. 기초원 이하의 필렛 부분은 형상이 매우 복잡하므로 형상함수의 정의시에는 필렛의 형상을 그림 2(d)와 같이 반경방향에 직선으로 가정한다.

다이내로의 초기속도를 V_0 라 하고, 강소성 경계면이 입·출구에서 평면이고, 각 횡단면에서 축방향 속도가 균일하다는 가정하에

$$U_z(Z) = \frac{V_0 \int_0^{\theta_T} \{RS^2(\theta, 0) - R_m^2\} d\theta}{\int_0^{\theta_T} \{RS^2(\theta, Z) - R_m^2\} d\theta} \quad (8)$$

이다. 여기서, R_m 은 맨드렐면의 형상함수로서, 본연구에서는 맨드렐형상이 원주이므로 그 반경을 나타낸다.

다이내의 회전방향 변형영역의 범위를 몇 개의 등가의 영역으로 분할할 경우 경계면으로 되고, 재료는 경계면을 넘어서 유동이 일어나지 않게 속도장이 구성된다. 가정 iv)에서 회전방향 속도성분은 반경방향에 선형으로 분포(10)하므로,

$$U_\theta(r, \theta, Z) = r \cdot \omega(\theta, Z) = -r \left[\frac{1}{RS^2(\theta, Z) - R_m^2} \cdot \int_0^\theta \frac{\partial}{\partial Z} \{RS^2(\theta, Z) - R_m^2\} U_z(Z) d\theta \right] \quad (9)$$

로 된다. 여기서, θ 의 범위는 $0 \leq \theta \leq \theta_T$ 이다.

원주 좌표계에서의 비압축성조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial U_z}{\partial Z} = 0 \quad (10)$$

식 (10)을 $U_r(r, \theta, Z)$ 에 대하여 일반해를 구하고, 맨드렐면과 다이내 그리고 다이 입·출구에서의 경계조건을 대입하여 정리하면 다음식과 같다.

$$U_r(r, \theta, Z) = -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial U_z(Z)}{\partial Z} + \frac{\partial \omega(\theta, Z)}{\partial \theta} \right\} + \frac{1}{r} \left[\frac{RS^2(\theta, Z)}{2} \left\{ \frac{\partial U_z(Z)}{\partial Z} + \frac{\partial \omega(\theta, Z)}{\partial \theta} \right\} + RS(\theta, Z) \omega(\theta, Z) \frac{\partial RS(\theta, Z)}{\partial \theta} + RS(\theta, Z) U_z(Z) \frac{\partial RS(\theta, Z)}{\partial Z} \right] \quad (11)$$

(1) 영역 II의 형상함수와 동적가용 속도장

그림 2(a), (b)와 같이 다이입구에서 부터 치가 형성되기 직전의 단면까지($Z = L_0$)는 일반적인 원추형 다이와 같이 변형되는 영역으로 이 영역에서의 형상함수와 속도장은 다음과 같다.

$$RS_2(r, \theta, Z) = \frac{R_i - R_b}{L_i} Z + R_b \quad (12)$$

단, $0 \leq Z \leq L_0$, $0 \leq \theta \leq \theta_T$ 이다.

$$U_z = \frac{V_0 (R_b^2 - R_m^2)}{RS_2^2(Z) - R_m^2} \quad (13a)$$

$$U_\theta = 0 \quad (13b)$$

$$U_r = \frac{V_0}{r} \frac{RS_2(Z)(R_b^2 - R_m^2)(r^2 - R_m^2) \left(\frac{R_i - R_b}{L_i} \right)}{(RS_2^2(Z) - R_m^2)^2} \quad (13c)$$

(2) 영역 III의 형상함수와 동적가용 속도장

기초원($Z = L_g$)까지 성형되는 영역의 형상함수는 기초원부(III-1), 인벌류트부(III-2) 및 치선부(III-3)의 세 영역으로 다시 나뉘어지고, 각각의 영역구별은 원추형 다이와 같이 변형되는 영역($Z = L_0$ 인 점)까지는 나타나지 않고, 이후 압출이 진행되면 즉, 치형이 성형되면서 나타나서 기초원까지의 다이길이에 이르면 기초원부, 인벌류트부 및 치선부로 구별된다. 그림 2(a), (b)에서 압출이 진행된 입의 지점에서 인벌류트부로 변형될 부분의 각도를 $\delta(Z)$ 라 하면 이는 다음과 같이 구해진다. 즉, 압출이 진행된 입의 점에서의 압력각을 $\phi_R(Z)$ 로 정의하면

$$\phi_R(Z) = \cos^{-1} \left[\frac{R_g}{R(Z)} \right] \quad (14)$$

이며, 여기서, $R(Z) = \frac{R_i - R_b}{L_i} Z + R_b$ 이다.

$$\text{inv}(\phi_R(Z)) = \tan \phi_R(Z) - \phi_R(Z) \quad (15)$$

이다. 따라서,

$$\delta(Z) = \text{inv}(\phi_R(Z)) \quad (16)$$

로 된다.

○ 기초원부 변형영역 (III-1)

$$RS_{3-1}(r, \theta, Z) = R(Z) \quad (17)$$

단, $L_0 < Z \leq L_g$, $0 \leq \theta \leq \theta_1 + \delta(Z)$ 이다.

영역 III의 1/2 피치에 대한 면적은 다음과 같다.

$$A_3(Z) = \frac{1}{2} \left[(RS_{3-1})^2(\theta_1 + \delta(Z)) + \frac{R_g^2}{3} \left\{ \left[\frac{\sin \phi_{R0}}{\cos^3 \phi_{R0}} \tan \phi_{R0} \right] - \left[\frac{\sin \phi_R(Z)}{\cos^3 \phi_R(Z)} \tan \phi_R(Z) \right] \right\} + R_0^2 \theta_3 - R_m^2 \theta_T \right] \quad (18)$$

편치가 다이내로의 초기속도 V_0 로 움직임에 따라, 영역 III의 축방향 동적가용 속도장은 다음식으로 동일하게 된다.

$$U_z = \frac{V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 A_3(Z)} \quad (19)$$

영역 (III-1)의 회전방향 속도성분은 식 (20a)와 같다.

$$U_\theta = \frac{r \theta V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{(RS_{3-1}^2 - R_m^2) A_3(Z)} \left\{ \frac{(RS_{3-1}^2 - R_m^2)}{2 A_3(Z)} \frac{\partial A_3(Z)}{\partial Z} - RS_{3-1} \frac{R_i - R_b}{L_i} \right\} \quad (20a)$$

반경방향 속도성분(U_r)은 식 (10)의 비압축성조건으로 부터 구한 식 (11)의 일반해에 각 성분을 대입하여 구한다.

$$U_r = \frac{V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2} \frac{RS_{3-1}}{r A_3(Z)} \frac{r^2 - R_m^2}{RS_{3-1}^2 - R_m^2} \frac{R_i - R_b}{L_i} \quad (20b)$$

○ 인벌류트부 변형영역 (Ⅲ-2)

$$RS_{3-2}(r, \theta, Z) = \frac{R_g}{\cos \phi_R} \quad (21)$$

단, $L_0 < Z \leq L_g$, $\theta_1 + \delta(Z) \leq \theta \leq \theta_1 + \theta_2$ 이다.

여기서, $\theta - \theta_1 = \text{inv}(\phi_R) = \tan \phi_R - \phi_R$ 이다.

영역 (Ⅲ-2)의 회전방향 속도성분은 식 (22a)와 같으며

$$U_\theta = \frac{r V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 (RS_{3-2}(\theta) - R_m^2) (A_3(Z))^2} \frac{\partial A_3(Z)}{\partial Z} \left[\frac{R_g^2}{3} \left\{ \left\{ \frac{\sin \phi_{R0}}{\cos^3 \phi_{R0}} - \tan \phi_{R0} \right\} - \left\{ \frac{\sin \phi_R}{\cos^3 \phi_R} - \tan \phi_R \right\} \right\} - R_m (\theta_2 - \theta) \right] \quad (22a)$$

반경방향 속도성분은 식 (11)로부터 다음과 같이 된다.

$$U_r = \left[\frac{-V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2} \frac{\partial A_3(Z)}{(A_3(Z))^2} \frac{\partial Z}{\partial Z} + \frac{(2 RS_{3-2}^2 - R_m^2 \csc^2 \phi_R)}{RS_{3-2}^2 - R_m^2} + \frac{2 RS_{3-2}^2}{RS_{3-2}^2 - R_m^2} \frac{\omega(\theta, Z)_{3-2}}{\tan \phi_R} \right] \cdot \left[\frac{RS_{3-2}^2 - r^2}{2 r} \right] \quad (22b)$$

○ 치선부 변형영역 (Ⅲ-3)

$$RS_{3-3}(r, \theta, Z) = R_0 \quad (23)$$

단, $L_0 < Z \leq L_g$, $\theta_1 + \theta_2 \leq \theta \leq \theta_T$ 이다.

영역 (Ⅲ-3)의 회전방향 속도성분은 식 (24a), 반경방향 속도성분은 0으로 된다.

$$U_\theta = \frac{r V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 (A_3(Z))^2} \frac{\partial A_3(Z)}{\partial Z} \theta \quad (24a)$$

$$U_r = 0 \quad (24b)$$

(3) 영역 IV의 형상함수와 동적가용 속도장

그림 2(d)에서와 같이 완전한 치로 성형되는 영역의 형상 함수는 치저부, 인벌류트부 및 치선부의 세 영역으로 다시 나뉘고 압축이 진행되어서 다이텐드부 ($Z = L_i$)에 이르면 완전한 치형이 성형되고 치저부(Ⅳ-1), 필렛부(Ⅳ-2)와 인벌류트부(Ⅳ-3) 및 치선부(Ⅳ-4)로 구별되어지면서 기어 성형이 끝난다.

○ 치저부 변형영역 (Ⅳ-1)

$$RS_{4-1}(r, \theta, Z) = R(Z) \quad (25)$$

단, $L_g < Z \leq L_i$, $0 \leq \theta < \theta_1$ 이다.

영역 IV의 1/2 피치에 대한 면적은 다음과 같다.

$$A_4(Z) = \frac{1}{2} \left[R_{4-1}^2(Z) \cdot (\theta_1) + \frac{R_g^2}{3} \left\{ \frac{\sin \phi_{R0}}{\cos^3 \phi_{R0}} - \tan \phi_{R0} \right\} + R_0^2 \theta_3 - R_m^2 \theta_T \right] \quad (26)$$

펀치가 다이내로의 초기속도 V_0 로 움직임에 따라, 영역 IV의 각 변형영역의 축방향 동적가용 속도장은 다음식과 같다.

$$U_z = \frac{V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 \cdot A_4(Z)} \quad (27)$$

영역 (Ⅳ-1)의 회전방향 속도성분과 반경방향 속도성분은 각각 다음식으로 된다.

$$U_\theta = \frac{r \theta V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{(RS_{4-1}^2 - R_m^2) A_4(Z)} \left\{ \frac{(RS_{4-1}^2 - R_m^2) \partial A_4(Z)}{2 A_4(Z)} \frac{\partial Z}{\partial Z} - RS_{4-1} \frac{R_i - R_b}{L_i} \right\} \quad (28a)$$

$$U_r = \frac{V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2} \frac{RS_{4-1}}{r A_4(Z)} \frac{r^2 - R_m^2}{RS_{4-1}^2 - R_m^2} \frac{R_i - R_b}{L_i} \quad (28b)$$

○ 필렛부 변형영역 (Ⅳ-2)

$$RS_{4-2}(r, \theta, Z) = RS_{4-1}(r, \theta_1, Z) \quad (29)$$

단, $L_g < Z \leq L_i$, $\theta = \theta_1$ 이다.

영역 (Ⅳ-2)의 동적가용 속도성분은 영역 (Ⅳ-1)의 동적가용 속도성분의 $\theta = \theta_1$ 에서 동일한 속도장이 구해진다.

○ 인벌류트부 변형영역 (Ⅳ-3)

$$RS_{4-3}(\theta) = \frac{R_g}{\cos \phi_R} \quad (30)$$

단, $0 \leq \phi_R \leq \phi_{R0}$ 이다.

영역 (Ⅳ-3)의 회전방향 속도성분과, 반경방향 속도성분은 다음식과 같다.

$$U_\theta = \frac{r V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 (RS_{4-3}^2(\theta) - R_m^2) (A_4(Z))^2} \frac{\partial A_4(Z)}{\partial Z} \left[\frac{R_g^2}{3} \left\{ \left\{ \frac{\sin \phi_{R0}}{\cos^3 \phi_{R0}} - \tan \phi_{R0} \right\} - \left\{ \frac{\sin \phi_R}{\cos^3 \phi_R} - \tan \phi_R \right\} \right\} - R_m (\theta_2 - \theta) \right] \quad (31a)$$

$$U_r = \left[\frac{-V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2} \frac{\partial A_4(Z)}{(A_4(Z))^2} \frac{\partial Z}{\partial Z} + \frac{(2 RS_{4-3}^2 - R_m^2 \csc^2 \phi_R)}{RS_{4-3}^2 - R_m^2} + \frac{2 RS_{4-3}^2}{RS_{4-3}^2 - R_m^2} \frac{\omega(\theta, Z)_{4-3}}{\tan \phi_R} \right] \cdot \left[\frac{RS_{4-3}^2 - r^2}{2 r} \right] \quad (31b)$$

○ 치선부 변형영역 (IV-4)

$$RS_{4-4}(r, \theta, Z) = R_0 \quad (32)$$

단, $L_g < Z \leq L_i$, $\theta_1 + \theta_2 \leq \theta \leq \theta_T$ 이다.

영역 (IV-4)의 회전방향 속도성분은 식 (33a)이고, 반경방향 속도는 0으로 계산된다.

$$U_\theta = \frac{r V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 (A_4(Z))^2} \cdot \frac{\partial A_4(Z)}{\partial Z} \theta \quad (33a)$$

$$U_r = 0 \quad (33b)$$

(4) 영역 V의 동적가용 속도장

완전한 평기어로 성형되는 영역 V는 변형은 일어나지 않고 마찰만 존재하므로 평기어 다이렌드 부위의 축방향 속도 성분만 있으면 일정하게 성형된다.

영역 V의 1/2 피치에 대한 면적은 다음식으로 되고,

$$A_5(Z) = \frac{1}{2} \left[R_i^2 (\theta_1) + \frac{R_g^2}{3} \left(\frac{\sin \phi_{R_0}}{\cos^3 \phi_{R_0}} - \tan \phi_{R_0} \right) + R_o^2 \theta_3 - R_m^2 \theta_T \right] \quad (34)$$

압축축방향 동적가용 속도장은 다음식으로 일정하게 된다.

$$U_z = \frac{V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 \cdot A_5(Z)} \quad (35a)$$

$$U_r = U_\theta = 0 \quad (35b)$$

마찰이 존재하는 치형의 표면적을 계산하기 위해 다음과 같이 다이렌드영역을 계산한다. 먼저, 1/2 피치에 대한 치저부의 치둘레 L_{R1} 은 다음식과 같다.

$$L_{R1} = R_i \theta_1 + (R_g - R_i) \quad (36)$$

1/2 피치에 대한 인벌류트부의 치둘레 L_{R2} 는 식 (37)로 근사화되고,

$$L_{R2} = \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} \left[\frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin \phi_{R_0}}{\cos^2 \phi_{R_0}} + \ln \left(\frac{1}{\cos \phi_{R_0}} + \tan \phi_{R_0} \right) - \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \right] \quad (37)$$

단, 여기서, $\tan \alpha = \frac{R_o - R_i \cos \theta_2}{R_i \sin \theta_2}$ 이다.

1/2 피치에 대한 치선부의 치둘레 L_{R3} 은

$$L_{R3} = R_o \cdot \theta_3 \quad (38)$$

1/2 피치의 치둘레 P_0 는 다음과 같이 계산되고,

$$P_0 = (L_{R1} + L_{R2} + L_{R3}) \quad (39)$$

1/2 피치 평기어부 다이렌드 부위의 치표면적 T_A 는 다음식과 같다.

$$T_A = P_0 \cdot L_d \quad (40)$$

여기서, L_d 는 평기어부 다이렌드길이를 표시한다.

(5) 영역 VI의 동적가용 속도장

그림 2(e)에서와 같이 평기어로 성형된 다음, 피치원주상의 나선각 방향으로 전단변형에 의한 비틀림가공이 시작되어 나선각을 가진 헬리컬기어로 성형된다. 이에 대한 전단변형량 γ_p 는

$$\gamma_p = \tan \beta \quad (41)$$

피치원주상에서 원주방향으로 변형되는 축방향 단위길이에 대한 회전각도 θ_p 는 다음과 같다.

$$\theta_p = \frac{\tan \beta}{R_p} \quad (42)$$

압축축방향의 속도성분 U_z 는 영역 V와 동일하며, 회전방향 속도성분은 반경방향에 선형으로 분포하므로 반경에 따른 각변형량으로 계산된다. 따라서, 영역 VI의 회전방향 속도성분은 식 (43a)이고, 반경방향 속도성분은 0이다.

$$U_\theta(r, \theta, Z) = r U_z(Z) \cdot \theta_p = \frac{r V_0 (R_b^2 - R_m^2) \theta_T}{2 A_5(Z)} \theta_p \quad (43a)$$

$$U_r(r, \theta, Z) = 0 \quad (43b)$$

여기서, 그림 2(a)의 V_f 는 다음식과 같이 계산된다.

$$V_f = (U_z^2(Z) + U_\theta^2(r, \theta, Z))^{1/2} \quad (44)$$

헬리컬기어부의 다이렌드영역에서 1/2 피치에 대한 치표면적 T_A 는 평기어와 헬리컬기어의 축직각 모듈이 같으므로 다음과 같이 계산된다.

$$T_A = P_0 \cdot L_d / \cos \beta \quad (45)$$

여기서, L_d 는 헬리컬기어부 다이렌드길이를 표시한다.

2.4 변형률속도 및 에너지 소비율의 계산

2.4.1 변형률속도와 내부에너지 소비율

원주좌표계에서 다이내의 임의점에 대한 변형률속도는 앞 절에서의 동적가용속도장에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial U_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_\theta &= \frac{U_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{\partial U_z}{\partial Z} \\ \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r} \right) \end{aligned} \quad (46)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} \right)$$

$$\dot{\epsilon}_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{\partial U_r}{\partial z} \right)$$

식 (46)의 변형률속도에서 유효 변형률속도는 다음과 같다.

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2}{2} + \dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2 \right]^{1/2} \quad (47)$$

각각의 영역에 대하여 식 (47)에서 구한 유효 변형률속도를 체적에 대하여 적분한 다음, 이들을 합하여 $1/2$ 피치에 대한 내부변형 에너지를 계산한다.

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dV \quad (48)$$

단, $dV = r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz$ 이다.

2.4.2 전단에너지 소비율

○ 전단경계면 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$

영역 I과 II, 영역 II와 III, 영역 III과 IV, 영역 IV와 V 사이의 강소성 경계는 속도불연속면으로 되고, 여기서의 전단경계면은 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ 에 해당하고, 상대속도 불연속량은 $\Delta V_{\Gamma si}$ ($i = 1, 2, 3, 4$)이므로 전단에너지 소비율은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{si} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{S_i} |\Delta V_{\Gamma si}| dS_i, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (49)$$

$$|\Delta V_{\Gamma si}| = \left[\left(U_\theta^2(r, \theta, Z) + U_r^2(r, \theta, Z) \right)^{1/2} \right]$$

단, $Z = 0, Z = L_0, Z = L_g, Z = L_i$ 이다. 여기서, dS_i 는 영역들사이의 속도불연속면의 미소면적을 나타낸다.

○ 전단경계면 Γ_5

평기어로 성형된 다음 비틀림가공이 시작되어 나선각을 가진 헬리컬기어로 성형되는 영역 V와 VI사이에서는 순수전단으로 비틀림 전단에너지가 작용하여 성형되므로 이 면에서의 상대속도 불연속량 $\Delta V_{\Gamma s5}$ 및 비틀림 전단에너지 소비율은 다음과 같다.

$$\dot{W}_{s5} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{S_5} |\Delta V_{\Gamma s5}| dS_5 \quad (50)$$

$$|\Delta V_{\Gamma s5}| = \left[\left(U_\theta^2(r, \theta, Z) + U_z^2(r, \theta, Z) \right)^{1/2} \right]$$

여기서, dS_5 는 전단경계에서의 속도불연속면의 미소면적을 나타낸다.

○ 전단경계면 Γ_6, Γ_7

영역 III-1과 III-2, 영역 III-2와 III-3, 영역 IV-1과 IV-2, 영역 IV-2와 IV-3의 경계는 반경방향 속도불연속면으로 되고 이 면에서의 속도불연속량 $\Delta V_{\Gamma s6}, \Delta V_{\Gamma s7}$ 및 전단에너지 소비율은 다음과 같이 된다.

$$\dot{W}_{s6,7} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{S_{6,7}} |\Delta V_{\Gamma s6,7}| dS_{6,7} \quad (51)$$

$$|\Delta V_{\Gamma s6,7}| = |U_r(r, \theta^* + 0, Z) - U_r(r, \theta^* - 0, Z)|$$

여기서, 영역 III-1과 III-2, 영역 IV-1과 IV-2의 경계에서는 $\theta^* = \theta_1 + \delta(Z)$ 이고, 영역 III-2와 III-3, 영역 IV-2와 IV-3의 경계에서는 $\theta^* = \theta_1 + \theta_2$ 이다.

2.4.3 마찰에너지 소비율

○ 영역 I, II, III, IV에서의 마찰경계면 Γ_8

콘테이너와 다이임구면에서의 마찰손실이 있으며, 상대미끄럼 속도 $\Delta V_{\Gamma fi}$ 에서의 마찰에너지 소비율은 다음과 같다.

$$\dot{W}_{fi} = \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{f_i} |\Delta V_{\Gamma fi}| dA_i, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (52)$$

$$|\Delta V_{\Gamma fi}| = \left[\left(U_z^2(Z) + U_\theta^2(RS, \theta, Z) + U_r^2(RS, \theta, Z) \right)^{1/2} \right]$$

여기서, dA_i 는 마찰면의 미소표면적을 나타낸다.

○ 영역 V에서의 마찰경계면 Γ_9

$$\dot{W}_{f9} = \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{f_9} |\Delta V_{\Gamma f9}| dA_9 \quad (53)$$

$$|\Delta V_{\Gamma f9}| = \left[\left(U_z^2(Z) + U_\theta^2(RS, \theta, Z) \right)^{1/2} \right]$$

여기서, dA_9 는 평기어 다이텐드부의 미소표면적을 나타낸다.

○ 영역 VI에서의 마찰경계면 Γ_{10}

$$\dot{W}_{f10} = \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{f_{10}} |\Delta V_{\Gamma f10}| dA_{10} \quad (54)$$

$$|\Delta V_{\Gamma f10}| = \left[\left(U_z^2(Z) + U_\theta^2(RS, \theta, Z) \right)^{1/2} \right]$$

여기서, dA_{10} 는 헬리컬기어 다이텐드부의 미소표면적을 나타낸다.

2.4.4 전체에너지 소비율

½ 피치에 대한 에너지 소비율을 기어 전체로 확장해서 구한다. 즉, 전체 에너지 소비율은 식 (55)로 되고,

$$J^* = 2N (\sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_f) \quad (55)$$

평균 펀치압력과 압출하중은 다음 식으로 구해진다.

$$P_{avg} = \frac{J^*}{A_r V_0} \quad (56)$$

$$L = \frac{J^*}{V_0} \quad (57)$$

여기서, A_r 은 펀치면적, V_0 는 펀치 하강속도이고, L 은 압출하중이다.

3. 실험장치와 실험방법

3.1 성형 치차

본 논문에서는 새로운 헬리컬기어 성형방법을 적용하기 위해서 성형대상으로 한 기어는 자동차의 자동변속기에 사용되는 롱 피니언(long pinion)이라 불리는 헬리컬 기어의 일종으로 Table 1에 그 계원을 나타낸다.

Table 1 Dimension of helical gear

Transverse module (M)	1.466185
Number of teeth (N)	20
Transverse pressure angle(ϕ)/°	21.82975
Helix angle (β)/°	23.6260 (R/H)
Dia. of standard pitch circle/mm	29.3237
Dia. of base circle /mm	27.2520
Dia. of bore /mm	16

3.2 전극봉과 금형설계 제작

Table 1과 같은 자동차 변속기용 헬리컬기어를 압출하기 위해서 먼저, 베릴륨동(Cu-Be)으로 전극설계, 제작을 시도했다. 그림 5(a), (b)는 평기어와 헬리컬기어의 전극설계용 호빙과 셰이빙가공 설계데이터로서 헬리컬기어 압출금형에서는 방전가공시의 과방전(over burn)량, 래핑 가공여유, 압출시 금형의 탄성변형량 및 압출후 소재의 탄성회복량 등을 예측하여 초기 전극설계 프로그램의 입력사항으로 하고 치형은 전위기어 그리고, 치형 기준단면은 축직각 방식을 채택하였다. 그리고, 그림 6은 전극설계 프로그램의 결과를 이용한 전극설계 도면이다.

방전가공용 전극을 호빙과 셰이빙가공을 거쳐서 실제 제품과 유사하게 제작하였다. 이렇게 제작된 전극으로 압출다이 모재를 직류 전동기를 이용한 수치제어 3축 방전기에 고정시켜 방전가공한 후, 전극에 다이아몬드 분말 페이스트(diamond powder paste)를 칠한 상태로 금형속을 래핑하여 그림 7과 같은 최종금형을 완성했다.

>>> INPUT DATA FOR SPUR GEAR DESIGN <<<		
NO.	ITEM	DIMENSION (mm)
(1)	TOOTH NO. (PINION)	Z = 20
(2)	MODULE	M = 1.466185
(3)	PRESSURE ANGLE	$\alpha_n = 20$
(4)	AMOUNT OF ADDENDUM MOD.(P)	$a = 0.8$
(5)	FIN (BALL) DIAMETER	$Bd = 2.381$
(6)	BACLASH (MINIMUM)	J = 0.8
(7)	OUTER DIAMETER	$D_o = 32.14$

Do you want input amendment ? (y/n) =
 (A) Over pin diameter (B) Between pin diameter
 What key do you want (A or B) ?

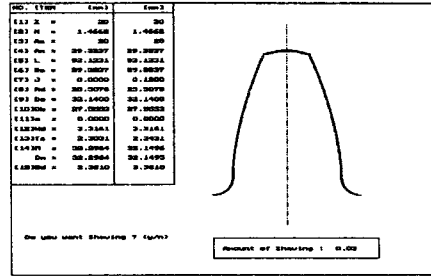


그림 5(a) CAD 프로그램에 의한 평기어의 전극도면설계를 위한 호빙 및 셰이빙가공용 입, 출력데이터

>>> INPUT DATA FOR HELICAL GEAR DESIGN (TRANSVERSE) <<<		
NO.	ITEM	DIMENSION (mm)
(1)	TOOTH NO. (PINION)	Z = 20
(2)	MODULE	M = 1.466185
(3)	PRESSURE ANGLE	$\alpha_n = 21.82975$
(4)	HELIX ANGLE	Beta = 23.6260
(5)	AMOUNT OF ADDENDUM MOD.(P)	$a = -0.875$
(6)	FIN (BALL) DIAMETER	$Bd = 2.381$
(7)	BACLASH (MINIMUM)	J = 0.8
(8)	OUTER DIAMETER	$D_o = 32.14$

Do you want input amendment ? (y/n) =
 (A) Over pin diameter (B) Between pin diameter
 What key do you want (A or B) ?

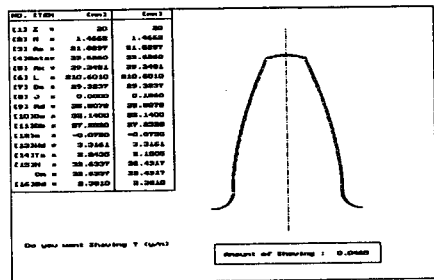


그림 5(b) CAD 프로그램에 의한 헬리컬기어의 전극도면설계를 위한 호빙 및 셰이빙가공용 입, 출력데이터

금형은 압출시의 고압력을 견디기 위해 2중 보강링으로 열박음했다. 다이인서트(die insert)는 열간 다이스강인 STD61종으로 하고 내경은 ϕ 33.5 mm, 제 1 보강링도 STD61, 제 2 보강링은 SCM4로 제작했다. 다이 인서트는 응력집중이 예상되는 부분이므로 가로분할하여 설계·제작을 행했다. 펀치는 그림 8과 같이 펀치와 맨드릴이 분리되는 분리형 펀치를 제작하고, 펀치는 STD61, 맨드릴은 SKH9종으로 한다.

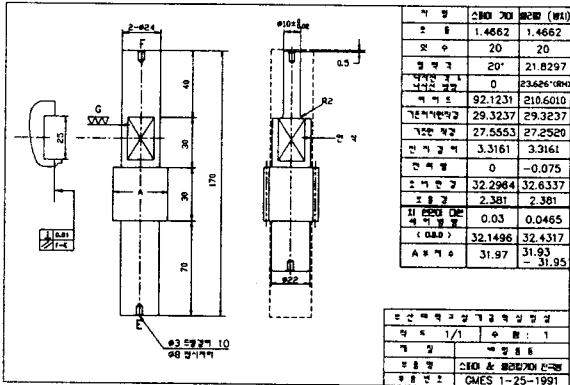


그림 6 방전가공용 평기어와 헬리컬기어의 전극설계도면

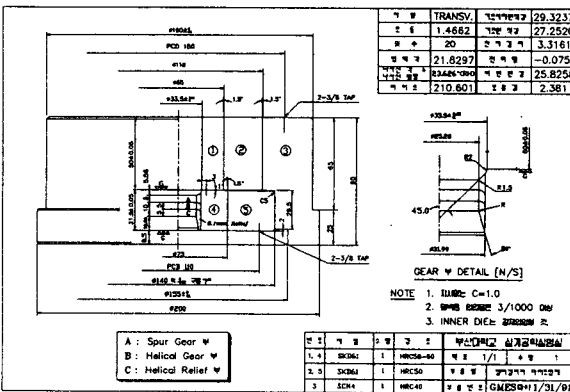


그림 7 헬리컬기어 압출다이와 컨테이너의 도면

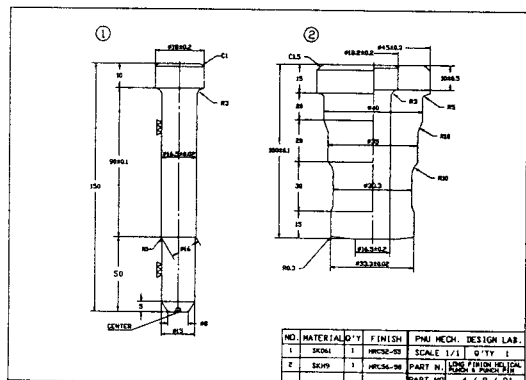


그림 8 기어압출용 펀치 및 만드렐의 도면

3.3 실험

실험에 사용한 소재는 Table 2 와 같은 화학적 조성을 지닌 알루미늄합금(AL2218), 저탄소강(SM10C) 및 크롬몰리브덴강(SCM21)을 선택하여 봉재를 그림 9(a)와 같이 선반가공으로 제작하였다. 이렇게 가공된 소재는 그림 10과 같이 질소

분위기(N₂ atmospheric furnace)속에서 SCM21 소재는 780°C로 가열된 후 3시간동안 유지시켜서 시간당 30°C씩 냉각하여 720°C에서 6시간동안 유지시킨 다음 이를 450°C까지 로속에서 냉각시킨 후, 공기중에서 냉각하여 구상화 풀림처리하였다. 그리고, SM10C는 760°C로 가열한 후 2시간동안 유지시킨 후 3시간동안에 650°C로 노냉한 다음 이를 300°C에서 공랭하여 연화풀림시키고, 알루미늄합금은 380°C에서 약 4시간동안 풀림처리를 하고 노냉시켰다.

Table 2 The chemical compositions of billet materials

Mat.	Composition (%)											
	Fe	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
AL2218	0.28	.051	.01	-	-	7.51	-	-	-	88.95	2.43	-
SI0C	99.305	.051	.399	0.0156	0.011	0.142	.051	-	-	0.009	0.016	-
SCM21	97.80	.148	.621	<0.01	<0.01	0.185	.068	.857	.149	0.043	0.117	<0.01

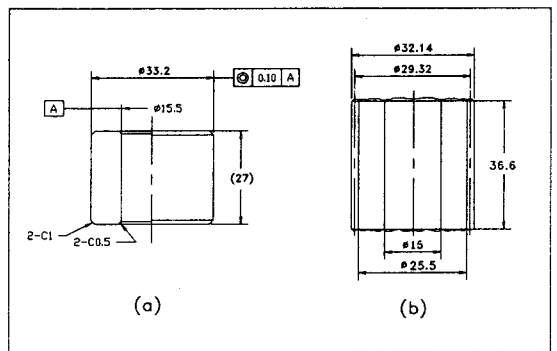


그림 9 (a)소재와 (b)압출된 헬리컬기어의 개략도

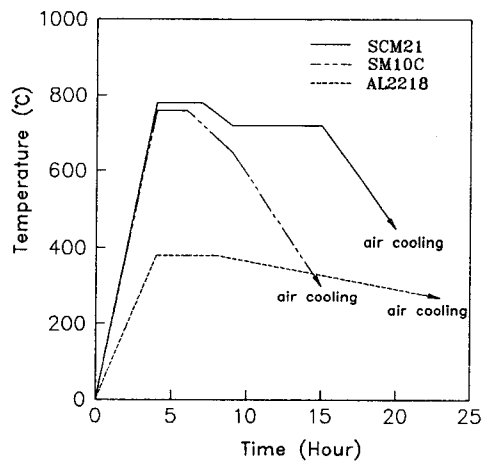


그림 10 소재의 구상화소둔 열처리사이클

소재의 유효응력-변형도 관계를 알기 위하여 압축시험에서 얻은 하중-변위 관계를 최소 자승법(least square method)을 이용하여 커브 피팅(curve fitting)한 결과 다음의 관계식을 얻었다.

$$AL2218 : \bar{\sigma} = 37.795 \frac{\epsilon^{0.2734}}{\epsilon} \quad (\text{Kg/mm}^2)$$

$$SM10C : \bar{\sigma} = 67.354 \frac{\epsilon^{0.2320}}{\epsilon} \quad (\text{Kg/mm}^2) \quad (58)$$

$$SCM21 : \bar{\sigma} = 76.231 \frac{\epsilon^{0.2481}}{\epsilon} \quad (\text{Kg/mm}^2)$$

마찰상수를 구하기 위해서 링 압축시험을 행하였다. 링 압축시험에 사용된 시편은 압출소재와 동일한 소재를 외경 25 mm, 내경 12.5 mm, 높이 8.33 mm 로 비가 6 : 3 : 2 가 되도록 제작하였다. 압출소재와 동일하게 풀림처리된 시험소재들은 본데라이트, 본데류베 피막처리를 한 후, 윤활제는 폴루오렌이 5-6 % 함유된 라멜라 구조를 갖는 은회색의 이황화몰리브덴(MoS₂)을 분사하여 압출시험과 동일하게 윤활처리하였다. 링 압축시험 결과 μ 값은 0.1 정도인 것을 알 수 있었다. 압출시험은 제작된 금형을 설치한 200 톤 유압프레스에서 수행하였다. 압출원리는 그림 1에서 첫 단계로 소재내로 삽입된 맨드렐을 에워싸고 있는 슬리브 펀치에 의해 압출력을 소재에 전달시킴으로써 기어가 부분적으로 압출된다. 이러한 단계 후에, 맨드렐과 슬리브 조립체는 적절한 시기에 부분적으로 압출된 소재를 벗어나기 위해 다이 조립체로부터 끌어내고, 두번째 소재가 다이조립체로 삽입되어진다. 그 때 두번째 압출이 초기 빌렛의 압출을 완전하게 하기 위해서 수행되고, 두번째의 소재는 부분 압출되어 첫번째 소재의 첫번째 압출시와 같은 모양을 가지면서 압출이 수행된다.

생산공정에서 이들 단계들은 연속적⁹ 과정을 반복한다. 압출이 진행되는 동안에 맨드렐부가 완전히 소재를 관통하여 나오고, 다이의 기어가 있는 부분을 넘어서 돌출된다. 이와 같이 압출이 진행되는 동안에 압출품의 내경은 맨드렐의 몸체 직경에 의해 내면으로의 금속유동이 조절되어진다.

맨드렐 렌드부는 압출품으로부터 맨드렐이 빠져나올 때 압출품의 구멍내에서 사이징 기능을 수행한다. 이 기능은 또한 미리 부분적으로 압출된 기어내로 맨드렐을 삽입할 때도 행해진다. 이와 같은 연속공정을 하면서 기어는 압출된다. 압출성형된 헬리컬기어는 양끝면을 선삭하고, 내경면을 셰이빙 아머(arbor)에 맞도록 리밍하여 셰이빙가공한다. 압출된 기어, 셰이빙된 기어와 전면 칩탄처리된 기어는 기어검사기에서의 각종 오차와 오버린 경(O.B.D) 등 기어정밀도를 측정하고, 금속조직과 기계적 성질을 조사한다.

4. 결과 및 고찰

그림 1과 같이 새로운 헬리컬기어의 성형방법으로 된 실험 장치로 그림 9(a)와 같은 소재를 압출가공하여 (b)와 같은

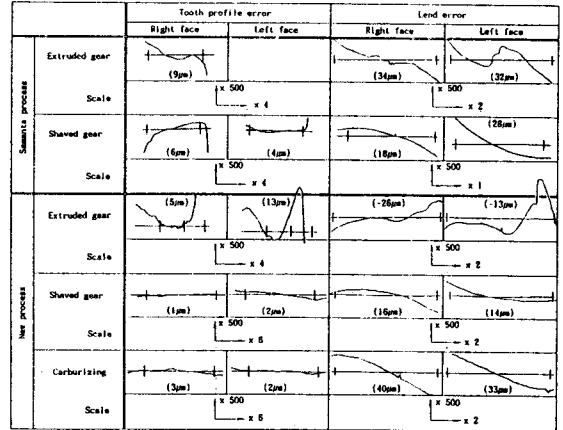


그림 11 치형과 리이드오차의 측정선도

헬리컬기어를 성형하였다. SCM21 소재로서 사만타공정과 새로운 성형공정으로 압출하고, 셰이빙가공을 한 후의 치형오차와 리이드오차를 비교하고, 마무리가공된 기어를 전면 칩탄처리한 후의 치형과 리이드오차를 그림 11에 나타내고, 각종 치형검사치와 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 여기서, 사만타공정으로 압출후의 오른쪽면의 치형오차는 KS 기어규격의 급수 3급에 해당되며, 이빨의 오른쪽면과 왼쪽면의 리이드오차는 7급에 해당되었다. 그러나 그림 11에 보는 바와 같이 이빨의 왼쪽면의 치형오차는 기어의 규격을 크게 벗어났고, 피치오차는 측정조차 되지않았다. 그러나, 새로운 공정으로 실험한 결과 이빨의 오른쪽면의 치형오차는 2급, 리이드오차는 6급에 해당하며 왼쪽면의 치형오차는 4급, 리이드오차는 3급에 해당되었다. 이는 나선각이 오른쪽 방향으로 압출이 진행되면서 이빨의 오른쪽면은 다이면에 접하여 나선 각 방향으로의 소성변형이 일어나 성형되므로 치형오차가 작은 반면, 이빨의 왼쪽면은 다이의 오른쪽면에서 역으로 차올라와 다이공극을 채우면서 성형되므로 다이면에 접하지 않는 부분도 생기게 되어 불완전하게 치형이 성형되기 때문으로 추측된다. 압출후에 셰이빙 마무리가공된 기어의 정도를 측정한 결과, 사만타공정에서는 단일피치오차는 오른쪽과 왼쪽면이 각각 3, 4급, 피치변동이 양쪽 모두 4급 등 이빨의 오른쪽면과 왼쪽면의 차이가 거의 없었다. 따라서 셰이빙가공후의 기어검사 결과를 종합해 보면 KS 기어급수 5급 정도에 해당된다. 이에 반해 신공정에서의 셰이빙가공 후의 단일피치오차는 양쪽면이 모두 3급이며, 치형오차와 리이드오차의 정밀도가 그림 11에서 보는 바와 같이 사만타공정에서 보다 향상되었다. 이는 신공정에서는 먼저 평치차로 성형되었다가 비틀림에 의하여 헬리컬기어로 되므로 치의 급형내 충만도가 사만타공정보다 좋았기 때문이라 생각된다.

Table 3에서 신공정으로 압출된 치형과 셰이빙가공 후의 치형, 전면칩탄처리한 후의 치형검사에서의 오차를 나타내었

다. 여기서, 치흡흔들림(Runout)이 사만타공정의 3급에서 신공정에서는 5급으로 나빠진 이유는 축공의 편심때문이다.

Table 3 Tolerances extruded, shaved and carburized helical gear

Process Tolerance Items	Samanta process				New process											
	Shaved		KS Class		Extruded		KS		Shaved		KS		Carburize			
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L		
Measurement over pin (Pin Dia. ϕ 2.381 mm)	ϕ 32.654				ϕ 32.842				ϕ 32.668							
Single pitch error	8.0	14.4	3	4	22.3	45.4	6	7	9.9	8.5	3	3	12.9	10.9		
Pitch variation	16.5	14.3	4	4	19.1	28.9	5	6	14.0	13.6	4	4	11.1	13.3		
Accum. pitch error	82.7	68.0	6	5	51.6	57.5	4	5	65.7	65.6	5	5	55.7	47.5		
Tooth profile error	6.0	4.0	2	1	5.0	13.0	2	4	1.0	2.0	0	0	3.0	2.0		
Runout	20.0		3		65.2		6		49.6		5		16.5			
Lead error	18.0	28.0	5	6	-26.0	-13.0	6	3	16.0	14.0	4	3	40.0	33.0		

Table 4는 각 소재의 압출전, 후의 마이크로 비커어스경도를 나타내었다. SCM21종의 합금강에 대해서는 압출후 추가공을 거쳐 침탄처리하도록 되어 있다. 이는 최종제품에 대한 열처리로 내마모성을 증대시켜 제품의 수명을 연장시키는 것을 목적으로 하는 표면 경화처리이다. 전면 침탄처리 후의 표면경도는 Hv660 정도의 경도치로써 사용되는 제품의 표면경도 Hv650 이상으로 나타났다.

Table 4 Hardness of billet, extruded and carburized helical gears

Material	Before Ext. (full annealed)	After Extrusion	Hardness increase after extrusion	Carburizing
AL2218	16 (HR _B)	25 (HR _B)	9 (HR _B)	-
SM10C	43 (HR _B)	87 (HR _B)	44 (HR _B)	25.3HR _C
(Samanta) SCM21 (New)	58 (HR _B)	94 (HR _B)	36 (HR _B)	58.4HR _C (662H _v)
	58 (HR _B)	95 (HR _B)	37 (HR _B)	58.1HR _C (656H _v)

원형봉재로부터 헬리컬기어로의 압출에 대하여 원주좌표계를 사용하여 다이의 기하학적 형상을 형상함수로 나타내어 동적가속도장을 유도하고 이를 수치계산하여 상계해를 구하였다. 특히, 치면의 형상함수를 실제의 치형곡선인 인벌류트곡선으로 하고, 나선각(β)과 마찰상수(μ)를 변화시켜 상계해석한 결과를 고찰해 보면 다음과 같다.

그림 12는 실험에 사용한 각 소재에 대한 마찰상수의 변화에 따른 이론치와 실험치의 펀치압출압력을 비교하였다. 여기서, 사만타공정 보다 신공정에서 펀치압출압력이 대략 10% 정도 높게 나타났다. 이는 신공정에서의 다이텐드길이 사만타공정에서 보다 2배이고, 평기어로 성형된 다음 비틀림가공이 시작되어 나선각을 가진 헬리컬기어로 성형되는 전단경계면 Γ_5 에서의 순수전단으로 인한 비틀림 전단에너지 소비율이 크기 때문이다. 그러나, 다이의 강도는 좋아

지기 때문에 상대적으로 금형의 강도가 향상된다. 사만타공정에서는 금형의 원으로 인해 다이입구부 치면이 그림 13(a)와 같이 균열이 일어났고, (b)는 신공정의 평기어와 헬리컬기어부로 된 다이형상 부위를 나타낸 사진이다.

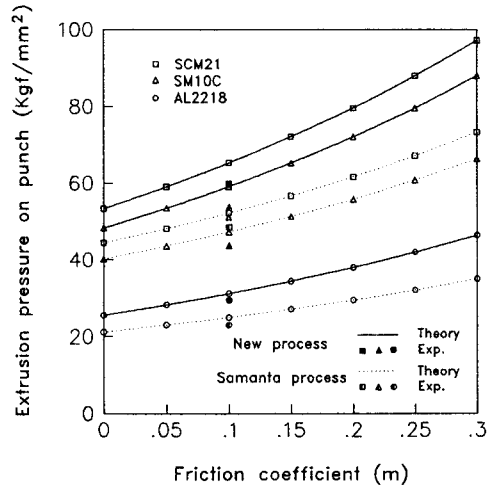


그림 12 마찰상수의 변화에 따른 이론치와 실험치의 펀치 압출압력비교

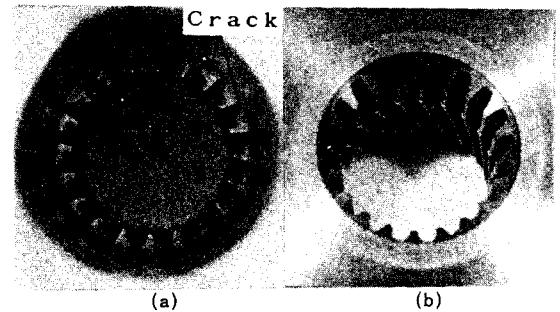


그림 13 (a) 사만타공정의 다이입구부에 생긴 치면 균열과 (b) 신공정의 다이 이증구조 형상 사진

그림 14는 모듈이 1.466185일 때 마찰상수의 영향에 따른 상대압출압력의 변화를 평기어부 다이텐드 각도(α^*)의 변화에 대하여 계산한 결과를 나타낸 것으로, 평기어부 각도가 증가하면 상대압출압력은 감소하게 된다. 또한 마찰조건에 따라서는 각 나선각에 대하여 거의 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그리고, 펀치의 상대압출압력은 각 소재들에 대한 실험범위에서 거의 1로 안정한 값을 나타냈다.

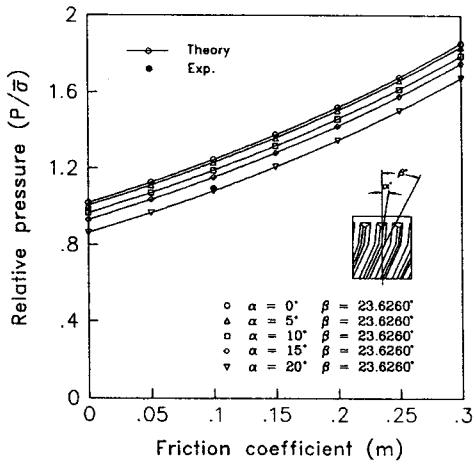


그림 14 마찰상수와 평기어부 다이랜드 각도의 변화에 따른 상대 압출압력

5. 결 론

1. 원형봉재 소재를 헬리컬기어로의 압출하는 공정에 대하여 다이의 형상을 평기어부와 헬리컬기어부의 이중 구조를 함으로써 금형의 강도를 향상시켜 量産을 가능케 하였다.
2. 다이의 형상을 인벌류트곡선으로 하여 동적가용속도장을 유도하고 수치계산으로 상계해를 구하였다.
3. 새로운 공정으로 인한 냉간압출에 의하여 KS 기어급수 6급의 기어를 성형하고, 이를 세이빙가공하여 4~5급에 해당하는 기어를 가공하였다. 이는 사만타공정에서 보다 향상된 정밀도를 얻었다.

이상과 같이 헬리컬기어 압출에 대한 상계정리의 적용결과와 금형설계와 실험결과 등의 유용성은 앞으로 기어의 제조법에 대하여 산업계의 활용과 가공문제 연구에 이용될 수 있겠다.

참고 문헌

1. T.A. Dean and A.R.O. Abdel-Rahman: Int. J. Mach. Tool Des., 21(1981) 2
2. A. Badawy, T. Schultes, P.S. Raghupathi and T. Altan: NAMRC X Conference Proceeding(1982) 191
3. A.M. Sabroff and J.R. Douglas: Annals of the CIRP 31(1982) 1
4. K. Ohga, K. Kondo and T. Jitsunari: Bull. of JSME 28(1985) 244
5. F. Dohmann and O. Traudt: Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, 1081
6. N. Hornmark, J.O.H. Hilsson and C.P. Mills: "Metal Forming", (1970) 227
7. C.A. Stickels and S.K. Samanta: Metals Engineering(1974)
8. J.C. Choi, K.T. Chang: Proc. of 12th Midwestern Mechanical Conf. (1971) 383
9. D.Y. Yang: Int. J. Mech. Sci., Vol. 20(1978) 695
10. M. Kiuchi, M. Ishikawa: J. of JSTP, Vol. 25, No. 282(1984) 722
11. 泉澤 正郎, 吉田 始, 長瀬 康男: 平成元年度 塑性加工春季講演會(1989) 515
12. S. Omori, M. Sueda, H. Furumoto and M. Masumoto: J. of the JSTP, Vol. 32, No. 361(1991) 214
13. J.C. Choi, H.Y. Cho, H.H. Kwon, J.C. Han: J. of KSME, Vol. 15, No. 1(1991) 27
14. J.C. Choi, J.C. Han: (1991) 특허출원중.