

내부세레이션홈을 갖는 스피어 기어의 단조에 관한 연구

최종웅*, 조해용**

A Study on the Forging of Spur Gears with Internal Serrations

Jongung Choi* and Hae-Yong Cho**

ABSTRACT

Numerical calculation tools for forging of gear-like components based on kinematically admissible velocity fields for upper bound method applicable to various deformation features of workpiece in forging processes were suggested. Each one of them deals with unidirectional flow of metal on dies, such as external involute spur gear, square spline, internal serrations. A complex calculation tool of gear-like component forging process was built up by combining these kinematically velocity fields. In this paper, the workpiece with both external and internal teeth is divided into two parts. The deformation of each part is analyzed simultaneously using numerical calculation tool from combined kinematically admissible velocity field. The experimental set-up was installed in a 200 ton hydraulic press. As a result, each kinematically admissible velocity field could be combined with others and the calculated solution are useful to predict the capacity of forging equipment.

Key Words : Upper Bound Method(상계법), Kinematically Admissible Velocity Field(동적 가용속도장), Internal Serration(내부 세레이션), Numerical calculation tool(수치계산용 프로그램), Toothed Mandrel(치형을 갖는 맨드렐)

기 호 설 명

r_d : 내부 맨드렐의 치저원 반경 [mm]

r_r : 외부 치형의 치저원 반경 [mm]

r_n : 중립면 반경 [mm]

u : 편치의 하강 속도 [mm/s]

α_o : 외부 치형의 1/2 피치 각 [rad]

r_o : 내부 치형의 치끝원 반경 [mm]

r_i : 외부 치형의 치끝원 반경 [mm]

t : 순간의 빌렛높이 [mm]

α_i : 내부치형의 1/2 피치 각 [rad]

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과, 학생회원
 ** 충북대학교 기계공학부, NSDM for ERC, 정회원

1. 서 론

정확한 속도비와 작은 구조로써 동력을 전달하는 기어류 부품의 단조에 대하여 상계법을 이용한 외부유동 또는 내부유동의 단순한 일방향의 단조형태에 의한 단조 해석에 있어 현재까지 많은 문헌을 통하여 그 해가 제시되었다⁽¹⁻¹²⁾. 사다리꼴 또는 각형 스플라인과 같은 직선치형을 갖는 외치차 단조를 해석한 Juneja⁽¹⁾, Dean⁽²⁾, Ohga⁽³⁾ 등이 있고, Cho등⁽⁴⁻⁷⁾은 중실 및 중공소재를 사용한 외치형 스피어 기어와 자동차용 펌프에 사용되는 원호기어 및 스플라인 등과 같은 여러 가지 기어류 부품의 단조를 상계해석하였으며 단조 최적조건을 제시하였다. Kondo등⁽⁸⁾은 알루미늄 합금을 사용한 내접 헬릭컬 기어의 단조시 가공압력에 따른 충진율을 이용하여 분류단조법과 간편법을 실험으로써 비교하고 분류단조법이 가공압력을 낮출 수 있는 금형의 구조임을 제시하였다. 또한, Choi 등⁽⁹⁾은 내치형 기어류 부품인 내접 세레이션을 단조할 경우 상계법을 적용할 수 있는 동적 가용속도장과 금형의 구조를 제시하였으며, 이론해석 및 실험을 통하여 인벌류트 세레이션을 단조하는 것이 삼각형 세레이션을 단조하는 것 보다 금형의 충전 및 하중면에서 유리함을 확인하였다. 한편, Ohga등⁽¹⁰⁾이 두 공정으로써 S10C, SCR 및 SNCM과 같은 합금강을 사용하여 외접 스피어 기어의 단조를 실험하여 각각의 재료에 대한 가공압력을 제시하였으며, Choi등⁽¹¹⁾은 합금강을 이용한 내접 스피어 기어의 단조를 상계해석하고 단조공정중 파손이 없이 사용가능한 금형을 설계하였다. 이상에서와 같이 기어류 부품의 단조에 관한 연구는 단순한 일방향의 유동에 관한 연구만이 존재한다. 기어는 그 기능상 항상 축과 연결되어 사용되며 축과의 미끄럼을 방지하기 위해 키, 세레이션 또는 스플라인을 사용한다. 이러한 키, 세레이션 또는 스플라인홈은 주로 절삭가공으로 제작한다. 기어의 내부에 이러한 홈을 기계가공으로써 제작하기 위해서는 기어의 중심에 드릴로써 구멍을 뚫고 다시 브로우칭하는 것과 같은 방법을 사용한다. 그러나 이러한 방법은 재료의 손실 및 가공시간면에서 경제적이지 못하다. 따라서, 최근의 산업발전에 따른 수요증가에 대응할 수 있으며 대량생산이 가능한 비절삭가공에 의한 키, 세레이션 및 스플라인홈의 가공법에 관한 연구가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 이미 제시된 인벌류트 스피어 기어 및 원호기어 등과 같은 외치형 기어류 부품의 단조에 관한 속도장과 삼각형 및 인벌류트 세레이션 형상과 같은 내

치형 기어류 부품의 단조에 관한 속도장을 이용하여 내부에 세레이션 홈을 갖는 기어류 부품의 단조에 적용가능한 동적 가용속도장을 제시하고자 하였다. 제시된 속도장으로 상계해를 구한 후 실험과 비교함으로써 이미 제시된 외치형 기어류 부품의 속도장과 내치형 기어류 부품의 속도장이 내치 및 외치형이 조합된 부품의 단조에 적용가능함을 보이고자 하였다. 또한, 실험에서 각 단계별로 소재의 유동상태를 확인함으로써 이론해석에서 가정한 중립면 형상과 속도장으로부터 구한 중립면 위치의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 이론해석

다이면에 치형이 가공된 다이와 세레이션 형상을 갖는 맨드릴을 사용하여 내부 및 외부유동이 동시에 일어나는 양방향 유동의 단조를 해석하기 위해 각각의 형상에 대하여 이미 제시된 치형의 1/2 피치를 변형영역으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 두가지 형상에 공통적으로 존재하는 축대칭 영역은 해석시 내부 치형에 포함시켜 해석한다. 해석 대상으로 하는 기어류 부품은 상대기어와 맞물려서 동력을 전달하는 외부의 치형이 인벌류트 곡선이며 동력전달시 축과의 미끄럼을 방지하는 세레이션의 형상이 각각 삼각형과 인벌류트 곡선인 스피어기어이다. 이러한 스피어 기어의 단조를 해석하기 위하여 인벌류트 스피어 기어와 내치 세레이션에 대하여 각각 Cho등⁽⁴⁾과

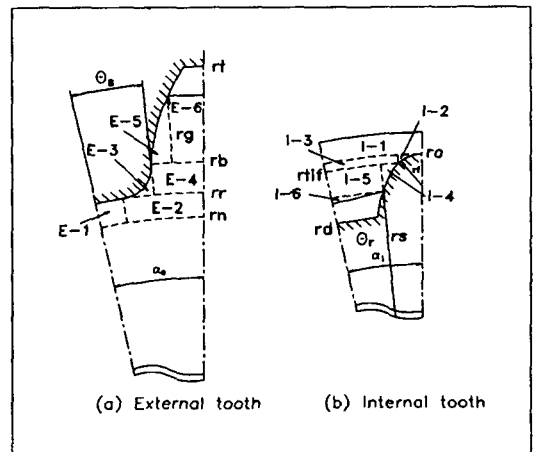


Fig. 1 Schematic drawing of half pitch of internal and external toothed part

Choi등⁹⁾이 제시한 속도장을 사용한다. 단조 진행중 중립면 아래쪽의 소재는 맨드렐의 치형부를 채우기 위해 기어의 중심을 향하여 유동하고 위쪽의 소재는 기어의 치형부를 채우기 위해 외부로 유동한다. 내부와 외부에 치형이 존재하므로 외부치형의 치저원과 맨드렐의 치끝원의 중앙에 중립면이 항상 존재한다고 가정한다.

내부 및 외부치형에 대하여 제시된 속도장을 사용하여 단조진행중 어느 순간의 소재높이에 대한 각 방향의 에너지와 금형의 충진도를 계산한다. 각 방향에 대하여 계산된 에너지를 합하여 전체 단조에너지를 계산하고, 그때의 펀치와 접하는 소재의 면적을 계산하여 펀치에 작용하는 상대압력을 구한다.

본 연구에서 해석대상으로 하는 소재는 해석의 편의를 위하여 다음과 같은 일반적인 가정을 한다.

(1) 재료는 비압축성이며 등방성이다. (2) 단조중 재료는 Von Mises의 항복조건을 따른다. 해석시 소재의 내경과 맨드렐의 치끝원의 직경을, 소재의 외경과 금형의 내경을 각각 일치하게 하여 펀치의 하강과 동시에 내부 및 외부에 존재하는 치형 공간으로 소재가 유동한다고 생각한다. Fig. 2에 본 연구에서 채택한 가공방법의 개략도를 나타내었다.

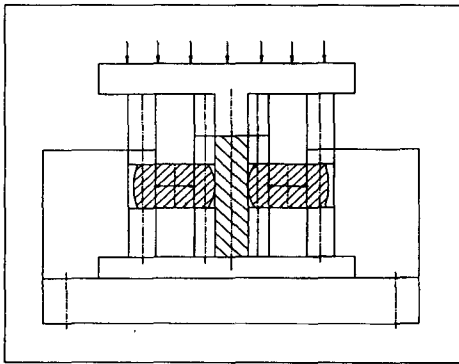


Fig. 2 Principle of working using in this study

단조가 진행되는 동안 축방향의 속도성분(U_z)은 내부 및 외부의 전 변형영역에서 다음과 같이 가정한다.

$$U_z = -\frac{u}{t}z \quad (1)$$

여기서, z는 축방향의 좌표이다.

2. 1 외부기어에 대한 속도장

1) I 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \theta_1, r_n \leq r \leq r_f$)

$$U_r = 0, U_\theta = \frac{u}{t}r\theta$$

2) II 변형영역 속도장 ($\theta_1 \leq \theta \leq \alpha, r_n \leq r \leq r_r$)

$$U_r = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right) \left(\frac{\alpha}{\alpha - \theta_1} \right)$$

$$U_\theta = \frac{ur}{t} \cdot \frac{\theta_1}{\alpha - \theta_1} (\alpha - \theta)$$

3) III 변형영역 속도장 ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_s, r_r \leq r \leq r_b$)

$$U_r = \frac{ur}{2t} + \frac{C_{III}}{r}, U_\theta = \left(\frac{ur}{2t} + \frac{C_{III}}{r} \right) \cdot \cot \phi$$

$\cot \phi$ 를 반경 r에 대한 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\cot \phi = \frac{(r_r + r_f)^4 - (r^2 - r_f^2)^2 - (r^2 - r_r^2) \{ (2r_f + r_f)^2 - r^2 \}}{2(r^2 + r_f^2)^2 \sqrt{(r^2 - r_r^2) \{ (2r_f + r_r)^2 - r^2 \}}}$$

$$C_{III} = \frac{u r_r^2}{2t} \left(\frac{\theta_1}{\alpha - \theta_1} \right) + \frac{u r_n^2}{2t} \left(\frac{\alpha}{\alpha - \theta_1} \right)$$

여기서, $\theta_s = \theta_1 + \theta_f$ 이다.

4) IV 변형영역 속도장 ($\theta_s \leq \theta \leq \alpha, r_r \leq r \leq r_b$)

$$U_r = \frac{ur}{2t} + \frac{C_{III}}{2tr \cdot (\alpha - \theta_s)} + \frac{C_{III} C_2}{(\alpha - \theta_s) r} + \frac{C_{IV}}{r}$$

$$U_\theta = \frac{\alpha - \theta}{\alpha - \theta_s} \left(\frac{ur}{2} + \frac{C_{III}}{r} \right) \cdot \cot \phi$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(r^2 - r_r^2) \{ (2r_f + r_r)^2 - r^2 \}} + 2r_f^2 \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} (\tan^{-1} A + \tan^{-1} B) + \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right)$$

$$- \frac{1}{4(r_r + r_f)^2} \sqrt{(r^2 - r_r^2) \{ (2r_f + r_r)^2 - r^2 \}}$$

$$A = - \frac{(2r_r + r_r) \sqrt{(2r_r + r_r)^2 - r^2} + 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_r^2)}$$

$$B = - \frac{(2r_r + r_r) \sqrt{(2r_r + r_r)^2 - r^2} - 4r_f(r_r + r_f)}{r_r(r^2 - r_r^2)}$$

5) V 변형영역 속도장 ($\theta_s \leq \theta \leq \theta_s + \text{inv}\phi_R, r_b \leq r \leq R$)

$$U_r = \frac{ur}{3t} + \frac{C_V}{r^2}, U_\theta = \left(\frac{ur}{3t} + \frac{C_{VI}}{r^2} \right) (\theta - \theta_s + \phi_r)$$

여기서, $\phi_r = \tan^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}$

$$C_V = \frac{u r_b^3}{6t} + \frac{r_b}{\alpha - \theta_s} \frac{C_1''}{2t} + \frac{C_{III} r_b}{\alpha - \theta_s} C_2'' + C_{IV} \cdot r_b$$

$$C_1'' = C_1 \Big|_{r=r_b}, C_2'' = C_2 \Big|_{r=r_b}$$

6) VI 변형영역 속도장 ($\theta_s + \text{inv}\phi_R \leq \theta \leq \alpha, r_b \leq r \leq R_g$)

$$U_r = \frac{ur}{2t} + C_R \left(\frac{ur}{6t} - \frac{C_V}{r^2} \right) + C_R' \left[\frac{u}{3t} \left(\tan^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2} r}{r_b} - \frac{r_b}{2r} - \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \right) \right. \\ \left. + C_V \left(\tan^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \left(\frac{-1}{r} \right) + \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r^2 r_b} \right) \right] + \frac{C_{VI}}{r}$$

$$U_\theta = \frac{\alpha - \theta}{\alpha - (\theta_s + \text{inv}\phi_R)} \left(\frac{ur}{3t} + \frac{C_V}{r^2} \right) (\text{inv}\phi_R + \phi_r)$$

여기서, $C_R = \frac{\text{inv}\phi_R}{\alpha - (\theta_s + \text{inv}\phi_R)}, C_R' = \frac{1}{\alpha - (\theta_s + \text{inv}\phi_R)}$

$$C_{VI} = \frac{1}{\alpha - \theta_s} \frac{C_1''}{2t} + \frac{C_V}{\alpha - \theta_s} + C_{IV} - C_R \left\{ \frac{u r_b^2}{6t} - \frac{C_V}{r_b^2} \right\}$$

$$\text{inv}\phi_{Rg} = \frac{\sqrt{R_g^2 - r_b^2}}{r_b} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{R_g^2 - r_b^2}}{r_b}$$

2. 2 내부 세레이션에 대한 속도장

(가) 삼각형 세레이션에 대한 속도장

1) I 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \alpha, r_o \leq r \leq r_n$)

$$U_r = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right), U_\theta = 0$$

2) II 변형영역 속도장 ($\theta_s \leq \theta \leq \alpha, R_s \leq r \leq r_o$)

$$U_r = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right), U_\theta = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right) \frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}}$$

$$a = r_i \cdot \sin \phi$$

3) III 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \theta_s, R_s \leq r \leq r_o$)

$$U_r = \frac{ur}{2} - \frac{u}{2\theta_s t} \left[a \sqrt{\frac{r^2 - a^2}{r^2}} + \frac{r_n^2}{r} \sin^{-1} \left(\frac{a}{r} \right) \right] + \frac{C_{III}}{r}$$

$$U_\theta = \frac{\theta}{\theta_s} \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right) \cdot \frac{a}{\sqrt{r^2 - a^2}}$$

4) IV 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \theta_s, R_s \cos \theta_s \leq r \leq R_s$)

$$U_r = \frac{ur}{2} - a' + \frac{C_{IV}}{r}$$

$$U_\theta = \frac{\theta}{\theta_s} \frac{u}{2t} \left(R_s - \frac{r_n^2}{R_s} \right) \cdot \frac{a}{\sqrt{R_s^2 - a^2}} = a' \theta$$

(나) 인벌류우트 세레이션에 대한 속도장

1) I 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \alpha, r_o \leq r \leq r_n$)

$$U_r = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right), U_\theta = 0$$

2) II 변형영역 속도장 ($\theta_s \leq \theta \leq \alpha, r_{if} \leq r \leq r_o$)

$$U_r = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right), U_\theta = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right) \cot \phi$$

여기서, $\cot \phi = \frac{r^2 - D_r}{\sqrt{r^2 A - D_r^2}}, A = 2D_r + 4r_f^2,$

$$D_r = r_o^2 - 2r_o r_f, \theta_s = \angle DOF$$

3) III 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \theta_s, r_{if} \leq r \leq r_o$)

$$U_r = \frac{ur}{2t} - \frac{u}{2t r \theta_s} [K] + \frac{C_{III}}{r}, U_\theta = \frac{\theta}{\theta_s} \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right) \cdot \cot \phi$$

여기서,

$$K = \left(\frac{2D_r^2}{3A^2} + \frac{r^2}{3A} \right) \cdot Q - \frac{D_r}{A} \cdot Q + r_n^2 \cdot \left[\tan^{-1} \left(\frac{D_r Q}{D_r^2 - r^2 A} \right) - \frac{Q}{A} \right]$$

$$Q = \sqrt{r^2 A - D_r^2}$$

$$C_{III} = \frac{u}{2t} \left(\frac{1}{\theta_s} [K_o] - r_n^2 \right), K_o = K \Big|_{r=r_o}$$

4) IV 변형영역 속도장 ($\theta_{R_s} \leq \theta \leq \theta_s, R_s \leq r \leq r_{if}$)

$$U_r = \frac{ur}{3t} + \frac{C_{IV}}{r^2}, U_\theta = \left(\frac{ur}{3t} + \frac{C_{IV}}{r^2} \right) \cdot (\theta - \theta_1 + \phi_r)$$

여기서, $C_{IV} = \frac{u r_{if}^3}{2t} - \frac{u r_{if}}{2t} \frac{1}{\theta_s} [K_{if}] + C_{III} \cdot r_{if}$

$$K_{if} = K|_{r=r_{if}}, \phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \right), \theta_{Rs} = \angle AOB$$

이다.

5) V 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \theta_{Rs}, R_s \leq r \leq r_{if}$)

$$U_r = \frac{ur}{2t} - \frac{\theta_{Rs} - \theta_1}{\theta_{Rs}} \left(\frac{ur}{6t} - \frac{C_{IV}}{r^2} \right) - \frac{1}{\theta_{Rs}} \frac{u}{3t} \left(\frac{r}{2} \tan^{-1} \left(\frac{C_{Rs}}{r_b} \right) - \frac{r_b}{2r} C_{Rs} \right) - \frac{C_{IV}}{\theta_{Rs}} \left(\frac{C_{Rs}}{3t} - \frac{1}{r^2} \tan^{-1} \left(\frac{C_{Rs}}{r_b} \right) \right) + \frac{C_V}{r^2}$$

$$U_\theta = \frac{\theta}{\theta_{Rs}} \left(\frac{ur}{3t} + \frac{C_{IV}}{r^2} \right) \cdot (\theta_{Rs} - \theta_1 + \phi_r)$$

여기서, $C_{Rs} = \sqrt{r^2 - r_b^2}$

5) VI 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \theta_{Rs}, R \cos \theta_{Rs} \leq r \leq R_s$)

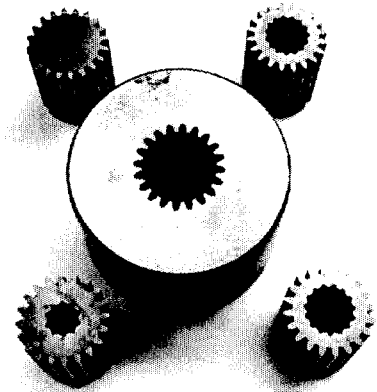
$$U_r = \frac{ur}{2t} - a + \frac{C_{VI}}{r}, U_\theta = \frac{\theta}{\theta_s} \left(\frac{uR_s}{3t} + \frac{C_{IV}}{R_s^2} \right) \cdot (\theta_{Rs} - \theta_1 + \phi_r)$$

여기서, $a = \frac{1}{\theta_R} \left(\frac{uR}{3t} + \frac{C_{IV}}{R^2} \right) \cdot (\theta_{Rs} - \theta_1 + \phi_r)$

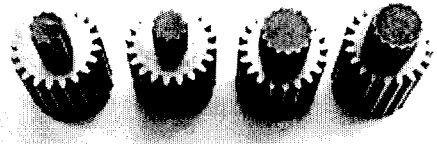
3. 금형제작 및 실험

3.1 금형제작

본 연구에서 실험을 위하여 잇수가 20개, 모듈 2.0, 압력각 20°인 표준치형을 갖는 금형과 KS B 2007에 따른 세척의 내치를 갖는 맨드릴을 Fig. 3과 같이 가공하였다. 위치제어의 형상은 인벌류트 및 소켓 렌치(socket wrench)에 사용되는 삼각형이며 잇수는 각각 10개와 15개이다. 단조중 발생하는 높은 가공압력으로 인한 금형의 파손을 방지하기 위해 치형이 가공된 인서트를 두 개의 보강링으로써 열박음하였다. 인서트는 공구강(SKD11)을 열처리(HRC 58)하였으며, 제 1 보강링은 인서트의 재질보다 인성이 강한 SKD61을 사용하였고, 제 2 보강링은 SCM4를 사용하였다. 펀치는 높은 가공압력을 견디기 위해 인서트와 동일한 재질과 경도로 제작하였다.



(a) die and punches



(b) ejectors and mandrels

Fig. 3 Die and punches

3.2 소재 및 실험

사용된 소재는 시판 Al 2024로서 가공경화를 고려할 경우 다음 식에 의해 유동응력을 계산하였다.

$$\bar{\sigma} = 379.23\bar{\epsilon}^{0.1952}$$

단조시편은 압출된 봉재로부터 외경 35.2mm, 높이 20 mm로 가공하였으며 내경은 내부 치형의 형상과 잇수에 맞도록 중공형사의 시편을 가공하였다. 시편 가공시 금형의 내경보다 시편의 외경을 작게 가공하고 맨드릴의 치끝원 직경보다 시편의 내경을 약간 크게 가공하여 실험시 소재가 금형에 쉽게 들어가도록 하였다. 이렇게 가공된 시편을 질소분위기(N_2 atmospheric furnace)속에서 420℃로 가열한 후 5시간 유지하고 다시 10℃/hr로 260℃까지 냉각하는 풀림처리를 하였다.

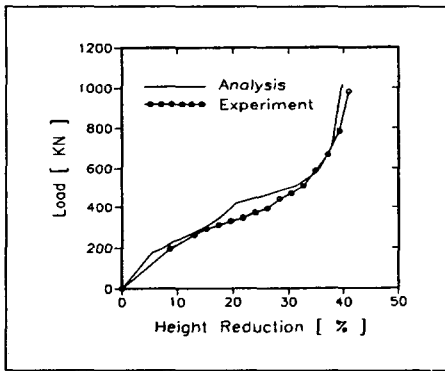
실험장치는 200ton 유압프레스에 설치하였다. 풀림 처리된 소재에 일반적인 인산염 피막처리를 하였고 실험시 마찰의 효과를 줄이기 위해 분무식 이황화 몰리브덴(spray type MoS_2)을 소재 주위에 분무하여 24시간 이상 공기중에서 완전히 건조시킨 후 실험을 행하였다. 시

편을 금형내에 있는 이젝터위에 놓고 상부 램을 하강시켜 소재의 윗면과 펀치의 바닥을 접촉시킨다. 펀치가 하강함에 따라 소재가 금형의 캐비티로 유동하면서 성형이 이루어진다. 펀치의 이송거리에 대한 하중을 기록하며, 단조 중 다이의 채움정도 및 소재의 유동형상과 치높이등의 측정을 위해 중간 몇 단계의 소재를 취출하였다.

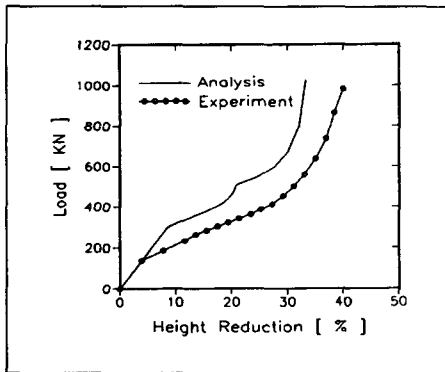
4. 결과 및 고찰

중공소재와 외주면에 인벌류트 스피어 치형을 갖는 금형 및 세레이션형상이 있는 맨드렐을 사용하여 내부와 외부가 동시에 성형되는 양방향 유동단조를 해석할 경우 내부와 외부유동 각각에 대하여 이미 제시된 속도장을 조합하여 상계법을 적용하였다.

Fig. 4는 외치의 잇수가 20, 모듈을 2.0, 압력각 20°,



(a) involute internal serration



(b) triangular internal serration

Fig. 4 Comparison of calculated and measured loads for forging of spur gear with internal shape

인벌류트 및 삼각형 세레이션 형상의 내치의 잇수가 15, 모듈을 1.5, 압력각 45°인 기어를 단조할 경우에 실험과 이론해석의 하중을 압하율에 따라 나타낸 것이다. 예측된 곡선과 실험의 곡선의 경향이 잘 일치하며 단조 최종상태에서 이론해석의 하중이 실험과 잘 일치한다. 따라서, 내부유동 속도장과 외부유동 속도장 등 이미 제시된 두 개의 속도장을 이용하여 내부에 세레이션홈을 갖는 외접 기어류 부품의 단조해석에 필요한 양방향 유동을 해석하기 위한 속도장 합성이 가능하며, 삼각형 및 인벌류트 세레이션과 외접 인벌류트 스피어 기어의 단조에 관하여 적용하여 본 결과 제시된 속도장의 합성으로부터 구한 해는 실제 단조의 하중을 예측하는데 유용하리라 생각된다.

Fig. 5는 내부에 잇수가 10, 15개인 인벌류트 세레이션과 삼각형 세레이션이 있는 스피어 기어를 단조할 경우 이론해석의 하중을 압하율에 따라 나타낸 것이다. 내부치형의 형상에 무관하게 잇수가 증가함에 따라 변형영역의 폭이 작아져서 Choi등⁽⁹⁾이 제시한 것과 같이 최종상태의 단조하중이 감소함을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 6의 단조중 소재의 충전도를 나타내는 그림에서와 같이 동일한 하중에서 내부 세레이션의 잇수가 적은 것이 많은 것보다 캐비티의 충전도가 낮음을 볼 수 있다. 결국 완전한 충진을 얻기 위해서는 잇수가 적은 것이 더 큰 하중이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 하중은 세레이션의 형상에는 크게 관계없음을 볼 수 있다. 이것은 외치에 비하여 내치의 치높이가 낮고 압력각이 크므로 Fig. 10과 같이 성형하중의 대부분이 외치성형에 소요되므로 내치가 전체 단조하중에 미치는 영향이 외치보다 상대적으로 작

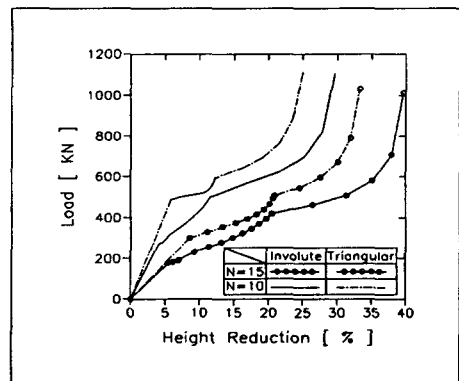
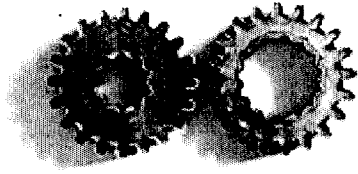
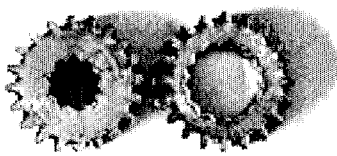


Fig. 5 Load variations with respect to height reduction



(a) involute internal serration



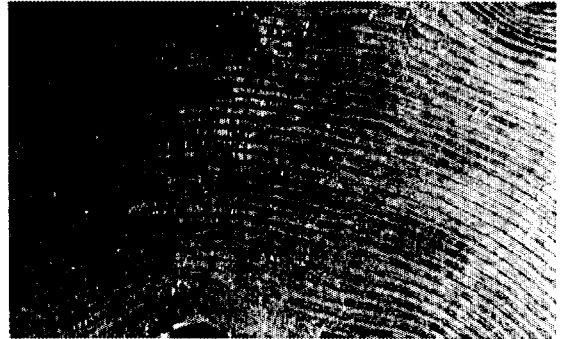
(b) triangular internal serration

Fig. 6 Comparison of die filling

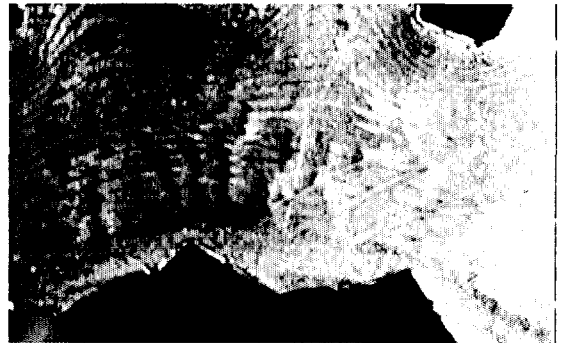
기 때문이라 생각된다. 따라서, 내부 및 외부에 치형이 모두 존재하는 부품을 단조할 경우 하중은 치형의 크기가 작은 내부의 세레이션 형상에 관계없이 치형의 크기가 큰 외치에 지배적인 영향을 받는다.

내부 및 외부유동이 동시에 일어나는 단조는 완전한 금형의 채움을 위하여 높은 하중과 압력을 요하므로 금형의 파손을 방지하기 위해 2단계 가공이 적절하며 특히, 합금강을 이용할 경우 1단계 가공 종료후 변형응력을 제거하기 위한 재열처리공정이 필요하다고 생각된다.

이론해석에서 가정된 중립면 위치의 타당성을 검증하기 위해 성형된 기어의 내부유동을 조사하였고, 중립면의 위치에 따라 그 크기가 좌우되는 내부 및 외부치형의 충진도를 조사하였다. Fig. 7은 단조중 소재의 유동을 나타내는 사진이다. 그림에서와 같이 잇수에 관계없이 외치의 치저원과 맨드レル의 치끝원 중간부분에서 어느 한방향으로 치우친 유동이 관찰되지 않는 것으로 미루어 소재 유동방향의 경계가 되는 중립면이 위치함을 알 수 있으며, 이론해석에서는 중립면이 외치의 치저원과 내치의 치끝원사이의 가운데에 있다고 가정하였다. Fig. 8은 실험과



(a) 10 teeth involute serration



(b) 15 teeth triangular serration

Fig. 7 Photograph of metal flow

이론해석의 내측 및 외측의 치형의 충진도를 압하율에 따라 나타낸 것이다. 외측유동에 있어 압하율에 따라 이론해석치와 실험의 결과가 잘 일치하고 있으나, 내측유동의 실험에서 내부 세레이션이 완전히 성형되는 시점이 잘 나타나 있지않다. 하지만, 외측유동의 이론해석이 실험과 잘 일치하므로 내부 세레이션이 완전히 성형되는 시점은 이론해석에서 예측한 압하율과 비슷한 것이라 생각된다. 따라서, 내부에 치형을 갖는 기어류 부품의 단조시 중립면을 내치와 외치의 중앙에 있다고 가정하는 것이 실제와 차이가 없음을 알 수 있었다. 결국, 중립면이 초기소재의 외경과 내경의 가운데 있음으로 해서 Fig. 9와 같이 치형이 낮은 내부의 캐비티가 외부의 캐비티보다 먼저 완전한 충진이 이루어진다.

Fig. 10은 인벌류우트 세레이션의 잇수가 15개인 경우 압하율에 따른 전체 단조하중과 외치의 단조하중 및 내치의 단조하중을 나타낸 것이다. 전체 단조하중은 외치와 내치의 단조하중을 합한 것이다. 전체 단조하중곡선은 압하율이 증가함에 따라 그 기울기가 변화한다. 압하율에 약 5% 근처에서 첫 번째 기울기의 변화를 볼 수 있다. 이

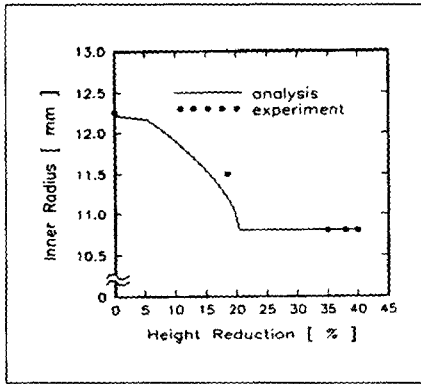
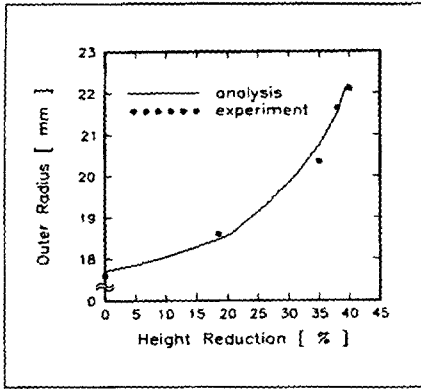
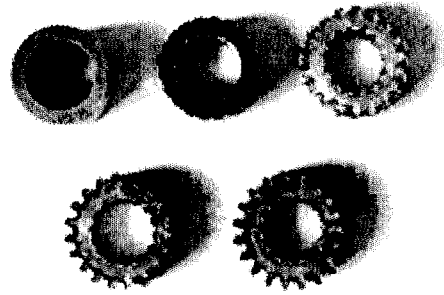
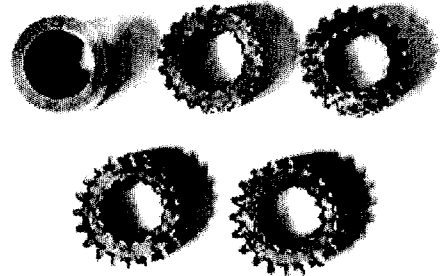


Fig. 8 Comparisons of inner and outer radius with respect to height reduction

것은 소성변형의 시작을 나타낸다. 두 번째는 압하율이 약 7%에 이르렀을때 내부 세레이션의 치형곡선이 Fig. 1과 같이 원호에서 인벌류우트 곡선으로 변화되는 시점을 나타내며 내치의 단조하중 곡선의 기울기는 변하지만 외치의 곡선은 그 기울기가 변하지 않는다. 세 번째 기울기의 변화는 압하율이 13% 근처에서 일어나며 소재가 펀치의 하강으로 인한 유동에 의하여 외치의 기초원을 지나는 시점을 나타낸다. 외치의 단조하중곡선 역시 이점에서 그 기울기가 변한다. 전체 단조하중곡선 기울기의 마지막 변화는 약 22%의 압하율에서 보이며, 여기서 내부로 유동하는 소재가 맨드릴의 치저원에 접촉함을 알 수 있고 그때의 하중은 40 ton이다. 따라서, 제시한 속도장을 이용하여 내부 세레이션의 완전 충전 시점을 예측할 수 있다. 이로써 완전한 내부채움과 부분적으로 외부치형을 채우는 1차 예비성형 후 소재를 재열처리한 뒤 2차로 외부형상을 완전하게 성형하는 2단계가공에서 재열처리를 하기 위한



(a) involute serration



(b) triangular serration

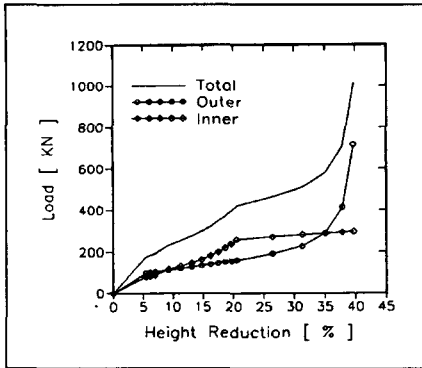
Fig. 9 Photographs of forged parts for each height reduction

1차가공의 종료시점을 결정할 수 있을 것이다.

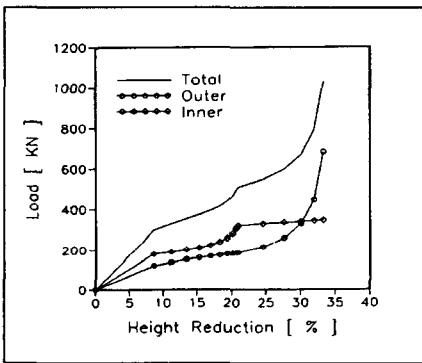
5. 결 론

본 연구에서는 내부에 세레이션층을 갖는 인벌류우트 스피어 기어를 단조할 경우 이미 제시된 두 가지의 속도장을 사용하여 수치해석용 프로그램을 작성하고 해석과 실험을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 내부유동과 외부유동에 대하여 이미 제시된 속도장을 조합하여 내부에 세레이션층을 갖는 스피어 기어의 단조에 적용하였으며, 실험과 잘 일치하는 유용한 결과를 얻었다. 따라서, 제시된 여러 가지의 외부유동 속도장과 내부유동의 속도장을 결합하여 실제 사용가능한 기어류 부품의 단조에 적용 가능함을 알 수 있었다.
2. 내부 치형의 형상은 전체 단조하중에 큰 영향을 미치지 않으며 외부치형의 크기 및 형상에 따라 단조하중이



(a) involute internal serration



(b) triangular internal serration

Fig. 10 Load variations of internal and external shape during forging operation

지배적인 영향을 받는다. 또한, 합금강을 이용할 경우 금형의 파손을 방지하기 위해 소재의 재열처리 과정이 필요하다고 생각된다.

3. 양방향에 동시에 단조 하는 경우 내부와 외부유동의 경계가 되는 중립면은 외부치형의 치저원과 내부치형의 치끝원의 가운데에 있다고 가정하여도 실제와 크게 차이가 없음을 알 수 있었다

4. 양방향 유동에 대하여 제시한 해는 단조중 압하율에 따른 소재의 충전정도를 잘 예측하므로 1차 가공의 종료 시점과 같은 2단계 단조의 해석에 유용한 해를 제공할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. O. P. Grover and B. L. Juneja, 1984, "Analysis of Closed-Die Forging of Gear-Like

Elements", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp.888 ~ 893.

2. N. A. Abdul and T. A. Dean, "An Analysis of the Forging of Spur Gear Forms", Int. J. Machine Tool Design Research, Vol. 26, No. 2, pp. 113 ~ 123, 1986.

3. K. Ohga, K. Kondo and T. Jitsunari, "Research on precision Die Forging Utilizing Divided Flow", Bulletin of the JSME, Vol. 28, No. 244, pp. 2451~2459, 1985.

4. 조해용, 최재찬, 최종용, 민규식, "중공소재의 내경변화에 따른 스피어기어 단조에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제 4 권, 제 3 호, pp. 257 ~ 266, 1995.

5. 조해용, 최종용, 민규식, "중공 및 중실소재를 이용한 스피어라인 단조에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 1 호, pp. 108 ~ 115, 1996.

6. 조해용, 민규식, 최종용, "트로코이드 기어의 단조 해석", 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 9 호, pp. 77 ~ 83, 1996.

7. 민규식, 최종용, 조해용, 이현철, "기어류 부품의 단조에 관한 상계해석", 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 2 호, pp. 102 ~ 112, 1997.

8. K. Kondo, T. Jitsunari and K. Ohga, "Investigation on Cold Die Forging of a Gear Utilizing Divided Flow", Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 244, pp. 2442~2450, 1985.

9. 최재찬, 조해용, 최종용, 민규식, "내부에 세레이션홈이 존재하는 부품의 단조에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 6 호, pp. 142 ~ 148, 1997.

10. 近藤一義, 櫻井武史, "分流方式による内歯ヘリカルギヤの精密冷間型鍛造(第3報)", 塑性加工春季講演會, pp. 15 ~ 16, 1995.

11. 최종용, 조해용, 최재찬, 김병민, "합금강을 이용한 내접 인벌류우트 기어 단조에 관한 연구", 제 3 회 단조심포지움, pp. 135 ~ 146.

12. H. Y. Cho, J. C. Choi, G. S. Min, Y. Choi and J. Choi, "An upper-bound analysis of the closed-die of spur gears", J. of Material Pre-processing Technology, Vol. 67, pp. 83 ~ 88, 1997.