

스퍼어기어의 단조에 관한 상계해석

조해용*, 최재찬**, 최종웅***

* 충북대학교 정밀기계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구센터

** 부산대학교 기계설계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구센터

*** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

Upper Bound Analysis for Forging of Spur Gears

Hae Yong Cho*, Jae Chan Choi**, Jongung Choi***

* Dept. of Precision Mech. Eng., Chungbuk National University, ERC for NSDM

** Dept. of Mech. Des. Eng., Pusan National University, ERC for NSDM

*** Graduated student, Dept. Of Mech. Des. Eng., Pusan National University

Abstract

Forging of spur gears has been investigated by means of upper-bound method. The term forging means forging of spur gears with solid cylindrical billets, hollow billets with flat punch. Kinematically admissible velocity field for forging of spur gears has been proposed in this study. The 1/2 pitch of spur gear has been divided into seven deformation regions, wherein, an involute curve has been introduced to represent the shape of die profile. Especially, neutral surface has been introduced into forging of hollow gears from hollow billets. By using the kinematically admissible velocity field, the power requirements and suitable conditions for forging of spur gears were successfully calculated with numerical method. According to the analysis, the acceptable number of teeth for forging of spur gears is from 15 to 20.

Key Word : Spur Gear Forging(스퍼어기어 단조), Kinematically Admissible Velocity Field(동적가용속도장), Involute Curve(인벌류우트곡선), Neutral Surface(중립면)

1. 서 론

기어는 작은 구조로써 큰 동력을 전달시킬 수 있으므로 시계와 같이 작고 정밀한 부품에서부터 선박용 터빈의 감속기에 이르기까지 그 사용범위가 매우 넓다.

기어의 가공법에는 절삭 가공법과 주조법, 분말야금, 소성가공법 등의 비절삭가공법이 있다. 기어는 주로 절삭가공에 의하여 생산되지만, 최근 대량 생산화와 산업의 발전에 따른 수요의 급증에 대응하기 위해 소성가공에 의한 기어의 성형공정과 그 해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻⁷⁾. 소성가공에 의한 기어의 성형법으로는 압출, 정밀단조 및 분말야금법 등을 들 수 있으며, 특히 최소의 마무리 가공을 요하는 정밀 소형기어의 제조에는 정밀단조가 많은 관심을 끌게 되었다. 그런데, 정밀냉간단조 금형은 가혹한 작업조건하에서 사용되므로 금형의 손상이 심하다. 따라서, 금형 및 펀치에 작용하는 단조하중과 단조압력을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 하중

과 압력을 예측하는 해석법 중 상계해법은 한계해석의 하나로 소성유동을 일으키는데 필요한 실제의 에너지 보다 적어도 같거나 큰 해를 예측하므로 금형 설계에 있어서 유용한 해석법이라 할 수 있다. 이러한 해석법을 이용하여 Juneja⁽¹⁾는 스피어기어의 단조에 관하여 치형을 사다리꼴로 가정하여 속도장을 유도하였으나 속도장이 반경방향 속도성분의 연속조건을 만족시키지 못하였다. 또한, Dean⁽²⁾은 치형을 치의 중심선과 평행한 직선으로 가정하여 속도장을 제시하고 상계해를 계산하였으나, 이 역시 공구면에서의 속도 경계조건을 만족시키지 못하였다. Kondo와 Ohga^(3,4)는 분할 유동을 이용하여 치형을 직선으로 가정한 스피어기어의 단조에 대한 속도장을 제시하였다. 한편, Kiuchi⁽⁵⁾는 UBET를 활용하여, 중공소재가 다이의 치 공간으로 유동되어 가는 과정을 해석한 바 있으며 국내에서는 Choi 등⁽⁶⁾이 필렛의 형상을 반경방향에 직선으로 가정하고 치형 곡선을 인벌류우트 곡선으로 하여 중실 소재로부터 중실 스피어기어의 단조에 관한 속도장을 제시하고 그 상계해를 구하였다.

본 연구에서는 다이의 형상을 실제 치면과 동일한 인벌류우트 곡선으로 하고 필렛을 기초원에서 인벌류우트 곡선과 접하는 원호로 가정하여 중실소재로부터 중실 스피어기어, 중공 소재로부터 중공 스피어기어, 맨드렐이 장착된 펀치를 이용한 중공 소재로부터 중공 스피어기어의 단조에 모두 적용 가능한 속도장을 제시한다. 그리고, 실험을 통하여 제시한 해의 타당성을 밝히고자 한다.

2. 이론해석

스피어기어의 단조에 관한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 펀치, 다이 및 이젝터의 주위에는 치가 가공되어 있으며 단조가 진행되는 동안 이젝터는 고정되어 있고 펀치의 하강운동으로 인하여 다이의 치 공간과 중립면 안쪽으로 소재가 유동된다. 맨드렐이 없는 펀치(평펀치)를 사용하여 중공 원통소재로부터 스피어기어를 단조 하는데 있어서 그 기하학적 관계를 r, θ, z 의 원주좌표계로 나타냈다. 기어의 1/2피치를 7개의 변형영역으로 분할하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 중립면은 반경이 r_n 인 원호로 가정하고 변형이 진행되는 매 단계마다 그 위치를 황금분할법(Golden section method)으로 찾게 된다. 이 중립면의 위치를 적당히 선택함으로써 중실기어 및 맨드렐이 있는 펀치를 사용한 기어단조를 해석할 수 있다.

이론해석을 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 재료는 비압축성이고 등방성인 것으로 가정한다.
- 2) 소재는 Von Mises의 항복조건을 따르는 것으로 가정한다.
- 3) 초기소재의 외경과 기어의 이뿌리원의 직경을 일치하게 잡았다.
- 4) 축방향 속도는 축방향좌표인 z 에 선형적으로 분포하며, 모든 변형영역에서 동일한 것으로 가정한다. 따라서, 축방향 속도는 다음과 같이 주어진다.

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

여기서, z 는 빌렛의 바닥에서 "0"이고, 펀치와 접촉하는 면에서 t 가 된다.

2. 1. 동적 가용속도장

체적일정 조건식을 r, θ, z 원주좌표계로 나타내면 다음과 같이된다.

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + U_r \right), \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z}$$

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \dot{\epsilon}_{zz} = 0 \quad (2)$$

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

이 영역은 Fig. 2에서 나타낸 바와같이 중립면의 아래쪽에 해당되는 축대칭 변형영역으로 원주방향속도는 없다고 가정하면 다음과 같은 속도성분들을 구할 수 있다.

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

2) II 변형영역 속도장 ($0 \leq \theta \leq \theta_1$, $r_n \leq r \leq r_r$)

Fig. 2에서 보듯이 공구면 FG와 접촉하고 있으므로 반경방향 속도성분 U_r 을 0이라 가정하면 속도장은 다음과 같다.

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

3) III 변형영역 속도장 ($\theta_1 \leq \theta \leq \alpha$, $r_n \leq r \leq r_r$)

원주방향속도를 $\theta = \theta_1$ 인 경우 $U_{\theta_1} = U_{\theta_1}$ 이고, $\theta = \alpha$ 에서 $U_{\theta_1} = 0$ 로 가정한다. 또, $r = r_n$ 에서 $U_{r_n} = U_r = 0$ 이다. 따라서, 속도장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_r = \frac{u}{2t} \left(r - \frac{r_n^2}{r} \right) \left(\frac{\alpha}{\alpha - \theta_1} \right), \quad U_\theta = \frac{ur}{t} \cdot \frac{\theta_1}{\alpha - \theta_1} (\alpha - \theta)$$

4) IV 변형영역 속도장 ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_s$, $r_r \leq r \leq r_b$)

원호필렛 부분을 나타내는 변형영역으로서 공구면상에서 공구면에 대해 법선방향의 속도성분이 0이 되어야 한다. 즉, $U_\theta/U_r = \cot \phi$ 이어야 한다. 따라서, 각 방향의 속도성분은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

5) V 변형영역 속도장 ($\theta_s \leq \theta \leq \alpha$, $r_r \leq r \leq r_b$)

$\theta = \theta_s$ 일 때 $U_{\theta_s} = U_{\theta_s}$ 이고, $\theta = 0$ 인 경우 $U_\theta = 0$ 이 되도록 원주방향 속도성분이 θ 에 따라 선형적으로 감소한다고 가정하면 다음과 같은 속도성분을 구할 수 있다.

$$U_r = \frac{ur}{2t} + \frac{C_1}{2tr \cdot (\alpha - \theta_s)} + \frac{C_{IV}}{\alpha - \theta_s} \frac{C_2}{r} + \frac{C_v}{r}$$

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

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

$$C_2 = \frac{1}{2} (\tan^{-1} A + \tan^{-1} B) + \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(2r_f + r_r)^2 - r^2}}{2\sqrt{r_f(r_r + r_f)}} \right) - \frac{1}{4(r_r + r_f)^2} \sqrt{(r^2 - r_r^2) \{ (2r_f + r_r)^2 - r^2 \}}$$

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

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

6) VI 변형영역 속도장 ($\theta_s \leq \theta \leq \theta_s + inv\phi_R$, $r_b \leq r \leq R$)

Fig. 2에 나타낸 바와같이 인벌류우트곡선에 해당되는 영역으로 반경방향속도 성분과 원주방향 속도 성분은 인벌류우트곡선상(공구면상)에서 서로 수직이어야 하고, 공구면에 대해 법선 방향의 속도 성분은 크기가 0 이 되어야 한다. 즉,

$$U_\theta \cos \phi_R - U_r \sin \phi_R = 0 \text{ 이 된다.}$$

인벌류우트 곡선상에서는 θ 가 r 만의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \theta_s + \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}$$

따라서, 원주방향 속도 성분은 인벌류우트 곡선 상에서는 r 만의 함수가 되고, 변형영역 내에서는 r 과 θ 의 함수가 된다고 가정하고, 이것을 만족하는 각 방향의 속도 성분을 구하면 다음과 같다.

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

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

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

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

7) VII 변형영역 속도장 ($\theta_s + inv\phi_R \leq \theta \leq \alpha$, $r_b \leq r \leq R$)

원주방향 속도가 $\theta = \theta_s + inv\phi_R$ 에서 $U_{\theta_{VI}} = U_{\theta_{VII}}$ 이고, $\theta = \alpha$ 에서 $U_\theta = 0$ 이 되도록 선형적으로 변화되어 간다고 가정한다. 또한, 이 변형영역에서는 $inv\phi_R$ 는

상수이다. 따라서, 각 방향의 속도성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 U_r &= \frac{ur}{2t} + C_R \left(\frac{ur}{6t} - \frac{C_{VI}}{r^2} \right) \\
 &+ C_R' \left[\frac{u}{3t} \left(\tan^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \frac{r}{2} - \frac{r_b}{2r} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \right) \right. \\
 &\left. + C_{VI} \left(\tan^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \left(\frac{-1}{r} \right) + \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r^2 r_b} \right) \right] + \frac{C_{VII}}{r} \\
 U_\theta &= \frac{\alpha - \theta}{\alpha - (\theta_s + inv\phi_R)} \left(\frac{ur}{3t} + \frac{C_{VI}}{r^2} \right) (inv\phi_R + \phi_r)
 \end{aligned}$$

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

$$C_{VII} = \frac{1}{\alpha - \theta_s} \frac{C_I}{2t} + \frac{C_{IV} C_2}{\alpha - \theta_s} + C_V - C_R \left\{ \frac{u r_b^2}{6t} - \frac{C_{VI}}{r_b^2} \right\}$$

$$inv\phi_R = \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b}$$

이상에서와 같이 인벌류우트 곡선과 원호 필렛을 갖는 치형에 대해 제시한 속도장은 속도경계조건과 체적일정조건을 모두 만족하는 동적 가용속도장이다.

2. 2. 상 계 해

2. 2. 1. 내부에너지 소비율(\dot{W}_F)

각 변형영역의 내부에너지 소비율은 다음 식과 같이 구한다.

$$\dot{W}_{Pi} = \int_V \sigma_o \dot{\epsilon} dV \quad (3)$$

여기서, 하첨자 i 는 각 변형영역을 나타낸다. 즉, $i = 1 \sim VII$ 이다. 유효변형을 속도는 다음과 같이 구한다.

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2 + 2(\dot{\epsilon}_{r\theta}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta z}^2 + \dot{\epsilon}_{rz}^2)}$$

여기서, 각 방향의 수직변형을 속도성분은 식(2)에서 구하고, 전단변형을 속도성분은 다음과 같이 구한다.

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{U_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} \right), \quad \dot{\epsilon}_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} \right)$$

$$\dot{\epsilon}_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) \quad (4)$$

위에서 구한 각 성분을 식(3)에 대입하고, 수치적분하면 각 변형영역의 내부에너지 소비율을 구할 수 있다.

2. 2. 2. 전단에너지 소비율(\dot{W}_S)

각 영역의 전단에너지 소비율은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\dot{W}_S = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \int_{S_A} |\Delta v| dA \quad (5)$$

여기서, $|\Delta v|$ 는 속도 불연속량이고, dA 는 속도 불연속면상의 미소면적이다.

2. 2. 3. 마찰에너지 소비율 (\dot{W}_F)

각 변형 영역과 경계면에서의 마찰에너지는 다음 식에 의해 구한다.

$$\dot{W}_F = \frac{m\sigma_o}{\sqrt{3}} \int_{F_A} |\Delta v| dA \quad (6)$$

여기서, dA 는 마찰이 존재하는 곳의 미소 면적이고, m 은 마찰상수, $|\Delta v|$ 는 공구와 소재 사이의 속도 차이이다.

2. 2. 4. 전체에너지 소비율(\dot{W}_T)

전체에너지 소비율은 위에서 구한 각 에너지 소비율을 모두 합한 것이다. 즉,

$$\dot{W}_T = \sum \dot{W}_P + \sum \dot{W}_S + \sum \dot{W}_F \quad (7)$$

상대압력에 관한 식은 다음과 같다.

$$\frac{P_{av}}{\sigma_o} = \frac{\dot{W}_T}{\sigma_o \cdot u \cdot A} \quad (8)$$

A 는 단조 진행중 어느 순간의 편치와 소재의 접촉면적이다.

3. 결과 및 고찰

원형봉재로부터 스피어기어로의 단조에 대하여 원주좌표계를 사용하여 동적가용속도장을 유도하고, 이를 수치해석하여 상계해를 구하였다. 이는 중실기어 및 맨드렐이 있는 편치를 사용한 중공기어단조중에 모두 사용 가능한 종합적인 속도장이다. 본 연구에서는 잇수 10~35, 모듈 1.0~3.0, 압력각 20°, 기어 두께 10 mm인 기어에 대하여 상계해석하였다. 해석시 치 높이는 2.25M, 마찰상수는 0.0, 0.1로 하였다.

소재는 Al2024를 사용하였으며 가공경화를 고려할 경우는 다음 식에 의해 유동응력을 계산하였다⁽⁹⁾.

$$\bar{\sigma} = 358.0 (\bar{\epsilon})^{0.156} \text{ MPa} \quad (9)$$

소재의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 중공소재로부터 중공 스피어기어를 단조할 경우 편치는 모두 평편치를 사용하였다.

Fig. 3(a),(b)는 중공소재를 이용한 중공 스피어기어의 단조시 상대압력과 하중을 소재의 직경비(D_i/D_o)에 따라 나타내었다. 상대압력과 하중은 소재의 직경비에 관계없이 그 변화하는 양상이 거의 비슷하다. 따라서, 본 연구에서는 중공소재를 사용할 경우 직경비를 0.35로 하여 계산하였다.

Fig. 4는 잇수가 15개, 모듈 2.0, 마찰상수 0.1인 경우 중공소재와 중실소재를 사용하여 스피어기어를 단조할 경우에 대해 상대압력의 변화를 계산한 결과로서, 중공소재로부터 중공기어의 단조가 중실소재의 단조보다 단조 초기의 상대압력이 낮고, 최종상태의 상대압력은 비슷한 것을 볼 수 있다. 따라서, 기어를 단조할 경우에는 중공소재를 사용하는 것이 낮은 상대압력으로 단조가 가능한 것을 알 수 있다. 단조가

진행되어 압하율이 32% 부근에서 중공소재의 상대압력이 중실 소재의 경우와 크기가 거의 같아지며 이후로는 중실 소재의 단조 경우와 유사한 경향을 나타내는 것은 Fig. 5에서와 같이 압하율 32% 근방에서 소재의 내경(r_i)이 감소하여 거의 0으로 되기 때문에 중공소재가 중실 소재의 경우와 비슷한 양상을 보이는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 중공소재를 이용한 중공 스피어기어의 단조시, 마찰상수가 0.0 일 때 잇수와 모뿔울에 대한 상대압력의 관계를 압하율의 변화에 따라 나타내었다. 여기서는 특정 모뿔울에 대해 최종상태의 상대압력이 가장 낮은 잇수를 찾을 수 있으며 이것으로 각 모뿔울에 대해 단조가 가능한 잇수의 범위를 결정할 수 있다. 그림에서 각 모뿔울에서 최종상태의 상대압력이 가장 낮은 잇수의 범위는 15~20개 사이이다.

Fig. 7은 Al2024를 직경 26 mm, 두께를 중실소재의 경우 13.86 mm 중공소재의 경우는 15.67 mm 중공소재의 내경을 9 mm로 가공하여 여러 단계의 압하율에 따른 치형의 성형과정을 나타낸 실험결과로 그림에서는 잘 나타나 있지 않지만 펀치와 이젝터면에서의 마찰로 인한 배부름현상(barreling)을 관찰할 수 있었다. 또한 펀치쪽의 치형이 이젝터쪽의 치형보다 양호함을 볼 수 있었다. 이는 운동펀치와 고정펀치면에서의 마찰상수가 달라짐에 의한 것이라 짐작된다. 따라서 양쪽에서 압력을 가하는 복동 프레스에 의하여 단조하는 것이 치형의 성형에 유리하다는 것을 짐작할 수 있다.

Table 2 와 Table 3은 각각의 압하율에 대한 소재중심부와 치형부의 경도를 나타낸 것으로 단조가 진행되어 압하율이 커짐에 따라 경도가 증가하고, 중공소재가 중실소재보다 치 부분을 완전히 채우기 위한 압하율이 더 크기 때문에 가공경화가 중실소재보다 더 심한 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Al2024의 중공과 중실 스피어기어의 단조실험과 이론해석의 결과를 비교한 것이다. 그림에서 가정한 속도장에 의한 상계해석의 하중과 실험의 하중이 압하율에 따라 변화하는 양상은 비슷하지만 크기는 해석에 의한 것이 더 크다. 또한, 해석에 의한 압하율 보다 실험에 의한 압하율에 크게 나타나고 있는데 이것은 해석에서는 고려할 수 없는 다이와 펀치사이 틈새로의 소재유동과 실험장비의 강성에 의한 단성변형량에 의한 것, 기타 마찰상수의 가정등에 의한 것으로 생각된다. 그 결과 제시한 속도장은 스피어기어 단조의 상계해로서 타당하다고 생각된다.

Fig. 9는 열처리 후 소재와 단조된 기어의 치형부분의 현미경 조직사진으로 원소재는 열처리되어 구상화된 조직을 관찰할 수 있으며, 단조된 기어의 조직에서는 전위조직과 섬유상유동(fiber flow)을 관찰할 수 있고 원소재에 비하여 조직이 매우 치밀하게 된 것을 볼 수 있다. 이는 Table 2 와 Table 3의 경도값의 결과와 잘 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 스피어기어 단조를 상계해석하기 위해 치형을 실제 기어의 치형인 인벌류우트 곡선으로 하고 필렛을 원호로 가정하여 속도장을 유도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평펀치를 이용한 중실 기어 및 중공 기어 단조, 맨드렐이 장착된 펀치를 이용한 중공 기어 단조 등에 모두 적용 가능한 동적 가용속도장을 유도하였다.
- 2) 스피어기어의 단조 공정에서 공정 변수들의 변화에 의하여 단조 하중과 압력을 조사하여 단조 가능한 기어의 한계를 찾았다.
- 3) 중공 스피어기어를 냉간 밀폐 단조할 경우 잇수는 15개 이상 20개 이하가 가장 낮은 상대압력으로 단조를 할 수 있다.
- 4) 제시한 속도장에 의해 얻은 상계해는 실제 단조시 단조하중의 예측에 있어서 매우 유용할 것으로 생각된다.

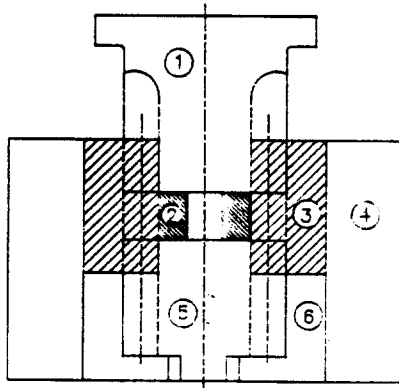
후 기

본 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구과제의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] O. P. Grover and B. L. Juneja, 1984, "Analysis of Closed-Die Forging of Gear-Like Elements", *Advanced Tech. of Plasticity*, Vol. II, pp.888 ~ 893
- [2] N. A. Abdul and T. A. Dean, 1986, "An Analysis of the Forging of Spur Gear Forms", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 26, No. 2, pp.113 ~ 123
- [3] K. Kondo, T. Jitsunari and K. Ohga, 1985, "Investigation on Cold Die Forging of a gear Utilizing Divided Flow", *Bulletin of JSME*, Vol. 28, No. 244, pp. 2442 ~ 2450
- [4] K. Ohga, K. Kondo and T. Jitsunari, 1985, "Research on Precision Die Forging Utilizing Divided Flow", *Bulletin of JSME*, Vol. 28, No. 244, pp.2451 ~ 2459
- [5] M. Kiuchi, H. K. Chung and J. Yanagimoto, 1990, "Analysis of Upsetting of Hollow Billets with Square and Gear-type Dies", *J. of the JSTP*, Vol. 31, No. 354, pp. 907 ~ 912,
- [6] 최재찬, 허관도, 김창호, 최 영, 1993, "인벌류우트 스피어 기어의 밀폐단조에 관한 상세 해석", *한국소성가공학회지*, 제2권, 제4호, 통권 제5호, pp.22 ~ 36
- [7] 최재찬, 허관도, 김창호, 최종웅, 1994, "스피어기어의 밀폐단조에 관한 상세해석", *한국정밀공학회지*, 제 11 권, 제 4 호, 통권 제 42 호 pp. 26 ~ 37
- [8] T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegel, 1983, "Metal Forming", *ASM*, p. 58
- [9] D. Y. Yang, 1994, "Investigation in to Non-Steady State 3-Dimensional Extrusion of a Trocoidal Helical Gear by Rigid Plastic Finite Element Method", *Annals of the CIRP*, Vol. 13/1, pp. 229 ~ 233

Tables and Figures



- ① Gear shaped punch
- ② Workpiece
- ③ Gear shaped die insert
- ④ Shrink ring
- ⑤ Gear shaped ejector
- ⑥ Ejector seat

Fig. 1 Schematic illustration of spur gear forging

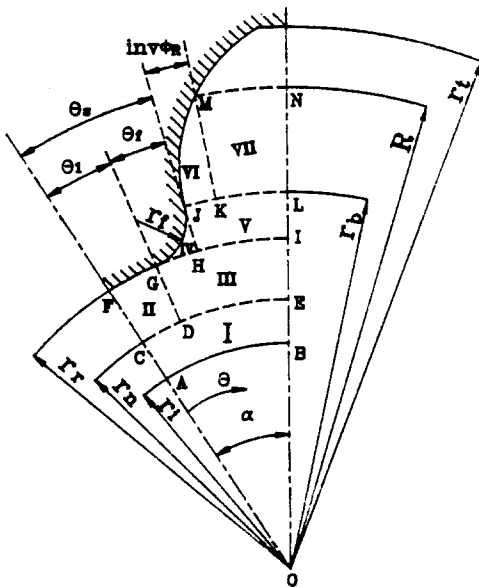


Fig. 2 Deformation regions for half pitch of spur gear

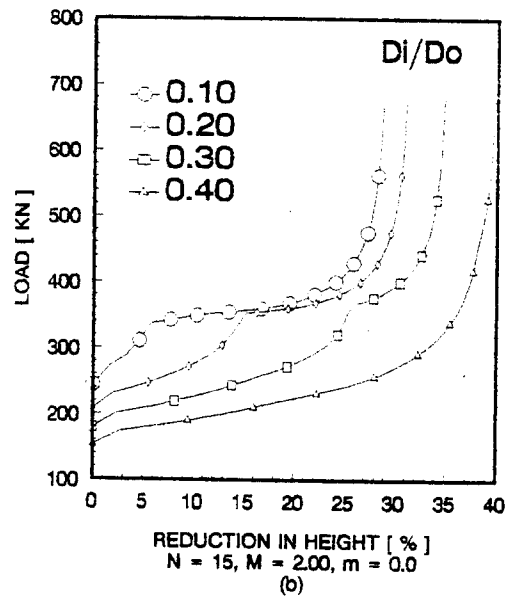
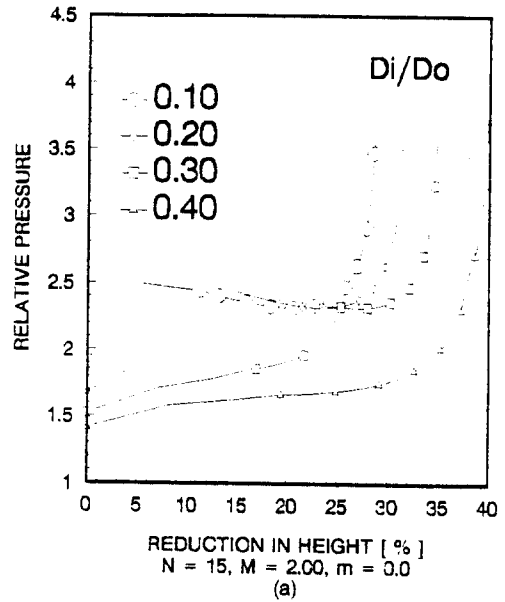


Fig.3 Relative pressures and forging load for each inner radii of hollow billet

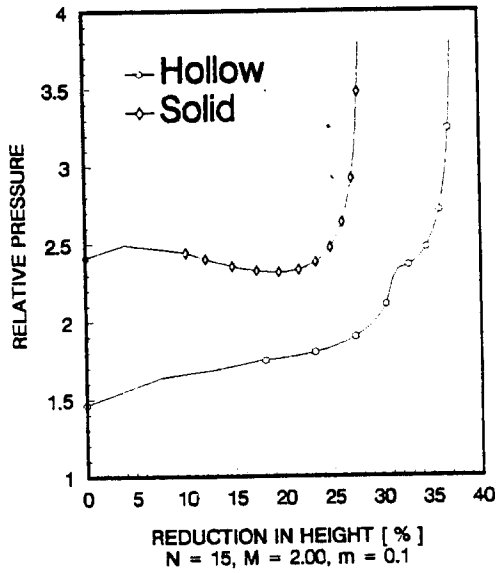


Fig. 4 Comparison of relative pressure between solid billet and hollow one

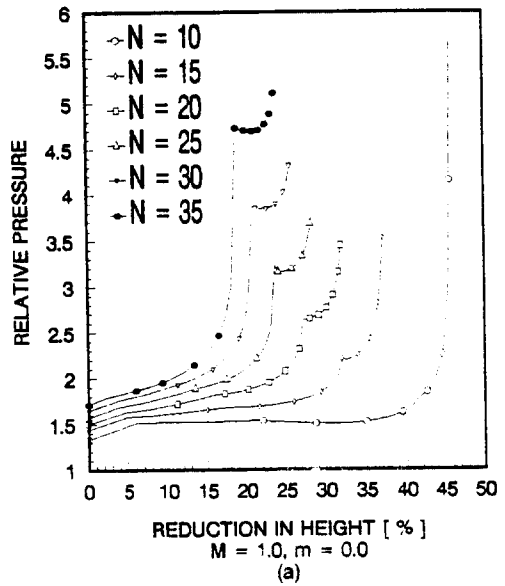


Fig. 5 Variation of neutral surface and inner radius

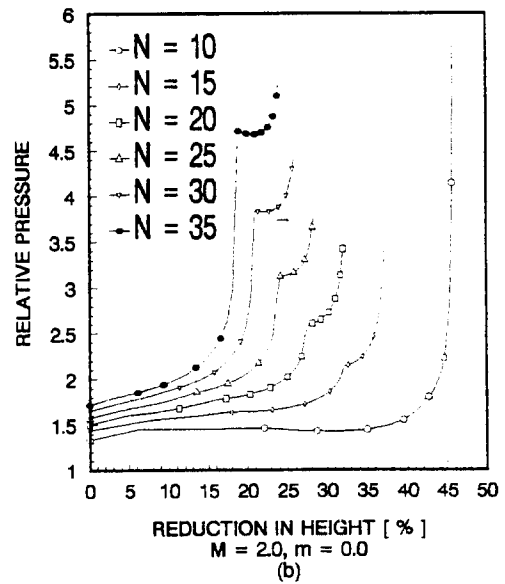
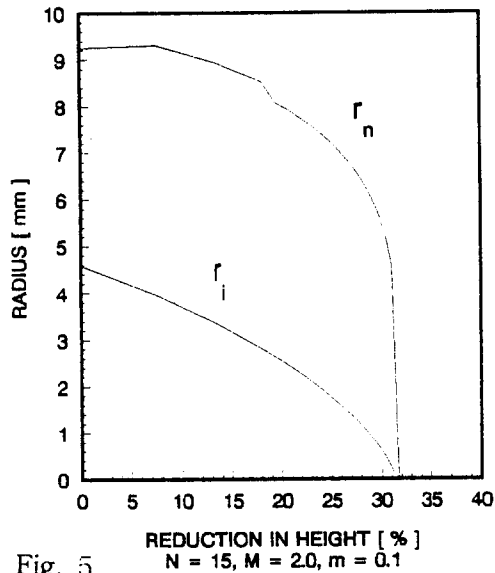
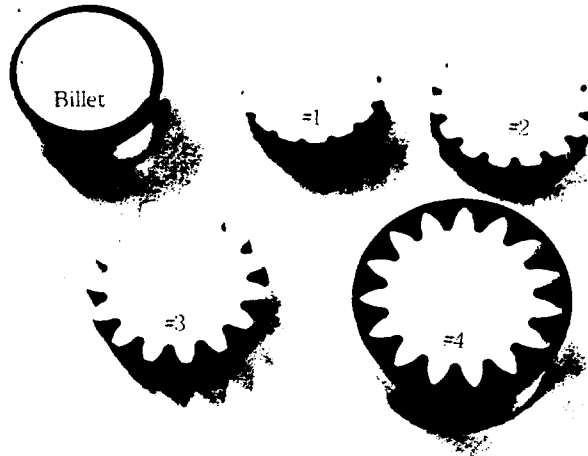
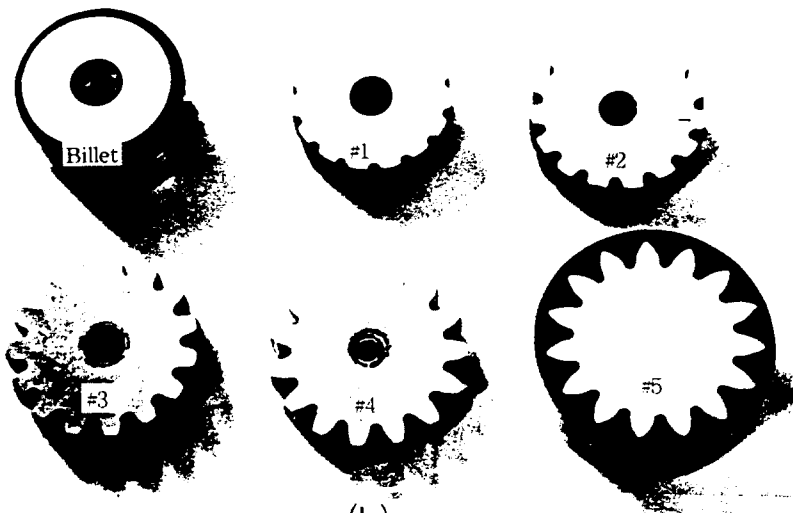


Fig. 6 Comparisons of relative pressures for each number of teeth



(a)



(b)

Fig. 7 Billets and forged gears for each step. (a) solid (b) hollow

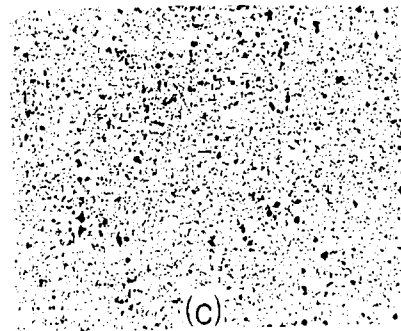
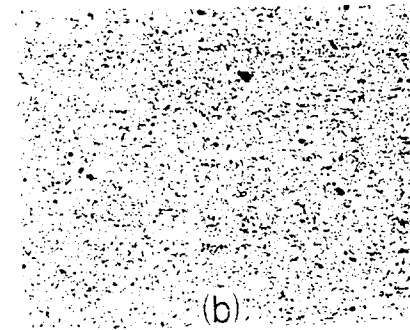
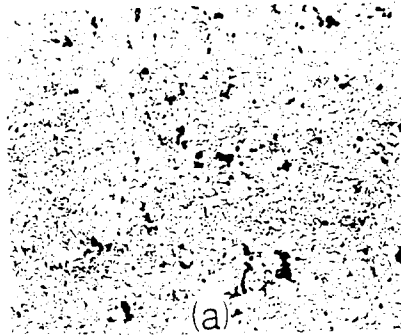
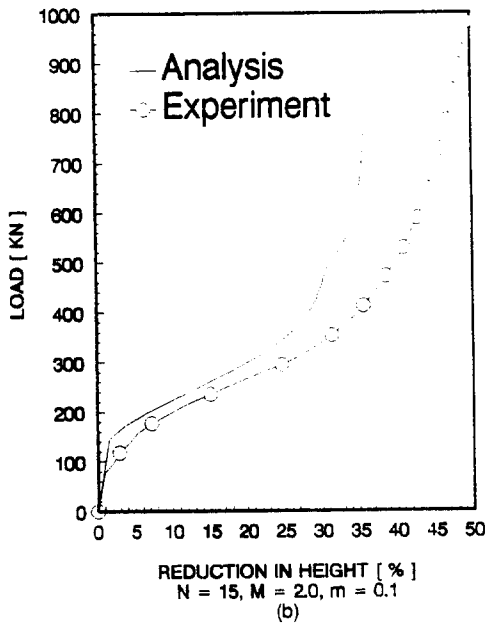
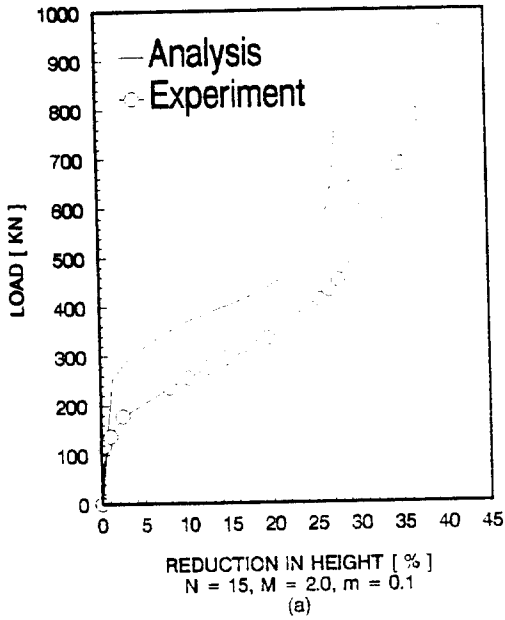


Fig. 9 Micro structures of billet and forged gears(Al2024) etched with Keller solution
(a)billet (b) solid (c) hollow

Fig. 8 Comparison of load between analysis and experiment for forging of spur gear

Table 1 Chemical compositions of Al2024^(S)

Composition (%)							
Al	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Pb
92.2	4.48	0.60	0.46	0.87	1.12	0.20	0.056

Table 2 Hardness of solid gear for each step (HRB)

	Center Region	Tooth Region
Billet	1.2	
# 1	17.2	18.9
# 2	32.2	36.1
# 3	35.1	37.5
# 4	39.3	41.1

Table 3 Hardness of hollow gear for each step (HRB)

	Center Region	Tooth Region
Billet	1.3	
# 1	22.0	27.9
# 2	28.0	37.6
# 3	28.4	39.8
# 4	34.3	47.4
# 5	37.6	47.8