

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(ME96-E-14)에 의하여 연구되었음

# 합금강을 이용한 내접 인벌류우트 기어의 단조에 관한 연구

최종웅\*, 조해용\*\*, 최재찬\*\*\*

## A Study on the Forging of Internal Involute Gears with Alloy Steel

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

### ABSTRACT

Forging of internal involute gears with alloy steel has been analyzed by means of upper bound method. Kinematically admissible velocity fields for forging of internal gear were proposed. It was assumed that the shape of free flow surface during forging operation is a straight line perpendicular to the plane of symmetry. Using the suggested velocity fields, forging loads and relative pressures were calculated by numerical method. Consequently, forging die should be successfully designed without fracture or failure during forging operation. Experiments were carried out with the designed die and SCM415 alloy steel as billet material. The calculated loads were compared with experimental one and they are in good agreement with experimental inspections. As a result, the calculated solutions would be useful to predict the loads and the designed die is suitable for forging of internal involute spur gear with alloy steel. The forged gear is measured to be KS 4 class and its class should be improved by subsequent working such as shaving after forging operation.

**Key Words** : Upper Bound Method(상계법), Velocity Field(속도장), Internal Involute Spur Gear(내접 인벌류우트 스퍼어 기어), Toothed Mandrel(치형을 갖는 맨드렐), SCM415 Alloy Steel(SCM415 합금강), KS Class(KS 급수)

### 기 호 설 명

$r, \theta, z$  : 원주좌표계

$N$  : 기어의 잇수

$t$  : 순간의 빌렛높이 [mm]

$a$  : 1/2 피치 각 [rad]

$U_r, U_\theta, U_z$  : 각 방향의 속도성분

$r_b$  : 기초원 반경 [mm]

$u$  : 펀치의 하강 속도 [mm/s]

\* 부산대학교 대학원, 학생회원  
 \*\* 충북대학교 기계공학부, 정회원  
 \*\*\* 부산대학교 기계공학부, 정회원

## 1. 서 론

최종제품의 형상을 갖는 금형과 펀치를 사용하여 부품을 성형하는 소성가공에 있어 가공압력과 하중은 단조장치의 부하능력 결정 및 금형설계에 중요한 기초자료가 된다. 이러한 가공압력과 하중을 계산하기 위하여 사용되는 해석기법은 다양하지만, 해석하고자 하는 제품의 형상정칙과 그에 따라 가정된 속도장을 사용한 상계법으로써 3차원 비축대칭 부품 특히, 원통형 주위에 일정한 간격으로 치형이 배치된 기어류 부품의 단조시 가공압력과 하중 계산 및 금형설계에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다. Juneja<sup>(1)</sup>, Dean<sup>(2)</sup> 등은 모델재료인 납과 알루미늄을 사용하여 사다리꼴 또는 각형 스플라인의 형상인 직선치형을 갖는 외치차단조에 관하여 상계해석을 하였으며, Ohga<sup>(3,4)</sup> 등은 알루미늄을 사용하여 각형 스플라인, 육각 및 사각형상의 단조를 분할유동(divided flow)을 도입하여 해석하였다. Kiuch<sup>(5)</sup>은 UBET를 사용하여 축대칭부분과 비축대칭 부분이 결합된 복잡한 형상의 단조 및 원형벌렛으로부터 헬리컬 기어의 형상을 갖는 부품의 압출을 해석하였다. 인벌류우트 스피어 기어의 단조에 대해서는 Cho<sup>(6-10)</sup> 등이 중심 및 중공의 알루미늄 소재를 사용한 외치차 스피어 기어와 자동차용 펌프에 사용되는 원호기어 및 스플라인 등 여러 가지 기어류 부품의 단조를 상계해석하였으며 단조 최적조건을 제시하였고 실험과 비교하여 해의 타당성을 증명하였다. 내치형상의 부품에 대한 단조로서는 Choi<sup>(11)</sup> 등이 알루미늄 합금 Al2024를 사용하여 내부에 세레이션홈이 존재하는 부품의 단조를 상계해석하고 내치 세레이션 단조의 금형구조를 제시하였으며, Kondo<sup>(12)</sup> 등은 알루미늄 합금을 사용한 내접 헬리컬 기어의 단조시 가공압력에 따른 충진율을 이용하여 분류 단조법과 간편법을 실험으로써 비교하고 분류단조법이 가공압력을 낮출 수 있는 금형의 구조임을 제시하였다. 한편, Ohga<sup>(13)</sup> 등이 두 공정으로써 S10C, SCR 및 SNCM과 같은 합금강을 사용하여 외접 스피어 기어의 단조를 실험하여 각각의 재료에 대한 가공압력을 제시하였다. 이상에서와 같이 기어류 부품의 단조에 사용되는 금형은 그 표면에 직접 치형이 가공되므로 소성가공시 치형부가 노치로 작용한다. 이러한 노치로 인한 응력집중 때문에 치형의 끝에서 큰 인장응력이 작용하여 금형의 파손이 발생하므로 현재까지 제시된 기어류 부품의 단조에 관한 연구는 단조시 발생하는 높은 가공압력과 하중으로 인한 금형의 파손을 방지하기 위해 주로 모델재료인 납

또는 알루미늄을 사용한 것이거나, 합금강을 소재로 한 경우는 가공압력을 낮추기 위해 두 개의 공정을 사용한 것이었다.

따라서, 본 연구에서는 금형의 표면에 치형을 가공하지 않음으로써 노치효과가 없는 Choi<sup>(11)</sup> 등이 내접 세레이션 단조에서 제시한 원통형 금형과 인벌류우트 치형이 가공된 맨드렐로써 SCM415 합금강 소재를 한 공정으로써 내접 스피어 기어로 단조할 경우에 상계법을 적용할 수 있는 동적 가공속도장을 제시하고 수치해석을 통하여 상계해를 구하고자 하였다. 수치해석에 의해 구해진 하중을 바탕으로 내접 스피어 기어의 단조시 파손이 없는 단조용 금형을 설계하고 제작한 후 실험을 행하여 내접 기어가 실제 재료에 대하여 금형의 파손 없이 단조가 가능한 형상임을 보이고, 이론해석과 실험을 비교하여 제시한 해의 타당성을 검토하고자 하였다. 또한, 단조된 기어의 치형을 검사하여 단조로써 기계가공을 대체할 수 있는 가능성을 검토하고자 하였다.

## 2. 동적 가공속도장

원통형 다이와 인벌류우트 치형을 갖는 맨드렐을 사용하여 소재가 치의 중심부로 유동하는 내접 기어의 단조를 해석하기 위해 치형의 1/2 피치를 변형영역으로 분할하면 Fig. 1과 같다. 단조 공정중 다이의 캐비티를 채우는 소재의 자유면 형상은 Choi<sup>(11)</sup> 등이 제시한 것과 같이 대칭면에 수직한 직선으로 가정하였다.

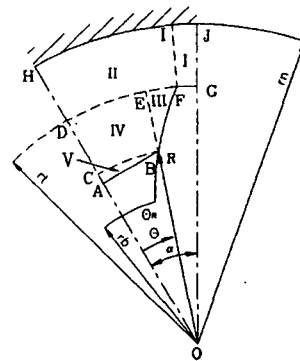


Fig. 1 Deformation zones in half pitch of internal involute spur gear

단조가 진행되는 동안 축방향의 속도성분( $U_z$ )은 전 변형영역에서 다음과 같이 가정한다.

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

여기서,  $z$ 는 축방향의 좌표이다.

- 1) I 변형영역 속도장 ( $\theta_s \leq \theta \leq \alpha$ ,  $r_i \leq r \leq r_n$ ),  
 $\theta_s = \angle AOF$

Fig. 1에서와 같이 최외각 경계인  $r_n$ 과 치끝원 $r_i$ 사이의 영역으로서 반경방향 속도성분이 존재하지 않는다고 가정한다. 또한,  $\theta = \alpha$  에서 원주방향 속도성분  $U_\theta = 0$  이다. 이상과 같은 가정과 체적일정 조건 및 경계조건에 의해 다음과 같은 속도성분을 구할 수 있다.

$$U_r = 0, U_\theta = \frac{u}{t} r(\theta - \alpha)$$

- 2) II 변형영역 속도장 ( $0 \leq \theta \leq \theta_s$ ,  $r_i \leq r \leq r_n$ )

최외각 경계인  $r_n$ 과 접하는 영역으로서 원주방향 속도성분이 원주좌표  $\theta$ 의 선형함수라 가정한다. 경계조건으로서  $\theta = \theta_s$  일 때  $U_{\theta_n} = U_{\theta_s}$  이다. 따라서 다음과 같은 속도성분을 얻을 수 있다.

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

- 3) III 변형영역 속도장 ( $\theta_R \leq \theta \leq \theta_s$ ,  $R \leq r \leq r_i$ )

단조중 인벌류우트 곡선에 접하는 영역으로서 공구면의 법선방향에 대한 속도성분이 존재하지 않아야 한다는 구속조건을 갖는다. 이러한 구속조건과 체적일정조건을 이용하면 다음과 같은 속도성분을 얻을 수 있다.  $R$ 은 단조 공정중 어느 순간에 있어 중심  $O$ 로부터 맨드렐의 표면에 닿은 소재의 선단부까지의 거리이다.

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

여기서,  $\phi_r = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \right)$ ,  $\phi_R = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{R^2 - r_b^2}}{r_b} \right)$

$C_{III}$ 는 경계조건으로부터 구해지는 적분상수이며  $\theta_R = \angle AOB$  이다.

- 4) IV 변형영역 속도장 ( $0 \leq \theta \leq \theta_R$ ,  $R \leq r \leq r_i$ )

원주방향의 속도성분이 원주좌표  $\theta$ 의 선형함수라 가정하고  $\theta = \theta_R$  일 때  $\theta = \theta_R$   $U_{\theta_{in}} = U_{\theta_{out}}$ ,  $\theta = 0$  일 때  $U_{\theta_{in}} = 0$  라는 경계조건과 체적일정조건을 이용하면 다

음과 같은 속도성분을 얻을 수 있다.

$$U_r = \frac{ur}{2t} - \frac{1}{\theta_R} \frac{u}{3t} \left( \frac{r}{2} \phi_r - r_b \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{2r} \right) - \frac{C_{IV}}{\theta_R} \frac{1}{r^2} (\tan \phi_r - \phi_r) + \frac{C_{IV}}{r}$$

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

여기서,  $C_{IV}$ 는 적분상수이다.

- (5) V 변형영역 속도장 ( $0 \leq \theta \leq \theta_R$ ,  $R \cos \theta_R \leq r \leq R$ )

이 영역은 단조시 소재가 금형의 캐비티를 채우면서 전진하는 소재의 전방부를 나타내는 영역으로서 Fig. 1에서와 같이 대칭면에 수직한 자유면 형상을 소재의 선단모양으로 가정한다. 원주방향의 속도성분을 원주방향 좌표  $\theta$ 의 선형함수라 가정하고  $r = R$ 일 때  $U_r = U_{rv}$ 라는 경계조건 및 체적일정조건을 사용하면 다음과 같은 각방향의 속도성분을 구할 수 있다.

$$U_r = \frac{ur}{2t} - a + \frac{C_v}{r}, U_\theta = \frac{\theta}{\theta_r} \left( \frac{uR}{3t} + \frac{C_{III}}{R^2} \right) \cdot \phi_R$$

여기서,  $a = \frac{1}{\theta_R} \left( \frac{uR}{3t} + \frac{C_{III}}{R^2} \right) \cdot \phi_R$ 이며  $C_v$ 는 적분상수이다.

### 3. 금형설계 및 소재

#### 3.1 금형설계

냉간단조에 사용되는 금형은 높은 가공압력과 같은 가혹한 조건하에서 사용되므로 그 금형의 설계가 적절하지 못하면 단조중 금형이 변형을 일으켜 제품의 정밀도가 낮아지고 나아가 금형의 파손에까지 이른다. 이러한 요인은 금형비의 증가를 가져오고 결국 제품 가격이 상승하는 원인이 된다. 특히, 합금강을 사용한 기어류 부품의 단조에 있어서는 금형설계가 더욱 중요한 요인이 된다.

합금강을 사용한 단조시 가공중 변형 또는 파손이 일어나지 않는 금형을 설계하기 위하여 제시된 속도장을 사용하여 잇수가 15, 모듈을 1.5인 내접 인벌류우트 기어의 단조를 해석한 결과 최종상태에서 하중은 약 2100 KN으로 계산되었으며, 이 때 편치에 작용하는 압력은 약 2600 MPa이었다. 이러한 높은 단조압력을 견디기 위해 실험에 사용한 금형은 인서트를 두 개의 보강링으로써 열

박음하여 보강한 구조를 택하였으며, 펀치 및 다이의 인서트는 압축강도가 높은 초경합금(GTi50, H<sub>R</sub>C89.0)을 사용하였다. 내압이 작용하지 않는 상태에서, 다이 인서트에 압축응력이 발생하도록 하기 위한 두 개의 보강링은 각각 공구강(SKD11) 및 크롬몰리브덴강(SCM4)을 사용하였고 인벌류우트 치형을 갖는 맨드렐은 공구강(SKD11)을 열처리(H<sub>R</sub>C60)하였다. Fig. 2에 금형의 개략적인 구조를 나타내었다. 펀치와 맨드렐은 가공중 소재의 원활한 미끄럼을 위하여 표면을 폴리싱(polishing)하였다.

3.2 소재

본 연구에서 해석 및 실험대상으로 한 소재는 SCM415이며 그 화학적 성분은 Table 1<sup>(14)</sup>과 같다. 단조용 시편은 봉재로부터 Fig. 3과 같이 외경 39.9mm,

내경 26.6 mm, 높이 21 mm로 가공하였으며, 링압축 시험용 시편은 외경: 내경: 높이의 비가 6:3:1이다. 시편의 외경이 금형의 내경보다 작은 이유는 소재가 금형내에 쉽게 들어가도록 하기 위해서이다. 이렇게 가공된 시편을 Fig. 4와 같이 질소분위기로(N<sub>2</sub> atmospheric furnace)속에서 780℃로 가열하여 4시간 동안 유지시킨 후 시간당 30℃씩 냉각하여 720℃에서 6시간 동안 유지시킨 다음, 이를 450℃까지 로속에서 냉각시킨 후 공기 중에서 냉각하는 풀림처리를 하였다.

4. 해석 및 실험

원통형 금형과 외주면에 인벌류우트 스퍼어 기어의 치형이 가공된 맨드렐을 사용하여 내부에 인벌류우트 치형을 갖는 내접 스퍼어 기어의 단조를 해석할 경우 상계법

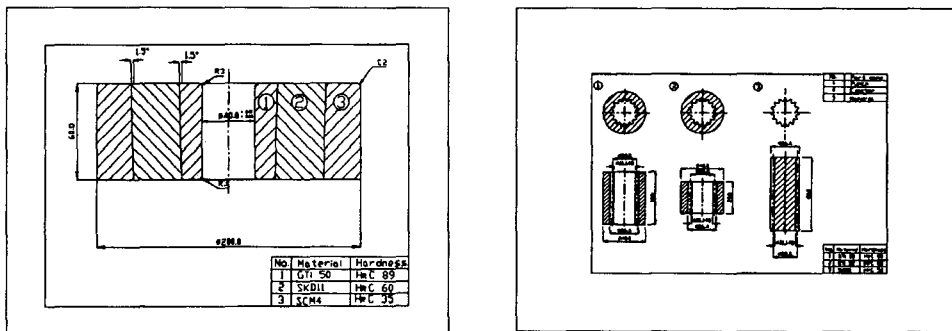


Fig. 2 Schematic drawing of die, mandrel and punch for forging of internal spur gear with SCM 415

Table 1 Chemical compositions of SCM415

Composition (weight %)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18	0.22	0.68	0.01	0.014	1.0	0.17

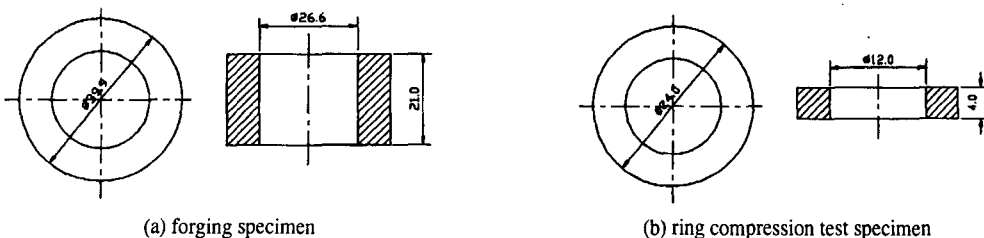


Fig. 3 Configurations of specimens(unit:mm)

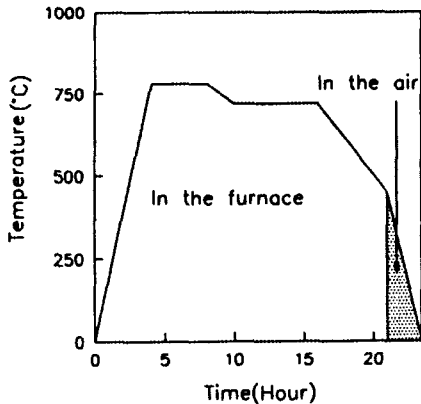


Fig. 4 Heating and cooling cycle for annealing of billet

을 적용할 수 있는 동적 가용속도장을 제시하였다. 제시된 속도장을 이용하여 수치해석 프로그램을 작성한 후 그 결과를 실험과 비교하였다.

본 연구에서는 소재를 가공중 Von Mises의 항복조건을 따르고 비압축성 등방성이며 강소성이라 가정한다. 또한, 해석할 때 소재의 내경과 단조하고자 하는 맨드릴의 치끝원의 직경을 일치하게 하여 펀치의 하강과 동시에 치형 공간으로 소재가 유동한다고 생각한다. Osakada<sup>[15]</sup> 등이 제안한 방법에 따라 Fig. 5와 같이 링압축시험을 수행한 후 마찰상수와 유동응력을 계산하였다. 링압축시험으로써 구한 마찰상수(m)는 0.10이며 유동응력은 다음 식과 같다.

$$\bar{\sigma} = 848.56\bar{\epsilon}^{0.1554} \quad (2)$$

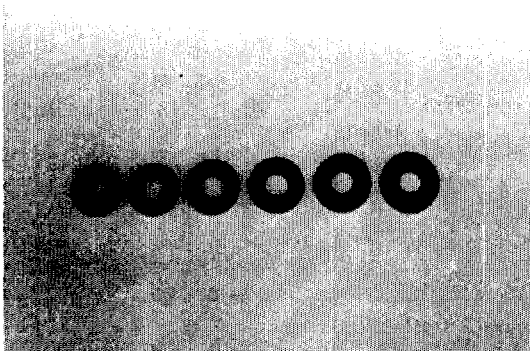


Fig. 5 Sets of original and deformed ring compression specimens

플럼 처리된 소재에 일반적인 인산염 피막처리를 하였고 단조 실험시 마찰상수를 줄이기 위해 분무식 이황화몰리브덴(spray type MoS2)을 소재주위와 펀치 및 이젝터의 상·하면에 분무하였다. 시편을 금형내에 있는 이젝터 위에 놓고 상부 램에 달려 있는 펀치를 하강시킨다. 펀치가 하강함에 따라 소재가 맨드릴의 치공간으로 유동하면서 성형이 이루어진다. 단조하중과 펀치의 이송거리를 기록하며, 단조중 다이의 채움 정도 및 소재의 유동형상과 치높이의 측정을 위해 중간 몇 단계의 소재를 취출하였다.

### 5. 결과 및 고찰

Fig. 6은 합금강을 사용한 내접 스퍼어 기어의 단조시 실험과 이론해석의 하중을 압하율에 따라 나타낸 것이며 그림 우측상단의 사진은 최종상태에서 치형의 모양이다. 실험과 이론해석의 압하율이 차이가 나는 것을 볼 수 있으며, 이것은 Choi<sup>[11]</sup>등이 제시한 것과 같이 실험에서 사용된 빌렛의 내경이 맨드릴 치끝원의 직경보다 약간 크게 가공되어 실제 치형의 성형은 일정한 압하율 이후에 시작되기 때문이며, 소재 및 단조장비의 탄성변형량, 그리고 펀치와 맨드릴의 틈새에 의해 발생하는 플래쉬 및 이론해석과 실험의 소재의 자유면 형상의 차이도 이러한 현상의 원인이라 생각된다. 단조 최종상태에서 이론해석과 실험의 하중을 비교한 결과 실제단조 하중을 예측하는데 사용 가능하며 그 때 사진에서와 같이 양호한 금형의 충전도를 얻을 수 있었다. 따라서, 제시한 속도장은 내접 스퍼어 기어의 단조하중을 예측하는데 유용하리라 생각되며 금형의 파손 없이 양호한 충진을 얻을 수 있는 금형을 설계할

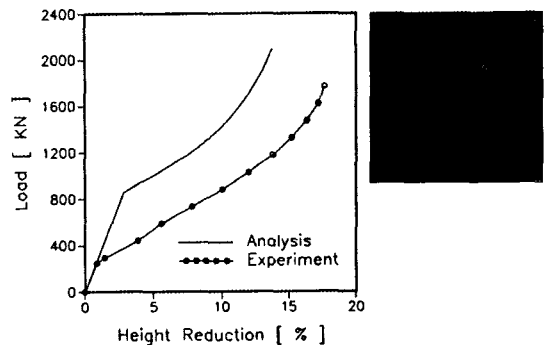


Fig. 6 Comparison of forging load between analysis and experiment versus height reduction

수 있었다. 따라서, 실제 재료를 사용하여 기어류 부품을 제작하고자 할 경우 내접 기어가 금형의 파손 등과 같은 결함이 없이 단조 가능한 형상이라 생각되며, 합금강을 사용한 내접 기어단조의 해석과 실험을 통하여 얻은 자료는 향후 연구가 필요한 외치 기어류 부품의 단조와 내치 및 외치가 동시에 성형되는 양방향 유동에 대한 금형설계의 기초자료로 활용 가능하리라 생각된다. 특히, 내치만 있는 부품을 성형한 후 이것을 열처리하여 변형에 의한 가공경화를 제거한 뒤 다시 외치를 가공하는 2단계성형의 해석 및 공정변수에 따른 하중과 상대압력 등의 예측에 도움이 되리라 생각된다.

Fig. 7은 합금강을 사용하여 잇수가 15개인 인벌류우트 내접 스피어 기어의 단조 실험시 압하울에 따른 소재의 충전정도를 나타낸 것이다. 단조가 진행됨에 따라 맨드렐의 치끝에서 먼저 변형이 시작하여 금형의 캐비티 내로 소재가 유동하는 것을 볼 수 있으며, 이 때 금형의 캐비티를 채우는 소재의 자유면 형상이 대칭면에 수직한 직선임을 볼 수 있다. 따라서, 인벌류우트 내접 스피어 기어의 단조에도 Choi<sup>(11)</sup> 등이 소켓렌치에 사용되는 삼각형 형상의 내접 세레이션 및 인벌류우트 세레이션의 단조에서 제시한 직선형 자유면을 사용하는 것이 실제와 차이가 없음을 알 수 있으며, 결과 내부에 형상이 있는 부품의 단조를 해석할 경우는 자유면 형상을 직선으로 가정하는 것이 실제와 차이가 없음을 알 수 있었다. 일정한 높이 감소율 이후부터 실험과 이론해석의 압하울 차이의 원인이 되는 축방향으로 돌출된 플래쉬형상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 최종상태에서 소재가 금형의 캐비티로 유동하는 거시적 유동 사진이다. 그림에서와 같이 소재가 외부

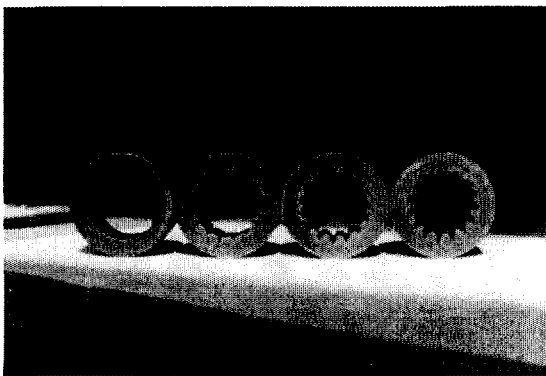


Fig. 7 Photographs of forged internal spur gear for each height reduction

로 유동하여 금형의 공간을 채우는 외치차 단조와는 달리 편치가 하강함에 따라 소재가 기어의 중심을 향하여 유동한다. 단조 후반부에서 충전이 이루어지는 맨드렐의 치저부는 소재가 변형을 받아 금형의 캐비티를 채우며 유동하므로 단조 초기부터 발생하는 변형이 누적되어 가장 큰 변형량을 갖게 되며 이로 인하여 Fig. 9에서와 같은 변형경화에 의한 경도 분포를 갖는다. 이것으로 볼 때, 내치차를 단조로 제작함으로써 치면과 치형부 내면의 경도 향상 효과를 얻을 수 있고, 향상된 경도로 인해서 치차의 수명 향상을 기대할 수 있을 것이다.

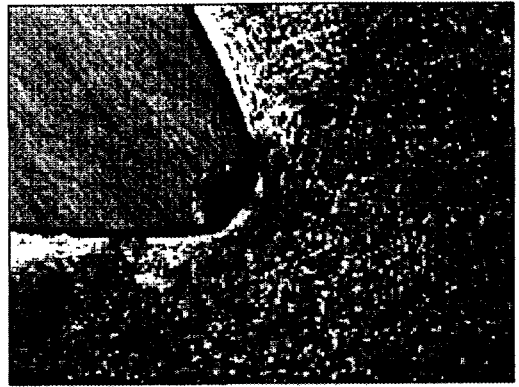


Fig. 8 Macro-structure of metal flow during forging operation

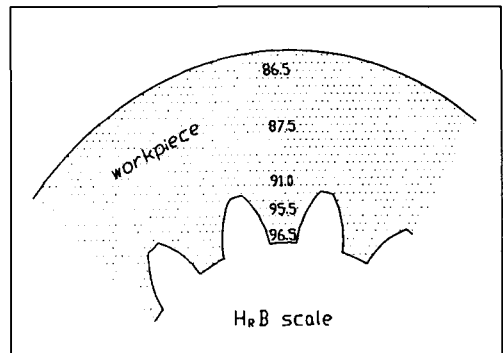


Fig. 9 Distribution of hardness throughout the forged part

단조후 내치차를 치형검사기에서 검사하기 위하여 Table 2에 있는바와 같이 저유점 및 저열팽창성 등과 같은 특성량을 갖는 금속인 SK-CAST(SK-カスト)를 용융시켜 단조된 내접 인벌류우트 기어에 부어서 Fig. 10과 같이 중심에 축이 있는 외치차를 만들었다. 치형검사기에

서 검사한 기어는 잇수가 15, 모듈이 1.5이며 치의 두께가 13.5 mm이다. Fig. 11은 기어의 치형오차와 리이드오차를 나타낸 것이다. 치형오차의 경우 x방향을 500배, y방향을 16배, 리이드 오차의 경우 각각 500배, 4배 확대한 그림을 나타낸다.

그림에서 좌측은 치형의 오른쪽 면을 나타내며 우측은 치형의 좌측면을 나타낸다. 치형오차를 측정할 구간은 치저원에서 치높이의 1/6만큼 떨어진 지점에서부터 치끝원에서 역시 치높이의 1/6만큼 떨어진 지점까지이다. 측정결과 치형오차는 치의 오른쪽이 10 $\mu$ m, 왼쪽이 11 $\mu$ m으로 각각 KS 기어급수 3급과 4급에 해당한다. 또한, 치높이의 2/3지점에서 기어의 축방향으로 측정할 리이드오차는 좌·우측 모두 11 $\mu$ m으로 KS 기어급수 3급에 해당한다. 따라서, 합금강을 이용하여 외부에 치형이 없는 내접 인벌류우트 스피어기어를 단조하여 KS 기어급수 4급 정도의 기어를 성형할 수 있었다.

리이드오차의 측정에서 측정구간의 처음과 끝에서 큰 오차가 발생하는 것은 단조기어의 특성으로서, 이것은 편치와 소재의 접촉면에서의 마찰에 의하여 양끝단에서 미충진 영역이 존재하여 치형이 완전히 형성되지 않기 때문이다. 이러한 미충진 영역은 기어의 정도를 떨어뜨리는 요인이 된다. 하지만, 양끝에서의 미충진은 치형의 형상과 치의 강도에 약간의 영향을 미치지만 기어를 사용할 때 치합 및 소음에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이로써 단

조에 의한 치형의 창생은 호빙가공에 의한 치형의 창생을 대체할 수 있음을 확인하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 합금강을 사용하여 내접 인벌류우트 스피어 기어를 단조할 경우 상계법을 적용할 수 있는 동적 가용속도장을 유도하고, 이를 수치해석하여 실험과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 내접 기어 단조에 적용 가능한 동적 가용속도장을 제시하고 상계해석을 수행하여 실험과 비교함으로써 제시한 상계해가 실제 내접 기어 단조공정의 하중 예측에 적용 가능함을 알 수 있었다.
2. 합금강으로써 내접 인벌류우트 스피어 기어를 단조할 경우 양호한 금형 충전과 단조후 결합 또는 파손이 없는 금형을 설계할 수 있었다. 따라서, 내접 기어 형상이 실제 재료를 사용하여 기어류 부품을 제작할 경우 금형의 파손 없이 단조 가능한 형상이라 생각되며, 내접 기어단조의 해석 및 실험을 통하여 얻어진 자료는 외치차 단조와 양방향 유동에 대한 금형설계의 기초자료로 사용 가능하리라 기대된다. 특히, 내치를 단조한 후 열처리하여 외치를 단조 하는 2단계 가공의 해석 및 실험에 활용도가 높다고 생각된다.
3. 단조로써 내접 기어를 성형할 경우 변형이 시작되는 치끝부보다 변형의 마지막 단계인 치저부가 가장 큰 정도분포를 가지는 것을 알 수 있었다.
4. 내접 인벌류우트 스피어 기어 단조시 소재 선단의 금속유동은 Choi<sup>(11)</sup> 등이 내접 세레이션에 대하여 제시한 것과 같이 대칭면에 수직한 직선임을 알 수 있었으며, 결과 내부에 형상을 갖는 부품의 단조를 해석할 경우 자유면형상을 직선으로 가정하는 것이 실제와 차이가 없음을 알 수 있었다.
5. 단조에 의하여 KS 기어급수 4급 정도의 기어를 성형하였다. 결과 기계가공을 단조로 대체시킬 수 있음을 확인하였다.

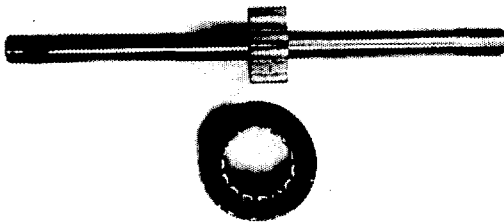


Fig.10 Forged gear and external gear with shaft for measuring gear class

Table 2 Properties of SK-CAST

Melting point (°C)	Hardness (HB)	Specific gravity	Tensile strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Strain(%)	Heat conductivity (Cal/cm <sup>2</sup> /°C/Sec)	Specific heat	Thermal expansion (°C <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	Composition
138 ~ 170	22	8.2	5.62	200	0.09	0.047	15	Bi Sn

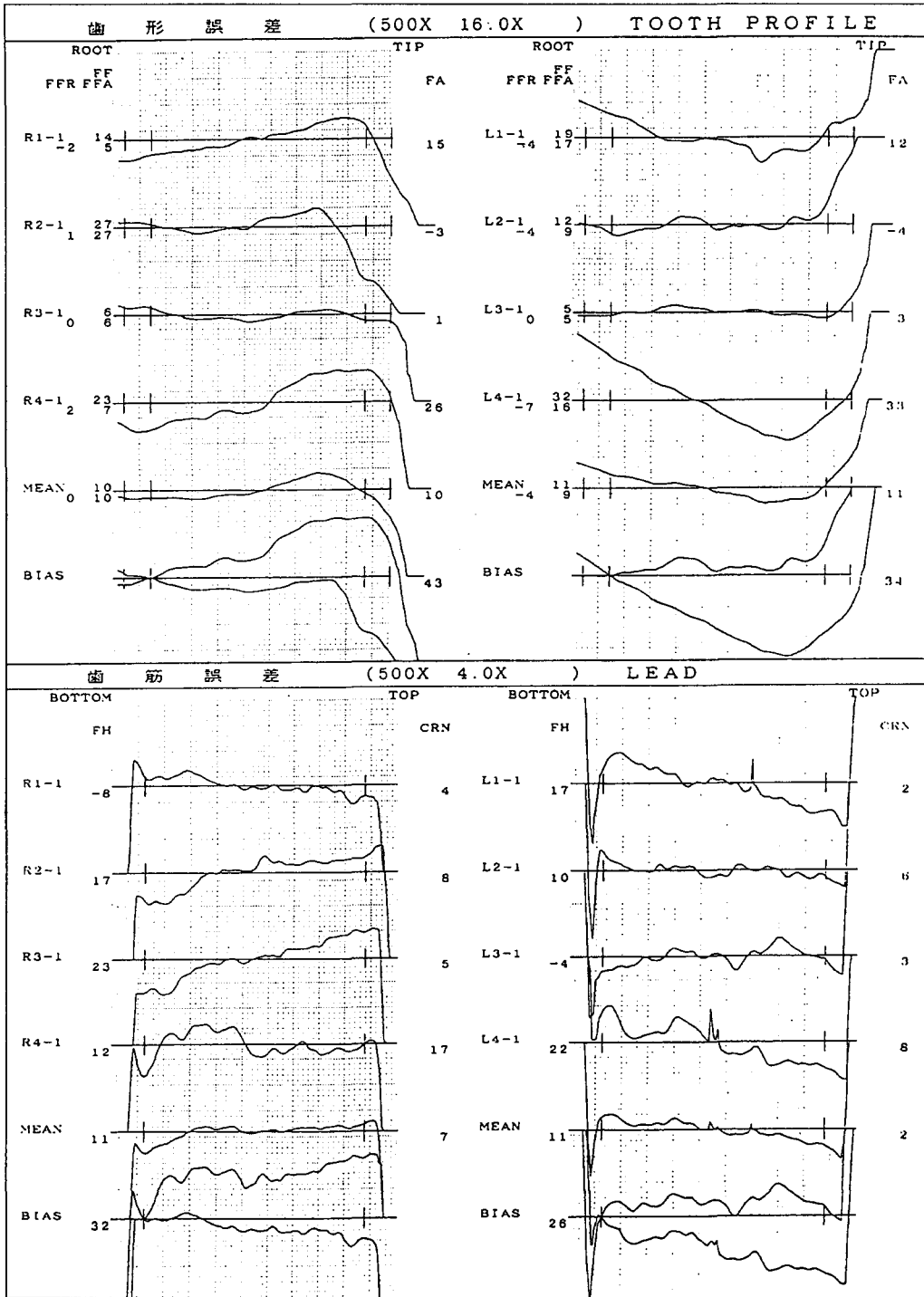


Fig. 11 Tolerance of forged internal spur gear



## 참고 문헌

1. O. P. Grover and B. L. Juneja, "Analysis of Closed-Die Forging of Gear-Like Elements", *Advanced Tech. of Plasticity*, Vol. II, pp.888 ~ 893, 1984.
2. N. A. Abdul and T. A. Dean, "An Analysis of the Forging of Spur Gear Forms", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 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. 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.
5. M. Kiuchi, "Complex Simulation System of Forging Based on UBET", *Annals of the CIRP*, Vol. 35/1, pp. 147 ~150, 1986.
6. 조해용, 최재찬, 최종용, 민규식, "중공소재의 내경 변화에 따른 스피어기어 단조에 관한 연구", *한국소성가공학회지*, 제 4 권, 제 3 호, pp. 257 ~ 266, 1995.
7. 조해용, 최종용, 민규식, "중공 및 중실소재를 이용한 스피어기어 단조에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, 제 13 권, 제 1 호, pp. 108 ~ 115, 1996.
8. 조해용, 민규식, 최종용, "트로코이드 기어의 단조 해석", *한국정밀공학회지*, 제 13 권, 제 9 호, pp. 77 ~ 83, 1996.
9. 민규식, 최종용, 조해용, 이현철, "기어류 부품의 단조에 관한 상세해석", *한국정밀공학회지*, 제 14 권, 제 2 호, pp. 102 ~ 112, 1997.
10. 최 영, "스피어기어의 냉간밀폐단조에 관한 연구", 석사학위 논문, 부산대학교 대학원, 1995.
11. 최재찬, 조해용, 최종용, 민규식, "내부에 세레이션 홈이 존재하는 부품의 단조에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, 제 14 권, 제 6 호, pp. 142 ~ 148, 1997.
12. 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.
13. K. Ohga, H. Ando and K. Kondo, "Forming of a Spur Gear by Use of a Liquid Lubricant - Precision Cold Die Forging of Actual Gear Toothed Products Utilizing Divided Flows I", *J. of the JSTP*, Vol. 36, No. 412, pp. 499 ~ 504, 1995.
14. 송삼홍, 이상훈, 임세혁, "침탄질화 처리된 SCM415재의 피로거동에 대한 통계적 연구", *한국정밀공학회지*, 제 14 권, 제 5 호, pp. 128 ~ 133, 1997.
15. K. Osakada, M. Shiraishi, S. Muraki and M. Tokuoaka, "Measurement of Flow Stress by the Ring Compression Test", *Int. J. of JSME Series A*, Vol. 34, No. 3, pp. 312 ~ 318, 1991.