

## 합금강을 이용한 스퍼기어의 정밀 냉간 단조

최재찬\* · 최 영\*\*

(1997년 11월 4일 접수)

### Precision Cold Forging of Spur Gear Using the Alloy Steel

J. C. Choi and Y. Choi

#### Abstract

The conventional closed-die forgings had been applied to the forging of spur gears. But the forgings require high forging-pressure. In this paper, new precision forging technology have been developed. The developed technology is two steps forging process. Good shaped products are forged successfully with lower forging-pressure than those of conventional forging. The accuracy of the forged spur gear obtained by new precision forging technology is set nearly equal to that of cut spur gear of fourth and fifth class in Korean industrial standard.

**Key Words** : Precision Forging, Forging of Spur Gear, Alloy Steel (SCM415), The Accuracy of Forged Spur Gear.

#### 1. 서론

기계부품중 기어는 정밀도와 강도를 요구하는 제품이다. 소형 정밀기어의 생산은 대부분 호빙, 세이빙과 밀링 가공 등과 같은 절삭가공에 의존하고 있다. 그러나 소성가공에 의해 성형된 기어는 절삭가공에 의해 제조된 기어에 비해 재료 및 비용절감, 생산성 향상 및 강도증가를 기대할 수 있어, 최근 냉간단조에 의한 합금강 소재의 기어 성형법 개발이 활발히 연구되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

기어 중 스퍼기어는 잇몸이 직선이며 축에 평행한 기어로 그 형상이 축방향에 대해 구제각이 전혀없고 단조시 금속유동은 축변방향으로 일어나기 때문에 단조가공시 높은 가공압력을 필요로 한다. 이러한 높은 가공압력은 금

형의 파손, 소성변형 및 마모로 인한 정밀도 저하의 원인이 된다. 이러한 점에서 낮은 가공압력으로 기어를 성형하는 정밀단조법이 개발되었다.<sup>(2,3)</sup>

Kondo와 Ohga등은 분류(divided flow)방식을 이용한 정밀단조법을 개발하고 이를 스퍼기어 단조에 응용했다.<sup>(4)</sup> 또 최근에는 합금강을 소재로 하여 스퍼기어를 단조하였다.<sup>(5)</sup> 그러나 분류방식에 의한 단조법에서, 단조시 맨드릴(mandrel)을 상·하로 교환해야 하며 내경(inner diameter)부에 금속유동이 발생하여 재료의 손실 및 추가적인 후가공을 필요로 한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 새로운 정밀단조법을 개발하고 합금강(SCM415)를 소재로 하여 스퍼기어를 단조하였다. 또한 안내형 단조로 스퍼기어를

\* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

\*\* 부산대학교 대학원, 기계설계공학과

단조에 비교하였으며 문헌(3)에 제시된 분류방식에 의한 단조법과 비교하였다. 단조된 기어의 정밀도를 측정하고 허용오차와 비교하였다.

## 2. 정밀단조법

스퍼기어를 단조하기 위한 일반적인 공정, 즉 안내형과 구속형 단조공정을 Fig.1<sup>(1)</sup>에 나타낸다. 저자는 상용 알루미늄 소재를 이용하여, 안내형 및 구속형 공정으로 스퍼기어를 단조하고 비교하였다. 비교결과, 같은 가공압력으로 단조한 경우, 안내형 공정이 이(tooth) 성형에 유리하였다. 또한 안내형의 경우, 재료와 다이벽면의 마찰로 인하여 이젝터부의 충만이 펀치부 보다 어려웠다. 또한 알루미늄 소재를 높은 가공압력인 1800(MPa)로 단조하였으나 이(tooth)의 완전한 성형을 이루지 못하였다.<sup>(1)</sup>

그러므로, 본 연구에서는 SCM415 소재의 스퍼기어를 단조하기 위해, Fig.2와 같은 2단계 단조공정(two step forging process)을 제안한다. 이는 스퍼기어 단조에 구속형 공정보다 유리한 안내형 단조공정을 변형한 형태이다. 두 번째 단조단계에서 이젝터부의 충만을 위해, 이젝터부 내측의 유동여유(inside relief)가 첫 단계에서 생성되도록 하였다. 두 번째 단조단계에서 완전 밀폐성형이 되지 않도록 이젝터의 내경을 맨드릴 외경보다 크게 하였다. 이는 단조 최종단계에서의 가공압력을 낮추기 위해서이다.

비교를 위해, Fig.3<sup>(2)</sup>에 분류방식에 의한 스퍼기어의 정밀단조를 나타낸다. 분류방식에 의한 단조에서는 첫 번째 단조단계에서 사용한 맨드릴을 두 번째 단조단계에서 사용할수 없으므로 교환하여야 한다. 또한 두 번째 단조단계에서 상·하로 구속을 줌으로 맨드릴도 상·하로 교환하여야 한다. 또한 맨드릴이 없는 부분으로 유동여유가 있으므로 내경부에 금속유동이 발생하며 이는 단조후 절삭가공으로 제거해야 한다. 이점은 재료의 손실을 가져오고 생산성을 낮추는 결과를 초래한다.

이러한 점을 본 연구에서 제안한 방법과 비교하면, 하형의 이젝터만을 교환하도록 하여 금형교환을 용이 하게 하였다. 구속형 단조에서 사용되는 금형 작동방식으로 수정하면, 펀치를 이젝터로, 이젝터를 펀치로 작동하도록 하는 것이 가능하다.<sup>(1)</sup> 이 경우, 더욱 생산성 높은 단조가 가능하다고 판단된다. 또한 내경부 금속유동이 발생하지 않음으로 분류방식 단조에서 발생하는 재료손실과 후가공 문제를 해결하였다. 제안한 정밀단조법에서, 첫 번째 단조단

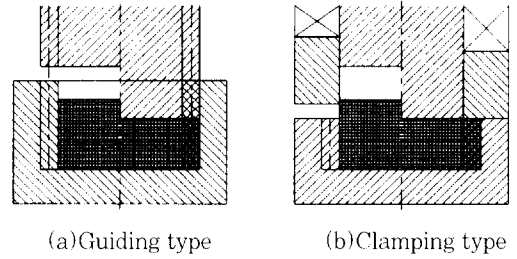


Fig. 1 Die design schematics for gear forging<sup>(1)</sup>

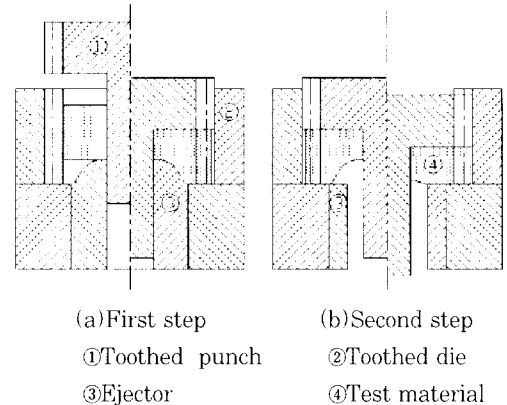


Fig. 2 Die design schematics for the steps precision-forging of a spur gear

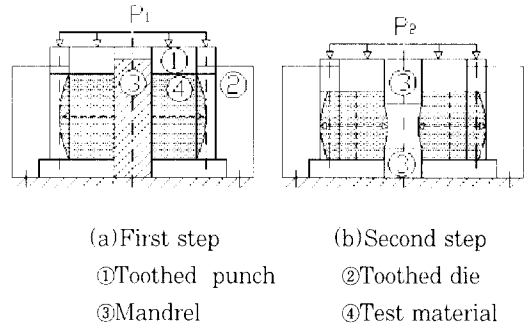


Fig. 3 Two steps forging process utilizing divided flow method<sup>(2)</sup>

계에서 생성되는 내측 유동여유가 극소하면, 단조 최종단계에서 이젝터 방향으로 금속유동이 발생하여 재료손실 및 추가적인 후가공을 필요하게 된다. 그러므로 단조 최종단계에서 내측 유동여유가 완전히 채워지지 않도록 하는 것이 필요하다.

### 3. 단조실험

#### 3.1 금형설계

합금강(SCM415) 소재의 스퍼기어를 단조하기 위해, Fig.2의 정밀단조법에 맞추어 금형을 설계 및 제작하였다. 스퍼기어의 재원은 Table 1과 같다.

일반적인 냉간단조 공정에서 200(kgf/mm<sup>2</sup>)의 높은 압력이 금형에 작용함으로써 금형의 파손 방지 및 탄성변형을 억제하기 위해 보강링(stress ring)을 이용하여 다이로 보강하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 다이를 2중으로 보강하였다. 금형의 치수정도를 확보하기 위해 보강링을 열박음 한 후, 내면을 와이어 컷(wire-cut) 방전가공하고 연마가공을 하였다. 펀치, 이젝터 및 다이 인서트는 고속도강(SKH9) 재료를 Hrc 65로 열처리 하였다.

#### 3.2 단조실험

소재는 풀림처리 한 후, 외경 23(mm)내경 11.5(mm)및 높이 15(mm)로 기계가공 하였으며, 단조시 마찰력을 줄이기 위해 인산염 피막처리를 하였다.

단조실험은 200(tonf) 유압프레스를 이용하여 수행하였다. 첫 번째 단조단계에서의 최대하중과 두 번째 단조단계에서의 최대하중을 같도록 실험하였다. 이 때 최대하중을 증가 시키면서 실험하였다. 가공압력이 1860(MPa)인 85.5(tonf)일 때, 이(tooth)의 성형이 완전하였다. 비교를 위해, 단조 최종단계의 하중을 같게하여, 안내형 단조 공정으로 스퍼기어를 단조하였다. 비교를 위해, 단조하중을 85.5(tonf)으로 같게하여, 안내형 단조공정으로 단조하였다.

#### 3.3 유동여유

제한한 정밀단조법은 첫 번째 단조단계에서 생성되는 내측 유동여유(inside relief)를 이용하여 단조 최종단계에서 완전한 성형을 하는 단조법이다. 그러므로 유동여유의 형상이 중요한 변수가 된다. 요구되는 조건은, 첫 번째 단조단계에서 생성되는 유동여유가 두 번째 단조단계에 폴딩(folding)결함이 발생되지 않아야 한다. 또한 단조 최종단계에서 내측 유동여유가 완전히 채워지지 않도록 하는 것이 필요하다.

본 연구에서 사용한 이젝터 형상을 Fig.4에 나타낸다. 첫 번째 단조단계에서 유동여유를 생성하는 이젝터의 돌출부 형상을 2가지로 하였으며, 이를 Fig.4 (a)와 (b)에 나타낸다. Fig.4 (c)는 단조 최종단계의 이젝터 형상이다.

유동여유 형상에 대한 비교를 Fig.5에 나타낸다. 단조하중은 85.5(tonf)로 같게 하였다. Fig.4 (a)에 보인 형상을 갖는 이젝터를 이용하여 단조한 후, 단조 최종단계에서 Fig.4 (c)에 보인 이젝터를 이용하여 단조한 스퍼기어의 이끝원에 대한 단면을 Fig.5 (a)에, Fig.4 (b)의 경우를 Fig.5 (b)에 나타내었다. Fig.5 (a)의 경우, 내부의 폴

Table 1 Adopted involute standard external spur gear

Module	1.5mm
Pressure angle	20°
Number of teeth	18
Pitch circle	27.0mm
Inner diameter	11.5mm

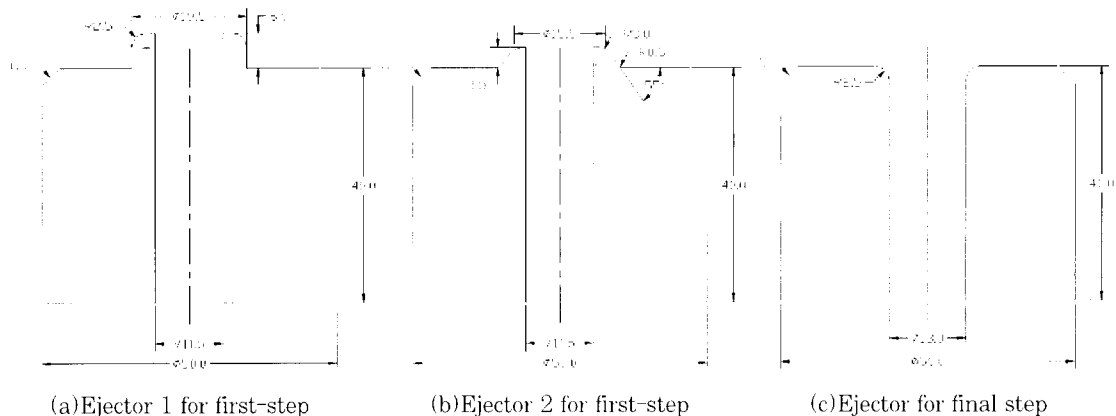
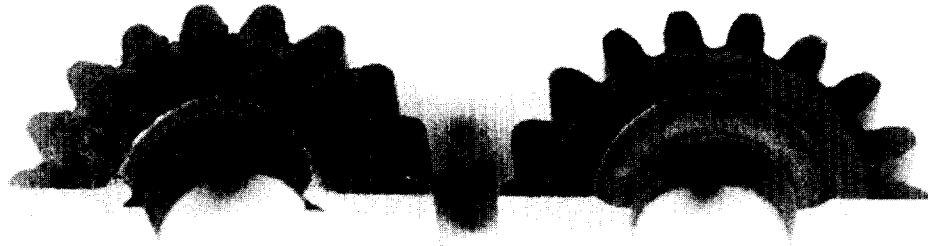


Fig. 4 Various ejector shapes for two-step precision forging with inside relief



(a)Ejector 1

(b)Ejector 2

Fig. 5 Comparison of spur gears forged with two-types inside relief

덩결함이 보이며, 재료가 이젝터 방향으로 유동하여 재료 손실 및 추가적인 후가공을 필요하게 된다. Fig.5 (b)의 경우는 이러한 문제점이 발생하지 않음으로 Fig.4 (b)에 보인 이젝터를 첫 번째 단조단계에서 이용하고 Fig.4 (c)의 이젝터를 단조 최종단계에서 이용하였다.

그러나 향상된 정밀단조를 위해서는 이젝터 형상에 대한 최적화가 요구된다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 하중-변위 선도

실험으로 얻어진 정밀단조법의 하중-변위선도를 Fig.6에 나타낸다. 첫 번째 단조단계에서, 유동 여유의 생성 때문에 편치행정이 길다. 그러므로 정밀단조법으로 단조할 경우, 소비되는 에너지가 많으며, 이로 인해 제품의 가공경화 정도가 높을 것이다. 두 번째 단조단계에서는 하중이 급속히 증가하나 일정한 기울기를 보인다. 통상의 단조공정에서는 단조 최종단계에서 급격한 하중증가가 있다. 이는 이젝터부의 유동 여유가 아직 남아 있기 때문이다.

##### 4.2 단조품

Fig.7에 (a)소재, (b)최종 단조된 스퍼기어를 나타낸다. 또한 편치부와 이젝터부에 재료가 균일하게 충만되었다. 이는 유동 여유를 뚫으므로, 안내형 단조공정에서 마찰력 때문에 재료가 편치부에 집중되는 현상을 해결했음을 나타낸다. Fig.8에 단조된 기어의 이젝터부를 보인다. 유동 여유부가 첫 번째 단조단계에서 완전히 형성되고 다음 단계에서는 이(tooth)가 성형이 된다. 단조 최종단계에서도 유동 여유부가 완전히 없어지지 않고 있다.

Fig.9 (a)에 완전 풀림처리된 소재(SCM415)의 조직

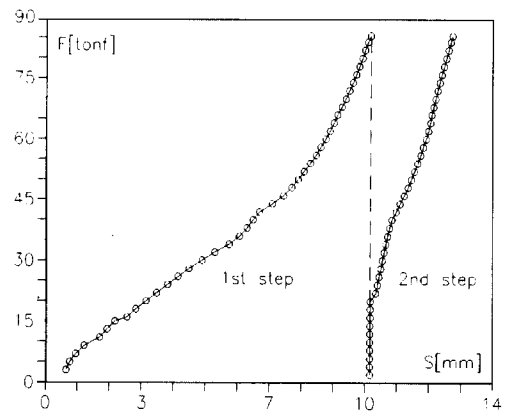


Fig. 6 Load-displacement diagram of the two step precision-forging

과 (b), (c) 및 (d)에 단조된 기어의 조직을 나타낸다. 단조된 기어의 조직은 이나비 중심의 축직각 평면에서 관찰된 것이다. (b)는 피치원 상의 조직으로, 반경방향으로 재료가 유동된 조직을 보인다. 이뿌리원 부근의 조직인 (c)는 피치원 상의 조직(b) 보다 치밀하고 미세하다. 단조시, 이뿌리원 부근의 영역에서 급격한 금속유동이 일어남을 보이는 것이다. (d)에 보인 맨드렐 접촉부 부근의 조직은 축방향으로 압축되어져 있음을 알 수 있다. 이들 금속조직에서 단조 전의 조직보다 단조 후 조직이 훨씬 치밀하고 미세하다. 이는 단조 후 재료의 성질이 개선됨을 보이는 것이다. 또한 대략적인 금속유동을 알 수 있다.

##### 4.3 가공압력

Fig.10에 안내형 단조공정으로 단조한 스퍼기어와 비교를 나타낸다. 같은 가공압력, 1860(MPa),으로 성형한 결과

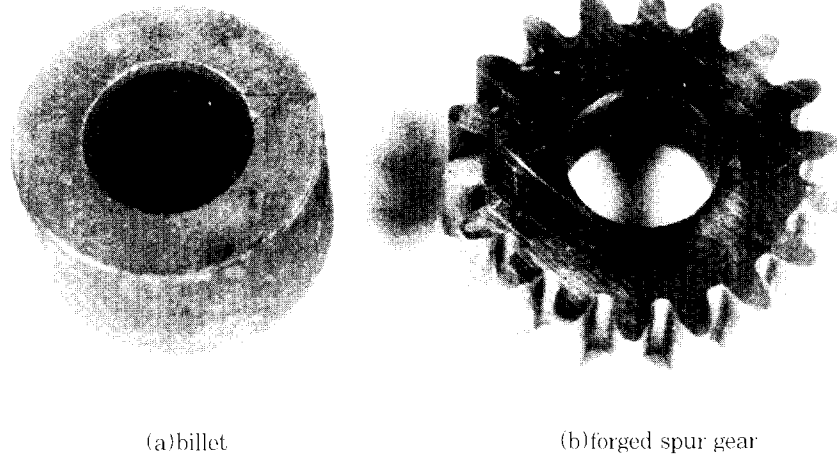


Fig. 7 Billet and forged spur gear in the loading direction view

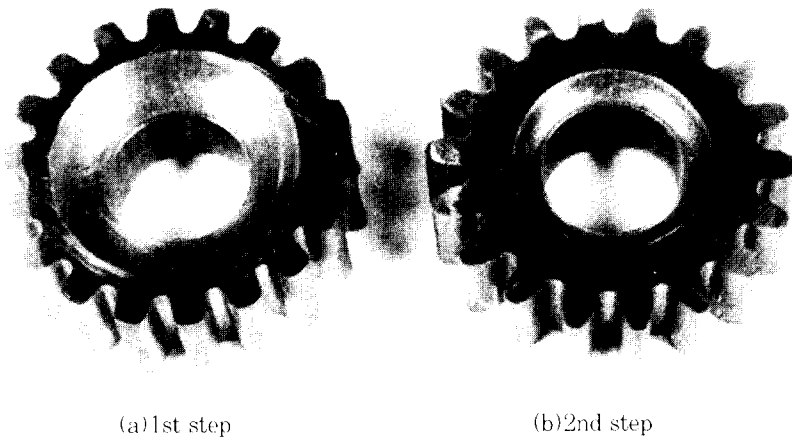


Fig. 8 Forged workpieces in the reverse direction view

이다. 안내형 공정에서는 다이벽면에 작용하는 마찰력 때문에 재료가 편치부에 집중되었고 이(tooth)가 완전히 성형되지 못했다. 그러나 본 연구에서 제안한 방법으로 성형한 스퍼기어는 이(tooth)가 완전히 성형되어졌다. 이는 제안한 단조방법이 정밀단조법임을 나타내는 것이다.

실험에서 1860(MPa)로 SCM415 소재의 스퍼기어 단조가 가능하였는데, 이 압력은 낮은 값이다. Kondo와 Ohga등은 분류방식을 이용한 2단계의 정밀단조법으로 S10C, SCr420H 및 SNCM420H 재료에 대해 1510(MPa), 1940(MPa) 및 2260(MPa)로 스퍼기어를 단조하였다.<sup>43)</sup>

#### 4.5 단조기어의 정밀도

제안한 정밀단조법으로 단조된 스퍼기어의 정밀도를 측정하고 이를 Table 2과 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서는 정밀도 및 허용오차는 한국산업규격<sup>44)</sup> 규를 따른다. 이형오차(tooth-profile error)와 잇줄방향오차(lead error)의 측정치를 Table 3에 나타낸다.

단조된 기어의 이형의 정밀도를 나타내는 이형오차는 3급(R), 4급(L)이다. 4급을 보인 10( $\mu\text{m}$ )의 오차는 3급 기어의 허용오차인 9( $\mu\text{m}$ )에 가깝다. 이형 기록선도에서 검사범위내의 불룩부 및 오목부의 최대나비를 이형오차로 한다. 측정된 이형오차는 절삭가공된 기어의 이형검사법

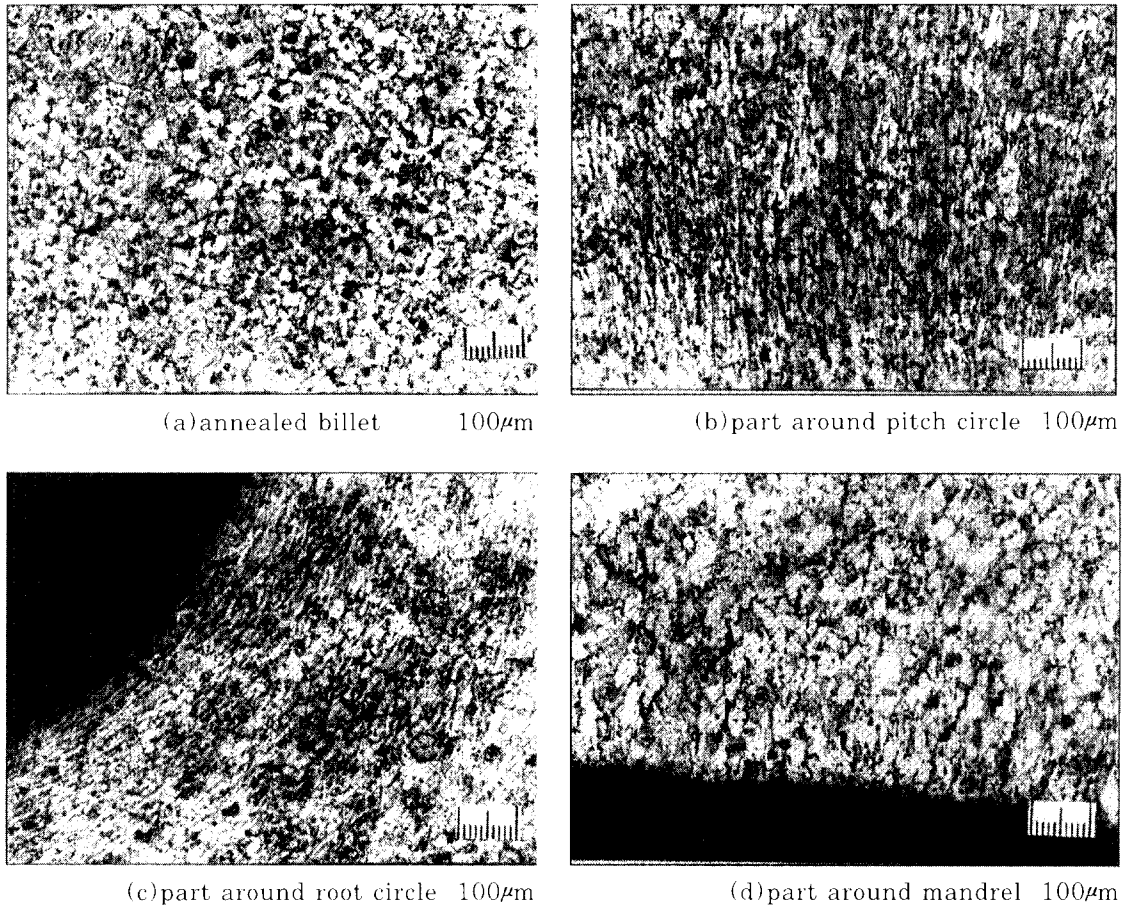


Fig. 9 Micro-structures of billet and forged spur gear at plane of rotation

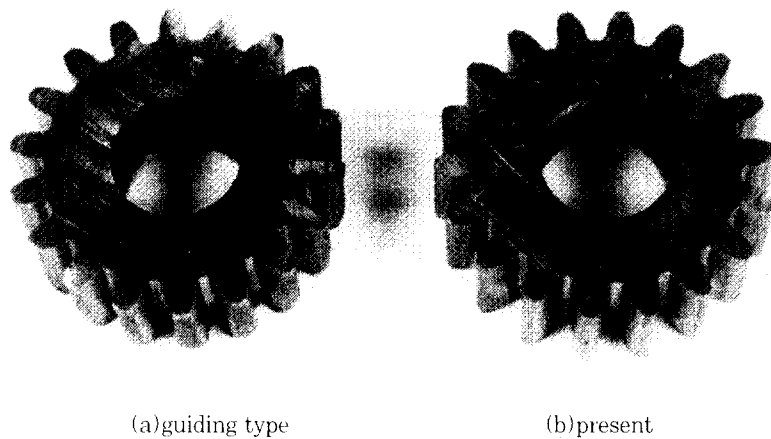
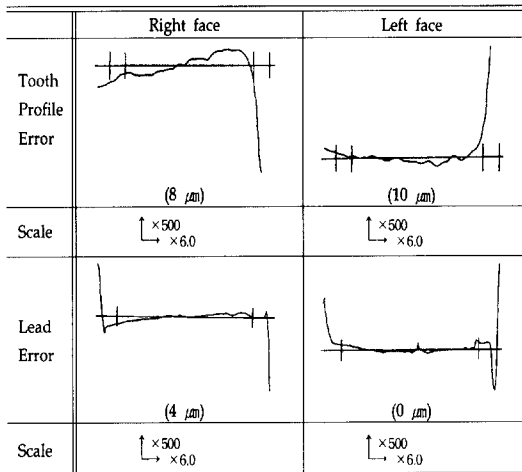


Fig. 10 Comparison of the forged spur gears between guiding type and the present precision-forging in loading direction view

**Table 2 Tolerances and errors of the forged spur gear**

Error [ $\mu\text{m}$ ]	Right (class)	Left (class)	Tolerances (class in KS)
Pitch error	14.2(5)	11.8(4)	10(3), 14(4), 19(5), 28(6)
Spacing error	18.7(5)	16.9(5)	10(3), 15(4), 22(5), 33(6)
Index error	35.2(3)	15.1(1)	19(1), 28(2), 39(3), 55(4)
Tooth-profile error	8(3)	10(4)	6(2), 9(3), 13(4), 18(5)
Lead error	4(0)	0(0)	7(0), 8(1), 9(2)

**Table 3 Charts of the tooth-profile and lead measurement**



위에 따른 것이다. Table 3를 살펴보면, 이끝(tip)에서의 오차가 크다. 상대기어의 이뿌리 형상을 수정하면, 즉 이 끝에서의 이형검사 범위를 줄이면 단조된 기어의 이형 정밀도를 쉽게 향상시킬 수 있다. 또한 단조 최종단계에서 이끝부가 성형됨으로, 정밀도 향상을 위해서는 낮은 단조 하중으로 성형하는 것이 요구된다. Table 3의 잇줄방향오차(lead error)는 유효이나비에 대한 이형 정밀도를 나타낸다. 즉, 단조된 스퍼기어의 축방향에 대해 이형이 얼마나 균일하게 성형되어졌는가를 나타낸다. 본 연구에서 제안한 방법으로 단조한 경우, 잇줄방향오차에 대해 높은 정밀도(0급)를 보인다. 이는, 제안한 정밀단조법이 축방향의 유효이나비 범위내에서 균일한 성형을 할 수 있는 방법임을 보이는 것이다. 단일피치오차(pitch error)는 4급(L), 5급(R)이다. 5급을 보인 14.2( $\mu\text{m}$ )는 4급 기어의 허용오차인 14( $\mu\text{m}$ )에 가깝다. 인접피치오차(spacing error)는 5급이다. 또한 누적피치오차(index error)는 피치오차 중 중요한 항목이며, 1급(L), 3급(R)의 높은 정밀도를 보인다. 단조기어의 피치오차는 펀치, 다이, 소재 및 이젝터의 동축도와 관련된 항목이다.<sup>18)</sup> 이 값을 개선시

키 위해서는 정밀한 금형의 가공 및 조립기술과 정도 높은 소재를 이용하는 것이 필요하다. 제안된 정밀단조 공정으로 얻은 스퍼기어는 4~5급의 정밀도를 나타낸다. S12C를 이용한 안내형단조에 의한 스퍼기어의 정밀도(6급)<sup>19)</sup> 보다 향상된 것이다.

### 5. 결 론

SCM415를 소재로 하여 스퍼기어를 단조하기 위해 정밀단조법을 제안하고 단조실험하였다. 제안한 단조법은 2단계 단조공정을 가진다. 첫 번째 단조단계에서 유동 여유를 생성하고, 최종단계에서 이(tooth) 성형이 완료된 후에도 유동 여유가 있으므로 낮은 단조압력으로 성형이 가능했다. 즉, 1860(MPa)의 낮은 가공압력에서 이(tooth) 성형이 완전한 스퍼기어를 얻을 수 있었다. 단조 전·후의 금속조직을 관찰하였다. 단조 전의 SCM415 소재의 조직보다, 단조 후 조직이 훨씬 미세하고 치밀하였다. 따라서 단조 후 재료의 성질이 향상을 기대할 수 있다. 또한 대략적인 금속유동을 관찰할 수 있었다. 단조된 스퍼기어의 정밀도를 측정하였다. 제안된 정밀단조 공정으로 얻은 스퍼기어는 4~5급의 정밀도를 나타낸다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- (1) 심상운, 송기섭, 윤두성, 박용복, 양동열, 1995, "자동차용 후진 아이들 기어의 정밀 냉간 단조", 단조기술의 진보, 이동녕·박종진 편, pp.145~157.
- (2) T. Nakano, 1994, "Modern applications of complex forming and multi-action forming in cold forging", J. Mater. Process. Technol., 46, pp.201~226.
- (3) K. Ohga, F. Murakoshi, H. Ando and K. Kondo, 1996, "Precision cold die forging of actual steel gear toothed products utilizing divided flows", Proceedings of the 5th I.C.T.P., Columbus, Ohio, USA, pp.331~334.
- (4) 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.
- (5) 최재찬, 최영, 김경구, 탁성준, 1997, “스퍼어기어의 단조 공정에 관한 연구”, 한국정밀공학회 '97년도 춘계학술대회논문집, pp.1015~1019.
- (6) 한국산업규격(KS) B 1405, 1971, 스퍼어 기어 및 헬리컬 기어의 정밀도.
- (7) 한국산업규격(KS) B 1406, 1990, 스퍼기어 및 헬리컬기어의 측정방법.
- (8) 이정환, 이영선, 박종진, 1996, “냉간단조 스퍼어기어의 치수정밀도”, 한국소성가공학회지 제5권 제2호, pp. 115~121.
- (9) 최재찬, 김창호, 허관도, 최영, 1995, “중공소재에 의한 스퍼어기어의 냉간단조에 관한 연구”, 한국정밀공학회, 제12권, 제8호, pp. 63~72.