

평기어의 정밀 냉간단조 금형설계

Die Design on the Precision Cold Forging of Spur Gear

*권혁홍, 진형민(대전대학교 기계설계공학과), 김형섭(인덕대학 기계설계과)

H.H. Kwon*, W.M. Jin(Dep. of Mechanical Design Eng., Daejin Uni.), H.S. Kim
(Dep. of Mechanical Design, Induk I. T.)

ABSTRACT

The conventional closed-die forging processes had been applied to forging of the spur gears. But this type process requires high pressure. The commercial finite element analysis code ANSYS for the stress and elastic deformation of non-axisymmetric die was adopted in this study. In the non-axisymmetric die such as gear forging, maximum stresses were imposed on the tip of the gear tooth. When the stress exceeds yield strength of insert die, many approaches were attempted to prevent the die failure. Good shaped products are forged successfully. This type process could be used as an advanced technique to replace conventional hobbing process of gear.

Key Words : Closed-die Forging(밀폐단조), Spur Gear(평기어), Die Insert(다이인서트), Stress Ring(보강링), Contact Pressure(접촉면압)

1. 서 론

기계부품중 기어는 정밀도와 강도를 요구하는 제품이다. 소형 정밀기어의 생산은 대부분 호빙, 세이빙과 밀링가공 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 냉간단조 및 압출에 의한 합금강 소재의 기어 성형법 개발이 활발히 연구되고 있다[1-5].

그러나, 냉간가공용 금형은 다른 프레스가공에서는 볼 수 없는 대단히 큰 응력이 작용하는 가혹한 작업조건하에서 사용되므로 형파손이 많으며, 이에 따른 금형수명의 저하는 금형가격을 상승시켜 제품가격의 상승원인이 된다. 또한 냉간가공에 의해 생산되는 제품의 정밀도는 금형의 정밀도에 완전히 결정되며, 제작되는 기어의 정밀도 또한 금형의 정밀도에 전적으로 의존하게 되므로, 금형의 수명과 냉간가공된 기어가 요구되는 수준의 정밀도를 얻기 위해서는 컴퓨터에 의한 금형의 설계·제작법(CAD/CAM)이 필수적이며, 금형의 파손대책을 고려한 신뢰도가 높은 금형설계가 기술적, 경제적 성

공을 위해서는 아주 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 컴퓨터를 이용한 비축대칭 냉간단조품의 금형설계를 하였다. 비축대칭 형상에서 응력집중과 탄성변형량을 고려하기 위하여 두꺼운 원통에 관한 해석해인 *Lamè* 식을 이용하여 다이인서트와 보강링의 접촉면압을 계산하여 이를 하중조건으로 한 유한요소해석을 통하여 얻어진 응력의 크기로써 금형의 안정도를 평가하고, 설계된 금형이 단조중 파손되지 않도록 비축대칭 부품인 인벌류우트 기어의 단조 금형을 설계하고자 한다.

2. 금형설계 규칙 및 계산식

본 연구에서 제시된 단조부품의 금형설계 규칙배이스는 경험적인 설계지침들과 노하우(know-how)를 체계화하였으며 정량화한 계산식들은 전 길이에 따라 일정압력을 받는 두꺼운 원통으로 고려하며, *Lamè* 방정식으로부터 시작된다[6,7].

[규칙 1] 금형세트 총 외경은 프레스의 재원에 따라 결정된다.

[규칙 2] 인서트와 보강량의 항복조건은 Tresca 항복조건을 적용한다.

[규칙 3] 인서트와 보강량의 조립순서는 다이 인서트의 교체는 편리하도록 최외각 링부터 순차적으로 행한다.

[규칙 4] 인서트와 보강량의 설계는 최대허용내압이 발생할 수 있도록 직경을 분할한다.

[규칙 5] 최대허용 내압이 작용할 때는 인서트와 보강량이 동시에 항복되도록 끼워맞춤공차를 준다.

[규칙 6] 인서트와 보강량의 설계에서 다이내압 P_d 와 최적 분할비를 사용할 때의 P_{iopt} 및 끼워맞춤에 의한 다이인서트의 항복방지를 위한 한계내압 P_{ilimit} 의 관계는 $P_d \leq P_{iopt} \leq P_{ilimit}$ 이다.

[규칙 7] 인서트와 보강량이 동일한 공구강이면, 압축응력이나 인장응력에 대하여 동일한 항복강도를 가지므로 작업중에 다이인서트에 인장응력을 허용한다.

[규칙 8] 인서트와 보강량이 재질이 다른 경우 즉, 다이인서트의 재질이 초경합금(W. C)이면, 인서트가 인장응력에 취약하므로 작업중에 인서트에 인장응력을 허용하지 않는다.

[규칙 9] 인서트와 보강량의 조립방법은 열박음(heat fitting), 억지끼워박음(press fitting) 및 이들의 조합된 방법 등이 있다.

[규칙 10] 금형의 재질은 기계적 성질에 따라 작업 중 결함이나 파손이 일어나지 않도록 선정한다.

[규칙 11] 마모가 현저한 대량생산과 정밀공차를 갖는 부품을 성형할 때의 금형의 재질은 초경합금을 선정한다.

[규칙 12] 보강량의 열박음은 (가열온도) \leq (뜨임 tempering) 온도이다.

■ 보강량이 한 개인 경우

- 최적분할직경비

$$Q_{1opt} = \sqrt{\frac{Q}{K_1}}$$

- 최대허용내압

$$P_{iopt} = S_{y1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{K_1} \right] - Q \sqrt{\frac{1}{K_1}} \right\}$$

- 한계내압

$$P_{ilimit} = S_{y1} (1 - Q^2) \left\{ Q=0, \frac{P_{iopt}}{S_{y1}} = 1 \right\}$$

- 접촉면압

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{1 - Q_{1opt}^2}{1 - Q^2} \{ S_{y2} (1 - Q_{2opt}^2) - S_{y1} (Q_{1opt}^2 - Q^2) \}$$

- 공차

$$Z_1 = \left[\frac{1}{E_2} \frac{1 + Q_{2opt}^2}{1 - Q_{2opt}^2} + \frac{1}{E_1} \frac{1 + Q_{1opt}^2}{1 - Q_{1opt}^2} \right] P_1 d_1$$

■ 보강량이 2개인 경우

- 최적분할직경비

$$Q_{1opt} = \sqrt[3]{\frac{Q}{\sqrt{K_1 \cdot K_2}}}$$

$$Q_{1opt} = Q_{1opt} \sqrt{K_1} = \sqrt[3]{\frac{Q K_1}{\sqrt{K_2}}}$$

- 최대허용내압

$$P_{iopt} = \frac{1}{2} (S_{y1} + S_{y2} + S_{y3}) - 1.5 S_{y1} \cdot Q_{1opt}^2$$

- 한계내압

$$P_{ilimit} = S_{y1} (1 - Q^2) \left\{ Q=0.22, \frac{P_{iopt}}{S_{y1}} = 0.95 \right\}$$

- 접촉면압

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{1 - Q_{1opt}^2}{1 - Q^2} \{ S_{y2} (1 - Q_{2opt}^2) + S_{y3} (1 - Q_{3opt}^2) - S_{y1} (Q_{1opt}^2 - Q^2) \}$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \frac{1 - Q_{2opt}^2}{1 - Q_{2opt}^2 Q_{3opt}^2} \{ S_{y3} (1 - Q_{3opt}^2) - S_{y2} (Q_{2opt}^2 - Q_{1opt}^2 Q_{3opt}^2) \}$$

- 공차

$$Z_1 = \left\{ \frac{1}{E_2} \frac{(1 + Q_{2opt}^2 Q_{3opt}^2)}{(1 - Q_{2opt}^2 Q_{3opt}^2)} + \frac{1}{E_1} \frac{(1 + Q_{1opt}^2)}{(1 - Q_{1opt}^2)} \right\} p_1 d_1$$

$$Z_2 = \left\{ \frac{1}{E_3} \frac{(1 + Q_{3opt}^2)}{(1 - Q_{2opt}^2)} + \frac{1}{E_1} \frac{(1 + Q_{2opt}^2)}{(1 - Q_{2opt}^2)} \right\} p_2 d_2$$

여기서, Q 는 금형의 내외경비(D_i/D_o)이며, K_1 은 다이인서트와 제 1보강량의 항복강도 비(S_{y1}/S_{y2})를 나타낸다.

2-1. 금형설계 규칙 및 계산식 적용

금형내경을 설계하고자 하는 기어류 부품의 단조용 금형을 설계하기 위해 설계 규칙과 계산식을 이용한 설계모듈을 수행하여 Table 2-1에 나타냈다. 이는 금형재질에 대한 데이터를 이용하여 주어진 입력사항을 기초로 하여 실제 제작에 필요한 금형변수, 즉 최적분할직경, 한계내압, 접촉면압, 끼워맞춤공차 등이 계산된다.

Table 2-1 Forging die design module of spur gear

스퍼기어 단조 금형설계 모듈	
컨테이너의 내경[mm] = 30 다이세트의 총외경[mm] = 274	
*** 보강링이 한 개인 경우 ***	
인서트링의 탄성계수 (SKH9, HrC55) = 220000	항복강도 = 2450 포아송비 = .3
제 1 보강링의 탄성계수 (SKD11, HrC50) = 209000	항복강도 = 1950 포아송비 = .3
최적분할 직경비 = .3125378	최적분할 직경[mm] = 95.9884
최대허용내압 = 1960.684	
한계내압 = 2420.63	
접촉면압 [Mpa] = 794.5684	
공차 [mm] = .4866628	
*** 보강링이 두 개인 경우 ***	
인서트링의 탄성계수 (SKH9, HrC55) = 220000	항복강도 = 2450 포아송비 = .3
제 1 보강링의 탄성계수 (SKD11, HrC50) = 209000	항복강도 = 1950 포아송비 = .3
제 2 보강링의 탄성계수 (SKD61, HrC52) = 212000	항복강도 = 1450 포아송비 = .3
최적분할 직경비 = .4383529	최적분할 직경 1[mm] = 68.43801
최적분할 직경비 = .4913485	최적분할 직경 2[mm] = 139.2851
최대허용내압 = 2266.027	
한계내압 = 2420.63	
접촉면압 [Mpa] = 1017.081	395.5316
공차 [mm] = .499958	.4739565

3. 기어금형의 유한요소해석

3-1. 평기어 금형해석

합금강(SCM415) 소재의 잇수 18, 모듈 1.5인 평기어를 단조하기 위해 설계된 금형에 대하여 ANSYS를 이용하여 보강링과 다이인서트 사이에는 접촉면압을 고려하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 평기어의 단조금형에 대하여 보강링을 체결하지 않은 단조금형에 최종상태의 내압(1860 Mpa)이 작용할 때의 해석된 금형에 발생하는 응력분포를 나타내면 Fig. 1과 같다. 내압이 작용할 경우 이부

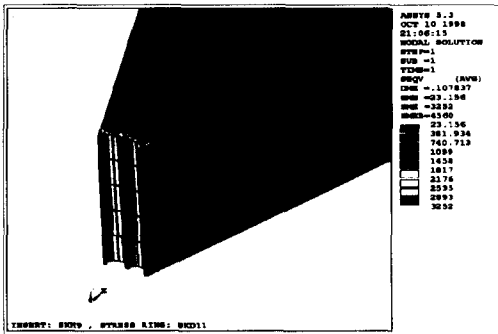
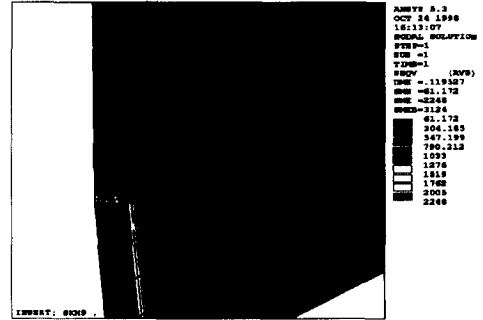


Fig. 1 Stress distribution acting on spur die without stress-ring

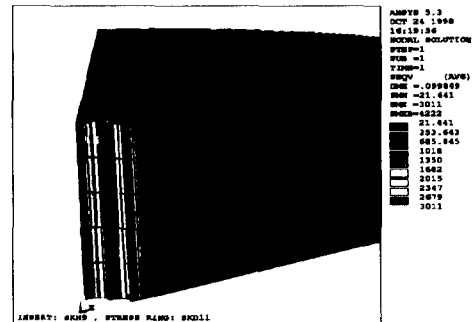
리부의 응력집중으로 인한 최대응력의 크기는 항복강도를 초과하는 응력이 발생함을 알 수 있다. 이와 같이 이뿌리부에서 응력집중으로 인한 최대응력이 금형재료의 항복강도를 초과하여 파손이 예상되

로 최대응력 크기를 감소시킬 수 있도록 보강링을 끼움으로써 예압력을 발생시켜 금형을 재설계한다.

보강링이 1개인 경우에 대하여 접촉면압과 최종상태의 단조압력을 하중조건으로 하여 금형에 단조 최종상태의 압력이 작용할 때와 작용하지 않을 때에 대하여 유한요소해석을 수행한 경우의 응력분포를 Fig. 2에 나타내었다. 이 역시 내압이 작용하는 상태에서는 이뿌리부에서 응력집중으로 인한 파손이 예측되어 금형의 재설계가 요구된다.



(a) without inner pressure

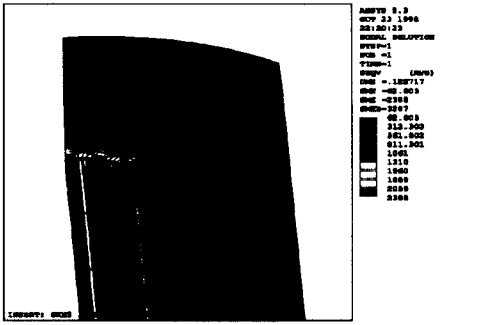


(b) with inner pressure

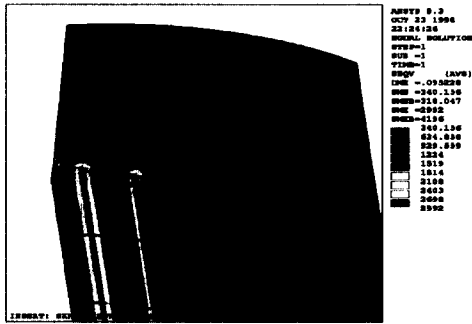
Fig. 2 Stress distribution of spur die with one stress-ring

여기서, 다이인서트에 외압력으로써 계산된 접촉면압을 하중조건으로 유한요소해석을 통하여 얻어진 최대응력의 크기는 Fig. 3에서 나타난 바와 같다. 보강링이 있을 경우에 접촉면적에 계산된 접촉면압을 부가하여 계산된 최대 응력치와 거의 같은 결과가 도출되어 일반적으로 접촉문제를 고려한 유한요소해석으로는 해석시간이 많이 요구되며 유한요소 모델링시에도 많은 어려움이 있으며 상당한 어려운 경험이 요구되는 문제점들을 이와같이 간편

하게 다이인서트와 보강링에 작용하는 접촉압력을 금형설계 규칙에 의해 계산된 접촉면압을 이용하여 계산 가능함을 보였다.



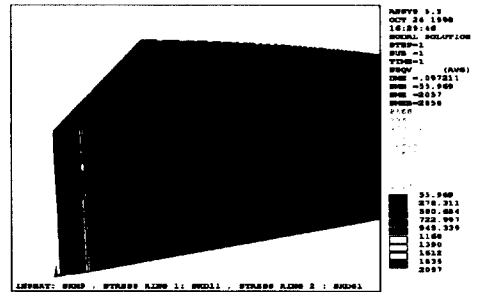
(a) without inner pressure



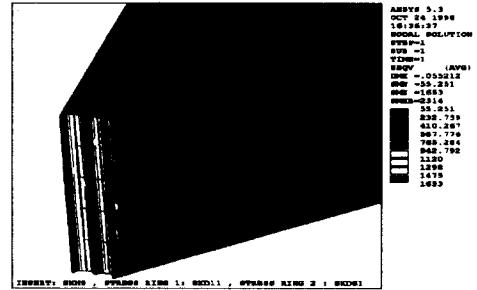
(b) with inner pressure

Fig. 3 Stress distribution of spur insert-die with one stress-ring

보강링의 개수를 2개인 경우에 대하여 유한요소 해석한 결과 응력분포를 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 내압이 작용하는 경우에도 인서트의 항복강도치를 초과하지 않음을 알 수 있다. 그리고, Fig. 5(a)에 내압력이 작용하지 않을 때의 2개의 보강링을 열박음량에 따라 반경방향으로의 금형의 수축이 발생한다는 것을 알 수 있고, Fig. 5(b)는 내압력이 작용할 때의 금형의 탄성팽창량이 50[μ m] 정도 예측할 수 있다. 결국, 접촉면압과 내압력을 작용하여 비축대칭 부품인 평기어 단조 금형세트 도면을 Fig. 6과 같이 작도하였다.

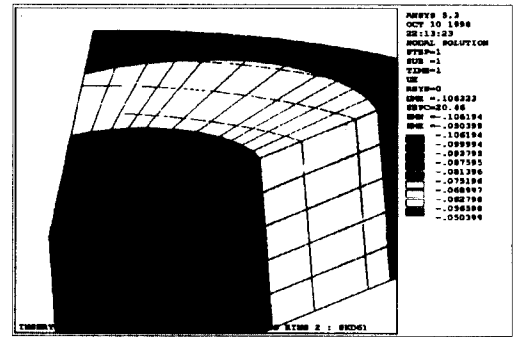


(a) without inner pressure

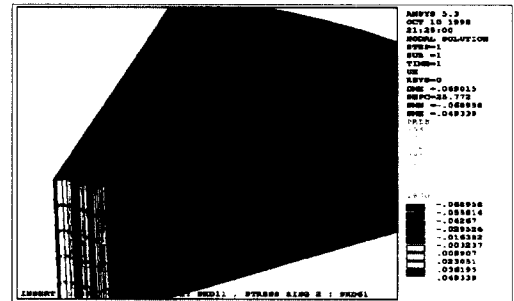


(b) with inner pressure

Fig. 4 Stress distribution of spur die with two stress-ring



(a) without inner pressure



(b) with inner pressure

Fig. 5 Radial displacement distribution of spur die with two stress-ring

4. 금형제작 및 실험

보강링(stress ring)을 이용하여 금형을 2중으로 보강하였다. 금형의 치수정도를 확보하기 위해 보강링을 열박음 한 후, 내면을 방전가공한 후 연마가공을 하였다. 펀치, 이젝터 및 다이 인서트는 고속도강(SKH9) 재료를 Hrc 65로 열처리하였다. 소재는 풀림처리한 후, 외경 23mm, 내경 11.5mm 및 높이 15mm로 기계가공하였으며, 단조시 마찰력을 줄이기 위해 인산염 피막처리를 하였다.

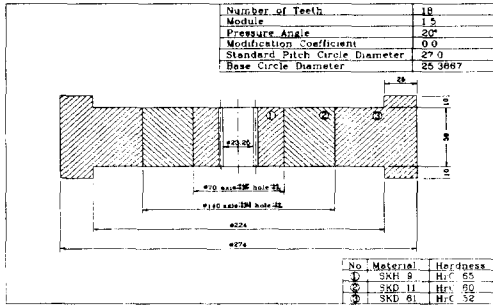


Fig. 6 Schematic drawing of designed spur die

단조실험은 200[tonf] 유압프레스를 이용하여 수행하였다. 첫 번째 단조단계에서의 최대하중과 두 번째 단조단계에서의 최대하중을 같도록 실험하였다. 이 때 최대하중을 증가시키면서 실험하였다. 가공압력이 1860[MPa]인 85.5[tonf]일 때, 이(tooth)의 성형이 완전하였다.

5. 결과 및 고찰

기어류 부품을 내면에 치형이 가공된 금형을 사용하여 단조할 경우 치형의 기하학적 형상으로 인하여 이뿌리부에 응력집중으로 인한 과도한 응력이 발생하여 금형이 파손될 수 있다. 금형파손이 예측될 경우 응력의 크기를 감소시키기 위해 금형을 수정하여 재설계한다. 금형수정의 첫 번째 방법은 금형세트의 총외경을 증가시키는 방법이다. 두 번째 방법은 보강링의 개수를 늘림으로써 금형세트의 최대 허용내압을 증가시키는 방법이다. 하지만 이 방법은 다이를 가공할 때 더 많은 비용과 시간이 걸리는 단점이 있다. 세 번째 방법은 금형설계모듈에

서 계산된 공차량을 조절함으로써 금형세트에 작용하는 응력을 조절하여 궁극적으로 금형의 이뿌리부에 작용하는 응력집중의 크기를 감소시키는 것이다. 네 번째 방법은 강도가 높은 금형재질을 선정하는 방법이다. 금형의 해석 및 수정은 초기 입력한 공정 변수를 변화시키면서 원하는 응력상태의 금형을 얻을 때까지 반복 수행한다.

해석된 결과를 이용하여 금형제작을 거친 후 실험을 행했다. 소재를 금형에 넣고 단조하게 되면 단조된 기어는 무부하시 금형성형부의 기어와 똑같은 치수를 갖는 것이 아니라 여러가지 요인으로 성형부의 기어와는 다른 치수를 갖게 된다. 그 요인으로는 단조압력에 의한 금형의 변형, 소재의 탄성회복 등이다. 따라서, 기어 치 각각의 정밀도를 향상시키기 위해서는 금형변형, 소재의 탄성회복량 외에 과방전량 등을 예측하고 이를 금형제작시 보정하는 것이 필요하다.

과방전, 래핑 및 탄성변형량을 고려한 평기어의 이론적인 치형을 예측하기 위해 전위량을 기준으로 계산된 치형을 Fig. 7에 나타내었다. 전극의 치형을 점선으로 나타낸 후 우측면에 금형의 방전가공 후의 치형과 최종 다이치형을 나타내었다. 좌측에는 최종 금형에서 탄성팽창한 단조된 기어를, 그리고 마무리가공 즉, 세이빙가공(0.0465 [mm])을 한 기어의 최종 치형을 나타내었다.

Fig. 8에 (a)소재, (b)최종 단조된 스피기어를 나타내었다.

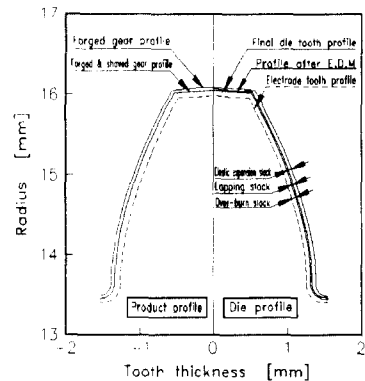


Fig. 7 Electrode, die and gear tooth-profile

정밀단조 공정으로 얻은 평기어를 측정된 결과 한국산업규격[8]에 따라 4-5급의 정밀도가 측정되었다. 기어 치형오차(tooth-profile error)와 잇줄방향

오차(lead error)의 측정치를 Table 5-1과 5-2에 나타내었다.



(a) billet (b) forged spur gear

Fig. 8 Billet and forged spur gear in the loading direction view.

6. 결 론

- 1) 기어용 금형설계를 계산하여 최적 분할직경, 최대 허용내압, 한계내압, 끼워맞춤 공차 및 응력 분포 및 탄성변형량 등의 금형변수를 구하였다.
- 2) 평기어 단조의 경우 대칭면에 접하는 이뿌리원에서 응력집중이 발생하여 보강링을 체결함으로써 양호한 단조용 금형설계를 행했다.
- 3) 금형해석 결과 단조가공시의 평기어 치면의 응력분포와 탄성변형량의 정량치로써 금형의 파손을 미리 예측하여 금형설계시 보정했다.
- 4) 제안된 정밀단조 공정으로 얻은 평기어를 측정 한 결과 4-5급의 정밀도를 나타냈다.

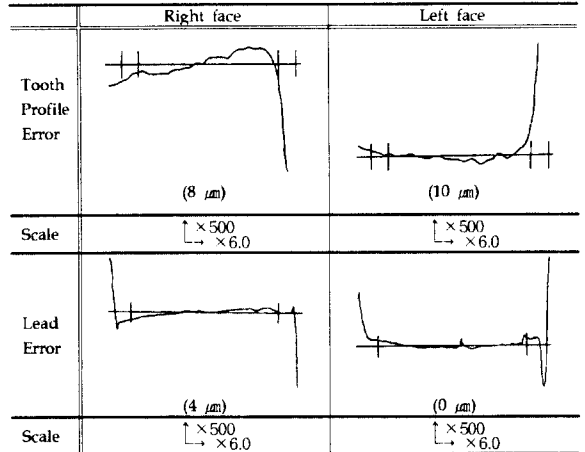
Table 5-1 Tolerances and errors of the forged spur gear.

Error [μm]	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)

참 고 문 헌

[1] 심상운, 송기섭, 윤두성, 박용복, 양동열, 1995, "자동차용 후진 아이들 기어의 정밀 냉간 단조", 단조기술의 진보, 이동녕·박종진 편, pp.145-157.

Table 5-2 Charts of the tooth-profile and lead measurement.



[2] 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.

[3] 권혁홍, 최재찬, 조해용, 이인호, 1992, "헬리컬 기어의 새로운 냉간압출법과 상계해석에 관한 연구", 韓國精密工學會誌 제9권 3호, pp.12-28.

[4] J.C.Choi, H.Y.Cho, H.H.Kwon, 1994, "A New Extrusion Process for Helical Gears: Experimental Study", J. of Mat. Pro. Tech. Vol.44-Nos.1-2, pp.35~53.

[5] 최재찬, 최영, 1997, "합금강을 이용한 스퍼기어의 정밀 냉간단조", 한국소성가공학회지 제6권 제6호, pp.500-507.

[6] 최종용, 조해용, 박윤수, 최재찬, 1998, "유한요소법을 이용한 비축대칭 부품의 단조 금형설계", 한국정밀공학회 '98춘계학술대회논문집 pp. 579-582.

[7] 여홍태, 최인, 허관도, 1998, "예압된 냉간단조 금형의 응력해석에 관한 연구", 한국소성가공학회 '98 추계학술대회논문집 pp.148-153.

[8] 한국산업규격(KS) B 1406, 1990, 스퍼기어 및 헬리컬기어의 측정방법.