

〈논 문〉

## 냉간단조 스퍼어기어의 치수정밀도

이정환\* · 이영선\* · 박종진\*\*

(1995년 9월 6일 접수)

### Dimensional Accuracies of Cold-Forged Spur Gears

J. H. Lee, Y. S. Lee and J. J. Park

#### Abstract

Recently, it is attempted to manufacture gears by various cold forging methods to meet requirements of mass production and uniform qualities. Compared to machined gears, cold forged gears reveal higher tooth strength and better surface roughness, but they reveal lower geometrical accuracies. Therefore, in the present study, a series of experiments are performed to investigate relations between geometrical accuracies of dies and billet and those of the final product. The geometrical accuracies of forged gears are considered through functional gear-element tolerances by measuring pitch error, profile error, lead error, radial error, tooth thickness and rolling test. Results of the experiments can be summarized as follows : (1) involute spur gears of KS 5(or AGMA7) accuracies can be made, (2) concentricity of die set should be maintained within 0.01mm, (3) clearance between the billet and die set should be less than 0.1mm, (4) concentricity and radial runout should be less than 0.08mm and 0.1mm, respectively. However, it is thought that FEM analysis of elastic/thermal deformations of dies and the billet is necessary for a better understanding of the findings obtained through the present study.

#### 1. 서 론

기어는 기계요소중 수요가 많고 기능상으로 매우 중요한 부품으로서 종래에는 거의 절삭가공에 의해 생산되었으나 대량생산 및 제품의 균일화라는 측면이 부각됨에 따라 분말야금법이나 냉간단조에 의한 생산이 활발하게 진행되고 있다. 냉간단조에 의한 제조기술은 기어의 치형강도가 높고 표면이 우수하다는 장점때문에 이미 선진국에서는 실용화되어 자동차는 물론 농기계, 카메라, 시계, 사무기기, 가전용품 등의 기어류 제조에 적용되고 있다. 그러나, 국내에서는 냉간단조 기술수준이 비교적 낮아 아직까지 정밀 기어류의 제조에 응용하지 못하고

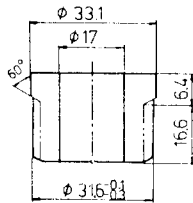
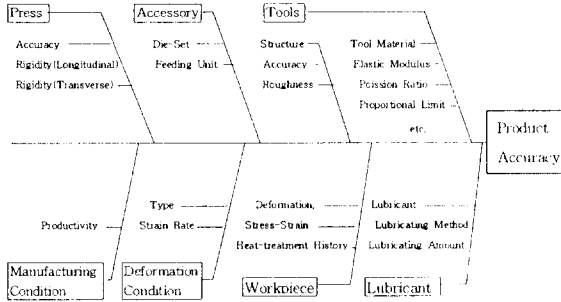
있다. 기어류의 냉간단조시에 가장 중요한 기술은 제품의 정도를 좌우하는 핵심기술인 정밀금형의 설계 및 제작기술로서 국내의 경우 기술이 미흡하여 제품의 품질이 저하되고 부가가치가 낮아 내수 및 수출시장에서 외국제품과의 경쟁력이 떨어지는 실정이다.

냉간단조기술은 프레스 작업을 통해 최종제품이 제조되는 동안 공정이 많고 공정자체도 여러 변수에 의해 영향을 받기 때문에 최종제품의 정밀도에 영향을 미치는 인자가 다양하고 정량적인 해석 또한 어렵다. 일반적으로 냉간단조품의 정밀도에 영향을 미치는 인자를 정리해보면 다음의 Table 1과 같다. 본 연구에서는 금형의 정도와 소재의 정도가 단조기어의 정밀도에 미치는 영향을 조사하였으며, 연구대상기어의 사양은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

\*한국기계연구원 재료공정연구부

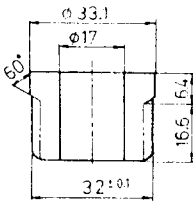
\*\*홍익대학교 기계공학과

**Table 1** Various factors affecting the dimensional accuracy of cold-forged spur gear



Specification		(Unit : mm)
Outside-circle Dia	33.1	±0.1
Root-circle Dia	27.286	±0.02
Tooth Profile	Module	2.0
	Pressure Angle	20°
	Number of Teeth	16
	Pitch-circle Dia	28
Base-circle Dia	26.191	
Tooth Thickness	10.616	±0.02
Addendum Modification Coef	0	

**Fig. 1** Specifications of gear 1



Specification		(Unit : mm)
Outside-circle Dia	33.1	±0.1
Root-circle Dia	27.286	±0.02
Tooth Profile	Module	2.0
	Pressure Angle	20°
	Number of Teeth	16
	Pitch-circle Dia	28
Base-circle Dia	26.191	
Tooth Thickness	10.616	±0.02
Addendum Modification Coef	0	

**Fig. 2** Specifications of gear 2

## 2. 냉간단조 기어의 정밀도

기어의 정밀도는 기어의 성능에 직접적인 영향을 미치는 기어의 이에 대한 허용오차인 Functional Gear-Element Tolerance를 기준으로 나타내며 기어의 정밀도 측정법을 이용하여 이를 판단할 수 있다. Table 2는 Functional Gear-Element Tolerance와 기어의 정밀도 측정항목을 나타내고 있다.

단조기어의 피치오차는 금형의 기어 성형부 자체의 피치오차에 의해 발생할 뿐 아니라 펀치의 편심하중으로 인한 소재의 불균일한 변형에 의해서도 발생하게 된다. 또한, 치흡흔들림이나 TCE(Total Composite Error)는 Die-Set의 편심에 의해 발생하게 되는데 이러한 Die-Set의 편심은 단조시 편

**Table 2** Functional gear element tolerance and items to measure the gear accuracy

Functional gear element tolerance	-tooth form dimension (addendum, dedendum, pressure, angle, clearance)
	-tooth spacing
	-tooth profile
	-lead angle
	-material hardness
	-surface finish
	-face width
	-outside diameter
	-outside-diameter runout
	-pitch error
Measuring Items of Gear Accuracy	-profile error
	-lead error
	-radial runout
	-tooth thickness
	-rolling test

치에 편심하중을 유발하고 소재는 불균일한 변형을 받게 되므로써 최종제품의 피치오차에 악영향을 미치게 된다. 이와같이 냉간단조로 기어를 성형할때 성형공정변수들이 기어의 정밀도에 미치는 영향은 크게 두가지로 분류될 수 있다. 하나는 "대칭성과 관련된 정밀도"이고, 다른 하나는 "치형 정밀도"이다.

### 2.1 대칭성과 관련된 정밀도

금형의 치형부 정밀도가 좋은 상태에서는 피치오차, 치흡흔들림, TCE(Total Composite Error), TTCE(Tooth to Tooth Composite Error)등은 기어의 대칭성에 관련된 인자이므로 피치오차의 위 세가지 치수정밀도를 향상시키기 위해서는 가공시 발생하는 편심 즉, 중심의 불일치를 최소화시켜야 한다. 냉간단조시에 발생하는 편심을 최대한 방지하기 위해서는 첫째, Die-Set에서 발생하는 편심을 방지하고 둘째, 금형내 소재의 위치에서 발생하는 편심을 방지해야 한다. Die-Set에서 발생하는 편심의 종류는 첫째, 펀치와 맨드릴과의 편심, 둘째, 펀치와 하부 금형내의 컨테이너와의 편심, 셋째, 하부 금형내의 컨테이너와 기어 성형부와의 편심 등이 있다. 반면에, 금형내 소재의 위치에 따라

발생되는 편심은 소재의 중심과 다이 중심의 차이에 의해 발생할 수 있다.

### 2.2 치형 정밀도

기어전체의 대칭성이 아무리 좋아도 실제로 상대 기어와 맞물리는 이 하나하나의 정밀도가 좋지 않으면 전체적인 기어 정밀도의 향상은 불가능하다. 이 하나하나의 정밀도에는 치형오차, 이두께, 이끝 원지름과 이뿌리원지름 등의 요소가 포함되는데 모두 치수적인 정도를 요하는 항목들이다. 소재를 금형에 넣고 단조하게 되면 단조된 기어는 무부하시 금형 성형부의 기어와 여러가지 요인에 의하여 다른 치수를 갖게 된다. 그 요인으로는 단조압력에 의한 금형의 변형, 취출시 소재의 탄성회복, 소성 변형시 발생하는 열로 인한 소재의 열팽창 및 냉각시 수축 등이 있다. 따라서, 기어 이 하나하나의 정밀도를 향상시키기 위해서는 앞에서 설명된 금형 변형, 소재 탄성회복 및 냉각수축량을 정확히 예측하고 이를 금형 제작시 보정하는 것이 필요하다.

### 3. 금형설계 및 제작

전술한 바와 같이 Die-Set의 동심도는 대칭성과 관련된 정밀도에 영향을 미치므로 금형의 설계 및 제작시에 편심발생이 되지 않도록 주의해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 Die-Set에서 발생하는 최대 편심량인 T. I. R(Total Indicator Reading)이 0.06 mm가 되도록 설계·제작하여 대칭성과 관련된 정밀도의 향상을 도모하였으며 치수정밀도 향상을 위해서 Fig. 3과 같은 과정을 통하여 치형부를 설계하였다. 냉간단조시에 소재와 금형은 압력을 주고 받을 뿐 아니라 소재는 소성변형을 받아 온도가 상승하기 때문에 소재가 취출된 후에 소재와 금형에 탄성변형 및 열변형이 일어난다. 따라서 냉간

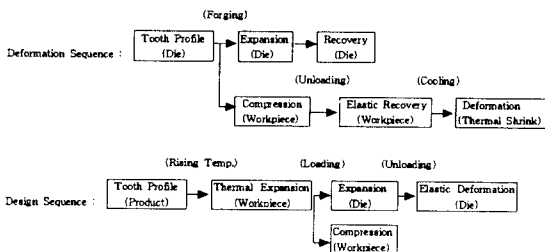


Fig. 3 Design procedure of workpiece and die for gear forging

단조된 제품의 크기 및 형상은 금형의 크기 및 형상과 다르게 되므로 이를 고려하여 금형을 설계하였다.

단조시 금형의 변형을 감소시키기 위해 다이 인서트(Die Insert)의 재질은 탄성계수가 큰 WC (15% Co)인 초경합금을 사용하였으며 SKD61과 SNCM447의 이중보강링을 사용하였다. 또한, 펀치와 맨드릴은 냉간단조에 일반적으로 사용되고 있는 SKD11을 사용하였다. 다이 인서트의 치형부가공은 램(ram)형 방전가공을 이용하였으며 Relief부는 금형의 아래쪽으로부터 약간 큰 치수의 전극봉으로 가공하였다. 방전가공이 끝난 금형에 2중보강링을 열박음하면 다이인서트의 치수가 약간 축소하게 되므로 기어성형부는 4회의 연마작업으로 최종치수를 맞추었다.

일반적으로 방전가공을 하면 Fig. 4와 같이 Overcut이 발생되므로 전극봉을 설계할 때는 Overcut의 양과 연마여유를 감안하여 설계하여야 한다. Fig. 5와 Fig. 6은 기어1과 2에 해당하는 전

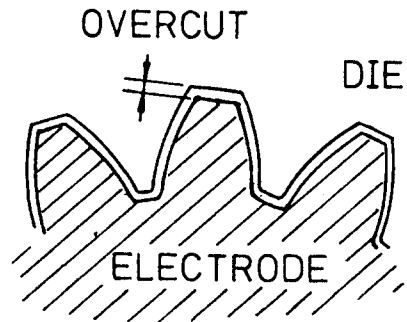


Fig. 4 A schematic diagram to show the overcut produced by EDM

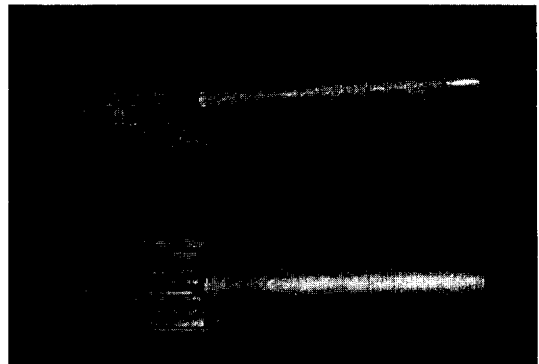


Fig. 5 Electrodes used in the present investigation

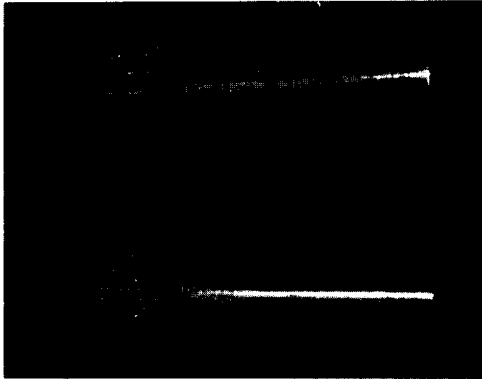


Fig. 6 Lapping bars used in the present investigation

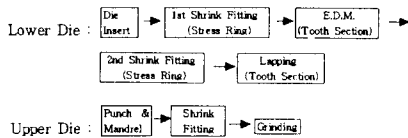


Fig. 7 Manufacturing procedure of punch and dies

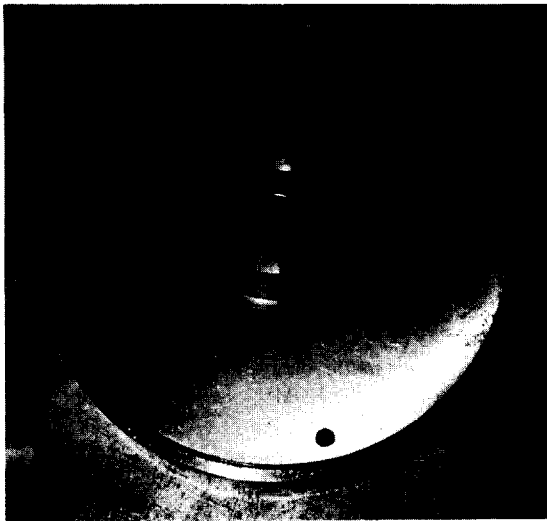


Fig. 8 Die manufactured for gear 1

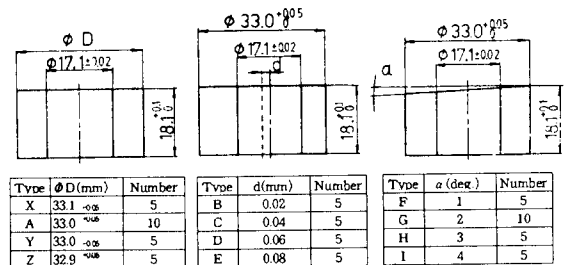
극봉과 Lapping봉의 외관을 보여주고 있다. 전극 및 Lapping봉의 정도는 직접적으로 금형의 정밀도에 영향을 미치므로 동축도 0.005이하의 소재에 Finish Hobbing 작업을 행하여 KS2급 이상의 정밀도를 유지하였다. 전극재료로는 방전가공시 마모량을 줄이기 위해 Cu분말에 C분말을 첨가하여 성형 및 소결을 행한 동탄소재와 SCM4 봉을

Brazing하여 사용하였으며 Lapping봉은 SCM4 소재를 사용하였다. Fig. 7의 제작순서에 의해 제작한 금형의 외관은 Fig. 8과 같다.

#### 4. 스퍼어 기어의 냉간단조

전술한 바와 같은 순서에 의해 제작된 금형을 이용하여 모듈율이 1과 2인 스퍼어기어를 냉간단조로 제조한 후 치수정도 측정을 통하여 설정한 설계 기준의 타당성을 검토하였으며 소재의 치수와 형상정도가 최종 냉간단조기어의 정밀도에 미치는 영향을 검토하여 최적 소재의 치수 및 정도를 조사하였다. 본 연구에 사용한 소재는 SCM21종이며 450톤 Knuckle Joint Press를 사용하였다. 소재는 12가지 종류로 가공하여 구상화열처리를 한 후 인산염피막 처리를 하여 단조시 금형과의 극심한 접촉압력에도 우수한 유회상태를 유지하도록 하였다.

일반적으로 냉간단조로 기어를 제조할 경우 소재 가공은 Shearing → Upsetting → Backward Extrusion → Piercing의 공정으로 대량생산하게 된다. 그러나, 본 연구에서는 소재의 동심도와 직각도가 최종기어의 정밀도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 12가지 종류로 치수와 형상을 변화시켜 가공(절삭가공)하였으며 Fig. 9에 소재의 형상 및 치수를 나타내었다. 소재의 치수가 최종 냉단기어의 정도에 미치는 영향을 검토하기 위해 외경을 33.1, 33.0, 33.0, 32.9 mm의 4종류로 변화시켰으며 동심도(T. I. R) 0.01 mm이하, 측면흔들림 0.05 mm 이하로 유지하였다. 또한, 소재의 형상정도가 냉단기어의 정도에 미치는 영향을 검토하기 위해 측면흔들림은 0.05 mm이하로 유지하면서 내경과



• T.I.R ≤ 0.01      • Side Runout ≤ 0.05      • T.I.R ≤ 0.01  
 • Side Runout ≤ 0.05  
 (a) Out Diameter      (b) T.I.R      (c) Slope

Fig. 9 Blank shapes and dimensions

외경의 편심량 $\delta(2\delta=T. I. R)$ 를 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 mm로 가공한 것과 동심도는 0.01 mm이하로 유지하면서 측면경사각 $\alpha$ 를 1°, 2°, 3°, 4°의 4종류로 가공한 소재를 이용하여 소재의 동심도와 직각도가 최종기어의 정밀도에 미치는 영향을 검토하였다. 단조시 요구하중을 조사하기 위하여 로드셀을 이용하여 하중을 측정된 결과 기어1은 47톤, 기어2는 65톤이 소요되었으며 Fig. 10은 단조된 기어의 외관을 나타내고 있다.

### 5. 치수정밀도 측정 및 결과

단조된 기어는 Parco Cleaner 2357(도장박리제)의 용액으로 윤활막을 제거한 후 측정하였다. 각 시편에 대하여 측정항목은 Table 3과 같으며 측정결과는 5개의 단조기어에 대한 측정값의 최소값과 최대값을 기술하였다. 우선 기어1과 2의 A시편에 대하여 치선경과 걸치기이두께를 측정하였으며 피치오차, 치흡흔들림, 치형오차, TCE, TTCE 등 전항목에 걸쳐 정밀도 측정을 행하였다. 또한, 소재의 치수 및 형상정도가 최종기어의 정밀도에

미치는 영향을 검토하기 위해 내외경 편심 및 측면 경사각을 준 소재로 단조한 기어에 대하여 물림시험을 통하여 TCE와 TTCE를 측정하였다. 피치오차와 치흡흔들림의 측정은 KLINGELNBERG사의 Gear Tester를 사용하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. 치형측정결과 치형오차와 물림시험결과는 Table 5와 같다. 치수정밀도 측정결과 기어1의 경우 걸치기이두께는 10.640~10.670 mm, 치선경은 31.300~31.345 mm 이었으며 기어2의 경우에는 걸치기이두께는 9.300~9.345 mm, 치선경은 31.800~31.840 mm으로 나타났다. 치수정밀도는 기어금형(성형부)의 치수와 밀접한 관계가 있으므로 기어성형부의 치수를 측정하였으며 Table 6은 제품과 금형의 치수를 비교한 값을 나타내고 있다. 측정결과에 따르면 걸치기이두께는 제품의 치수가 금형의 치수보다 0.035~0.040 mm, 치선경은 0.085~0.180 mm 정도 크게 나타났다. 이는 단조공정 동안에 발생하는 압력으로 인한 금형의 팽창과 취출시 제품의 탄성회복이 주원인으로 생각된다.

대칭성과 관련된 치수정밀도의 영향을 살펴보기 위하여 소재의 치수 및 형상을 변화시켜 실험한 결과는 물림시험을 통하여 TCE와 TTCE를 비교하였다. Fig. 11은 소재의 동심도에 따른 영향을, Fig. 12는 소재의 직각도에 따른 영향을, Fig. 13은 소재의 외경에 따른 TCE와 TTCE의 영향을

**Table 3** Measurement items for different blanks

Blank	Measuring Items	
	Dimension	Accuracy
A (Gear 1, 2)	-O.S.D -Tooth thickness	-Pitch Error -Radial Runout -Profile Error -TTCE, TCE
B,C,D,E,F, G,H,I,X,Y,Z (Gear 1)	-	TTCE, TCE

**Table 4** Measurement of pitch errors and radial runout

Items	Gear 1 ( $\mu\text{m}$ )	Gear 2 ( $\mu\text{m}$ )
Pitch Error	20~24	12~20
Specing Error	23~31	12~17
Index Error	77~144	34~68
Radial Runout	90~110	40~44

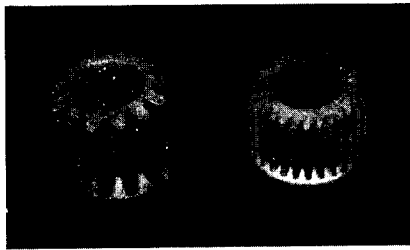
**Table 5** Measurements of tooth profile errors and tooth composite errors

Items	Gear 1 ( $\mu\text{m}$ )	Gear 2 ( $\mu\text{m}$ )
Profile Error	10~28	8~20
TCE	108~122	88~104
TTCE	26~33	47~55

**Table 6** Measurement of tooth thickness and outside-circle diameters(Die/Products)

Items	Objects	Gear 1 (mm)	Gear 2 (mm)
Tooth Thickness	Die	10.600~10.630	9.265~9.310
	Product	10.640~10.670	9.300~9.345
Outside-Circle Dia.	Die	31.200~31.260	31.630~31.660
	Product	31.300~31.345	31.800~31.840

나타내고 있다. 소재의 동심도에 따른 영향은 Fig. 11에서 알 수 있듯이 소재의 편심량이 증가할 수록 TCE가 증가하면서 산포도 또한 증가하는데 산포도가 증가한다는 것은 기어의 정밀도가 불균일한 것으로 제품의 대량생산에 결정적인 저해요인이 된다. 소재의 직각도에 따른 영향은 기어정밀도에 매우 큰 영향을 미치고 있는데 TCE와 TTCE가 소재의 측면 경사각이 커질수록 현저히 증가하며 산포도 또한 불균일하게 된다. 이와같은 현상은 직각도와 평평도가 부정확한 소재를 단조할때 펀치에 작용되는 하중이 불균일하기 때문이며 소재 동심도



(a) Module 2 (b) Module 1

Fig. 10 Gear produced in the present investigation

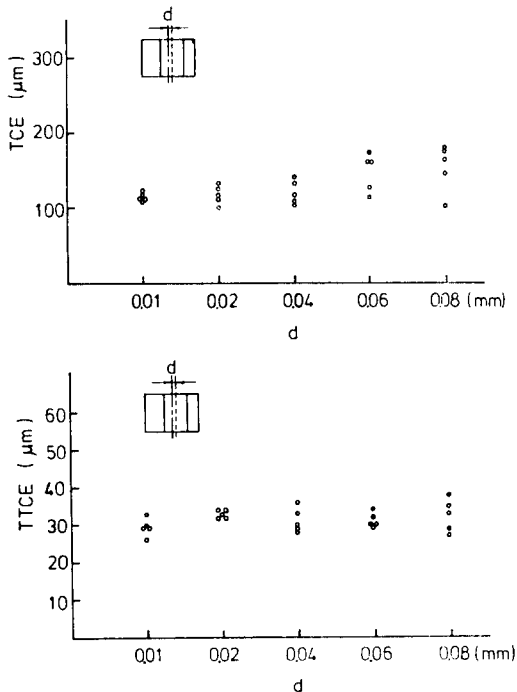


Fig. 11 Effect of blank concentricity

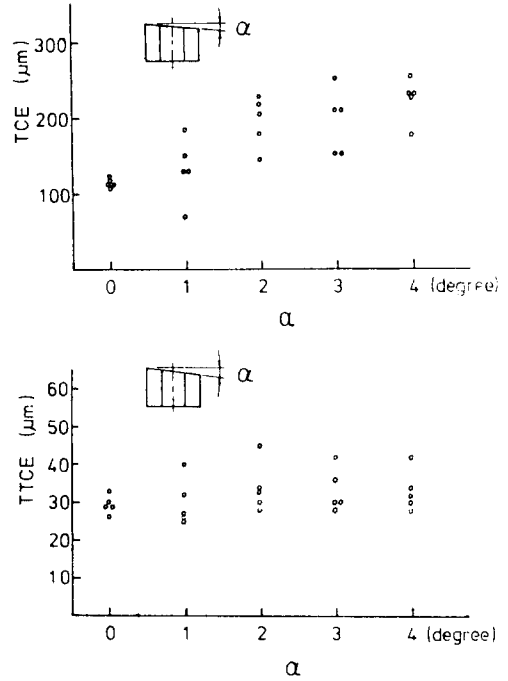


Fig. 12 Effect of blank slant

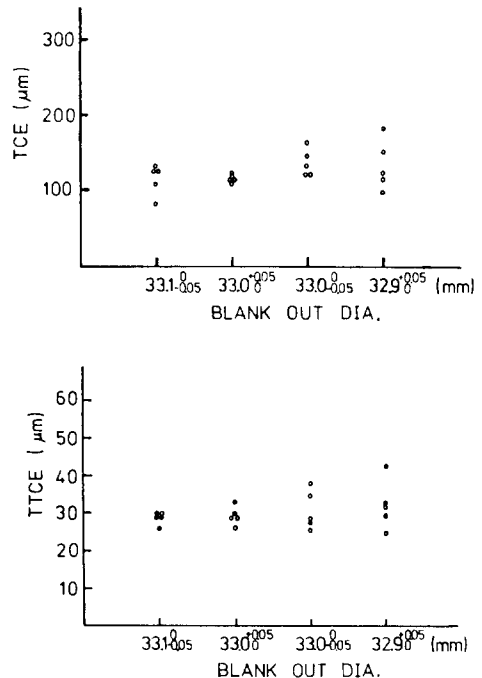


Fig. 13 Effect of blank outer diameter

의 영향도 이러한 편치의 불균일한 압력분포에 기인한 것이다.

소재 외경의 영향은 금형 컨테이너 내경과의 간격이 증가할 수록 TCE와 TTCE 모두 산포가 불균일하게 된다. 이상과 같이 소재의 외경, 동심도, 직각도는 단조기어의 정밀도에 상당한 영향을 미치므로 냉간단조로 소재를 제작할때 치수정도를 향상시키기 위해 세심한 주의를 기울여야 한다.

## 6. 결론

본 연구는 냉간단조에 의해 공업적으로 사용가능한 인볼류트 스퍼어기어를 제조하는데 있어 금형의 치수정밀도와 소재의 치수정밀도를 변화시킨 실험을 수행하여 단조기어의 정밀도와 금형, 소재의 치수정밀도와의 관계를 규명하고자 하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 냉간단조로 인볼류트 스퍼어기어를 제조할 때 발생될 수 있는 소재의 외경, 동심도, 직각도의 변화에 따른 영향을 2 종류의 기어에 대한 시제품을 제작하여 KS 5급(AGMA 7급)의 정밀도를 얻을 수 있었다.

(2) Die-Set의 동심도와 단조기어의 동심도의 관계는 Die-Set의 동심도(T. I. R.)가 최소 0.01 mm, 최대 0.065mm일때 단조기어의 동심도(T. I. R.)는 0.44 mm 이내를 얻을 수 있었다.

(3) 금형과 제품의 치수측정결과, 단조시 발생되는 압력으로 인한 금형의 팽창과 취출시 제품의 탄성회복으로 인해 걸치기이두께는 0.035 0.040 mm, 치선경은 0.085 0.180mm 정도 제품의 치수가 크게 나타났다.

(4) 소재의 형상정도에 따른 기어의 정밀도를 불림시험을 통하여 조사한 결과 소재의 동심도와 직각도가 떨어질수록 TCE와 TTCE가 증가하면서 산포도 또한 증가하였으며 그 영향은 직각도가 더

욱 더 민감하였다.

(5) 소재외경의 영향은 금형 컨테이너 내경과의 간격이 증가할 수록 TCE와 TTCE 모두 산포가 불균일하게 되므로 가능한 한 소재와 금형과의 공차(Clearance)를 감소시키는 것이 바람직하다. 그러므로, 대량생산을 고려할 경우라도 소재외경과 금형과의 공차는 0.1 mm, 동심도와 측면흔들림은 각각 0.08 mm, 0.1 mm이하로 제어하는 것이 단조기어의 정도저하를 방지하기 위해 필요하다.

## 참고문헌

- (1) Ryoichi Wadabayashi, Fukuo Fujimoto and Hirokazu Yamamoto, "Forming of Pump Gears by Cold Extrusion", 大阪府立工業奨励館報告, No. 44, 1968, pp. 59~63
- (2) "Apparatus and Method for Cold Extrusion of Gears", Inventor :Shima K. Samanta, Assignee : Ford Motor Co., Dearborn, MI, Patent No. 3, 910, 091 dated October 7, 1975
- (3) Darle W. Dudley, "Gear Handbook", Mcgraw Hill, 1962
- (4) "Impact Machining", Version Allsteel Press Company, 1969, pp. 315~329
- (5) W. Koenig, H. W. Hafmann and K. Steffens, "Flie  $\beta$  Pressen von Werkstuecken mit Komplexer Geometrie", Ind. Anz., Vol. 17, No. 14, 1984, pp. 14~17
- (6) M. H. Sadeghi and T. A. Dean, "Analysis of Tooth Profile Accuracy in Precision Forged Spur Gears with Involute Teeth", Trans. of NAMRI/SME, Vol. xxi, 1993, pp. 3~8
- (7) 유재운, 김현기, 이정환, "냉간단조 기어의 정도향상에 관한 연구", 과학기술처보고서, UCN 184-536.C, 1984