

# 냉간 단조 스퍼어 기어의 금형과 단조품의 인볼류트 곡선 변화 연구

천세환\*, 이정환\*\*, 이영선\*\*, 배원병\*

## A study on the changes of involute-curve of spur gear die for cold forging and forged part

S.H. Chun\*, J.H. Lee\*\*, Y.S. Lee\*\* W.B. Bae\*

### ABSTRACT

In metal working, cold forging that has profit to satisfy dimension accuracy is using in various manufacturing products. Recently, most of the interest thing is precision forging of gear. Gear forging product is more strength than broaching gear, and it has many advantages with reduction of factory expenses. The reason of difficulty to improve accuracy of gear dimension compare to another products is the dimension accuracy is very high, approximately  $10\mu\text{m}$ , and because die of involute teeth and elastic strain of forged tool differ from standard curve. This paper represent quantitative analysis of die and teeth of forged tool, namely difference of curves, with experiments and analyze the factor of dimension gap, finally, will design compensated involute curve.

**Key Words** : Spur Gear, Cold Forging, FEM, Strain Gage, Invoulte Curve

### 1. 서 론

단조공법중 치수 정밀도를 만족하는데 유리한 공정인 냉간단조는 다양한 제품의 제조에 이용되고 있다. 그 가운데, 최근들어 더욱더 관심이 집중되고 있는 분야는 기어의 정밀 단조 기술이다. 단조 기어는 상대적으로 치절기어에 비해 강도가 향

상되므로 제조 비용 절감과 함께 많은 장점을 가지고 있다. 냉간단조 기술의 개발은 1950년대부터 개발되어 왔으나 상업적으로 제조가 가능한 기어의 치형 정밀도가 제품의 요구 수준을 만족하지 못해서 제한적인 적용이 이루어지고 있다. 기어의 정밀도를 향상시키는 것이 다른 제품들에 비해 상대적으로 어려운 이유는 첫째 요구 치수 정밀도가

\* 한국기계연구원

\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

10 $\mu$ m 수준으로 매우 높으며, 둘째 인볼류트(involute)치형 형상이 금형과 단조품의 탄성 변형에 의해 표준 곡선과 다르게 나타나는 점 등을 들 수 있다. 따라서, 고정도의 단조기어를 제조하기 위해서는 금형과 단조품의 치형 형상 변화를 정량적으로 분석하여 금형에 이를 보정해야 한다. 본 연구에서는 금형과 단조품의 치형 곡선의 차이를 실험(측정)을 통해 정량적으로 분석하고, 치수 차이가 발생하는 원인을 각 단계별로 분석하여 최종적으로 보정된 금형용 인볼류트 곡선을 설계하고자 하였다. 금형과 단조품의 치형 측정은 CCMM(접촉식 삼차원 측정기)를 사용하였으며, 스트레인 게이지를 부착하여 금형의 탄성변형량을 단조 공정 동안에 실시간으로 측정 후 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D™를 이용하여 금형에 발생하는 탄성 변형량을 해석하므로써 단조 공정시에 금형의 탄성 변형량을 정량적으로 예측하고자 하였다.

## 2. 스피어 기어 냉간 단조 실험 및 금형 탄성 변형률 측정

### 2.1 냉간 단조 실험

본 연구에 사용된 스피어 기어의 제원은 표 1과 같으며 그림 1은 금형 구조와 스트레인 게이지를 부착한 부위를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 단조 소재는 압출형태로 기어 성형이 이루어진다. 금형은 초경인서트에 SKD61종 소재의 링이 보장되어 있으며, 단조용 소재는 SCr420H(AISI 5120-H)을 구상화 소둔처리후 인산염 피막 처리한 링 소재가 사용되었다.

Table 1. Specification of spur gear

Spur Gear Tooth Data	
Module	1.75
Pressure Angle	20°
Base Diameter	Φ24.667
Pitch Diameter	Φ26.25
Number of Teeth	15

### 2.2 금형의 탄성변형률 측정

그림 1에 나타나 있는 바와 같이 스트레인 게이지는 압출이 이루어지는 금형의 랜드(land)부에 높이별로 3 위치에 부착하여 금형의 탄성 변형률을 측정하였다. 일반적으로 압출 금형은 압출이 시작되면서부터 압출 진행

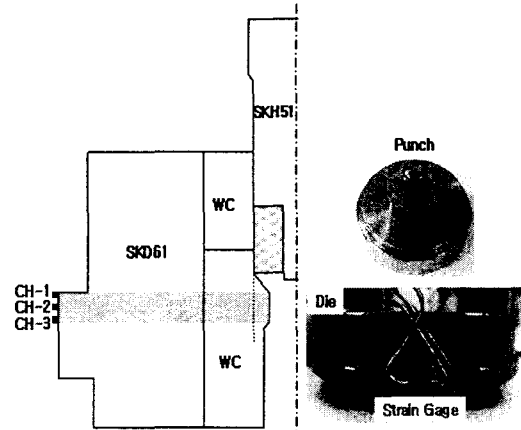


Fig. 1 Configuration of model die and locations for attached strain gages

방향으로 굽힘이 발생되기 때문에 랜브부내에서도 그 위치에 따라 변형률이 서로 다를 수 있다. 그림 2는 측정된 금형의 위치별 탄성 변형률을 나타내고 있다. 금형의 각 부위별 탄성변형량과 단조품의 탄성변형량은 압출시 직접 측정이 곤란하므로 금형의 탄성변형량을 측정하여 해석값과 비교·분석하므로써 단조품의 탄성변형량 예측에 대한 FEM해석의 신뢰성을 입증하고자 하였다.

측정된 금형의 탄성변형률은 압출 시작시 비정상상태에서 정상상태에 이르기까지 변형률이 증가하다가 정상상태에 도달하면 거의 일정한 값을 이루며, 단조 하중과 동일한 양상을 나타내었다.

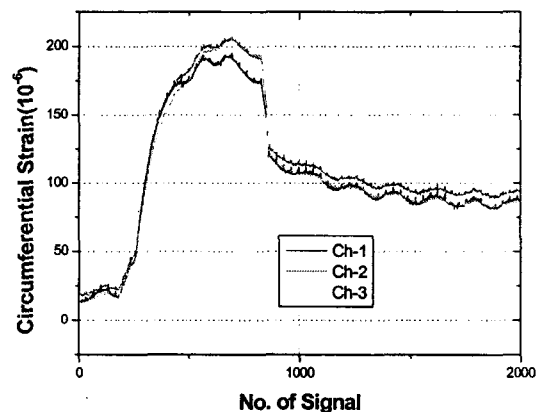


Fig. 2 Measurement of elastic strains at die surface

### 3. 유한 요소 해석

#### 3.1 Pre-Processing

금형과 단조 소재의 탄성변형량을 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D™를 이용하여 금형에 발생하는 탄성 변형량을 분석하였다. 표 2는 FEM 해석에 사용된 단조 소재와 금형의 물성치를 나타낸 것이다. 스퍼어기어는 회전 대칭이기 때문에 해석 시간과 계산 시간을 줄이기 위하여 1/12의 모델을 해석에 사용하였다. 금형의 인벌류트 곡선은 3차원 측정기에 의해 측정된 실 금형 치수를 이용하였다. 그림 3은 DEFORM-3D™ 해석을 위해 생성된 금형 Land부의 Mesh 형태를 나타내고 있다.

Table 2. Material properties of die

Material	Hardness	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Poissin's Ratio
W.C	85(H <sub>RA</sub> )	500000	3100	0.23
SKD61	47(H <sub>RC</sub> )	212000	1200	0.30
SCr420H	-	205800	413	0.29

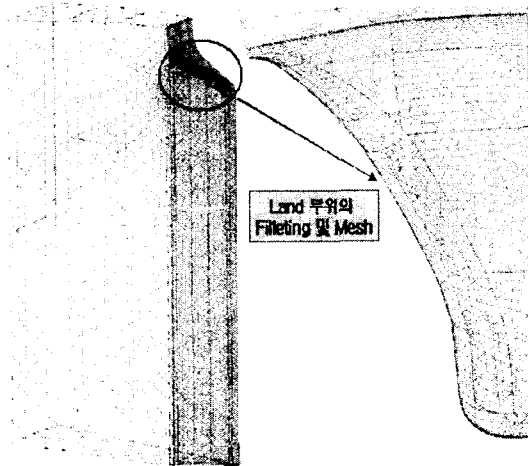


Fig 3 Mesh system of die land

#### 3.2 해석 결과

그림 4는 스퍼어 기어의 실 단조품과 해석 결과를 비교한 것으로 압출 시작부의 비정상 상태 영역이

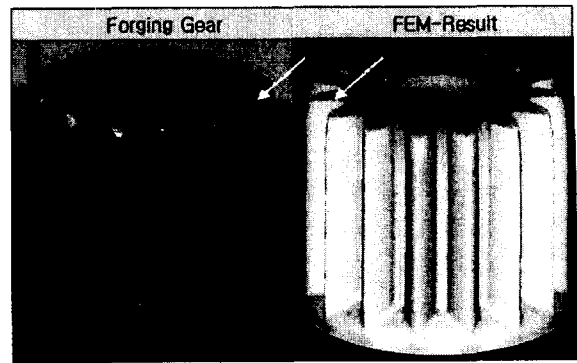
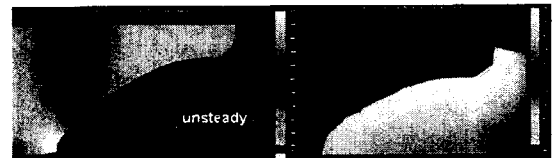
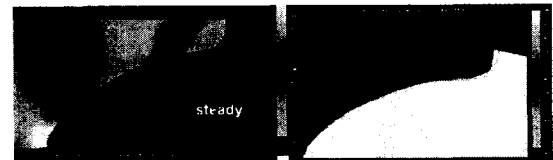


Fig. 4 Experimental and FEM results of forged part

실 단조품과 해석 결과 모두 확연히 관찰되고 있다. 그림 5는 단조품의 부위별 단면 형상과 금형의 부위별 유효응력 분포를 나타내는 것으로 응력 분포와 그 크기가 압출 시작부위와 중간부위, 최종 부위에서 서로 다름을 알 수 있다.



(a) upper section of extruded gear



(b) middle section of extruded gear



(c) lower section of extruded gear

Fig. 5 Effective stress distribution of die and forged part at each section

압출 시작부위는 그림 5(a)에 나타나 있는 바와 같이 비정상 상태 구간이기 때문에 치형 끝 부분

에서 미성형 부위가 발생되며, 정상 상태 유동이 이루어지고 있는 그림 5(b)와 (c)에서는 치형의 완전한 성형이 이루어지고 있다. 금형의 응력은 비정상상태에서부터 정상 상태로 진행 될 수록 증가되는 것을 확인 할 수 있다.

#### 4. Involute Curve의 치수 측정 비교

전술한 바와 같이 금형과 단조품 간의 치수 변화 비교·분석의 최종 목표는 보정된 치수로 금형을 가공하는 것이므로 금형 가공의 첫 단계인 Wire-Cutting 치수를 결정하는 것이 궁극적인 목적이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 금형 가공에 사용되는 Wire-Cutting Data에서부터 치수를 비교 분석하였다. 그림 6은 Wire가공용 CAD Data에서부터 최종 단조품까지의 치형 치수 변화를 나타내고 있다. 우선 금형 가공상의 오차에 해당되는 Wire-Cutting Data와 금형 치수간의 차이는 최소 2 $\mu$ m에서 최대 18 $\mu$ m까지 부위별로 불균일한 치수 차이를 나타내고 있는데, 금형 래핑 공정에서 발생하는 치수 오차로서 이 또한 균일화해야 함을 알 수 있다. 금형 가공 치수와 단조품 치수, FEM해석에 의해 예측된 금형의 탄성 팽창된 치수는 그림 6-1에 나타나 있는 바와 같이 피치원 직경을 기준으로 상부 2곳과 하부 1곳에서 비교 분석하였다. 그림 6-2는 피치원 직경 하단 부위로서 금형 치수 보다 단조품 치수가 10 $\mu$ m정도 더 작게 나타나고 있으며, 금형의 탄성 팽창된 치수가 단조품 치수 보다 10 $\mu$ m이상 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면에 피치원 직경 상부인 그림 6-3는 금형과 단조품간 치수는 10 $\mu$ m의 차이를 팽창된 금형은 단조품과 5 $\mu$ m의 치수 차이를 나타내고 있다. 또한, 또하나의 피치원 직경 상부인 그림 6-4는 그림 6-1과 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서, 단조시 금형의 탄성 팽창/수축과 단조품의 취출 후 탄성 변형량은 치형의 위치에 따라 서로 많은 차이를 나타냄을 알 수 있으며, 보다 세부적인 해석과 실험을 통한 보정 계수의 확보가 필요함을 알 수 있었다. 1개의 치형 내에서 분석한 그림 6의 결과와 더불어 길이 방향의 치수 변화를 분석하기 위해 길이 방향을 따라 3 부분에서 금형 팽창량을 분석하였으며, 그 결과는 그림 7에 나타내었다.

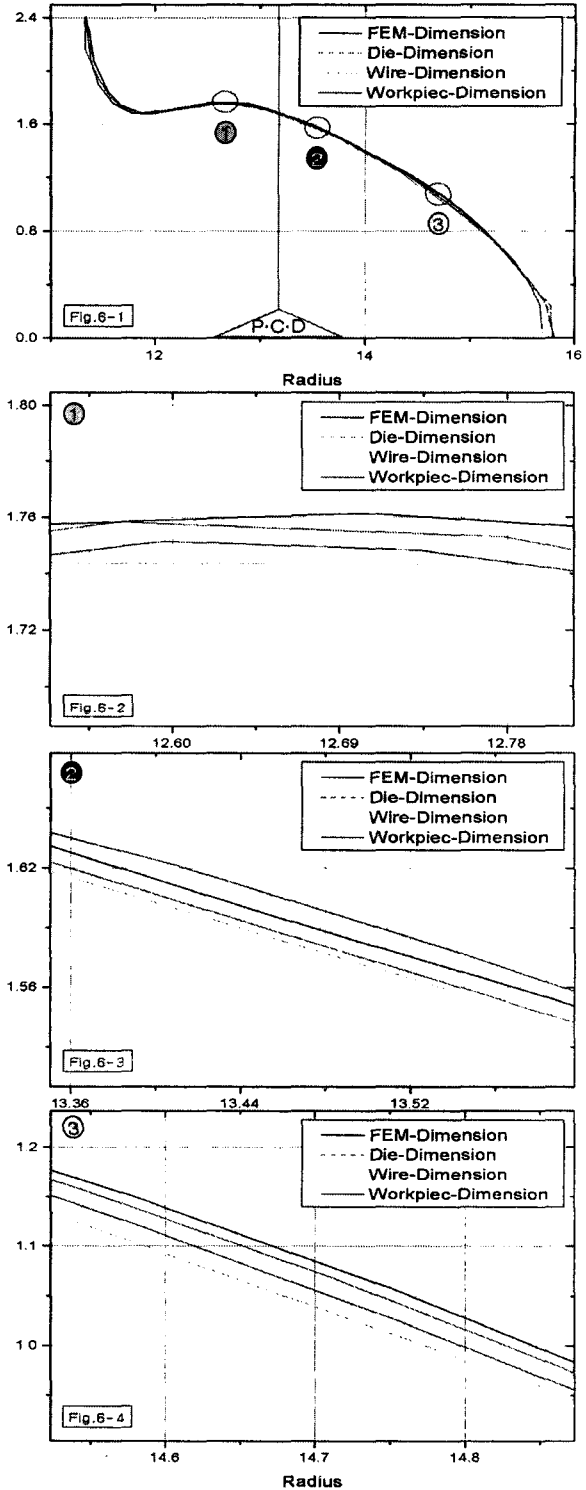


Fig. 6 Changes of involute curve at each stage in one tooth

치형의 길이 방향으로 15mm가 5mm 보다 먼저 압출이 시작된 부위로서 15mm 부위는 압출시 금속의 흐름이 정상상태에 도달되고 난 직후 부분이며, 5mm 와 10mm 부분은 압출이 정상상태로 계속적인 진행이 이루어진 부분이다. 상대적으로 먼저 압출된 15mm 위치의 인볼류트 곡선은 정상상태 부분(5mm, 10mm)에 비해 압출시 더 높은 압력이 가해진 부분으로 금형의 팽창량 또한 상대적으로 높은 부분이다. 따라서, 금형의 팽창량은 15mm 부분에서 최대 크기를, 5mm 위치에서 최소 크기를 나타내고 있다. 특히, 피치원 직경상단 부분에서 많은 차이를 나타내고 있는데, 그 원인은 그림 5에 나타나 있는 바와 같이 동일 부위에서 금형의 응력이 상대적으로 높기 때문이다.

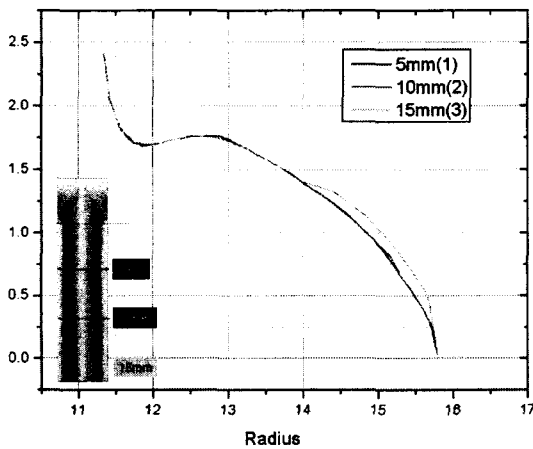


Fig 7 Die expansion at each forging stage

### 5. 결론 및 향후 연구계획

냉간단조용 스피어 기어의 치수 정밀도 향상을 위해서는 단조 공정시 금형과 단조품간에 발생하는 치수 차이만큼 표준 기어 치형 곡선을 변형하여 계산된 기어 인볼류트 곡선이 필요하다. 따라서, 보정된 치형 곡선의 설계를 위해 필요한 금형과 단조품의 치형 변화와 그에 영향을 미치는 단계별 치형 변화를 분석하였으며 정량적인 데이터를 제시하였다. 향후에는 본 결과를 기준으로 보정된 금형을 이용한 실험이 수행될 것이며, 길이 방향으로 발생하는 치수 편차를 감소시키기 위한 연구가 진행될 것이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 진행된 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] 이정환, 이영선, 박종진, 냉간단조 스피어기어의 치수 정밀도, 한국소성가공학회 제5권 제2호, (1996)
- [2] Hung-Hsiou Hsu, A study on precision forging of spur gear forms and spline by the upper bound method, International Journal of Mechanical Sciences 44 (2002)
- [3] J. C. CHOI, Y. CHOI, K. D. HUR and C. H. KIM, A study on the forging of spur gears, International Journal of Mechanical Sciences (1996)
- [4] M.L. Alves, J.M.C. Rodrigues, P.A.F. Martins, Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation, Finite Elements in Analysis and Design 37 (2001)
- [5] Jongung Choi, Hea-Young Cho, Chang-Yong Jo, Forging of spur gears with internal serrations and design of the dies, Journal of Materials Processing Technology 104 (2000).
- [6] J. C. CHOI, Y. CHOI, Precision forging of spur gears with inside relief, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999).
- [7] N. R. CHITKARA and M. A. BHUTTA, Near-net shape forging of spur gear forms: an analysis and some experiments, International Journal of Mechanical Sciences (1996).
- [8] M. H. Sadeghia and T. A. Deanb, Precision forging straight and helical spur gears, a Dept. of Mechanical Engineering (2003).
- [9] M. H. Sadeghi, T. A. Dean, The ejection of precision-forged straight and helical spur-gear forms, Department of Mechanical Engineering (2003).