

냉간 단조시 인볼류트 곡선 변화 예측을 위한 유한요소 해석

천세환*, 이정환***, 이영선***, 배원병**

FE Analysis to predict the changes of involute-curve during cold-forging

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, Involute Curve, Finite Element Analysis

1. 서론

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 향상되므로 제조 비용 절감과 함께 많은 장점을 가지고 있다. 냉간단조 기술의 개발은 1950년대부터 개발되어 왔으나 상업적으로 제조가 가능한 기어의 치형 정밀도가 제품

* 부산대학교 대학원 정밀기계과
** 부산대학교 대학원 기계공학과
*** 한국기계연구원

의 요구 수준을 만족하지 못해서 제한적인 적용이 이루어지고 있다. 기어의 정밀도를 향상시키는 것이 다른 제품들에 비해 상대적으로 어려운 이유는 첫째 요구 치수 정밀도가 10 μ 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 차이 실험(측정)을 통해 정량적으로 분석하고, FEM 해석을 이용하여 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 탄성 변형량을 단조 공정 동안에 실시간으로 측정 후 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D™를 이용하여 금형에 발생하는 탄성 변형량을 해석함으로써 단조 공정시에 금형의 탄성 변형량을 정량적으로 예측하고자 하였다.

2. 스퍼어 기어 냉간 단조 실험 및 금형 탄성 변형률 측정

2.1 냉간 단조 실험

본 연구에 사용된 스퍼어 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 보강링으로 구성되어 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 탄성 변형률 측정

그림 1에 나타나 있는 바와 같이 스트레인 게이지는 압출이 이루어지는 금형의 랜드(land)부에 높이별로 세

곳에 부착하여 금형의 탄성 변형율을 측정하였다. 일반적으로 압출 금형은 압출이 시작되면서부터 압출 진행 방향으로 굽힘이 발생되기 때문에 랜드부내에서도 그 위치에 따라 변형율이 서로 다를 수 있다. 그림 2는 측정된 금형의 위치별 탄성 변형율을 나타내고 있다. 금형의 각 부위별 탄성 변형량과 단조품의 탄성 변형량은 압출시 직접 측정이 곤란하므로 금형의 탄성 변형량을 측정하여 해석값과 비교·분석함으로써 단조품의 탄성 변형량 예측에 대한 FEM 해석의 신뢰성을 입증하고자 하였다. 측정된 금형의 탄성 변형율은 Loading시에 Land부 압출이 시작되는 비정상 상태의 경우는 Ch.1이 Ch.2와 3의

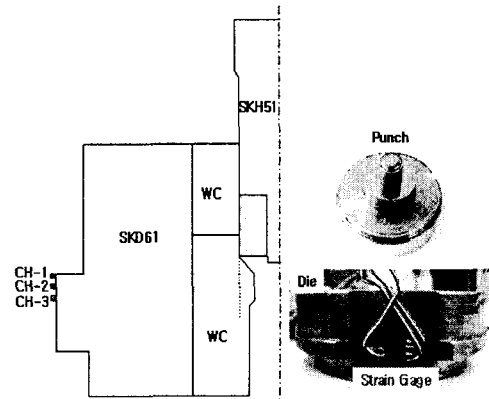


Fig. 1 Configuration of model die and locations for attached strain gauges

탄성 변형량 보다 작고, 정상 상태에 도달하면 Ch.2가 Ch.1과 3보다 크게 나타나는 것을 알 수가 있는데, 이것은 소재가 압출되면서 금형의 길이 방향으로 굽힘 응력이 발생되기 때문이다.

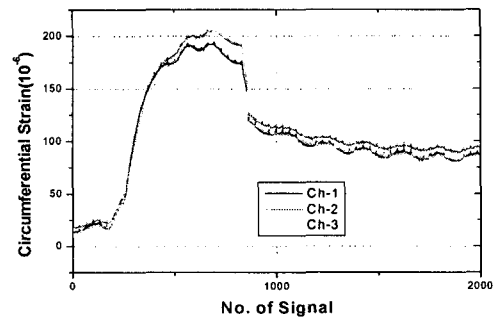


Fig. 2 Measurement of elastic strains at die surface

3. 유한 요소 해석

3.1 Pre-Processing

금형과 단조 소재의 탄성변형량을 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D™를 이용하여 금형 및 소재에 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 실금형 치수를 이용하였다. 그림 3은 DEFORM-3D™ 해석을 위해 실금형과 같은 Land 부를 표현하기 위해 전·후처리 전용 프로그램인 Hyper Mesh를 이용하여 구성한 Mesh System을 나타내고 있다.

Table 2 Material properties of die and workpiece

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

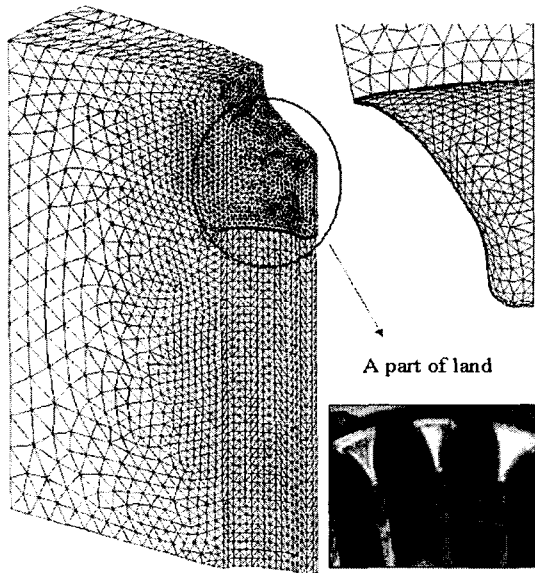


Fig. 3 Mesh system of die land

3.2 탄소성 유한요소 해석

금형의 팽창량과 소재의 탄성회복량에 대한 보다 상세한 분석을 위해 강소성 유한요소 해석에 이어 탄소성 유한요소법을 수행하였다. 금형은 Elastic, 소재는 Elasto-plastic으로 Loading-Unloading-Ejecting 전공정의 탄성팽창량과 탄성회복량을 분석하였다. 해석결과는 강소성 유한요소법

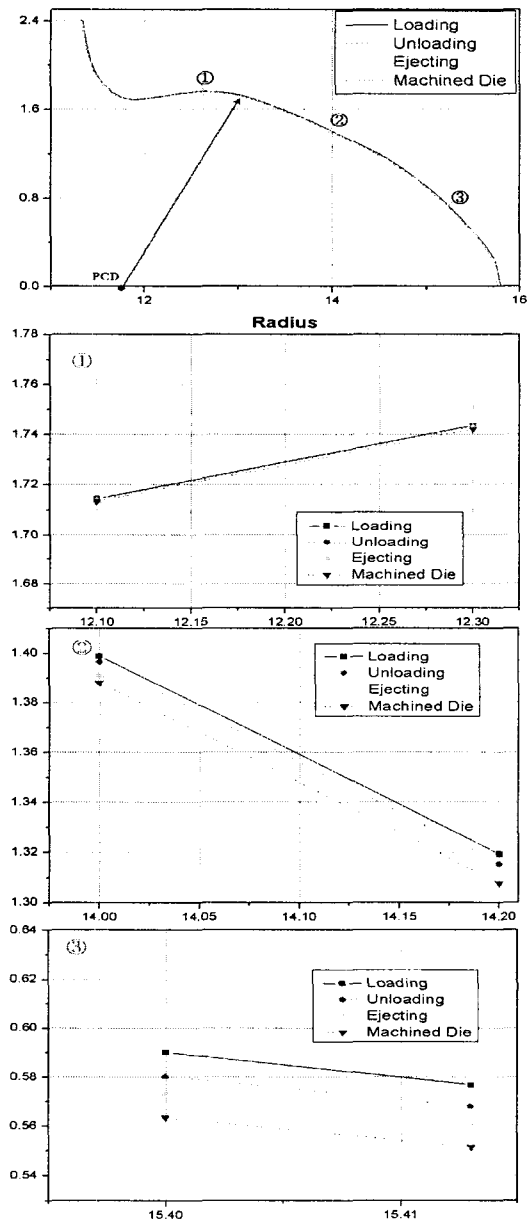


Fig. 4 Changes of die involute curve at each process in one tooth

과 거의 유사한 형태의 결과가 나왔으며, 전공정 해석시 발생하는 금형의 탄성 팽창량과 소재의 탄성회복량은 그림 4, 6에서 잘 나타나고 있다. 그림 4은 탄소성 해석시 금형의 인볼류트 곡선의 변화를 나타내고 있는데 1번 부위에 금형의 탄성팽창량은 2번, 3번 부위에 비해 아주 적은값을 나타내고 있다. 이와 반대로 2번 부위에서는 Loading시 금형이 15 μm 정도 팽창되었다가 Unloading시 4 μm 정도 금형이 다시 수축 되었다. Ejecting 공정이 끝난 후 10 μm 정도 금형이 다시 수축된다. 단조품이 취출된 후에도 약 3~4 μm 의 금형이 팽창되어 있는 상태이다.



Fig. 5 Effective stress at each process in one tooth

3번 부위에서 가장 큰 팽창량을 가지고 있는데, Loading시 약 30 μm 의 팽창량과 Unloading후 10 μm 정도 수축한 상태에서 단조품의 취출 후 다시 10 μm 의 수축이 이루어진다. 특히 3번 부위는 단조품의 취출이 끝난 상태에도 불구하고 금형이 13

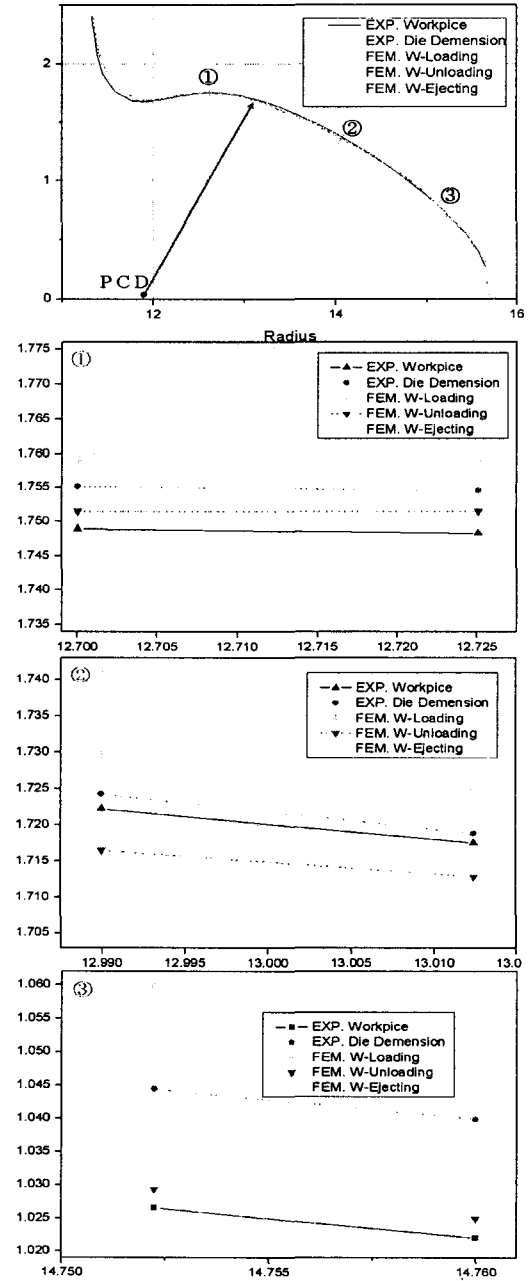


Fig 6 Changes of workpiece involute curve at each process in one tooth

μm 정도가 팽창되어있는 상태를 나타내고 있다. 이와 같이 1번 부위와 3번 부위에서 가장 많은 차이를 가지는 이유로는 그림 5을 보면 Loading-Unloading-Ejecting 시 금형과 단조소재의 접촉이 Land 부에서 계속 이루어지기 때문에 1번에서는 금형과 단조품의 유효 응력이 다른 부위에 비해 많이 높은 것을 알 수 있다. 그림 6은 실제단조품 측정값과 FEM해석 결과의 인볼류트 곡선 변화를 나타내고 있다. FEM해석 결과를 보면 Loading시 금형의 팽창과 더불어 단조품도 같은 크기로 팽창되며 Unloading 공정후 수축됐다가 Ejecting후 탄성회복이 나타남을 알수가 있었다. 1번 부위에서는 FEM 해석에 의해 예측한 치수가 실단조품 보다 $5\mu\text{m}$ 정도크고, 2번 부위에서는 $3\mu\text{m}$ 정도 해석값이 더 작고, 3번 부위는 $10\mu\text{m}$ 정도 크게 나타나고 있다. 이와 같이 치형 부위별로 탄성팽창량이 다르게 나타나는 것을 본 연구에서 알 수가 있었다.

4. 결론 및 향후 연구계획

절삭 기어에 비해 냉간단조 기어는 측정 및 금형 가공 치수 정밀도가 확보되어 있어야 하며, FEM 해석과 실제 단조품의 인볼류트 곡선을 비교·분석함으로써 FEM해석 기술의 치수정밀도 예측에 대한 신뢰성을 입증하였다. 냉간단조용 스피어 기어의 치수 정밀도 향상을 위해서는 단조 공정시 금형과 단조품간에 발생하는 치수 차이만큼 표준 기어 치형 곡선을 변형하여 계산된 기어 인볼류트 곡선이 필요하다. 보정된 치형 곡선의 설계를 위해 필요한 금형과 단조품의 치형 변화와 그에 영향을 미치는 단계별 치형 변화를 분석하였으며 정량적인 데이터를 제시하였다. 향후에는 본 연구 결과를 기준으로 보정된 금형을 이용한 실험을 수행 할 것이다. 일반적으로 치수 정밀도면에서 Extrusion 형태 보다 더 정밀도가 높을 것으로 예상되는 Upsetting형태에 대한 스피어 기어 성형 기술 연구를 수행 할 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [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. Sadeghi and T. A. Dean, Precision forging straight and helical spur gears, a Dept. of Mechanical Engineering (1995).
- [9] M. H. Sadeghi, T. A. Dean, The ejection of precision-forged straight and helical spur-gear forms, Department of Mechanical Engineering (2003).