

단조 베벨 기어의 탄성회복과 금형변형에 관한 연구

김명곤*·강우진*·조종래**·이정환***·배원병****

A Study on the Elastic Deformation of Forged Bevel Gears and Die

M.K. Kim, W.J. Kang, J.R. Cho, J.H. Lee and W.B. Bae

Abstract

Cold forging has several advantages as compared with conventional forming by cutting process. In this study, the elastic deformations of straight bevel gear and die induced by cold forging process are investigated to use 3D-Scanner. So we could estimate the total elastic deformation as comparing between forged bevel gears and die. And finite element analysis has been performed to predict the elastic deformation, each of cold forged bevel gear and die. The predicted values are compared with the experimental values and as a result they are well agreed with experimental data.

Key Words : Elastic deformation (탄성변형), Bevel gear(베벨기어), Die(금형), Cold forging (냉간단조), FEM(유한요소법)

1. 서 론

오늘날 베벨기어 제조에 있어서 냉간단조 공정은 높은 생산성 때문에 각종 산업 기계에 사용되고 있다. 특히 자동차 산업에 있어서 없어서는 안 될 중요한 공정이다. 그러나 이러한 잇점에도 불구하고 냉간단조 공정에서 생산된 제품은 낮은 정밀도에 의하여 그 효과가 제대로 발휘되지 못하는 실정이다. 냉간단조에서 정확한 치수의 형상을 얻기 위해서는 성형 될 때 접촉되는 부위의 탄성 변형분포와 이에 따른 제품 변형에 관한 정확한 정보가 필요하며, 이를 토대로 하여 제품의 금형설계를 하는 것이 상당히 중요하다.

무절삭 단조품을 제조하기 위한 금형의 합리적인 설계방

법을 확보하기 위하여 제품 성형시 평균 가압 압력뿐만 아니라 금형의 국부적인 파손이나 마모에 관한 정확한 지식이 필요하다. 또한 제조현 오늘날 베벨기어 제조에 있어서 냉간단조 공정은 높은 생산성 때문에 각종 산업 기계에 사용되고 있다. 특히 자동차 산업에 있어서 없어서는 안 될 중요한 공정이다. 그러나 이러한 잇점에도 불구하고 냉간단조 공정에서 생산된 제품은 낮은 정밀도에 의하여 그 효과가 제대로 발휘되지 못하는 실정이다. 냉간단조에서 정확한 치수의 형상을 얻기 위해서는 성형 될 때 접촉되는 부위의 탄성변형분포와 이에 따른 제품 변형에 관한 정확한 정보가 필요하며, 이를 토대로 하여 제품의 금형설계에서는 정확한 치수의 최종형상을 시행 착오 없이 조기에 개발하고 생산할 수 있는 방법이 요구

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** 한국해양대학교 공과대학 기계정보공학부
*** 한국기계연구원 무절삭정밀단조 연구실
**** 부산대학교 공과대학 기계공학부

되며, 이를 개발하기 위해서는 금형의 변형과 이에 따른 제품 변형 사이에 구체적인 정보를 필요로 하게 된다. 그러므로 이러한 정보를 측정을 통하여 얻어내고 이것을 금형의 설계에 적용한다면 냉간 단조 시 고정밀한 단조품을 얻을 수 있다.

2. 탄성변형 실험 및 해석

2.1 측정장치 및 실험소재

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 정밀도(1 μ m)가 높은 3차원 측정기를 이용하여 베벨기어의 탄성회복과 금형의 탄성 팽창량에 대해서 측정하였다. 본 연구에서 사용된 베벨기어의 소재는 SCM420H(AISI4118H)로써 기계적 성질이 우수하고 내식, 내마멸성이 좋으며 경도를 높이기 위하여 열처리하는 경우 그에 따른 담금질성을 향상시킬 수 있기 때문에 일반적으로 기어류에 널리 사용되는 소재이다 Table 1은 SCM420H의 화학성분을 나타낸 것이다.



Fig. 1 3D-Scanner

Table 1 Chemical composition of SCM420H

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Max.(%)	23	35	90	30	30	25	125	35	30
Min.(%)	17	15	55	0	0	0	85	15	0
Actual value	20	22	75	13	19	1	100	25	1

2.2 금형 및 베벨기어의 탄성변형에 관한 측정실험

2.2.1 베벨기어 냉간단조공정

일반적으로 베벨기어 냉간 단조공정은 총 3단계로써 예비성형공정, 기어치형 성형공정, 사이징(sizing) 공정으로 구분된다(1). 예비성형공정은 규정된 형상치수에 적합하게 예비성형체를 만드는 공정이고 기어치형 성형공정은 예비성형체에 인벌류트 치형 형상을 성형하는 단조공정이다. 마지막으로 사이징공정은 기어치형 정밀도를 높이기 위해 기어치형 성형공정에서 제조된 소재를 가지고

최종형상으로 단조하는 공정이다. 본 연구에서는 베벨기어와 금형의 탄성변형량을 측정하기 위해서 앞의 두 공정단계(예비성형공정, 기어치형 성형공정)의 탄성은 고려하지 않으며 단조공정의 최종단계인 사이징공정에서의 베벨기어에 한해서만 실험과 측정, 해석을 수행한다. 이러한 이유는 최종단계에서의 소재가 제품의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다.

2.2.2 베벨기어의 형상과 제원

본 연구에서는 탄성변형 측정에 사용된 직선베벨기어와 금형을 Fig. 2에 나타내었고 Table 2는 실험에 사용된 베벨기어의 제원을 나타낸다. 본 연구에서 사용되는 금형은 방전가공에 의해서 제작된다.

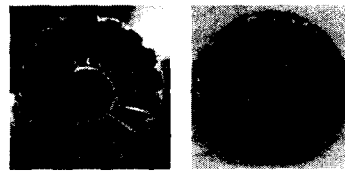


Fig. 2 Straight bevel gear and die

Table 2 Specification of straight bevel gear

Number of teeth	16
Module (mm)	5.0
Pressure angle (deg)	22.3
Pitch diameter (mm)	80.0
Pitch angle (deg)	58.00

2.2.3 베벨기어 및 금형의 탄성변형 측정 실험

본 연구에서 단조공정 중에 발생하는 탄성변형은 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째는 베벨기어의 탄성회복량이고 두 번째로는 금형의 탄성팽창량이다(2). 여기서 측정하고자 하는 변형량은 총 탄성변형량으로써 이 두 가지 변형을 모두 포함하고 있다. 본 연구에서 탄성변형 측정에서의 대상은 Fig 2와 같이 금형과 그 금형에서 제조된 베벨기어이며 측정 부위는 Fig. 3과 같이 외경과 내경, 높이이다. 먼저 3차원 측정기로 단조공정의 최종공정인 사이징 공정 금형의 각각에 해당되는 부위(외경/내경/높이)의 치수를 측정하였다. 다음으로는 냉간 단조 후 그 금형에서 생산된 베벨기어를 금형과 동일한 위치에서 치수를 측정하였다. Table 3은 베벨기어의 설계치수와 각각의 측정된 부위에서의 금형의 치수, 그리고 베벨기어의 평균 치수를 보여주고 거기에 비교된 총 탄성형량과 변형방향을 나타내었다(3)(4).

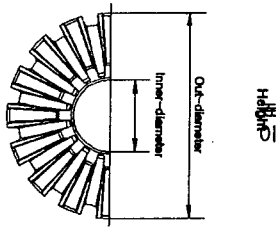


Fig. 3 Measured positions

Table 3 Comparison of total elastic distortion between die and bevel gear(mm)

Measured position	Outer diameter	Inner diameter	Height
Design dimension	82.000	30.710	17.920
Die demention	81.936	30.029	18.377
Bevel gear dimention(average)	82.092	30.223	18.456
Total elastic distortion	0.156 (0.190%)	0.194 (0.646%)	0.073 (0.243%)
Distortion direction	outward	outward	outward

2.3 금형 및 베벨기어의 탄성변형에 관한 유한요소해석
본 연구에서는 베벨기어 및 금형의 탄성변형을 예측하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D와 ANSYS-5.7을 사용하여 해석을 수행하였다. 실험과 동일한 조건에서의 금형 및 베벨기어의 탄성변형량을 추정하기 위해서는 예비성형체로부터 최종 베벨기어의 제조까지 전 공정해석이 먼저 수행되어야 한다. 왜냐하면 실제적으로 각 공정에서의 베벨기어 성형 시, 그 내부에는 잔류응력이 발생하고 이 잔류응력은 베벨기어 내부에 존재하기 때문에 이러한 영향을 고려하기 위해서 전 공정 해석 수행이 필요하다.

탄성변형 측정 실험과 동일한 조건으로 비교하기 위해서는 두 가지로 유한요소해석을 적용시켜야 한다. 첫 번째는 최종공정 후의 베벨기어 탄성회복에 관한 유한요소 해석이며 두 번째는 최종공정 때의 금형의 탄성팽창에 관한 유한요소해석이다. 이 두 값을 결부시키면 측정실험과 동일한 조건인 총 탄성변형량을 실험측면과 해석측면에서 비교 가능하게 된다.

2.3.1 베벨기어 탄성회복에 관한 유한요소해석

베벨기어의 탄성회복에 관한 해석은 ANSYS-5.7을 가지고 해석을 수행하였고 해석조건은 Table 4에 나타내었다. 해석 수행 방법은 먼저 전체 공정을 강소성 유한

요소 해석을 수행한 후, 해석된 최종공정에서 베벨기어의 형상과 응력 데이터를 ANSYS-5.7로 전환 후 ANSYS의 초기응력(initial stress)으로 부가하여 탄성해석을 수행하였다.

Table 4 Analysis conditions of bevel gear

Material	SCM420H
Properties	E(187GPa), $\nu(0.3)$, Y(350 MPa)
Stress-strain relation	$\bar{\sigma} = 890 \bar{\epsilon}^{0.23} (MPa)$
Number of mesh	8000
Friction factor(m)	0.1
Simulation mode	Isothermal

2.3.2 베벨기어 금형의 탄성팽창에 관한 유한요소해석

베벨기어 금형의 탄성팽창에 관한 해석은 DEFORM-3D를 사용하여 해석을 수행하였으며 해석조건은 Table 5에 나타내었다. 해석 대상은 베벨기어의 최종공정의 하부금형으로 제한하였고 금형의 보강링 부분과 금형 부분을 일체형으로 모델링(5) 하였다.

금형의 탄성팽창에 관한 유한요소 해석은 두 가지 방법으로 수행했는데 첫 번째 방법은 최종공정 후 소재의 데이터를 금형에 보정 시킨 후 금형을 탄성체로 가정하고 해석하는 강제금형해석(rigid-die assumption)과 두 번째 방법은 사이징공정에서 해석하고자 하는 금형을 소재와 같이 탄성체로 가정하고 해석하는 탄성금형 해석(elastic-die assumption)방법이다(6).

Table 5 Elastic analysis conditions of die

Material	SKD 11(AISI D2)
Properties	E(210 GPa), $\nu(0.3)$
Number of mesh	10000
Friction factor(m)	0.1
Simulation mode	Isothermal
Solution	1. Rigid die assumption
	2. Elastic die assumption

2.3.3 베벨기어 측정과 해석을 통한 총 탄성변형량 비교

베벨기어의 측정결과와 해석결과를 총 탄성변형량 입장에서 비교하였다. Table 6는 총 탄성변형량의 측정과 해석에 대한 비교 결과이며 금형의 탄성팽창 해석을 강제금형 해석과 탄성금형 해석의 두 가지 방법으로 해석한 것에 대해서 각각 비교하였다. 내경에서는 탄성금형, 외경의 경우 강제금형의 해석 결과가 실험에 더 가깝게 나타났다.

단조기어의 변형 중 단조 후 탄성 회복량이 상대적으로 크음을 알 수 있다. 따라서 탄성회복에 관한 계속적인 연구가 필요하다.

Table 6 Comparison of distortion between measurement and simulation

Measurement position	Inner diameter	Outer diameter	Used tool
Final deformation by Experiment(A)	0.194	0.156	3D Scanner
Elastic deformation of gears by simulation(B)	0.11	0.14	Ansys 5.7
Rigid die assumption	Die deformation(C)	0.009	Deform 3D
	Total (D=B+C)	0.119	
	Deviation(D-A)	-0.075	0.02
Elastic die assumption	Die deformation(E)	0.061	Deform 3D
	Total (F=B+E)	0.171	0.274
	Deviation(F-A)	-0.023	0.118

3. 결론

본 연구에서는 3차원 측정기를 사용하여 금형과 베벨기어의 탄성변형으로써의 총 탄성 변형량을 측정하고 그에 대한 비교로써 DEFORM-3D와 ANSYS-5.7을 사용하여 해석을 수행하였다. 이러한 측정과 해석을 비교해 본 결과 결론은 다음과 같다.

- (1) 금형과 냉간단조 베벨기어의 외경, 내경, 높이를 비교함으로써 냉간 단조과정 중에 발생하는 금형의 탄성팽창과 냉간단조 베벨기어의 탄성회복을 모두 포함하는 총 탄성변형량을 측정 할 수 있었다. 그 결과 외경과 내경, 높이 모두 팽창함을 볼 수 있다.
- (2) 냉간단조 베벨기어의 총 탄성변형 측정값과 유한요소를 통한 해석값을 비교해 본 결과 유한요소 해석이 냉간단조 공정 중에 발생하는 총 탄성변형량을 잘 예측하고 있다.
- (3) 금형의 탄성팽창에 대한 보다 정확한 측정을 위해서는 스트레인 게이지를 성형중인 금형에 부착하여 실제적인 탄성팽창을 측정해야하며 해석에 있어서는 보강링을 분리하여 금형을 탄성체로 가정하고 해석하는 등 다각도의 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 무절삭정밀단조 연구실에서 주관하는 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행하였으며 이에 관계된 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 강우진, 2003, “단조기어의 탄성회복 및 열처리 변형을 고려한 금형설계에 관한 연구”, 부산대학교 대학원 석사논문.
- (2) A. Kocanda, R. Cako & P. Czyzewski, 1996, “Some Aspects of Die Deformation in Net-shape Cold Forging”, *Advanced Technology of Plasticity*, pp367~370.
- (3) M. H. Sedeghi & T.A.Dean, 1991, “Analysis of dimensional accuracy of precision forged axisymmetric components”, *Proc. Instr. Mech. Engrs.*, Vol.205, pp171~178.
- (4) B.Raddad & A.Kocanda, 1993, “On the strength criteria for high stressed ring shaped dies”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity*, Beijing, China, Sep., pp5~9.
- (5) Y.K. Lee & S.R. Lee & C.H. Lee & D.Y. Yang, 2001, “Process modification of bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis”, *Journal of Mat. Pro. Tec.*, Vol 113, pp59~63.
- (6) 이영선, 이대근, 이정환, 2002, “냉간 단조용 금형의 탄성 변형에 관한 실험 및 이론적 연구”, *한국소성가공학회지*, 제11권, 제2호, pp171~178.