

단조/절삭 베벨기어의 열처리 변형에 관한 연구

강우진*, 김명곤*, 조종래**, 이정환***, 이영선***, 배원병****

(2002년 12월 30일 접수)

A Study on the Distortion induced by Heat Treatment on Automobile Bevel Gears

W. J. Kang, M. G. Kim, J. R. Cho, J. H. Lee, Y. S. Lee and W. B. Bae

Abstract

Heat treatment is widely used in various manufacturing processes to enhance the quality of a product such as strength, surface hardness, and service life. In the heat treatment, there is dimensional change or distortion of the product, which critically influences the dimensional accuracy of precision parts. In this study, the distortion of a straight bevel gear induced by heat treatment is investigated in two cases. In the first case, the distortion induced by heat treatment are compared between a forged bevel gear and a machined bevel gear. In the second case, the distortion of an annealed gear is compared with that of a quenched gear. And finite element analysis has been performed to predict the distortion of a heat-treated and machined bevel gear. The predicted values are compared with the experimental values.

Key Words : Heat Treatment, Bevel Gear, Distortion, FEM Analysis

1. 서론

베벨 기어는 자동차 산업에 널리 사용되는 기계요소로 절삭가공 혹은 냉간단조에 의해서 제조된다. 냉간단조 기어는 절삭기어에 비해서 재료비를 절감하고 생산성을 높임은 물론 제품의 균일화를 이룰 수 있으므로 생산이 활발히 진행되고 있다. 그러나, 단조기어의 단점은 단조후의 탄성 회복에 의한 탄성변형과 열처리 동안의 잔류응력의 풀림에 의한 치수변화가 일어난다는 것이다. 정밀도가 낮은 기어를 사용하면 치물림이 좋지 않아 소

음이 발생하며 치면의 일부에 응력이 집중되어 피로수명을 저하시킨다. 열처리공정은 강도, 표면 경도, 그리고 수명과 같은 생산품의 품질을 향상하기 위하여 사용되고 있다. 최종 생산품에서 미세 조직의 비율, 재료의 성질, 잔류 응력, 그리고 치수 정밀도를 얻기 위하여 열처리 공정은 가열, 냉각, 침탄, 확산 공정을 포함한다.

일반적으로 열처리 공정 동안 냉간단조 기어는 잔류응력이 풀리기 때문에 절삭 기어보다 변형을 예측하기 어렵다. 모듈이 5mm이고 피치원 지름이 80mm인 베벨기어는 인접 피치 오차가 4등급인 경우 $67 \mu m$, 6등급인

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

경우 260 μ m 이다. 이중 일반적으로 열처리 변형의 오차 범위가 $\pm 5\mu$ m의 치수 정밀도가 요구된다.

본 논문의 목적은 열처리 동안 절삭기어와 단조기어의 변형양상과 변형량을 실험과 해석으로 예측하여 절삭기어의 경우 절삭 데이터를 수정하도록 하고, 단조기어의 경우 금형 설계에 반영하도록 하여 치수정밀도 향상은 물론 단조기어의 무절삭 정밀단조를 가능케 하는데 있다.

2. 베벨기어의 열처리 변형 측정

2.1 측정장치 및 베벨기어 재료

본 연구에서는 정밀도(1 μ m)가 높은 3차원 측정기를 이용하여 2가지 조건에 대한 베벨기어의 열처리 전, 후의 변형량을 측정하였다. 베벨기어 소재는 가공성을 좋게 하고 열처리 결함을 줄이기 위하여 구상화 어닐링한 SCM420H(AISI4118H)를 사용하였다. Table 1은 베벨기어 소재인 SCM420H의 화학조성을 나타낸 것이고 Fig. 1은 베벨기어 소재의 경화능 시험결과를 나타낸 것이다.

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

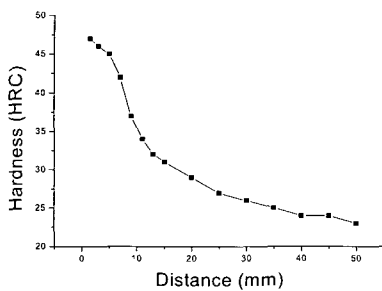


Fig. 1 Test of hardenability

2.2 열처리 변형 측정 및 조건

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 직선베벨기어를 사용하여 열처리를 하였다. Table 2는 베벨기어의 재원을 나타내고 있다. Fig. 3은 적용된 열처리공정도, 작업시간, 작

업온도를 나타낸 것이다. 일반적인 열처리 변형에는 크게 3가지를 들 수 있는데, 냉간단조나 기계가공에 의해 발생한 내부 잔류응력이 어닐링 과정에서 없어지면서 생기는 변형, 냉각 중 열응력에 의한 변형과 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태로 발생하는 변형이다.^(1~2)

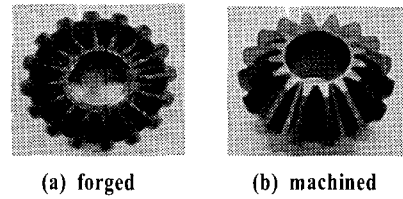


Fig. 2 Configurations of bevel gear

Table 2 Specification of straight bevel gear

No of teeth	16
Module (mm)	5.0
Pressure angle	22.3
Pitch diameter (mm)	80.0
Pitch angle	58.00

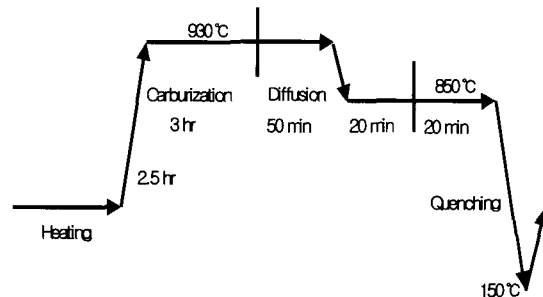


Fig. 3 Heat-treatment processes

본 연구에서는 2가지 경우의 열처리 변형조건에 대하여 측정하였다.

Case 1은 설계치수가 같은 냉간단조 베벨기어와 절삭 베벨기어의 열처리 전, 후의 변형을 비교하였다.

Case 2는 침탄, 확산 후 상온까지 서냉한 시편(어닐링)과 담금질을 거쳐 열처리를 완료한 시편의 변형량을 비교하였다.

Case 1은 열처리 변형에 있어서 대표적인 세 가지 변형을 모두 포함한 변형이다. 측정부위는 Fig. 4와 같이 10개 시편의 외경/내경/높이/치형을 측정하였고 Table 3은 평균변형과 표준편차와 치형에 대한 측정결과를 나타내었다.

Case 1인 경우, 즉 냉간단조 후 열처리한 베벨기어와 절삭가공 후 열처리한 베벨기어를 비교해 본 결과, 냉간 단조 베벨기어는 내경 부분이 수축하는 반면에, 절삭공정에 의한 베벨기어는 내경 부분이 팽창함을 보였다. 또 열처리 변형량을 정량적으로 비교해보면 외경, 내경, 치형 부위에서 냉간단조 베벨기어가 더 많은 팽창과 수축을 보인다. 그 이유는 단조했을 경우의 내부잔류응력과 절삭공정 했을 때의 내부잔류응력이 다르기 때문이다.

Case 2는 냉간단조에서 발생한 잔류응력이 열처리 변형에 미치는 영향을 평가한 실험으로 그 결과는 Table 4에 나타내었다. 일반적으로 절삭기어는 기계가공에 의한 내부잔류응력을 무시할 수 있지만 단조기어의 경우 내부응력은 여전히 존재한다.

Case 2인 경우, 어닐링한 시편의 외경은 증가하고 내경은 수축함을 알 수 있다. 이것은 가열시 늘어났던 변형량이 서냉시에는 내부잔류응력이 풀어지면서 더 많은 수축을 보이기 때문이다. 퀴칭했을 경우가 서냉했을 경우보다 더 많은 팽창량을 보인다. 그 원인은 서냉시에 발생하는 미세조직(펄라이트+베이나이트)과 퀴칭시에 발생하는 미세조직(마르텐사이트)이 다른 데에 있다. 그러므로 미세조직이 마르텐사이트로 변태하면서 체적증가를 수반하여 퀴칭 시 더 많은 변형량을 보이는 것이다.⁽⁴⁾



Fig. 4 Measured positions

Table 3 Comparison of distortion induced by heat treatment for forged/machined bevel gears (mm)

Cold-forged bevel gear			
Measured Position	Outer diameter	Inner diameter	Height
Design	82	30.71~30.83	39.7
Before H.T.	82.053	30.803	39.569
Average distortion(mm)	0.046	-0.014	0.018
Distortion ratio(%)	0.0561	0.0455	0.0455
Deviation	0.009	0.006	0.008

Machined bevel gear			
Measured position	Outer diameter	Inner diameter	Height
Design	82	30.71~30.83	39.7
Before H.T.	81.889	30.799	39.680
Average distortion(mm)	0.024	0.015	0.025
Distortion ratio(%)	0.0293	0.0487	0.0630
Deviation	0.005	0.005	0.007

Tooth profile	Cold-forged bevel gear		Machined bevel gear	
	[1] Position	[2] Position	[1] Position	[2] Position
Before H.T.	4.235	5.564	4.913	5.625
Average distortion(mm)	0.019	0.027	0.016	0.018
Distortion ratio(%)	0.4486	0.4853	0.3257	0.0032
Deviation	0.008	0.016	0.010	0.008

Table 4 Comparison of distortion induced by annealing and quenching processes (mm)

Heat treatment	Annealing		Oil-quenching	
	Outer diameter	Inner diameter	Outer diameter	Inner diameter
Before H.T.	82.054	30.796	82.050	30.800
Average distortion(mm)	0.022	-0.020	0.040	0.011
Distortion ratio(%)	0.0268	0.0649	0.0488	0.0357
Deviation	0.008	0.005	0.008	0.002

2.3 열처리 변형의 유한요소해석

본 연구에서는 베벨기어의 열처리변형을 예측하기 위하여 DEFORM-3D를 사용, FEM 열처리 해석을 수행하였다. 열처리 공정은 Fig. 3과 같이 적용하였으며 절삭가공 베벨기어에 대해서만 해석하였다. (단, 절삭가공에 의해 발생한 내부잔류응력이 존재하지 않는다고 가정한다.) 열처리 해석에 있어서 사용되어지는 열전달 지배방정식은 다상 열전달 방정식으로 확산 모델링과 함께 Laplace 식으로부터 유도된다. 다상 열전달 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho c T = \frac{\partial}{\partial X} \left(K \frac{\partial T}{\partial X} \right) + L_i \xi_i + Q \quad (1)$$

여기서 ρ , c , K , L_i , ξ_i 는 밀도, 비열(specific heat), 열전도계수, 상변태의 잠열(latent heat), 상변태 체적비(transformation volume fraction rate)를 나타내고

$$\rho c = \sum \xi_i \rho_i c_i, \quad K = \sum \xi_i K_i \text{ 이다.}$$

확산공정에서 사용되어지는 확산 모델링은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D \frac{\partial C}{\partial X} \right) \quad (2)$$

C , D 는 탄소함유량, 확산계수(diffusion coefficient)를 나타내고 확산계수는 다시 $D = A_1 \exp(A_2 C) = A_1 \exp(A_2/T)$ 로 나타낸다. 여기서 A_1 과 A_2 는 재료상수로써 탄소함유량 또는 온도의 함수로 나타내며 T 는 절대온도를 C 는 탄소함유량을 나타낸다.

Table 5는 열처리 해석 시 필요한 SCM420H의 물성치를 나타낸 것이다. 해석을 수행함에 있어서 중요한 자료 중 하나가 열전달 계수(convection heat transfer coefficient)이다. 이 값은 가열과 쿨링 시 그리고 형상에 따라서도 그 부분적으로 전달되는 것이 다르게 작용⁽³⁾하는데 가열 시에는 열전달 계수가 약 50 W/m²·K이며 오일 쿨링 시에는 Fig. 5⁽⁴⁾와 같다. Fig. 6은 4066개의 절점과 16567개의 요소수를 나타내고 있는 유한요소망을 나타낸다.

Table 5 Material properties of SCM420H

E (GPa)	ρ (kg/m ³)	k (W/m·K)	c (J/g·K)	α (10 ⁻⁵ /K)
205	7850	44.5	0.475	1.1

Table 6은 열처리 해석치와 측정치를 비교해 본 결과이다. 내경부분은 해석치와 측정치가 0.004mm 정도 차이가 있으며, 외경부분은 0.012mm 정도 차이가 난다.

열처리 변형량을 공정별로 보기 위해서 Fig. 7 (a)와 Fig. 7(b)에 가열공정과 쿨링공정에서 시간에 따른 변형량을 나타내었다. 가열공정에서는 열처리 변형량이 증가하지만 오스테나이트 변태에서 약간의 변형량 감소를 보인다. 이것은 체적입방구조(BCC, 베이나이트)에서 면심

입방구조(FCC, 오스테나이트)로 상변태가 일어나면서 생기는 현상이다. 쿨링공정에서는 온도가 떨어지면서 변형량이 큰 폭으로 감소하다가 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 일어나는 곳에서 약간의 변형량 증가를 보인다.

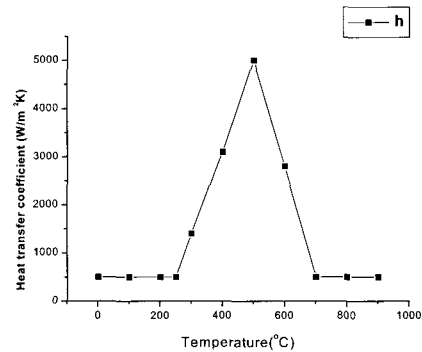


Fig. 5 Heat transfer coefficient as a function of surface temperature

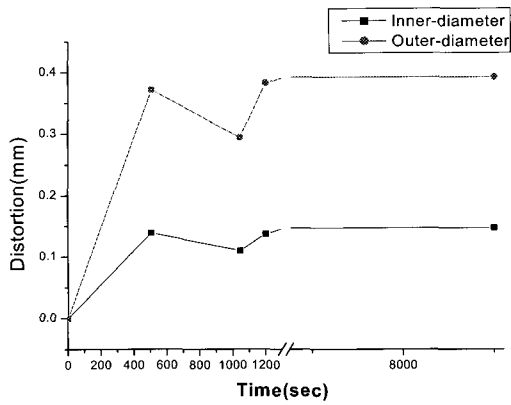


Fig. 6 Finite element mesh of 1/32 of a gear

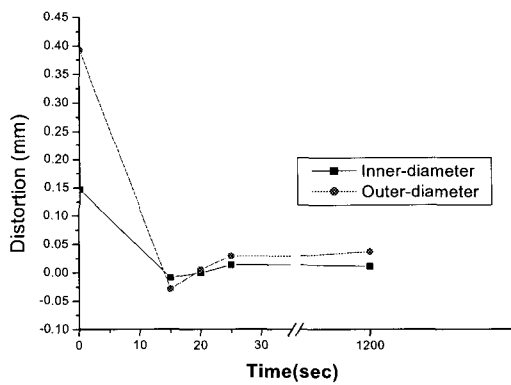
Table 6 Comparison of distortion between FEM analysis and experiment (mm)

Measured position	Inner diameter		Outer diameter	
	analysis	experiment	analysis	experiment
Distortion	0.011	0.015	0.037	0.025

Fig. 8은 베벨기어의 표면과 중심부에서 시간에 따른 온도변화를 보여준다. 열처리 공정의 변수는 대부분 온도의 함수이고 이러한 온도를 파악하는 것은 중요하다. Fig. 9는 침탄, 확산공정 후 깊이에 따른 탄소함유량을 보여준다. 노안에 다량으로 함유된 탄소가 베벨기어에



(a)



(b)

Fig. 7 Distortion in (a) the heating process (b) the quenching process

표면에 침탄과 확산이 되면서 약 0.8정도의 탄소가 증가하고 내부로 갈수록 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10(a)와 (b)는 가열과 쿨칭시에 조직이 시간에 따른 상변태 (베이나이트⇒오스테나이트⇒마르텐사이트)를 보여준다. 흥미로운 점은 마르텐사이트가 시작하는 점은 베벨기어의 표면이 아니고 표면에서 약간 떨어진 부분부터 마르텐사이트 변태가 시작하면서 표면보다 먼저 마르텐사이트가 된다. 왜냐하면 일반적인 탄소강에서 마르텐사이트 변태시작온도(T_{Ms})에 관한 관계식은 식(3)과 같이 Andrew 식이 가장 잘 알려져 있는데 침탄과 확산공정에서 베벨기어 표면에 많은 탄소가 함유되고 이 탄소 함유량이 마르텐사이트 시작온도를 낮추기 때문이다.⁽⁵⁾

$$T_{Ms}(^{\circ}C) = 539 - 423C - 30.4Mn - 12.1Cr - 17.7Ni - 7.5Mo \quad (3)$$

유한요소해석에 있어서 외경과 내경 부분을 절삭기어의 측정치와 비교해 보았다. 그 값은 내경이 0.004mm, 외경이 0.012mm 만큼의 변형량 차이를 보였다. 이러한 변형량의 차이는 해석과 실제적 공정에서 적용하는 많은 부분적 차이, 즉 노내에 베벨기어가 들어가는 방향, 냉매(quench)의 유동방향, 노내 분위기, 교반에 있어서의 영향, 무엇보다도 열적 데이터의 정확성 등이 있다.⁽²⁾ 정확한 해석을 위해서는 이러한 많은 요소들을 고려해야 할 것이다.

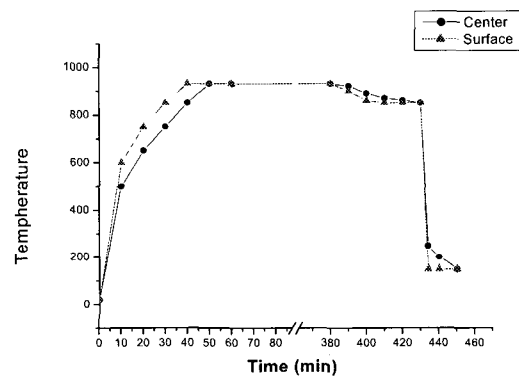


Fig. 8 Temperature variation w.r.t time in the heat treatment

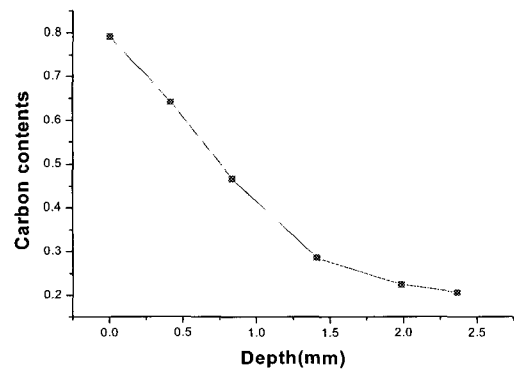
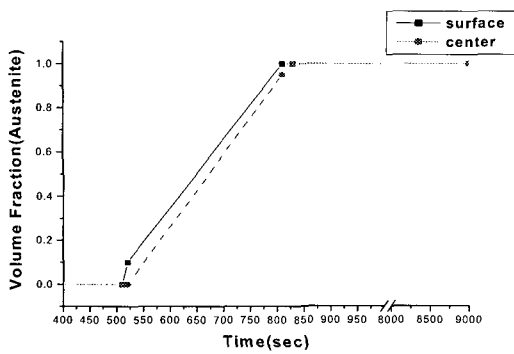


Fig. 9 Carbon contents w.r.t depth

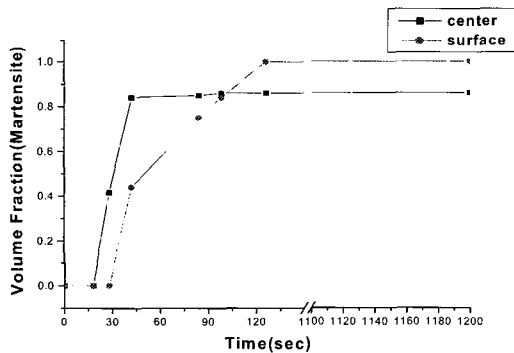
2.4 조직 및 경도측정

단조기어와 절삭기어의 열처리 전/후 미세조직의 차이를 검토하기 위해 Fig. 11, Fig. 12와 같이 각각의 조직 사진을 부위별로 나타낸 것이다.

단조베벨기어나 절삭베벨기어나 조직의 형태는 비슷한 것으로 나타났다. 열처리 전 조직에서 백색부분이 페라이트와 흑색부분이 펄라이트, 중간부분에 동그란 조직은 어닐링 시의 구상탄화물 상태이다. 열처리 후를 살펴보면 표면부분에는 미세탄화물과 마르텐사이트 조직구조를 보이고 내부쪽에서는 길게 파진 모양의 템퍼링 마르텐사이트 미세구조도 보인다.



(a)



(b)

Fig. 10 Volume fraction of (a) austenite and (b) martensite w.r.t time

단조베벨기어와 절삭베벨기어의 열처리 후 경도를 측정하였다. Table 7은 연구대상인 베벨기어의 표면경도와 경화층 깊이에 따른 규정을 나타낸 것이며, Fig. 13은 깊이에 따른 경도를 나타낸 것이다. 단조기어의 경우 표면을 제외하고 오히려 경도가 조금낮게 나타난다. 이것은 단조 윤활막이 표면에 붙어 있어 침탄량이 절삭기어에 비해 작기 때문인 것으로 판단한다.

따라서 단조 기어의 경우 절삭기어에 비해 조직적으로 문제가 되지 않고 열처리 시 변형양상의 차이를 분석하여 급형설계에 반영하면 절삭단조와 같은 정밀도를 유지할 수 있다.

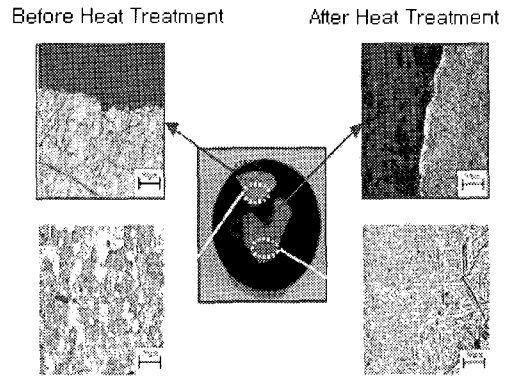


Fig. 11 Micro-structures of cold-forged bevel gear with heat treatment

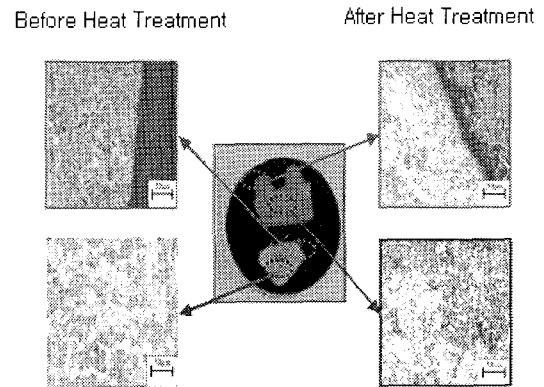


Fig. 12 Micro-structures of machined bevel gear with heat treatment

Table 7 Specification of measured hardness

Material	SCM420H	Hardness	HRC 58 ~ 63
H/T Method	C.Q.T.	Hardening depth	0.8 ~ 1.2 mm

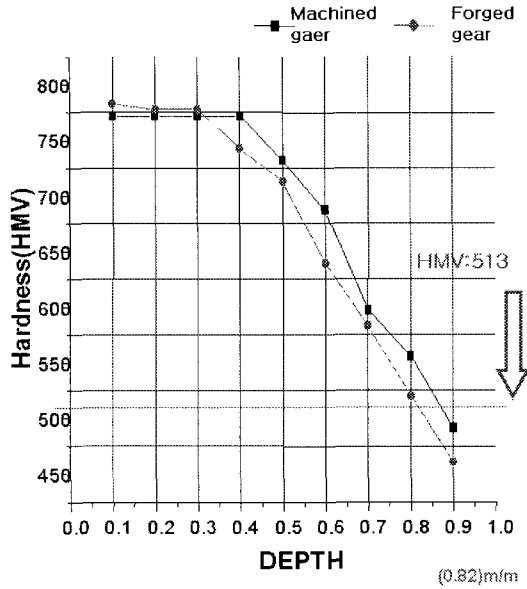


Fig. 13 Comparison of hardness between cold-forged and machined bevel gear

3. 결론

본 논문에서는 열처리 변형량을 2가지 조건에 대하여 측정, 비교하고 열처리 해석을 수행하여 해석과 실험을 비교한 결과, 결론은 다음과 같다.

(1) 냉간단조 베벨기어는 열처리시 잔류응력이 풀리기 때문에 절삭 베벨기어보다 변형량이 더 많다. 특히 외경과 치형 변화는 2배정도 된다. 또한 표준편차도 크게 나타나고 있다.

(2) 냉간단조 베벨기어의 열처리 변형을 예측하기 위해서는 열처리 가열시에 어닐링 효과로 발생하는 변형량을 고려해야 한다.

(3) 절삭가공 베벨기어의 측정값과 유한요소해석을 통한 해석값을 비교하였다. 유한요소해석 값이 열처리 과정을 잘 예측하고 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 무절삭 정밀단조 연구실이 주관하는 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행하였으며 이에 관계된 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) M. A. H. Howes 1992, "Factors Affecting Distortion in Hardened Steel Components", Proceeding of the 1st. Int. Conf. on Quenching and Control of Distortion, pp. 251~258.
- (2) R. T. von Bergen 1992, "The Effects of Quenchant Media Selection and Control on the Distortion of Engineered Steel Parts", Proceeding of the 1st. Int. Conf. on Quenching and Control of Distortion, pp. 275~282.
- (3) S. Segerberg and J. Bodin, 1992, "Variation in the Heat Transfer Coefficient around Components of Different Shapes During Quenching", Proceedings of the 1st. Int. Conf. on Quenching & Control of Distortion, pp. 165~170.
- (4) A. Majorek, B. Scholtes, H. Muller, E. Macherauch, 1992, "The influence of Heat Transfer on the Development of Stress, Residual stresses and Distortions in Martensitically Hardened SAE 1045 and SAE 4140", Proceedings of the first Int. Conference on Quenching & Control of Distortion, pp. 171~179.
- (5) K. Arimoto, G. Li, A. Arvind, and W. t. Wu "The Modeling of Heat Treating process", Scientific Forming Technologies Corporation.