

스퍼기어의 제조공정에 따른 치수변화와 잔류응력에 관한 연구 -냉간 단조기어와 기계가공기어 비교-

권용철¹, 이정환¹, 이춘만², 이영선[#]

Dimensional Changes and Residual Stress of Spur Gear According to the Manufacturing Processes -Comparison of Cold Forging Part with Machining Part-

Y. C. Kwon, J. H. Lee, C. M. Lee, Y. S. Lee

Abstract

The high dimensional accuracy of the cold forged part could be acquired by the accurate dimensional modification for the die, which is, the dimensional changes from the die through forged part to final part after heat treatment were considered. The experimental and FEM analysis are performed to investigate the dimensional changes from the die to final part on cold forged part, comparing with the machined gear. The dimension of forged part is compared with the die dimension at each stage, such as, machined die, cold forged part, and heat-treated-part. The elastic characteristics and thermal influences on forging stage are analyzed numerically by the DEFORM-3DTM. The analyzed residual stress of forged part is considered into the FE-analysis for heat treatment using the DEFORM-HTTM. The effects of residual stress affected into the dimensional changes could be investigated by the FEA. Each residual stress of gears was measured practically by laser beam type measurement.

Key Words : Cold Forging, Spur Gear, Residual Stress, FEM, Involute Curve

1. 서 론

정밀단조기술은 생산성이 높고, 재료 이용율이 높으며, 제품의 개당 생산비가 낮고, 제품의 기계적 특성이 우수하므로 자동차, 항공기, 전자 산업 등 산업 전반에 걸친 핵심 부품의 생산에 적용되고 있다. 정밀단조품의 최대 수요처는 자동차 산업이며, 주요 동력 전달 장치 부품 제조에 냉간단조품의 사용이 증대되고 있다. 최근의 냉간 단조 기술 개발은 금형 수명과 단조품 정밀도 향상에 집중 되고 있는데, 최근 들어 더욱 더 관심이 집

중되고 있는 분야는 기어의 치수 정밀도를 제어하기 위한 기술이 그 중 하나이다.

냉간 단조 기술은 1950년대부터 현재까지 많은 발전이 이루어 졌으나, 단조 기어의 탄성회복에 의한 치수 변형, 단조 후 열처리 시 치수변형으로 인해 기어의 치형 정밀도를 향상시키는데 많은 어려움을 지니고 있다. 기어의 정밀단조를 위한 연구 또한 많은 연구자들[1~6]에 의해 수행되어왔다. 그러나 정확한 치수 변화를 분석하기 보다는 정형(Net-shaping)제조에 초점이 맞추어 졌던 사실이다. 최근들어, 정량적인 연구를 위해 Lee 등이

1. 한국기계연구원 부설 재료 연구소 융합공정연구부
2. 창원대학교 기계설계공학과
교신저자: 한국기계연구원 부설 재료 연구소,
Email: lys1668@kims.re.kr

Table 1 Specification of spur gear

Spur Gear Tooth Data	
Module	1.75
Pressure Angle	20 °
Base Diameter	ø24.667
Pitch Diameter	ø26.25
Number of Teeth	15

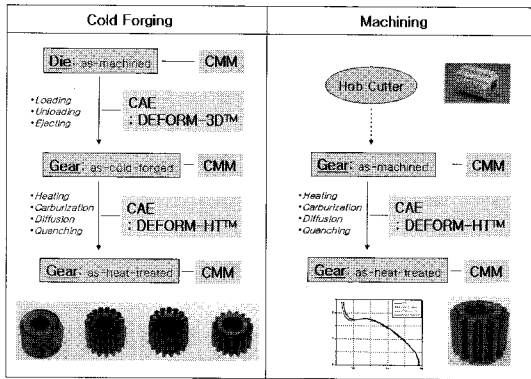


Fig. 1 Experimental and FE analysis procedures to investigate the dimensional change of involute profile

단조 공정 시 금형과 단조품의 인볼류트 곡선의 변화를 연구하였다[7~8]. 또한 단순한 압축모델(Upsetting Model)을 사용해서 열처리 후 제품의 변형을 연구하였다[9].

본 연구에서는 냉간 단조 스퍼기어의 치수 정밀도 향상을 위해 단조 공정 동안에 금형에서부터 기계 가공품과 최종 단조 제품까지 치수 변화를 실험과 유한요소해석을 통해 정량적 분석을 수행하였다. 사용된 스퍼기어는 모듈 1.75, 잇수 15, 압력각 20°, 피치 지름 26.25mm 등으로 제원은 Table 1 과 같다.

또한 각 단계별 치형의 정밀치수는 접촉식 3 차원측정기(Contact Coordinate Measuring Machines)를 사용하여 측정하였다. 냉간 단조 기어의 치수 변화와 정밀도에 영향을 미치는 잔류 응력의 효과는 유한 요소해석에 의해 정량적으로 분석하였다 Fig. 1 은 실험과 해석의 진행 과정을 설명하고 있다.

2. 실험 및 유한요소해석

2.1 스퍼기어 냉간단조

냉간 단조로 스퍼 기어를 성형하는 방법으로는

압출형(Extrusion Type)에 의한 방법과 단조형(Upsetting Type)에 의한 방법이 있는데, 본 연구에서는 상대적으로 낮은 성형 하중과 높은 금형 수명의 단조 및 열처리의 장점이 있는 압출형에 의한 기어 성형에 대하여 분석하였다.

2.1.1 실험

본 연구에 사용한 스퍼 기어는 한국 공업 규격 KS B 1045에 규정된 스퍼 기어 제원을 사용하였다. 밀폐형 단조로서 금형은 초경 인서트(WC)에 SKD61종 보강링 소재가 사용 되었으며, 단조용 소재는 칩탄 기어용 소재로 많이 사용되고 있는 SCM420H(AISI 5120)를 구상화 소둔 처리 후 인산염 피막 처리한 링 소재가 사용 되었다.

Fig. 2는 기계가공품과 단조품의 열처리 전, 후의 소재 조직으로 단조품의 경우 열처리 이전에 소성 변형된 소둔조직을 기계가공품의 경우 전형적 페라이트-퍼알라이트 조직을 나타내고 있으며 열처리에 의해 모두 템퍼드마르텐사이트조직을 보이고 있다. Fig. 3와 같은 열처리 공정도를 이용하여 열처리 전, 후의 내부 조직을 관찰해본 결과 Fig. 2와 같이 열처리 후의 조직이 열처리 전의 조직에 비해 미세화되는 것을 확인 할 수 있다. Table 2는 화학 조성을 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 소재의 물성치를 분석하기위해 인장실험을 수행한 결과 항복강도는 805.64[Mpa], 가공경화지수는 0.2로 측정되었다.

Table 2 Chemical composition of SCM420H

Component	C	Si	Mn	Cr	Mo
Wt.%	0.17~	0.15~	0.55~	0.85~	0.15~
	0.23	0.35	0.90	1.25	0.35

냉간 단조 기어의 인볼류트 치형은 단조공정 동안 단조품과 금형의 팽창/수축과 단조품 취출 후 탄성 변형으로 인해 금형보다 더 큰 치수를 나타낸다. 금형과 단조품 사이에 치수 차이는 접촉식 3 차원 측정기에 의하여 측정되었다. Fig. 3 은 본 연구에서 적용된 기어의 열처리 공정도, 작업 시간, 작업 온도를 나타내고 있다.

단조품의 인볼류트 치형은 열처리 동안의 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 일어나면서 미세조직변화와 함께 변화되고 있다. Fig. 4 은 실험에 사용된 단조품과 기계가공품의 열처리 전, 후 외관을 나타내고있다.

스퍼기어의 제조공정에 따른 치수변화와 잔류응력에 관한 연구
-냉간 단조기어와 기계가공기어 비교-

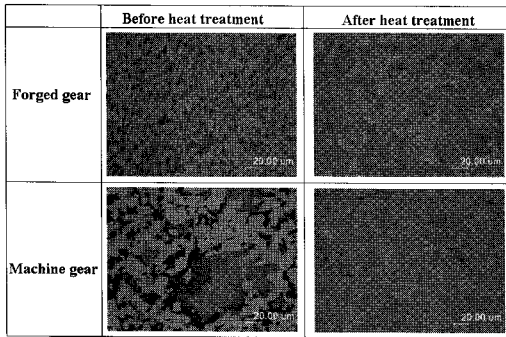


Fig. 2 The micro structure before and after heat treatment of forged gear and machine gear

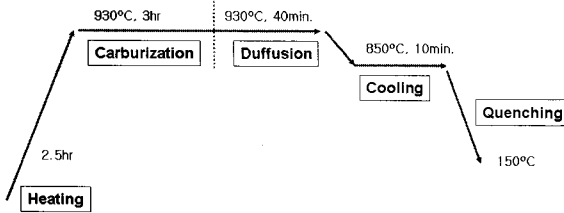


Fig. 3 Cycle of heat treatment for spur gear

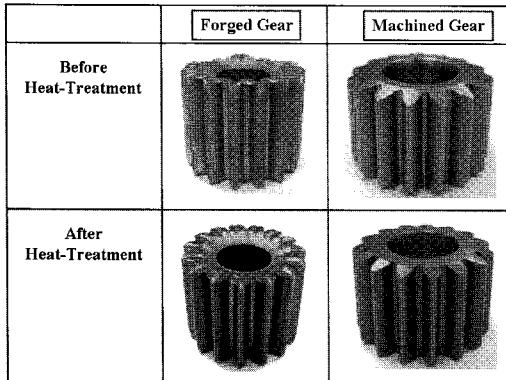


Fig. 4 Forged gear and machined gear used in experiment

열처리 공정시 치수 변화 측정을 위해 접촉식 3 차원 측정기를 이용하였다. 또한, 단조 공정과 기계가공 공정을 거치는 동안과 열처리 공정을 거치는 동안에 기어 치형의 잔류 응력을 회절분석기 X-ray 로 측정하여 공정간에 발생되고 소멸되는 응력변화를 고찰하고 치수변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2.1.2 유한요소해석

본 연구에서는 Table 3 에서 보는 것과 같이 금형

Table 3 The FE-model for dimension analysis of cold forged spur

Model Cases		Loading	Unloading	Ejecting
Workpiece		Rigid-Plastic	Elasto-Plastic	Elasto-Plastic
Die	Shrink fitting	Considering		
	Thermal Influence	Considering		
Material		Elastic	Elastic	Elastic

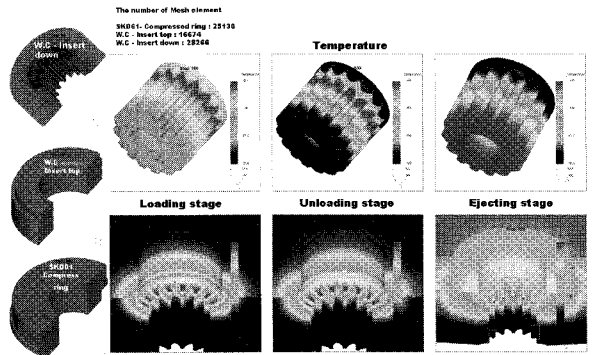
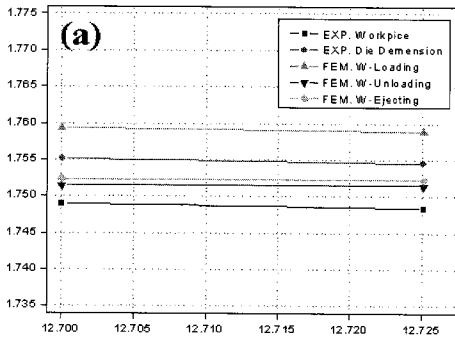
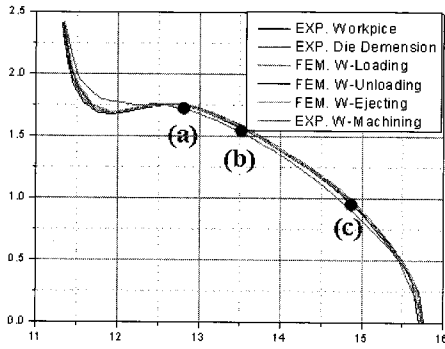


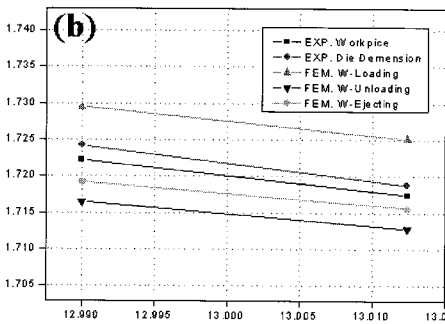
Fig. 5 Mesh system of dies and temperature distribution of forged gear

과 소재의 치형 변화를 해석하기 위하여 금형은 탄성체(Elastic)고, 소재는 탄소성체(Elasto-Plastic)로 가정하여 유한요소해석을 수행하였다.

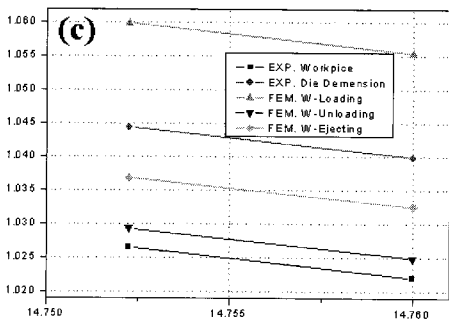
탄소성 유한요소해석에서 사용한 금형은 예압(Pre-stress)이 가해지는 상태이기 때문에 금형의 각 부위별로 열박음(Shrink-fitting)을 통하여 최종적인 기계 가공을 한 금형을 해석에 사용하였다[10]. 또한 각 금형의 부품별 열 박음 해석 후 전공정의 가압-제하-취출까지의 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 냉간단조 시 발생하는 변형열에 의한 치수변화 역시 분석하기 위해 비등온해석을 이용하였다. Fig. 5는 해석결과로부터 분석된 단조품과 금형의 공정별 온도 분포로서 단조품의 온도는 가압시 최대 200°C, 제하시 168°C, 취출시 130°C로 상승 후 상온으로 하강됨을 알 수 있다. 또한, 금형 역시 최대 80°C 이상까지 상승 된 후 하강함을 확인할 수 있다. 스퍼 기어는 회전 대칭이기 때문에 해석 시간 과 계산 시간을 줄이기 위하여 치형 1개의 1/2모델을 사용하여 3D 유한요소해석을 수행하였다. 탄소성 유한요소해석에 사용된 금형과 소재의 요소 수는 Fig. 5와 같이 금형의 초경 부위는 67626개, 보강링은 25130개, 소재는 30000개의 요소 수를 사용하였다.



[a] DETAIL “(a)”



[b] DETAIL “(b)”



[c] DETAIL “(c)”

Fig. 6 Change of involute profile during forging states

3. 결과 및 고찰

3.1 단조 공정 시 치수 변화

각각의 인볼류트 치형은 유한요소해석과 실험을 통해서 계산 되어지고 측정되어졌다. 기어의 피치원은 기어 구동시에 가장 중요한 위치이다. 인볼류트 곡선의 변화는 피치원 직경을 중심으로 상부 2곳과 하부 1곳에서 비교·분석하였다. Fig. 6는 전체 단조 공정 동안 실제 단조품 측정값과 유한요소해석 결과의 인볼류트 곡선의 변화를 나타내고 있다. 금형과 단조품 사이에 차이는 실제 실험 결과에서 약 12 μ m로, 유한요소해석에 의해 예측한 치수가 실 단조품보다 5 μ m정도 크게 측정되었다. 유한요소해석 결과를 보면 가압(Loading) 시 금형의 팽창과 더불어 단조품도 같은 크기로 30 μ m 팽창되며, 제하(Unloading)공정 후 10 μ m수축된 후 취출(Ejecting) 후 10 μ m 탄성회복이 나타남을 알 수 있다.

또한, 실제 공정과 똑 같은 조건을 유한요소해석에 적용시키기 위해 냉간 단조 공정 시 발생하는 열 영향을 해석 시 적용 하였으며, 해석 결과 초기 단조품의 온도 20°C에서 단조품의 최종 온도는 취출 후 130°C에 이르렀다(Fig. 5). 유한요소해석에서 단조 전 공정 동안의 마찰계수는 0.1로 하여 해석을 수행하였다.

3.2 열처리 시 치수 변화

단조품 치수는 열처리 공정 동안 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태로 인해 추가적으로 변화 된다. 열처리 전, 후 단조품과 기계가공품의 측정된 인볼류트 치형을 Fig. 7에 나타내었다. 단조품과 기계가공품의 잔류 응력 측정은 X-선 회절분석기로 Z축(Loading) 방향으로 측정되었다. 단조품과 기계가공품의 측정된 잔류 응력값들은 열처리 공정에 대한 유한요소해석 동안에 인볼류트 치형의 변형 해석에 사용되었다. Fig. 8은 3 위치에서 측정된 열처리 전, 후의 단조품과 기계가공품의 잔류응력을 보여주고 있다.

유한요소해석 시 단조 기어는 단조품에서 실제 측정된 압축 잔류 응력을 적용하였는데, 열처리에 의하여 증가되었다. 기계 가공 기어의 표면 잔류 응력은 단조 기어와 달리 인장응력(+)에서 압축응력(-)으로 300[Mpa]이상 변화 되었다. 기계 가공 기어의 인장응력은 기어 세이빙 공정 동안에 가공 공구인 호브(Hub)나 기타 가공 공구에 의하여

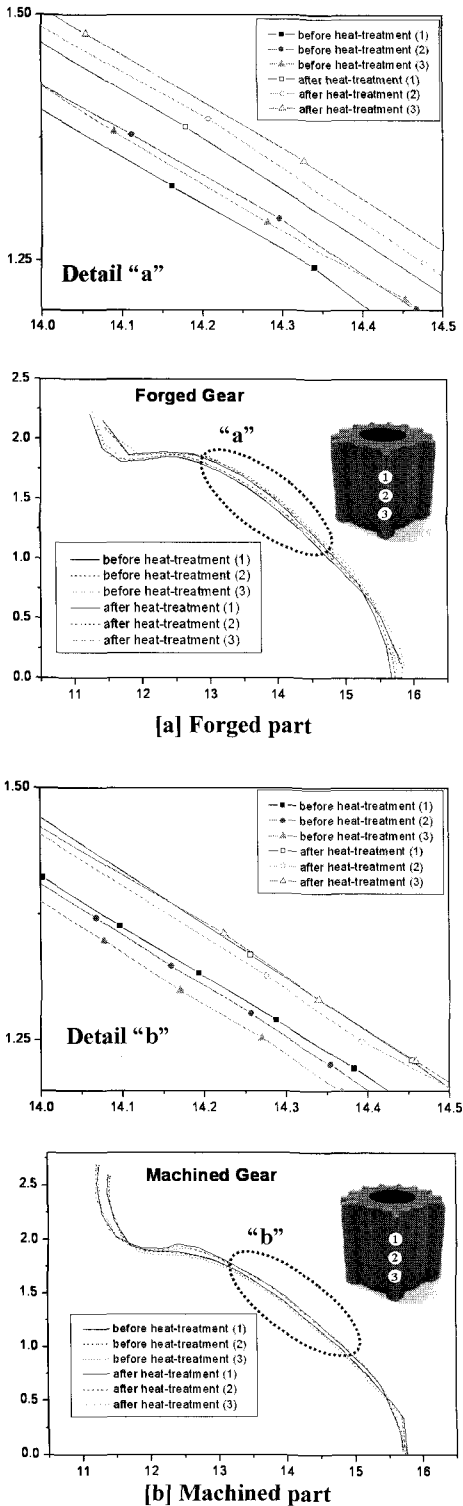


Fig. 7 Measured involute profiles of forged gear and machined gear before and after heat treatment

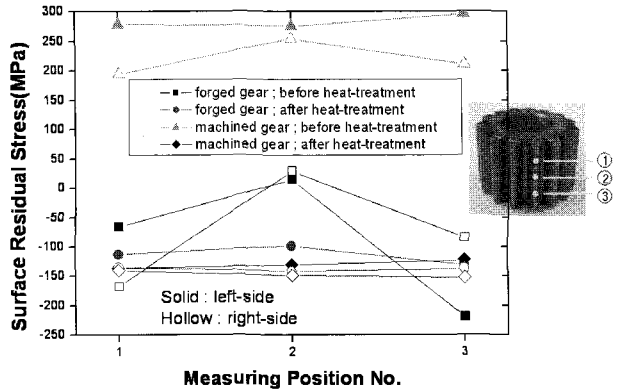


Fig. 8 Residual stress all the two gear before and after heat treatment at 3-measuring-point

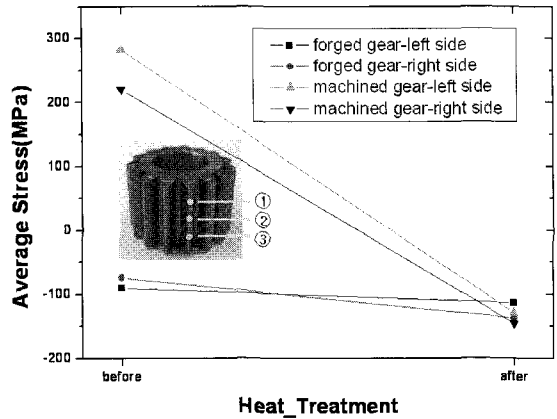


Fig. 9 Average residual stresses of the two gears before and after heat treatment

치면에 작용된 것이다. 열처리 후 단조 기어와 기계 가공 기어의 압축 잔류 응력들은 Fig. 9에서 보여 진 것처럼 100~150[Mpa]으로 동일한 수준을 나타내고 있다. 또한 유한요소해석 프로그램인 DEFORMTM-HT를 이용하여 열처리 공정 후 잔류 응력을 분석한 결과 Fig. 10과 같이 퀴칭(Quenching)시 일정 시간(25~30sec)부터는 단조 기어와 기계 가공 기어 모두 일정한 압축 잔류응력이 계산되었다. 해석에 사용된 물성치는 참고문헌 [11]에 기술된 동일한 값을 이용하였다. 기계 가공 기어의 경우에 열처리 전, 후 잔류응력의 차이는 단조 기어보다 더 크게 측정되었다. 그러므로 기계 가공 기어에서 치수의 변화는 단조 기어 보다 20 μ m 크게 나타나고 있는데 이는 열처리 공정 동안에 기계가공 기어의 경우에 300Mpa 이상의 응력

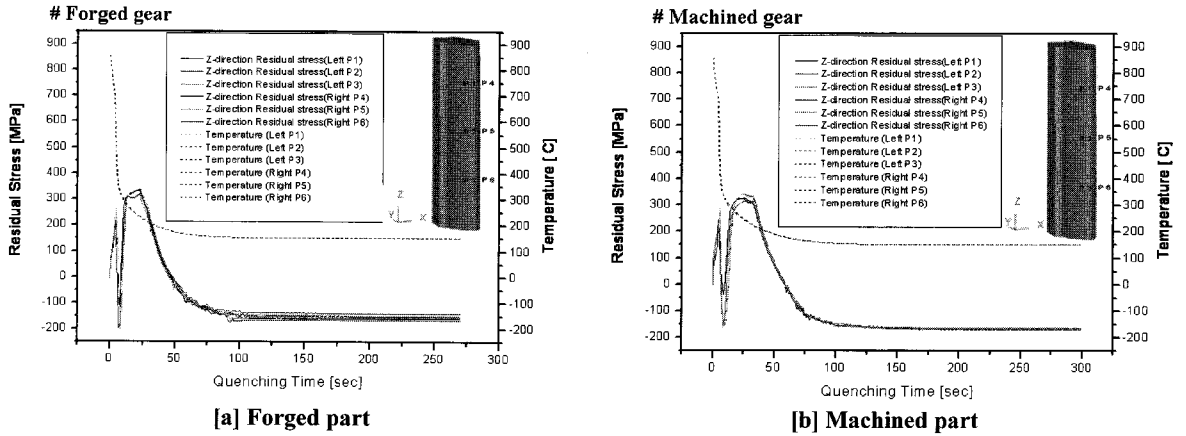


Fig. 10 Change of residual stress and during oil quenching

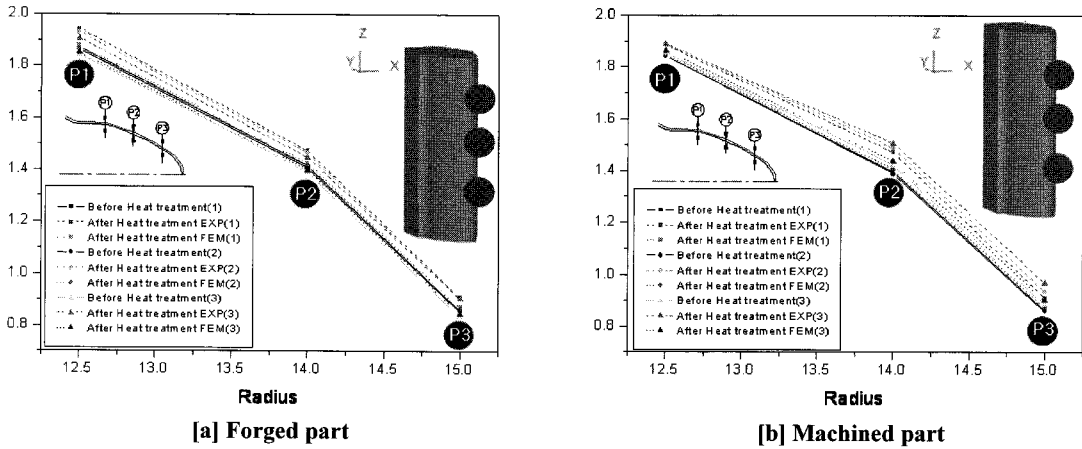


Fig. 11 Involute curve changes of two gears before and after heat treatment at 3-measuring-point

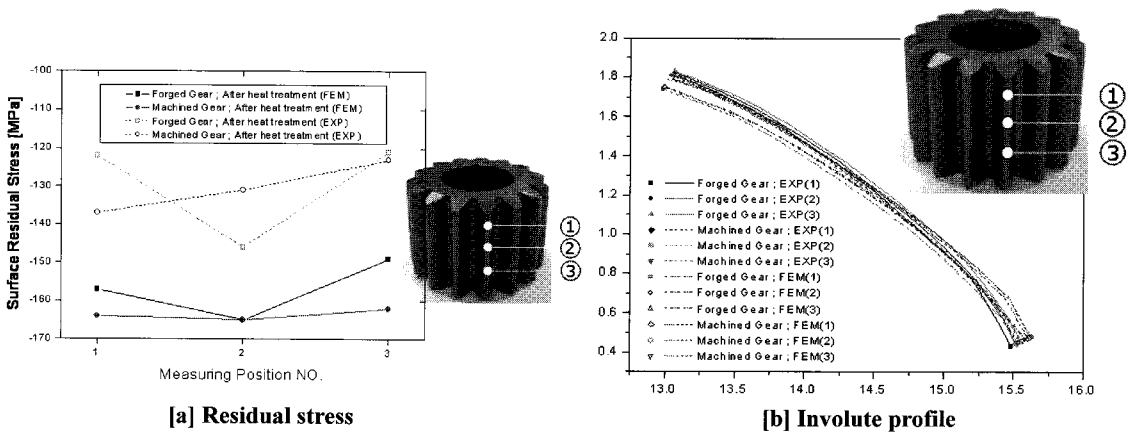


Fig. 12 Comparisons of measured and calculated about changes of involute profile during heat treatment

변화가 발생하고 있기 때문에 판단된다. 따라서 열처리 치수 변화는 단조 기어가 더 미소함을 알 수 있으며, 그 원인은 응력 변화량에 의한 것으로

판단된다. Fig. 11에서 측정치와 계산치의 차이는 약 50 μ m정도 차이가 나타나고 있다. 또한 Fig. 12에서 알 수 있듯이 열처리 공정동안의 치수 변화

는 단조품은 30~60 μm , 기계 가공품은 50~60 μm 의 열변형이 발생되었다.

4. 결론

마이크로미터(μm) 정밀도 단위의 냉간 단조 스퍼기어의 치수 제어를 위해서는, 단조 공정 (Loading-Unloading-Ejecting) 동안 단조품과 금형의 탄성 변형과 열처리 시 발생하는 열 변형에 대한 정량 분석이 필요하며 그 결과 금형과 최종 기어의 치수적인 변화는 기어 단조를 위해 실제 금형 치수에 고려되어야 한다. 이상의 치수 변화들은 실험과 유한요소해석을 통해 정량적으로 분석되어야 하기 때문에, 본 연구에서는 압출형 스퍼 기어에 대한 실험과 해석을 병행하여 탄성 변형과 열 변형에 대한 정량적 연구를 수행하였다. 또한, 단조품에 대한 분석과 함께 기계 가공품에 대한 분석도 수행함으로써 열처리 변형에 대한 FEM 해석 결과에 대한 신뢰성 향상을 도모하였다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 단조품의 금형과 단조품과 치수 차이는 12 μm 로서 치폭 기준으로 0.6%의 탄성변형이 발생되고 있다. 또한, 유한요소해석에서 계산된 단조 공정 동안의 치수변화는 각각 가압 시 30 μm 팽창, 제하 시 10 μm 수축, 취출 시 10 μm 수축이 발생되어 결국 10 μm 의 탄성 팽창이 발생하는 것으로 예측되었다.

(2) 열처리 공정 동안의 치수변화는 단조품은 30~60 μm , 기계가공품은 50~60 μm 로서 단조기어보다 기계가공기어가 열변형의 편차가 20 μm 더 크게 발생되었다.

(3) 기계가공기어의 열처리 치수 크기가 단조기어에 비해 큰 변형을 보여주고 있는 이유는 잔류응력의 변화량에서 분석할 수 있다.

열처리 전, 후의 잔류 응력 변화는 단조의 경우는 압축응력(-) \rightarrow 압축응력(-)로 기계가공기어는 인장응력(+) \rightarrow 압축응력(-)로 변화되어(300Mpa)이상 차이가 발생되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신 사업 (RTI104-01-03) 지원으로 수행된 연구 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Kondo, K. Ohga, 1995, Precision cold die forging of a ring gear by divided flow method, Int. J. Mach. Tools Manufacture, Vol. 35, No. 8, pp. 1105~1113.
- [2] Hung-Hsiou Hsu, 2002, A study on precision forging of spur gear forms and spline by the upper bound method, Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 44, No. 8, pp. 1543~1558.
- [3] M. L. Alves, J. M. C. Rodrigues, P. A. F. Martins, 2001, Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 37, No. 6-7, pp. 549~558.
- [4] N. R. Chitkara, M. A. Bhutta, 2001, shape heading of splines and solid spur gear forms: an analysis and some experiments, Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 43, No. 4, pp. 1073~1106.
- [5] Jongung Choi, Hae-Young Cho, Chang-Yong Jo, 2000, Forging of spur gears with internal serrations and design of the dies, J. of Materials Processing Technology, Vol. 104, No. 1-2, pp. 1~7.
- [6] J. C. Choi, Y. Choi, 1999, Precision forging of spur gears with inside relief, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, No. 10, pp. 1575~1588.
- [7] Y. S. Lee, J. H. Lee, Y. N. Kwon, T. Ishikawa, 2004, Experimental and FE analysis to predict the dimensional changes of workpiece and tool in cold forging, Proc. Of Int. Conf. NUMIFORM2004 pp. 504~509.
- [8] Y. S. Lee, J. H. Lee, Y. N. Kwon, T. Ishikawa, 2004, FE-modeling approaches to accurate dimension prediction for the cold forged part, J. of Engineering Manufacture B, pp. 1709~1722.
- [9] Y. S. Lee, J. H. Lee, Y. N. Kwon, J. R. Cho, T. Ishikawa, 2005, Analysis of the dimensional changes from the die machining to final heat-treatment for cold forging, Proceeding of ICTP2005.
- [10] Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, T. Ishikawa, 2006, Experimental and finite element analysis to predict the dimensional changes of a cold-forged spur gear, Proc. IMechE Vol. 220, pp. 1051~1057.
- [11] J. R. Cho, W. J. Kang, M. G. Kim, J. H. Lee, Y. S. Lee, W. B. Bae, 2004, Distortions induced by heat treatment of automotive bevel gears, J. of Materials Processing Technology Vol. 153-154, pp. 476~481.