

헬리컬기어 제조공정에 따른 특성 비교 - 단조품과 기계가공품 -

정현철¹ · 강범수² · 이일환³ · 최석탁³ · 신상종⁴ · 강성훈¹ · 이영선[#]

Properties of a Helical Gear Due to the Manufacturing Process - Forged versus Machined Product

H. C. Jung, B. S. Kang, I. H. Lee, S. T. Choi, S. J. Sin, S. H. Kang, Y. S. Lee

(Received September 19, 2011 / Revised December 9, 2011 / Accepted December 12, 2011)

Abstract

Although high productivity is possible, cold forged helical gears have not been widely used due to difficulty in achieving mechanical properties as well as dimensional accuracy of the product. Confidence in the gear characteristics also is very important in heavy-duty gear applications. Therefore, the properties of forged gears must be compared to the properties of conventional machined gears. The properties might be different due to the different fabrication processes. In this study, machined and forged products both before and after heat-treated have been compared by measuring the residual stress and involute curve of the tooth. Characteristics of hardness and microstructure were also compared. Additionally, tooth fracture strength was compared for the heat-treated products. Moreover, the tooth strength and the fracture pattern were compared between the machined and forged gears. The forged gear showed decreased changes in residual stress and decreased changes in dimensions when compared to the machined gear before and after heat treatment. The forged gear was over 10% better than the machined gear in tooth strength.

Key Words : Helical Gear, Forged Gear, Machined Gear, Residual Stress, Tooth Strength, Profile Curve

1. 서론

정밀단조기어는 절삭가공 제품보다 낮은 재료 소비율과 높은 생산속도로 인하여 대량 생산이 유리할 뿐만 아니라 제품의 기계적 특성이 우수하여 각종 구조물 및 수송기(항공기, 자동차, 선박) 등의 핵심 부품에 적용되고 있다. 특히 자동차의 변속기 및 차동장치용 부품들은 상당수가 기어들로 구성되어 있는데 자동차 산업이 발전함

에 따라 기어의 수요가 증가되는 추세이며, 이를 충족시키기 위하여 스플라인(spline), 직선형 베벨기어(bevel gear), 스퍼기어(spur gear) 등이 정밀단조 기술을 이용하여 제조되고 있다. 그러나, 헬리컬기어(helical gear)는 다양한 크기와 형태로 변속기에 적용되고 있음에도 불구하고 헬릭스 각도(helix angle) 및 형상의 제어와 치수 정밀도를 충족시키기 어려워 국내에서는 대부분이 절삭가공으로 생산하고 있다. 그러나 산업 발전에 따른 수요의 증

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. 부산대학교 항공우주공학과

3. (주) T.A.K

4. 현대자동차 변속기 생기팀

교신저자: 한국기계연구원 재료연구소 변형제어연구그룹,

E-mail: lys1668@kims.re.kr

가로 인하여 선진국의 경우 오래 전부터 냉간 단조 공정을 이용한 헬리컬 기어를 대량생산 중에 있다[1~5]. 미국 Ford사의 경우 1970년대에 변속기 피니언 기어를 시작으로 엔진과 동력전달 계통의 기어류를 정밀 단조 공정으로 생산 중에 있다. 일본은 변속기용 기어와 차동기어를 중심으로 정밀 단조 기어를 적극 활용하고 있다. 국내에서도 연구가 진행되었으나 변속기용과 같은 고품질 기어에는 활발히 생산에 적용되지는 않고 있다.

일반적으로 냉간 단조 공정은 치형의 절삭 가공공정을 대폭적으로 생략할 수 있어 경제적 및 생산적인 측면에서 저원가, 고효율의 장점을 가지며, 절삭가공에 비해 기계적 특성이 우수하다는 장점을 갖고 있다. 반면에 소재의 탄성 및 열처리 변형으로 인한 치수 변화가 크기 때문에 치수 정밀도를 만족시키기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. Lee 등[6]은 단조형 스퍼기어용 소재의 정도가 치수정밀도에 미치는 영향을 연구하였으며, Choi 등[7]은 수치 해석을 통하여 금형과 단조품의 치형 형상 변화를 분석하였다. 또한 Kim 등[8]은 유한요소법을 이용하여 열처리 전·후 기어의 치형 변형을 예측하는 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 냉간단조 헬리컬 피니언 기어(helical pinion gear)의 신뢰도 향상을 위해 절삭기어와의 특성을 비교하였다. 첫째, 단조 기어와 기계가공 기어에 대하여 열처리 전·후의 치형 곡선(involute profile) 변화량을 3차원 측정기를 사용하여 측정데이터와 기준 설계치수를 정량적으로 비교하였다. 둘째, 잔류응력은 치수변화 및 강도 특성에 영향을 미치므로 비접촉식 측정법(X-Ray diffraction scan)을 이용하여 열처리 전·후의 표면 잔류응력(residual stress) 변화를 비교하여 잔류응력의 변화량에 따른 치수변형의 영향을 분석하고자 하였다. 끝으로 단조품과 기계가공품의 경도 및 조직을 분석하고 치형 강도 테스트를 통하여 제조 공정에 따른 기어의 강도 특성을 비교·분석하였다. 이는 기계가공품과 단조품의 기계적 특성을 평가하여 파단강도와 저항성을 파악하고자 하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 기어의 제원 및 열처리 공정

본 연구에서 시험에 사용된 기어는 전술한 바



(a) Machined product (b) Forged product

Fig. 1 The configuration of forged pinion gear and machined pinion gear

Table 1 Specifications of helical pinion gear

Parameters	Value
Module	1.33
Helix angle[°]	18.4225
Pressure angle [°]	20
No. of tooth [ea]	31
Pitch circle diameter[mm]	43.45

Table 2 Chemical compositions of SCM920HVS1

Component	C	Si	Mn	P	S	Mo
SCM920HVS1	≤ 0.2	≤ 0.25	≤ 0.7	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.25

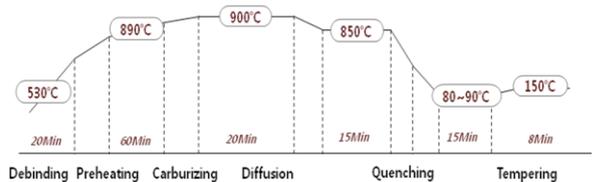
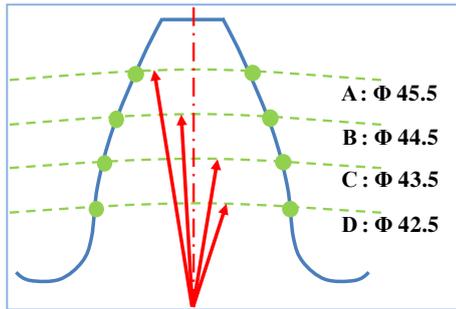


Fig. 2 Heat treatment cycle of helical pinion gear

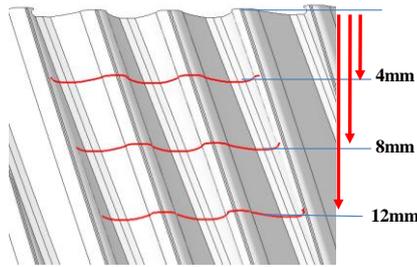
와 같이 승용차용 변속기에 사용되고 있는 헬리컬 피니언이다. Fig. 1에 나타낸 절삭가공에 의해 제조된 기계가공품과 냉간단조 공정을 이용하여 제조된 단조품의 특성을 비교·분석하고자 하였으며 헬리컬 피니언의 제원은 Table 1에 나타내었다. 기어의 소재는 SCM920HVS1이고 화학적 조성은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 열처리 공정은 Fig. 2와 같이 침탄(carburizing), 확산(diffusion), 담금질(quenching), 뜨임(tempering)으로 구성되어 있다.

2.2 치형 곡선 측정

기어의 인볼류트 곡선(involute profile)은 열처리



(a) Measurement position for involute profile



(b) Measurement position for lead deformation

Fig. 3 Measurement point to investigate the dimensional changes

공정을 거치면서 팽창 · 변형하게 되므로 치수 정밀도 제어가 어렵다. 그러므로 열처리 전, 후의 각 공정별 치수변화에 대한 정량적 데이터를 확보하는 것은 품질의 신뢰성을 확보하기 위한 중요한 과정이다. 이전의 연구를 살펴보면 Bae 등[9]은 F.E.M을 이용하여 헬리컬 기어의 열처리로 인한 체적 팽창 중에 상대적으로 기어 부분의 반경 방향 증가가 더 큰 것을 확인하였다. 또한 탄성변형으로 인한 리드각의 변화 등을 예측하여 향후 열처리 변형을 감안한 치형 설계를 통하여 품질의 신뢰성을 높이하고자 하였다.

본 시험에서는 접촉식 3차원 측정기를 이용하여 치형 곡선을 측정한 데이터를 3D CAD프로그램인 NX 6.0기반의 헬리컬기어 설계프로그램을 이용하여 열처리 후 실제 치수 변화량에 대한 정량적 데이터를 확보하고자 하였다. 측정 위치는 Fig. 3(a) 나타낸 바와 같이 치형의 인볼류트 곡선을 반경 방향으로 측정하였다. 또한 헬리컬 기어의 경우 헬릭스 각도로 인하여 리드각도의 정밀도 확보가 더욱 어렵기 때문에 Fig. 3 (b)와 같이 높이 방향에 대하여 치형의 변형 데이터를 생성함으로써 리드정밀도에 대한 보정 데이터를 확보하고자 하였다.

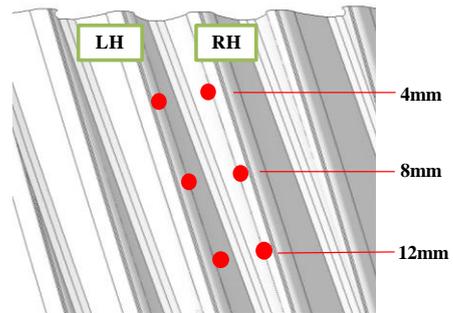


Fig. 4 Measurement point for residual stress

2.3 잔류응력 측정

잔류응력은 주조, 단조, 기계가공, 용접 등 거의 모든 공정에서 발생이 되며 제품의 신뢰성에 중요한 영향을 미치게 된다. 일반적으로 표면잔류응력은 압축응력이 강도 및 피로수명의 특성 향상에 유리하기 때문에 열처리 또는 쇼트피닝 공정을 이용하여 표면에 압축 잔류응력을 부가한다. 따라서 최종 제품의 잔류응력이 인장응력과 압축응력인지, 기계가공품과 단조품은 어떠한 차이가 있는지에 대한 정량적 데이터 제시가 신뢰도 측면에서 중요한 항목에 해당한다.

잔류응력을 측정하는 방법 중 비파괴적 시험법은 파괴적 시험법과 비교하여 시편을 파괴하지 않아 실제 산업현장에서 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 활용된 X선 회절법(X-ray diffraction scan)은 비파괴 시험법으로써 국부적으로 잔류응력이 변화하는 장소의 측정도 가능하며 형상이 복잡한 부품의 응력 측정에도 적용이 가능하다. 측정 위치는 Fig. 4의 그림에서 볼 수 있듯이 치형의 우측(RH)과, 좌측(LH)에 대하여 높이 방향으로 3부분을 나누어 측정하였다.

2.4 치형 경도, 조직 및 강도 측정

침탄 열처리로 인하여 치형의 표면과 내부에는 경도의 차이가 생기고, 조직 또한 변화가 생긴다. 이에 공정별(단조품, 기계가공품) 특성을 분석하기 위하여 Fig. 5와 같이 표면(Ps)에서부터 내부(Pi)까지 0.1mm의 간격으로 경도를 측정하였으며 표면과 내부의 조직을 비교 · 분석하였다.

기어의 강도시험은 기어의 재질, 치형, 열처리 등에 의해 차이가 발생하기 때문에 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위하여 강도시험에 적용되는 요인들을 명확히 하고, 3회 이상 측정 후 통계적으로

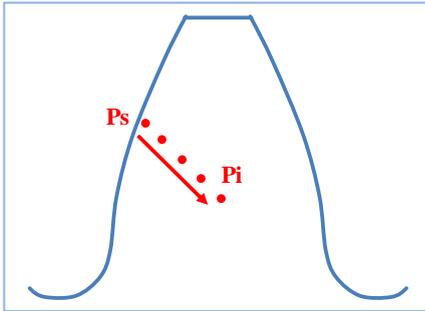


Fig. 5 Measurement position of Vickers hardness

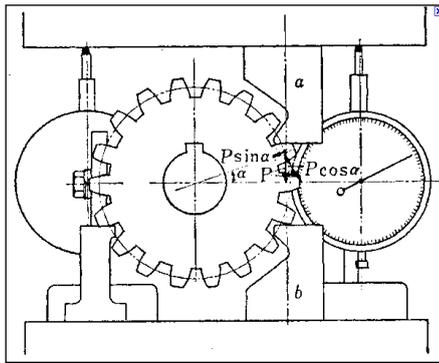


Fig. 6 Specification example of gear bending strength test

처리하였다. 치형 강도 시험에는 굽힘강도 시험, 치면강도 시험, 치면의 마모강도 시험 등이 있으며 헬리컬 기어 강도 설계와 관련하여 일반적으로 많이 쓰이는 규격에는 AGMA 2001, DIN 3990, BS 436, JGMA 401 등이 있다.

치형 굽힘강도 시험은 기어가 구동시 치형에 가해지는 하중과 변위를 실제상황과 동일하게 모사할 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 Fig. 6 과 같은 JGMA 4102-01 규격의 지그를 제작하여 기계가공품과 단조품의 강도 시험을 진행함으로써 각 소재별 하중 - 변형량의 관계를 파악하고자 하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 치형 곡선 측정 결과

치형의 반경방향 인볼류트 곡선의 변형을 3차원 측정기를 이용하여 기계가공품과 단조품의 열처리 전, 후의 치형 곡선을 측정하여 Fig. 7 에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 치형의 편측

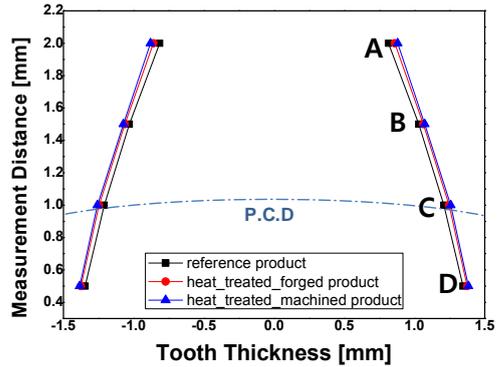


Fig. 7 Graph of involute profile by heat treatment between forged and machined product.

변화량은 P.C.D(pitch circle diameter)를 기준으로 기계가공품이 평균적으로 약 $50\mu\text{m}$ 팽창하였으며, 단조품은 약 $40\mu\text{m}$ 팽창한 것으로 측정되었다. 상대적으로 이끝면에 해당하는 A부에서 큰 변형을 보였으며, 치형의 이뿌리면 D부에서 상대적으로 가장 작은 변형량이 관찰되었다.

기어 피치원은 기어의 구동시에 가장 중요한 위치로 높이 방향으로 변형량을 측정함으로써 열처리로 인한 리드각의 변형을 측정하였다.

기계가공품은 열처리 후 약 0.17° (CW) 변형하였으며, 단조품의 경우 약 0.12° (CW) 변형하는 것을 확인하여 열처리로 인한 리드각 또한 기계가공품의 변형이 상대적으로 크게 나타났다. 치형 곡선과 리드각의 변형이 단조품보다 기계가공품에서 더 크게 나타난 것은 열처리 공정에 따른 잔류응력의 변화량 차이에 의한 것으로 분석할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9에서 알 수 있듯이 기계가공품의 열처리 전·후 잔류응력 변화량이 단조품보다 크기 때문에 치수변화량 또한 크게 나타나고 있는 것이다.

3.2 잔류응력 측정 결과

Kwon 등[10]은 SCM420H 소재를 이용하여 스퍼기어의 제조공정에 따른 잔류응력의 변화에 관한 연구를 수행한 바 있으며 그 결과는 Fig. 8과 같다. 스퍼기어의 열처리 전 기계가공품은 $200 \sim 300\text{MPa}$ 의 인장응력(+)이, 단조품은 -100MPa 의 압축응력(-)이 잔류한다. 열처리 후에는 기계가공품과 단조품 모두 약 $-100 \sim -150\text{MPa}$ 의 압축응력을 나타내는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에 본 연구 대상인 헬리컬 피니언의 제조공정별 잔류응력 측정 결과를 나

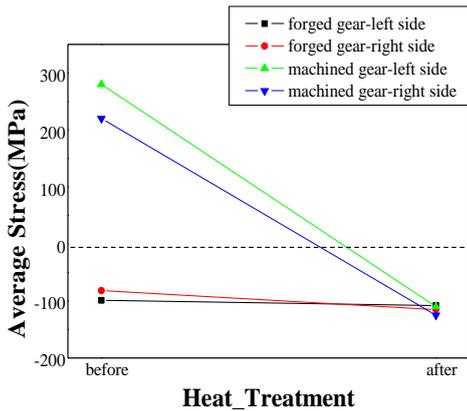


Fig. 8 Residual stress change of spur gear by heat-treatment [10]

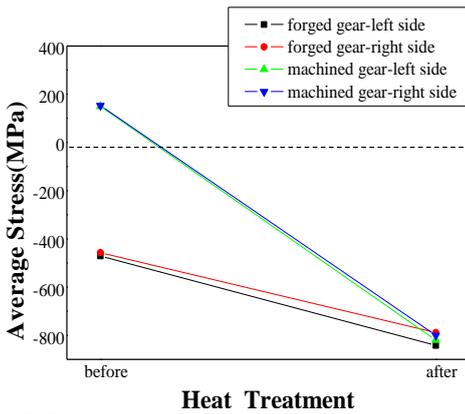


Fig. 9 Residual stress change of helical pinion gear by heat treatment

타내었는데 기계가공품은 열처리 전에 150MPa의 인장응력(+)이, 단조품은 -500 ~ -550MPa의 압축응력(-)이 잔류해 있지만 열처리 공정을 거치고 나면 약 -800MPa의 압축응력으로 변화된다. 이러한 결과는 선행 연구 결과[10]와 비교하였을 때, 소재와 기어 제원의 차이 때문에 응력의 변화 정도에는 차이가 있지만 열처리에 의해서 압축응력으로 변화하는 양상은 동일함을 확인할 수 있다.

3.3 치형 경도, 조직 및 강도 측정 결과

Fig. 10은 본 연구에 사용된 SCM920HVS1 원소재의 미세조직으로 주로 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)조직을 보여 주고 있다. Fig. 11은 열처리 후 단조품과 기계가공품의 치형 표면 미세조직(microstructure)을 보여 주고 있으며 Fig. 12는 기어 내부의 미세조직을 보여주고 있다. 단조품과

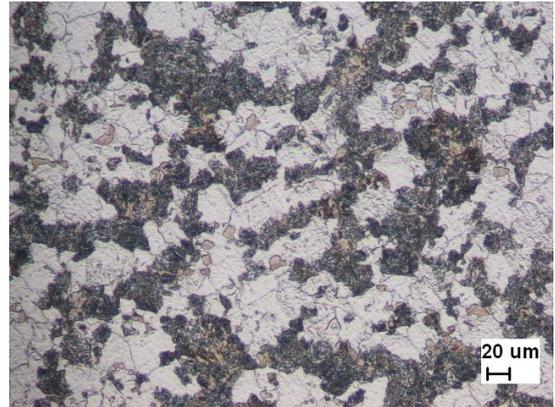
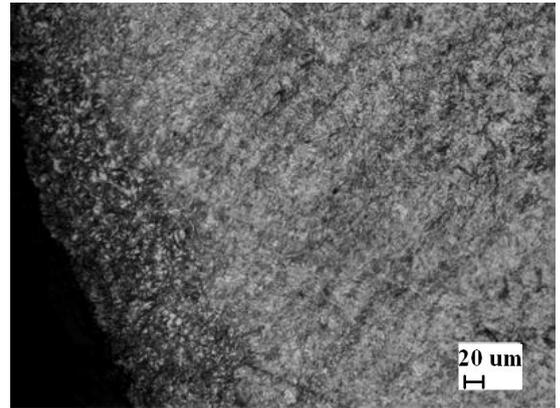
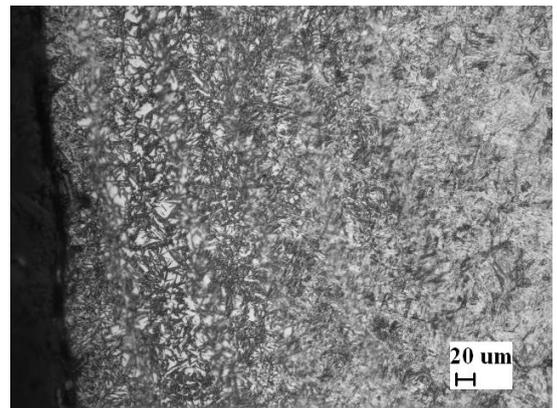


Fig.10 Microstructure of SCM920HVS1(×500): as received

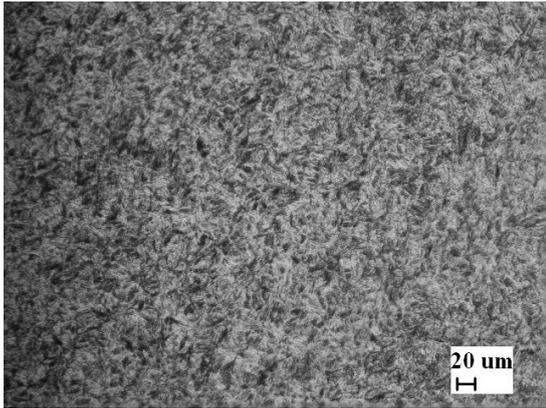


(a) Forged product (×500)

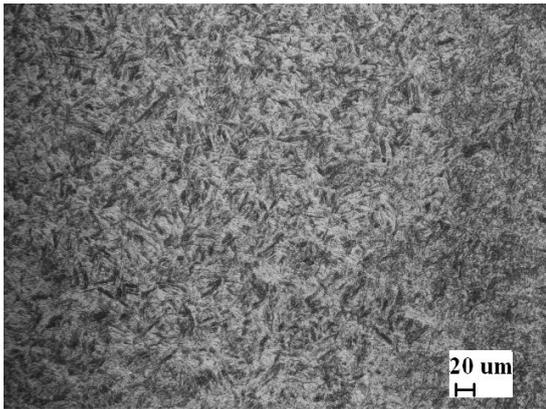


(b) Machined product (×500)

Fig.11 Microstructure at tooth surface after heat-treatment



(a) Forged product (×500)



(b) Machined product (×500)

Fig.12 Microstructure inside of tooth after heat-treatment

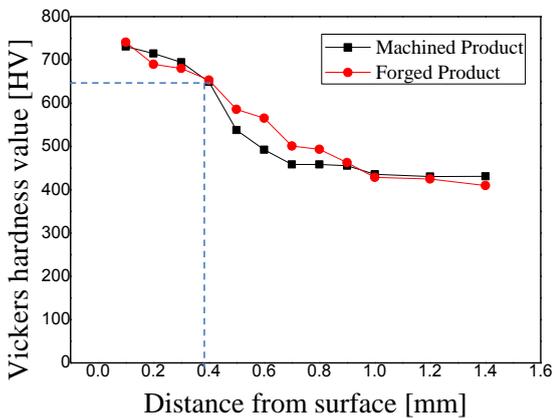
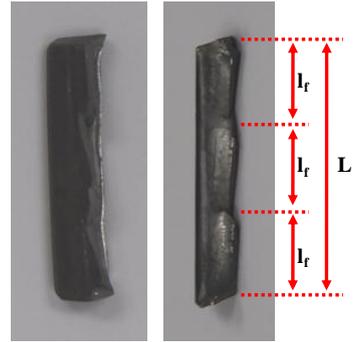
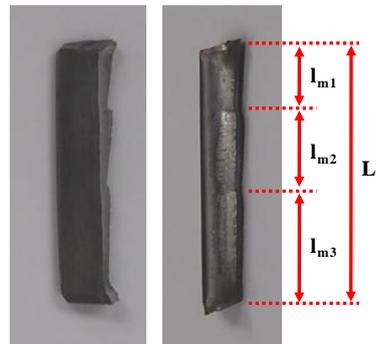


Fig.13 Configurations of fracture section by tooth strength test



(a) Forged product



(b) Machined product

Fig.14 Configurations of fracture section by tooth strength test

기계가공품 모두 열처리 이후에 전반적으로 템퍼드 마르텐사이트(tempered martensite) 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 단조품과 기계가공품의 경도 측정 결과로써 두 제품 모두 동일한 경도를 가지며 요구 규격에 잘 일치하는 경도 분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 열처리로 인한 침탄층의 두께도 0.4mm 이내로 단조품과 기계가공품 모두 동일한 수준을 나타내고 있다.

치형 강도 시험 후 파단된 치형의 단면 형상을 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14(a)의 단조품은 전체 길이(L)에 대하여 일정한 간격(l_r)의 파단층을 볼 수 있지만, Fig. 14(b)의 기계가공품은 상단부인 l_{m1} 부터 l_{m3} 까지 불균일한 파단층을 보이며 상세 길이는 Table 3에 나타내었다. 이러한 결과는 치형이 파단될 때 균일한 응력 분포로 인하여 모든 면이 동시에 파단된 것이 아니라 단계적으로 파단됨을 알 수 있다.

Fig. 15는 치형굽힘강도 시험 결과로써 단조품과 기계가공품의 파단 하중 경향은 동일함을 알 수

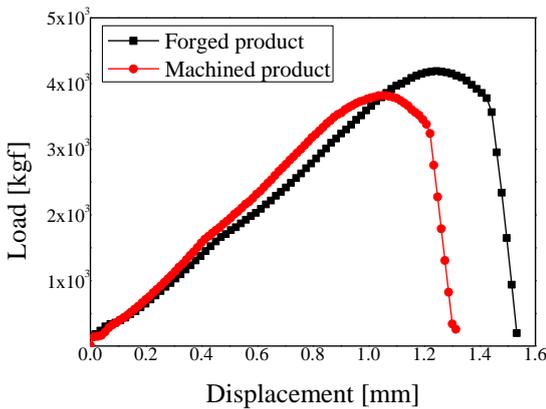


Fig.15 Result graph of tooth strength test

Table 3 Specific length of fracture section

Section	Length[mm]
l_f	5.46
l_{m1}	4.3
l_{m2}	5.3
l_{m3}	6.8
L	16.40

있으나 치형이 파단되는 하중은 단조품이 약 4.2×10^3 kgf로 최대 하중이 약 3.8×10^3 kgf인 기계가공품 보다 10%이상 높은 것을 알 수 있다. 일반적으로 단조품은 공정 특성상 단류선(metal flow)의 효과로 인해 기계가공품 보다 우수한 강도 특성을 나타낸다. 본 연구 결과에서도 기계가공품이 약 1.2mm에서 파손된 반면 단조품은 1.5mm이상에서 파괴되어 최대하중과 파단시점 모두 단조품이 10% 이상 우수한 특성을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 헬리컬 피니언 냉간단조기어의 특성을 분석함으로써 기존 절삭기어 대비 특성에 대한 신뢰도를 높이고자 하였다. 먼저 열처리로 인한 치형곡선의 치수변화량과 리드각의 변형량을 측정하고 잔류응력의 변화량을 측정하여 정량적인 데이터를 제시하였다. 또한 치형의 경도 및 조직을 분석하였으며, 치형굽힘강도 시험을 통해 기계가공품과 단조품의 기계적 특성을 비교하였으며 항목별로 정리하면 아래와 같다.

(1) 단조품과 기계가공품의 열처리로 인한 치형의 치수 변화는 피치원 선상을 기준으로 각각

40 μ m, 50 μ m 이며, 리드 정밀도는 단조품의 경우 약 0.12°(CW), 기계가공품의 경우 약 0.17°(CW) 열처리 변형이 발생되어 기계가공품의 치수변화량이 상대적으로 크게 나타났다. 그 원인으로서는 잔류응력 변화량 차이 때문으로 판단된다.

(2) 기계가공품은 열처리 전에 150MPa 정도의 인장응력(+)이, 단조품은 -500~550MPa 정도의 압축응력(-)이 잔류해 있지만 열처리 후에는 두 공정 모두 -800MPa 정도의 압축잔류응력이 측정되었다. 인장잔류응력의 절삭기어와 압축잔류응력의 단조기어 모두 열처리 효과에 의해 동일한 수준의 압축응력이 잔류함을 알 수 있다. 결국, 절삭기어의 경우가 단조기어 보다 열처리 전후 응력 변화가 600MPa이상 크게 발생하고 있다.

(3) 치형의 경도와 조직은 단조품과 기계가공품 모두 큰 차이를 보이지 않았지만 단류선의 영향으로 단조품의 치형 파단 강도가 기계가공품 보다 10% 이상 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 지역전략기획사업으로 추진중인 “정밀단조 헬리컬기어 치수정밀도 향상기술” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. K. Samanta, 1976, Helical gear: a noble method of manufacturing, Proc. 4th N. Am. Metalworking Res. Conf. Battle's Columbus Labs, Soc. Mech. Eng., Columbus, OH, USA, pp. 199~205.
- [2] K. Ohga, K. Kondo, T. Jitsunari, 1985, Research on precision die forging utilizing divided flow, Bull. J. Soc. Mech. Eng., Vol. 28, No.244, pp. 2451~2459.
- [3] F. Dohmann, O. Traudt, 1987, Metal flow and tool stress in cold forging of gear component, Adv. Tech. Plast., Vol. 2, pp. 1081~1088.
- [4] Y. B. Park, D. Y. Yang, 1999, Study on precision cold forging of helical gear, Trans. Mater. Process., Vol. 8, No. 4, pp. 385~392.
- [5] S. Chung, J. H. Park, C. Kim, C. H. Kim, J. C. Choi, 2002, 7th Forging Symp.(Kyoung Hoan Na), Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Changwon, Kor., pp. 85~91.

- [6] J. H. Lee, Y. S. Lee, J. J. Park, 1996, Dimensional accuracies of cold-forged spur gears, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 5, No. 2, pp. 115~121.
- [7] Y. Choi, J. C. Choi, 1998, Forging of helical gears : upper bound analysis and experiments, *Met. Mater. Int.*, Vol. 4, No. 4, pp. 747~754.
- [8] H. J. Kim, S. C. Choi, D. J. Lee, H. Y. Kim, 2006, Analysis of the carburizing heat treatment process for SNCM alloy steel using the finite element method, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 30, No. 10, pp 1284~1292.
- [9] K. Y. Bae, Y. S. Yang, B. O. Park, 2010, Analysis of deformation of automotive helical gear in heat treatment of carburized quenching, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 27, No. 11, pp 84~91.
- [10] Y. C. Kwon, J. H. Lee, C. M. Lee, Y. S. Lee, 2007, Dimensional changes and residual stress of spur gear according to the manufacturing processes – comparison of cold forging part with machining part , *Trans. Mater. Process.*, Vol. 16, No. 8, pp. 575~581.
- [11] D. Y. Ju, C. Liu, T. Inoue, 2003, Numerical modeling and simulation of carburized and nitride quenching process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 143, No. 12, pp. 880~885.
- [12] N. R. Chitakara, M. A. Bhutta, 2001, Shape heading of planes and solid spur gear forms : an analysis and some experiments, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1073~1106.