

# 차량용 헬리컬기어의 침탄 열처리 변형해석

## Analysis of Deformation of Automotive Helical Gear in Heat Treatment of Carburized Quenching

배강열<sup>1,✉</sup>, 양영수<sup>2</sup>, 박병옥<sup>3</sup>  
Kang Yul Bae<sup>1,✉</sup>, Young Soo Yang<sup>2</sup> and Byung Ok Park<sup>3</sup>

1 진주산업대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Jinju National Univ.)

2 전남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chonnam National Univ.)

3 ㈜세양 (Se Yang Co., Ltd.)

✉ Corresponding author: kybae@jinju.ac.kr, Tel: 055-751-3384

Manuscript received: 2010.7.27 / Revised: 2010.8.23 / Accepted: 2010.9.10

*Heat treatment with carburized quenching process is widely used for automotive helical gear to improve its surface properties of hardness and strength. However, the gear can be deformed with the process over the allowable tolerance, which possibly makes noise, vibration and heat problems in operation. In this study, deformation of helical gear during heat treatment of carburized quenching was analyzed with a numerical method, incorporating coupled calculations of thermal conduction, carbon diffusion, phase transformation and thermal stresses. With the analysis, the effect of coolant temperature in quenching on the deformation was investigated. The result of the analysis revealed that the higher the coolant temperature became, the more change of helix angle and the more compressive stresses in the surface generated, because of delayed generation of martensite in the part.*

Key Words: Helical Gear (헬리컬기어), Heat Treatment (열처리), Deformation (변형), Coolant Temperature (냉각유 온도), Numerical Analysis (수치해석)

### 1. 서론

기어(gear)는 자동차 등 기계구동 운동전달 기구에서 필수불가결한 요소로, 각속도 비를 일정하게 유지하면서 축 사이에 동력을 전달한다.<sup>1</sup> 이러한 운동 특성상, 기어는 주기적으로 하중을 받고 높은 응력 상태가 되므로, 내마모성과 내피로성이 크게 요구된다. 따라서 기어 제작에서는, 호빙공정으로 기계 가공한 후, 침탄 열처리 등을 통하여 기계적 성질을 향상하는 방법을 적용하고 있다.<sup>2</sup> 침탄 열처리는 여러 단계의 가열과 냉각, 경화 요소의 침투와 확산 등의 공정으로 구성되고, 소재

는 넓은 온도범위에서 복잡한 열적 부하를 받게 된다.<sup>3</sup> 이와 같은 열처리 공정의 특성으로 다소의 치형변화를 동반하여, 호빙가공으로 확보된 기어의 치수정도를 유지하기 어렵게 된다. 동력전달용으로 활용되는 기어에서의 변형은 제품의 소음과 진동 등을 유발하고, 결국 내구성의 저하를 가져와 제품의 품질을 열화 시키게 되는 원인이 된다. 치수정도가 확보될 수 있는 높은 품질의 기어를 생산하기 위해서는, 열처리 후 추가적인 마무리가공이 필수적이다.<sup>4</sup> 마무리 가공공정의 효과적 선정을 위해서는 제조 전에 품질을 예측하거나 평가하는 것이 필요하다. 열처리 과정에서의 치형 변

화를 예측하여, 열처리 후에 치형의 변화가 없도록 변형감안 설계를 할 수 있고, 최소의 변형을 얻을 수 있는 열처리 조건을 도출할 수 있다. 해석 기법의 발전과 컴퓨터의 계산능력으로 열처리 과정에서의 열적이력, 재료의 상변태, 변형 등의 제반 특성 등을 예측하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다.<sup>5-9</sup> 동력전달용으로 헬리컬기어의 활용이 광범위하게 이뤄지고 있으나, 이의 열처리에서 변형을 해석한 연구사례는 드물다. 헬리컬기어의 변형감안 설계와 제조공정 축소를 위해서는 기어형상과 열처리 조건을 고려한 변형 해석이 필요하다.

본 연구에서는 자동차용 헬리컬기어축에 고강도의 특성을 갖는 SNC815H 소재를 적용하고자 하는 설계에 앞서,<sup>10</sup> 이에 대한 침탄 열처리과정에서 발생하는 열처리 변형을 수치해석방법으로 예측하고자 하였다. 특히 담금질에서의 냉각유의 온도가 해석의 결과에 미치는 영향을 해석하여, 기어 열처리 공정설계에 이용하고자 하였다. 축방향 회전대칭성이 없는 헬리컬기어 형태의 특성상 이 전체의 3 차원 해석이 불가피하다. 침탄과 확산, 그리고 담금질 등의 과정으로 구성된 침탄 열처리에서, 헬리컬기어축의 열처리는 고탄소 분위기에서 탄소확산을 동반하여 수행되므로, 열전도해석과 더불어 확산해석이 수행되어야 하고, 이와 병행하여 소재 내에서의 금속조직의 변화를 해석하여야 하며, 이를 기반으로 열탄소성과 변형의 해석이 가능하다. 특히 온도, 치형과 나선각(helix angle), 탄소확산, 잔류응력, 상변태 등을 해석하고, 기어 변형과의 관계를 규명하고자 하였다. 수치해석을 위해서는 열처리 모사연구에 활용되어 실험적 결과와 잘 일치한 결과를 보인 상용소프트웨어 DEFORM 을 사용하였다.<sup>2,3,7</sup>

## 2. 열처리 공정의 해석

헬리컬기어축을 3 차원적인 형상으로 나타내면 Fig. 1 과 같이 나타낼 수 있고, 선삭공정으로 축가공을 수행한 다음, 호빙머신으로 기어를 가공하게 된다. 해석에서 사용한 기어축의 기어부 제원은 Table 1 과 같다. 기어의 허용오차는 치형오차가 좌우 각각 0.012mm 이고, 리드가 좌우 각각 0.015mm 이다. 기어 소재는 SNC815H 이고, 재료의 주요 화학적 조성은 Table 2 에 나타낸 바와 같다. 고부하에서 강도가 요구될 때 적용 가능한 SNC815H 소재는 열처리에 의한 표면경도와 압축

잔류응력의 증가가 피로강도의 향상에 효과가 있다고 보고된 바 있다.<sup>10</sup>

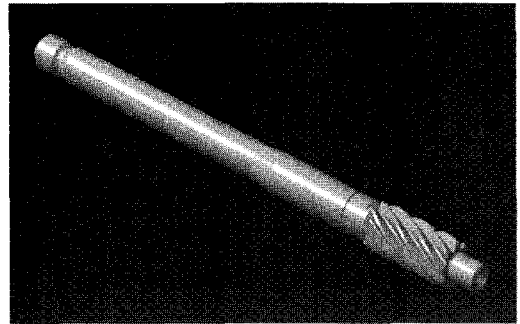


Fig. 1 Helical gear shaft

Table 1 Specification of helical gear

Length, mm	48
Diameter, mm	20
Radius of base circle, mm	15.474
No. of teeth, mm	8
Module, mm	1.94
Helix angle, deg.	20.5
Pressure angle, deg.	20

Table 2 Chemical composition of SNC815H

Constituent	C	Cr	Mn	Ni	Si
Composition (wt %)	0.12~0.18	0.70~1.0	0.35~0.65	3.0~3.5	0.15~0.35

기어축의 열처리 공정은 Fig. 2 와 같이 시간에 따른 온도변화로써 나타낼 수 있다. 초기 가열 후에 900°C, 1% 탄소 분위기에서 9000 초 동안 유지하여 침탄을 실시하고, 다음에는 830°C 까지 온도를 낮춘 상태로 0.8% 탄소 분위기에서 1200 초 동안 탄소의 확산이 진행되도록 한다. 담금질은 100°C 냉각유에서 2700 초 동안 수행하고, 공기 중에서 상온까지 냉각한다. 뜨임은 190°C 에서 7200 초 동안 실시하게 된다. 냉각유를 사용하는 담금질의 경우, 냉각유의 온도를 60~150°C 범위에서 달리 사용하고 있다.<sup>3,5,8,9</sup> 본 해석에서는 830°C 에서 냉각유에 담금질하는 공정에서, 냉각유의 온도를 50°C, 100°C, 150°C 으로 각각 달리하여, 냉각 온도에 따른 기어의 형상 변화와 이에 관련된 기어의 특성변화를 해석하고자 하였다.

열처리 변형해석에 병행하여서는 온도, 확산,

조직변화, 탄소성 등의 해석이 필요하고, 이를 위해서는 크게 네 가지의 해석모듈이 이용된다. 이에는 온도해석 모듈, 탄소확산해석 모듈, 상변태해석 모듈, 그리고 탄소성해석 모듈이 있고, 특히 탄소확산해석 모듈은 시간에 따른 탄화처리 온도, 시간에 따른 침탄 포텐셜 그리고 확산계수 등을 입력받아 상변태 모듈과 탄소성해석 모듈에 위치별 탄소량을 출력하게 된다. 상변태해석 모듈은 온도해석 모듈과 데이터를 주고받게 되고, TTT 선도 및 마르텐사이트 변태 데이터를 입력받아, 탄소성해석에 상변태 결과를 제공하게 된다. 온도해석 모듈은 열적 성질과 대류계수 등을 입력받아, 결과를 탄소성해석 모듈에 제공하게 된다. 동시에 탄소성해석 모듈에는 재료의 기계적 성질이 입력되어야 한다.<sup>9</sup> 열전도도, 비열, 확산계수, 열팽창계수, 초기 항복강도, 가공경화지수 등은 SNC815H의 값을 사용하였다.<sup>2</sup>

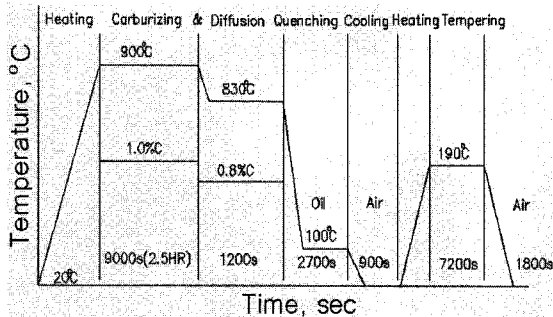


Fig. 2 Heat treatment procedure for helical gear

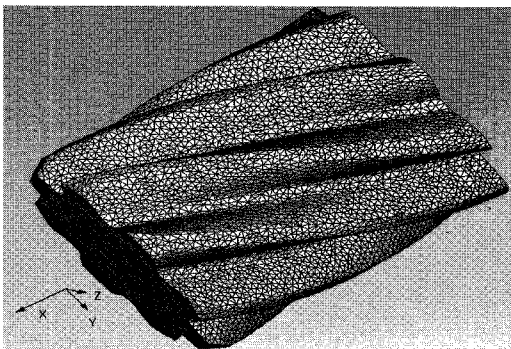


Fig. 3 Solution domain for helical gear

헬리컬기어축에서 해석영역은 기어 부분에 국한하였다. 제거된 축의 강성효과를 고려하기 위하여 기어의 한쪽 면에 길이방향의 이동을 구속하였고, 해석 중 강체 변위가 발생하지 않도록, 반대쪽

에는 축의 중심축에 직각(y 축 및 z 축)방향으로의 이동을 구속하였다. 수치해석을 위한 기하학적 형상은, CATIA 에서 작성한 기어 모델을 STL 포맷으로 저장한 파일을 읽어 활용하였다. 모델의 해석영역은 Table 3 에 나타난 바와 같은 유한요소로 분할하였고, Fig. 3 과 같이 나타난다. 탄소확산 등 기어 이를 좀 더 정확하게 해석하기 위하여, 요소는 표면에서 요소의 크기를 더욱 작게 나누어, 한 변의 길이가 최소 0.2mm 가 되게 하였다. 표면에서 내부방향으로는 상대적으로 더 큰 크기의 요소를 사용하여, 중심위치에서는 최대 1.5mm 로 설정하였다. 해석시간 간격은 0.001sec 를 초기값으로 하고, 최대 온도 변화가 2°C 를 넘지 않도록 조절되게 하였다.

Table 3 Finite elements for solution domain of gear

Mesh type	Tetrahedral mesh
No. of elements	192,667
No. of nodes	42,836

가열과 담금질의 온도해석은 열전도방정식(1)과 대류열전달 경계조건을 활용하게 된다.<sup>8</sup>

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q \quad (1)$$

여기서,  $\rho$  는 소재 밀도,  $c$  는 소재 비열,  $T$  는 열처리 도중의 소재 온도,  $k$  는 소재 열전도계수,  $Q$  는 상변태 잠열,  $x, y, z$  는 좌표축,  $t$  는 시간이다.

재료의 성질은 온도의 변화와 더불어 탄소의 함량을 고려하고, 금속 상의 복합적 존재는 각 상 성질의 선형적 조합을 고려하여 수행하게 된다. 대류계수는 온도에 따라 변화하게 된다. 공기 중에서의 대류계수는 초기 가열에서는  $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 열처리 노 내에서는  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 냉각유 속에서의 대류계수는 재료 표면온도에 따라,  $20^\circ\text{C}$  에서  $500$ ,  $250^\circ\text{C}$  에서  $500$ ,  $400^\circ\text{C}$  에서  $3100$ ,  $500^\circ\text{C}$  에서  $5000$ ,  $600^\circ\text{C}$  에서  $2800$ ,  $700^\circ\text{C}$  에서  $500$ ,  $900^\circ\text{C}$  에서  $500 \text{ W/m}^2\text{K}$  으로 설정하였고,<sup>3</sup> 중간 온도 구역에서는 보간 값을 이용한다. 탄소확산 해석은 확산방정식(2)와 경계조건을 적용하고, 탄소의 확산계수는  $0.00025\text{mm}^2/\text{s}$  로 설정하였다.<sup>7</sup>

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

여기서  $C$  는 소재의 탄소함량,  $D$  는 탄소 확산계수

이다.

재료의 상(phase)은 초기 상온에서 베이나이트로 구성되며, 임계온도 이상(Ac1 과 Ac3)에서는 오스테나이트로 확산형 상변태가 발생한다. 냉각에서는 오스테나이트에서 베이나이트로의 확산형 변태와 마르텐사이트로의 비확산형 변태가 발생한다. 마르텐사이트 변태 시작 온도는 탄소함량에 따라 큰 차이가 있다. 따라서 이를 고려한 계산식을 이용하여 시작 온도를 결정하고, 또 마르텐사이트 조직의 분율을 구하는 식을 이용하여 계산한다.<sup>5,7</sup>

열탄소성해석에서 전변형률 증분은 방정식(3)과 같이 탄성( $d\epsilon_{ij}^e$ ), 소성( $d\epsilon_{ij}^p$ ), 열( $d\epsilon_{ij}^{th}$ ), 상변태 변형률 증분( $d\epsilon_{ij}^{tr}$ ) 등으로 구성되고, 소성의 해석은 온도와 탄소량에 따른 유동응력식(4)를 기반으로 한다.<sup>5,7</sup>

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^{th} + d\epsilon_{ij}^{tr} \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = Y(T, C) + H(T, C)\bar{\epsilon} \quad (4)$$

여기서, Y는 항복응력, H는 가공경화계수, T는 온도, C는 탄소량이다. 상변태 해석 등 해석에 활용한 소프트웨어의 이론적 배경은 참고문헌에서 상세히 찾을 수 있다.<sup>5,7,8</sup>

### 3. 결과 및 고찰

담금질이 개시된 직후부터, 기어 길이 중앙의 이 표면과 중심에서의, 시간에 따른 온도변화 해석결과를 Fig. 4 에서 보이고 있다. 기어 중심부는 약 10 초가 경과할 때까지 400°C 로 급격히 냉각하고, 표면부에서는 5 초 경과 때까지 300°C 로 급격히 냉각되는 등 표면과 중심부 공히 약 20 초 이내에 급격히 냉각이 이뤄지고, 약 60 초의 시간이 경과하면, 표면과 중심부의 온도차가 거의 없음을 알 수 있다. 냉각유의 온도 차이는 초기 냉각기간에는 큰 영향이 없으나, 20 초를 경과하면서, 즉 300°C 전후에서, 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 구간에서는 특히 마르텐사이트 조직의 생성이 계속되므로, 냉각유의 온도가 조직의 생성에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다.

기어 길이 중앙의 이 표면에서부터 기어 축 중심까지의 반경 방향으로, 침탄시간 변화에 따라 나타나는 탄소함량을 Fig. 5 에서 보이고 있다. 침탄과정(3,600 초, 7,600 초), 확산과정(12,000 초), 담

금질과정(14,500 초)에서의 탄소분포를 보이고 있다. 침탄 효과는 약 1mm 정도 이상까지 나타나고 있고, 표면의 탄소함량은 약 0.8%에 달함을 알 수 있다.

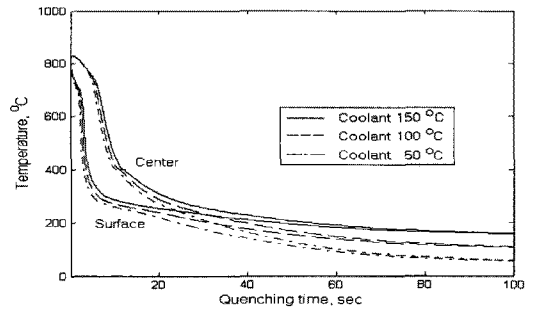


Fig. 4 Temperature change with quenching time

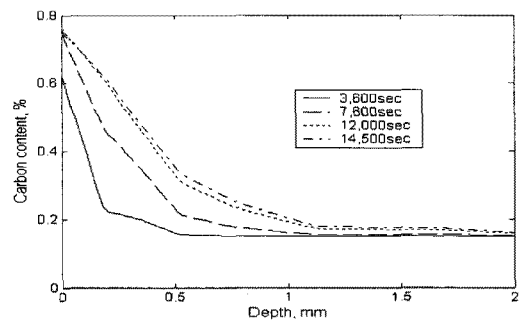


Fig. 5 Change of carbon distribution in gear during heat treatment

Fig. 6 은 냉각유의 온도가 50°C 인 경우에, 냉각 개시 후 시간에 따른 나선각의 변화를 보여 주고 있다. 가열과정에서 약 0.08° 증가한 결과에서, 냉각이 시작되면 증가분이 줄어들고, 대략 10 초 이후, 즉 마르텐사이트가 발생하는 시점에 맞춰, 나선각이 증가하고, 최종 나선각은 추가적인 냉각이 발생한 결과로, 다소 증가하게 됨을 알 수 있다.

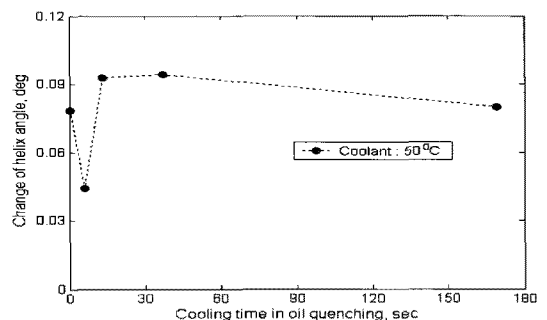


Fig. 6 Change of helix angle with elapsed quenching time

냉각유의 온도에 따라 나선각의 변화를 해석한 결과, Fig. 7 에 보인 바와 같이, 냉각유의 온도가 높을수록 나선각의 증가도 커짐을 알 수 있다. 이는 냉각유의 온도가 높을수록 마르텐사이트 변태의 완료가 늦어지고 이로써 기어의 형태가 더 크게 변화됨에 기인하는 것으로 판단된다. 100°C 의 냉각유에서 담금질한 열처리어의 해석결과에서 나선각의 변화는 0.1° 의 크기로 나타난다. 헬리컬기어 리드의 좌우오차 함이 나선의 변형과 유사하다고 판단하면, 해석 대상인 기어의 나선 허용변형은 0.03mm 이 된다. 나선길이 48mm 를 고려하면, 나선각의 허용변형은 0.035° 가 된다. 따라서 열처리에 의한 나선각 변형이 허용치를 상회하고 있음을 알 수 있다.

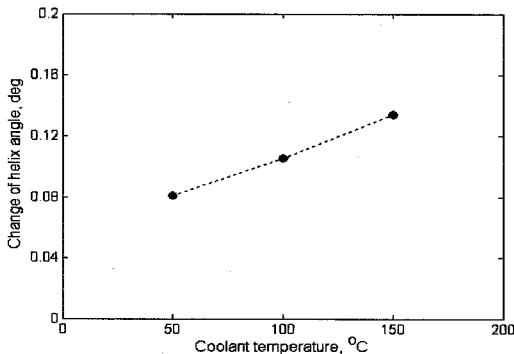
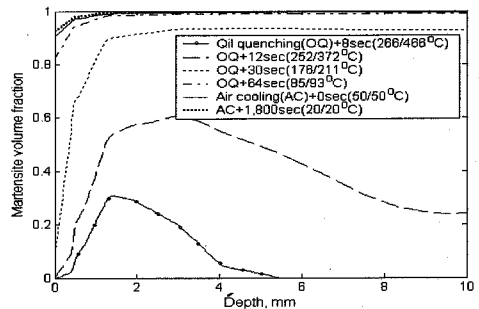


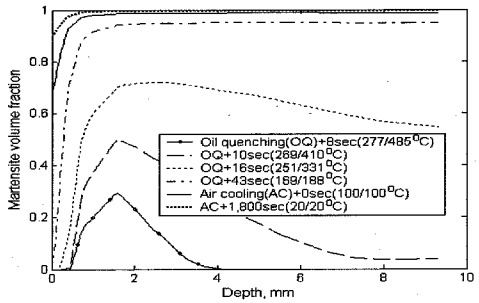
Fig. 7 Change of helix angle during quenching with different coolant temperature

Fig. 8 은 담금질이 시작된 직후부터, 기어 길이 중앙의 이 표면에서부터 기어 축 중심까지의 반경 방향으로, 시간 변화(표면온도와 중심온도 병기)에 따라 마르텐사이트 조직의 분율 변화를 보여 주고 있다. 초기에는 2mm 근방에서 최대값을 보이다가 냉각이 진행될수록 기어 중심축에서 완전히 마르텐사이트 조직으로 변화하고 있음을 보이고 있다. 특히 표면에서는 마르텐사이트 조직이 상대적으로 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 탄소의 함량이 많은 표면에서는 완전히 마르텐사이트 조직을 생성하는 냉각속도보다 다소 느림을 나타낸다. 소재는 탄소함량이 0.15% 정도로 낮으나, 3% 이상의 Ni, 1% 정도의 Cr 등의 합금원소가 첨가되어, 탄소의 확산을 방해함으로써 TTT 선도에서 펄라이트 노즈를 우측으로의 이동하게 하고, 이는 마르텐사이트 변태를 위한 더 많은 시간을 허용한

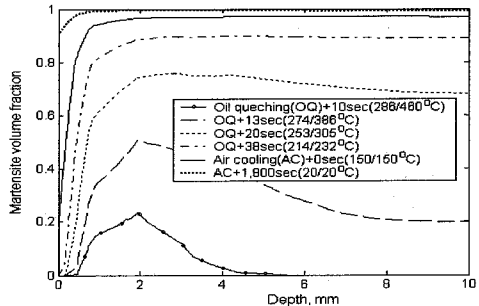
것으로 판단된다.<sup>12</sup> 마르텐사이트 변태가 종료되는 온도는 탄소 당량이 많을수록 낮아져, 탄소함유량이 0.6% 이상으로 나타나는 표면부에는 상온에서도 마르텐사이트 변태가 완료되지 않음을 보여 주고 있고, 이는 확산된 탄소가 마르텐사이트 변태를 억제한 결과이다. 이러한 결과는 선행된 연구에서도 나타나고, 탄소의 함량이 많은 침탄층에서는 마르텐사이트 시작온도가 급격하게 감소한다.<sup>3,8</sup> 이러한 이유로, 마르텐사이트 변태는 침탄층보다 깊은 위치에서 발생하고, 내부로 확대되어 가게 된다.



(a) Coolant 50°C



(b) Coolant 100°C



(c) Coolant 150°C

Fig. 8 Changes of Martensite volume fraction in gear during quenching and air cooling with different coolant temperatures

상대적으로 냉각속도가 표면보다 다소 느린 기어 중심부에서 전부 마르텐사이트 조직이 나타나고 있다. 이는 중심부에서의 냉각속도가 마르텐사이트 생성에 필요한 한계속도보다 빠른 결과로 판단된다. 침탄층은 가장 나중에 변태가 발생하고, 열처리 후에 잔류오스테나이트가 형성된다. 대략 1mm 이내의 표면부분에서 잔류오스테나이트가 나타나고 있다. 이러한 예측 결과는 SNC815H 소재를 이용한 반경 40mm 침탄기어의 경화에 대한 선행된 연구에서도 나타나, 약 1mm 정도 기어 표면에서는 약 90%의 마르텐사이트가 형성되었고, 표면을 제외한 나머지 부분이 전부 마르텐사이트 구역으로 나타나고 있다.<sup>9</sup>

한편, 냉각유의 온도가 높을수록 마르텐사이트 생성이 늦고, 특히 표면에서의 생성이 늦게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 냉각유의 온도 변화에도 불구하고 냉각 후 최종의 상태에서는 마르텐사이트가 대부분 나타나는 유사한 상의 분율을 나타내고 있다.

Fig. 9 는, 기어 길이 중앙 단면에서, 열처리 전의 인볼류트 치형과 열처리 과정에서 치형의 변화를 확대하여 보이고 있다. 830°C 의 가열과정에서는 나선각의 변화가 작고 전체적인 크기가 증가하고 있으나, 냉각 후에는 냉각유의 온도에 따라 기어 이의 방향, 즉 나선각이 증가되어 나타남을 알 수 있다.

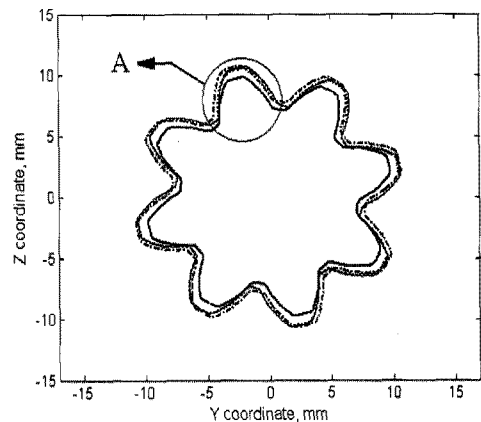
이는 결국 마르텐사이트 변태에 따른 체적팽창의 결과로 유추할 수 있다. 특히 냉각유의 온도가 증가할수록 다소 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 Fig. 7 에서 보인 결과와 유사한 결과를 나타내고 있다.

Table 4 에서는 열처리 조건에 따른 기어의 이뿌리원 반경, 이끝원 반경, 기어 이의 깊이와 두께의 변화를 보이고 있고, 이뿌리원의 변화보다는 기어 이의 형상 변화가 상대적으로 더 크게 나타나고 있다. 100°C 의 냉각유에서 담금질한 열처리의 해석결과에서 치두께의 변화는 0.051mm 로 나타난다.

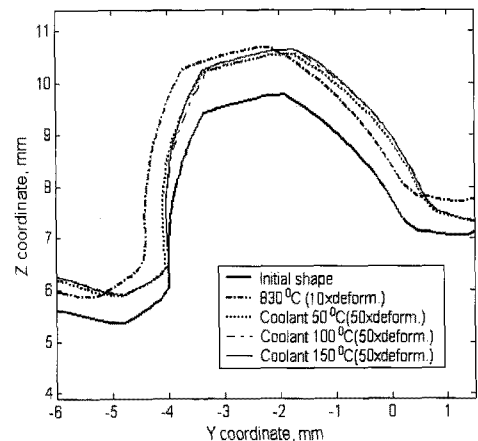
치두께의 크기오차는 치형오차의 좌우 합과 대략 같다고 판단할 때, 해석 대상인 헬리컬기어의 치형 허용오차 0.024mm 보다 크게 나타나고 있다.

한편, 헬리컬기어의 나선 피치가 L 이고, 기어의 피치원 반경이 R 이면, 나선각은  $\pi/2 - \tan^{-1}(L/2\pi R)$  로 결정된다. 기어의 길이가 l 이고 나선 피치보다

작은 경우, 나선의 회전각의 크기  $\theta$  는  $l = L(\theta/2\pi)$  에서 산출할 수 있고, 나선각은  $\pi/2 - \tan^{-1}(l/R\theta)$  로 나타낼 수 있다. 해석에 이용된 헬리컬기어의 나선 피치는 105mm 이었다. 열처리 전과정에서 전체적으로 길이 증가 효과와 직경 증가 효과가 유사하게 나타나고 있어 나선각의 식 만으로는 나선각의 변화가 뚜렷하지 않을 것으로 판단할 수 있으나, Fig. 7 과 Fig. 9 에서 나타난 바와 같이, 나선각 증가하는 이유는 Table 4 에서 보인 바와 같이, 기어축 자체보다는 변형이 용이한 기어 이 부분의 상대적 크기가 단면 내의 반경방향으로 더 증가되므로, 상대적으로 R $\theta$  의 크기를 더 증가하는 효과로 나타나고, 이로써 나선각의 증가에 영향을 더 크게 미친 결과로 판단된다.



(a) whole section



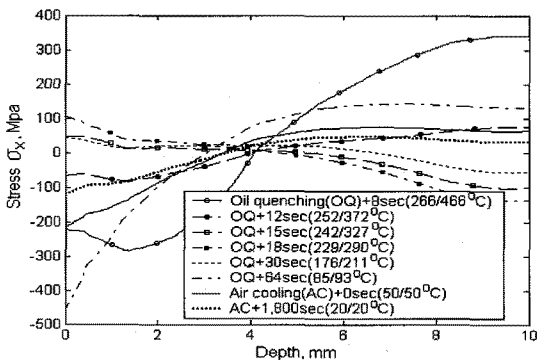
(b) Detail of A at whole section

Fig. 9 Shape of gear tooth during heat treatment with coolant temperature

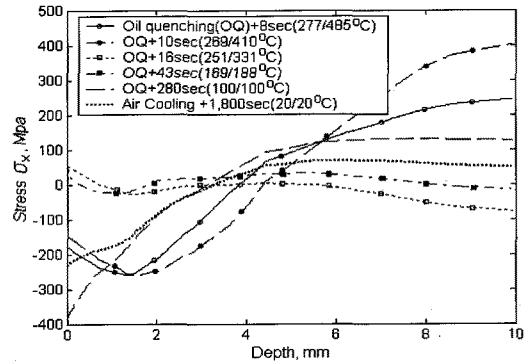
Table 4 Change of gear shape in heat treatment with oil quenching(OQ) temperature(unit, mm)

	Dedendum m-circle radius	Addendum m-circle radius	Tooth depth	Tooth thickness
Initial size	7.13053	9.99872	2.86820	3.15040
Heating (830°C)	7.19938	10.09883	2.89945	3.26570
OQ 50°C	7.13764	10.01410	2.87647	3.18886
OQ100°C	7.13789	10.01488	2.87698	3.2010
OQ150°C	7.13670	10.01503	2.87833	3.18866

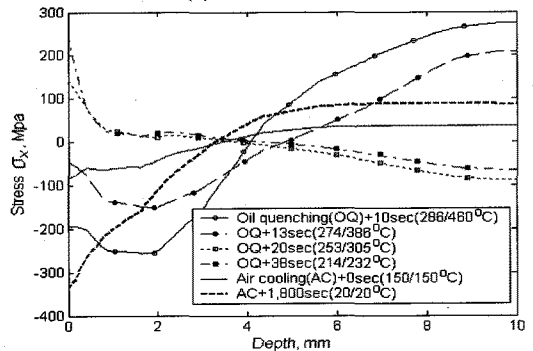
Fig. 10 은, 담금질 개시 후, 기어 길이 중앙의 이 표면에서부터 기어 축 중심까지의 반경 방향으로, 냉각 시간 변화(표면온도와 중심온도 병기)에 따라 기어 내부에 나타나는 축방향(x 방향)의 응력 분포를 보이고 있다. 냉각 초기(담금질 후 8~10 초 이내, OQ+8~10sec)에 표면은 압축응력이, 내부는 인장응력이 나타남을 알 수 있다. 냉각 중간(OQ+20~40sec)에는 표면에 인장응력, 내부에 압력 응력으로 나타나고, 최종(AC+1800sec)으로는 표면에 압축응력, 내부에 인장응력이 나타남을 보이고 있다. 냉각유의 온도가 높을수록 잔류응력의 크기가 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 냉각유의 온도가 높을수록 마르텐사이트의 생성이 지연되기 때문으로 판단된다. 초기의 표면압축응력은 표면 온도의 큰 증가와 내부의 낮은 온도 상승에 의해 나타난다. 담금질 과정에서 발생하는 마르텐사이트 변태가 압축응력을 야기하고, 마르텐사이트가 최종으로 발생하는 표면부에서 가장 큰 압축응력이 형성된다고 판단할 수 있다.



(a) Coolant 50°C



(b) Coolant 100°C



(c) Coolant 150°C

Fig. 10 Stress distribution in gear during quenching and air cooling with different coolant temperature

이는 실험적 방법으로 얻은 잔류응력분포의 결과와 잘 부합하고 있고,<sup>8</sup> 특히 표면 잔류응력의 경우, 해석에서 얻은 예측결과는 선행된 연구에서의 측정결과인 300~400MPa 와 대체로 유사한 크기를 보이고 있어,<sup>13</sup> 해석결과가 타당함을 알 수 있다. 그럼에도, 해석의 신뢰성을 더 확보하기 위하여는, 해석결과와 실험결과의 정교한 비교가 필요하다고 판단한다.

4. 결론

유한요소해석을 통해 헬리컬기어의 침탄 열처리 과정에서의 냉각유의 온도에 따라, 온도이력, 상변태, 잔류응력, 변형의 크기를 해석하고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 냉각유의 온도가 높을수록 나선각의 크기가 증가되었고, 본 연구에서는 50°C 에서 가장 작게 나타났다.
- 2) 헬리컬기어의 나선각 증가는, 열처리 과정에

서 나타난 체적의 팽창 중에서, 상대적으로 기어 이 부분의 반경 방향 증가가 더 크게 나타난 결과에 기인한다.

3) 탄소의 확산으로 형성된 침탄층으로 인하여, 기어 이의 표면에는 마르텐사이트 생성 온도가 낮아지게 되고, 상대적으로 많은 잔류오스테나이트 조직을 갖게 된다.

4) 냉각유의 온도가 높을수록 표면에서의 마르텐사이트 생성이 지연되고, 이는 잔류응력의 크기와 기어 이의 변형을 더 증가하는 효과로 나타난다.

5) 기어표면에서 압축잔류응력이 나타나고 내부에서는 인장잔류응력이 나타나고 있다. 이는 표면부에서 부피가 큰 마르텐사이트 조직이 지연되어 생성되기 때문이다.

6) 이 두께의 상대적 변화가 이 깊이, 이끝원 반경, 이뿌리원 반경보다 더 크게 나타났다.

7) 열처리 과정에서 나타나는 이 깊이, 이 두께, 이뿌리원 반경, 이끝원 반경, 나선각 등의 변화를 산출하여, 열처리 변형을 감안한 치형의 설계가 가능하다.

8) 향후, 풀림 처리 과정의 해석과 더불어, 실험결과와의 비교연구를 통하여 변형해석의 신뢰성을 더 높일 수 있다.

## 후 기

이 논문은 진주산업대학교 2010년도 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

- Kamouneh, A. A., Ni, J., Stephenson, D. and Vriesen, R., "Investigation of work hardening of flat-rolled helical-involute gears through grain-flow analysis, FE-modeling, and strain signature," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 7-8, pp. 1285-1291, 2007.
- Kim, H. J., Choi, S. C., Lee, D. J. and Kim, H. Y., "Analysis of the Carburizing Heat Treatment Process for SNCM Alloy Steel Using the Finite Element Method," *Tran. of the KSME(A)*, Vol. 20, No. 10, pp. 1284-1292, 2006.
- Cho, J. R., Kang, W. J., Kim, M. G., Lee, J. H., Lee, Y. S. and Bae, W. B., "Distortions induced by heat treatment of automotive bevel gears," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 476-481, 2004.
- Antoniadis, A., Vidakis, N. and Bilalis, N., "A simulation model of gear skiving," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 2, pp. 213-220, 2004.
- Ju, D. Y., Liu, C. and Inoue, T., "Numerical modeling and simulation of carburized and nitrided quenching process," *J. of Mat. Pro. Tech.*, Vol. 143-144, pp. 880-885, 2003.
- Youn, I. J., Lyu, S. K., An, C. W. and Ahn, I. H., "Characteristic on the Heating Deformation of Sleeve by Heating Method," *J. of the Korean Society of Safety*, Vol. 21, No. 3, pp. 1-7, 2006.
- Sugianto, A., Narazaki, M., Kogawara, M., Shirayori, A., Kim, S. Y. and Kubota, S., "Numerical simulation and experimental verification of carburizing-quenching process of SCr420H steel helical gear," *J. of Mat. Pro. Tech.*, Vol. 209, No. 7, pp. 3597-3609, 2009.
- Song, G. S., Liu, X. H., Wang, G. D. and Xu, X. Q., "Numerical Simulation on Carburizing and Quenching of Gear Ring," *Int. J. of Iron and Steel Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 47-52, 2007.
- Inoue, T., Yamaguchi, T. and Wang, Z., "Stresses and Transformations Occurring in Quenching of Carburized Steel Gear Wheel," *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 1, No. 10, pp. 872-876, 1985.
- Lyu, S. K., "Effects of Heat-treatment on the Bending Fatigue Strength of SNC815 Carburized Spur Gear," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 12-19, 1994.
- Linnert, G. E., "Welding Metallurgy(3<sup>rd</sup> ed.)," Vol. 2, American Welding Society, pp. 334-337, 1967.
- Kim, W. I., Kim, H. S. and Shin, K. H., "New Mechanical manufacturing Process," Moonundang, pp. 115-116, 1997.
- Lyu, S. K., Nam, T. H. and Lee, J. Y., "A Study on the Effect of Heat-treatment on the Fatigue Strength of SNC815 Spur Gears," *J. of the Korean Society Heat Treatment*, Vol. 13, No. 1, pp. 21-26, 2000.