

열처리 냉각방식 변화에 따른 SCr420HB 헬리컬 기어 시뮬레이션 적용에 관한 연구

변재혁*† · 변상덕** · 이창현***

*(재)구미전자정보기술원, **경북진공열처리, ***공주대학교 산학협력단

A Study on SCr420HB Helical Gear Deformative Simulation by Heat Treatment Quenching Method

J. H Byun*†, S. D Byun**, C. H Yi***

*Gumi Electronics and Information Technology Research Institute

**Kyeong Buk Vacuum Heat Treatment Co.

***Kongju National University Industry-University Cooperation Foundation

Abstract In this study, a simulation was used to derive an optimal process of heat treatment with carburizing, and compared the derived result with SCr420HB helical gear in heat treatment with carburized quenching process about a change of the quenching method. The optimal carburizing process time is derived by the simulation with the theoretical time. The process has been performed by oil quenching and salt quenching method. Through the comparison of the results from the simulation(Hardness, effective case depth hardened by carburizing treatment and deformation) and the actual process, analyzed the error value of each quenching. And it verified the applicability of the simulation.

(Received December 26, 2014; Revised January 2, 2015; Accepted January 7, 2015)

Key words : Carburizing, Helical gear, Heat treatment simulation, Effect case depth hardened by carburizing treatment, Oil quenching, Salt quenching

1. 서 론

일반적으로 열처리 기술은 내마모성, 내식성, 피로 강도, 내열성 등의 기계적 성질을 향상시키는 유효 수단으로 사용되고 있으며 전 산업분야에 걸쳐 사용되는 기반기술이다. 동력전달용으로 활용되는 기어에 서의 열처리 중요성은 경화깊이, 경도, 변형 등이 중요하다, 그중에서도 변형은 제품의 소음과 진동을 유발하고, 결국 내구성의 저하를 가져와 제품의 품질을 열화 시키게 되는 원인이 된다. 높은 품질의 기어를 생산하기 위해서는, 실제 열처리 공정 전에 품질을 예측하는 기술이 필요하다. 열처리 공정 중 발생하는 기어의 물성 변화를 시뮬레이션 사전예측 기술 적용을 통해 최적의 침탄열처리 공정을 도출하여 헬리컬 기어 열처리 품질 및 생산성을 향상 시킬 수 있다.

그러므로 헬리컬 기어의 열처리공정 오류 및 공정시간 최소화를 위해 열처리 해석이 필요하다[1-4].

본 연구는 SCr420HB 헬리컬 기어 침탄공정 설계 이론으로 도출된 조건을 시뮬레이션 기술을 활용하여 사전 검증 후 도출된 최적의 침탄공정 조건을 실제 침탄프로세스에 적용 후 도출된 결과와 DEFORM 3D 열처리 해석프로그램으로 예측된 결과 비교 분석 하였다[5].

2. 실험 방법

2.1 침탄열처리 공정시험

실험에 적용할 헬리컬 기어는 Fig. 1에서와 같이 실제 모델과 시뮬레이션 해석을 위한 3D모델로 나타내었다.

†Corresponding author. E-mail : jhbyun@geri.re.kr



Fig. 1. SCr420HB helical gear shaft.

Table 1. Helical gear requirement

Material	SCr420HB
Surface hardness (HV)	660~775
Effective case depth (ECD)550 HV	0.8~1.2 mm

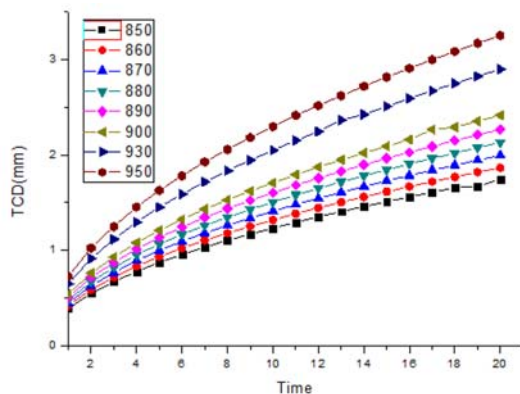


Fig. 2. Relationship between gas carburizing time and effective depth of hardening.

Table 1과 같이 침탄열처리 후 요구되는 특성을 본 연구의 목표로 시험을 진행하였다.

2.2 침탄열처리 이론적 공정

침탄 층 깊이에는 전 경화 층 깊이(TCD) 또는 유효 경화층 깊이(ECD)가 규정되어 있다. 전 침탄 층 깊이(TCD)에 의한 침탄 시간을 계산식으로부터 구할 수 있다. 침탄온도-시간-전 침탄깊이(TCD)의 관계를 Fig. 2에 나타냈다[6].

Table 2. Chemical composition of SCr420HB steel

Material	Chemical composition(%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCr420HB	0.214	0.299	0.871	0.016	0.007	1.209	0.075
	Cu	Al	B				
B	0.171	0.019	0.002				

$$TCD = K\sqrt{t} \quad (1)$$

$$= 0.390 \sqrt{t} \quad (850^{\circ}\text{C의 경우})$$

$$= 0.540 \sqrt{t} \quad (900^{\circ}\text{C의 경우})$$

$$= 0.648 \sqrt{t} \quad (930^{\circ}\text{C의 경우})$$

$$= 0.727 \sqrt{t} \quad (950^{\circ}\text{C의 경우})$$

목표 침탄깊이 및 표면탄소량을 조절하기 위해 필요한 침탄시간과 확산시간은 Fick의 제2법칙을 기본으로 하여 F.E.Harris 실험식을 적용하였다.

$$T_c = T_t \left(\frac{D}{C} \right)^2 \quad (2)$$

T_c : 침탄시간

T_t : 침탄시간 + 확산시간

D : 확산종료시의 표면탄소량과 소재의 탄 소량과의 차

C : 처음 탄소 포텐셜과 소재의 탄소량과의 차

2.3 열처리 시뮬레이션 해석

SCr420HB 헬리컬 기어의 열처리 해석을 위하여 실험을 통해 물성을 확보하는 것이 바람직하지만, 시간/비용면에서 무리가 있고, 고온영역에서 정확한 측정이 어려운 관계로 온도에 대한 물성은 물성 계산 프로그램인 JMatPro 물성치 데이터를 기반으로 해석을 진행하였으며, 냉각 시의 온도는 850°C 온도 고정인자로 설정하여 DEFORM HT 열처리 시뮬레이션 해석을 진행하였다. JMatPro 열물성치를 위한 SCr427HB의 성분은 Table 2와 같다[7-10].

2.4 경도 및 경화깊이 측정

열처리한 시험편의 요구 경도 값과 경화 깊이의 비교를 위하여 시험편을 절단하여 KSD 0215(마이크로비커스 경도 시험법)방법으로 하중 1.961N으로 10초간 측정하였다.

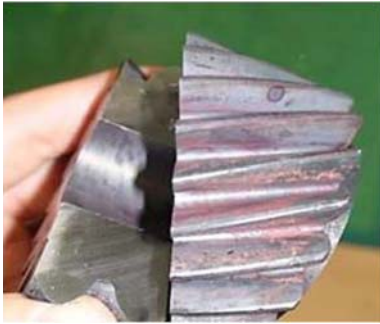


Fig. 3. Cutting method of helical gear.



Fig. 4. Strain measurements using the universal gauge.

헬리컬 기어의 절단 후 날 부위 안쪽 면을 기준으로 0.2 mm 간격으로 경도 값을 측정하였으며 ECD (Effective case depth)를 지난 지점까지 경도 값을 측정하고 마운팅 시험편의 Core 부위의 경도측정 하였다.

2.5 기어의 변형측정

침탄 열처리 시험을 진행 후 헬리컬 기어를 Universal gauge를 이용하여 치와 치 사이에 5.556 mm볼을 이용하여 변형 정도를 측정을 통해 시물레이션 해석 결과와 비교하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SCr420HB 열적 물성분석 결과

Fig. 5와 같이 SCr420HB를 1600°C에서 상온까지 서냉시 상변화 해석을 진행한 결과를 나타낸다. 액상에서 약 1500°C부터 고상으로 변화하는 동시에 Ferrite와 Austenite 상으로 성장하다가 약 1400°C에서 Austenite 100%로 변태하며 약 800°C에서 Austenite 상에서 Ferrite와 M7C3 탄화물로 변태되

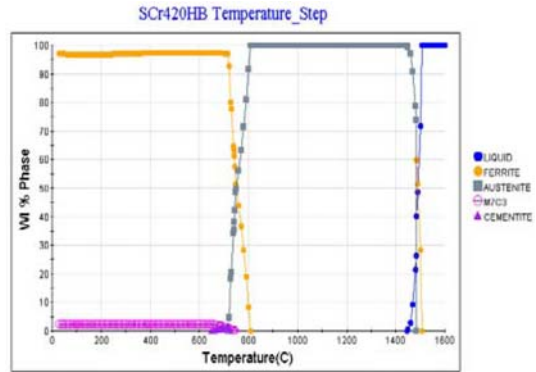
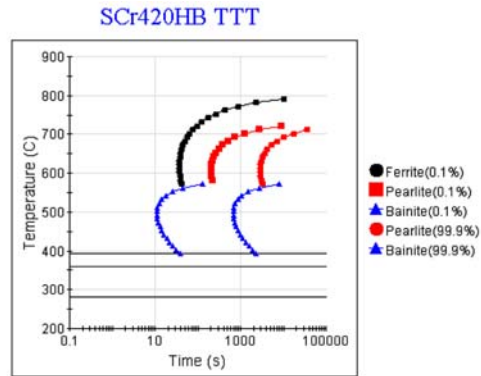


Fig. 5. Phase change temperature.



SCr420HB CCT

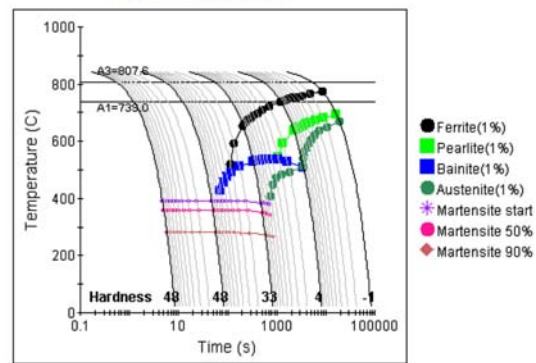


Fig. 6. TTT/CCT curve of SCr420HB.

며 720°C~650°C까지는 미량의 Cementite 상이 함께 나타나다 사라진다.

Ferrite는 807°C, Bainite 583.4°C, Pearlite 739°C에서 각각 변태를 시작하여 냉각의 따른 종로점에서 변태를 종료하며, 열처리에서 경도 값에 가장 중

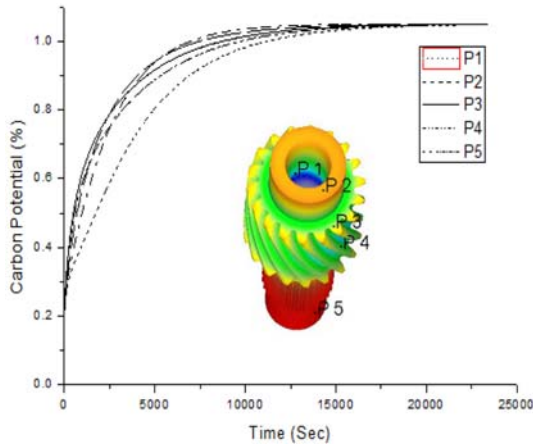


Fig. 7. Carbon potential for the carburizing time.

요한 영향을 미치는 상(Phase)인 Martensite는 392.9°C에서 변태를 시작하여 281°C에서 90% 변태가 완료된다. TTT(Time temperature transformation) CCT(Continuous cooling transformation) 해석결과 그래프는 Fig. 6과 같다.

3.2 침탄 최적 공정조건 도출

T.C.D 그래프와 F.E. Harris 식을 이용하여 이론적인 침탄공정 시간을 도출한 결과 목표 유효경화 깊이가 1.0 mm 기준으로 총 침탄시간 9~10시간이며 침탄시간은 3.53시간 확산시간 6.47시간으로 도출하였으며, C.P값은 Cr과 같은 강력한 탄화물 형성원소를 함유한 것을 고려하여, 침탄 1.05%, 확산 0.75%로 이 결과를 시뮬레이션 해석을 통해 침탄 및 확산공정에서의 C.P값이 안정되는 최적의 시간을 도출한 결과 Fig. 7과 Fig. 8과 같다.

시간의 경과에 대한 목표 C.P(Carbon Potential) 값 1.05%는 20,400 sec에 전체적으로 탄소포화농도가 1.05를 나타내며 침탄공정 설계이론에서 도출한 시간인 12,700 sec에서는 P2~P5에서는 1.04%를 나타내고 있으나, P1에서의 탄소포화 농도가 1.02%를 나타내고 있다. P1인 내경의 탄소포화 농도가 1.05%가 되는데 1400 sec 지연되어, 20,400 sec의 침탄공정이 지난 후에 탄소포화 농도가 1.05%에 전체적으로 도달하는 것을 알 수 있었다. Fig. 8의 확산시간의 경우 C.P 값이 0.75유지 후 10,020 sec 후 CP 0.75%로 완료되어 이론적 시간 23,292 sec

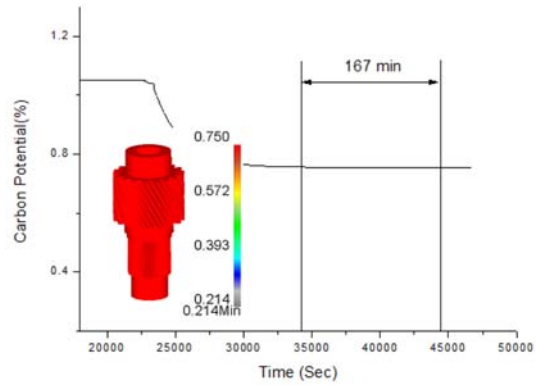


Fig. 8. Carbon potential for the diffusion time.

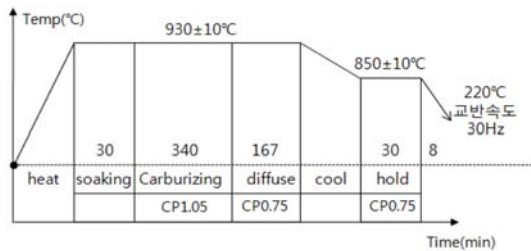


Fig. 9. Gas carburizing-salt quenching processing carbon potential (C.P) 1.05 and 0.75.

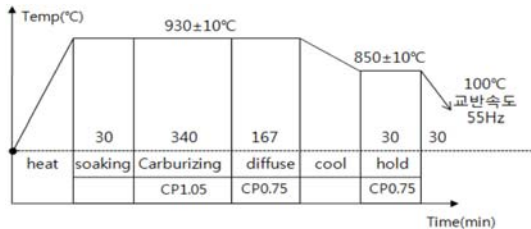


Fig. 10. Gas carburized-oil quenching process using carbon potential (CP) 1.05 and 0.75.

초 보다 약 13,000 sec 감소하였다.

도출된 최적의 공정을 실제 침탄 열처리 공정에 적용하였으며, 냉각방식을 Salt 냉각방식과 오일냉각방식으로 진행하여 최적의 헬리컬기어 열처리 방법 도출과 동시에 열처리 해석 수렴치를 검증하였다. Fig. 9는 Salt 냉각방식, Fig. 10은 Oil 냉각방식에서의 침탄열처리 공정을 나타낸 것이다.

3.3 냉각온도분포 해석 결과

Oil 냉각과 Salt 냉각의 시간에 대한 온도분포 해

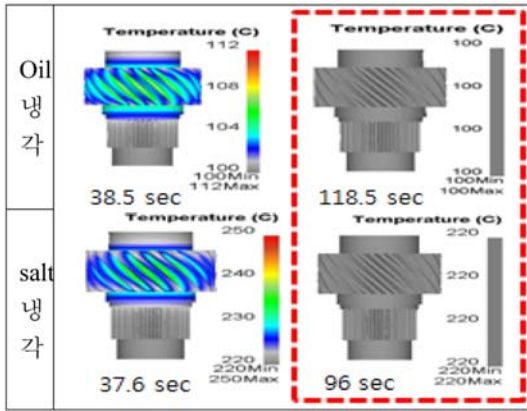


Fig. 11. A result of oil & salt quenching time temperature analysis.

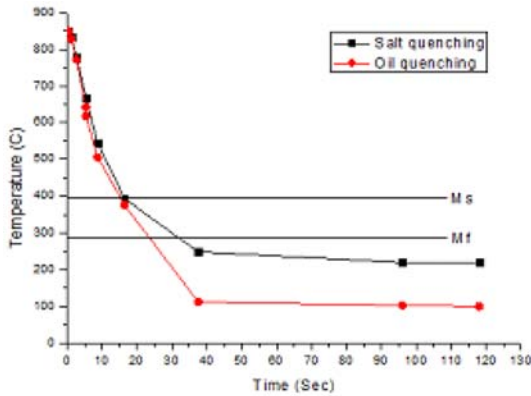


Fig. 12. Cooling system according to the temperature graph analysis.

석결과를 Fig. 11에 나타내었다. Oil 냉각은 118초가 되면 오일의 온도인 100°C에 도달하였으며, Salt 냉각은 96초 후 Salt 온도인 220°C에 도달하였다.

Fig. 12와 같이 냉각 완료된 후 표면과 중심부의 온도 차이 검증을 위해 중심부의 시간에 따른 온도 분포 해석하였으며, 해석결과 Oil 냉각의 경우 118초에 Oil의 온도인 100°C와 일치하였으며 Salt의 경우 96초 후에 Salt 냉매온도인 220°C와 일치하였다.

3.4 경도시험 해석 및 시험결과

헬리컬 기어 열처리 냉각이 완료된 후 실제 열처리 공정에서의 경도측정 샘플과 동일한 형상으로 Fig. 13과 같이 절단하였다.

Oil과 Salt 경도 분포 해석 결과는 Fig 14, 15와

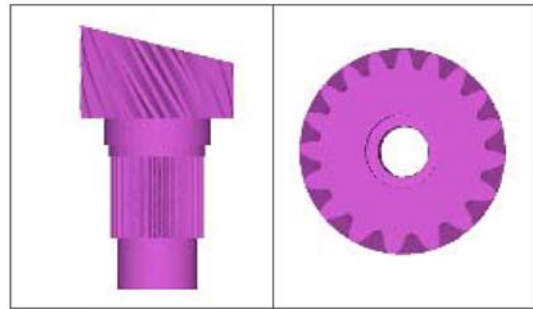


Fig. 13. Cross-sectional helical gear.

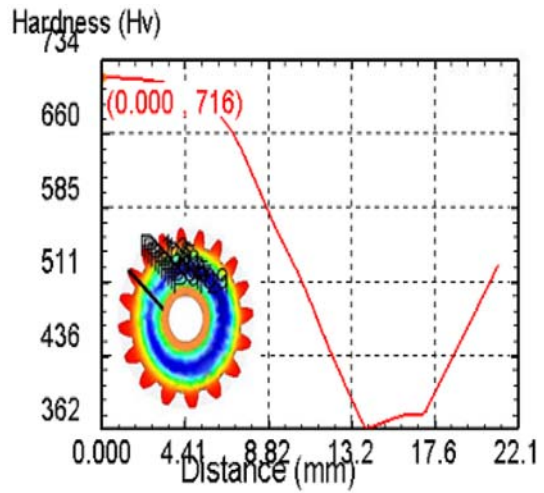


Fig. 14. Hardness for the depth of the oil quenched simulation.

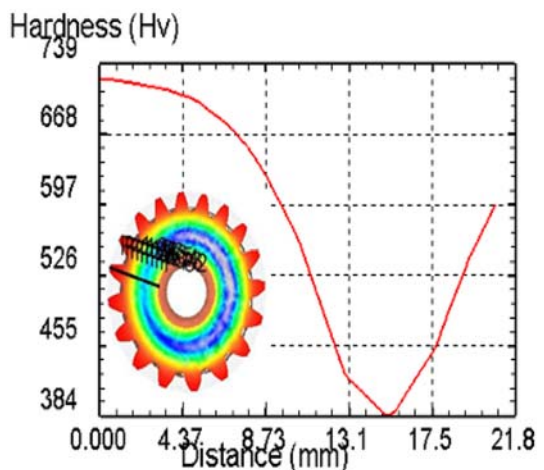


Fig. 15. Hardness for the depth of the salt quenched simulation.

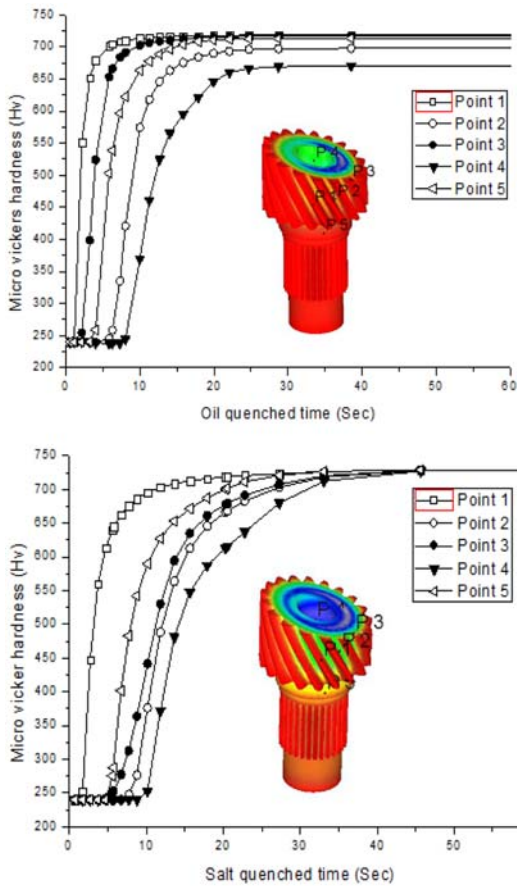


Fig. 16. 5 points for hardness distribution in the cooling time.

같다.

오일 냉각 후 경도 분포를 살펴본 결과 표면의 경도는 HV716으로 헬리컬 기어의 요구치인 HV660~775의 값을 만족한다. 중심부(Core)의 경도 값은 HV362를 나타내고 있으며 내부표면의 경도 값은 HV511 외부 표면경도와 HV 205 정도 차이가 났다. 이는 내부와 외부의 오일의 교반속도의 차이 때문으로 추측된다.

Salt 냉각 후 표면에서 내부까지의 경도 분포를 살펴본 결과 표면에서의 경도 값 HV 722로 헬리컬 기어의 요구치인 HV 660~775의 값을 만족하였으며, 중심부의 경도 값은 HV 384, 내부표면 경도 HV597로 외부표면경도와 Hv125 차이가 났다. 이는 Oil과 Salt의 냉각효율 차이가 원인으로 추측된다.

Fig. 16은 Oil과 Salt 냉각 방식 해석에서 5 절점

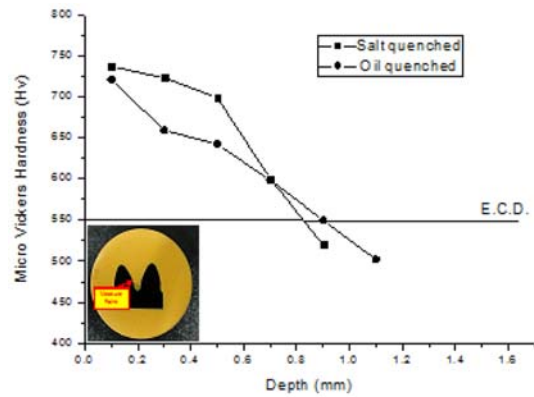


Fig. 17. Effective carburized depth graph.

을 선택하여 경도변화를 분석한 결과 Oil에서의 경우 냉각이 완료되었을 때 5 Point의 경도는 약 25 초 후부터 안정화가 되었으나, Point 2, 4번이 경도 값이 낮게 나타났다. Salt의 경우 냉각이 완료되었을 때 5 Point의 경도는 약 35초부터 안정화가 되었다. 각 Point에서의 경도 값의 차이는 Salt 냉각효율이 높으므로 Oil 냉각과는 달리 위치에 대한 경도 값이 모두 동일하게 나타났다.

시뮬레이션을 통한 최적의 공정조건으로 각각의 냉각 방식으로 열처리 후의 경도시험을 진행한 결과는 Fig. 17과 같다.

Oil 냉각의 경우 표면경도 HV721 심부 HV296, Salt 냉각의 경우 표면 HV737, 심부 HV355을 확인하였으며, 유효 경화 깊이인 HV 550까지 경도측정을 통한 유효경화 깊이 분석한 결과 Oil 0.9 mm, Salt 0.86 mm로 헬리컬기어의 요구 기계적 성질인 ECD(0.8 mm~1.2 mm)에 적합하게 나타났다.

3.5 변형 해석 및 시험결과

헬리컬 기어의 변형 치수의 측정을 위하여 치와 치 사이의 간격을 분석하였다. 확산공정 완료 후의 변형과 냉각이 완료된 후의 변형해석 결과는 Fig. 18과 같다.

확산공정 완료 후 변형과 냉각공정이 완료된 후 변형 결과, 오일 냉각 후 치수의 변화는 최대 약 0.007 mm의 변형이 발생하였으며 Salt 냉각 후 변형은 최대 0.0035 mm로 Oil과 Salt 냉각방식 둘다 기어의 변형정도는 미미하지만, Salt 냉각시의 헬리컬

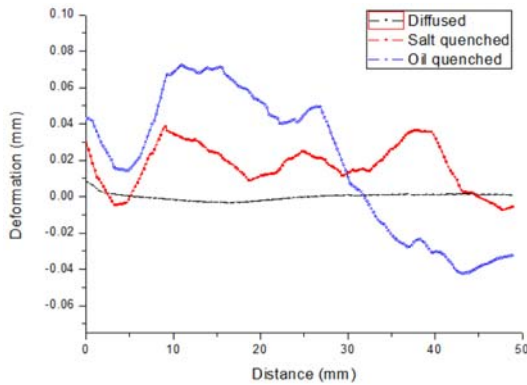


Fig. 18. Result of total deformation salt&oil quenched simulation.

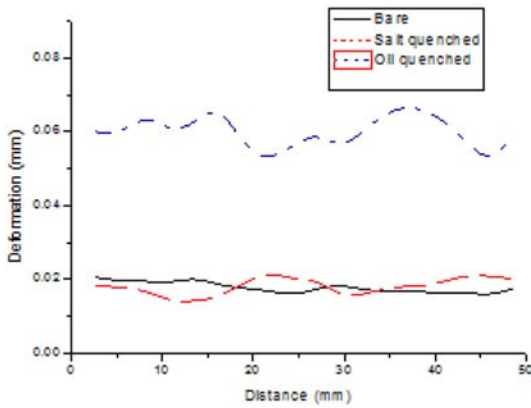


Fig. 19. Deformation measurement test result.

Table 3. Deformation simulation & compare the measured values

	Salt quenched		Oil Quenched	
	Analysis result	Test result	Analysis result	Test result
Average value (mm)	0.017	0.018	0.019	0.06
Error(%)	5.6		68.3	

기어 부위의 변형은 매우 양호한 것으로 나타났다.

Fig. 5와 같이 변형을 측정된 결과는 Fig. 19와 같다.

열처리 헬리컬 기어와 각각의 냉각방식으로 열처리가 완료된 후의 변형정도를 측정된 결과 헬리컬 기어의 변형은 미미하게 나타났으나, Salt 냉각에서 변형이 가장 적게 되며 Oil 냉각에서 변형이 높게 나타났다으며, 실제 분석시험 결과를 시뮬레이션 결과 비

교해보며 전체 변형 경향성은 동일하였으며 평균 변형의 비교는 Table 3과 같다.

4. 결 론

본 연구에서는 SCr420HB 소재 헬리컬기어의 이론적으로 도출된 침탄시간을 침탄 열처리 시뮬레이션을 통해 최적공정설계 후 열처리 냉각 방식을 Salt, Oil 냉각방식으로 각각 실제 열처리 후 열처리 시뮬레이션 해석 결과와 비교 분석하였다.

각각의 냉각 방식으로 열처리 후 경도, 유효경화깊이, 변형을 비교 분석하여, SCr420HB 헬리컬 기어의 열처리 최적 냉각 방식과 시뮬레이션 해석 결과의 정확도 비교를 통해 시뮬레이션의 열처리 적용 가능성을 검증하였다.

1. 시뮬레이션을 활용하여 최적 침탄시간 도출 결과 이론적 시간보다 2시간 단축된 침탄 340분 확산 167분 후 균일한 온도에 도달하는 것을 확인하였다.

2. 시뮬레이션을 통해 도출된 마이크로비커스경도 값과 실제 열처리공정에서 도출된 마이크로 비커스 경도 값과 비교결과 Salt의 경우 표면경도 오차 2% 심부경도 오차 8%, Oil의 경우 표면경도 오차 0.7% 심부경도 오차 22% 발생하는 것을 확인하였다.

3. 최적의 열처리 공정으로 시험을 진행 후 실제 변형시험 결과와 시뮬레이션 변형해석 결과는 각각 Oil 냉각방식의 경우 68.3%, Salt 냉각 방식의 경우 5.6%의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

4. SCr420HB 헬리컬 기어의 경우 Oil 냉각 방식보다 Salt 냉각 방식을 적용하여 열처리 하는 것이 변형에 적합한 것을 확인하였으며, 시뮬레이션 결과와의 일치성은 평균 75% 정도 확인하였다.

References

1. F. Otto and D. H. Herring : Gear Heat Treatment (2002) 1-5.
2. A. Antoniadis, N. Vidakis and N. Bilalis : A simulation model of gear skiving, J. of Materials Processing Technology., **146** (2004) 213-220.
3. D. Y. Ju, C. Liu and T. Inoue : Numerical modeling and simulation of carburized and nitrided quenching proces., **143** (2003) 880-885.
4. T. Inoue, T. Yamaguchi and Z. Wang : Stresses and

- Transformations Occurring in Quenching of Carburized Steel Gear Wheel, Mater. Sci. Technol. **1** (1985) 872-876.
5. DEFORM 3D Version 10.2, Scientific Forming Technologies Corporation (2012).
 6. K. S. Kim : Programing Method of Carburizing Process, KSHT. **15** (2002) 29-34.
 7. J Mat Pro Version 7.0, Sente Software Ltd. (2012).
 8. N. Saunders, Z. Guo, A. P. Miodownic and J. Schile : The calculation of TTT and CCT diagrams for general steels, Sente software (2013)
 9. D. Y. Ju, Y. Ito and T. Inoue : Simulation and verification of residual stress and distortion in carburizing-quenching process of a gear shaft^{*}, In: Proceedings of 4th Intl. Conf. on Quenching and Control of Distortion, Beijing, Chiana (2003) 291-296.
 10. H. Shichino, T. Takahashi and Y. Nagasaka : Experimental and computer simulation analysis of carburized spur gear, In: Proceeding of Intl. Conf. on Motion and Power Transmission, Fukuoka, Japan (2001) 273-278.