

< 논문 >

유한요소법을 이용한 SNCM 합금강의 침탄열처리 공정 해석

김형종[†] · 최선철* · 이동재** · 김현영***
(2006년 4월 10일 접수, 2006년 7월 12일 심사완료)

Analysis of the Carburizing Heat Treatment Process for SNCM Alloy Steel Using the Finite Element Method

H. J. Kim, S. C. Choi, D. J. Lee and H. Y. Kim

Key Words : Carburizing (침탄), Quenching (담금질), Finite Element Method (유한요소법), Heat Treatment (열처리), Lock Gear (록기어), Orthogonal Array (직교배열)

Abstract

Heat treatment is a controlled heating and cooling process to improve the physical and/or mechanical properties of metal products without changing their shapes. Today finite element method is widely used to simulate lots of manufacturing processes including heat treatment and surface hardening processes, which aims to reduce the number of time- and cost-consuming experimental tryouts. In this study we tried, using this method, to simulate the full carburizing process that consists of carburizing, diffusing and quenching, and to predict the distribution of carbon contents, phase fraction and hardness, thermal deformation and other mechanical characteristics as the results. In the finite element analysis deformation, heat transfer, phase transformation and diffusion effects are taken into consideration. The carburizing process of a lock gear, a part of the car seat recliner, that is manufactured by the fine blanking process is adopted as the analysis model. The numerical results are discussed and partly compared with experimental data. And a combination of process parameters that is expected to give the highest surface hardness is proposed on the basis of this discussion.

1. 서 론

최근 들어 산업현장에서는 기계부품의 강도 향상, 내마모성 증대, 생산성 향상 및 원가 절감 등을 위하여 재료의 최적 열처리 조건이 점차 중요시되고 있다. 특히, 높은 내마모성과 내피로성이 요구되는 기어류 부품들은 3mm 이상의 비교적 두꺼운 판재를 블랭킹 가공한 후 요구사양에 맞게 열처리나 표면처리 등 후처리를 한 후에 사용하는 경우가 많다. 연신율이 우수하고 강도도 뛰

어난 새로운 합금강들이 속속 개발되고 있으나, 이러한 재료들은 원가의 상승을 수반하므로 가격 경쟁면에서 뒤떨어지게 된다. 따라서 부품 개발 업체들은 경화능이 좋은 저가의 재료를 선택하여 성형한 후 적절한 열처리를 통하여 성능을 높이는 방법으로 제품을 개발하고 있다.

열처리는 수십년 전부터 이미 많은 연구가 이루어져 온 분야이나, 특히 표면경화처리에 대한 최근의 실험적, 해석적 연구를 살펴보면 다음과 같다. 박상준 등⁽¹⁾은 진공침탄과 가스침탄에 의한 SCM415강의 경도와 변형특성에 대해서 연구하였으며, 김학신 등⁽²⁾은 혼합가스 분위기에서 가스 침탄질화처리를 실시한 SM35C 탄소강의 기계적 성질에 미치는 가스 침탄질화처리 조건 및 고주파 켄칭의 영향을 조사하였다. 또한, 백승호 등⁽³⁾

[†] 책임저자, 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail : khjong@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6314 FAX : (033)242-6013

* 회원, 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

** (주)오스템 기술연구소

*** 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

은 침탄처리한 Ni-Cr-Mo강의 마찰·마모특성을 연구하였으며, 김옥산 등⁽⁴⁾은 유한요소법을 이용하여 탄소강의 경화능 해석을 수행한 바 있다. 또한 조시훈 등⁽⁵⁾은 상변태를 고려하여 탄소강 용접부의 열유동 및 잔류응력 해석을 하여 실험과 비교·분석 하였다. Franz 등⁽⁶⁾은 실험과 해석을 통하여 NiCrMo435 (German grade) 관제시편의 잔류응력과 열변형을 연구하였고, Krauss⁽⁷⁾는 마르텐사이트의 강도와 구조 및 탄소량에 따른 경도 분포를 실험적으로 제시하였다. 본 저자들⁽⁸⁾은 실험과 유한요소해석을 통하여 Ni-Cr-Mo강의 침탄열처리 공정에서의 경도, 열변형, 잔류응력 등을 비교·분석한 바 있다.

최근 유한요소법을 이용한 많은 상용 프로그램이 개발되어 공학적 문제를 해결하는데 광범위하게 응용되고 있으나, 열처리 분야에는 재료의 열(온도) 관련 물성치 데이터의 부족으로 인하여 아직 그 응용이 활발하지 못하며, 실제 현장에서도 많은 시간과 비용을 요구하는 경험적 방법을 주로 사용하고 있는 실정이다. 본 연구는 침탄을 통한 표면경화 공정에 대한 유한요소해석을 통하여 상(phase) 분포, 경도 분포, 경화 깊이, 열변형량 등을 예측하고, 실제 제품으로부터 측정 가능한 데이터와 비교·분석함으로써, 열처리 공정에 대한 유한요소해석의 타당성을 확인하고 그 기법을 확립하고자 하였다. 또한, 실험계획법을 적용하여 표면경화를 극대화할 수 있는 최적의 공정조건을 구하는데 그 궁극적인 목표를 두었다. 본 연구에 적용한 제품은 정밀블랭킹(fine blanking) 공정으로 제조되는 자동차 시트용 리클라이너 부품인 록기어(lock gear)이며, 유한요소해석에는 상용 프로그램 DEFORMTM3D-HT⁽¹⁰⁾를 사용하였다.

2. 침탄열처리 공정

락기어의 전체 열처리 공정은 크게 Fig. 1(a)의 가열, 침탄, 담금질 공정과 Fig. 1(b)의 뜨임 공정으로 진행된다. 침탄 공정에서는 침탄로내 온도와 탄소분위기(C.P.; carbon potential)를 870 °C, 1.0 wt%로 유지하여 30분 동안 부품 표면에 탄소를 침투시킨 후 850 °C, 0.85 wt%로 30분 동안 탄소를 확산시킨다. 이어지는 담금질 공정에서는 부품을 급냉시켜 표면의 고탄소층을 경화시키고 내부는 인성을 유지하게 한다. 본 연구에서는 복잡

한 열적 물성치를 필요로 하는 뜨임 공정을 제외하고, 가열, 침탄 및 담금질 공정에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

개발 중인 라운드 리클라이너⁽⁹⁾ 부품인 록기어의 두께는 4 mm이며, 그 형상과 크기는 Fig. 2와

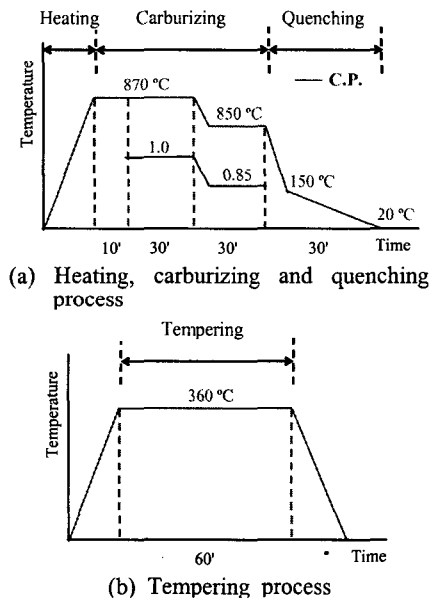


Fig. 1 Heat treatment process of lock gear

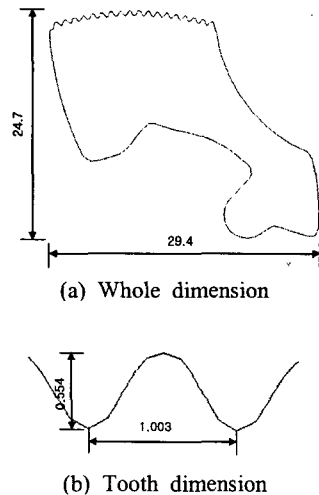


Fig. 2 Major dimension of a lock gear

같다. 열처리 해석에 사용된 유한요소 모델은 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 두께방향(z축)으로 대칭성을 가진 1/2 모델로, 27,951 개의 절점과 22,956 개의 선형 육면체 요소로 이루어져 있다. 치형(tooth) 부분은 침탄 효과가 가장 요구되는 부분이므로 다른 부분보다 요소를 조밀하게 형성하였고, 표면경화 현상을 관찰하기 위하여 두께 방향으로는 Fig. 3(b)와 같이 표면쪽을 더 조밀하게 모델링 하였다.

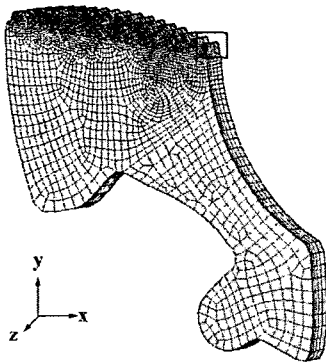
3.2 재료 물성치

일반적으로 기계적 물성치는 단축인장시험이나 전단시험 등과 같이 비교적 간단한 시험으로 얻을 수 있으나, 침탄 열처리 해석에 필요한 열관련 물성치는 실험적으로 얻기가 매우 어려운 고가의 정보이다. 실제 재료와 동일한 재료의 물성치를 사용하여야 하지만, 본 해석에서는 상용 프로그램에서 제공하는 물성치중 탄소함량이 가장 비슷한 것을 대신 사용하였다. 실제 부품 재료인 Ni-Cr-Mo강 (SNCM220)과 DEFORM-3D의 데이터베이스에 포함된 대체 재료 (SNC815)의 화학조성을 Table 1에 비교하였다.

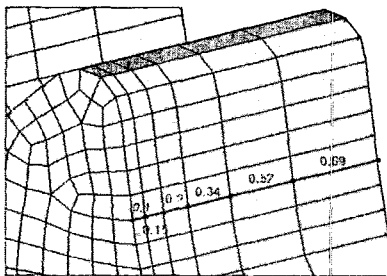
열처리 해석에 필요한, 각 상(phase)에 대한 기계적·열적 물성치들은 대부분 온도와 탄소량에 대한 곡선 형태로 주어지며, x-y 데이터 형식으로 입력된다. 또한, 온도 변화에 의하여 발생하는 상변태에 관한 물성치도 온도와 탄소량에 대한 곡선으로 주어진다. 각 상에 대한 방대한 물성치중 중요한 것들만 Fig. 4~6에 나타내었다. Fig. 4는 식 (1)의 유동응력식에 사용되는 계수 Y, H에 대한 데이터이다.

Table 1 Chemical composition of SNCM220 and SNC815

| | C | Cr | Mn | Ni | Si | Mo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| SNCM220 | 0.17 ~ 0.23 | 0.40 ~ 0.65 | 0.60 ~ 0.65 | 0.40 ~ 0.70 | 0.15 ~ 0.35 | 0.15 ~ 0.30 |
| SNC815 | 0.12 ~ 0.18 | 0.70 ~ 1.00 | 0.35 ~ 0.65 | 3.00 ~ 3.50 | 0.15 ~ 0.35 | 0.00 |

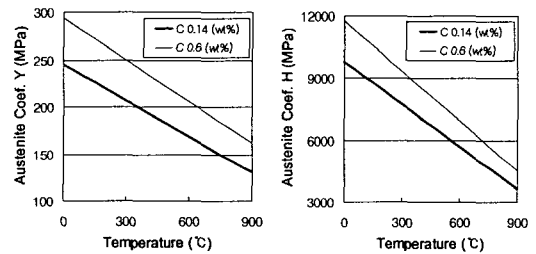


(a) Whole model

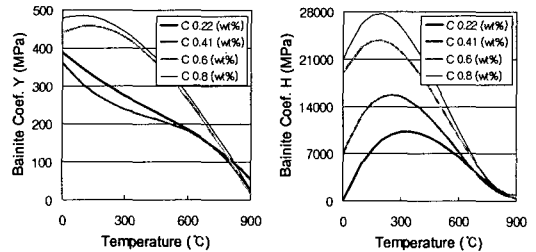


(b) Mesh system of the tooth region

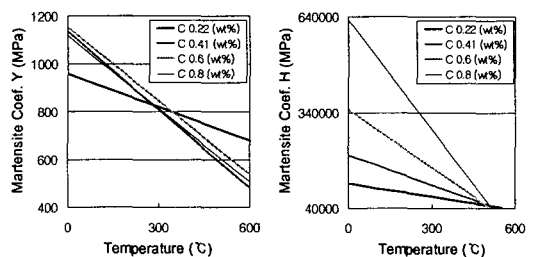
Fig. 3 Finite element model of lock gear



(a) Austenite



(b) Bainite



(c) Martensite

Fig. 4 Variation of the initial yield stress and strain hardening constant in Eq.(1) with temperature

식 (1)은 유한요소해석에 사용되는 온도와 탄소량에 따른 유동응력식이며, 여기서 계수 Y와 H는 Fig. 4의 데이터들이 적용된다.

$$\bar{\sigma} = Y(T, A) + H(T, A)\bar{\epsilon} \quad (1)$$

Y : Initial yield stress
 H : Strain hardening constant
 T : Temperature
 A : Atom(carbon) content

Fig. 5는 유한요소해석에 필요한 오스테나이트와 마르텐사이트의 열전도율이다. Fig. 6은 오스테나이트 상태에서의 탄소 확산계수를 나타내며, 이는 비정상상태 유동을 나타내는 Fick의 제 2 법칙에 사용되는 계수이다.

Fig. 7은 베이나이트 상태에서의 열팽창계수로서 온도에 따른 체적변형률을 나타낸다. Fig. 8은 마르텐사이트의 탄소량에 따른 Vickers 경도값을 나타낸다. 탄소강의 마르텐사이트 경도값이라 탄소 이외의 원소를 포함하는 합금강의 마르텐사이트 경도값과는 차이가 있을 것으로 판단된다.

상변태에 대한 물성치는 Table 2에 정리하였으며, 오스테나이트에서 베이나이트로의 상변태는

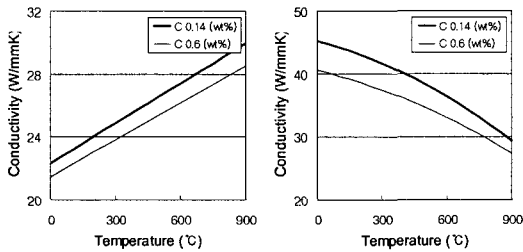
다음과 같은 Avrami 식 (2)로 주어지며, 이 식의 계수들은 TTT (time temperature transformation) 곡선으로부터 계산되어 프로그램 내에서 사용된다.

$$\xi = 1 - \exp(-kt^n) \quad (2)$$

ξ : volume fraction
 t : time
 k : constant
 n : Avrami number

Table 2 Properties of SNC815 for each phase transformation

| | Austenite ↔ Bainite Eq. (2), TTT curve | Austenite ↔ Martensite TTT curve |
|---------------------------|--|-------------------------------------|
| Kinetics | Eq. (2), TTT curve | TTT curve |
| Latent Heat | 595.36 | 661.51 |
| Volume Change | Fig. 8 | Fig. 8 |
| Transformation Plasticity | Eq. (3) | Eq. (3) |



(a) Austenite (b) Martensite
Fig. 5 Thermal conductivity

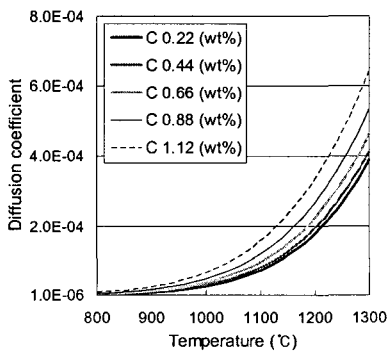


Fig. 6 Diffusion coefficient of austenite

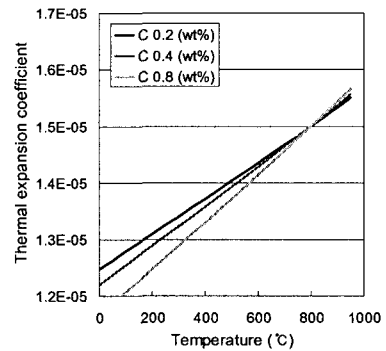


Fig. 7 Thermal expansion coefficient of bainite

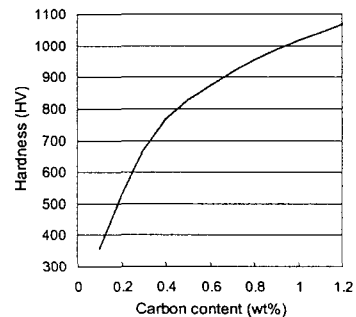
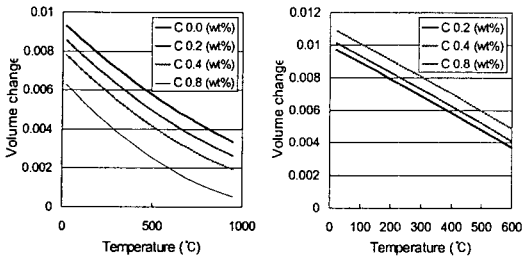


Fig. 8 Martensite hardness according to carbon content



(a) Austenite→Bainite (b) Austenite→Martensite
Fig. 9 Volume change of bainite and martensite

오스테나이트에서 베이나이트 또는 마르텐사이트로의 변태소성(transformation plasticity) 구성식은 식 (3)을 사용한다.

$$\epsilon_{ij}^{tp} = \frac{3}{2} K_{ij} h(\xi_j) \dot{\xi}_j s_{ij} \quad (3)$$

- ϵ_{ij}^{tp} : transformation plasticity strain tensor
- K_{ij} : transformation plasticity coefficient from phase i to phase j
- $\dot{\xi}_j$: volume fraction rate
- s_{ij} : deviatoric stress tensor

Fig. 9는 오스테나이트에서 베이나이트 또는 마르텐사이트로 상변태 시 탄소량과 온도에 따른 체적변화를 나타내는 곡선이다.

3.3 실제 공정 해석

실제 록기어 침탄열처리 현장에서는 Fig. 10에 나타낸 3 가지의 공정조건을 포함한 여러 번의 시행착오를 통하여 최종적으로 C 공정으로 열처리를 진행하고 있다. 본 연구에서는 우선 이 3 가지의 공정에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 11은 침탄 공정 해석 후 3 가지 공정에 대한 깊이방향의 탄소분포를 비교한 것이다. 일반적으로 침탄량은 침탄시간에도 비례하므로 상대적으로 침탄시간이 긴 A 공정의 탄소분포가 전 깊이에 대해 높게 분포하였다.

Fig. 12는 담금질 공정 해석으로 얻은 경도 분포와 실제 제품에서 측정된 경도(micro Vickers hardness)를 비교한 것이다. 해석과 실험에서 경도는 대체로 탄소량에 비례하는 것으로 나타났으나 각 공정마다 상당한 차이를 보였으며, 전체적으로 해석치가 실험치보다 높게 분포하였다. 실험치는 열처리 검사성적서의 데이터를 사용하였지

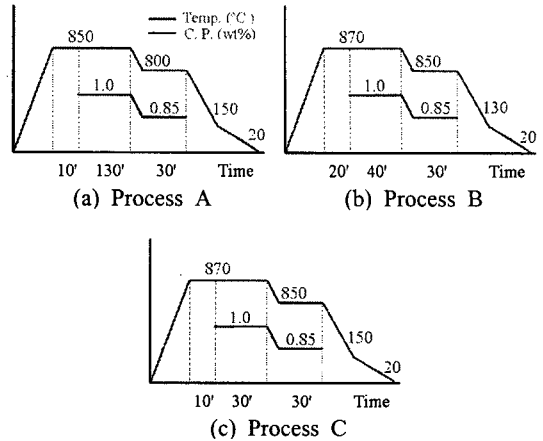


Fig. 10 Trial process conditions for carburization and quenching

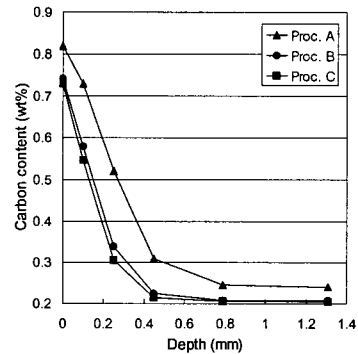


Fig. 11 Comparison of carbon content for three trial processes

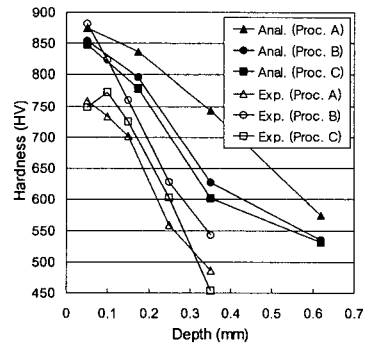


Fig. 12 Comparison of hardness between analysis and experiment

만 측정 시편의 편차도 고려해야 할 것이며, 해석치는 실제 재료 대신 유사 재료의 물성치를 사용한 점이 큰 요인으로 판단된다.

3.4 최적 공정변수 연구

최적의 열처리 조건 연구를 위하여 2수준 6종류의 공정변수를 설정하고, $L_8(2^7)$ 직교배열표를 이용한 실험계획법⁽¹¹⁾을 적용하였다. 직교배열표는 인자의 수가 많을 경우에 인자의 주효과와 2인자 교호작용을 검출하고, 기술적으로 없으리라고 생각되는 2인자 이상의 교호작용에 관한 정보를 희생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 간단히 구성할 수 있도록 만들어 놓은 표이다. 여러 가지 직교배열표 중에서 $L_8(2^7)$ 는 2수준의 인자를 최대 7개까지 배치시켜 분석할 수 있는 것으로, 본 변수연구에 가장 적합한 표이다. 본 연구에서는 경도값의 분포가 가장 높은 경우를 최적으로 간주하였으나, 실제 열처리 공정에서는 재료의 조직이나 인성 등을 고려할 때 경도만으로 최적조건을 결정하는 것은 무리일수도 있다. 일반적으로 경도는 탄소량에 비례하여 나타나지만 탄화물이나 잔류오스테나이트 등 실제 공정에서는 문제가 생길 수 있기 때문이다. Table 3과 4는 공정변수의 범위와 8가지의 해석 조건을 나타낸다. 공정변수의 선정과 변수 범위는 열처리 검사성적서의 내용을 바탕으로 결정하였다.

침탄공정 해석 후 침탄량은 공정조건에 관계없이 모두 록기어의 몸통 부분보다 모서리 부분에

서 높게 나타났으며, 기어 치형부분도 뿌리쪽보다 끝단에 더 높게 분포하였다.

Fig. 13은 8가지 공정조건에 대하여 치형부 근처에서 깊이방향으로의 탄소량 분포를 나타낸 것으로, 구별을 쉽게 하기 위하여 2개의 그래프에 나누어 표시하였다. 탄소량의 차이가 크진 않지만, 표면과 내부가 교차되는 양상을 보였다. 표면에서는 Proc. 2가 가장높게 나타났지만, 0.1 mm 이상 깊이방향으로 갈수록 Proc. 5가 높게 나타났다.

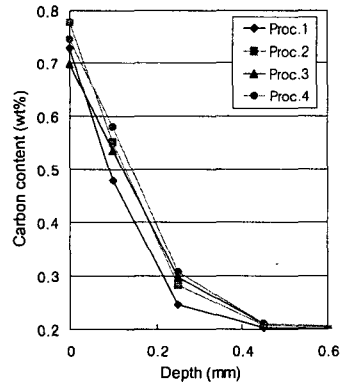
Fig. 14는 8가지 조건에 대하여 그림으로 비교하기에는 무리가 있어 표면의 경도 분포중 가장 낮은 것(a)과 높은 것(b)만을 비교하였다. 전체적으로 탄소량이 높게 분포되었던 Proc. 5가 표면과 두께방향으로 모두 높은 경도를 나타내었다. 탄소량이 높을수록 마르텐사이트의 경도가 높게 나타나지만 일반적으로 잔류 오스테나이트도 많이 생기게 되므로 적절한 침탄 깊이만 만족한다면

Table 3 Level setting of process variables

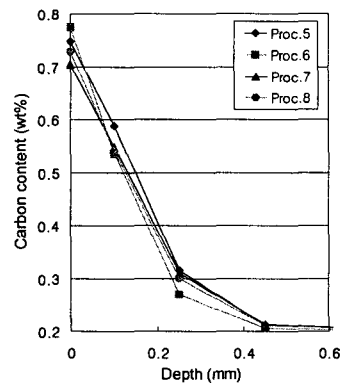
| Variables (Unit) | Level 0 | Level 1 |
|------------------------------|---------|---------|
| (A) Temperature-1 (°C) | 850 | 870 |
| (B) Temperature-2 (°C) | 800 | 850 |
| (C) Carbon Potential-1 (wt%) | 1.0 | 1.1 |
| (D) Carbon Potential-2 (wt%) | 0.8 | 0.85 |
| (E) Time-1 (min) | 30 | 40 |
| (F) Time-2 (min) | 20 | 30 |

Table 4 Layout of the $L_8(2^7)$ orthogonal array

| | Temp.-1 (°C) | Temp.-2 (°C) | C.P.-1 (wt%) | C.P.-2 (wt%) | Time-1 (sec) | Time-2 (sec) |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Proc.1 | 850 | 800 | 1.0 | 0.80 | 30 | 20 |
| Proc.2 | 850 | 800 | 1.0 | 0.85 | 40 | 30 |
| Proc.3 | 850 | 850 | 1.1 | 0.80 | 30 | 30 |
| Proc.4 | 850 | 850 | 1.1 | 0.85 | 40 | 20 |
| Proc.5 | 870 | 800 | 1.1 | 0.80 | 40 | 30 |
| Proc.6 | 870 | 800 | 1.1 | 0.85 | 30 | 20 |
| Proc.7 | 870 | 850 | 1.0 | 0.80 | 40 | 20 |
| Proc.8 | 870 | 850 | 1.0 | 0.85 | 30 | 30 |



(a) Processes 1 to 4



(b) Processes 5 to 8

Fig. 13 Distribution of carbon content in thickness direction

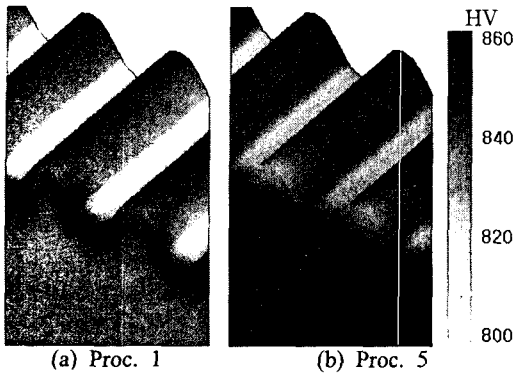
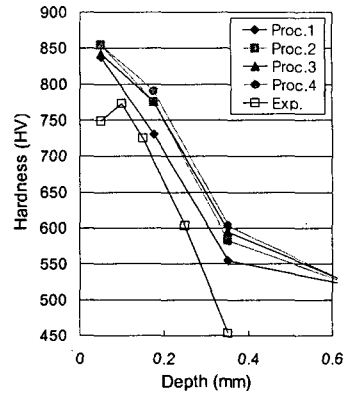


Fig. 14 Distribution of hardness in 8 types

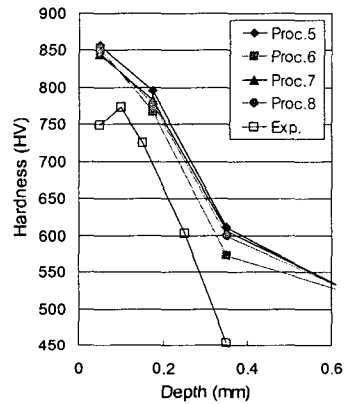
탄소량 차이는 크게 문제되지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 15는 8가지 공정의 치형부분 근처에서 두께 방향으로 측정된 경도와 실험치인 Fig. 10(c) 공정의 담금질 후 측정된 경도값을 비교한 그래프이다. 역시 구별을 쉽게 하기 위하여 2 개의 그래프로 나누어 표시하였다. 해석 결과는 전반적으로 표면에서의 최대값으로부터 깊이방향으로 선형적인 감소경향을 보였으나 측정값의 경우 표면보다는 0.1 mm 깊이에서 최대값을 나타내었다. 이러한 현상은 칩탄 처리한 많은 제품에서 볼 수 있는 보편적인 것이나, 해석에서는 0.1 mm 깊이에서의 경도를 계산할 수 있을만큼 조밀한 요소를 사용하지 않았기 때문에 이러한 현상을 구현할 수 없었다. 대체로 해석 결과가 측정값보다 높은 경도를 나타내었으며, 실제공정[Fig. 10(c)]과 동일한 조건인 Fig. 15 Proc. 8의 경우, 해석 결과는 측정값보다 약 100 정도 높게 나타났다. 실제 록기어 부품은 섹터 기어(sector gear)와 맞물리는 치형 중간 부분과 뿌리쪽 부분의 내마모성이 가장 중요할 것으로 판단된다. 따라서 치형 중간 및 치형 뿌리쪽 경도를 대상으로 Table 5와 6에 분산분석(ANOVA) 표를 작성하여 인자를 분석하였다. 여기서 SS(sum of squares), DOF(degree of freedom), MS(mean of squares), F-test는 각각 변동(또는 제곱합), 자유도, 제곱평균, F-검정을 의미하며, F-검정 값은 클수록 높은 유의수준을 의미한다.

F-검정 결과 경도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 C.P.-2, Time-1, C.P.-1, Temp.-2 순으로 나타났으며, 각 인자에 대하여 일원분석표를 작성하여



(a) Processes 1 to 4



(b) Processes 5 to 8

Fig. 15 Distribution of hardness in thickness direction

Table 5 ANOVA table for the hardness in the middle of a tooth

| | SS | DOF | MS | F-test |
|---------|---------|-----|--------|---------|
| Temp.-1 | 8.000 | 1 | 8.000 | 44.444 |
| Temp.-2 | 18.000 | 1 | 18.000 | 100.000 |
| C.P.-1 | 22.445 | 1 | 22.445 | 124.694 |
| C.P.-2 | 83.205 | 1 | 83.205 | 462.250 |
| Time-1 | 42.230 | 1 | 42.230 | 235.111 |
| Time-2 | 1.805 | 1 | 1.805 | 10.028 |
| Error | 0.180 | 1 | 0.180 | . |
| Total | 175.955 | 7 | . | . |

분석한 결과 최적의 조건은 A₁B₀C₁D₁E₁F₁이다. 즉, Table 3에서 (A)Temp.-1은 870°C, (B)Temp.-2는 800°C, (C)C.P.-1은 1.1wt%, (D)C.P.-2는 0.85wt%, (E)Time-1은 40min, (F)Time-2는 30min이다. 이 조건은 Table 4의 8가지 공정조건에 포함되지 않음

Table 6 ANOVA table for the hardness at the root of a tooth

| | SS | DOF | MS | F-test |
|---------|--------|-----|--------|--------|
| Temp.-1 | 2.000 | 1 | 2.000 | 4.938 |
| Temp.-2 | 6.480 | 1 | 6.480 | 16.000 |
| C.P.-1 | 6.845 | 1 | 6.845 | 16.901 |
| C.P.-2 | 15.680 | 1 | 15.680 | 38.716 |
| Time-1 | 15.125 | 1 | 15.125 | 37.346 |
| Time-2 | 0.980 | 1 | 0.980 | 2.420 |
| Error | 0.405 | 1 | 0.405 | . |
| Total | 47.515 | 7 | . | . |

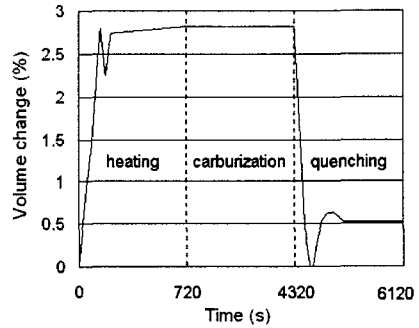


Fig. 17 Volume change in heat treatment process

Fig. 17은 전체 공정동안의 체적 변화를 나타낸 것이다. 가열공정에서 2.82%의 증가와 담금질 공정에서 2.30% (초기체적 대비 2.43%)의 감소가 일어나 전체 공정 동안의 체적은 0.52% 증가한 것으로 나타났다. 체적의 변화와 더불어 치형의 치수 변화를 보면 이뿌리면 치수는 전체 공정 동안에 0.096% (0.0007mm) 증가가 일어났으며, 치형부 두께는 0.11% (0.0044 mm) 감소하였으나 몸통부는 0.11% (0.0044mm) 증가하였다. 이는 측정 가능한 정밀도 범위를 벗어나는 수준이므로 치수 변화량은 무시할 수 있는 정도라고 판단된다. 해석결과로 열변형량이 거의 없는 것으로 나타났지만, 실제 제품은 3차원 형상이라 프로파일 프로젝트 같은 장비로 정밀측정하는데 어려움이 있다. 하지만 실제 제품을 조립하고 작동할 때 문제가 없는 것으로 확인되어 열변형량은 무시할 수 있는 수준인 것으로 판단된다.

이상으로 침탄 및 담금질 공정에 대하여 실험과 해석을 비교·분석 하였다. 그러나 실제 제품은 담금질 후 뜨임 공정을 통하여 경화된 강의 취성을 줄이고 인성을 높여서 사용한다. 향후 뜨임 공정에 대한 상변화 및 각 상에 대한 물성치가 확보되면 완전한 침탄 열처리 공정의 유한요소해석 및 완제품과의 비교·분석도 가능할 것으로 판단된다

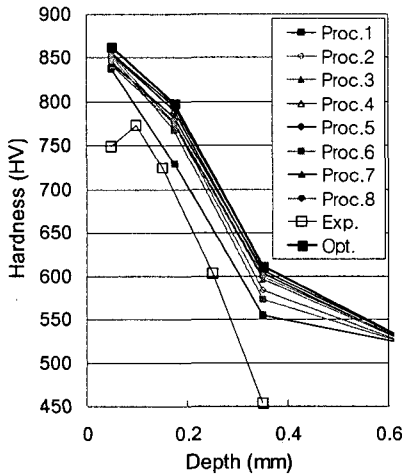
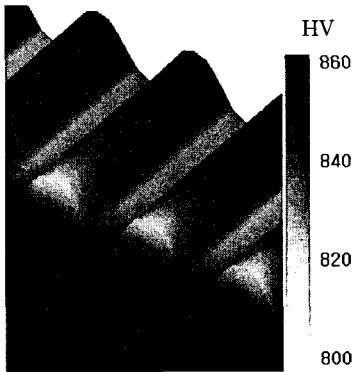


Fig. 16 Distribute of hardness in the optimum process condition

므로 확인 해석(confirmation run)을 수행하여 Fig. 16에 그 결과를 나타내었다. 표면과 내부 모든 부분에서 경도값이 높게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

실제 공정과 동일한 조건으로 침탄 열처리 공정의 유한요소해석을 수행하여 탄소 분포, 상변화, 경도 분포 및 열변형 등에 관한 유용한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 직교배열표를 이용한

공정변수 연구를 통하여 가장 높은 표면경도를 얻을 수 있는 공정조건을 연구하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 침탄공정 해석 결과 부품 표면에 침투·확산된 탄소의 분포 양상을 확인할 수 있었으며, 실제 열처리 공정에서 상당한 참고 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 해석으로 예측한 경도값과 실험으로 측정된 경도값은 모두 표면으로부터 깊이에 따라 선형적으로 감소한다. 대체로 측정값보다 해석 결과가 다소 높게 나타나지만, 공정조건에 따른 경도 분포의 정성적인 비교·분석에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 해석 결과가 측정값과 차이를 보이는 것은 실제 재료의 물성치 대신 유사 재료의 물성치를 사용한 점이 큰 요인으로 보인다.

(3) 침탄로 내 가스 분위기, 온도 및 시간 등에 대하여 2수준 6종류의 공정변수를 설정하여 실험계획법에 의거한 변수연구를 수행하였으며, 변수 설정 범위 내에서 표면경도를 최대화할 수 있는 열처리 조건을 제시하고 재 해석을 통하여 확인하였다.

(4) 열처리 후 록기어의 체적은 0.52% 증가하였고, 치형의 단면 치수는 0.096% 증가, 두께 변화는 위치에 따라 0.11% 정도 감소 또는 증가하였다. 이 정도의 치수 변화는 실제 측정 가능한 정밀도 범위를 벗어나는 수준이므로 록기어의 열변형은 크게 문제되지 않을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Park, S. J., Rhee, K. S. and Kim, K. S., 2002, "Hardness and Distortion Characteristics of SCM415 Steel by Carburizing," *J. of the KSHT*, Vol. 15, No. 6, pp. 269~271.
- (2) Kim, H. S., Lee, K. B., Yu, C. H., Kim, H. T. and Jang, H. Y., 2000, "Effect of Induction Hardening on Mechanical Properties in Gas Nitrocarburized SM35C Steel," *J. of the KSHT*, Vol. 13, No. 4, pp. 224~230.
- (3) Baek, S. H., 1998, "Friction-Wear Properties of Carburized SNCM," *J. of the KSHT*, Vol. 11, No. 3, pp. 159~167.
- (4) Kim, O. S. and Koo, B. K., 1998, "Analysis of Hardenability for Carbon Steel Using Finite Element Method(I)," *J. of the KSHT*, Vol. 11, No. 2, pp. 131~139.
- (5) Cho, S. H. and Kim, J. W., 2001, "A Study on the Analysis of Residual Stress in Weldment by Considering the Phase Transformation of Carbon Steel," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 25, No. 3, pp. 390~398.
- (6) Franz, C., Kubler, R., Muller, H. and Lohe, D., 2000, "Residual Stresses and Distortion due to the Heat Treatment Process," *20th ASM Heat Treating Conference*.
- (7) Krauss, G., 1999, "Martensite in Steel : Strength and Structure", *Materials Science and Engineering*, A273~275, pp. 40~57.
- (8) Choi, S. C., Kim, H. J., Kim, H. Y., Lee, D. J., 2004, "A Finite Element Analysis for the Carburization Process of a Ni-Cr-Mo Carbon Steel", *Proc. of the KSME*, Vol. 4, pp. 123~129.
- (9) Kim, H. Y., Choi, J. G., Kim, J. M., 2005, "Crashworthiness for Automotive Seat with Round Recliner", *Proc. of the KSME*, Vol. 5, pp. 131~136.
- (10) Jeffrey Fluhrer, SFTC Inc., *DEFORMTM3D User's Manual*, Ver. 5.0
- (11) Park, S. H., 1995, *Modern Design of Experiments*, Minyung Press Co.