

냉간 단조용 SCM420 강의 퀴칭 시 열전달 예측모델 개발

진민호* · 장지웅* · 김정민* · 강성수**
(2004년 2월 17일 접수)

Development of Heat Transfer Predicting Model for Cold forging Steel(SCM420) During Quenching Process

M. H. Chin, J. W. Jang, J. M. Kim and S. S. Kang

Abstract

Heat treatment is one of the critical manufacturing processes that determine the quality of a product. This paper presents experimental and analytical results for the quench of a ring gear in stagnant oil. The goal of this study is to develop heat transfer predicting model in an overall analysis of the quenching process. Thermal conductivities which are dependant on temperatures and convection coefficients which are obtained by inverse method are used to develop the accurate heat transfer model. The results of heat transfer model have a good agreement with experimental results.

Key Words : Heat Transfer , Convection Coefficient, Thermal Conductivity, Heat Capacity, Quenching Process
Inverse Method Algorithm

1. 서 론

열처리는 필요한 기계적 물성치를 획득하기 위한 아주 중요한 생산 공정이다. 강의 열처리 기술은 핵심부품의 내구성, 내마모성 및 성능 향상을 위해서 매우 중요한 기술이며, 특히, 기계공업, 자동차 산업 등의 국제 경쟁력 향상을 위해서 아주 중요한 기술이다. 열처리 시에는 크기와 형태의 변형 및 퀴칭 균열과 같은 결함이 발생하게 되며 이로 인한 추가 공정이 요구되어 생산비용을 증가 시키고, 생산되는 부품의 신뢰도에 치명적인 영향을 끼치는 등의 여러 가지 문제를 발생시키고 있다.

열처리 기술이 발달한 일본·독일 등의 선진국에서는 정밀 핵심 부품의 불량율을 크게 줄이고 보다 정확한 형상의 제품을 생산하기 위해 지속적인 원인 분석 및 DB 화를 수행하고 이를 토대로 정확하

열처리 예측을 위한 많은 연구들이 수행되고 있다.
(1~6)

그러나 우리나라의 경우 이러한 결함 등에 대한 지금까지의 대처방안은 축적된 경험에 의한 데이터와 시행착오의 방법을 사용하고 있어, 열변형에 대한 정확하고 정량적인 제어를 하고 있지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 열처리시의 열변형을 정량적으로 예측하기 위한 전단계로써의, 퀴칭 공정시에 발생하는 열전달을 예측하기 위한 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해 열전달에 관련된 열용량(Heat Capacity)⁽⁷⁾은 문헌연구를 통하여 획득하였으며, 온도에 따라 크게 변화하는 열전도도(Heat Conductivities) 및 대류계수(Convection Coefficients)를 실험을 통하여 획득하였다. 획득한 물성치를 통하여, 개발된 예측모델의 타당성을 실험결과와의 비교를 통해 검증하였다.

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

2. 열적 물성치 획득

2.1 목표 강종

목표 강종은 대표적인 HSLA(High Strength Low Alloy)강으로써 자동차 기어 단조용 소재로 널리 사용되고 있는 SCM420을 선정하였다. 아래의 Table 1에 SCM420 강의 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of SCM420 steel

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr
0.18	0.15	0.60	0.03	0.03	0.15	0.9
-0.23	~0.35	~0.85	below	below	~0.3	1.20

2.2 열용량(Heat Capacity)

문헌조사를 통해 목표 SCM420 강의 온도에 따른 열용량(Heat Capacity)을 얻을 수 있었으며 그 결과를 아래의 Fig. 1에 나타내었다.⁽⁷⁾

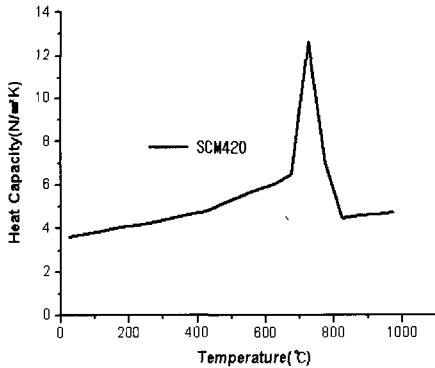


Fig. 1 Heat capacity for SCM 420 steel

2.3 대류계수(Convection Coefficient)

켄칭 공정을 묘사하는 Cooling 실험을 통하여 각 면에서의 냉각커브를 획득한 다음 이를 Inverse Method 를 이용하여 대류계수를 획득하기로 하였다.

2.3.1 냉각곡선 획득 실험

단순화 된 Ring Gear의 4 부위(Bottom, Outer, Top, Inner Surface : Fig. 3참조)에 K Type의 열전대를 접촉하였다. 분당 10°C의 속도로 승온 후 완전하게 오스테나이트화하기 위하여 소재의 A_{C3}온도 이상에서 1시간의 유지 후, 시편을 취출 하여

160°C로 가열된 기름욕조에 담근다. 시험편의 산화를 방지하기 위하여 N₂를 보호 가스로 사용하였다. 아래의 Fig. 2에는 본 실험에 사용된 실험 장비들을, Fig. 3에는 시험편의 형상과 열전대의 부착위치를 나타내고 있으며, Fig. 4에는 켄칭 사이클을 나타내었다.

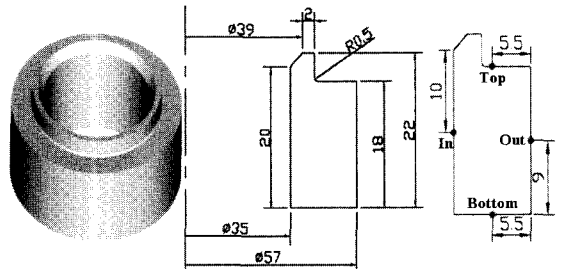
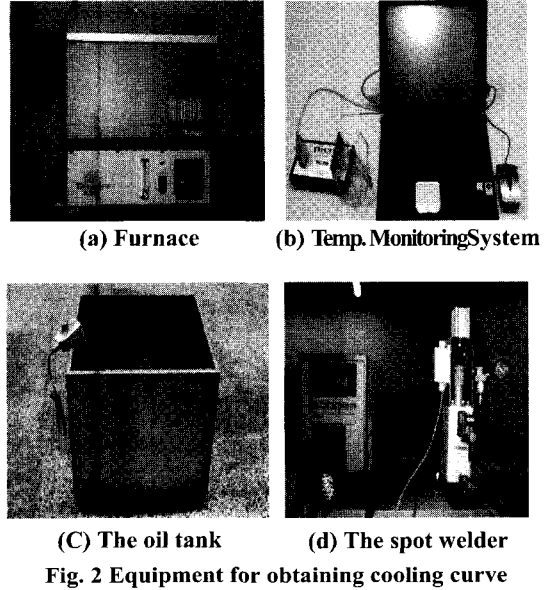


Fig. 3 The geometry of specimen and location of thermo-couples

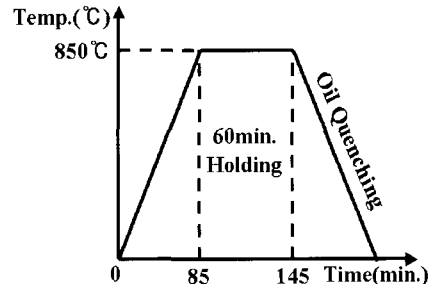


Fig. 4 The quenching cycles for experiments

아래의 Fig. 5에 실험으로 획득한 시험편의 각 부의 냉각 곡선을 나타내었다. 시험편의 형상 및 크기가 작기 때문에, Fig. 5와 같이 Top, Outer, Inner, Bottom 온도차이는 크지 않지만, Bottom 부의 냉각 속도가 제일 빠르고 그 다음으로 윗면, 바깥 그리고 내경부의 순으로 일정한 경향성을 가짐을 알 수 있었으며, 400℃ 부근에서 마르텐사이트로의 상변태로 인한 잠열의 영향을 확인 할 수 있었다.

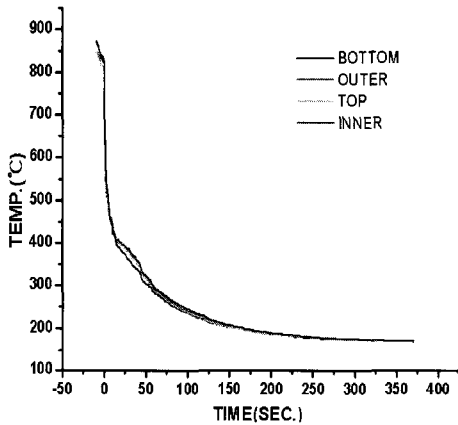


Fig. 5 Sectional cooling curves during quenching

2.3.2 대류계수(Convectional Coefficient)의 획득

대류계수는 실험을 통해 측정된 각 위치의 온도 데이터를 구한 후, FEM(Finite Element Method)⁽⁸⁾을 이용한 역문제법(Inverse method)을 통하여 각 위치별 최적화된 대류계수를 획득하였다.

아래의 Fig. 6에 역 문제법에 대한 알고리즘을 나타내고 있다. 즉, 실험에서 획득한 각 부위별 온도(T_{exp})와 프로그램을 통해 입력되는 h 값을 통해서 계산된 해석상의 온도(T_{opt})와의 차이가 $\epsilon(1^\circ\text{C}$ 이하) 범위로 좁혀질 때 최적의 h 값으로 선택하였다. 이 알고리즘을 통하여 얻은 SCM420 강의 최적의 h 값을 아래의 Fig. 7에 나타내었다.

실험결과를 살펴보면, 냉각특성이 잘 나타나는 Bottom 부의 대류계수가 가장 큰 값을 나타나야 하지만, 다른 면들의 값들과 비교를 했을 때 크게 차이가 나타나지 않았다. 이는, 대류를 통한 열전달에 영향을 미치는 인자가 대류계수 뿐만 아니라, 소재의 형상 및 위치에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

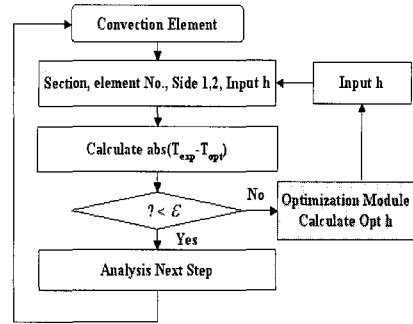


Fig. 6 Inverse method algorithm for obtaining optimal h

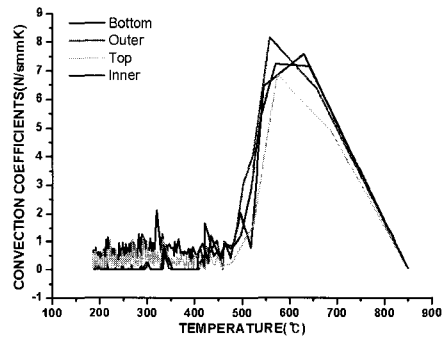


Fig. 7 Optimal h through inverse method

2.4 열전도계수(Thermal Conductivities)

2.4.1 온도에 따른 열전도계수의 측정

열전도 계수는 먼저 온도에 따른 열확산도를 측정하여 아래의 식 (1)을 통하여 역으로 열전도 계수를 구하기로 하였다.

$$K = D\rho c_p \quad (1)$$

여기서 D 는 열확산도를, ρ 는 재료의 밀도 그리고 c_p 는 재료의 비열을 나타낸다.

계산을 위한 재료의 밀도 및 비열에 대한 값은 초기 문헌조사를 통하여 얻은 값을 사용하였으며, 열확산도 시험 결과는 한국 표준과학연구원이 보유하고 있는 펄스 레이저법(Pulse Laser Method)을 이용한 열확산도 측정 장치를 사용하여 획득한 결과이다.

아래의 Fig. 8에 열확산도 시험편의 형상을 나타내었고, Fig. 9에는 실험을 통해 획득한 열확산도와 이전의 문헌조사를 통해 획득한 물성치를 이용하여

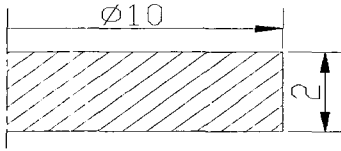


Fig. 8 The geometry of thermal diffusivity specimen

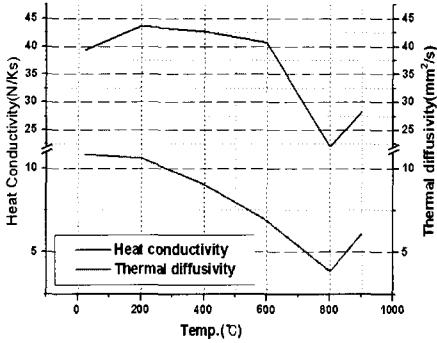


Fig. 9 The calculated thermal conductivity

여 역산한 열전도도를 나타내었다. 고체에 있어서의 열전도는 격자파동을 통하여 전달되므로 온도의 상승에 따라 원자간 거리가 증가하게 되어 열전도도에 있어서 불리하게 작용한다는 사실을 실험을 통하여 확인 할 수 있었다.

2.4.2 마르텐사이트 단일상의 열전도도 측정

또한 냉각 또는 급랭 시에는 마르텐사이트 상변태가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 상변태로 인한 물성의 변화를 고려해 주기 위하여 마르텐사이트 단일 상에서의 열전도도를 측정하였다.

아래의 Fig. 10에는 실험에 사용된 장비를 나타내고 있으며, Fig. 11과 Fig. 12에는 시험편의 도면 및 형상과 실험 결과를 각각 나타내고 있다.



Fig. 10 P.A. HILTON Model No. H940

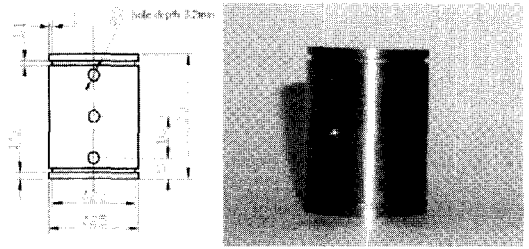


Fig. 11 The geometry of thermal conductivity specimen

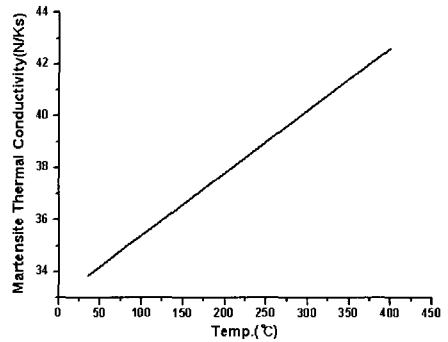


Fig. 12 Thermal conductivity for martensite phase

Fig. 12에서 살펴보면 마르텐사이트에서의 열전도도 값은 소재의 온도에 따른 값보다 비례 낮게 측정되었다.

이는 열전달을 격자파동의 측면에서 볼 때 마르텐사이트에서의 BCT 조직이 상온에서의 BCC 조직에 비해서 불리하므로 낮은 값을 가진다고 예상한다.

2.4.3 마르텐사이트 상변태 운동방정식

마르텐사이트 상변태 온도를 알기 위해서 Andrew의 선형 형태⁽⁹⁾의 식을 사용하였으며 그 식은 아래와 같다.

$$M_s(°C) = 539 - 423C - 30.4Mn - 7.5Si - 12.1Cr - 17.7Ni - 7.5Mo + 10Co \quad (2)$$

식 (2)를 통하여 계산한 SCM420 강의 Ms 온도는 416°C임을 알 수 있다.

또한 본 연구에서 적용한 마르텐사이트 상변태 동역학적 모델은 Koistinen과 Marburger⁽¹⁰⁾가 제안한 것으로 아래의 식 (3)과 같다.

$$y = 1 - \exp[-a(Ms - T)] \quad (3)$$

여기서, y 는 마르텐사이트의 상분율, Ms 는 마르텐사이트 상변태 시작 온도를 나타내고, 대부분의 강에서는 $a = 1.1 \times 10^{-2} K^{-1}$ 의 값을 나타낸다.

아래의 Fig. 13에 식 (3)을 이용하여 계산한 온도에 따른 마르텐사이트의 상분율의 변화를 나타내었다. Ms 온도는 Andrew의 식을 이용하여 계산한 값으로 416°C로 적용하였다.

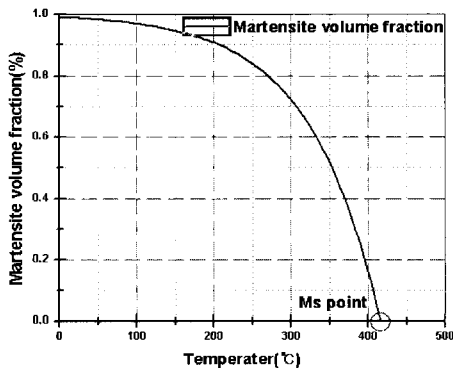


Fig. 13 Martensite volume fraction

마르텐사이트 단일상에서의 값과 앞서 구한 열확산도를 통한 열전도도값을 혼합법칙(mixture rule)을 이용하여 예측모델에 적용하였다.

$$K = \zeta_M K_M + (1 - \zeta_M) K_E \quad (4)$$

여기서, ζ_M 과 K_M 는 마르텐사이트 상분율과 열전도도를, K_E 는 온도에 따라 측정된 열전도도값을 나타낸다.

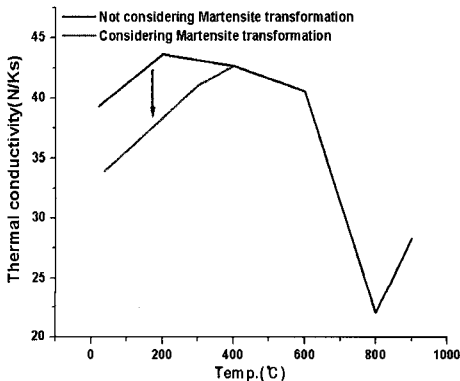


Fig. 14 Thermal conductivity during cooling process

이 상의 과정을 통하여 획득한 열전도도를 Fig. 14 에 나타내었다. 이전의 열전도도와 많은 차이를 나타냄을 알 수 있으며 마르텐사이트로의 상변태시의 열전도도 변화도 고려해주어야 함을 실험의 결과로 알 수 있었다.

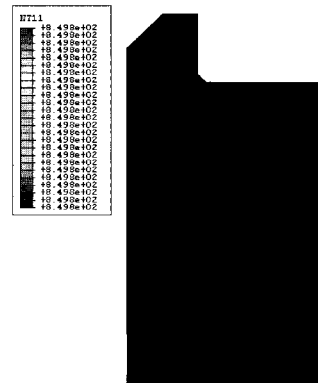
3. 열전달 예측 모델 정립

3.1 열전달 모델링

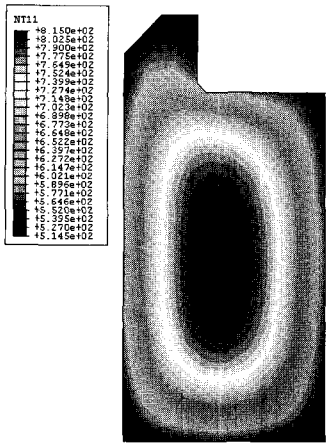
퀀칭 시의 열전달 해석을 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. 열전달 모델의 형상은 대류계수 측정 실험에 사용되었던 것과 동일한 링 기어를 사용하여 2D, 축대칭의 조건으로 해석을 수행하였다. 실험 시에는 850°C에서 취출을 하였으나 공기 중에서 냉각되는 효과를 고려하여 해석에서는 링 기어의 초기 온도는 830°C로 두었으며 외부온도는 기름 욕조의 온도인 160°C로 두어 해석을 수행하였다. 아래의 Table 2에 시뮬레이션 조건을 정리하였으며, Fig. 15에는 초기, 1s, 100s, 500s일 때의 해석에서의 냉각 양상을 나타내었다.

Table 2 The simulation condition

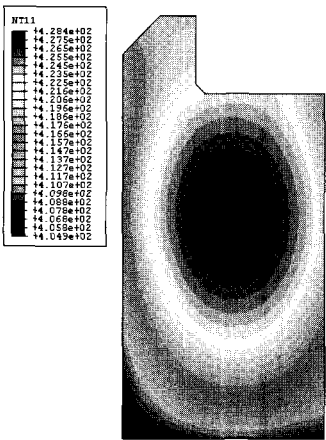
Variables	Input data
Density	0.00785g/mm ³
Specific heat	Fig. 1
Convection coefficient	Fig. 7
Thermal conductivity	Fig. 13
Initial Temperature	850°C
Ambient Temperature	160°C



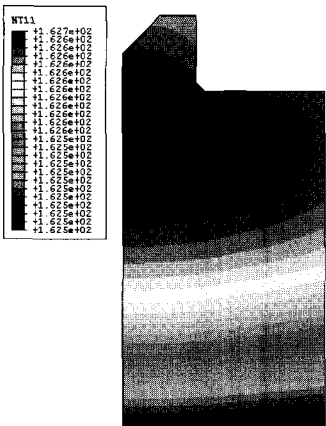
(a) Initial condition



(b) t = 1 sec



(c) t = 100 sec

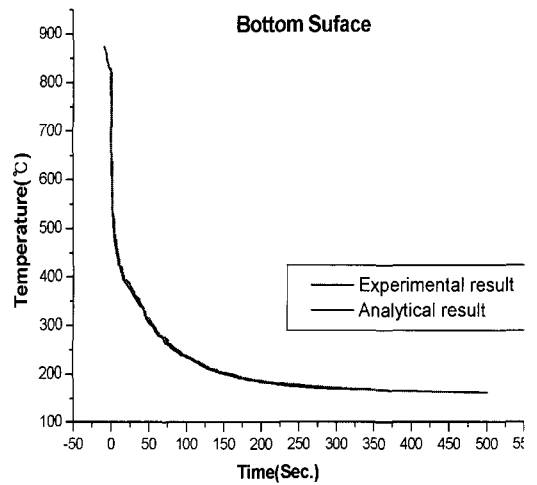


(d) t = 500 sec

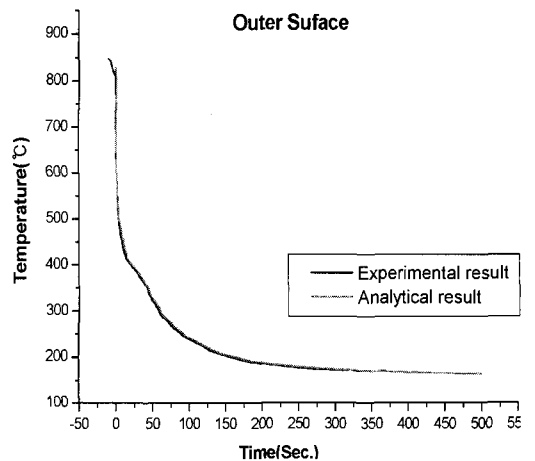
Fig. 15 Simulation results

시뮬레이션 결과, 냉각의 양상이 실험의 결과와 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 이를 정량적으로 비교하기 위하여 실험에서 열전대를 부착하였던 각 지점에서의 온도 데이터를 추출하였다.

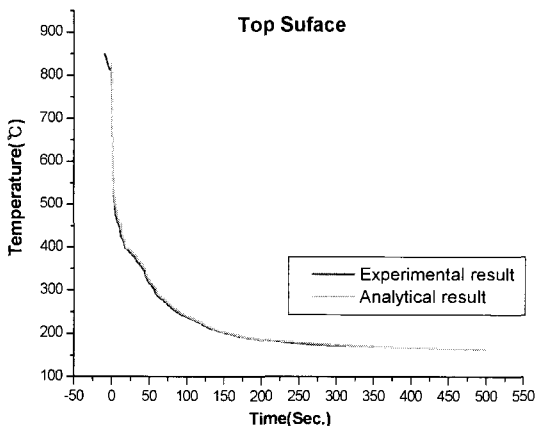
Fig. 16에 해석을 통하여 추출한 온도 데이터와 실험을 통하여 획득한 데이터를 열전달 모델의 타당성을 검증하기 위하여 비교하였다. 그 결과 해석결과와 실험결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.



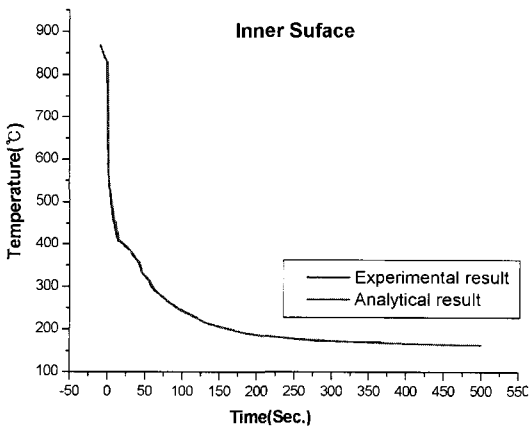
(a) Bottom section



(b) Outer section



(c) Top section



(d) Inner section

Fig. 16 Comparison between analytical and experimental results

온도와 상에 따른 열전도도의 확보, 냉각곡선의 획득 실험 및 역 문제 알고리즘을 통한 최적의 h 값을 획득하여 구축된 예측모델은 열전달 해석 시 그 정확도가 매우 우수함을 알 수 있었다. 즉, 퀘칭 공정시에 발생하는 열전달 예측 모델이 정밀도 높게 정립되었음을 보여주고 있다.

4. 결론

SCM420 강의 퀘칭 시 열전달 예측모델 개발에 관한 연구를 수행한 결과 아래와 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

(1) 온도에 따른 열전도도와 냉각 곡선 획득 실험을 통해서 실험데이터를 획득 하였으며 이러한 실험결과를 토대로 하여 역 문제 알고리즘을 통한 최적의 h 값을 획득하였다. 이로 인해 다른 형상에 대해서도 간단하게 h 값을 획득할 수 있는 기반을 마련하였다.

(2) 열전도도 실험을 통해서 온도에 의한 열전도 변화 추이를 확인 한 결과, 마르텐사이트 상변태가 열전도변화에 영향을 준다는 것을 확인 하였으며, 이를 반드시 고려해주어야 함을 알 수 있었다.

(3) 온도와 상에 따른 열전도도, 위치와 온도에 따른 h 값의 고려하여 개발한 열전달 예측모델을 통한 예측결과와 실험을 통한 냉각곡선이 잘 일치함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 국제 IMS 프로그램 연구 개발사업의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고 문헌

- (1) G. M. Ludtka, W. H. Elliott and Tracy Pattok., 1998, "Predictive Model and Methodology for Heat Treatment Distortion", The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space INTERNATIONAL, August 11~13.
- (2) Cheng Heming, Huang Xieqing, Wang Honggang., 1999, "Calculation of the residual stress of a 45 steel cylinder with a non-linear surface heat-transfer coefficient including phase transformation during quenching", Journal of Material Processing Technology, Vol. 89~90, pp. 339~343.
- (3) S. Jahanian and M. Mosleh., 1999, "The Mathematical Modeling of Phase Transformation of Steel during Quenching ", Journal of Material Engineering and Performance, Vol. 8, pp. 75~82.
- (4) Dong-Ying Ju, Chuncheng Liu and Tatsuo Inoue., 2003, " Numerical modeling and simulation of carburized and nitrided quenching process ", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143~144, pp. 880~885.
- (5) I. Elkatatny, Y. Morsi, A. S. Blicblau, S. Das and E. D. Doyle., 2003, " Numerical analysis and experimental

- validation of high pressure gas quenching”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 42 No. 4, pp. 417~423.
- (6) C. C. Liu, X. J. Xu and Z. Liu., 2003, “A FEM modeling of quenching and tempering and its application in industrial engineering”, Finite elements in analysis and design, Vol. 39 No. 11, pp. 1053~1070.
- (7) 連続鋼版加熱爐における傳熱實驗 計算方法, 昭和 45 年, pp. 80~87, 日本鐵鋼協.
- (8) 장지웅., 2002, “FE program development for predicting and controlling thermal deformation in heat treatment”, 부산대학교, 석사학위논문.
- (9) K. W. Andrew, 1965, JISI, Vol. 203, p. 721.
- (10) D. P. Koistinen and R. E Murbuger., 1959, "A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steel", Acta Metallurgica, Vol.7, pp. 59~60.