

論文

개량차분법에 의한 임의의 형상의 열처리제품의 급냉경화 해석

金桂洙 · 宋寧範 · 洪俊杓

연세대학교 공과대학 금속공학과

Computer Simulation of Quench-Hardening of Alloy Steel for
Structural Purposes by the Modified Finite Difference Method

K. S. Kim, Y. B. Song and C. P. Hong

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

ABSTRACT

Understanding and control of thermal history of heat-treated components are very important in heat treating process. A computer program was developed for prediction of thermal history in quenching process with various cooling media and agitation conditions. Computer simulation of heat flow in quenching treatment of spur gear of SCM 22 H was carried out by two and three dimensional finite difference method. Distributions of microstructure and hardness in heat-treated spur gear were predicted by computer simulation, and the results showed a good agreement with the experiments. It was concluded that the

1. 서 론

열처리 작업에 있어서 제품을 가열, 유지 및 냉각시키는 동안의 열이력(thermal history) 및 제품내의 온도분포를 정확하게 해석하고, 이들을 정량적으로 제어하는 것은 제품의 품질향상 및 생산성을 높이는데 있어서 필수적인 요건의 하나이다. 이중에서도 특히 강의 냉각시에 있어서 강 및 냉각매질의 종류, 냉각조건, 제품의 형상 및 크기등에 따른 열이력 및 온도분포의 변화는 최종제품의 성능과 직접관계를 갖고 있다. 최근 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 열처리 프로세스의 설계에 관해 많은 연구가 발표되고 있다.^{1)~4)}

그러나 이러한 연구의 대부분은 단순한 형상의 열처리 부품의 냉각시의 열전달해석을 주로 다루고 있으며, 복잡한 임의의 형상에 대하여 열전달해석으로부터 미소

조직 및 경도의 예측등에 관한 연구는 그다지 수행되고 있지 않은 실정이다.⁵⁾⁷⁾ 따라서 컴퓨터시뮬레이션에 의한 열처리 프로세스 설계법을 보다 정량적으로 응용하기 위해서는 복잡한 임의의 형상의 열처리부품에 대한 해석법을 개발할 필요가 있다.

본 저자는 이러한 목적을 위하여 이미 계단상의 축대칭 형상을 갖는 구조용 합금강의 켄칭시에 있어서의 열전달해석을 실시하여, 켄칭매질의 종류, 교반의 효과등에 따른 열전달계수의 평가를 하였다. 이러한 결과들 토대로 냉각속도 및 시간의 예측, 미소조직 및 경도의 예측이 가능토록 하였다.⁸⁾

본 연구에서는 컴퓨터에 의한 열처리프로세스 설계시스템을 실제적인 열처리 부품에 보다 효율적으로 적용하기 위하여, 2차원 및 3차원 개량차분법에 의한 열전달해석 프로그램을 개발하여 현재 자동차용 기아재료로

널리 쓰이고 있는 SCM 22 H강의 켈칭 작업에 적용하므로서, 냉각매질의 종류 및 교반효과에 따른 열처리 부품의 각 위치에서의 냉각속도, 미소조직 및 경도분포를 예측할 수 있도록 하였다. 해석결과와 실험결과를 비교검토했으므로, 복잡한 임의의 형상의 열처리부품의 켈칭작업을 보다 효율적이며 정량적으로 제어할 수 있는 기본 방안을 제시하고자 한다.

2. 열이력 해석모델과 개량차분식의 작성

2.1 개량차분법에 의한 열전달 해석

열처리 과정에서 온도변화와 더불어 상변화 및 열응력의 발생이 수반되지만 여기에서는 열적변화에 대해서만 취급하기로 한다. 열처리 제품내의 열전도 기초 미분방정식은 3차원인 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1)$$

여기서 ρ : 밀도, C : 비열, K : 열전도율,
 T : 온도, t : 시간

본 연구에서는 비정상 열전달문제를 해석하기 위해서 수학적 취급이 간단하고, 열처리 제품의 형상이나 크기의 변화에 관계없이 적용될 수 있는 개량차분법을 사용하였다.

개량차분법은 유한차분법과는 달리, 미소 분할요소에 대해서 "Fourier의 에너지보존의 법칙"을 적용한 다음과 같은 차분식을 도입할 수가 있어서 임의의 복잡한 형상에 대한 해석에 유리하다.

$$T_i^{t+\Delta t} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\rho C V_i} \left(\sum_{j=1}^6 B_j A_j\right)\right) T_i^t + \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V_i} \sum_{j=1}^6 B_j A_j T_j^t \quad (2)$$

여기서 $T_i^{t+\Delta t}$: 요소 i 의 시간 $t+\Delta t$ 에서의 온도

T_i^t : 요소 i 의 시간 t 에서의 온도

Δt : time step

A_j : 요소 i 와 이웃요소 j 사이의 면의 면적

B_j : 요소 i 의 j 번째 이웃요소사이의 면의 경계 조건

V_i : 요소 i 의 체적

본 연구에서는 시간에 대해 전진차분법(explicit finite method)을 사용하고 있어 다음식에 의하여 안정시간상

한계가 계산된다.

$$1 - \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V_i} \left(\sum_{j=1}^6 B_j A_j\right) \geq 0 \quad (3)$$

2.2 해석모델

2차원 및 3차원 개량차분법에 의해서 비정상 열전달 해석을 행한 평기아의 단면사진 및 해석모델을 Photo.1과 Fig.1에 나타내었다. 평기아의 열전달해석을 행할 경우 모든 이(tooth)의 냉각조건은 동일하므로 대칭성을 고려하여 한 이에 대해서만 해석을 행하였으며, Fig.1에 표시한 바와 같이 2차원 해석의 경우는 Z축의 열전달을 고려하지 않고 이(tooth)의 형상이 좌우 대칭이므로 중심면을 반만 해석하였으며, 3차원 해석시에는 Z축의 열전달을 고려하여 해석하였다.

열전달계수 및 열물성치등은 기초실험 및 4단가공 시편의 열전달 해석에 의해서 확립된 값을 사용하여 평기아의 온도분포를 계산하였다. 2차원 및 3차원 비정상 열전달해석을 위한 요소분할도를 Fig.2에 표시한다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 2차원 개량차분법에 의한 열이력 곡선 및 미소조직의 예측

평기아를 교반하지 않은 상태에서 유냉 및 수냉한 경우, 이끝면(tooth face)으로부터 길이방향으로 3mm, 8mm, 13mm, 19mm지점의 냉각곡선을 2차원 개량차분법에 의한 비정상 열전달해석을 통하여 계산하였다. 상기 각 지점에서 계산에 의한 냉각곡선을 연속냉각 변태곡선⁹⁾에 적용한 결과를 Fig.3 및 4에 나타내었다.



Photo.1. Photograph of spur gear.

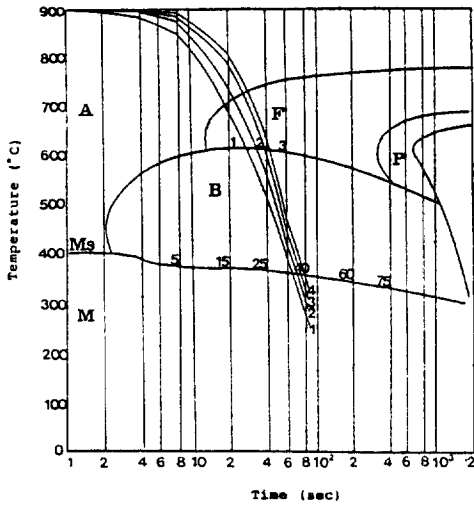


Fig. 3. Cooling curves of SCM 22 H steel (spur gear) superimposed on a CCT diagram for oil quenching without agitation.
 1 : 3 mm from tooth face 3 : 13 mm from tooth face
 2 : 8 mm from tooth face 4 : 19 mm from tooth face

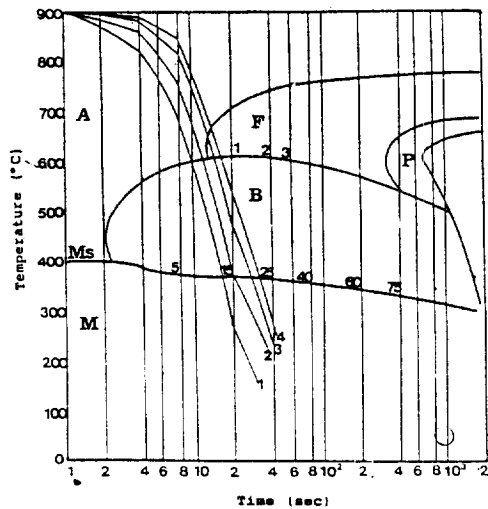


Fig. 4. Cooling curves of SCM 22 H steel (spur gear) superimposed on a CCT diagram for water quenching without agitation.
 1 : 3 mm from tooth face 3 : 13 mm from tooth face
 2 : 8 mm from tooth face 4 : 19 mm from tooth face

유냉인 경우를 고려하면, 이끝면으로부터 3mm지점은 소입 후 약 18초 후에 Fs선에 도달하여 64초까지 오스테나이트의 34% 정도가 페라이트와 베이나이트로 변태한 후, Ms선에 도달하여 약 66% 정도의 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태한다. 따라서 이끝면으로부터 3mm지점의 최종조직은 34% 페라이트 및 베이나이트 + 66% 마르텐사이트의 혼합조직으로 예측된다.

한편 이끝면으로부터 19mm지점은 소입 후 약 30초 후에 Fs선에 도달하여 80초까지 전 오스테나이트가 약 40% 페라이트 및 베이나이트로 변태한 후, Ms선에 도달하여 약 60% 정도의 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트 변태를 일으키게 된다. 이 지점의 최종조직은 40% 페라이트 및 베이나이트 + 60% 마르텐사이트의 혼합조직으로 예측된다.

교반을 행하지 않고 수냉한 경우를 고려하면, 이끝면으로부터 3mm지점의 최종조직은 13% 베이나이트 + 87% 마르텐사이트의 혼합조직이며, 19mm지점은 22% 페라이트 및 베이나이트 + 78% 마르텐사이트의 혼합조직으로 예측된다.

이와같이 유냉 및 수냉인 경우의 냉각곡선을 비교하면 수냉의 경우가 유냉에 비하여 증기막 단계가 감소하고 비등단계에서의 냉각속도가 증가하고 있으며, 표면부와 중심부의 냉각속도의 차이가 더 현저하다는 것을 알 수 있다. 한편 교반을 행하지 않고 유냉 및 수냉한 경우, 이끝면으로부터 3mm, 19mm부위의 조직사진을 Photo.2에 나타내었다.

유냉인 경우를 고려하면 모든 조직이 혼합조직을 나타내고 있으며 이끝면으로부터 19mm지점은 많은 페라이트 및 베이나이트가 존재하고, 3mm지점은 침상 마르텐사이트가 나타나고 있는 반면, 수냉인 경우는 모든 조직에 있어서 침상 마르텐사이트가 나타나고 있으며 이끝면으로부터 3mm인 부위는 침상 마르텐사이트의 분율이 보다 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

이러한 사실은 앞의 냉각곡선과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 실험적인 해석이 용이하지 않은 평가아를 2차원 개량차분법에 의한 비정상 열전달해석을 통하여 평가아 각 부위에서의 온도분포를 해석함으로써 최종조직을 대략적으로 예측할 수 있으며 임의의 형상인 열처리 제품의 조직설계에 기준점을 제공할 수 있다.

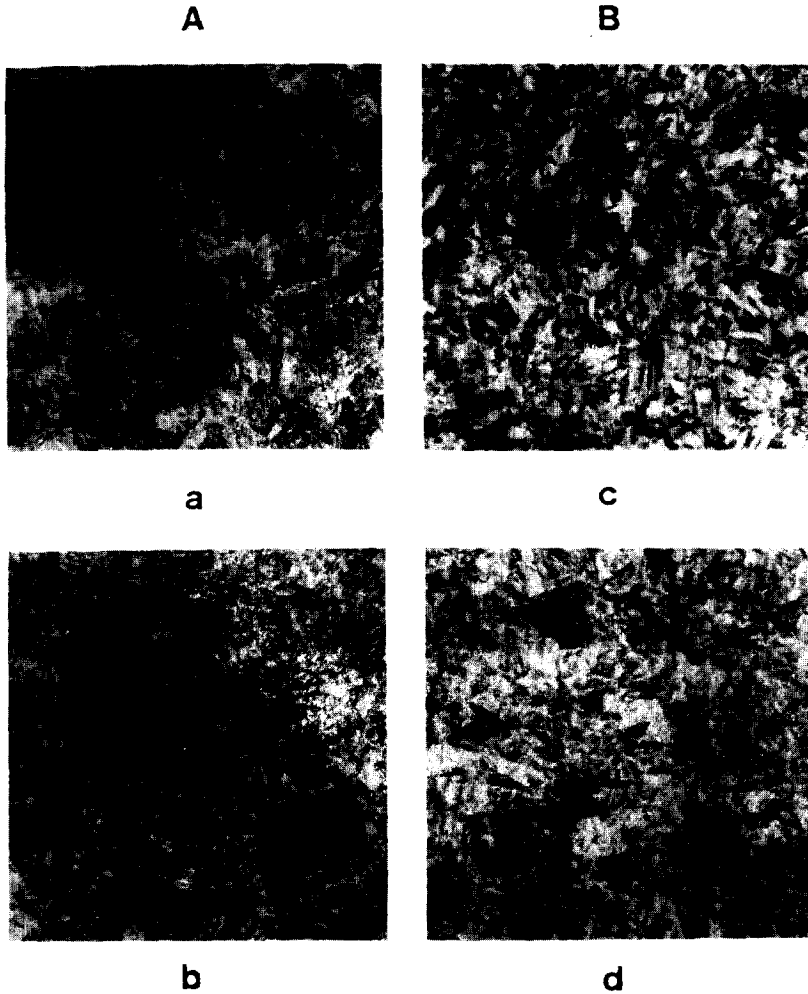


Photo. 2. Microstructures of SCM 22 H steel (spur gear) for oil and water quenching without agitation.

A : oil quenching B : water quenching
 a : 3 mm from tooth face c : 3 mm from tooth face
 b : 19 mm from tooth face d : 19 mm from tooth face

3.2 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 냉각시간 및 경도예측 교반을 행하지 않고 평기아를 유냉 및 수냉한 경우, 평기아 각 부위에서의 측정된 경도값과 2 차원 개량차분법에 의해서 계산된 등경도곡선을 Fig.5 와 Fig.6 에 나타내었다.

그림에서 실선은 2 차원 개량차분법에 의한 비정상 열전달해석을 통해 평기아 각 부위에서 900℃-400℃까지의 냉각시간을 계산한 후 이것을 등냉각 시간곡선으로 나타낸 것이다. 또한 등경도 곡선은 등냉각 시간곡선을

C.C.T.Diagram으로부터 계산한 냉각시간과 경도와외 관계로부터 경도값으로 치환하여 표시하였다. 기호는 실험적으로 측정된 경도값으로서, 유냉의 경우 이끝면 (tooth face) 으로부터 3 mm, 7 mm, 9 mm, 12 mm, 17 mm, 21 mm 지점의 경도값이며, 수냉의 경우를 고려하면 이끝면으로부터 3 mm, 6 mm, 9 mm, 13 mm, 15 mm, 24 mm 지점의 경도값이다.

실험적으로 측정된 경도값과 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 계산된 등경도곡선은 유냉 및 수냉의 경우 거의

일치하고 있다. 한편 교반을 행하지 않고 수냉한 경우 실험적으로 측정된 경도 분포와 3차원 개량차분법에 의해서 계산된 등경도곡선을 Fig.7에 나타내었다. 3차원 해석결과를 2차원 해석과 비교하면 22초-27초사이에 900°C-400°C까지 냉각되는 지역은 증가하고 27초이후에 냉각되는 지역은 감소하고 있다.

즉 경도분포가 39.6-41.5 범위의 지역은 증가하고 39.6 이하인 지역은 감소한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 2차원 해석시 Z축으로의 열전달을 고려하지 않은 반면에 3차원 해석의 경우는 Z축으로의 열전달을 고려하였기 때문이다.

이와같이 평기아의 열전달해석을 행함에 있어 해석대상이 3차원 형상이므로 3차원 해석이 2차원 해석에 비하여 보다 더 정확하다는 것을 알 수 있다. 이상의 연구결과로부터 실험적인 해석이 용이하지 않은 임의의 형상인 기아제품의 열처리시, 본 연구에서 수행한 컴퓨터시뮬레이션에 의해 제품의 형상 및 냉각조건에 따른 냉각속도를 예측하고 이에 따른 미소조직 및 기계적 성질을 제어하므로써 최종 열처리 제품의 품질향상을 가져올 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 열처리 공정의 정량적인 설계를 위하여 퍼스널 컴퓨터에 의해 열처리 설계를 가능케 하는 열전달 해석 시스템을 개발하였다. 임의의 형상의 열처리 제품에의 적용성을 검증하기 위해서 SCM 22 H 강재 평기아의 켈칭작업의 열전달 해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차원 및 3차원 개량차분법에 의해 임의의 형상의 열처리 제품의 비정상 열전달해석을 통하여 켈칭작업의 시뮬레이션이 가능하게 되었다.

(2) 임의의 형상인 평기아의 경우 실험적으로 측정된 경도분포와 2차원 및 3차원 개량차분법에 의해서 계산된 등냉각시간곡선으로부터 치환된 등경도곡선은 거의 일치하였다.

따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제품의 형상 및 냉각조건에 따른 온도분포를 해석하고 냉각시간 및 이에 의존하는 경도분포를 예측함으로써 보다 더 정량적인 열처리 해석이 가능하고, 열처리 조업을 효율적으로 제어할 수 있게 되었다.

참고문헌

1. M.Bamberser and B.Printz : Materials Science and Technology, 2, p.410, 1986.
2. 권동철, 홍준표, 김문일 : 대한금속학회지, 26, 3, p.242, 1988.
3. D.H.Breen, G.H.Walter and C.J.Keith : Met. Prog., 104, p.76, 1973.
4. D.W.Ingham and P.C.Clark : Heat Treatment of Metals, 10, p.91, 1983.
5. 井口信洋, 山木一道 : 熱處理, 25, p.311, 1985.
6. J.F.Janowak and R.B.Gundlach : J. Heat Treating, 4, p.1, 1985.
7. P.A.Blackmore and R.A.Harding : J. Heat Treating, 3, p.4, 1984.
8. 김계수, 홍준표 : 熱處理工學會誌, vol.2, No. 2, P.1-9, 1989.
9. 日本鐵鋼協會 : 鋼의 熱處理, 丸善株式會社, p.388, 1969.
10. K.Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, P.82, 1982.

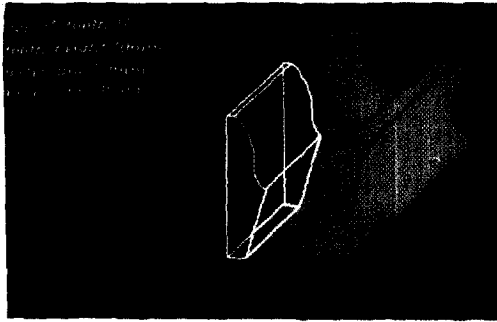


Fig.1. Schematic of spur gear.

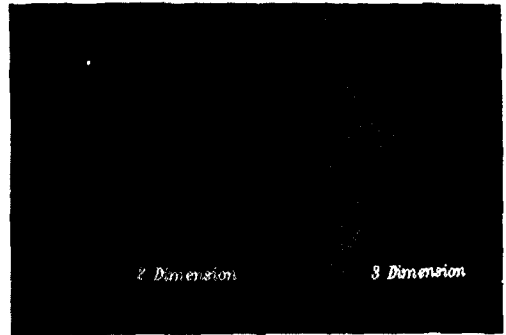


Fig.2. Mesh diagram of tooth in spur gear.

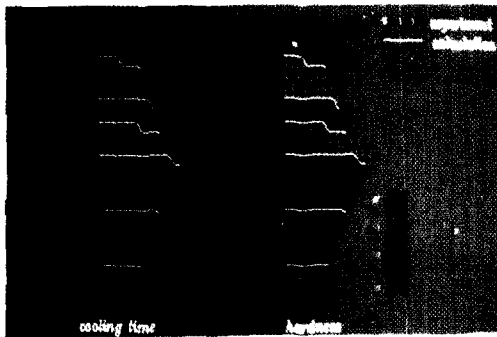


Fig.5. Comparison of experimental hardness distributions with those by two dimensional simulation for oil quenching without agitation.

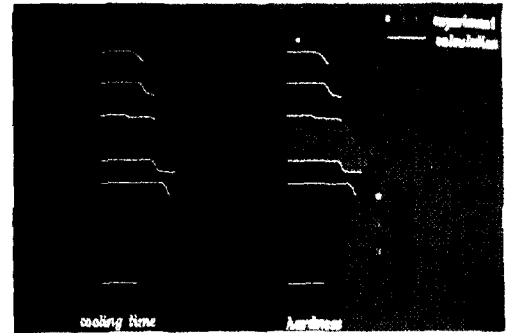


Fig.6. Comparison of experimental hardness distributions with those by two dimensional simulation for water quenching without agitation.

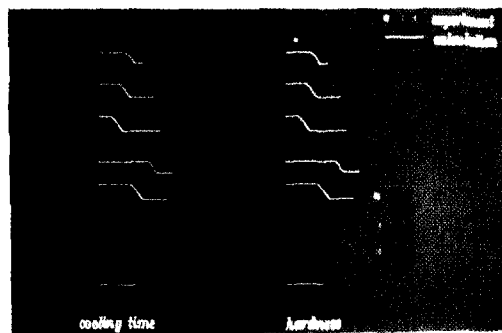


Fig.7. Comparison of experimental hardness distributions with those by three dimensional simulation for water quenching without agitation.