

스마트 열처리 공장을 위한 engineering S/W의 제작 및 응용

[글] 손윤호^{1*}, 강지영² (주)유진에스엠씨¹, (주)동우HST² yjismcoo@hanmail.net

1. 서 론

열처리는 철강소재로 이루어진 제품을 일정한 분위기 하에서 소정의 시간 동안 가열하여 원하는 미세조직을 구현함으로써 제품에서 필요로 하는 기계적 특성을 얻게 하는 조작이다. 대부분의 철강제품은 사용 전에 열처리 공정을 거치고 있으므로, 열처리는 뿌리산업의 핵심구성요소로 간주되고 있다. 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 열처리 공정으로는 소입/소려(Quenching & Tempering, 이하 Q/T)처리, 침탄(Carburizing) 열처리, 질화(Nitriding) 열처리 등이 있다. 대부분의 열처리 공장들은 규모가 매우 영세하고 노동집약적이며, 열악한 환경 및 과다 에너지 소비 등 여러 문제점들을 지니고 있어, 열처리 산업은 전형적인 저 부가가치 산업으로 인식되고 있다.

최근 독일 등 선진국이 제조 스마트화 전략을 실행함에 따라 국내에서도 여러 산업분야에서 정보통신기술과 로봇기술 등을 활용하여 이를 모방하려는 시도가 일어나고 있다. 이에 열처리 엔지니어링 S/W가 미래 스마트 열처리 공장의 핵심 두뇌 역할을 수행할 것이라는 것이 예상된다. 저렴한 열처리 엔지니어링 S/W의 제작 및 보급을 통해 숙련기술자의 의존도를 낮출 수 있고, 생산성을 극대화 시켜 제품개발의 비용과 시간을 획기적으로 낮출 수 있을 것이다. 또한 이를 통하여 각 열처리공장들이 규모와 관계없이 동등 수준의 품질을 유지할 수 있게 될 것이며, 소형 열처리공장의 기술경쟁력도 유지시키고 향상시킬 수 있다.

열처리 엔지니어링 S/W는 열처리 공정 모니터 및 제어를 위한 on line 프로그램과 열처리 공정 해석 및 공정변수 결정을 위한 off line 프로그램으로 나눌 수 있다 [1]. 특히 S/W 개발자들은 열처리 공정 중 상변화과정을 모델링하고 최적 재료의 선택, 특성예측 및 열처리공정 설계를 위한 program package의 개발을 핵심 목표로 잡고 있으며, 목표를 다시 세분하여 특성예측프로그램(property prediction program)과 공정설계프로그램(process planning program 혹은 recipe program)을 개발 타깃으로 삼는다. 열처리 공

정 S/W 사용자는 이러한 엔지니어링 S/W를 사용하여 제품의 품질 및 에너지 사용 등을 보다 손쉽게 최적화시킬 수 있다. 이외에도 재료선택, 열처리비용 산출 등 여러 부대 효과들도 노릴 수 있으며, 숙련 기술자에 대한 의존도 역시 낮출 수 있게 된다. 예를 들어, 진공침탄 열처리의 경우에는 이러한 S/W없이도 공정 진행이 거의 불가능에 가깝다.

필자는 열처리분야의 종사자로서 국내 열처리 산업에서 활용될 수 있는 열처리 엔지니어링 S/W 제작을 시도해왔으며, 프로그램은 KHTM(Korean Heat Treating Manager)이라고 명명하고 현재 침탄 열처리 version인 KHTM_C 와 질화 열처리 version인 KHTM_N 의 제작을 시도 중이다. 물론 고농도침탄(super carburizing), 고용질화(solution nitriding), SUS질화(S-Phase Nitriding), 고온확산코팅(High temperature coating) 등 매우 다양한 세부 열처리 기술에 대한 S/W의 개발이 필요하지만, 현재는 시급히 범용적으로 사용되는 기술에 대한 S/W개발을 진행 중이다. 본 논문에서는 열처리분야에서 가장 많이 사용되는 침탄 및 질화 열처리 기술의 개요를 설명하고 열처리 엔지니어링 S/W의 제작과정을 기술한 후 이러한 S/W의 사용으로 얻게 되는 실제적인 응용효과와 향후 전망에 대해 논의하고자 한다.

2. 열처리공정

먼저 침탄 및 질화 열처리의 개략적인 공정과 그에 따른 미세조직 변화와 표면경화기구에 대해 살펴보자 한다.

2.1 침탄 열처리

보통 국내에서 널리 사용되고 있는 대기압 침탄 열처리는 930°C 부근의 고온에서 메탄 혹은 프로판과 공기를 일정 비율로 혼합한 후 변성로에서 투입·변성시킨 흡열형가스(RX가스) 혹은 액체의 메탄올을 로 내에 투입하여 진행된다 [2]. 이 과정을 통하여 제품 표면에 탄소를 흡착, 내부로 확산시켜 원하는 탄소의

농도분포를 얻게 한다. 이때 로 내 침탄 분위기는 산소 센서를 이용하여 탄소포텐셜(Cp), 즉 탄소활동도(carbon activity, a_c)를 측정함으로써 제어된다. 이때 RX가스에 포함된 CO가스조성은 불변으로 가정한다.



$$a_c = \frac{P_{CO}}{P_{O_2}^{0.5}} \quad (2)$$

보통의 침탄공정 사이클은 부스트 및 확산 2단계로 구성되고, 부스트 단계에서는 탄소포텐셜을 높게 세팅하여 침탄량을 늘리고 확산단계에서는 목표 표면농도에 도달되도록 포텐셜을 낮추어 작업한다. 침탄공정 후 다음 냉각실로 제품을 이동시킨 다음 적당한 냉각유에 침적 급냉시키면 얻고자 하는 경도분포곡선을 얻을 수 있다. 관리포인트로는 통상 최대표면경도, 유효 침탄깊이(Hv550 지점, 대략 0.36 wt%C) 및 심부경도가 있고, 그 외 대기압 침탄 열처리의 경우 표면의 산화층 두께도 일정한 수준 이하로 제약을 받게 된다.

한편 대기압 침탄 열처리에 비해 진공침탄 열처리의 경우는 침탄공정 중에 침탄성 가스를 계속 로 내에 주입하는 것이 아니라 펄스형태로 주입한다 [3,4]. 사용되는 침탄성 가스는 1960-70년대 메탄가스와 프로판 가스가 사용되었으나 90년대 이후부터는 대부분 아세틸렌 가스를 사용하며, 압력은 10 Torr 내외를 유지하고 작업범위도 850-1050°C로 매우 넓다. 아세틸렌 가스가 철강 표면에서 직접 열분해하여 탄소를 제품에 공급하기 때문에 분위기의 탄소포텐셜 즉 탄소 활동도(carbon activity)는 1 보다 훨씬 큰 값을 갖게 되므로 센서에 의한 분위기제어는 더 이상 의미가 없게 된다. 이에 따라 진공침탄이 잘 발달된 미국 및 유럽의 회사들은 수학적 계산을 통한 공정제어에 의존하고 있다. 아울러 진공침탄의 경우에는 냉각실을 냉각유 대신 20bar 가스퀵칭이 가능하도록 구성하는 것이 일반적이어서 매우 환경친화적이며 에너지 절감이 가능하다.

침탄 열처리는 주로 0.2 wt%C 수준의 저탄소 저합금강을 대상으로 하는 경우가 많고 표면부근의 탄소농도는 0.8 wt%C 내외로 하는 것이 일반적이다. 고온 침탄처리에 의해 일정한 탄소농도 분포곡선을 얻게 한 후 급냉하면 침탄층 내부의 조직은 오스테나이트 조직에서 매우 경도가 높은 마르텐사이트 조직 등으로 변화하게 된다. 마르텐사이트 조직의 경도는 탄소농도에 크게 의존하므로 이에 따른 경도분포곡선을 얻게

되는 것이다. 결국 침탄 처리시 경화기구(마르텐사이트 변태라고 요약할 수 있다. 물론 탄소함량에 따라 잔류 오스테나이트의 양 등의 문제가 있으며, 제품의 냉각속도 혹은 조건에 따라 웨라이트, 펄라이트 및 베이나이트 등 다양한 미세조직이 얻어질 수 있다 [1]. 아울러 고온에서 급냉시 이러한 조직변화로 인하여 다양한 형태의 변형문제가 상존하고 있음을 상기할 필요가 있다.

2.2 질화 열처리

질화 열처리는 매우 다양한 공법으로 실행되고 있는데, 대표적으로는 염욕질화, 가스질화, 플라즈마질화, 저압질화 및 최근에는 스크린 플라즈마질화까지 매우 다양하다. 이 중에서 가스질화가 가장 보편적으로 많이 사용되고 있으나, 제품 및 상황에 따라 공법을 달리하는 것이 유리할 수 있다. 예를 들어 매우 정밀하고 균일한 처리를 원하는 경우 염욕질화가 좋고, 경제적이며 대량생산의 경우에는 가스질화가, 금형제품처럼 질화 시간이 10시간 이내로 매우 짧은 경우에는 플라즈마질화가 유리하며, 제품 외관 즉 광택도를 유지하고자 하는 경우 스크린 플라즈마 질화를 필요로 하게 된다. 이는 각 공법마다 반응 잠복기의 유무, 이온 봄바딩 효과 등 뚜렷한 한계와 특징을 나타내기 때문이다 [5].

질화 열처리 전에는 통상적으로 Q/T처리 즉 심부경도 조정등을 목적으로 템퍼링 처리를 행하며 처리 강종에 따라 대략 450-580°C의 비교적 낮은 온도에서 1-100 시간동안 처리된다. 템퍼링은 특별한 경우가 아니고는 보통 질화 열처리 온도보다 30°C 이상 높은 온도에서 행하는 것이 일반적이다. 처리 분위기로는 플라즈마질화의 경우 질소와 수소 혼합가스를 투입하여 전기에너지로서 그로우 방전을 일으켜 반응 활성종(radical species)를 이용하고, 가스질화의 경우에는 암모니아를 투입하면 암모니아가 철강제품 표면에서 발생하는 NH, NH₂ 등의 활성종들을 이용한다. 2000년대 초반 수소센서가 개발되어 암모니아 분해율을 쉽게 연속적으로 측정할 수 있게 됨으로써 가스질화 공정도 분위기를 정확하게 제어할 수 있게 되었다. 통상적으로 이 분위기변수를 질화포텐셜(nitriding potential, KN)이라고 부르고 있으며, 다음과 같이 정의된다.



$$K_N = \frac{P_{NH_3}}{P_{H_2}^{3/2}} \quad (4)$$

질화 열처리후 철강의 미세조직은 크게 세가지 지역으로 나뉘게 되는데, 표면의 화합물층(compound layer), 표면부근의 확산층(diffusion layer) 및 반응에 아직 참여하지 않은 심부지역(core region)으로 구분한다. [5-7] 화합물층은 주로 ϵ -Fe₂-3N, γ -Fe₄N, θ -Fe₃C등으로 이루어져 있고, 확산층은 기지와 CrN등과 같은 각종 질화물 및 입계의 세멘타이트로 이루어져 있다. 심부지역은 아직 반응하지 않은 웨라이트 기지와 각종 탄화물로 이루어져 있다. 용도에 따라 화합물층 미세조직을 다르게 하는 것이 일반적 산업적용 방식(일명 상제어질화)이며, 특히 내식성 및 경부하 내마모 특성을 위해서는 주로 ϵ -Fe₂-3N 을 두껍게 형성시키고, 내피로성이 중요할 때는 γ -Fe₄N 혹은 확산층 단독으로 구성한다. 또한 PVD코팅을 전제로는 확산층 단독으로 하는 것이 나중 작업량 감소를 위해 필요하다(Duplex technology). 물론 적용되는 사용조건에 따라 질화 열처리 전 기본적인 철강소재 선택이 매우 중요하다고 할 수 있다.

질화공정이 진행 중 철강 내부의 확산층 미세조직의 변화과정은 매우 복잡하다 [7]. 우선 철강을 템퍼링 처리하게 되면 기지(matrix)로써 소려된 마르텐사이트(혹은 웨라이트)와 각종 탄화물 즉, M3C, M7C3, M2C, MC, M23C6, M6C등이 형성된다 [8]. 템퍼링 후 질화처리 시에는 질소가 철강내부로 확산되면서 철강에 포함된 Cr, Al, V, Ti 등 질화물 형성원소와 결합하여 CrN, CrxA1-xN등과 같은 각종 미세한 질화물을 석출함으로써 확산층내 표면부근의 경도가 상승한다. 따라서 강화기구는 석출경화 현상이라고 할 수 있고, 보통 이러한 합금원소량이 많으면 많을수록 표면경도는 상승하는 반면 질화 깊이는 점차 짧아지게 된다. 아울러 질소가 기존의 탄화물과 반응하여 조대 질화물을 형성하게 하고 아울러 용해 방출된 탄소는 표면지역으로, 아울러 심부지역으로 확산하게 된다. 또한, 입계로 확산된 탄소원자들은 입계에서 세멘타이트를 형성하여 소위 angel hair라는 필름을 형성하게 한다.

3. 열처리 엔지니어링 S/W

전술한 바와 같이 각 열처리공정에 따라 처리되는 철강재료의 내부에 각 원소의 화학포텐셜 차에 의해 확산이 일어나며, 또한 미세조직의 변화가 발생하고 그에 따라 경도 등 기계적 특성이 결정된다. 따라서 열

처리용 엔지니어링 S/W를 개발하기 위해서는 열역학 데이터베이스 및 확산계수 등 각종 변수의 확보가 중요하고 [9], 먼저 열처리과정 중 성분 및 미세조직의 변화에 대한 수학적 모델링이 요구된다. 지배방정식인 다상 다성분계에 대한 확산방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다. 기지를 a상이라고 하면 n 성분계 (n=Fe) 철강재료의 경우,

$$J_i^a = \sum_{j=1}^{n-1} D_{ij} \frac{\partial c_j^a}{\partial x}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{j=1}^{n-1} D_{ij} \frac{\partial c_j^a}{\partial x} \right) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)은 우리에게 잘 알려진 Fick의 제1법칙과 제 2법칙을 다성분계 다상계에 대하여 일반화시킨 식이며, 특히 식(6)을 확산방정식이라 부르고 있다. 식 (5)에서 J_i^a 는 a 상에서 성분 i의 플럭스 (moles/cm² sec)이며, D_{ij} 는 (n-1)X(n-1) 행렬로 주어지는 상호확산계수(diffusivity)이고 마지막으로 $\frac{\partial c_j^a}{\partial x}$ 는 농도구배이다. [10] 식 (6)에서는 총농도 \bar{c}_j 는 거리 x, 시간 t에서의 성분 i의 농도이며, 반면 c_j^a 는 a상에서의 성분 i의 농도이다. 식(6)을 적절한 초기 및 경계조건과 함께 유한차분법(FDM)등의 방법으로 풀면 시간과 거리에 따른 농도변화를 계산할 수 있게 된다. 물론 복잡한 형상의 제품의 경우에는 일차원적인 식(5)와 (6)의 형태를 변화하여 유한요소법(FEM)등의 방법을 사용해야 한다.

3.1 침탄 열처리 S/W의 제작과 응용의 예

침탄 열처리의 경우 대부분은 900°C 이상의 온도에서 수행되며, 이때 철강의 미세조직은 오스테나이트 단상조직이다. 따라서 제품내 위치 x와 시간 t에서 총 농도는 기지인 오스테나이트 조성고 같으므로 유한차분법에 의해 매우 쉽게 식(6)의 해가 얻어진다. 특정한 조성의 저탄소 저합금강을 침탄할 때 철강 열역학 데이터를 이용하여 주어진 탄소포텐셜 Cp에 대응하는 표면의 평형농도를 구하고, 탄소의 확산계수 또한 계산되어야 한다. 이후 냉각과정 중에 오스테나이트 조직은 마르텐사이트 등과 같은 다른 조직으로 변태하므로 제품내 각 위치의 조성고 따른 CCT(Continuous Cooling Transformation)곡선을 이용하여 상변태 분율을 계산해야 한다. 마지막으로 각 위치에 따른 미세조직이 결정되면 강도모델을 이용하여 경도 등 기계적

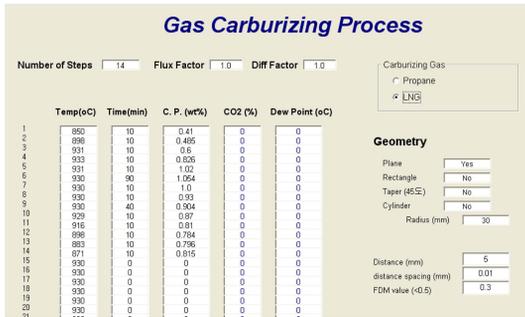


그림 1. KHTM_C 가스침탄 모듈 입력화면

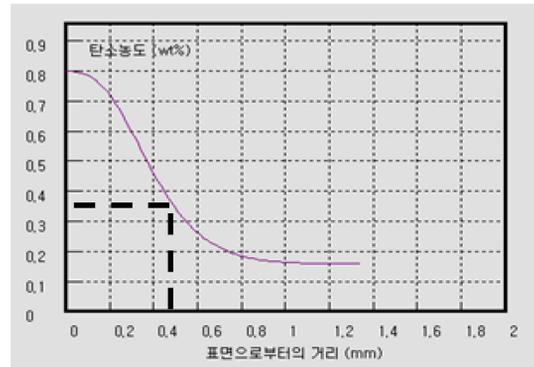


그림 2. KHTM_C 진공침탄 모듈에 의해 예측된 탄소농도분포 곡선: 930°C, 부스트-확산 7 step 조건으로 진공침탄 실시, 유효경화깊이는 0.45 mm

성질로 표현할 수 있다. 또한 공업적으로는 유효경화 깊이가 중요시되므로 복잡한 미세조직 계산을 생략하고, 얻어진 농도분포곡선으로부터 0.36 wt% C 지점 (Hv550)을 유효경화깊이로 지정하는 경우가 많다 [1].

그림 1은 KHTM_C 열처리 S/W의 가스침탄 모듈의 input화면이다. 이를 개량하여 현장에서 on line S/W를 제작하여 공정 모니터 및 제어를 실현 중이다. 아울러 열처리 S/W를 이용하여 여러 처리조건하에서 시뮬레이션을 하고, 탄소포텐셜 등의 변수를 최적화시켜 침탄시간을 약 20% 정도 감소시켰다. 향후 가스침탄장치의 설계를 변경하여 내구성을 증대시키는 등 부가적 노력이 수반된다면 약 40%이상의 처리시간 단축효과를 기대할 수 있다. 실제로 일본 등 선진국에서도 이러한 방향으로 S/W를 활용하여 개선해 나가고 있다.

한편 진공침탄의 경우에는 전술한 바와 같이 탄소 활동도가 매우 높기 때문에 조업중 아세틸렌가스를 계속 투입한다면 soot등 로내 오염을 유발할 뿐만 아니라 제품의 품질도 제어가 되지 못한다. 따라서 침탄 및 확산과정을 여러 번 반복하여 로내 오염을 최소화하고 원하는 탄소농도분포곡선을 획득하여야 한다. 결국 고객으로부터 요구되는 표면경도 및 유효경화깊이를 만족시켜야 하므로 진공침탄공정용 엔지니어링 S/W는 몇 단계의 침탄 확산공정이 필요하고, 각 단계에서 침탄 시간 및 확산시간을 결정해줄 수 있어야 한다. 물론 가스소비량을 최소화하기 위하여 제품표면적 및 공정진행에 따른 최소 요구 가스량을 결정해 줄 필요도 있다. 진공침탄장치 메이커인 독일의 ALD, 프랑스의 ECM 및 미국계 SecoWarwick 과 같은 회사들은 각자의 S/W를 제작하여 장치와 함께 판매하고 있으며, 계산방식은 각자의 노하우에 따르고 있다.

그림 2는 SCM415(0.16wt% C-0.8wt% Mn-0.2 wt

%Si-1 wt%Cr-0.16wt%Mo-bal. Fe) 합금을 온도 930°C에서 진공침탄하여 유효경화깊이가 0.45 mm 가 되도록 하고자 할 때 S/W를 사용하여 얻어진 농도분포곡선을 나타내었다. 주어진 조건하에서 최적 7단계의 침탄-확산공정으로 이루어지며 총 4700초의 공정 시간이 소요된다. 각 단계마다 침탄 확산시간이 다르게 나타나며, 아울러 투입되는 가스량도 달라진다. 국내 업체에서 진공침탄장치 및 공정을 개발할 때 수백회의 실험이 진행되어 데이터베이스를 구축하려는 시도가 있었으나 원리적으로는 진공침탄의 경우 열처리 엔지니어링 S/W는 제조과정에서 필수불가결한 요소이다.

3.2 질화열처리 S/W의 제작과 응용에

1928년 독일 Krupp사에서 질화강이 개발되어 질화 열처리가 상용화된 이래 [5], 많은 연구자들이 침탄 열처리 경우처럼 simulator 개발을 원하였지만, 전술한 바와 같이 대단히 복잡한 미세조직변화가 일어나기 때문에 제작을 시도하는데 어려움이 많았다. 질화 열처리를 엔지니어링 S/W를 제작하기 위해서는 먼저 철강재료의 템퍼링 공정에 대한 모델링이 선행되어야 한다. 2000년대 중반 이후 ThermoCalc와 같은 열역학데이터베이스와 더불어 확산계수를 계산할 수 있게 됨에 따라 템퍼링 모델링이 가능해 졌다 [11]. 시판이 되고 있는 템퍼링용 엔지니어링 S/W로는 스웨덴 ThermoCalc사의 TC PRISMA, 오스트리아의 MatCalc, 미국 Questek사의 PrecipiCalc 등이 있다.

템퍼링 시에는 전술한 바와 같이 M3C, M7C3등 여러 종류의 탄화물이 동시 혹은 순차적으로 핵발생하고 성장, 조대화과정을 거쳐 최종 안정상을 제외한 탄화물

은 용해과정을 거치게 된다. 주요 과정인 성장단계에서는 multicell 모델을 구축하여 경계조건과 함께 수립된 확산방정식을 푸는 방식(TC PRISMA의 경우)이며, 이때 계면의 조성은 국부평형(local equilibrium)을 가정하여 상태도로부터 구해야 한다 [11]. 어떤 모델을 구축하여 문제를 해결할지는 각 연구자의 물리적 현상 해석방식과 수학적 간략화 전략에 따르게 될 것이다. 또한 어떤 물리적 모델이라도 이때 각 탄화물들은 상호작용을 통하여 핵발생, 성장, 조대화 및 용해의 과정을 거치게 되므로 계산이 다소 복잡해진다. 템퍼링 모델의 계산을 통하여 석출된 각 탄화물의 분율, 크기 및 조성을 계산할 수 있고 당연히 질화공정 계산에 필요한 기지에 용해된 합금원소농도 등을 계산할 수 있다.

템퍼링 미세조직이 계산되면 이를 이용하여 경도등과 같은 기계적 성질을 계산하는 것이 가능하다 [12]. 강도모델링에서는 중첩원리와 Orowan식과 같은 석출강화방정식등을 이용하여 저합금강의 템퍼링경도를 계산하는 것이 가능하다. 마지막으로 질화공정에서는 템퍼링 및 강도계산의 결과를 입력 데이터로 하여 다시 경계조건과 함께 식(6)으로 주어지는 확산방정식을 풀어야 한다. 질화 중 확산층 내부는 tempered martensite(혹은 ferrite라고 하기도 함) 기지와 CrN등과 같은 질화석출물 등으로 이루어지게 되므로 식(6)의 총 농도와 기지내 농도는 다르게 된다. 이때 기지 내 농도구배는 평형상태도의 상경계 정보로부터 총 농도 구배로 변환할 수 있다. 변환 후 식(6)을 풀어야 한다. 아울러 두 농도의 차이는 질화물에 포함되어 있는 합금원소 농도이다. 아울러 계산과정은 국부평형모델을 사용할지, 핵발생과정을 포함시켜 과포화현상을 허용하는 비평형 모델로 할 지를 결정해야 한다 [13]. 공업적으로 질화공정은 비교적 장시간이 소요되므로 국부평형모델을 사용하여 문제를 푸는 경우가 많고 대단히 실용적이다. 본 연구에서도 이 방법을 택하였으나, 최근 들어 핵발생, 성장 및 조대화를 동시에 다루는 후자의 모델인 Kampmann Wagner Numerical Analysis(KWN 모델)을 사용하는 경우가 있다.

이러한 계산과정을 통하여 확산층 내부의 질화물의 분율 분포곡선, 합금원소농도 분포곡선, 질화물의 크기 등을 계산할 수 있으며, 최종적으로 강도모델링을 통하여 경도분포곡선을 구할 수 있게 된다. 그림 3에서는 제작된 질화 열처리용 전문 S/W인 KHTM_N의 입출력화면을 나타내었다. 입력조건으로 약 30개 이상의 상용 저합금강을 택할 수 있고, 열처리조건 즉 템

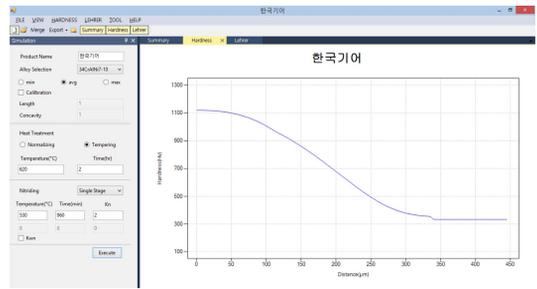


그림 3. 질화용 엔지니어링 S/W, KHTM_N의 작업화면: 좌측 입력화면, 우측 경도분포곡선

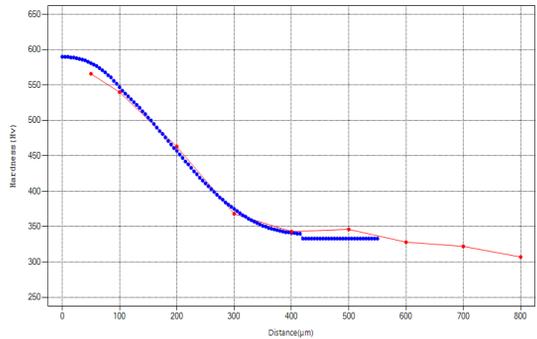


그림 4. 계산결과(blue)와 실험데이터(red)의 비교 : 620°C, 4 hr 템퍼링후 520°C, 16 hr동안 KN = 3 atm^{-0.5} 조건으로 질화

퍼링 조건을 입력 후 질화조건을 이단질화가 가능하도록 최대 2개 입력하며, 출력은 화합물층 종류와 두께, 심부경도, 표면경도 및 질화깊이를 포함한다. 이 프로그램을 사용하여 SCM440 재질의 철강을 600°C에서 4시간 템퍼링한 후 다시 520°C에서 16시간동안 질화포텐셜을 3으로 하였을 때 얻어지는 경도분포곡선을 그림 4에 나타내었다. S/W의 계산결과가 실제와 잘 일치한다면 이를 이용하여 가상실험(virtual experiment)이 가능해지고 이를 통해 개발기간이 대폭 단축될 수 있다.

표 1, 2 및 3은 이러한 가상실험을 행한 결과이다. 표 1에는 고객이 SCM440재질을 이용하여 기어를 제작하기 위해 필요한 기계적 특성 규격을 제시한 경우이다. S/W를 사용하여 이러한 규격을 만족시키는 공정조건을 구한결과 표 2과 같은 결과를 얻을 수 있다.

결과를 분석해보면 심부경도를 만족하기 위하여 템퍼링 조건에서는 기지에 용해되어 있는 Cr함량이 낮아 지게 되어 목표로 하는 표면경도를 얻기 힘들게 된다. 따라서 이 경우는 고객과 협의하여 목표 표면경도를 다

표 1. A고객사에서 요구한 질화 품질

품명: SCM440 기어 심부경도 = 320 ± 20 Hv 표면경도 = 600 Hv 이상 유효경화깊이 = 0.3 ± 0.05 mm (심부경도 + 50 Hv 지점) 화합물층 두께 = 4-10 μm, γ' 단상
--

표 2. 질화 엔지니어링 S/W에 의한 품질 예측

심부경도 = 337 Hv 표면경도 = 584 Hv (failed) 유효경화깊이 = 0.305 mm 화합물층 두께 = 7.6 mm, γ' 단상
처리조건: 620°C, 2 hr 템퍼링 530°C, 6 hr, KN 1.6 질화 (stage 1) 530°C, 10 hr, KN 0.8 질화 (stage 2)

표 3. 추천 유사강종에 의한 품질 예측

변경 강종: SCM430 심부경도 = 314 Hv 표면경도 = 647 Hv 유효경화깊이 = 0.315 mm 화합물층 두께 = 7.3 μm, γ' 단상
처리조건: 600°C, 2 hr 템퍼링 530°C, 6 hr, KN 1.6 질화 (stage 1) 530°C, 8 hr, KN 0.8 질화 (stage 2)

소 낮추든지 아니면 심부경도를 상향조정하여 질화시 얻을 수 있는 최대 표면경도를 상향 조정하여야 한다. 이렇듯 엔지니어링 S/W를 사용하면 불필요한 실험을 줄일 수 있고 제품을 보다 손쉽게 개발할 수도 있다. 물론 표 3과 같이 유사한 재료의 강종(이 경우 SCM430)을 추천하는 것도 가능하다. 강종 변경 시 열처리 시간도 짧아져 양측에 이득이 될 수 있다.

4. 열처리 분야 엔지니어링 S/W의 전망

최근 들어 재료분야에서도 다른 공학분야와 마찬가지로 컴퓨터에 의한 시뮬레이션의 중요성이 부각되고 있다. 특히 2012년 미국 오바마 대통령의 Material Genome Initiative(MGI) 발표 이후, 통합전산재료공학(Integrated Computational Material Engineering, 이하 ICME) 분야가 두각을 나타내고 있다. ThermoCalc 등 이미 많은 S/W가 개발되어 시판되고 있으며, 열처

리 공정 엔지니어링 S/W 역시 ICME의 한 구성요소로 간주될 수 있다. 미국 Questek사가 보여준 바와 같이 기존의 시행착오에 의한 재료 및 공정개발이 컴퓨터를 이용하여 단기간 내에 완료될 수 있는 시대에 접어들고 있는 것이다. 여러 종류의 다양한 재료 및 공정설계 관련 S/W의 개발이 기대된다.

다른 많은 엔지니어링 S/W와 마찬가지로 이 분야에서도 입력변수들의 데이터베이스 확보가 무엇보다 중요하다. 미국의 MGI정책은 이를 정확히 파악하여 나온 정책이다. 이를 위하여 실험적 연구뿐만 아니라 제일원리(The first principle)에 의한 계산과 같은 많은 노력들이 이루어지고 있다. 이러한 열처리 엔지니어링 S/W의 개발과 정확도 향상을 위해서는 무엇보다 계산에 이용되는 열역학, 확산계수 데이터 등의 개발 및 축적이 필요하며, 국가 R&D차원에서 이러한 기초연구, 즉 돈이 안되지만 전략적인 연구에 보다 많은 투자가 이루어지는 것이 필요하다. 결국 세계각국의 과학, 엔지니어링기술의 경쟁에서 최종 승패는 위에서 언급된 데이터들에 의해 결정되기 때문이다. 열처리 엔지니어링관련 기초데이터들이 확보될 때 본 연구에서 보여준 열처리 엔지니어링 S/W의 정확도가 증대될 것이며, 기타 세부적인 열처리 응용프로그램의 개발도 가속화 될 것이고, 이를 이용한 열처리 산업의 현대화도 이룩될 수 있다.

5. 맺음말

이상에서와 같이 국내에서도 열처리 엔지니어링 S/W가 현재 개발 중이다. 특히 질화공정 분야에서는 세계적으로도 온전한 S/W가 나와있지 못한 상태이며, 우리나라가 가장 앞서 출시할 가능성이 높은 것으로 보여진다. 고도로 발달된 S/W개발이 선진국의 전유물은 아니며, 우리의 노력여하에 따라 선도적인 역할을 할 수도 있을 것이다. 특히 질화관련 엔지니어링 S/W는 향후 관련 프로그램의 확장과 입출력 제어를 통하여 질화용 철강합금설계, 복잡한 형상의 부품에 대한 설계, 기술자 및 학생을 위한 교육용 S/W까지 여러 용도로 변환시킬 수 있다. 또한, 엔지니어링 S/W를 열처리장비에 접목하면 지능형 열처리장비를 제작할 수 있으며, 실제로 선진국 장비들은 이러한 추세로 발전하고 있다. 이러한 방식으로 국내 열처리산업의 고도화도 이끌 수 있을 것이다.

감사의글

본 연구는 산업통상자원부 엔지니어링 기술진흥사업 엔지니어링SW 기술개발 기반구축 (N051700001) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M. Gergely et al., Metal Handbook Vol. 4 Heat Treating, 1991, ASM International.
2. 김학윤, 박상준, 표면열처리, 2003, 원창출판사.
3. J. Kowalewski, Industrial Heating, Jan. 2006 pp39-42.
4. W.Grafen and B.Edenhofer, Heat treatment of metals, Vol. 4, 1999, pp79-85.
5. Source book on nitriding, 1977, American society for metals.
6. E.J.Mitteмейer and M.A.J.Somers, Thermochemical surface engineering of steels, 2015, Woodhead Publishing.
7. D.Liedtke, Nitriding and Nitrocarburizing on iron materials, 2010, expert verlag GmbH.
8. J.H.Woodhead and A.G.Quarrell, J. of the iron and steel institute, 1965, pp605-620.
9. U.R.Kattner, J. of Metal, Vol.49, 1997, pp14-19.
10. J.S.Kirkaldy and D.J.Young, Diffusion in the condensed state, 1987, The institute of metals.
11. Q. Chen et al., Acta Materialia, Vol. 56, 2008, pp1890-1896.
12. J. S. Wang et al., Acta Materialia, Vol. 61, 2013, pp4939-4952.
13. Minsu Jung et al., Metallurgical and Materials Transactions A, Vol 47A, 2016, pp1425-1439.