

최신 열처리 기술 동향 2004

이 영 국

연세대학교 공과대학 금속시스템공학과

Heat Treating Technology Roadmap 2004

Young-Kook Lee

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

이 글은 'Vision 2020' 목표를 달성하기 위해 1997년부터 시작된 최신 열처리 기술 동향에 대한 세 번째 개정판이다. ASM 열처리 학회(Heat Treating Society, HTS)의 연구개발 위원회는 1997년에 기술적 연구의 선도를 다음과 같은 네 가지의 카테고리로 분류하였다 : 장비 및 설비 기술, 공정 및 재료 기술, 에너지 및 환경 기술, 그리고 시설적인 독창성. 1997년 동향분석에서 제시된 각 분야에 대한 검토와 현재의 필요에 대한 갱신을 위해 분과 위원회가 만들어졌다. 이 글은 공정 및 재료 기술 분야에 대한 연구와 개발의 필요성에 대해 논하고 있다.

개선된 공정과 재료

공정 & 재료 기술 분과위원회는 주의 깊게 1997년 동향표의 각 전문화된 요구를 검토해 보았다. 비슷한 항목은 서로 합해졌고 여러 항목들이 다른 분야로 분류되었다. 예를 들면, 열처리 장비의 기능 향상과 열처리시 소비되는 에너지 감소 그리고 효율적인 가격 등의 이유로 새로운 열처리 재료의 개발이 요구되는 상황이다.

전통적인 재료 공정의 개선 또한 필요하다 예를 들면, 기술적 선도를 위한 개선 목록에는 반복 횟수의 감소와 질화 및 침탄처리에 대한 항목들이 포함되어 있는데, 이들은 중요한 가격 절감과 에너지 절약을 가져온다. 하지만, 이런 변화들은 항공, 우주 산업에서 요구하는 기준이나 사용자의 열처리 설명서와 같이 기존에 존재하는 절차와 기준들 때문에

종종 달성하기 어렵다. 개선된 공정을 개발하여, 제품에서 그 효율을 결정하고, 그리고 변경된 절차의 결과를 증명하기 위해서는 소비자과 열처리 기술 개발자 사이의 협력 작업이 필요하다. 이러한 개정은 여러 다른 부분들에 대한 공정의 공급자들에 의해 받아들여져야 하는 필요성이 있다. 이러한 공정 개선의 이익은 산업 현장에서 'Vision 2020' 목표를 달성하는데 도움이 된다.

저압 침탄

개선된 공정의 좋은 예는 저압 침탄이다. 저압 침탄은 산업에서 관심의 대상으로 떠오르고 있다. 저압 침탄은 각 주기마다 침탄 가스가 조금 사용된다는 점에서 오래된 진공 침탄을 개선했다고 할 수 있다. 진공침탄의 boost stage 동안 침탄 로의 진공도는 200에서 400 torr이다. 최근의 저압 침탄에서는 진공도가 25 torr 이하이다. 그러므로 침탄 가스는 좀 더 효율적으로 사용되어지는데, 각 부분에서 공급되는 대부분의 탄소들은 침탄에 사용되고 침탄 로의 안쪽 면에 그을음을 생성시키는데 낭비되지 않는다. 저압 침탄 공정의 고안과 개선은 더욱 효과적이고 효율적인 제어를 가져다주며 더 많은 재료의 처리를 가져다준다.

진공 침탄은 우주 항공 산업에서 인정된 공정이고 Aerospace Material Specification AMS 2759/7에 자세하게 소개되어 있다. 저압 침탄은 기존의 AMS 기준에서 벗어나지 않는다.

* 이 글은 미국 ASM International에서 발간한 "Heat Treating Progress", Volume 4, Number 3, 2004, p. 45-48에 게재된 내용을 번역한 것임.

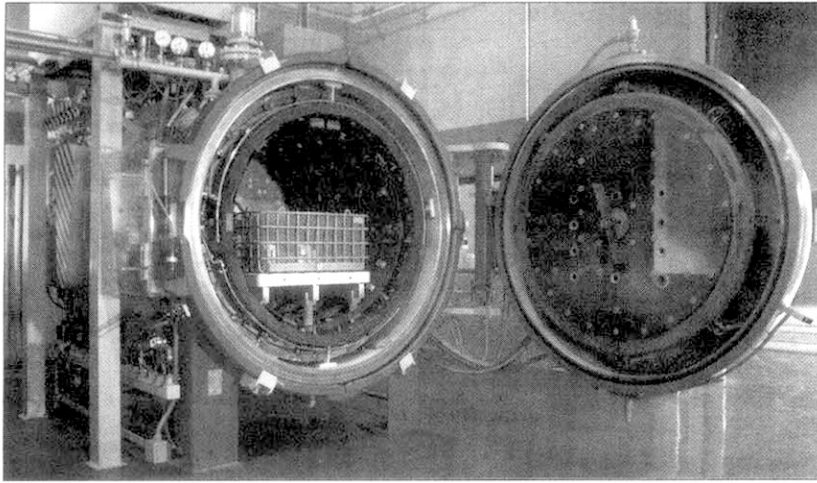


그림 1. 저압 진공 침탄로.

고온 침탄

요즘의 진공 침탄 로들은 1010°C(1850°F) 이상의 온도에서 침탄이 가능하며, 또한 많은 반복 횟수를 줄이고 전체적인 에너지 소비를 줄일 수 있다. 공정 및 재료 관련 선도기술 목록에 명시된 것처럼 1010°C(1850°F) 이상의 온도에서 성공적으로 침탄이 가능한 합금의 개발이 필요하다. 매사추세츠의 우스터 폴리테크닉 연구소에 있는 Heat Treating Excellence 센터(CHTE)는 이러한 고온 침탄 기술의 문제점들을 해결하기 위해 몇몇 제품 공급자와 기업의 사용자들 사이의 협력적인 산업/대학간 연구를 추진하고 있다.

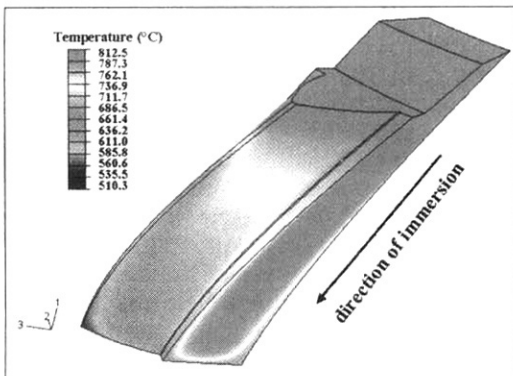


그림 2. DANTE 프로그램을 이용하여 예측된 냉각통에서 헬리컬 기어의 온도 분포.

열처리 예측 소프트웨어

Ford Motors사, General Motors사, Sandia 국립 연구소, Oak Ridge 국립 연구소, 그리고 Los Alamos 국립 연구소의 선두 그룹들에 의해 추진되어 철강 제품에서 침탄과 경화처리에 의해 발생하는 잔류응력과 변형을 예측하는 소프트웨어 개발에 관한 실질적인 프로젝트가 기업/정부/학계간에 협력적으로 성립되었다. 이 거대한 조직의 구성원들에는 회사와 대학과 국립 연구소의 엔지니어들이 포함되었다.

기업과 미국 국무부의 에너지 연구소들 모두 변형에 의한 정확한 제품의 제조를 위해 많은 비용이 소비되었으며, 이에 따라서 이 협력적인 조직의 목표는 가격을 절감하고 변형을 잘 예측하고 조절할 수 있도록 도와주는 예측 소프트웨어를 개발하는 것으로, 이는 잔류응력 상태가 강화된 제품의 수명을 얻는 것을 의미한다. 이 프로젝트를 통해 DANTE라는 열처리 예측 소프트웨어가 개발되었다. 이 소프트웨어는 조직 구성원들에 의해 사용되고 있으며 상업적인 제품으로 라이선스를 통해 사용이 가능하다.

정량적인 상변태 데이터

열처리 예측 소프트웨어는 열처리의 정확한 모델을 위해 강의 상변태에 대한 정량적인 데이터가 필요하다

공정 및 재료 관련 선도 기술 목록

재료 및 공정 지식:

- 시행착오를 줄이기 위해 개발된 유도 코일 설계 도구의 생산
- 결정립 성장을 억제하는 고온 (>1010°C, 1850°F) 침탄강 개발. 공정 주기를 단축하기 위하여 대기 및 진공 분위기에서 침탄 처리를 하여 고온 침탄의 실용성 및 관계 연구 조사
- 비교적 짧은 질화 공정과정 개발
- 변수와 공정 시간을 단축하기 위한 유도, 자기장, 노 공정에 대한 템퍼링/시효 공정의 이해 향상
- 가열 시간을 단축하는 급속 가열 중에 생기는 상변태 기구
- 열처리 시 희귀 원소가 미세구조 변화에 미치는 영향
- 보다 더 효과적인 표면 개선 공정 개발
- 극저온 가공을 위한 재료 개발 및 한계점에 대한 이해
- 신소재 (폴리머, 복합재료, 새로운 자성 및 비자성 합금) 에 대한 열처리 공정의 개발
- 침탄을 위한 대안적인 재료 및 공정 개발
예) 제한된 경화능 강과 집약적인 침과 같은 개선된 냉각 공정
- 생산 응용을 높이기 위해 소재의 표면을 강화시키는 대안적인 방법 개발

재료 응용 지식- 소프트웨어 및 모델 데이터베이스:

- 사용자가 요구하는 성질을 입력하면 재료 물성치를 조합해 이에 맞는 재료와 열처리 공정과정을 출력하여 재료를 선택할 수 있는 소프트웨어 개발
- 사용자가 특정한 응용분야 (예를 들면, 마모, 응력, 그리고 부식) 에 적용 가능한 파괴 과정에서 재료와 미세 구조에 대한 상세한 결과를 재료의 특성과 관련시켜 제공 가능한 공정 모델 개발
(Note: 모델은 역으로 파괴 분석에 대한 확인에 사용이 가능해야 한다.)

재료 개발:

- 가열과 냉각 중 체적 변형을 이용한 상변태 모델 개발
- 가열과 냉각 중 상변화로 인해 생기는 체적 변형에 대한 모델 개발
- 연속 가열 및 연속 냉각 시 일정 범위의 재료에서 상변화 속도에 영향을 주는 제조 공정, 화학 조성 및 불균일한 미세구조들에 대한 변수 효과를 포함하는 상변화 데이터 개발
- 소프트웨어 도구로의 상변화 모델의 집적
- 실온부터 열처리 온도까지 열 및 기계적 물성치에 대한 데이터베이스 개발
- 낮은 비용으로 데이터베이스 자료를 얻은 방법 개발
- 열처리 공정과 최종 성질의 상호관련 있는 자료 개발
- 다양한 매체와 구성요소를 이용함으로써 생산 장비의 열전달 성질을 결정하는 센서 개발
- 침탄 로에서 가열하거나 기름, 물, 폴리머, 염욕, 공기, 그리고 진공에서의 냉각과 스프레이 냉각을 포함한 상변태 모델에 대한 데이터를 실험하고 얻기 위한 산업기준 개발
- 재료와 가스 분위기 사이의 상호 작용에 대한 열응역 모델 개발
- 침탄에 대한 가스 분위기와 재료의 상호 작용에 대한 열응력 모델 개발
- 침탄, 질화, 그리고 고온 침탄 공정 도중에 가스 분위기와 재료의 상호 작용에 대한 열응력 모델 개발
- 구성 성분들의 냉각 속도, 잔류 응력, 그리고 물리적 특성을 예측하기 위한 열응력 모델 개발
- 공정 조절 시스템에 대해서 실시간 공정 조절을 위한 모델들 연결
- 더욱 효과적인 일정한 열전달을 도출하기 위한 컴퓨터 유동역학 개발

다. 저자들은 열처리 강에서 변형과 잔류 응력을 이해하는 핵심은 중요한 합금강의 상변태 거동을 정량적으로 정의하는 것이라고 이해했다. 이를 위해 만들어진 철강, 단조, 그리고 열처리 산업의 대표자들로 Joint Industry Alliance(JIA)가 구성되었다. 그 핵심 구성원들에 의해 정량적인 상변태 데이터 개발을 위

한 연구가 시작되었다. 공동 연구 조직은 열팽창 방법을 이용하여 강의 상변태 데이터를 측정하기 위한 방법의 기준을 정하기 위해 구성되었다. 조직은 몇몇 American Iron and Steel Institute(AISI)와 Forging Industry Assn. (FIA)의 회원 회사들과 이러한 기술에 관심이 있는 다른 회사들, 학계, 그리고 몇몇 국립 연

구소들로 구성되어 있으며, National Center for Manufacturing Sciences(NCMS)의 한 부류인 Technologies Research Corp.에 의해 운영되어졌다.

종합적인 실험 계획은 이중 열팽창 측정방법을 통해 강의 두 단계의 상변태 거동을 특정 짓는 것으로 수행되었다. 이런 협력적인 노력으로부터, 강의 열팽창 특성에 대한 기준이 개발되었고, 이런 실험 방법은 American Society for Testing and Materials(ASTM)에 의해 승인되었으며 2005년에 출판물로 나올 것이다. 열팽창 방법을 이용한 강의 상변태 속도와 팽창 변형량의 정량적인 측정을 위한 실험 방법을 간략하게 QMST 라고 부른다. 이 협력적인 노력의 결과로, 현재 열처리 공정의 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 정확히 요구되는 수준의 상변태 거동을 정량적으로 측정하기 위한 기준이 정립되었다.

일반강의 상변태 데이터를 얻기 위해 두 번째 기업/정부 출연연구소/연구기관 사이의 프로젝트가 추진되고 있으며, AISI steel 프로젝트의 승낙을 기다리고 있다. 이 프로젝트로부터 검토될 수 있는 추가적인 요구 사항들은 열처리 산업과 마찬가지로 철강 붕과 판압연 산업들과 단조, 분말 금속, 그리고 주조 산업들에서 얻을 수 있는 이점들이다. 탄소 농도에 따른 상변태 데이터와 변형의 영향이 반영된 상변태 데이터나 연속냉각 중의 상변태 데이터가 필요하다. 이 프로젝트에서 얻는 정량적인 데이터는 기존의 열처리 시뮬레이션을 검증하고 개선하여 정확성을 높이는데 사용될 수 있다.

이러한 시뮬레이션들은 주조에서부터 압연이나 단조와 같은 형상 제어와 열처리가 포함된 열처리 공정의 전체적인 연결을 어떻게 최적화시킬지에 대하여 우리의 이해를 크게 증가시켜 줄 것이며, 이를 통해 최적의 에너지 절약, 가장 우수한 품질 보증, 최적의 성과 달성, 그리고 저렴한 가격들을 제공할 것이다.

지능적인 유도 경화

Vision 2020 동향의 목표표 제기되는 다른 협력적인 프로젝트는 지능적인 유도 경화 프로젝트이다. 이 공동의 작업은 Sandia 국립 연구소와 General

Motor사의 Delphi Saginaw Steering Division 사이에 유도 경화 공정을 위한 closed-loop 조절 기술을 개발하기 위해 시작되었다. 신경계 네트워크 기반의 조절 전략이 개발되었고 특허가 출원되었다. 이 Closed-Loop Induction Controller(CLIP-C)가 1996년에 R&D 100상을 수상하였다.

후속 프로젝트는 Delphi Saginaw에 의해 시작되었고 Sandia 국립 연구소, Ford, Chrysler, Colorado School of Mines, 그리고 AISI Bar 응용 연구 그룹들이 참가하였다. 새로운 협력을 위한 프로젝트 목표는 제품 최적화를 통한 효율과 질적인 향상과 함께 시간과 제조 에너지 소비를 최소화시키는 제품 디자인 방법을 개발하는 것이다. 여러 전문 분야에 걸친 조직은 다음과 같이 구성되어 있다.

1. 재료와 공정 사이의 기초적인 이해를 포함하는 공정에 대한 정확하고 과학적 기반의 컴퓨터 모델 개발
2. 가열 도중 상변태 거동을 특징짓는 방법이나 모델에 대한 재료 특성 방법과 유도 경화 응용에 대한 재료의 화학적 성질과 시편 이력 상태에 대한 최적화가 가능한 방법 개발
3. 넓은 범위의 철강, 공정, 그리고 구성 형상들에 적용 가능한 과학적 기반의 센서장치와 close-loop 제어 연산 개발

위의 방법들은 최적화된 강도-무게 비율의 철강 요소들의 개발과 사용자 그룹에 의해 정당성이 확인되었다.

유도 가열/경화 공정에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 범용 프로그램이 개발되었다. 프로그램은 최종 미세조직, 잔류 응력 분포, 그리고 형상 변형을 예측할 수 있는 기능이 있다. 과학적 기반의 수동적이고 능동적인 전자기적 센서들이 가열 전체 시간에 대해 경화 깊이를 측정하기 위해 개발되었다. 유도 경화 공정에 대한 모델 기반의 적용 가능한 제어 프로그램도 역시 개발되었다. 향후 개발 활동은 실제 제조 공정에 대한 확인, 추가적인 특징들의 개발, 그리고 저항 용접, 단조, 다른 비평형 열적 공정과 같은 다른 제조 공정들에서의 사용에 대해 프로그램을 평가하고 정확도를 높이는 것이다. 과학적 기반의 센서들도 Sandia-funded 프로젝트에서 일반적인 철강 제조 응용에 대해 좀더 개발이 이루어졌으며 세 가지 특허를 획득했다.

미래에 가능한 것

미래에 특정한 분야에 재료 선택이 필요한 디자인 엔지니어가 “Vision 2020 소프트웨어”에 디자인 변수를 입력하고 CAD 작업을 하는 모습을 상상해 볼 수 있다.

소프트웨어는 선택 사항으로 주어진 목록에서 특정한 재료를 선택할 수 있다. 이와 같은 경우, 강의 침탄 정도가 선택되어진다. 최소 케이스 깊이가 0.64 mm(0.025 in.), 표면 강도가 58~62 HRC, 그리고 중심부 경도가 35~45 HRC인 부품에 대한 디자인 변수들은 가해지는 힘을 지탱하기 위해 필요하다. 이런 정보는 소프트웨어의 열처리 서브루틴을 위한 입력값으로 사용되고 더 정확한 열처리 사이클을 결정한다. 열처리로에 관련된 변수들은 이미 소프트웨어에 입력되어 있다.

이 소프트웨어는 원하는 열처리 사이클을 예측하는 것뿐만 아니라 공정 변수들을 열거하는데, 이들은 요구되는 전체 반복 소요시간을 최소화시킨다. 열 발생과 가스사용에 대한 전체 에너지 소비는 기계적 성질을 위해 제품에 가해지는 공정을 고려하여 최소가 되도록 유지된다.

우리가 도울 수 있는 방법

HTS 연구 & 개발 위원회는 열처리 산업에서 연구자들과 소비자들이 협력적으로 연구의 분야를 개발하고 현상을 규명하고 진행하도록 하는 일에 관여하고 있다. 공정과 재료 기술을 개선하기 위한 의견들의 특별한 목록이 지금 열처리에 사용되는 재료들을 대체할 수 있는 새로운 재료들을 통해 금속이나 재료를 연구하는 엔지니어들과 효능을 최적하기 위해 노력하는 생산 엔지니어들의 흥미를 끌어야 한다. 이상적으로 이러한 새로운 재료들은 열처리를 하지 않는, 만약에 하더라도 필요한 열처리는 기존 재료에 비해 더 적은 에너지가 필요해야 한다. 추가로 생산이나 소비에 연관된 열처리 관계자들이 공정 재료에 대한 현재의 방법을 검토하고 어떻게 공정들이 품질, 에너지 소비, 공정 시간, 또는 다른 Vision 2020 목표 측면에 대해 바뀌어야 하는지 결정할 필요가 있다.

비록 2020년이 되기까지 오랜 시간이 걸리지만, 위의 목표들을 성취하기 위해 지금 진행 속도보다 더 활발한 연구가 필요하다. 공동의 세계에서, 유지 가능한 프로그램들은 오랜 기간 번영의 목적들과 함께 개인 회사의 에너지 소비, 환경적 충돌, 그리고 일반적 안정을 보인다. Vision 2020과 기술적 동향은 산업의 유지 가능한 프로그램의 시작이며, 미국 열처리 산업의 세계적 경쟁력을 달성하는 방법을 제시한다.