

저압식 진공 침탄(LPC) 열처리 공정 기술 개발

동상근*, 양제복*

Development of Process Technology for Low Pressure Vacuum Carburizing

Sang-Keun Dong*, Jae-Bok Yang

ABSTRACT

Vacuum carburizing continues to gain acceptance as an alternative to atmosphere carburizing particularly in the car industry. The advantages of low-pressure carburization over atmospheric gas carburization is not only the creation of a surface entirely free of oxide and the environmentally friendly nature of these methods but also an improvement in deformation behaviour achieved by combining carburization with gas quenching, a reduction in batch times by increasing the carburization temperature, low gas and energy consumption and the prevention of soot to a large extent.

In present study, an improved vacuum carburizing method is provided which is effective to deposit carbon in the surface of materials and to reduce cycle time. Also LPC process simulator was made to optimize to process controls parameters such as pulse/pause cycles of pressure pattern, temperature, carburizing time, diffusion time. The carburizing process was simulated by a diffusion calculation program, where as the model parameters are proposed with help the experimental results and allows the control of the carburizing process with good accordance to the practical results. Thus it can be concluded that LPC process control method based on the theoretical simulation and experimental datas appears to provide a reasonable tool for prototype LPC system.

Key Words : Carburizing(침탄), Low Pressure Carburizing(LPC)(저압식 진공 침탄), Vacuum(진공), Diffusion(확산), Heat Treatment(열처리)

1. 서론

최근 진공 침탄기술은 최근들어 자동차 분야에서 기존의 상압식 가스 침탄 기술을 대신할만한 신기술로 인식되고 있다. 저압식 진공 침탄 기술은 상압식 가스 침탄에 비해서 입계산화가 없고 환경 친화적인 공정 기술의 장점 뿐만 아니라 gas 냉각방식을 채택할 수 있어 변형에 있어서

도 장점이 있고 침탄 온도를 증가 할 수 있고, sooting이 별로 없어 침탄 가스 및 에너지 소모량도 절감되는 기술이다.

본 연구에서는 탄소의 전달을 촉진할 수 있는 LPC 진공 침탄 공정 program 모델 제시하였다. 또한 LPC 공정 제어 시뮬레이터를 제작하여 LPC 공정 변수에 LPC simulator 운전 결과를 통한 LPC 공정 해석 기술 확립하였다. 또한 LPC 공정에 대한 이론적 modeling을 수행하였다. 이로 부터 저압식 진공침탄 simulation을 위한 이론적 및 실험적 방법의 체계화, LPC 공정 제어 및 프로그램 고유 기술 개발, 시작품 모델에 대한 운전 기술 및 공정 설계 기술에 대한 기

* 한국에너지기술연구원

† Email : skdong@kier.re.kr

반 기술을 구축하였다.

아래 그림은 일반적인 진공 침탄 열처리 사이클의 한 예이다.

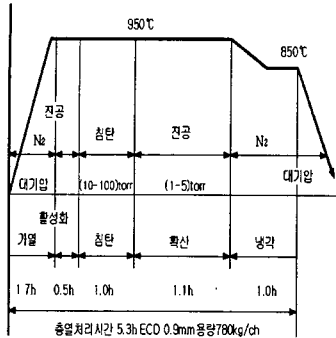
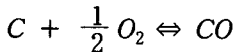
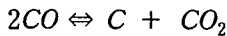
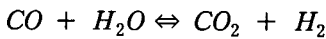


Fig. 1. Process cycle of Vacuum carburizing

전체적인 진공침탄 열처리공정은 가열, 침탄, 확산, 냉각을 거쳐 최종적인 열처리 제품이 얻어지게 되는 것이다. 여기서 공정 제어란 바로 가열 온도, 가열시간, 침탄시 압력, 침탄가스 유량, 침탄시간, 확산시 압력, 확산시간, 냉각 방법 등을 제어 하는 것이다.

일반적으로 많이 쓰이는 상압식 가스 침탄인 경우는 대기압 하에서 침탄가스를 로내에 주입하는데 침탄시, 확산시 분위기 제어가 용이하게 할 수 있다. 분위기 제어는 Carbon Potential (CP)를 제어 하기 위한 것이데, 상압식 가스 침탄에서 변성가스를 주입하기 때문에 로 분위기에서는



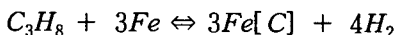
위식과 같이 분위기중 가스 성분들이 평형 상태로 존재 한다. 오스테나이트에 고용되는 탄소량 Cp (%) (Carbon potential)는

$$C_p = \frac{A_s P_{CO}}{K_3 P_{O_2}^{1/2}}$$

와 같이 된다.

따라서 CO, CO2, O2 의 평형상태에서 O2, CO를 측정하여 carbon 분위기로 환산하여 알 수 있기 때문에 쉽게 분위기 제어가 가능하여 최종적으로 원하는 침탄 깊이를 제어할 수 있다.

하지만 진공 침탄인 경우 침탄 분위기에서의 반응은



와 같이 비평형 상태에서 진행된다. 또한 침탄시에는 O2 가 존재하지 않고, 진공 분위기 센서가 개발되어 있지도 않다.

따라서 진공침탄에서는 분위기제어는 침탄 시간 및 확산 시간을 조정하면서 표면에서의 탄소 농도를 조절하는 포화치 조정법에 의존해야 되므로 경험적인 운전 지식을 이용해야한다. 하지만 실제로는 여러 가지 작업 조건에 따른 경험적인 자료는 많지 않다.

따라서 본 기술은 이론적인 식들과 simulator/실험로 운전결과 들을 효율적으로 조합하여 진공 침탄 공정을 simulation하여 공정 제어변수 특성을 파악하여 공정 제어 기술을 도출해야 하는 것이다.

좀더 이론적으로 살펴보면 진공 침탄인 경우 CP(carbon potential) 분위기제어가 어려우나 이론적인 특성을 고찰하면 진공시 950-1000C의 온도 분위기상태에서 propane 가스를 주입하면 약 5분후에는 46% , 10분후에는 약 80%의 carbon 이 강재로 유입된다. 따라서 침탄가스 양을 적당히 조정하면 충분히 Carbon 분위기는 형성되는 것이다. 다음 그림은 강재 표면에 고용되는 탄소농도 포화치 조절을 위한 선도이다. 이 그림은 특정한 침탄 온도에서 침탄 시간 및 확산 시간을 제어 하면서 침탄층을 제어 하는 것을 보여준다. 진공분위기에서 침탄에의해 표면 탄소농도가 포화상태(주어진 온도, 압력에서 정해지는 최대 탄소 고용 농도) 까지 증대되고 확산에 의해 표면 농도가 감소되면서 안쪽으로 침투하는 carbon 전달 메카니즘이 존재한다.

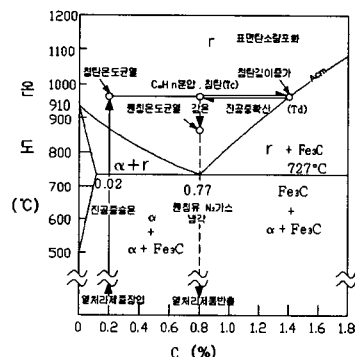


Fig. 2. The Iron-Carbon equilibrium diagram

위 진공 침탄/확산시 시간 제어는 이론적으로는 위의 포화치 조정치의 그림과 Harris 식이 이용된다. 전형적인 침탄 사이클 공정 제어에는 위와 같은 침탄 시간/ 확산 시간을 이론적으로 가정할 수 있다. 하지만 pulse식 다단계 (boost-diffusion)와 같이 복잡한 제어 모델 일때는 Harris 식은 잘 맞지 않고 많은 경험식에 의존해

야 한다.

강제로 유입되는 탄소유량 밀도는 결국 침탄 시 진공압력 및 침탄 가스 유량에 의해 정해진다. 침탄 시간과 피열처리 강제 표면에서의 탄소 유입량(유량밀도)의 관계는 실험적으로만 정확히 구해진다. 다음 그림은 시험 결과의 한 예이다. 이러한 자료는 직접 실험로 운전에 의해 구해질 수 밖에 없다.

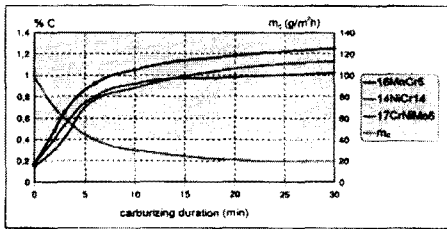


Fig. 3. Surface content of carbon vs. carburizing duration

이론적으로 살펴 보면 분위기가스에서 carbon potential과 피열처리재 표면과의 반응에서 탄소 유입량은

$$J_1 = -\beta(C_g - C_s) \text{ 로 표현된다.}$$

여기서 J_1 : 탄소전달량($\text{gcm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$), C_g : 가스중의 탄소농도(gcm^{-3}), C_s : 표면탄소농도(gcm^{-3}), β : 탄소전달계수($\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$)이다.

또한 Fick's Law 1법칙에 의하면

$$J_2 = -D(\partial C/\partial x)_{x=0}$$

여기서 J_2 : 탄소확산량($\text{gcm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$), D : 오스테나이트 중의 탄소의 확산계수($\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$), $\partial C/\partial x$: 최표면부터 탄소농도 분포곡선의 접선(gcm^{-1})이다.

최표면에서 $J_1 = J_2$ 가 된다.

위 식에서 볼 때 표면에서의 탄소 유입량은 표면에서 확산 속도와 carbon potential 과의 평형상태(균형)에 의해 결정된다. 하지만 진공 분위기에서는 비평형적으로 탄소분위가 정해지므로 탄소유입량의 이론적 모델링에는 경험적인 지식이 포함되어야 한다.

앞에서 기술 한바 있는 기존의 상압식 가스 침탄 PROGRAM 상의 이론적인 식은 매우 간단하다. 즉 Ficks'Law를 바탕으로 한 Haris식은

$$D(\text{침탄깊이}) = K(\text{계수, 온도의 함수})\sqrt{T(\text{전침탄시간})}$$

기존의 침탄 공정 기술은 단지 위식에만 의존해서 침탄/확산시간을 정하고 있는 실정이다. 그러나 진공 침탄일 경우 단순히 위식에만 의존할 수

없는 여러 실험결과를 보여주고 있다. 예를 들면 같은 침탄/확산 시간을 주었을때도 pulse 식 침탄/확산 일때 반복횟수에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 pulse 식 침탄 특성은 Haris식으로서는 파악이 안되는 것이다. 따라서 환경적이고 경제적인 진공 침탄 공정기술 확보를 위해선 바로 실험 결과에서 경험식을 구하고 그로부터 이론적 수치적 계산과 더불어 공정 제어 변수를 제어하는 지능형 제어 시스템이 요구된다. 본 기술에서는 이러한 관점으로부터 방향을 정하고 제어시스템을 PLC, computer, controller 가 기적으로 한몸이 되어 지능적으로 학습 자료로부터 추천하는 시스템으로 제작되었고 실용적인 LPC 열처리 공정 제어 기술인 것이다. 또한 진공침탄 과정에서도 보통 100torr 정도에서 침탄을 수행하는 일반적인 방법에서 50torr 이내, 주로 10-20 torr에서 주기적으로 침탄하는 주기적 주입 방식의 저압식 진공침탄 기술을 고유하게 개발했다.

2. 주기적 LPC 침탄 싸이클

Fig.4 는 개발된 LPC 공정 싸이클을 보여준다. 특성은 다음과 같다.

(1) 균일 침탄을 위한 공정 PULSE 식 침탄/확산 제어 모델 ;침탄온도에 도달하면 0.1 torr 에서 10 - 50torr 까지 침탄 가스를 주입한다. 그후에 pump/pulse 혹은 pump/fan/pulse 에 의해 분위기 침탄 압력은 1-5분까지 제어된다. 강재의 표면은 아주 빠른 속도

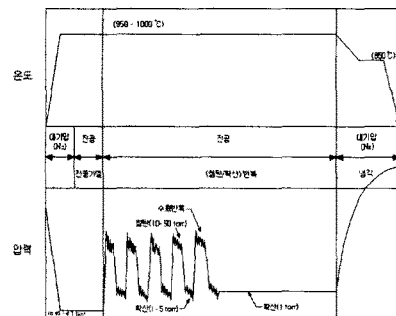


Fig. 4. Process cycle of pressure pulsating LPC system

로 탄소가 포화되어 탄화물을 생성하고 5분내에 약 46% 정도가 침투하는 이론적 근거한 것이다. 그리고 이후 적당한 시간에 프로판 가스의 주입이 차단하지 못하면 강재 표면에 거름 및 과잉 침탄이 되므로 바로 확산 시간을 두어 1-5분간 확산 시간을 갖는 것이다. 이 단계에서는 탄소의

표면 농도는 감소하나 강제 속으로 깊게 침투되는 것이다. 이러한 침탄 확산 과정이 반복되는 횟수가 많을 수록 침투강도 및 균일 침탄이 양호해지는 것이다. 즉, pulse/pump을 동시에 이루어져 빠른 시간에 반복되면서 침탄 가스의 유동이 교란되어 피열처리재 주위에서는 carbon 입자들의 유동이 진동되어 결국 균일한 침탄이 가능해지는 것이다.

(2) 침탄/확산 반복의 원칙은 고수하되 pulse/pump 때 가급적 침탄 가스 유동을 강제의 깊이 방향 및 좌우 방향으로 3차원적으로 매우 강하게 교란되도록 동적 유동 특성을 갖게 한다. 즉 침탄 가스의 주입시 순간적인 impuse momentum이 크게 얻어 지도록 하는 것이다.(위 그림에서의 미세한 교란 pulse) 이를 위해 노즐의 형태 및 제어기 제작에 이러한 관점이. 도입된다. 즉 노즐의 형태는 강한 jet flow를 만드는 노즐이고 또한 제어기는 MFC 및 압력제어기를 통해 원하는 압력 파형을 이루게한다.

(3) 침탄 유입량 제어에서 일반적인 외국에서의 방법은 단순히 압력제어에 만 의존한다. 즉 유입량은 바로 압력차(침탄후의 압력- 침탄전의 압력)에 비례하는 것이기 때문이다. 즉 압력제어가 바로 주입량 제어인 셈이다. 본연구 에서는 압력제어 및 유량제어가 동시에 가능한 시스템으로 제작되었다. 따라서 같은 진공압력/온도 상황에서 밸브 개도에 따라 여러가지 다른 침탄 가스 유입량이 제어 될수 있는 시스템 이기 때문에 엄밀하고 복잡한 강제 열처리에도 사용 될 수 있는 시스템인 것이다.

3. 실험결과 및 simulation

3.1 실험결과

3.1.1 실험장치 및 실험 조건

Fig. 5 는 LPC 공정 simulator 실험로 시스템을 보여준다. 허용온도는 1100C 까지 설계되었고 침탄 유효 체적은 150*150*150(mm)이며 가열 방식은 전기heater로 사용했고 냉각방식은 기계/수동 조작 방식의 유냉각 방법이다. 개발된 제어 시스템과 조합하였다. 진공 상태 및 pulse 식 침탄 과정은 PC 상에서 Program 제어값이 설정 되어 제어시스템의 controller로 uploading 되고 센서의 값들도 제어시스템 및 PC 가 공유하면서 엄격한 제어가 가능한 환경을 구현하였다.

Fig. 6 은 LPC simulator 사진을 나타낸다. 가열실에서 위면은 곡면이고 나머지 면은 평면이다. 가스노즐은 중앙으로 분사되는 총 8개의 노

즐로 이루어져 있다. 가열실 옆에 중간 단열실을 두었는데 이는 침탄후 냉각전에 중간 단열실로 이동하여 냉각 PROCESS 전에 대기 상태에 있는 것을 의미한다.

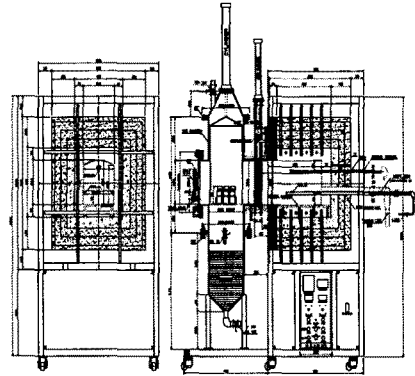


Fig. 5. LPC Simulator furnace system

가열실과 단열실 사이에는 중간 DOOR를 두었다. 침탄후 냉각직전 온도(900C)까지 온도가 떨어지면 질소를 공급하여 가열식 및 중간 단열실의 분위기가 대기압까지 올린다. 이후 중간 도어를 열고(공압식으로 작동됨) 피열물이 놓여있는 CART를 중간 단열실로 기계적으로 이송한다. 그후 전면의 door를 열고 수동으로 cart를 밖으로 끄집어내어 오일통에 저어면서 유냉한다. LPC 제어 인자로서는 pulse pattern, pulse 수, 침탄시간, 확산시간, 진공압력이 유력한 인자로 대두된바 이에 대한 세부 실험을 위해 여러 가지 pulse pattern 및 시간, 진공압력, 침탄가스 유량을 변화하면서 실험 하였다.

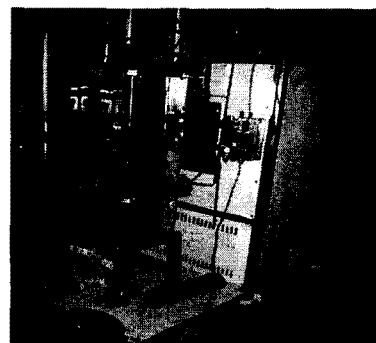


Fig. 6. LPC Simulator furnace system

3.1.2 탄소농도 분포 분석

탄소농도 분석 결과에서 보면 농도 분포의 trend는 유사한 모습을 보이고 있다. Fig.7 에서 알 수 있듯이 C-1에서 C-7 까지의 PULSE 파형

조건에서의 결과는 비슷한 형상을 보이고 있으나 침탄 정도는 서로 차이를 보이고 있다. 결과를 분석해 보면 침탄 정도가 운전 조건의 PARAMETER 와 연관짓는 데는 다음과 같은 가설을 들 수 있다. 1) 진공압력 선도에서 진공 분위기의 정도를 나타내는 진공압력의 시간에 대한 적분량 즉, 진공압력 면적이라 칭하는 변수 Sp. 2) 1단계 결과에서 알 수 있듯이 pulse 수가 영향을 미치는 것으로 보여 Pn이라는 정하고. 3) 침탄시 가스 유량 Qg의 함수 이 세가지와 침탄된 탄소 농도와 연관짓는다. 또한 침탄시간, 확산시간의비가 탄소농도에 미치는 영향은 이론적으로 계산 가능하므로 일단 확산시간/침탄시간 비가 3인 상태에서의 탄소농도로 측정된 탄소농도를 환산하여 비교해 보았다.(이때 확산시간은 pulse 침탄 후에 이루어지는 확산 시간외에 pulse 주입시 단위 pulse 침탄후 단위 pulse 확산시의 시간도 포함하였다.) 또한 특성파악을 용이하게 하기 위해 표면 탄소 농도만을 비교하였다.

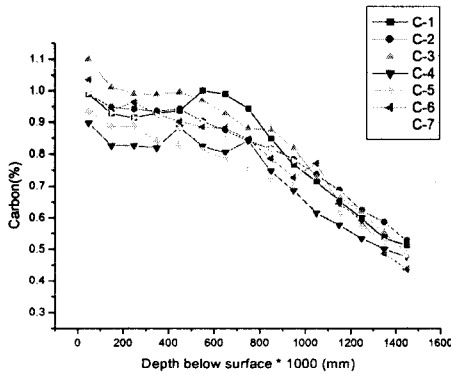


Fig. 7 Carbon profile in different carburizing cases

Fig.8에서 알 수 있듯이 x 축 변수인 $Sp \cdot Pn \cdot Qg / 6000$ 과 표면 탄소농도는 어느 정도 비례 관계에 있음을 알 수 있다.

세부 시험조건 일때의 Fig.9 에서 알 수 있듯이 실험 조건 D-2 인 경우(압력 48Torr, 유량 1LPM, 8cycles) 는 확산 후에도 과잉 침탄이 있음을 확연하게 드러나는 경우이다. 이를 제외하고는 여러 조건들에서는 농도 프로파일이 비교적 등사성을 보여주고 있다. 물론 어떤 조건은 과잉 침탄에 따라 확산 후에도 잔류 Austenite 가 존재 할 수도 있고 어떤 경우는 침탄시 과잉 침탄이 되어도 확산 시간을 충분히 주면 잔류 Austenite 가 거의 없을 수 있는 것이다.

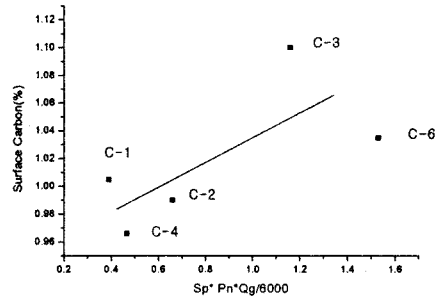


Fig. 8. Relationship between surface carbon and model parameter

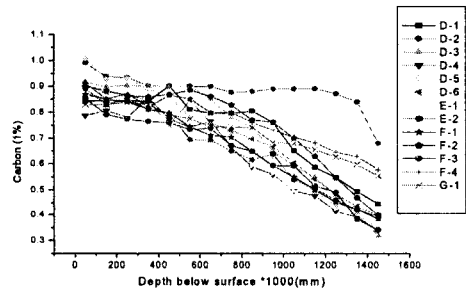


Fig. 9 Carbon profile in different detail carburizing cases

본연구 에서는 표면 탄소 농도가 0.8 %정도로 유지되도록 한다면 어떠한 변수 제어가 필요한냐는 관점에서 여러 가지 변수에 대한 특성파악이 특히 중요한 것이다. 즉 과잉 침탄의 경우도 실험 조건에 포함 하므로 표면 탄소농도 가 그림에서 알 수 있듯이 0.8 - 1.05 % 까지 변화를 주었던 것이다. modelling을 위한 단계로서 앞 절에서 와 같이 설정된 변수인자 $Sp \cdot Pn \cdot Qg$ 에 대한 영향을 계산하였다. 이때 D1-D6, E1-E2, F1-F4의 조건들은 2-3분 침탄후, 1분간 pumping 하고 다시 2-3분 침탄 후 1분 pumping 하는 반복과정을 거친다. 즉 pulse 식이 Fig.7 과 약간 차이를 보인다. 1분간의 확산시 밸브 조정을 달리하여 충분한 배기를 안 하여 전절의 01.-0.2torr 에 비해 달리 약간 높은 1-2 torr에서 확산을 하고 최종 확산시에는 0.1torr에서 확산 한다. 따라서 본 경우에도 확산 시간 계산을 1분간의 확산 시간 * 횟수 + 최종 확산 시간으로 더하였다. 또한 Fig.9에서의 확산시간/침탄시간= 2 일 때로 하였다.

Fig. 10 에서 보면 진공 압력면적 계수인 SP 가 크면 유량 조건 및 pulse 수의 조건들이 매우 좁은 운전범위에 있음을 알 수 있다. 즉 진공압

력이 45 torr 이상이 되면 다른 조건에 관계 없이 과잉 침탄의 범위에 접근하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 modelling 변수와 표면 탄소 농도는 양호한 상관 관계를 보이고 있다. $Sp \cdot Pn \cdot Qg / 6000$ 의 값이 1.5 이상 되면서 진공 압력이 45 torr 이상이고 침탄 가스 유량이 1 LPM 이상이 되면 매우 심한 과잉 침탄 영역에 포함되는 것으로 보인다. 또한 $Sp \cdot Pn \cdot Qg / 6000$ 의 값이 1이하 일때는 비례관계, 1이상일때는 곡선 관계를 보이는데 이는 포화농도에 접근하기 때문으로 보이며 또한 $Sp \cdot Pn \cdot Qg / 6000$ 값이 크더라도 압력이나 유량이 적으면 과잉 침탄이 안 일어나기 때문이다. 즉 $Sp \cdot Pn \cdot Qg / 6000$ 값이 1이상일 때는 다른 진공 압력에 관한 지수 함수 같은 보조 계수가 수정항으로 개입되어야 함을 의미한다.

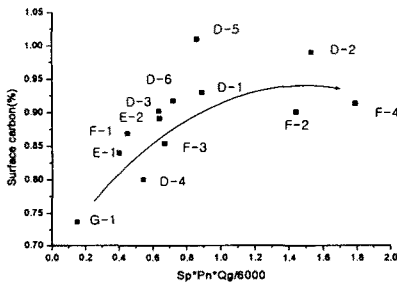


Fig. 10 Relationship between surface carbon and model parameter

3.2 simulation

LPC 공정 기술에서 침탄 program이란 아래 Fig. 11 같이 공정 조건에 따라 제어변수 즉 (침탄시간, 확산시간, pulse식 주입 싸이클, 침탄 가스유량)등을 결정하는 진공침탄 제어 program을 작성하는 것이다. 이를 위해선 simulation program이 주 기술이고 실험적인 결과를 이용하여 modelling하는 방법이 이용된다.

3.2.1 모델링

위와같은 LPC 공정 Program 개발을 위해서는 modelling 이론식 및 경험식 도출의 과정이 필요하다. 실험적 고찰로부터 있을 수 있는 경험적인 지식은 다음과 같다.

- (1) 시간, pulse수, 압력에 관한 경험식
- (2) 포화농도에 이르는 시간과 온도 관계

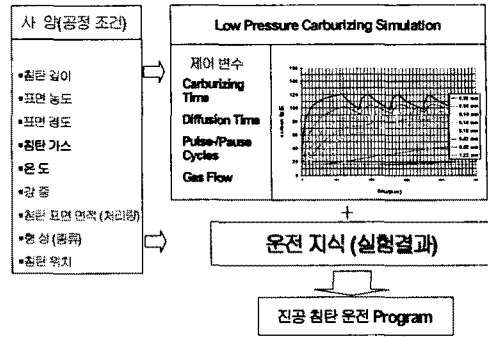


Fig. 11 LPC process program

- (3) 침탄가스 분해 속도 고려
- (4) 처리량에 따른 침탄 및 확산시 진공 압력 최적화(sooting 고려)
- (5) 탄소유입속도 및 확산 계수 모델링(pulse pattern 에 따른)
- (6) 탄소농도 와 경도관의 상관 관계

먼저 이론식을 정리하면 다음과 같이 된다. 강 표면에서 침탄되고 강 내부로 확산되는 물리적인 현상을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

$$J_2 = -D(\partial C / \partial x)_{x=0} = \alpha(C_g - C_s)\rho$$

위식들의 해를 구하면

$$\frac{C - C_0}{C_g - C_0} = \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{(Dt)}}\right) - \exp(hx + h^2Dt) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{(Dt)}} + h\sqrt{(Dt)}\right)$$

여기서

C_0 = initial concentration of carbon in the steel(%)

C_g = carbon potential of atmosphere(%)

C = carbon concentration at distance a from the surface

$$h = \alpha/D$$

여기서 확산 계수 D는 여러 가지 model식들이 제안되고 있다. 예를들면 Gary G. Tibbets에 의한

$$D = 0.47 \exp(-1.6C) \exp(-(37000 - 6600C)/RT)$$

와 같이 온도 및 카본 농도에 관련되고 있다. 위식들에서 침탄의 정도를 좌우하는 것이 탄소 질량 전달계수 α 와 확산 계수 D 라고 볼 수 있다. 먼저 계산에 비교적 간단한 single step 즉, 일정시간 침탄후 일정 시간 확산을 거친 실험 조

건 G-2 의 경우를 simulation 하였다. 이때 표면에서의 반응과 관련되는 전달계수 α' 와 강에서의 탄소의 확산계수 D' 는 실험치를 잘 묘사하는 계수를 구하여 적용하였다.

pulse 식 침탄에 대한 simulation을 위해 위에서 기술된 시험결과 분석을 통하여 수정계수를 유도하였다. 즉 전절에서 기술한바 있는 진공압력 면적이라 칭하는 변수 Sp. 또한 pulse 수가 고려된 Pn 마지막으로 침탄시 가스 유량Qg와 침탄가스량의 상관 관계를 model식에 도입하였다.

그 방법으로서의 위 식들에서 전달계수 α 와 확산계수 D를 수정하였는데

$$\alpha'' = \alpha' F1(Sp*Pn*Qg/6000)$$

$$D'' = D' F2(Sp*Pn*Qg/6000)$$

여기서 모델식 F1 및 F2는 그림 18 의 curve fitting 한 결과와 상수 값이 도입된 형태이다.

3.2.2 simulation 결과

다음 Fig.12 는 실험조건 G2, F3 인 경우에 있어서 modelling 후의 진공 침탄 simulation 결과이다. 비교적 실험과 계산 결과가 잘 일치하고 있다.

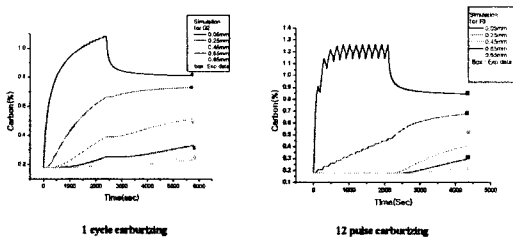


Fig. 12 Simulation result and measurement: carbon profile vs. time

다음 Fig. 13 은 실제 여러 작업조건에 따른 simulation하여 그 결과 로써 표면 탄소 농도를 최종적으로 구하여 실험 결과와 비교 분석한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 여러 조건에서 비교적 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 기술은 환경적이고 경제적인 진공 침탄 공정 제어를 위해 실험 결과에서 경험식을 구하고 그로부터 이론적 수치적 계산과 더불어 공정 제어 변수를 제어하는 지능형 제어 기술이고 PLC, computer, controller 가 유기적으로 한몸이 되는 실용적인 LPC 제어 시스템 기술인 것이다.

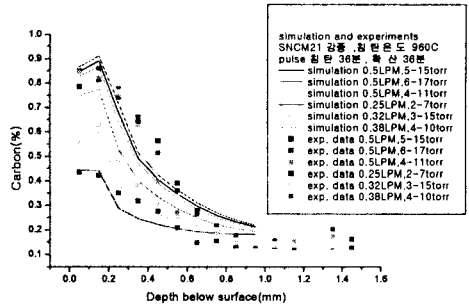


Fig. 13 Simulation result and measurement: surface carbon profile

4. 결론

LPC 진공 침탄 공정 program 모델 제시하고 LPC 공정 제어 시뮬레이터를 제작하여 LPC 공정 변수에 대한 상세 시험을 수행하였다. LPC simulator 운전 결과를 통한 LPC 공정해석기술 확립하고 LPC 공정에대한 이론적 modelling을 수행하였다. 벤티식 LPC 시스템 시작품에 대한 운전 기술 보유하였다. 세부적으로 보면

- (1)저압식 진공침탄 simulation을 위한 이론적 및 실험적 방법 도출
- (2)LPC 공정 제어 및 프로그램 고유 기술 개선 시작품 모델에 대한 운전 기술 및 공정 설계 기술에 대한 기반 기술 구축
- (3)LPC 세부 공정 변수에 대한 실험 보완 필요

후기

본 연구는 산자부 지원 에너지절약사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] Ralph Poor and Stephen Verhoff, 2002, "New Technology is The Next Step in Vacuum Carburizing," Industrial Heating, October, pp. 41-48.
 [2] John Gupta and Gordon Willett, 2003, "Flexible Vacuum Carburizing Systems," Industrial Heating, September, pp. 87-90.
 [3] Fan-Shiong Chen, 2003, "Deep-hole carburization in a vacuum furnace," Material Chemistry and Physics, vol. 82, pp. 801-807.