

분말야금 부품의 침탄처리*

김 경 훈 · 장 우 양 · 강 조 원

조선대학교 신금속소재공학과

Carburizing P/M Parts*

K. H. Kim, W. Y. Jang and J. W. Kang

Dept. of Met. & Mater. Engr., Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

다공성 철계 부품들의 열처리는 근본적으로 주조 부품 또는 가공 부품들의 열처리와 동일하다. 상변화가 동일하고, 분위기(진공을 포함한)도 동일하며 설비 역시 동일하다. 유일한 차이점은 다공성 부품의 경우에는 간혹 침탄속도가 상대적으로 빠르다고 하는 점이다. 이 글에서는 다공성 부품과 가공 부품의 열처리의 차이점에 대하여 설명하고자 한다. 만약 다공성 부품을 외주에 의해 열처리를 하는 경우라면 그 차이점은 매우 중요한 의미를 갖는다. 즉 분말야금에 의해 제조된 부품이 있을 때 이를 가공 부품처럼 취급하는 열처리 전문가들에게 열처리를 의뢰할 경우에 그 결과는 다소 실망스러울 수도 있다.

분말야금 부품에 대한 전형적인 열처리는 중립 경화(neutral hardening)이며 표면과 중심부는 대략 비슷한 탄소 함량을 갖는다. 표면 침탄이 가능하나 상대적인 밀도가 85% 이상(기공이 15% 이하)일 때에만 권장한다. 필연적으로 탄소가 부품에 어떻게 침투하는가는 기공의 영향을 받게 된다.

전반적으로 가공 부품, 주조 부품 및 분말야금 부품의 열처리는 동일한 기술과 설비가 이용되지만 침탄깊이에 미치는 기공의 영향에 대해서는 약간의 설명이 필요하다. 다공성 부품의 밀도 및 탄소 포텐셜에 따른 탄소 침투의 영향에 대한 이전의 연구결과들은 간혹 수학적 관계식을 유도하는데 이용되기도 한다. 이에 상응하는 수학적 모델 식은 탄소 포텐셜, 밀도 및 탄소 침투깊이 사이의 관계를 설명하는데 도움을 준다.

일반적 지침: 철계 분말야금 부품의 침탄은 가공 부품에 비해 보다 짧은 시간에 보다 작은 탄소 포

텐셜에서 달성될 수 있다. 예를 들면 86%의 밀도를 갖는 분말야금 부품을 0.9%의 탄소 포텐셜에서 2시간 동안 침탄할 경우 표면으로부터 2mm의 깊이에서 탄소함량은 0.04%에서 0.5%로 증가할 수 있다.

이단계 침탄공정(Two-stage carburizing)

침탄은 대개 이단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서 탄소 포텐셜은 오스테나이트의 탄소 고용한에 근접하는 수준(온도와 강재의 합금성분에 좌우되며 약 1.0~1.2%의 탄소)으로 유지한다. 두 번째 단계에서는 탄소 포텐셜을 0.8~0.9% 수준으로 유지시킨다. 이러한 이단계 공정을 흔히 "부스트 - 확산" 단계라고 한다. 두 번째 단계에서 여분의 탄소는 강재 내부로 확산해 들어간다. 요구되는 침탄 깊이에 도달하면 온도를 850°C 정도로 낮추고 부품을 급냉한다. 급냉시 잔류 오스테나이트의 양이 감소하면 강재의 치수 안정성은 증가한다.

강재 내부로의 탄소의 침투속도는 표면에서의 화학 반응 속도에 의해서가 아니라 오스테나이트 내에서의 탄소의 확산속도에 의하여 결정된다. 침탄속도는 경험식 $X = Kt^{1/2}$ 로 표시된다. 여기서 K는 표면에서 일어나는 기체-고체 반응속도와 오스테나이트 내에서의 탄소의 확산속도를 포함한다. 이 식은 주조 부품, 가공 부품 및 다공성 강재에 대해서도 역시 적용이 가능하다.

가공 부품에 대하여 세 개의 다른 온도에서 시간에 따른 표면 침탄 깊이의 변화를 그림 1에 나타낸다. 세 개의 상대밀도(이것은 기공의 양을 나타냄)를 갖는 분말야금 부품에 대하여 925°C에서 진공 침탄 처리하였을 때 시간에 따른 침탄층의 깊이 변화를 그림 2에 나타낸다. 결론적으로 다공성 철계 부품에

*이 자료는 Heat Treating Process, 1(4) PP. 23-25에 게재된 내용을 번역한 것임.

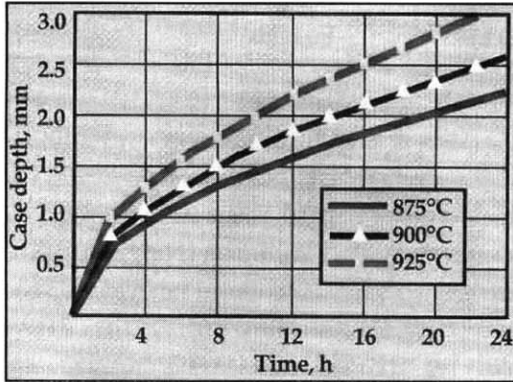


그림 1. 시간에 따른 가공 부품의 표면침탄 깊이 변화.

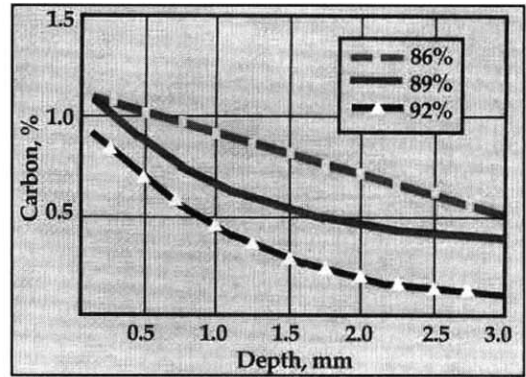


그림 3. 탄소 농도 분포에 미치는 가공의 영향(밀도가 낮은 시료의 탄소 농도는 거의 직선적으로 변함).

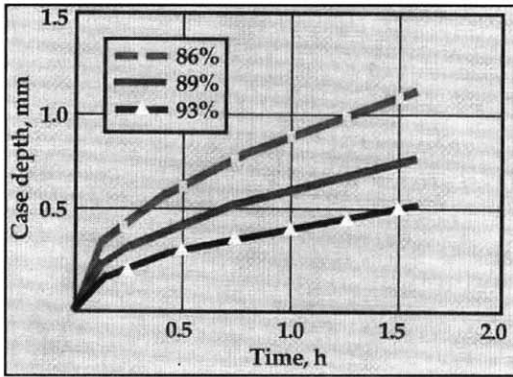


그림 2. 시간에 따른 분말야금 부품의 표면침탄 깊이 변화(세 개의 다른 밀도를 갖는 부품들을 925°C에서 진공침탄 처리함).

서 밀도가 낮으면 낮을수록 침탄층의 깊이는 커지며 탄소 침투깊이 및 침탄층의 깊이는 가공도가 커지면 증가한다.

실험에 의한 증명

분말야금 부품에서 가공이 탄소 침투에 어떠한 영향을 미치는가 하는 많은 연구가 이루어져 왔다. 본 연구에서는 유냉설비가 갖추어져 있는 열처리 로에서 침탄실험을 실시하였다. 침탄 열처리는 먼저 2시간 동안 840°C에서 오스테나이트화처리를 한 다음 유냉하였다 노내 분위기는 중성가스와 함께 메탄/공기의 흡열가스(40% : N₂, 40%: H₂, 20%: CO)를 사용하였다. 탄소 포텐셜은 탄소 프로브로 제어하였으며 탄소 함량은 채취된 시료로부터 결정하였다.

그림 3에 나타난 실험 결과는 가공 부품의 탄소 포텐셜보다 낮은 0.9%의 탄소 포텐셜에서 중심부의

탄소량이 0.04에서 0.72%로 증가함을 보여 주고 있으며, 이 경우 86%의 밀도를 갖는 시료를 2시간 침탄처리 한 결과 2mm의 깊이의 침탄층이 얻어졌다. 이러한 결과는 가공이 탄소 농도 분포에 어떠한 영향을 미치는 가를 보여주고 있다.

탄소 이동은 가스 상을 통과하며 일어난다. 침탄기구는 표 1의 세 개의 반응식으로 설명된다. 첫 번째 반응은 매우 느리기 때문에 침탄반응의 대부분은 두 번째 및 세 번째 반응에 의해서 일어나며 이러한 반응은 네 번째 반응 즉 물-기체 반응과 결합시킬 수 있다.

후자의 반응은 강의 내외부로 탄소를 이동시키는 모든 화학종(Chemical species)을 포함하고있다. 탄소의 침투를 더 깊게 그리고 더 빠르게 하기 위해서는 침탄가스 분위기를 가공 내로 침투시켜야 한다.

다공층 근사(Porous bed approach)

분말야금 부품의 열처리에서 가스-탄소 반응은 다공층 내에서의 화학반응속도와 유사한 것으로 간주할 수 있으며 이것은 다공층 반응에 대한 결론들과 비교되는 실험 데이터를 얻게 한다. 다공층에서의 가공

표 1. 침탄반응

반응 1	$CH_4 = (C) + 2H_2$
반응 2	$2CO = (C) + CO_2$
반응 3	$CO + H_2 = (C) + H_2O$
반응 4	$CO_2 + H_2 = CO + H_2O$

은 모세관과 유사한 것으로 간주하며 이러한 가정 하에서 기공의 구조는 기공의 거칠기, 형상 및 배열 등으로 특징지을 수 있다. 기공 및 기공의 구조를 평가하는 하나의 방법은 비틀림 인자(Tortuosity factor)라고 하는 경험적 상수를 이용하는 것이다. 다공성 고체를 통한 가스 확산이 짧은 거리를 제어하는 속도가 되면 이용 가능한 기공의 표면적 및 확산 통로의 길이는 침탄공정에 영향을 미친다. 면적이 A이고 기공도가 e인 다공성 시료를 통과하는 질량 흐름(Mass flux) $F = Ae/t$ 이며 여기서 Ae는 표면에서 이용 가능한 기공의 공간이며 t는 기공의 구조에 대한 불확정도를 나타낸다. 분말야금 부품에서 밀도가 낮아지면 Ae값은 증가하고 t 값은 감소한다. 이것은 분말야금 부품에서 밀도가 낮아지면 탄소의 흐름이 증가하며, 밀도가 커지면 탄소의 흐름이 감소함을 의미한다. 실제적으로 밀도가 더 높은 부품에서는 침탄은 더욱 더 천천히 일어난다.

다공층 근사법에서 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있다.

- 기공이 증가하면 확산속도는 증가한다.
- 가스의 확산속도에 비하여 계면의 반응속도가 매우 늦게 되면 시편 내외부의 가스조성은 동일하다.
- 확산속도가 늦어지면 화학반응에 의한 반응물은 감소되며 전체 반응속도는 기공의 표면적이 증가하더라도 비례하여 증가하지 않는다.

이러한 결과들을 그림 4의 실험 데이터와 비교하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

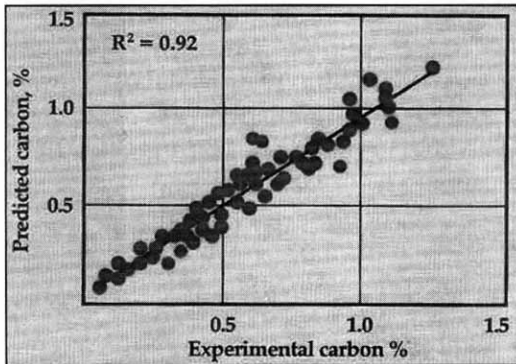


그림 4. 실험 결과값과 수학적 모델식과의 비교.

(1) 밀도가 감소함에 따라 반응가스가 부품 내부로 더 깊게 침투하기 때문에 침투속도는 증가 된다.

(2) 계면 반응속도는 기공 내부로의 가스 확산속도보다 더 늦다. 실제 조업에서 밀도가 증가함에 따라 침탄 속도는 늦어진다. 결과적으로 기공이 고립되어 있으면 탄소 침투는 강 내부의 탄소 확산에 더 의존적이다.

수학적 모델

앞의 실험결과를 표 2와 같이 세 개의 다른 밀도와 세 개의 다른 탄소 포텐셜을 이용한 통계적 근사법에 근거한다. 탄소 침투에 미치는 기공 및 탄소 포텐셜의 영향을 더 잘 이해하기 위하여 변수분석법(ANOVA; Analysis of variance) 및 다중회귀분석법을 포함한 모든 통계적 도구들을 채택하였다. 데이터의 분석에 의해 어느 특정 깊이(d; mm)에서의 탄소 함량, %로 표시한 탄소 포텐셜(CP) 및 상대밀도(r) 사이의 정량적으로 관계를 구하였으며 이러한 결과는

표 2. 실험 조건

상대밀도 (%)	탄소 포텐셜 (%)
0.81	0.5
	0.75
	1.0
0.86	0.5
	0.75
	1.0
0.91	0.5
	0.75
	1.0

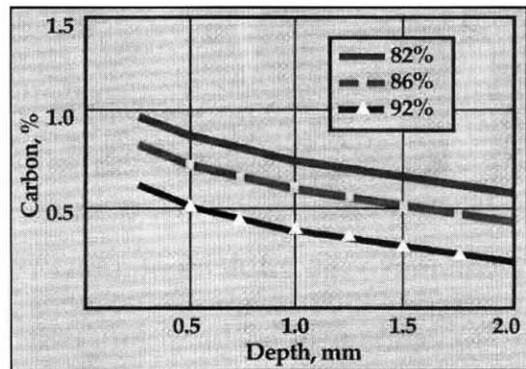


그림 5. 탄소 포텐셜이 0.5% 일 때 세 개의 다른 밀도를 갖는 시료에서의 탄소 침투 깊이 변화.

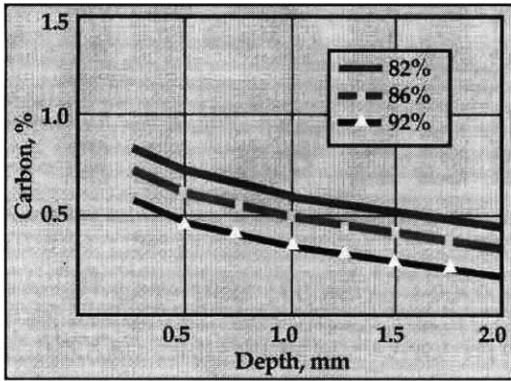


그림 6. 탄소 포텐셜이 0.7% 일 때 세 개의 다른 밀도를 갖는 시료에서의 탄소 침투 깊이 변화.

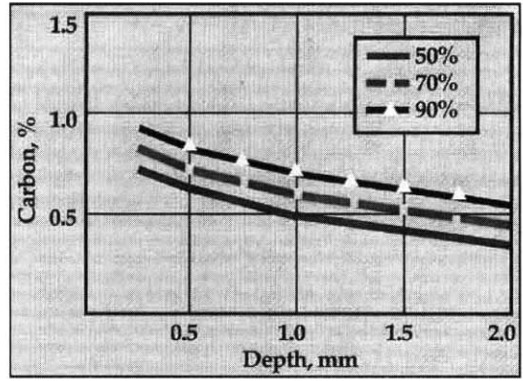


그림 9. 탄소 포텐셜이 0.86% 일 때 세 개의 다른 밀도를 갖는 시료에서의 탄소 침투 깊이 변화.

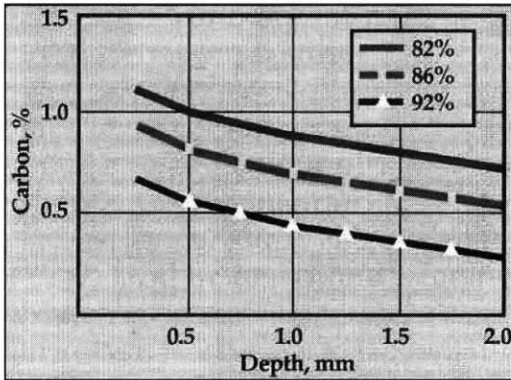


그림 7. 탄소 포텐셜이 0.9% 일 때 세 개의 다른 밀도를 갖는 시료에서의 탄소 침투 깊이 변화.

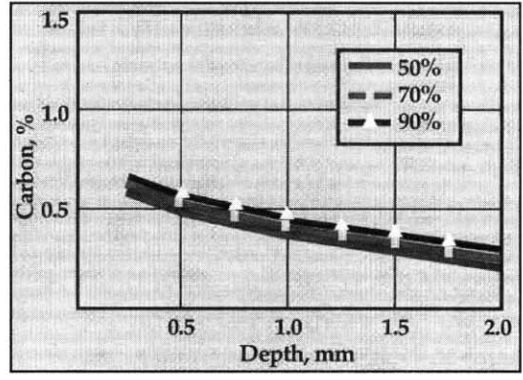


그림 10. 탄소 포텐셜이 0.92% 일 때 세 개의 다른 밀도를 갖는 시료에서의 탄소 침투 깊이 변화.

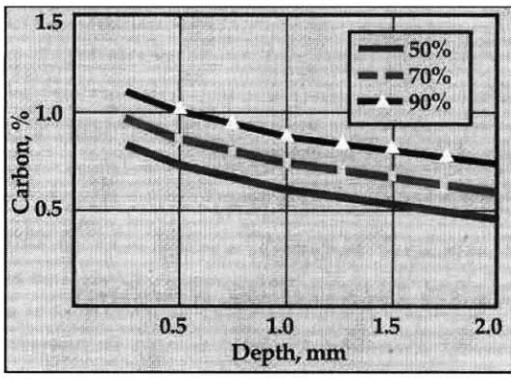


그림 8. 탄소 포텐셜이 0.82% 일 때 세 개의 다른 밀도를 갖는 시료에서의 탄소 침투 깊이 변화.

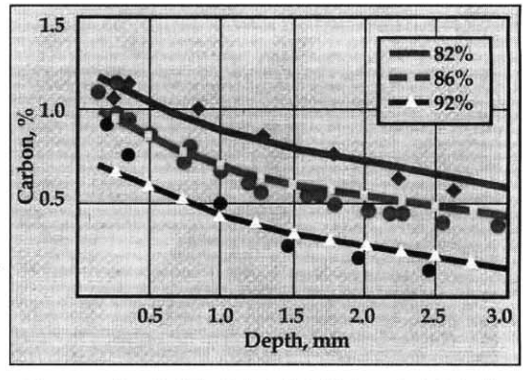


그림 11. 그림 3의 실험 결과값과 수학적 모델식과의 비교.

실험조건 내에서는 타당한 결과를 나타냈다.

수학적 모델 식은 깊이, 탄소 포텐셜 및 밀도-탄소 포텐셜 반응의 함수이다. 수학적 모델 식은 실험 데이터의 92% 이내의 값을 나타냈으며 그 정확도는 그림 4와 같다. 수학적 모델 식에서 밀도가 낮거나 중간 정도이면 표면 탄소는 높게 나타났으며 밀도가 높으면 표면탄소는 낮게 나타났다. 모델 식과 실험 데이터를 비교한 결과를 그림 11에 나타낸다.

수학적 모델 식은 다음과 같다.

$$\text{탄소} = 0.868 + 4.88(\text{CP}) - 5.11 (\text{CP})r - 0.616d^{1/3}$$

비록 엄격하게 잘 맞지는 않으나 모델 식은 탄소 량에 미치는 기공의 영향을 적절히 잘 나타낸다. 예를 들면 탄소 포텐셜이 탄소 침투 깊이에 어떻게 영향을 미치는가는 그림 5, 6 및 7에서 그리고 밀도가 탄소 포텐셜에 어떻게 영향을 미치는가는 그림 8, 9 및 10에서 잘 보여 주고 있다.