[논문] 열처리공학회지, 제37권 제5호(2024)
J. of the Korean Society for Heat Treatment.
https://doi.org/10.12656/jksht.2024.37.5.228

진공 침탄에서 아세틸렌 압력이 AISI 4120 강의 표면 물성에 미치는 영향

권기훈[1,3] · 손윤호[2] · 이영국[3,†] · 문경일[1,†]
[1]한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소 주문형생산연구부문
[2]㈜유진에스엠씨
[3]연세대학교 신소재공학과

Influence of Acetylene Pressure of Low-Pressure Carburization on the Carburizing Properties of AISI 4120 steel

Gi-Hoon Kwon[1,3], Yun-Ho Son[2], Young-Kook Lee[3,*], Kyoungil Moon[1,*]
[1]Customized Manufacturing R&D Department R&D, Korea Institute of Industrial Technology, Siheung 15014, Republic of Korea
[2]YuJin SMC Co., Korea
[3]Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Korea

Abstract: Low pressure carburizing is an industrially adopted process to modify the mechanical properties of the iron surface. Since acetylene gas is used as a carbon source, it has excellent carbon absorption and uniform carburizing layer compared to other carburizing gas. The superiority of carburizing properties is determined by the selection of process parameters such as acetylene flow rate and process pressure. The aim of this study is to examine the effects of the pressure of acetylene as a carburizing gas on carbon transfer and surface properties of carburized specimen. AISI 4120 steel was carburized using pure acetylene at flow rates of 10, 30 sccm and pressure conditions of 1, 5, 10, 15, 20 torr. In order to investigate the carbon behavior according to the acetylene pressure, the mass gain of carbon was measured and the abnormal structure formed on the surface was observed. With the experimental results, Abnormal layers such as soot and cementite were not observed on the surface of the carburized specimens under the 10 sccm condition, and there was no significant difference in carburizing properties according to pressure. On the other hand, as the pressure increased under the condition of 30 sccm, the cementite fraction increased, and soot was formed from 15 torr, reducing the overall hardness gradient.
(Received September 6, 2024; Revised September 20, 2024; September 23, 2024)

Keywords: *Acetylene; Mass gain; Pressure; Cementite; Soot*

1. 서 론

강재 부품의 표면 경화를 목적으로 사용되고 있는 침탄 열처리는 저합금강을 오스테나이트 영역까지 가열하고 침탄 원료를 투입하여 강 표면 부위에 탄소를 침투 및 확산시켜 퀜칭하는 방식으로 이루어지며, 침탄 원료 및 분위기 형태에 따라 플라즈마 침탄, 액체 침탄, 고체 침탄, 가스 침탄, 진공 침탄으로 구분된다 [1]. 기존에는 가스 침탄이 많이 사용되었으나, 이산화탄소 발생이 없는 친환경적인 공정, 우수한 침탄 균일도, 공정 시간 단축, 입계 산화물 미발생 등의 장점을 가진 진공 침탄으로 점차 대체되고 있다 [2]. 진공 침탄 공정은 강재를 900~1050°C까지 승온시킨 후, 저압 (1~10 torr)으로 정해진 펄스 스케쥴을 기준으로 침탄성 가스인 아세틸렌 가스를 주입하여 행해진다. 불포화 탄화수소인 아세틸렌은 삼중 결합구조

[†]Corresponding author. E-mail kimoon@kitech.re.kr
Copyright ⓒ The Korean Society for Heat Treatment

를 가져 분해하기 어려움에도 불구하고 진공 분위기에서 가열된 강을 촉매로 쉽게 탄소 및 수소로 분해되고 빠른 속도로 강에 탄소가 침투된다. 아세틸렌 분해 반응은 다음의 식으로 표현된다 [3].

$$2Fe + C_2H_2 = 2Fe[C] + H_2 + 53.5\ kcal \quad (1)$$

기존 가스 침탄의 경우, 침탄 분위기가 열역학적 평형상태에 있기 때문에 로내 가스 분압을 측정하여 Carbon potential을 제어한다. 반면에 진공 침탄에서 아세틸렌은 비평형 상태로 빠르게 분해되기 때문에 적절하지 않은 공정 변수 (아세틸렌 유량 및 압력)에서는 침탄과정 중에 과침탄이 되거나 표면 이상층이 형성되어 제품의 물성을 저하시킬 수 있다 [4]. 따라서 공정 변수가 침탄 반응에 끼치는 영향을 이해하며 공정 모델링 하는 것이 중요하다. 진공 침탄에서 대표적인 공정변수로는 아세틸렌 유량과 압력이 있다. 아세틸렌 유량은 침탄 처리를 위해 로 내에 유입되는 단위시간에 따른 가스량을 의미하며 철 표면으로부터 탄소가 침투되는데 직접적인 영향을 주는 공정 변수이다. 따라서 장입되는 제품의 형상 및 총 표면적을 고려하여 아세틸렌 유량을 설정해야한다. 또 다른 공정변수로서 공정 압력은 로 내 분위기에 존재하는 기체 분자들의 밀도와 관계되며, boost step에서 로 내부에 유입되는 아세틸렌 가스와 침탄 반응에 의해 형성된 수소 기체로 구분할 수 있다. 산업적으로 10 torr보다 높은 공정 압력에서 진공 침탄을 진행할 경우, 로 내부 (레토르트, 가스 노즐 등) 및 진공 펌프 배관에 그을음이 형성될 위험이 있고, 이로 인한 장비의 오염에 의하여 로내 진공 분위기를 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다 [5-7]. 진공 침탄 공정에서 공정 압력에 따른 침탄 거동에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. Ryzhov 등[8] 은 아세틸렌 기체가 분해되어 철 표면에 접촉되는 분자수는 공정 압력에 비례한다고 설명했음에도 불구하고 실험결과로부터 1~10 torr 범위에서 압력에 따른 침탄 물성 차이가 거의 없었다. 반면에 Yada 등 [9]은 공정 압력을 1.8 torr, 10 torr로 설정하여 침탄 시간에 따른 무게증가를 측정하였다. 공정 압력이 높을수록 침탄 초기에 무게는 명확하게 증가하였지만 비교적 긴 침탄 시간에서 무게증가는 감소하여 압력에 따른 무게증가 효과는 역전되었다. Tian 등 [10]은 12Cr2Ni4 강을 사용하여 공정 압력에 따른 surface carbon flux를 계산하였다. Zajusz 등 [11]은 공정 압력과 관련하여 탄소이행계수를 계산하는 수식을 제시하였으며 침탄 시간, 온도, 공정 압력에 따른 탄소 농도 구배를 시뮬레이션을 통해 계산하여 공정 변수 효과에 대해 설명하였다. 이전에 진행되었던 침탄 연구들은 대부분 실험결과를 통해 압력에 따른 침탄 물성 차이를 명확히 보여줬음에도 불구하고 물성 변화에 대한 원인을 규명하는데 설명이 미미했다. 또한 침탄 실험에서 사용되는 아세틸렌 유량에 대한 정확한 명시가 없었다. 이에 본 연구에서는 진공 침탄에서 공정 압력에 따른 표면 특성 변화를 근거하여 침탄 과정에서 입계 시멘타이트 및 그을음이 형성되는 원인을 규명하고 탄소 포화층이 강재 내에 탄소 침투를 저해시키는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 아세틸렌 유량 및 공정 압력에 따른 탄소 무게증가, 경도 변화, 미세조직을 각각 미세저울, 마이크로 비커스 경도계, 광학 및 주사 전자 현미경, 라만 분석기를 이용하여 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 소재는 세아베스틸에서 제조된 AISI 4120 봉강으로 자동차 기어 및 기계부품 소재로 흔히 사용된다. 이 소재의 화학 성분은 표 1과 같다. 진공침탄 공정에 사용되는 시험편은 봉강 소재로부터 가공하여 지름 30 mm, 높이 10 mm의 치수 및 디스크 형상을 가진다. 본 연구에서 사용한 실험용 침탄로는 내화학성 및 내열성이 뛰어난 석영으로 이루어져 있으며 가열부, 냉각 챔버, 전원 공급 장치, 진공 배기계, 가스 공급계, 제어계로 구성되어 있고 가열실과 소입실의 2실 밀폐형 수평식 구조로 되어 있다. AISI 4120 디스크 시험편을 Hot zone 중앙 구역에 장입하고 0.01 Torr까지 진공 배기하면서 950°C까지 승온시켜 각 온도에서 30분 동안 등온 유지한 후, 아세틸렌 가스 (C_2H_2, 99.99 %)를 5 분 동안 10, 30 sccm 유량으로 주입한 후, 4°C의 증류수에 20 분 동안 급냉시켰다. 침탄 실험 후 표면 Carbon flux를 평가하기 위해 침탄 전 · 후 무게 변화량을 미세저울 (AND, GR-200)로 0.0001 g 범위까지 측정하였으며, 침탄 시편의 깊이 방향으로 경도 분포를 측정하기 위해 마이

Table 1. Chemical composition of AISI 4120 (wt%)

Compositions	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
AISI 4120	0.196	0.223	0.641	0.020	0.015	0.116	0.091	0.947	0.172	Bal.

크로 비커스 경도계 (Mitutoyo, HM-210B)를 사용하였다. 측정하중은 100 gf, 하중시간은 10 초로 5 회 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값들의 산술 평균을 내어 경도값을 산출하였다. 침탄된 시편의 단면부를 800, 1000, 1500, 2000 grit의 SiC 연마지와 1 μm Diamond suspension을 이용하여 연마한 후 3 % Nital 용액에 약 1 분간 부식시킨 후 광학 현미경 (MTDI, HRM-300)과 주사 전자 현미경 (FEI Hong Kong Company, NNS 450)을 이용하여 단면 미세조직을 관찰하였다. 또한 공정 압력에 따라 표면에 도포된 그을음을 규명하기 위해 라만 분석기 (Jobin Yvon, LabRAM HR)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 950°C에서 30 sccm C_2H_2 조건에서 침탄 분위기 압력을 1 torr에서 20 torr까지 변화시키면서 진공침탄 처리한 시편의 표면 사진이다. 침탄처리된 시편의 표면 색상은 공정 압력에 따라 분명한 차이를 보여주고 있다. 1 torr에서 10 torr와 같은 공정 압력에서는 표면 변색이 거의 발생되지 않고 표면 색상은 light gray을 띄고 있다. 15 torr에서부터 변색이 시작되어 거의 gray-black 색상을 띄며 20 torr에서는 완전한 black 색상을 가진다. 15 torr 이상에서 공정 압력이 높아질수록 로 내에 잔여하는 아세틸렌 가스가 열분해되어 침탄 표면에 black 색상을 가지는 그을음이 도포된 것으로 판단된다. 도포된 black 층에 대한 명확한 규명은 위해 뒤에 공정 압력에 따른 표면 미세조직 및 상분석 데이터를 보면서 기술하고자 한다 (Fig. 9, 11 참고).

Fig. 2에 보여지는 바와 같이 아세틸렌 유량 (10, 30 sccm) 조건에서 공정 압력에 따른 침탄 시편의 증가된 질량 곡선을 나타내고 있다. 증가된 질량은 침탄 공정 중에 시편 표면에 침투된 탄소 원자의 질량을 의미하며, 분위기는 진공 및 환원성 분위기를 띄기 때문에 산화층의 영향은 없는 것을 판단된다. 아세틸렌 유량과 상관없이 공정 압력이 높아짐에 따라 무게 증가량이 늘어났지만 아세틸렌 유량에 따라 무게 증량 곡선은 서로 다른 거동을 나타내고 있다. 10 sccm 유량 조건의 경우, 침탄 시간이 길어질수록 공정 압력

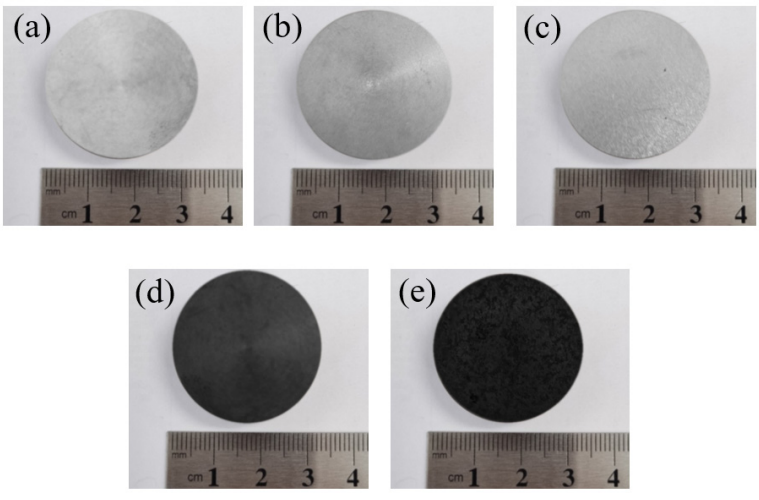

Fig. 1. Top views of carburized in specimens at 950°C according to acetylene pressures in the furnace: (a) 1 torr; (b) 5 torr; (c) 10 torr; (d) 15 torr; (e) 20 torr.

에 따라 비슷한 무게 증량을 가지며 linear law를 따른다. 진공 침탄은 철을 촉매로 아세틸렌이 순식간에 분해되어 탄소가 침투되는 반응인데, 낮은 유량 (10 sccm)의 아세틸렌에 의해 철 표면으로부터 탄소가 침투되는 속도가 낮기 때문에 표면 탄소 농도가 포화치에 도달하지 않아 아세틸렌 촉매 저하 효과가 없어 linear 거동을 유지한다고 판단된다. 반면에 30 sccm 유량 조건의 무게 증량은 60 s 이내에서 linear한 증량 커브를 가지지만 침탄 시간이 더 길어질수록 따라 parabolic law를 따른다 [13]. 특히, Fig. 1에 표면 변색이 일어난 15 torr 이상의 압력 조건에서 무게 증량이 역전되어 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 3은 각 아세틸렌 유량 (10, 30 sccm)에서 공정 압력에 따른 침탄 시편 내 깊이 방향의 비커스 경도 분포 곡선을 나타낸다. 침탄 시편의 경화부는 기지 내에 고용된 탄소 농도에 비례하여 고용 강화 및 침탄 직후 급냉에 의한 경화능으로 경도가 높은 마르텐사이트 조직으로 변태된다. 따라서 아세틸렌 유량이 높은 30 sccm 조건이 10 sccm 조건에 비해 탄소 침투가 많기 때문에 높은 경도분포를 가진다. 10 sccm 조건에서 공정 압력에 따른 경도 곡선은 공정 압력에 상관없이 유사한 경도분포를 가지는 반면에 30 sccm 조건에서 공정 압력에 따른 경도 곡선은 다른 차이를 갖는다. 공정 압력이 10 torr 이하에서 공정 압력이 높아짐에 따라 표면부근 (표면으로부터 0.1 mm이하)의 경도는 분명하게 높아지고 유효 경화 깊이는 미미하게

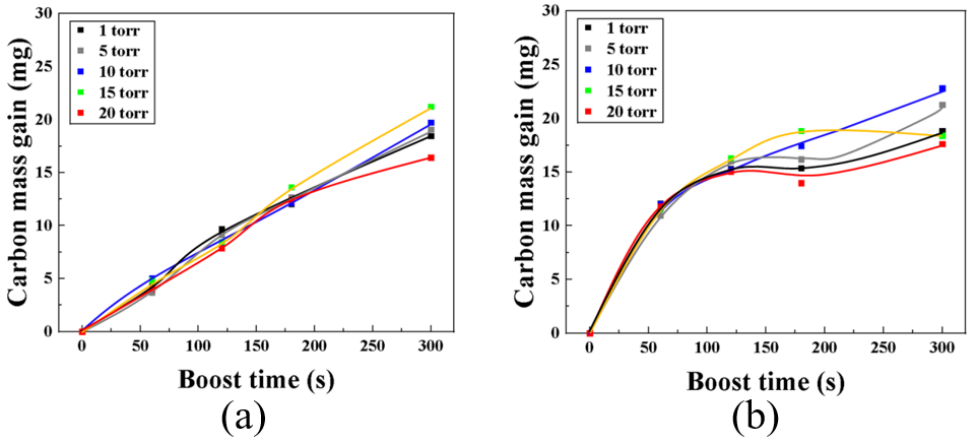

Fig. 2. Mass gain curves of AISI 4120 steel carburized for 300 s according to acetylene pressures: (a) 10 sccm; (b) 30 sccm.

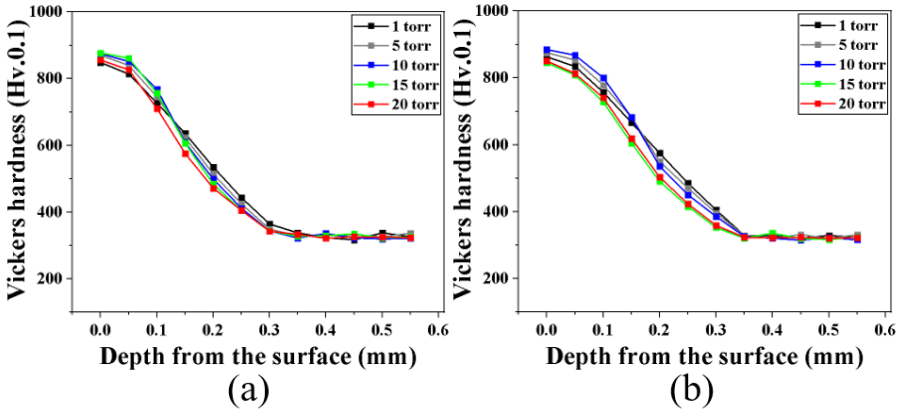

Fig. 3. Vickers hardness distributions of AISI 4120 steel carburized for 300 s according to acetylene pressures: (a) 10 sccm; (b) 30 sccm.

감소하지만 15 torr 이상의 공정 압력에서부터 전반적인 위치에서 경도 저하가 발생한다.

앞에서 기술한 바와 같이 아세틸렌 유량이 증가할수록 처리 시편의 탄소가 침투되는 속도가 빨라지는 효과와 유사하게 30 sccm 조건에서 공정 압력이 높아지면 경도 곡선이 임계 압력 (10 torr)까지 증가하다가 감소하는 현상을 Fig. 4와 같이 공정 압력에 따라 탄소 확산이 변화되는 모식도를 이용해 좀 더 효과적으로 설명하고자 한다. Case 1 (임계 압력 이하)의 경우는 Fig. 4 (a)와 같이 공정 압력이 증가함에 따라 침투되는 탄소량이 많아져 표면부의 탄소 농도가 증가할 뿐 만 아니라 입계 시멘타이트가 석출되어 모재 방향으로 탄소가 확산되는 속도를 저하시킨다. Case 2 (임계 압력 초과)에서 아세틸렌 열분해에 의해 침탄 시편 표면부에 그을음이 형성되어 침탄 분위기로부터 시편으로 탄소의 침투뿐만 아니라 내부로 확산되는 속도를 저하시킨다. 진공 침탄 공정에서 아세틸렌 유량은 처리재의 표면적 및 로 내부 크기에 따라 달라지지만 공정 압력은 분위기가 구성하는 밀도이고 세기 값이기 때문에 아세틸렌 유량이 고정되면 달라진 침탄 환경에서도 비슷한 압력 효과를 확인 할 수 있다.

Fig. 5는 각 아세틸렌 유량 (10, 30 sccm)에서 공정 압력을 1 torr에서 최대 10 torr까지 변화시키면서 침탄처리한 시편의 단면을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 조직사진에서 표면부에 보이는 백색 부위는 탄소가 고용되어 마르텐사이트 조직이 형성된 경화층에 해당되고 그 이외의 부위는 마르텐사이트/ 베이나이트 혼합조직으로 심부에 가까운 확산층 및 모재부에 해당된다. 광학현미경 조직사진을 참고하여 10 sccm 조건에서 처리된 침탄 시편의 경화층 두께는 1, 10, 20 torr에서 각각 0.178, 0.175, 0.166 mm로 측정되었다. 공정압력에 따라 경화 깊이 차이는 미미하지만 다른 압력 조건에 비해 20 torr에서 0.01 mm 정도 부족한 경화 깊이를 확인했다. 반면에 30 sccm 조건에서 처리된 침탄 시편의 경화층 두께는 1, 10, 20 torr에서 각각 0.204, 0.195, 0.174 mm로 측정되었다. 10 sccm 조건에 비해 공정 압력에 따른 경화 깊이 저하가 분명하게 관찰된다.

Fig. 6은 각 아세틸렌 유량 (10, 30 sccm)에서 공정 압력에 따른 침탄 시편의 경도 프로파일을 5 회씩 측정하여 경도가 550 Hv를 가지는 깊이를 기준으로 최소 및 최대값을 제외하고 나머지 값들을 산술 평균을 내어 유효경화 깊이를 산출하였다 (KS D ISO 4507 기준). Fig. 5에 광학 현미경으로 관찰된 침탄 시편의 침탄층과 유사한 경향으로 10 sccm 조건에서 공정 압력 별 유효 경화 깊이는 0.177 mm (1 torr), 0.176 mm (5 torr), 0.175 mm (10 torr), 0.171 mm (15 torr), 0.166 mm (20 torr)이고 공정 압력에 상관없이 유효경화 깊이는 비슷할 뿐 만 아니라 오차 범위는 6 % 미만으로 분석되었다. 반면에 30 sccm 조건에서 공정 압력 별 유효 경화 깊이는 0.203 mm (1 torr), 0.192 mm (5 torr), 0.194 mm (10 torr), 0.177 mm (15 torr), 0.173 mm (20 torr)이고 공정 압력이 높아짐에 따라 5 torr까지 유효 경화 깊이는 미미하게 저하되었으며 15 torr부터 경화 깊이 저하 효과가 증가하고 오차 범위는 14 % 이상으로 분석되었다. 10 sccm 유량 조건에서 공정 압력에 따른 침탄 물성은 큰 차이가 없는 반면에 30 sccm 유량 조건에서 진공 침탄 시 임계압력을 넘어서게 되면 시편 표면에 그을음이 도포되고 mass gain 및 경화 깊이가 크게 저하됨을 확인하였다.

임계압력 이상에서 처리 시편의 침탄 물성이 저하되는 현상을 규명하기 위해 Fig. 7과 같이 아세틸렌 유량 (10, 30 sccm)에서 공정 압력에 따른 표면으로부터 20 μm 이내의 침탄 시편 단면을 광학 현미경을 통해 1000 배율로 관찰하였다. 10 sccm 유량 조건 (Fig. 7 (a)~(c))에서는 미세조직 사진을 통해 표면부에 입계 탄화물이 1~2 μm 이내 두께로 거의 관찰되지 않는 반면에 30 sccm 유량 조건 (Fig. 7 (d) ~ (e))에서는 표면부에 입계 탄화물이 15~20 μm 두께로 관찰되었다. 이 탄화물은 기지 내 오스테나이트 상에서 탄소 고용한도를 넘어 석출한 시멘타이트이다 [12]. 특히 30 sccm 조건에서 공정 압력이 높을수록 표면부에 석출된 시멘타이트 분포가 커질 뿐만 아니라 20 torr 조건에서 최표면에 그을음으로 판단되는 이상층이 관찰되었다. 따라서 시편 표면부에 형성된 시멘타이트, 그을음과 같은 이상층은 침탄 과정 중에 아세틸렌 가스가 분해되어 탄소가 강재 내에 침투 및 확산되는 속도를 저하시키는 역할을 한다고 판단된다.

Fig. 8은 아세틸렌 유량 (10, 30 sccm) 조건에서 공정 압력에 따른 Transverse 방향에서 표면부의 미세조직이다. 침탄 시편 표면은 수냉에 의해 산화막으로 도포되기 때문에 침탄층의 미세조직을 정확하게 파악

하기 힘들다. 따라서 1 μm Diamond suspension을 이용하여 얇게 산화막을 연마한 표면부의 미세조직을 관찰하였다. 10 sccm 조건에서는 공정 압력에 상관없이 표면 미세조직은 대부분 마르텐사이트 조직을 가진다. 이는 표면부에 고용된 탄소 농도가 포화치에 도달하지 않았기 때문에 이상층은 관찰되지 않았다. 30 sccm 조건에서 처리 시편의 표면부 미세조직은 공정 압력에 따라 뚜렷한 차이를 보인다. 1 torr 및 10 torr 조건에서 표면부에 석출된 시멘타이트는 약 3~5 vol.%를 차지하고 있으며, 20 torr 조건에서 그을음으로 판단되는 이상층이 관찰되었다. 따라서 처리 시편 표면에 형성된 이상층은 철 표면의 촉매 면적을 줄여 탄소 침투 반응을 저하시킨다.

Fig. 9는 아세틸렌 유량 (10, 30 sccm) 조건에서 공정 압력에 따라 침탄 처리된 시편의 시멘타이트 체적 분율 곡선이다. 10 sccm 조건에서는 공정 압력에 상관없이 표면으로부터 약 5 μm 이내에 시멘타이트 구역을 가지고 있으며 표면에서 시멘타이트의 체적 분율은 약 1 vol.%를 가진다. 반면에 30 sccm 조건의 경우, 15 μm 구역을 갖는 시멘타이트 층을 가지며 표면에서 시멘타이트의 체적 분율은 약 5~6 vol.%를 가진다. 공정 압력이 높아질수록 시멘타이트 분율 구배는 높아질 뿐만 아니라 시멘타이트 15 torr부터 표면 체적 분율은 포화에 도달한다.

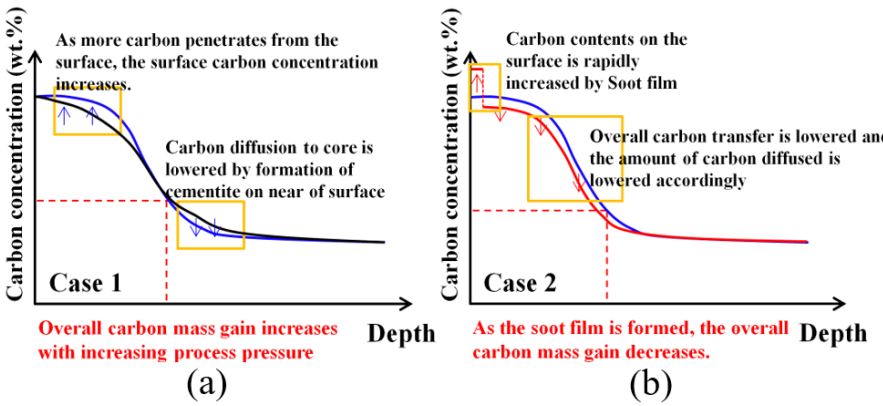

Fig. 4. 2 Case of Carbon behavior according to acetylene pressures: (a) before abnormal layer formation; (b) after abnormal layer formation.

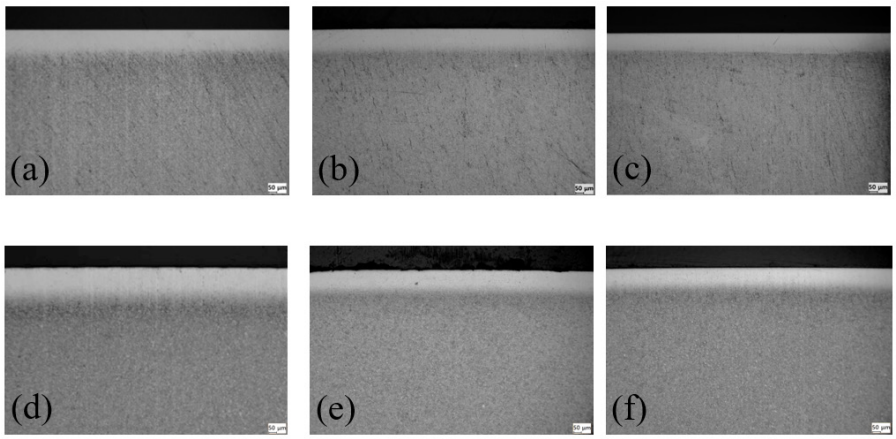

Fig. 5. Optical cross-sectional metallographic pictures of the as carburized: (a) 10 sccm, 1 torr; (b) 10 sccm, 10 torr; (c) 10 sccm, 20 torr; (d) 30 sccm, 1 torr; (e) 30 sccm, 10 torr; (f) 30 sccm, 20 torr.

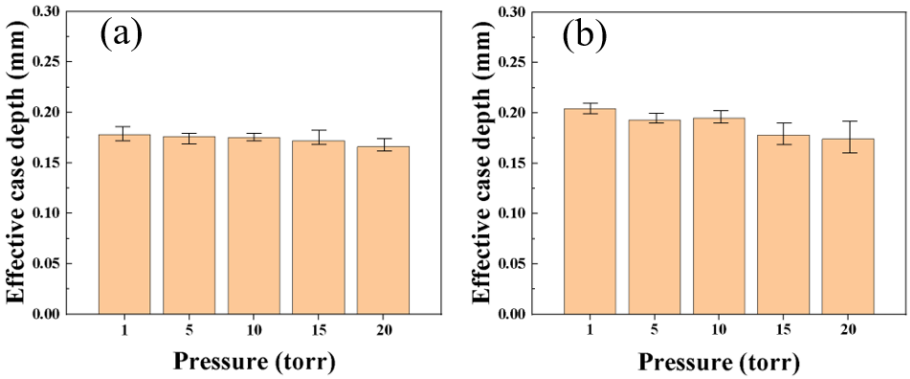

Fig. 6. Effective case depth graph of the as-carburized specimens according to acetylene pressures: (a) 10 sccm; (b) 30 sccm.

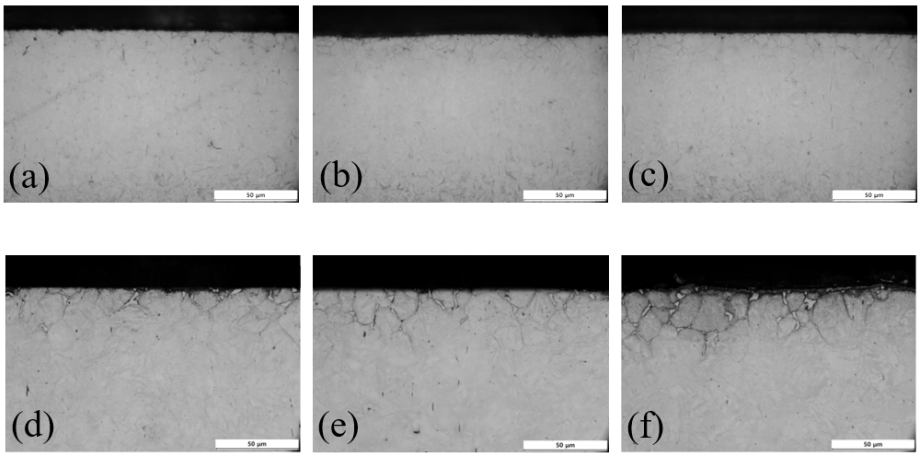

Fig. 7. Optical cross-sectional metallographic pictures of the as-carburized: (a) 10 sccm, 1 torr; (b) 10 sccm, 10 torr; (c) 10 sccm, 20 torr; (d) 30 sccm, 1 torr; (e) 30 sccm, 10 torr; (f) 30 sccm, 20 torr.

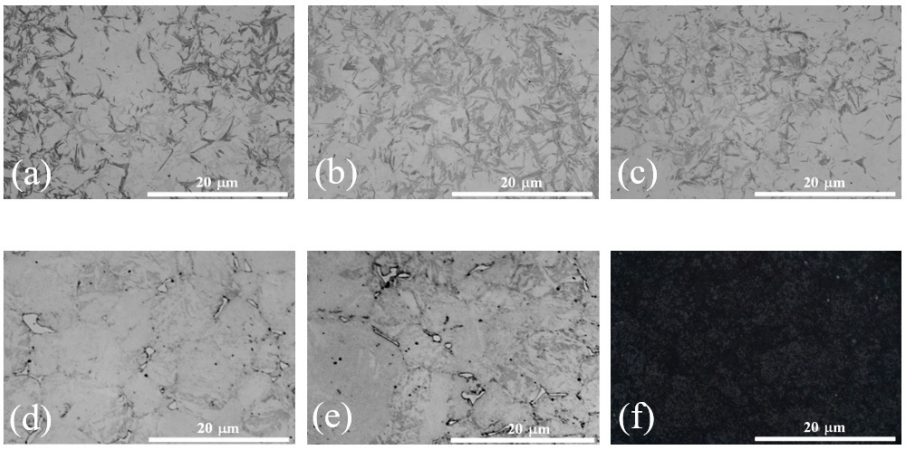

Fig. 8. SEM images near the surface of the as-carburized specimens according to acetylene pressures: (a) 10 sccm, 1 torr; (b) 10 sccm, 10 torr; (c) 10 sccm, 20 torr; (d) 30 sccm, 1 torr; (e) 30 sccm, 10 torr; (f) 30 sccm, 20 torr.

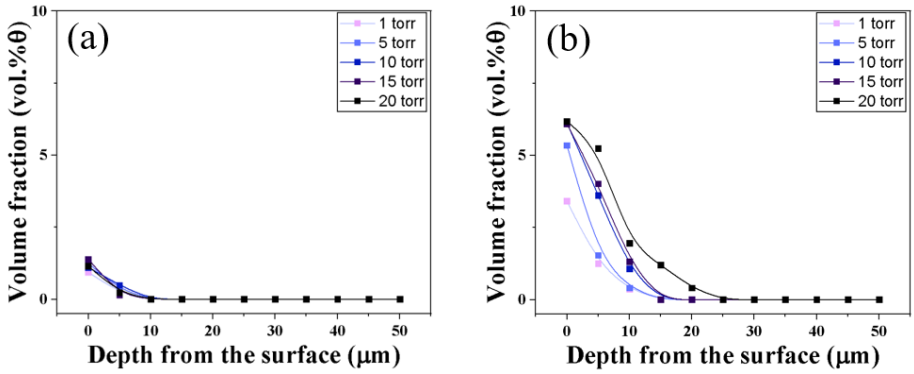

Fig. 9. Volume fraction distributions of cementite of the the as-carburized specimens according to acetylene pressures

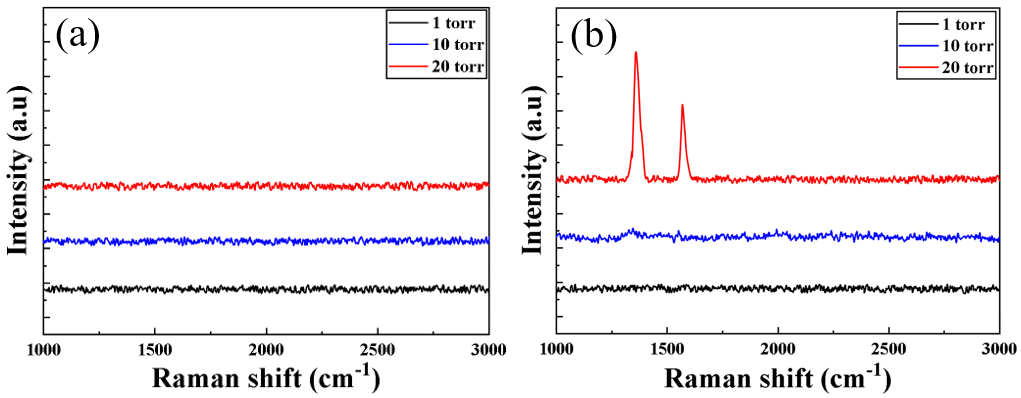

Fig. 10. Raman spectroscopy of the as-carburized specimens according to acetylene pressures: (a) 10 sccm; (b) 30 sccm.

Fig. 10은 공정 압력에 따른 시편 표면에 형성된 탄소 구조를 규명하기 위해 라만 분광기를 이용하여 분석한 탄소 결정도를 보이고 있다. Fig. 10 (a)와 같이 10 sccm 조건에서 처리된 침탄 시편의 표면은 공정 압력에 상관없이 탄소가 도포되지 않는 마르텐사이트 조직으로 특정 탄소 peak가 검출되지 않는다. Fig. 10 (b)에서 아세틸렌 유량을 30 sccm으로 증가시켰을 때 1, 10 torr 공정 압력조건에서 마찬가지로 탄소 구조를 확인할 수 없었다. 반면에 20 torr 조건에서 처리한 시편의 경우, 라만 스펙트럼에서 눈에 띄는 것은 1350 cm^{-1}에 위치한 불규칙한 격자구조를 가지며 sp^3 결합에 의한 D band와 1558 cm^{-1} 부근에서 규칙적인 격자구조를 가지며 sp^2 결합에 의한 G band이다. 표면에 도포된 검정 물질은 아세틸렌 열분해에 의해 탄소가 응축되어 형성된 그을음으로 판단되며 I_D / I_G 비가 약 1.714의 값을 갖기 때문에 결정성이 낮은 탄소 구조이다.

4. 결 론

본 연구에서는 진공 침탄에서 공정 압력에 따른 표면 특성 관찰을 하여 침탄 과정 중에 형성되는 이상층에 대한 원인을 규명하고 강재 내에 탄소가 침투 및 확산되는데 끼치는 영향을 고찰하였다. 핵심 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 30 sccm 아세틸렌 유량 조건에서 10 torr 이내에서 표면 변색은 공정 압력에 상관없이 일어나지 않는다. 특히, 15 torr 이상부터 처리시편 표면에 검은 변색이 도포되기 시작한다.
2. 침탄 시간에 따른 mass gain은 10 sccm, 30

sccm 조건에서 각각 linear law, parabolic law을 따른다.

3. 10 sccm 아세틸렌 유량 조건에서 압력 별 경도 프로파일은 공정 압력에 상관없이 거의 동일한 반면에, 30 sccm 유량 조건의 경도구배는 15 torr 이상의 공정 압력부터 표면 경도 및 경화 깊이가 감소한다.
4. 30 sccm 유량 조건에서 공정 압력이 높아질수록 처리 시편의 표면부에 석출되는 시멘타이트 분율은 높아지며, 15 torr부터 표면에 낮은 결정성을 갖는 탄소 구조체가 도포된다.

감사의 글

본 연구는 한국산업단지공단 (KICOX)의 재원으로 경기 반월시화 스마트그린 산업단지 공정혁신 시뮬레이션센터 구축 및 운영 사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다 (No: SG20230101)

References

1. M. J. Son: J. Korean Soc. Heat Treat, **31** (2018) 68.
2. J. L. Dossett and G. E. Totten: ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, pp. 581–590, ASM International, MaterialsPark, OH (2013).
3. H. G. Kim and T. Y. Chung: J. Korean Soc. Heat Treat, **13** (2000) 35.
4. T. Turpin, J. Dulcy, and M. Gantois: Metall. Mater. Trans, **36** (2005) 2751.
5. M. Sugiyama, K. Ishikawa and H. Iwata: Adv. Mater. Process, **155** (1999) 29.
6. P. Rokicki, K. Dychton: Arch. Metall. Mater, **61** (2016) 2009.
7. G. H. Kwon, K. I. Moon, Y. K. Lee and M. Jung: J. Korean Soc. Heat Treat, **34** (2021) 272.
8. N. M. Rzhov, R. S. Fakhurtdinov and A. E. Smirnov: Met. Sci. Heat Treat, **29** (2010) 52.
9. K. Yada and O. Watanabe: Computers & Fluids, **79** (2013) 65.
10. Y. Tian, H. Wang, X. An and Z. Wang: Mater. Res. Express, **6** (2019) 516.
11. M. Zajusz, M. Tkacz-smiech, and M. Danielewski: Surf. Coat. Tech, **258** (2014) 646.
12. X. An, Y. Tian, B. Wang, T. Bia, H. Wang: H, Surf. Coat. Tech, **421** (2021) 127348.
13. H. Wang, J. Liu, Z. Wang and X. An: Coatings, **10** (2020) 1075.
14. L. R. P. Kassab, A. D. Santos and M. F. Pillis: Mater. Res, **21** (2018) 147.