

CO₂ 무 배출 침탄 열처리된 SCM415H 소재의 기계적 성질

변재혁* · 노승훈*† · 이종형* · 이창현** · 양성현**

*금오공과대학교 지능기계공학부, **금오공과대학교 생산기술 연구소

Mechanical Properties of The CO₂ Free Vacuum Carburized in SCM415H

Jae Hyuk Byun*, Seung Hoon Ro*†, Jong Hyung Lee*, Chang Hun Lee**
and Seong Hyeon Yang**

* Dept. of Intelligent Mechanical Engineering, Kumoh Nat'l Institute of Technology

** Production Technology Research Institute, Kumoh Nat'l Institute of Technology

(Received December 14, 2011 ; Revised June 20, 2012 ; Accepted June 29, 2012)

Key Words: Vacuum Carburizing(진공침탄), Gas Carburizing(가스침탄), Acetylene(아세틸렌), CO₂ Free(이산화탄소 무배출), Mechanical Properties(기계적성질)

초록: 진공침탄법은 이산화탄소의 발생이 없는 친환경적인 열처리 방식으로 알려져 있다. 그러나 진공침탄법은 탄화수소 가스(메탄, 프로판)를 노내에 직접 공급하여 열분해하는 과정을 거침으로써 노내에 그을음이 발생하여 안정적인 조업이 불가능한 단점이 있다. 최근에는 이러한 단점을 극복하기 위한 불포화 탄화수소인 아세틸렌가스를 이용한 진공침탄법이 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 아세틸렌가스를 이용한 진공침탄방식의 침탄 및 확산 시간을 변수로 하여 여러 가지 조건에서 열처리를 진행한 후 가스침탄 열처리된 소재와 기계적 성질을 비교 분석하여 이산화탄소 무 배출 진공침탄 열처리 방법의 활용가능성을 확인하였다. 연구 결과 본 연구에서 시도된 진공침탄법은 가스침탄에서 나타나는 입계산화층이 발생하지 않았으며 경도 값은 진공침탄 시험편의 유효경화 깊이가 29.8% 크게 나타났으며 인장강도는 가스침탄보다 10% 낮게 나왔으나 허용치를 충분히 만족하는 수준이었다.

Abstract: Vacuum carburizing is supposed to be the superior process to the gas carburizing. However, the vacuum carburizing has the stage in which hydrocarbon gas is supplied into the furnace to be pyrolysis, and consequently the stable heat treatment is hard to achieve due to the soot from the hydrocarbon pyrolysis. Recently, many studies have been made which utilize acetylene gas to overcome this defects. In this paper, the carburizing and the diffusion periods have been selected based on the Harris experimental formula, and the mechanical properties of the vacuum carburized specimen have been compared with those of the gas carburized SCM415H specimen to identify the feasibility of the CO₂ free vacuum carburizing process. The result showed that the vacuum carburized materials used have no oxidization of the grain boundaries, and show the 29.8% higher effective hardness depth and the acceptable tensile strength.

1. 서 론

열처리는 부품생산 공정의 최종단계로서 제품의 성능과 직결되는 기술이며 산업의 고도화에 따른 주요부품의 내구성 향상을 위하여 그 중요성이 더욱더 증대되고 있다. 열처리 분야의 향후 10~20년의 주된 기술개발 목표들은 열처리 변형 저감, 재료의 강도개선, 에너지 및 CO₂ 저감 등이다.

국내의 경우, 품질의 고급화 및 고기능화를 위한 신기술 접목과 신 공정 개발, 자동차 고급화 및 글로벌 부품 생산 지원을 위한 친환경 열처리 기술 개발 및 에너지 절감에 부응 할 수 있는 기술 개발의 필요성이 절실하게 대두되고 있다.⁽¹⁾ 침탄 열처리는 저탄소강의 표면에 탄소를 침투시켜 표면만 고탄소강으로 만드는 공정으로 표면은 딱딱하게 내부는 무르게 하는 기계적 성질을 얻기 위한 방법이다.

현재 대부분의 침탄은 가스 침탄 법을 사용하는데 가스침탄은 효율성과 작업 안정성이 낮고

† Corresponding Author, shro@kumoh.ac.kr

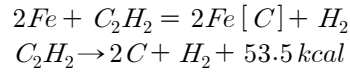
공해를 유발하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 수단으로 진공침탄 법이 활발히 연구 개발되고 있다.^(2,3)

진공침탄은 탄소고용한도와 확산을 이용해서 침탄 층을 제어하는 방법으로 침탄시간과 확산시간의 조절에 의해 목표로 하는 표면 탄소량과 침탄깊이를 정확하게 얻는 방식이다. 일반적으로 진공침탄은 1기압 이하에서 900~1040℃로 가열된 제품에 대해 침탄 성 가스(메탄, 프로판 등)를 주입하여 침탄 열처리를 하였으나 그늘음의 문제가 발생하여 상용화가 극히 제한적이었다. 하지만 최근에는 이러한 문제를 해소하기 위하여 불포화 탄화수소인 아세틸렌가스를 이용하여 진공침탄을 실시하는 추세이다. Fig. 1은 진공침탄 프로세스와 탄소 포화치 조정법을 상태도 상에 나타낸 그림이다. 상태도 상에서 알 수 있듯이 아무리 높은 탄소 고용한도에서 침탄을 행한다고 해도 오스테나이트로의 탄소원자의 고용한도 (Acm)가 있기 때문에 그 이상 침탄은 진행되지 않는다.

본 논문에서는 기존의 열처리 방식인 가스침탄 열처리와 아세틸렌가스를 이용한 진공침탄 열처리 후의 기계적 성질을 비교 분석하여 이상적인 진공침탄 열처리방법을 찾기 위한 연구를 진행하였다.

아세틸렌은 불포화 탄화수소 중에서도 특히 반응성이 높은 3중 결합 구조를 가지고 있으며 수소를 금속으로 치환해서 금속탄화물을 생성시키고 중합반응에 의한 방향족 탄화수소의 생성 및 3중 결합을 부가반응 시 촉매의 존재 하에서 오

레핀을 거쳐 포화탄화수소를 생성한다. 진공침탄 로에 도입된 아세틸렌은 다음과 같은 반응을 일으킨다.



진공 중에서 가열된 강과 접촉한 아세틸렌은 용이하게 탄소와 수소로 분해되고 탄소는 γ 철 중에 고용되어 침탄이 이루어진다.⁽⁶⁾

2. 실험방법

2.1 시험편

Fig. 2는 실험에 사용된 SCM415H Pinion shaft 시험편이다.

Table 1은 일반적으로 자동차사가 요구하는 침탄열처리 후 만족되어야할 기계적 성질이다.

2.2 시험편의 물성분석

실험에 사용된 SCM415H 시험편의 성분은 아래의 Table 2와 같다.

Table 1 Spec of the heat treatment of pinion shaft

Material	SCM 415H
Surface hardness	HV 750 or higher
Effective case depth (HV550)	0.45~0.85mm
Tensile strength (MPa)	980 higher

Table 2 Chemical composition of SCM 415H(wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.18	0.16	0.65	0.02	0.02	0.05	1.0	0.15

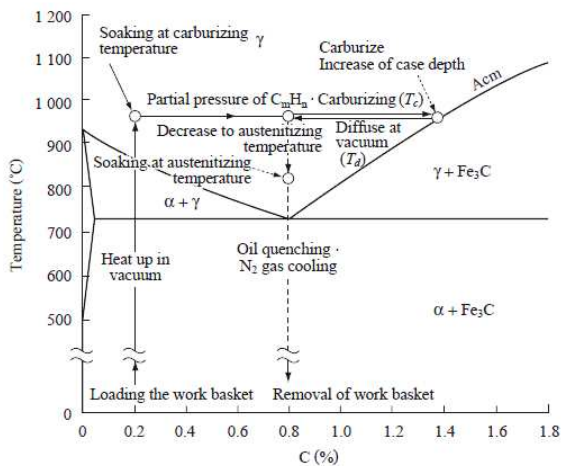


Fig. 1 Equilibrium diagram and carburizing basics⁽⁴⁾

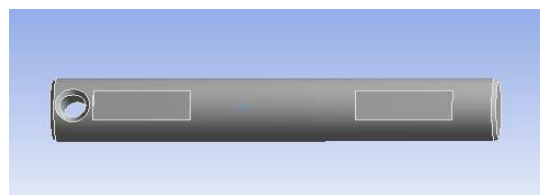
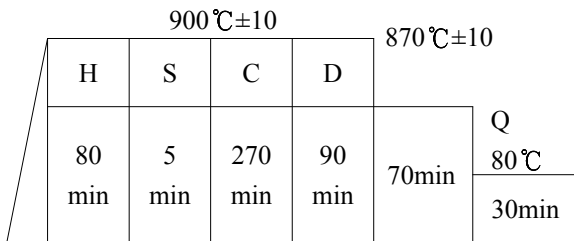


Fig. 2 SCM415H Pinion shaft

Table 2의 성분 값을 JMatPro⁽⁶⁾에 입력하여 온도에 따른 상변화와 CCT(Continuous cooling transformation) / TTT(Time temperature transformation) 곡선을 분석하였다. 이후부터 CCT, TTT라 칭한다.

2.2 가스침탄 열처리

가스침탄 열처리의 공정도는 아래의 Fig. 3과 같다. 상온에서 목표 온도까지의 시간은 PID(Proportional integral derivative control)제어되며 예열 단계에서부터 소입 전까지 RX가스(도시가스와 공기의 혼합)의 공급량은 13~17m³/hr이며 CP%(Cabon Potential)는 침탄단계에서는 1.1±0.05%, 소입 전 단계까지는 0.85±0.05%로 실험을 진행하였으며 오일냉각(Q)시의 오일의 교반속도는55Hz이다.



← Room temperature

H: Heating S: Soaking Q: Quenching
C: Carburizing D: Diffusing

Fig. 3 A heat treatment cycle for gas carburizing

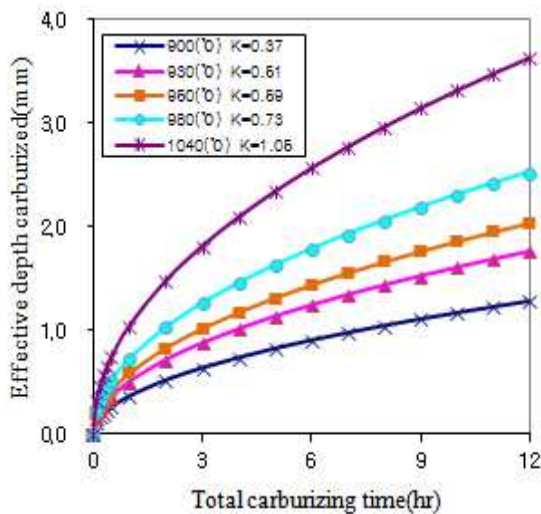


Fig. 4 Relationship between carburizing time and effective depth of hardening

2.3 진공침탄 열처리

진공로 내에 목표온도 도달 후에 온도의 안정화 후 균일한 가열(Soaking)이 이루어지면 아세틸렌가스가 주입(Carburizing)되어 로 내부는 수초만에 소정의 압력에 도달하고 처리물의 표면 각 위치는 감압하의 침탄분위기로 균일하게 되어 침탄이 개시된다. 아세틸렌가스 공급 후 가스를 배출해서 원래의 진공도로 돌아와 확산(Diffusing)을 실시한다. 침탄 및 확산에 소요되는 시간의 설정은 아래의 해리스 식에 따라 이루어진다.^(7,8)

$$D = K\sqrt{T}$$

$$Tc = T \times \left(\frac{C_2 - C_0}{C_1 - C_0} \right)^2$$

$$T = T_c + T_d$$

$$T_d = T_c \cdot R \tag{5}$$

- D : 유효경화 깊이 K: 상수
- T : 총 침탄시간 Tc: 침탄시간
- Td: 확산시간 C0: 소재탄소농도
- C1: 침탄시탄소농도 C2: 표면탄소농도
- R: 확산, 침탄시간의 비

진공침탄은 해리스 식을 통해 목표로 하는 탄소농도에 대한 유효깊이와 침탄시간을 예측할 수 있다.⁽⁵⁾ 본 실험에 사용된 진공침탄 로 및 열처리 공정에 대한 유효경화 깊이를 구하기 위한 해리스식의 상수 K값은 각각의 온도에 따라 Fig. 4를 이용하여 구할 수 있다.

0.75mm의 경화 깊이를 위한 온도는 900~1040℃에서 선택이 가능하지만 높은 온도에서 과열되면 입자의 크기가 커져 기계적 성질이 낮아지므로 SCM415H 시험편의 입자크기가 커지지 않는 최대 허용온도인 930℃에서 실험을 진행하였다. 따라서 K값은 0.51로 결정되었다. 침탄 및 확산시간을 결정하기 위한 변수 R(확산시간/침탄시간)값은 3가지 조건으로 변화를 주어 실험을 진행하고 기계적 성질과 조직, 경도 값 등 여러 가지 성질을 비교해 보았다. R값은 Fig. 4의 상수 K(0.51) 및 목표 경화 깊이 (0.75)를 해리스식에 대입하여 구한 총 침탄시간, T(130분)을 침탄시간과 확산시간의 비율을 달리하여 최적의 조건을 구하였다. Table 3은 세 가지 침탄시간과 확산 시간에 대한 R값을 나타내었다.

Table 3 The conditions of vacuum carburizing

Condition	Carburizing time (Tc)	Diffusing time (Td)	Total carburizing time	R (Td/Tc)
A	55 min	75 min	130	1.36
B	50 min	80 min	130	1.6
C	45 min	85 min	130	1.88

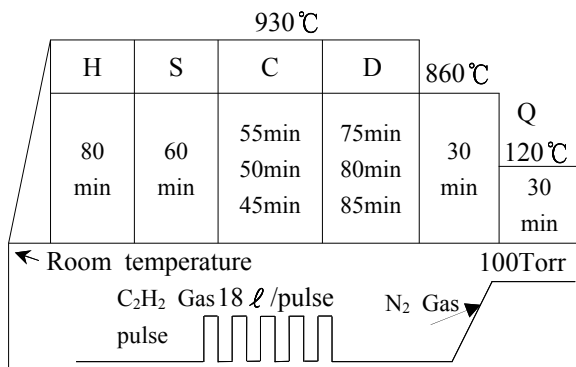


Fig. 5 Heat treatment cycles for vacuum carburizing

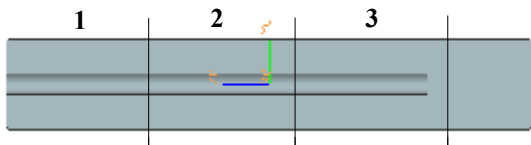


Fig. 6 Hardness specimen

Table 3의 침탄시간으로 실험한 진공침탄 공정은 Fig. 5와 같다.

상온에서 가열 목표온도인 930°C는 PID 온도제어기로 시간이 설정되며 930°C에서 각각의 시간동안 침탄 및 확산을 실시하고 잔류 오스테나이트 방지를 위해 860°C로 가열실에서 감온하여 30분유지 후 오일냉각을 실시하였다.

침탄공정시의 펄스 조건은 1주기에 2.5분으로 주기 당 18ℓ의 C₂H₂를 주입하여 실험하였고 오일 냉각시의 N₂가스 주입으로 100Torr로 유면압을 제어하였으며, 오일 교반속도는 60Hz로 진행하였다.

2.4 기계적 성질분석

2.4.1 경도시험

열처리 시험편의 경도 값과 경화 깊이의 비교

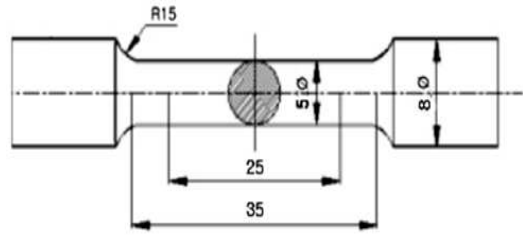


Fig. 7 Dimensions of the tensile test specimen(mm)

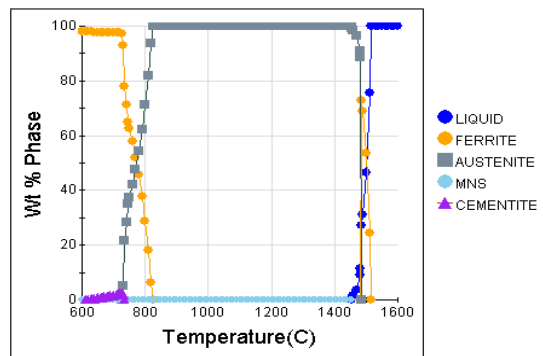


Fig. 8 Phase Change Temperature

를 위하여 마이크로 비커스 경도시험을 하중 9.807N으로 10초간 측정하였다.

가스 침탄열처리를 한 시험편과 각각의 R값을 세가지 비율로 변화시켜 진공침탄열처리 한 시험편의 경도시험을 실시하였다. 시험편은 Fig. 6과 같이 수직으로 절단 후 홀의 깊이별 경도 값 확인을 위하여 3등분으로 절단하여 측정하였다.

2.4.2 인장시험

시험편의 인장강도와 기계적 성질을 비교하기 위하여 시험편을 Fig. 7과 같이 KS B 0801규격 14A호 시험편에 맞추어 시험편을 가공하였다.

인장시험은 150N~50kN 하중의 인장 시험기를 사용 분당 2mm/min의 속도로 실험을 실시하였다.

2.4.3 파단면 SEM 관찰

열처리 전의 시험편을 인장시험 후 파단면을 SEM을 이용하여 5000배의 배율로 관찰하고 가스 침탄, 진공침탄 열처리 후의 시험편을 인장시험 후 파괴 형상 및 파단면을 비교 분석하였다.

2.4.4 미세조직 관찰

각각의 열처리 조건으로 시험한 시험편을 미세

조직 관찰 절차에 따라 마운팅, 폴리싱 과정을 거쳐 입계 산화 면을 관찰하고 3% Nital 용액으로 5~10초 부식 후 열처리 전, 후 조직을 500배율로 비교 분석하였다.

3. 실험결과

3.1 시험편의 물성

JMatPro를 이용하여 SCM415H 온도에 따른 상변화분석과 CCT/TTT 곡선을 분석하였다.

Fig. 8은 SCM415H의 온도에 따른 상변화에 대한 그래프를 나타내고 있다.

Fig. 8은 온도 구간 600~1600℃ 사이에서의 상변화를 나타내고 있다. 가열 전에 페라이트와 시멘타이트 조직과 탄화물로 구성되어있으나 페라이트는 728℃에서 점차 소멸되기 시작하여 825℃에서 완전 소멸되고 시멘타이트는 610℃에서 생성되기 시작하여 730℃에서 완전 소멸한다. 이 구간에서 오스테나이트가 성장하기 시작하여 825℃에서 완전한 오스테나이트가 되고 1510℃에서 액상화가 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8에서의 오스테나이트 온도를 이용하여 JMatPro로 분석한 TTT곡선과 CCT곡선은 Fig. 9와 같다.

TTT곡선은 오스테나이트화한 후에 A1변태온도 이하의 임의의 온도로 급랭시켜서 오스테나이트

의 변태를 나타내는 항온변태곡선이다. CCT곡선은 냉각속도에 따른 냉각시의 상변화를 나타내고 있다. 10℃/s에 해당하는 냉각속도선이 본 실험에서 냉각방식인 오일냉각에 해당된다. CCT그래프에서 각 선은 페라이트 생성시작선과 펄라이트, 베이나이트의 생성시작과 종료 시점이며 검은 실선은 Ms(Martensite start)점과 Mf(Martensite finish) 점을 나타내고 있다. SCM415H강의 Ms점은 422.3℃이며 다른 상들의 변태 시작온도는 Table 4에서 확인할 수 있다. 그리고 Mf점은 313℃이므로 313℃에서 마르텐사이트 변태가 종료된다.

3.2 경도시험

가스침탄과 각 조건으로 실험한 진공침탄의 경도분포를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서 각각의 조건으로 시험한 시험편을 Fig. 6과 같이 3등분하여 시험편의 깊이에 따른 경도 값의 비교를 위하여 3D 그래프로 표현하였다.

Fig. 11과 Table 5에서와 같이 가스침탄과 진공침탄 모두 표면에서는 높은 경도 값이 나타났으

Table 4 Starting temperature of phase transition

Phase	Transition temperature(℃)
Ferrite	825.1
Pearlite	740.1
Bainite	613.3
Martensite	422.3

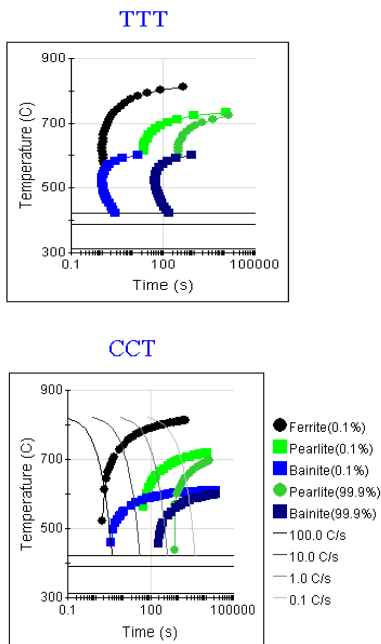


Fig. 9 TTT/CCT curve of SCM415H

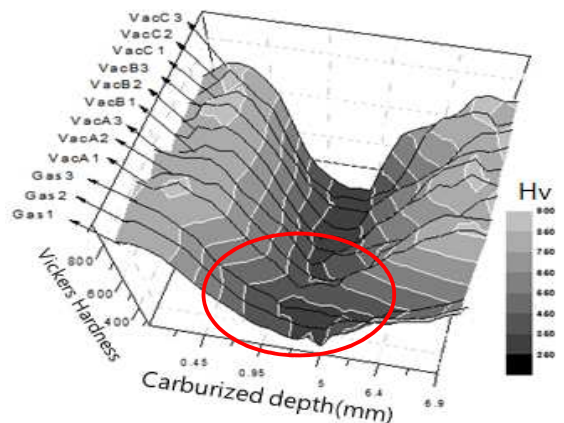


Fig. 11 Gas and vacuum carburizing variation of micro Vickers hardness

Table 5 Locational hardnesses of the Gas carburizing and the Vacuum carburizings

Location Types	Front surface(HV)	Core (HV)	Rear surface(HV)
Gas 3	853	331	635
Vac A3	853	340	869
Vac B3	865	320	886
Vac C3	848	342	844

Table 6 Tensile test result of the carburized specimens

Sample name	Maximum load (kN)	Tensile strength at maximum load (MPa)	Tensile strength at yield (offset 0.2 %) (MPa)
SCM 415H	13.5	688	478
Gas	24.2	1232.6	457
Vac A	20.5	1041.7	416.1
Vac B	20.5	1098.3	465.8
Vac C	21.3	1081.8	440.8

나 심부로 갈수록 낮은 경도값이 측정되었으며 막힌 홀 부위인 안쪽 면으로 갈수록 가스침탄과 진공침탄의 경도 값의 차이는 확연히 나타났다. 가스 침탄의 경우에는 막힌 홀 부위의 경도(Fig. 11 ○부분) 값이 진공침탄에 훨씬 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 이는 가스침탄의 경우에는 막힌 홀 부위에서 깊이가 깊어질수록 입계산화층이 늘어나 일정한 경도 값이 나오지 않았기 때문인 것으로 사료된다. E.C.D(Hv550)에서의 깊이를 측정한 결과 가스침탄은 0.67mm, 진공침탄의 경우에는 A시험편 0.84mm B시험편 0.85mm C시험편 0.82mm로 나타났다. 진공침탄 한 시험편은 가스침탄보다 모두 유효 경화 깊이가 깊게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 진공침탄의 진공분위기에서 탄소의 모재 침투 능력이 우수한 결과로 사료된다.

3.3 인장시험 및 파단면 SEM 분석

각각의 조건으로 열처리한 시험편의 인장시험 결과를 Table 6에 나타내었다.

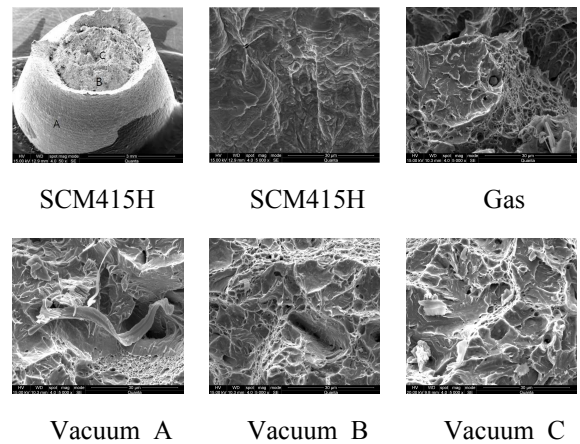


Fig. 12 SEM images of the fractured surfaces (×5000)

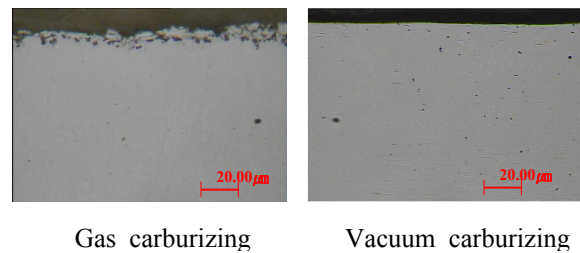


Fig. 13 Grain boundary corrossions of the gas and vacuum carburized

Table 6과 같이 가스침탄을 한 시험편이 세 가지 조건으로 진공침탄 한 시험편보다 150MPa 높은 결과를 얻을 수 있었다. 이는 유효경화 깊이 증가로 인해 인성이 낮아져 인장강도가 감소한 것으로 사료된다. 하지만 트랜스 미션계에 사용하는 강의 인장강도 980MPa 이상의 조건은 모두 충족하였고 본 실험에서는 Vac B가 가스침탄 다음으로 인장강도가 좋은 것으로 확인되었다.

인장시험후의 파단면의 SEM 분석 결과는 Fig. 12와 같다. SCM415H 열처리전 시험편의 파단면은 500배율 관찰결과 연성파괴 형태인 Cup-Con형태가 나타났으며 5000배율 관찰시 슬립 면과 딥플은 입내와 입계에 관계없이 나타났다. 열처리 후의 시험편은 가스와 진공침탄 모두에서 취성파괴가 관찰되었고 그 형태는 입내파괴와 벽개 층이 대부분이었으며 불순물이 빠져나간 홀이 관찰되었고 딥플은 관찰되지 않았다.

3.4 미세조직 관찰

Fig. 13은 각각의 조건으로 실험한 시험편을 광

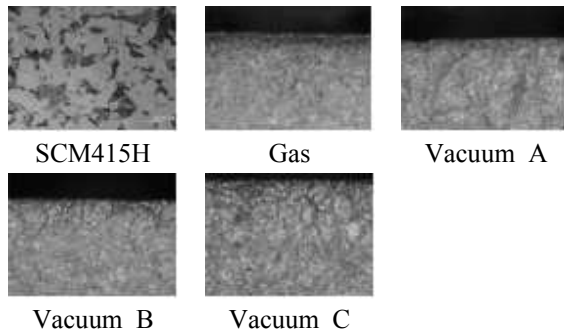


Fig. 14 Microstructures of the gas and vacuum carburizing($\times 500$)

학 현미경을 이용하여 가스침탄과 진공침탄의 입계 산화층을 비교하였다.

가스침탄에서는 침탄 층에 입계산화가 관찰되는 반면 진공침탄 열처리에서는 입계산화가 나타나지 않았다. 이것은 가스 침탄 열처리의 경우에는 프로판과 부탄을 공기와 변성하여 사용하는 RX가스에는 미량의 수증기와 탄산가스가 포함되어 있기 때문에 이 가스가 침탄이 진행되면서 산소와 결합하여 산화된 것으로 사료된다.

Fig. 14는 SCM415H 시험편과 가스침탄과 진공침탄후의 시험편을 에칭 후 조직을 비교한 것이다. 열처리 전 소재는 페라이트와 펄라이트를 확인할 수 있었으며 가스침탄 한 시험편은 입계산화층이 존재했고 템퍼드마르텐사이트와 페라이트가 관찰되었으며 미량의 탄화물을 관찰할 수 있었다. 진공침탄의 경우에는 A, B, C조건 모두 템퍼드마르텐사이트와 초석페라이트로 유사한 조직을 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 SCM415H를 이용하여 기존의 가스침탄 열처리 방식을 진공 침탄 로에 적용하여 침탄효과 및 기계적 특성을 분석함으로써 초기 도입단계인 진공침탄의 활용 가능성을 검토하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 경도시험에서 표면에서의 경도 값은 가스와 진공침탄 모두 시험편의 사양을 만족하였으며 내부 홀에서의 경도 값은 진공침탄이 가스침탄 경도 값인 HV635보다 38% 높고 유효 경화 깊이 또한 가스침탄 0.67mm보다 진공침탄이 29.8% 더 크다.

(2) 인장시험 결과는 시험편의 요구치를 만족하는 수준이며 가스침탄보다 10%정도 낮은 인장강도가 나왔으나 진공침탄의 특성상 가열시간이나 퀴칭시 N₂가스 압력 조절로 인장 강도를 높일 수 있을 것으로 사료된다.

(3) 단면의 SEM분석과 조직관찰 결과 가스침탄과 진공침탄에서의 취성과괴를 확인할 수 있으며 벽개면이 관찰되었고 덤플은 관찰되지 않았다. 진공침탄에서는 입계산화가 전혀 발생하지 않았으며 템퍼드마르텐사이트와 초석페라이트가 관찰 되었다.

(4) 진공침탄의 침탄효과 및 기계적 성질을 기존의 가스침탄 열처리 방식과 비교한 결과 막힌 홀 부위의 균일한 침탄층으로 기계적성질이 우수하며 입계산화가 발생하지 않아 정밀 부품의 열처리 가능하며 유해가스(CO₂)의 발생이 없어 친환경적이므로 그 활용도가 크게 상승할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구된 논문으로 이에 관계자 여러분께 감사를 포함합니다.

참고문헌

- (1) Moon, K. I. and Kim, S. W., 2006, "Recent Trends of Heat Treatment Research(2)," *The Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 19, No. 3, pp. 170~175.
- (2) Krauss, G., 1980, "Principles of Heat Treatment of Steels," *American Society for Metals, Metals Park, Ohio* pp. 45~62.
- (3) Lee, I. S., Ryou, H. S., Kim, W. B. and Yang, J. B., 2003, "Heat Transfer Analysis in the Vacuum Carburizing Furnace," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 7, pp. 877~882.
- (4) Iwata, H., 2005, "Advance Acetylene Vacuum Carburizing," *IHI Eng. Rev.*, Vol. 38, No. 2, pp. 83~88.
- (5) Kim, H. G. and Chung, T. Y., 2000, "Vacuum Carburizing : Challenges for the Next Century," *The Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 13, No. 1, pp. 37~39.

- (6) JMatPro Version 4.1, Sente Software Corp., 2007.
- (7) Choi, Y. T. and Byoun, S. K., 1992, "Micro-structure and Effective Case Depth of the Vacuum Carburized Steels," *The Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 5, No. 1, pp. 32~40.
- (8) Lee, S. G., Kang, S. B., Jung, B. H. and Kim, H. G., 1992, "A Study on Setting up Condition of Treatment for Vacuum Carburizing," *The Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 5, No. 4, pp. 195~200.