

.....
論 文
.....

진공침탄열처리강의 조직 및 유효경화깊이

최영택·변상교*
한국기계연구소
경북열처리공업사

Microstructure and Effective Case Depth of the Vacuum Carburized Steels

Y. T. Choi and S. K. Byoun*
Korea Institute of Machinery & Metals
*Kyung-Pook Heat Treating Co.

ABSTRACT

This content is a part of the results of the study on the development of the vacuum carburizing technology. In this study the vacuum carburizing furnace being used was the furnace that developed through the joint project between KIMM and Kyung-Pook Heat Treating Co. from June 1988 to Nov. 1990. And the used carburizing gas was the propane gas and the introducing methods of the gas applied two methods such as pulse and constant pressure.

By this study we established the basis of the furnace manufacturing technology and of the processing technology in the vacuum carburizing. Above all in this work there are notable meanings in a viewpoint of the foremost research in home.

Hereafter, we are going to industrialize the vacuum carburizing technology by improving the results of the present work and by developing the process for the mass production.

1. 서 론

진공침탄열처리는 보통 진공도가 약 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ torr 이고, 온도가 1040°C (조업온도 범위 950~1100°C)로 유지된 진공열처리로의 가열실 내에 침탄성가스(hydrocarbon gas)를 대기압 미만의 압력 상태(50~500torr)가 되도록 주입하여 침탄, 확산, 미세화처리를 한 후 기름소입에 의해 경화열처리 작업을 하는 기술이며, partial pressure carburizing, subatmospheric gaseous carburizing 혹은 저압침탄 등의 여러가지 용어로 사용되고 있다.

이러한 진공침탄열처리기술은 1968년경 미국 C.I. Hayes 사의 Herbert W. Western 등에 의해 진공침탄열처리로 및 공정기술이 특허화되어, 1970년대 초 진공로 내에서 사용할 수 있는 소입유의 개발과 이의 적용으로 1972년 경에 발표 공업화된 기술로 그 당시 열처리 업계에서는 획기적인 기술로 높이 평가되었다.

여기서 진공침탄열처리 관련 기술의 장단점을 살펴보면, 경제적 측면에서는,

첫째, 가스침탄보다 50~80%(Table 1 참고), plasma 침탄보다 20%정도 작업 cycle 의 단축이 가능하다.

Table 1. Comparisons of the Running Times between the Vacuum Carburizing and the Gas Carburizing.

Effective case depth(mm)	Total running times(hr)	
	Vacuum carburizing	Gas carburizing
1.1	5	9
4	14	71

둘째, 침탄성가스가 침탄시간에만 주입되므로 가스 소모량이 적고, 가스침탄로에 비해 idling 시간이 짧아서 에너지 절감과 가동비가 적다. 이때, 가스침탄시의 가동비에 비해 약 절반정도 소요된다(Table 2 참고).

셋째, 정비가 용이하고 저렴하며 작업환경이 양호하다.

또한 기술적 측면에서는,

첫째, 가스침탄조업시에 생성되는 입계산화(internal oxidation)가 생성되지 않기 때문에 처리 제품의 피로강도 등 기계적 특성이 증대된다.

둘째, 제품 특성에 큰 영향을 미치는 표면조각 및 carbon gradient 등과 같은 침탄특성의 제어가 용이하고, 또한 이러한 공정조건의 재현성이 우수해서 전자동화가 용이하다.

셋째, 최표면층의 탄소농도는 침탄 및 확산 시간의 조절에 의해 용이하게 결정할 수 있다.

넷째, 균일한 침탄층의 형성이 용이하고, 침탄얼룩의 생성을 방지할 수 있다. 등과 같은 장점 뿐만 아니라 설비의 용도면에서는 공구강 및 일반기계구조용강의 열처리, Cu brazing 및 PM 제품의 진공소결 등과 같은 조업에 활용될 수 있는 잇점이 있다.

반면 단점으로는 침탄조업시 침탄 가스에 의한 로내의 sooting으로 생성되는 문제점과 고온조업에 의한 결정립 조대화 등이 지적되고 있으나, 전자에 대해서는 질소가스와의 혼합가스 사용 및 self-cleaning 방법의 적용 등에 의한 개선과 후자에 대해서는 미세화처리에 의한 결정립 크기 개선 등과 같은 방법이 연구 적용되고 있다¹⁻¹¹⁾.

이와같이 전반적으로 볼 때 일반 침탄방법보다 기술적 경제적인 잇점이 많고, 특히 고도의 내피로 특성을 요구하는 기계구조용부품과 항공기 부품 산업에 있어서 필수적인 공정기반 기술로서 그 수요의 증대가 예상되는 고부가성 열처리 기술로 국내에서도 연구 개발되어야 할 분야이다.

본 내용은 과거 치 기업주도 특정연구사업(진공침탄열처리로 제작 및 기술 개발 : '89. 7~'90. 11 : 경북열처리공업사 참여)으로 진공침탄열처리로의 개발과 동시 제설비를 이용하여 프로판가스를 직접 사용해서 조업

Table 2. Comparisons of the Running Costs between the Vacuum Carburizing and the Gas Carburizing.

Items	Vacuum carburizing	Gas carburizing
total running times	5hrs	9hrs
power(20₩/KWh)	280KWh (₩ 5,600)	<u>carburizing f'ce 445KWh</u> generator 113KWh 558KWh (₩ 11,160)
nitrogen gas(60₩/m ³)	12.8m ³ (₩ 768)	
propane gas(200₩/m ³)	0.8m ³ (₩ 160)	10.0m ³ (₩ 2,000)
total	₩ 6,528/cycle	₩ 13,160/cycle
	₩ 14.5/kg	₩ 29.2/kg
cycles/month	115	64
production/month (ton)	51.7	28.8

- effective case depth : 1.1mm(about), -450kg/charge, -24days/month
- gas carburizing : endothermic gas

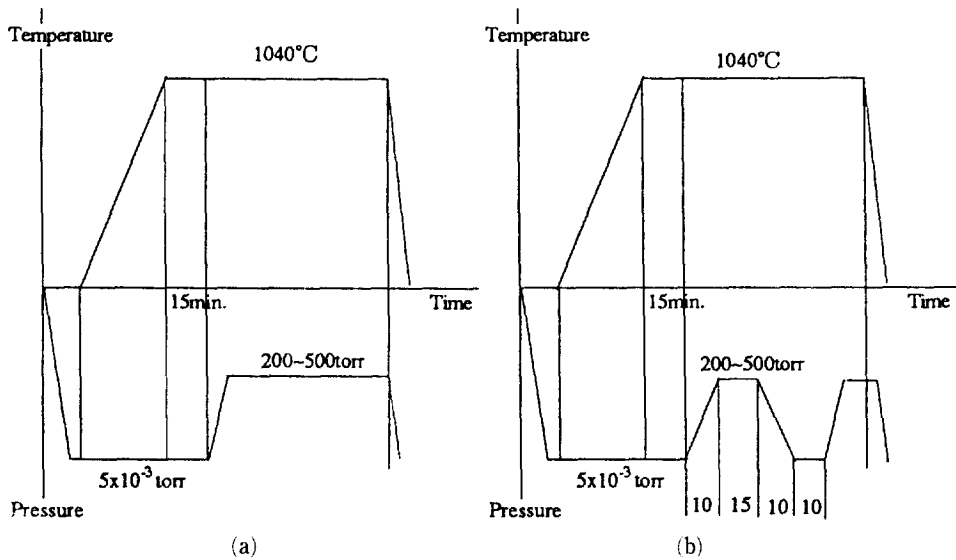


Fig.1. Experimental cycle for vacuum carburizing.

조건에 따른 침탄층과 확산, 미세화처리 및 소입에 의해 형성되는 경화층 등에 대한 특성분석을 통해 진공침탄열처리 기술 개발을 목적으로 수행한 연구내용의 일부이다.

2. 실험방법

2.1. 조업방법의 선정 및 조업조건

진공침탄은 침탄성가스의 주입 방법에 따라 정압법, pulse 법 및 연속법이 있다¹²⁾. 본 실험에서는 상기 방법 중 정압법과 pulse 법을 선정하였다.

조업 조건으로는 Fig.1에서 처럼 진공 배기한 후에 침탄성가스인 프로판 가스를 200, 350, 500torr 되도록 투입하고, 정압법에서는 Fig.1(a)처럼 유지시간을 30, 60, 90분으로 하였고, pulse 법의 경우에는 Fig.1(b)와 같은 cycle 을 1, 2, 3회로 하여 침탄 실험을 하였다. 위와 같이 침탄한 시편을 Fig.2와 같은 조건으로 확산 및 미세화처리를 한 후에 기름소입을 하였다. 이때 확산시간은 60, 90분으로 하였다.

본 실험에 사용된 진공침탄열처리로는 전술한 연구사업에서 개발된 Photo 1과 같은 생산조업용설비로 1회에 최대 450Kg 까지 장입할 수 있고, 가열실과 소입실(가스 및 기름 소입 겸용)의 2실 밀폐형 수평식 구조로 되

어 있다.

2.2. 시료 선정 및 칫수

본 실험에 사용된 시료의 재질은 경화능이 낮은 S10C와 경화능이 다소 우수한 SCM420의 철강재이고, 시편

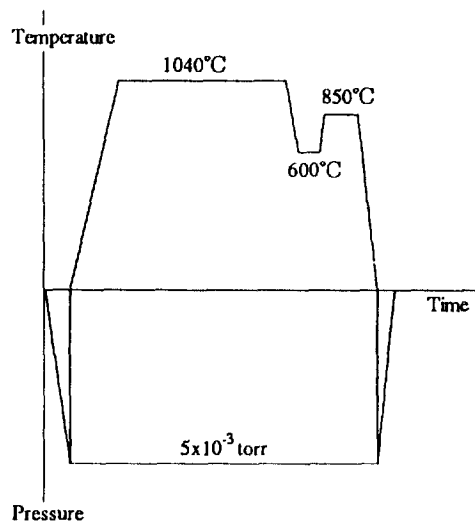


Fig.2. Experimental cycle for diffusion and quenching after vacuum carburizing.

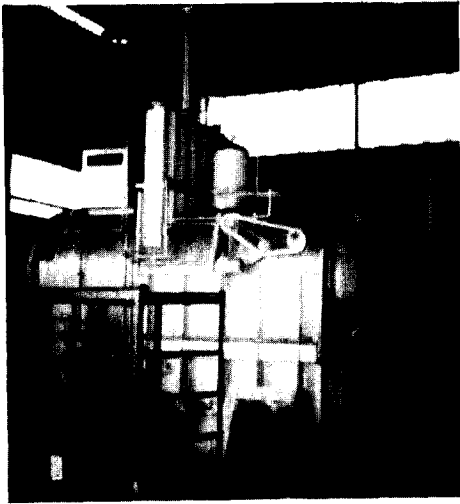


Photo 1. Vacuum carburizing furnace.

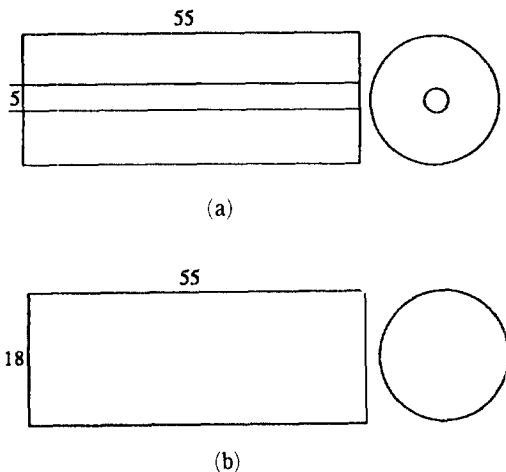


Fig.3. View of the specimens.

의 형상은 Fig.3 과 같다.

2.3. 특성분석

각 조건별 시편에 대해서는 현미경 조직, 경화층 깊이 및 특정 시편에 대한 탄소농도분석 등을 시험하였다. 이때, 조직검사에는 광학현미경을, 경화층 깊이의 측정에는 micro-hardness tester(model DMH-1, Matzuzawa Seiki Co.)를 사용하였다. 또한 탄소농도구배분석은 X-ray spectrometer(model UV 225 computer

1000 PX : Labtam International PTY, Ltd)를 이용하여 0.1~0.2mm 깊이 단위로 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 조직특성

3.1.1. 침탄시편

침탄층은 전술한 여러가지의 조건에 따라 침탄깊이는 달라졌으나, 현미경조직은 Photo 2와 같이 대체적으로 유사하게 관찰되었다. 즉, 저탄소합금강인 SCM420은 침탄 후 가스냉각에 의해 경화층이 형성되면서 Photo 2(a)에서 처럼 최표층부위는 결정입계를 따라 비교적 미세한 망상 및 괴상의 탄화물이 형성되고, 표층에서 다소 내부로 들어가면 잔류오스테나이트와 침상 마르텐사이트의 혼합조직층이 형성됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 고온침탄으로 형성된 표면의 과잉침탄조직이 가스냉각시에 오스테나이트에 과포화된 탄소가 Ac₁m 선을 따라서 용해도가 감소되고, 그 감소되는 양만큼의 탄화물이 오스테나이트 입계에 석출하여 최표층부에 비교적 미세한 탄화물이 형성되는 것으로 분석되고 있다. 한편 표층에서 다소 내부로 들어가면 탄소량이 감소되어 가스냉각에 의해 마르텐사이트와 잔류오스테나이트가 형성되는 것이다.

반면, 경화능이 낮은 S10C는 Photo 2(b)와 같이 표층부위에 주로 괴상의 과잉침탄조직이 형성됨을 볼 수 있다.

이러한 현상은 침탄시편의 깊이별 경도 변화를 측정 한 결과인 Fig.4와 잘 일치함을 알 수 있다.

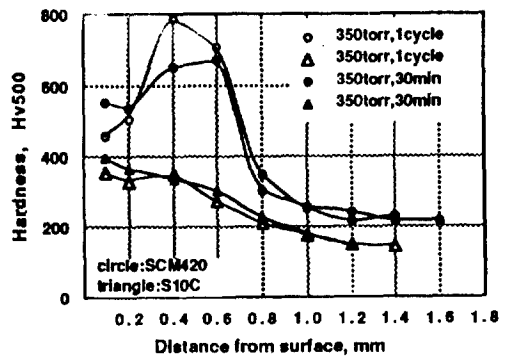


Fig.4. Microhardness gradient of the vacuum carburized and gas cooled steel at 1040°C.

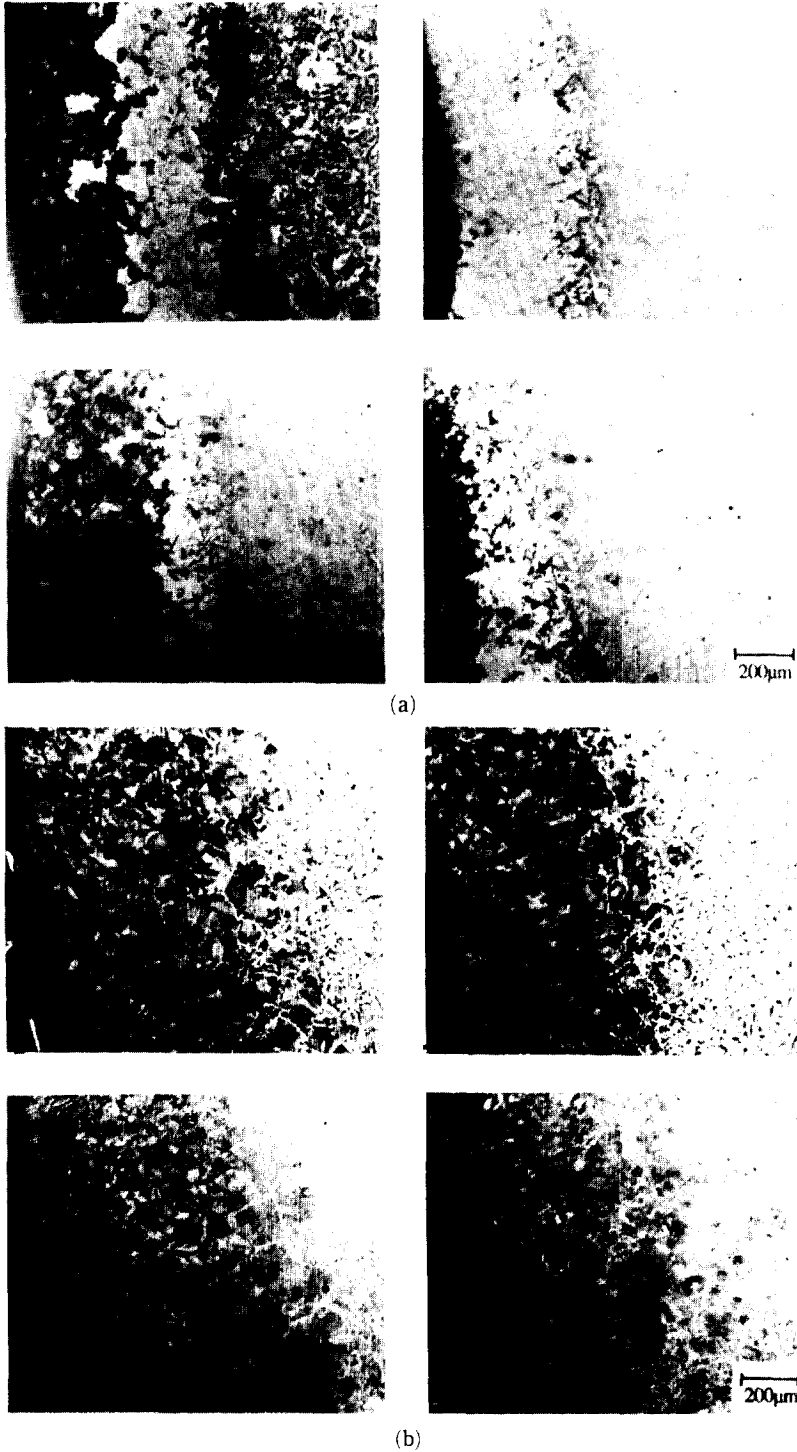


Photo 2. Microstructures of the vacuum carburized steels, (a) SCM420 and (b) S10C.
upper : pulse, 350torr, 1 cycle lower : constant pressure, 350torr, 30min. left : surface of the outside dia. right : surface of the inside dia.

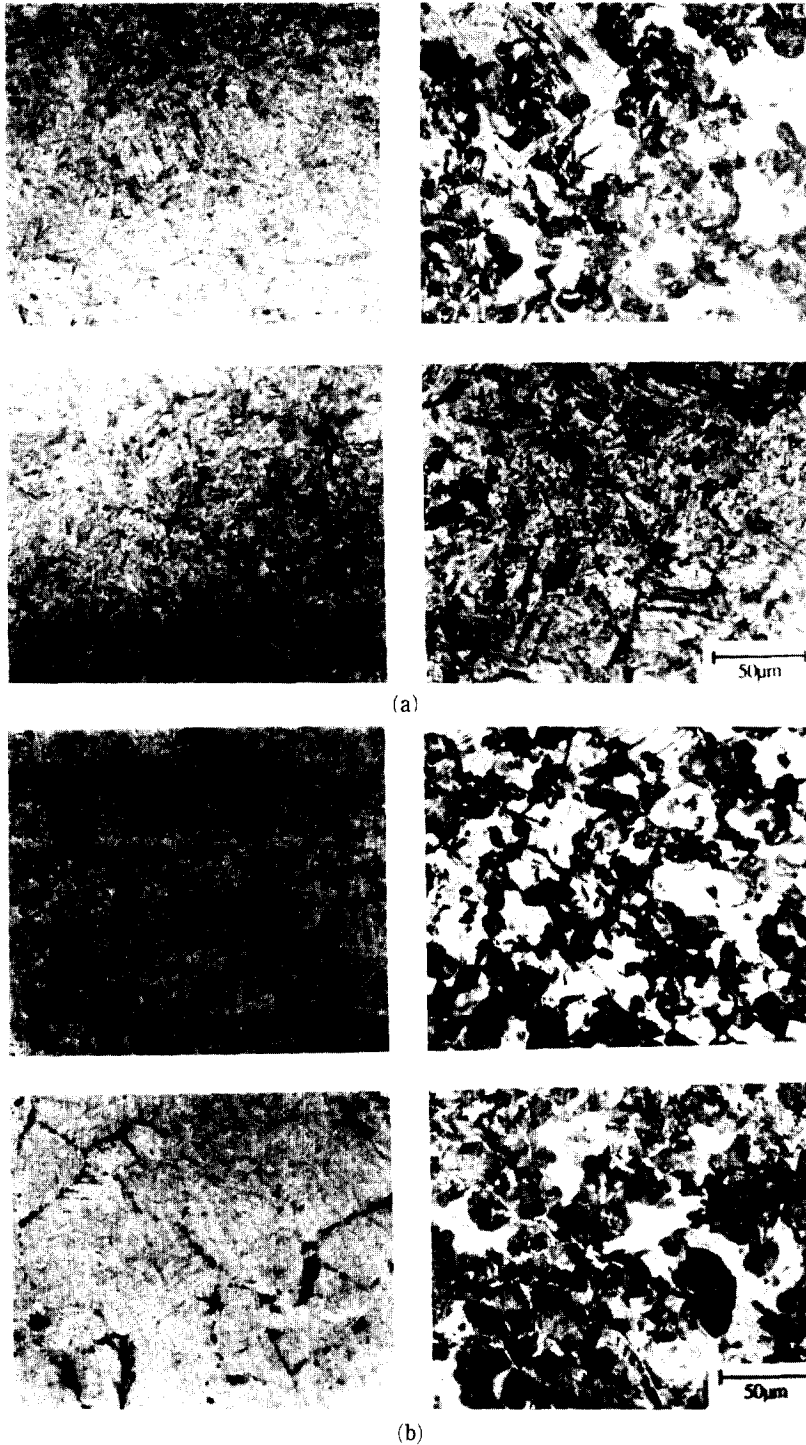


Photo 3. Microstructures of the diffusion and quenched steels after vacuum carburizing by pulse method (200torr, 2cycle), (a) SCM420 and (b) S10C.
 upper : diffusion time 60min. lower : diffusion time 90min. left : surface of the outside dia.
 right : surface of the inside dia.

3.1.2. 확산 및 유냉 시편

진공침탄 방법에 따른 확산 및 소입 후의 내외경 표층부위의 경도 변화는 pulse 법의 경우가 정압법의 경우보다 미세하나마 다소 높은 경도 분포를 형성하는 것으로 분석되었다. 외경부위에 대해 보면 pulse 법에서는 SCM 420 과 S10C 는 거의 동일하게 750~850(Hv 500)으로 측정되었고, 정압법에서는 SCM 420 은 700~800, S10C 는 650~800의 범위로 측정되었다. 한편, 내경에 대해서는 pulse 법의 경우 SCM 420은 650~800, 정압법의 경우에는 450~700으로 측정되었고, S10C의 경우에는 소입성이 낮아서 대체적으로 낮은 경도 분포를 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

이와 같은 소입경도의 차이를 검토해보기 위해 특정의 침탄조건, 즉 200torr, 2cycle의 pulse 법의 조건으로 침탄처리한 시편에 대해 확산시간별 유냉 후 조직특성을 관찰하였다.

SCM420 강재의 시편을 확산 소입처리 한 후의 외경 표층부의 조직은 Photo 3(a)와 같이 확산처리 시간에 관계없이 마르텐사이트 조직이 잘 형성되어 있는 것을 알 수 있으나, 내경 표층부의 조직은 확산처리시간이 60분인 시편의 경우에 잔류 오스테나이트와 침상의 마르텐사이트 조직에 부분적으로는 결정입계를 따라 불완전 소입으로 생성되는 조직인 troostite 형 nodular pearlite 조직 등이 혼재하고 있다.

또한 S10C의 경우 외경 표층부의 조직은 Photo 3(b)에서 처럼 소입성이 낮아서 부분적으로 냉각효과의 저하로 인해 형성되는 불완전 소입조직인 익모상의 bainitic-troostite 조직과 마르텐사이트 조직이 혼합되어 있는 것으로 관찰되었다.

반면, 내경 표층부는 소재의 낮은 경화능 특성 등으로 인해 형성되는 불완전소입조직이 관찰되었다. 한편 최표면층에는 입계산화가 전혀 생성되지 않는 것으로 관찰되었다.

3.2. 탄소농도구배

여러 실험 조건 중에서 200torr, 2cycle의 pulse 법 조건으로 SCM420 소재의 시편에 대한 침탄 및 확산시간에 따른 깊이별 탄소농도구배는 Fig.5와 같이 표면탄소농도는 침탄시편에서는 약 1.47%(0.35mm), 확산시간이 60분인 시편에서는 약 0.82%(0.1mm), 확산시간이 90분인 시편에서는 약 0.79%(0.05mm)로 분석되었다. 여기서 탄소성분상의 유효경화깊이는 0.4%까지의

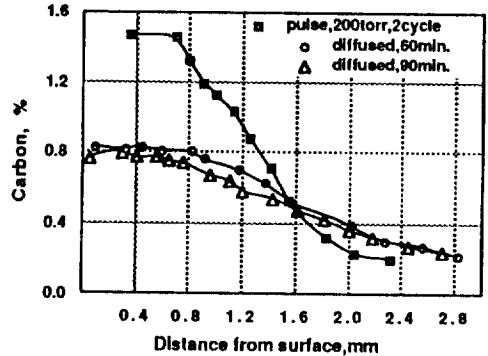


Fig. 5. Changes of the carbon gradient after vacuum carburizing and diffusion of the SCM420 steel.

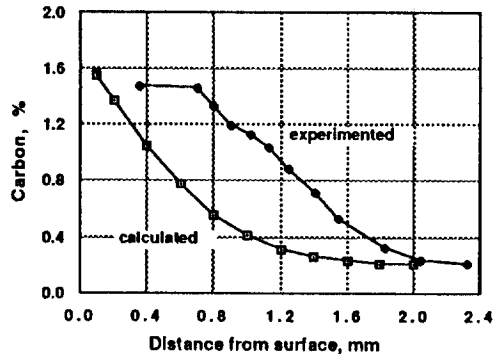


Fig. 6. Comparisons of the experimented and the calculated data in the carbon gradient.

점으로 60분 확산의 경우 약 2.0mm, 90분 확산의 경우 약 1.9mm로 분석되었다.

한편, 이론적으로 볼 때 1040°C에서 진공침탄시 최표면층의 탄소농도는 Fe-C의 평형상태도에서 1.73%가 된다. 이를 기준으로 한 이론적 탄소농도구배 산출 결과와 본 실험결과를 아래 식에 의거 비교 산출하면 Fig.6에서 처럼 상당한 오차가 생성되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 오차는 pulse 조업의 경우 프로판가스가 투입되어 유지되는 시간 외에 투입과 배기 및 진공상태에서의 유지시간 등의 영향에 의한 것으로 판단된다.

$$C - C_0 = (C_1 - C_0) [1 - \text{erf}\{x/2(Dt^{1/2})\}]$$

C : x(cm)에서의 탄소농도

C₀ : 소재의 탄소농도

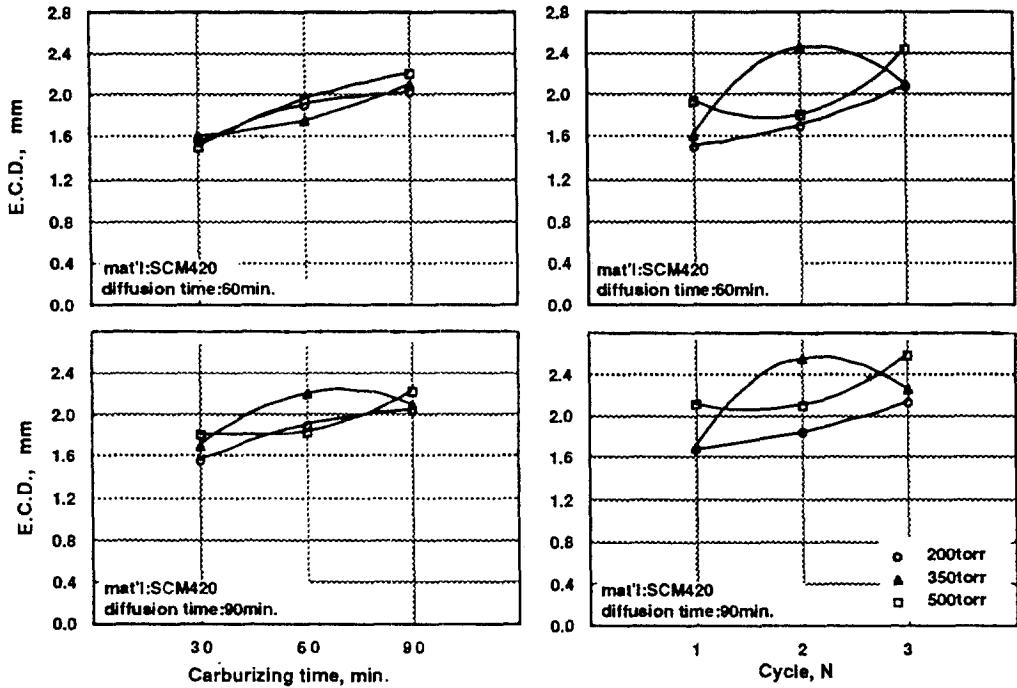


Fig.7. Changes of the effective case depth by the variation of the vacuum carburizing conditions.

- C_i : 最 표면층의 탄소농도
- x : 표면으로 부터의 거리(cm)
- D : 확산계수 ($4.2 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ at 1040°C)
- t : 침탄시간(sec)

동 결과를 볼 때 pulse 식 진공침탄에서 가스투입시간과 진공배기 후 진공상태에서의 유지시간의 조정에 의해 추가적인 확산처리 없이 표면탄소농도를 임의의 값으로 용이하게 조정할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 조업조건에 대해서는 향후 연구예정에 있다.

3.3. 유효경화깊이

앞에서 실험한 두 종류의 강종 중에서 소입성이 보다 양호한 SCM 420 강에 대해서 조업조건별 기름소입 후의 유효경화깊이(표면에서 부터 550Hv 까지의 깊이, KSD -0215) 변화는 Fig.7과 같이 분석되었다.

한편, 진공침탄에서의 유효경화깊이(effective case depth)는 다음과 같은 Hayes vacuum carburizing formula 가 적용되어 산출되고, 이때, 침탄온도별 K의 값은 Table 3과 같다. 또한 Fig.2와 같은 미세화처리 및 재가열소입할 때의 유효경화깊이에 대한 奥村望¹¹⁾의 연

Table 3. K Values for Hayes Formula. (AISI 4118)

Temperature ($^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$)	K (mm/h ^{1/2})
1550/843	0.2769
1600/871	0.3251
1700/927	0.5613
1900/1038	1.1227

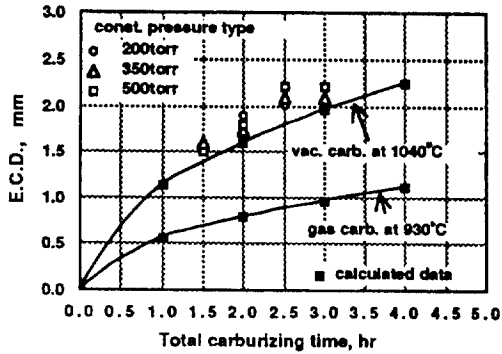
구에 의하면 그 영향은 무시할 수 있는 것으로 해석하고 있다.

$$\text{E.C.D.} = K \times t^{1/2}$$

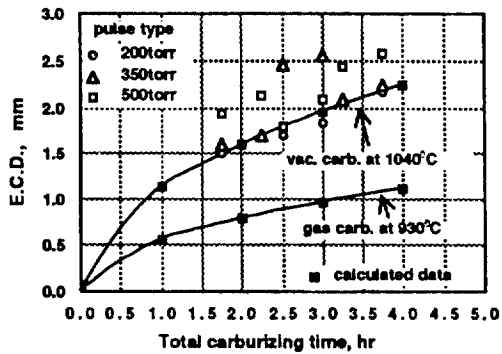
t : 침탄시간(hr)

K : 상수

따라서, 본 실험결과와 상기식에 의한 이론적 산출결과를 비교하면 Fig.8과 같이 대체적으로 이론적 산출값과 실험값이 거의 유사하게 분석되나, 투입가스의 압력이 증가할 수록 유효경화깊이가 전반적으로 증가하는 추세에 있으며 정압법보다는 pulse 법의 경우에 이러한



(a)



(b)

Fig. 8. Variations of the effective case depth versus the total carburizing times in the SCM420 steel.

경향이 보다 증가하는 것으로 관찰되었다.

4. 결론 및 전망

전술한 연구에 의해 국내에서는 처음으로 생산조업용 대용량 규모의 진공침탄열처리 설비의 국산화 개발과 시편 규모면에서의 진공침탄열처리에 대한 기본 공정기술의 개발 등과 같은 성과를 획득하였다.

향후 동 연구결과를 근거로 해서 생산조업용 규모의 공정개발을 위해,

첫째, pulse cycle의 침탄 및 확산 시간의 조정에 의한 최적조업조건 선정연구

둘째, 유효경화깊이가 깊은 실제 제품의 선정 및 양

산조업조건 연구

셋째, 금속적 기계적 특성에 대한 보완 해석등과 같은 연구를 통해 진공침탄열처리기술을 기업화할 예정에 있다.

한편, 진공침탄열처리 기술은 깊은 유효경화깊이(약 1mm 이상)를 요구하는 부품의 침탄열처리에 있어 기술적으로 우수하고, 에너지 절약 및 생산성 측면에서 경제적인 공정기술이라는 점에서 볼 때 높은 내피로특성을 요구하는 항공기 부품산업에 필수적인 공정기반 기술로서 뿐만 아니라 최근 전반적인 산업기술의 발전에 따른 품질고도화를 위한 고급기술 요구 증대 등과 같은 추세로 볼 때 동 기술의 수요가 증가할 것으로 전망된다.

5. 참고 문헌

1. ASM : Vacuum Carburizing, Metals Handbook, 9th ed., Vol. 14, p.270.
2. 内藤武志 : 浸炭焼入れの實際, 日刊新聞工業社. p. 94, (1979).
3. H.W. Western : Metal Progress, Oct., p.101, (1972).
4. H.C. Child : Heat Treatment of Metals, 3, p. 60, (1976).
5. H.W. Western : Metallurgia and Metal Forming, Nov., p.390, (1970).
6. W.J. Doelker : Metal Progress, May, p.50, (1977).
7. D.H. Herring : Industrial Heating, Jun., p.16, (1985).
8. D.H. Herring : Industrial Heating, Sep., p.22, (1985).
9. D.H. Herring : Industrial Heating, Oct., p.38, (1985).
10. 杉山道生, 岩田均 : 特殊鋼, Vol.32, No.9, p.13, (1983).
11. 奥村望 : 熱處理, Vol.24, No.5, p.280, (1984).
12. 藤野朗治 : “眞空爐を利用した低壓浸炭の實施例”, 島津製作所 航空機器事業部