技術解說

진 공 침 탄
Vacuum Carburizing

김 한 군
부산공업대학 금속공학과

1. 서 론

현재 사용되고 있는 금속의 표면경화법에는 여러가지 방법이 있다.[1] 그 중에서 실용적인 면에서 지금까지 가장 많이 사용되고 있는것 중의 하나는 침탄경화법이다. 침탄경화법을 크게 3가지로 분류하면 고체침탄, 액체침탄 및 기체침탄으로 나눌 수 있다. 이 중 고체침탄은 지금도 사용되고 있기는 하지만, 다소 낡은 방법으로 처리시간이 길고, 작업이 번거로와 인건비가 비싸며, 열효율이 낮아서 그 사용빈도가 저하되고 있는 실정이다. 또한 액체침탄은 용융시안 염욕속에서 처리하기 때문에 작업중이나 폐염의 처리시 까다로운 공해문제가 수반된다. 이에 비하여 기체침탄은 밀폐된 로속에서 침탄용 캐리어 가스(carrier gas)인 질소/메타놀 혼합물질이나 흡열분위속에서 작업하는 것으로 최근까지도 많은 회사에서 가장 발달된 침탄법으로 많이 이용하고 있다. 이러한 침탄기술에 대해서는 이미 널리 잘 알려져 있는 실정이다.[2]

진공침탄은 이상의 3가지 방법에 이어 제 4의 방법(Fourth process)이라고 알려져 있다.[3] 이 방법은 미국의 C.I.HAYES 사의 H.W.Western[4]에 의하여 1968년부터 연구가 시작되어 1972년에 발표된 기술이다. 이것은 대기압보다 낮은 압력(760 torr 혹은 100 KPa 이하)과 높은 작업온도범위(980－1050℃)에서 실시되기 때문에, 침탄시간이 단축되어 일본이나 미국 등지의 많은 업계에서 사용되어,[5] 지대한 성과를 올려 획기적인 신기술이라 하여 열처리업계에서 높은 평가를 받고 있다.

2. 진공침탄의 특징

2-1 처리시간의 단축

진공침탄은 종래의 침탄온도(930℃정도)에 비하여 높은 980℃－1050℃의 고온에서 실시하기 때문에 처리시간이 단축되고 침탄깊이가 깊어진다. 예를들면 SCM 415강을 침탄깊이 4 mm를 얻고자 할때 가스침탄으로서는 3일간의 침탄시간이 필요한데 반하여 1040℃에서 진공침탄시키면 14시간밖에 소요되지 않기때문에 시간을 1/5 정도로 단축시킬 수 있다.

2-2 경제성

진공침탄에서는 필요한 침탄온도까지 진공가열시켜 재료의 표면을 청정화시킨 후, 침탄가스를 필요한 시간만 도입하여 다시 재진공시켜 진공가열중 표면의 과잉탄소는 내부로 확산시킨다. 침탄가스는 한정된 시간에 소량 사용하기 때문에 가스침탄에 비하면 침탄가스 소비량이 1/10～1/40에 불과하여 가스비용이 대폭 절감된다. 또한 가스침탄로에서는 18～24시간의 워밍시간이 필요하지만, 진공침탄에서는 이것이 불필요하므로 연속침탄이 실시되지 않는 경우에 대단히 경제적이며 열효율이 높아서 에너지손실이 적다.

2-3 처리제품의 조직 및 기계적 성질

침탄시의 승온, 균열, 확산 및 켄칭등의 작업이 진공속에서 실시되어 침탄이 산화성가스를 함유하지 않은 분위기에서 이루어지므로 제품표면이 깨끗하고 이상층이 발생되지 않는다.[6]

보통 가스 침탄로에 사용되는 캐리어 가스중에는 미량의 산화성분인 CO_2나 H_2O가 함유되어 침탄중 오스테나이트 결정입계에 철보다 산소와의 친화력이 강한 Cr,

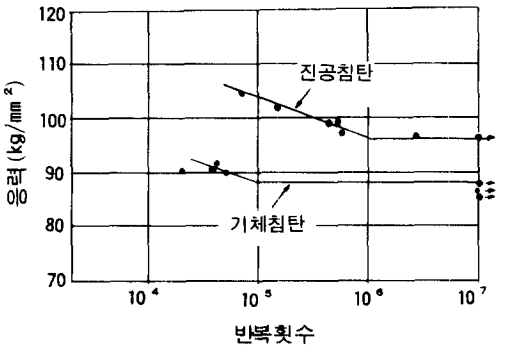

그림 1. AISI 4320강의 회전굽힘 피로시험

Mn, Si등을 우선적으로 산화시키므로, 이로인한 탈합금원소현상(De-alloying influence)이 나타나서 입계산화층을 형성하여 놋치효과가 증가되므로 기계적성질을 저하시킨다. 이에 비하여 진공침탄에서는 이러한 현상이 나타나지 않기 때문에 놋치효과감소에 의한 피로강도를 증가시키고[7,8], 표면경화능을 증가시킨다.[9] 그림 1은 AISI 4320강에서 진공침탄이 일반 가스침탄에 비하여 피로한도가 개선되는 효과를 나타낸다.[3]

진공침탄은 로-트내부 및 로-트사이의 침탄얼룩이 적고, 동공이 있는 제품이나 형상이 복잡한 제품에 균일한 침탄이 이루어진다. 특히 동공이 있는 제품이나 복잡한 형상의 물건에 있어서 형상에 따른 침탄얼룩감소에 상당한 효과가 있다.

2-4 로 용도의 다양성

진공침탄은 가스침탄과 달리 침탄뿐만 아니라 브레이징이나 소결과 같은 작업도 동시에 실시할 수 있고, 여러 종류의 열처리 사이클을 연속적으로 실시할 수도 있다. 이를테면, 진공속에서 유냉한 다음 진공침탄, 퀜칭을 실시하고, 침탄질화처리를 실시하는 등의 복합열처리도 가능하다.[10]

2-5 작업환경의 개선

가스침탄과는 달리 진공침탄은 냉벽형(冷壁形) 진공로를 사용하여 감압하에서 실시되기 때문에 작업환경이 깨끗하고 안전성이 높으며, 냉방시설된 작업환경에서 작업이 가능하다.

2-6 장비의 간소화

진공침탄에서는 가스침탄로에서 필요한 변성로나 분위기제어기기류등이 불필요하기 때문에 장비의 간소화가 이루어진다.

2-7 자동화

침탄사이클의 시간, 온도, 압력, 가스유량등을 프로그래밍시켜 완전한 자동운전이 가능하다. 더욱이 자동장입 및 자동반출기구등을 설치하면 야간 무인운전이 가능하다.

3. 진공침탄의 원리

3-1 침탄기구

강을 소정의 침탄온도까지 진공가열시키면, 오스테나이트화 되면서 표면이 활성화되어[6], 침탄이 용이한 상태가 된다. 그 후 침탄가스를 도입시키면, 재료의 표면에 침탄가스가 접촉하여 침탄반응이 촉진된다. 침탄가스로서는 일반적으로 메탄, 프로판등의 탄화수소계 가스가 사용된다. 河上[11], wagman[12]등에 의하면 탄화수소가스는 고온의 재료표면에 접촉하여 열분해하므로써 식 (1)과 같은 침탄반응의 평형을 나타낼 수 있지만, 실제에 있어서는 반응이 지연되기 때문에 평형에 도달하는데 장시간이 필요하다.[13]

$$Fe + CH_4 \rightarrow (Fe-C) + 2H_2 \quad (1)$$

식 (1)과 같은 메탄의 열분해반응은 그냥 단순하게 일어난다고 생각하는 것보다 다음과 같은 여러단계의 복잡한 연쇄반응으로 진행된다고 알려져 있다.[14,15]

$$CH_4 \rightleftarrows CH_3 + H \quad (2)$$

$$CH_3 + CH_4 \rightleftarrows C_2H_6 + H \quad (3)$$

$$C_2H_6 \rightleftarrows C_2H_4 + H_2 \quad (5)$$

$$C_2H_2 \rightleftarrows 2C + H_2 \quad (6)$$

이상과 같은 반응에서 탄소와 철은 반응의 촉매작용을 하며, 특히 철은 메탄의 완전분해촉매가 된다. 따라서 실제 강표면에서는 (6)식에 의해 다음과 같은 침탄반응이 일어난다.

$$Fe + C_2H_2 \rightarrow 2(Fe-C) + H_2 \quad (6)'$$

프로판을 사용하는 경우에는 다음과 같은 반응식에 따라 침탄이 진행된다.

$$C_3H_8 \rightarrow (C) + C_2H_6 + H_2 \quad (7)$$

$$C_2H_6 \rightarrow (C) + CH_4 + H_2 \quad (8)$$

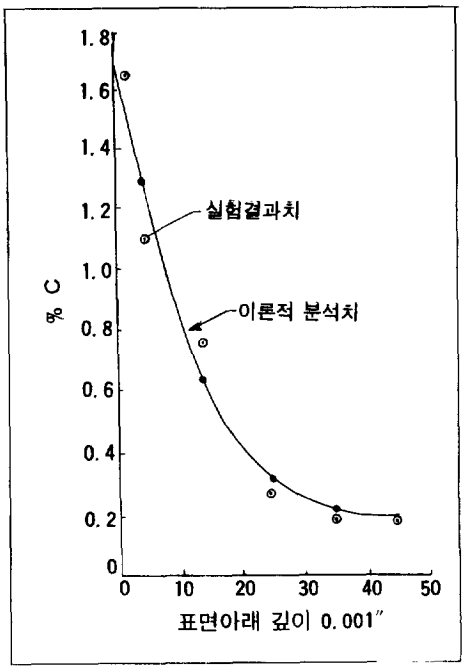

그림 2. AISI 1020 강을 1040°C에서 5분동안 진공침탄한 후 표면에서부터 탄소함량.

이러한 침탄반응에 의하여 침탄이 진행될 때, 침탄온도가 진공침탄의 경우에는 높기 때문에, 강의 표면에서 급격히 침탄이 일어난다. 그림 2는 AISI 1020 강을 1040℃에서 진공침탄시킬 때 5분이내의 시간에 표면탄소농도가 철-탄소평형상태도의 최대고용한도에 가까운 1.73%의 탄소농도에 접근한다는 것을 실험적으로 나타낸 결과이다.[3]

3-2 침탄조건의 설정

3-2-1 침탄깊이

F.E.Harris[16,17]는 가스침탄에서 전 침탄깊이와 침탄온도, 시간과의 관계를 탄소강에 대하여 다음과 같이 표시하였다.

$$\text{전침탄깊이(in)} = \frac{31.6\sqrt{t}}{10^{\left(\frac{6700}{T}\right)}} \qquad (9)$$

여기서 T는 침탄시간(hr), T는 침탄온도(°R)이다.

일반적으로는, 목표로 하는 표면탄소량보다 높은 카아본 포텐샬로 침탄을 실시하여 초기 카아본 포텐샬을 저하시키면서 표면탄소농도의 확산으로 표면탄소농도를 조정한다. 이를테면, 강한 침탄을 실시한 후 표면탄소농도와

표 1. 식(10)에서 K_1의 실측치

침탄온도 (℃)	K_1			
	AISI 1020		AISI 4118	
	$in \cdot h^{-1/2}$	$mm \cdot h^{-1/2}$	$in \cdot h^{-1/2}$	$mm \cdot h^{-1/2}$
843	0.010	0.25	0.011	0.28
871	0.012	0.30	0.013	0.33
899	0.016	0.40	0.017	0.43
927	0.020	0.51	0.022	0.56
1038	0.040	1.02	0.044	1.12

침탄깊이가 조정되도록 침탄시간을 결정해야 한다.

진공침탄에서는 제품의 표면탄소농도와 침탄깊이의 관리에 있어서 간단히, 그리고 비교적 정확하게 재현성이 잘 이루어진다. 이러한 이유중의 하나는 침탄시 강표면 탄소량은 그 온도에 해당하는 오스테나이트 중에 고용되는 고용탄소 범위에 따라 결정되고, 침탄온도가 일정하면 제품표면의 탄소농도가 일정하기 때문이다. 또 한가지 이유는 과잉침탄이 진공중에서 확산되므로 표면탈탄없이 내부로만 확산하게 된다. 따라서 침탄시간과 확산시간의 설정에는 Harris의 이론식을 적용할 수 있다.[18] 즉 유효침탄깊이 D는

$$D = K_1\sqrt{t} = K_1\sqrt{(t_C + t_D)} \qquad (10)$$

여기서 t_C는 침탄시간, t_D는 확산시간이다. AISI 1020 강으로 실험한 K_1값을 표 1에 나타내었는데, 이론치와 거의 일치한다. 더욱이 저합금강(AISI 4118 등)에도 동일한 실험을 실시하여 표 1에 나타낸 K_1값이 얻어졌다.[5]

3-2-2 표면탄소농도

제품의 최종탄소농도는 일반적으로 침탄온도에 따라 결정되고 침탄시간/확산시간의 비에 따라서 결정된다. F.E.Harris의 실험식에 의하면 침탄시간 t_C와 확산시간 t_D의 관계는

$$t_C = t \times \left(\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0}\right)^2 \qquad (11)$$

여기서 t_C는 침탄시간, t는 침탄시간과 확산시간을 합한 시간, C_1은 확산종료시의 표면탄소농도, C_2는 침탄종료시의 표면탄소농도, C_0는 재료의 탄소량이다. 진공침탄에서는 침탄시에 표면탄소농도와 그 온도에서 오스테나이트중

의 고용탄소 한도가 서로 가까운 값이 되고, 또한 확산은 진공중에서 일어나므로 침탄시간과 확산시간과의 관계는 실험식과 잘 일치하게 된다.

4. 진공침탄처리 공정

중합금침탄강인 AISI 8620 강의 침탄시 열처리사이클의 한 예를 그림 3에 나타내고, 이의 작업방법에 대한 개요는 다음과 같다.

1) 자동자정기간(Automatic self-cleaning cycle)중 집적된 모든 중탄소(Heavy carbon), 즉 그을음을 제거한다.
2) 부품을 세정한 chamber 속에 장입한 후 1분이내 로터리 펌퍼만으로 중간정도의 진공수준까지 chamber를 진공시킨다.
3) 유효진공수준인 10^{-1}m bar에 도달시켜 부품을 균일한 오스테나이트온도까지 가열한다.
4) 질소나 다른 혼합가스를 도입하여 일정한 분압에 도달하도록 진공도를 변화시킨다.
5) 미리 정해진 일정한 분압에 도달한 후 1차 및 2차의 부화된 탄화수소가스를 도입한다. 이때 침탄질화처리를 실시하려고 하면 탄화수소와 함께 암모니아가스를 도입하면 된다.
6) 침탄후 chamber는 침탄부품을 확산시키기 위하여 또다시 진공시킨다.
7) 이 기간에 있어서 몇가지 작업방법에 대한 선택의 여지가 있다. 즉 침탄시간과 처리강의 성질과 목적에 따라 온도를 강하시킬 수 있다. 경우에 따라서는 퀜칭시 변형 제어를 위하여 온도를 820℃~840℃의 범위로 낮추기도 한다. 또 하나의 방법은 저압가스퀜칭으로 임계온도 이하인 540℃--650℃범위까지 떨어뜨린다. 입자미세화는 다중퀜칭을 실시하면 이루어진다.
8) 기름속, 물속 혹은 그림 4와 같은 장치의 5 bar의 가압가스속에서의 진공퀜칭은 진공밀폐된 상태에서 내부 문을 열고 재료를 이동시켜 두 chamber 사이의 압력이 균일하게 되면서 이루어진다.
9) 진공 chamber는 또다시 자정(self-cleaning)을 위한 준비를 하게 되고 새로운 작업주기가 시작된다.

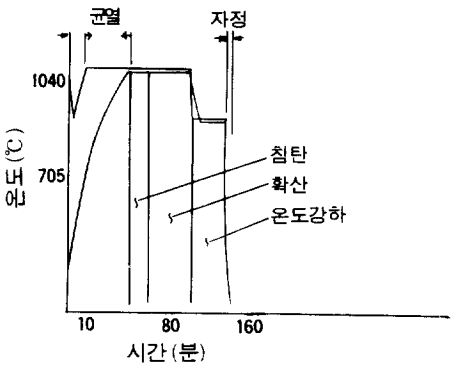

그림 3. AISI 8620 강의 작업공정.

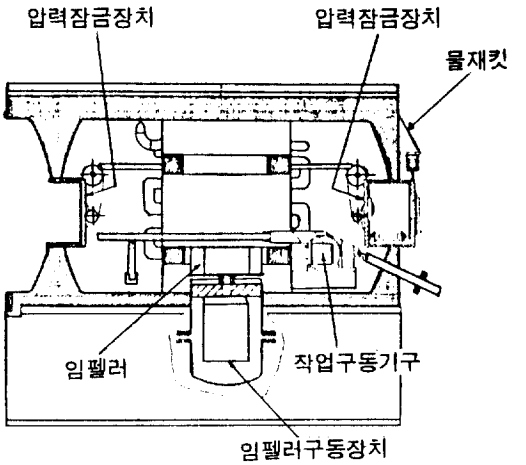

그림 4. 가압퀜칭장치

5. 앞으로의 전망

진공침탄은 이상에서 소개한 바와같은 많은 장점을 가지고 있는 매력적인 방법임에 틀림없다. 그러나 현재로서는 표면탄소량조절에 있어서의 기술적 know how 나 설비비가 다소 비싼것등의 해결해야할 문제도 있다. 그러나 지금까지 작업공정에 있어서 큰 결점중의 하나로 생각되었던 그을음의 생성문제가 계속된 연구결과 자정작업(self-cleaning operation)의 도입에 의하여 해결되고, 최근에는 컴퓨터를 이용한 진공침탄에서의 최적처리조건을 결정[19] 하는등, 그 결점들이 점차 해결되고 있는 실정이다.

진공침탄의 가장 큰 특징이 침탄시간의 단축과 제품의 고급화라고 하면, 국내 열처리업계에서도 국제경쟁력강화를 위한 새로운 열처리기술 개발을 위해서, 또한 공해문제, 노사문제등의 국내적 경영난 해결을 위하여, 멀지않

아 이러한 분야에 대한 많은 관심과 연구발전이 이루어질 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Hick, A.J. : "Heat Treatment－The Present Position and Future Outlook", Metallurgia, March, 1979.
2. Dann, H. : "Developments in the Carburising Process", Metallurgia, Sep. 1975.
3. D.H.Herring and G.P.Read : Vacuum Carburising Developments, Metallurgia, May, 1986.
4. 杉山 : 金屬材料, 3, 1973.
5. 杉山道生, 內垣內 勝 : 表面硬化處理技術の進步, 特殊鋼, 35卷, 12號.
6. 杉山, 他 : 金屬材料, 17, 5, 1977.
7. 內藤武志 : 浸炭燒入れの實際, 日刊工業社, p.111.
8. GM Comp. : Staff Report "Influence of Partial Pressure carburizing on Bending Fatigue Durability"
9. Metals Handbook, 9th, Ed. Vol. 4, p.270.
10. 苧野, 中村 : 熱處理, 23, p.290, 1983.
11. 河上益夫 : 金屬理化學(下), p.420.
12. D.D.Wagman, et al. : J. Res. Bur. Standards, 34, 143, 1945.
13. 日本鐵鋼協會篇 : 鋼の熱處理改訂5版, 9, 93, 1969.
14. K.Schmering(斯波忠夫監修) : 石油炭化水素化學, 4, 石油の分解と改質, 25章, 1967.
15. 日ソ通信社訳 : 燃料燃燒過程の物理化學的基礎, P-.132, 1974.
16. F.E.Harris : Metal Porgress, 45, p.683, 1944.
17. F.E.Harris : Metal Porgress, 44, p.265, 1943.
18. D.H.Herring : Industrial Heating, sep. p.22, 1985.
19. 石神逸男, 辻 新次, 浦谷文博, 綱澤榮二, 眞空浸炭における最適處理條件の豫測化, 熱處理, 28卷, 3號, p.171, 1988.