진공침탄 공정기술을 이용한 자동변속기 부품 개발

이원범^{a*}, 문경일^a, 조용기^a, 임경묵^a, 변상교^b

^a한국생산기술연구원 열·표면기술센터, ^b경북열처리공업사

Development of Automatic Transmission Parts by Using Vacuum Carburizing Heat-treatment Technology

Won-Beom Lee^{a*}, Gyung-Il Moon^a, Yong-Ki Cho^a,
Kyung-Mook Lim^a, Sang-Gyo Byun^b

^aHeat Treatment & Plating Technology Center, KITECH

^bKyungBuk Heat Treatment

(Received May 17, 2010 ; revised October 25, 2010 ; accepted October 30, 2010)

Abstract

Vacuum carburizing process is well known process for its environment-friendly, low-cost, high-quality characteristics, compared with gas carburizing. In this study, a research was carried out to develop a process of vacuum carburizing for essential components of automotive transmission that is difficult to control its distortion. As a result, vacuum carburizing process is superior to gas carburizing in terms of cost, environment and quality.

Keywords: Vacuum carburizing, Automatic transmission, Annulus gear, Distortion

1. 서 론

열처리는 가열, 냉각 사이클에 의한 조직제어를 통해 물성을 결정하는 기술로서 각종 기계, 자동차 부품의 제작에 많이 쓰이고 있다. 열처리는 일반적으로 표면경화 열처리와 전체 열처리로 구분되어 왔으며, 최근 자동차, 기계 부품의 사용조건이 가혹해짐에 따라 품질 및 내구성이 요구되면서 표면열처리의 중요성이 날로 커지고 있다. 이 중에서 침탄 공정은 철강재료의 표면경화 방법중의 하나로서 제품 표면의 기계적 성질을 비교적 쉽게 향상시킬 수 있어 자동차 부품, 건설기계 부품 등에 오랫동안 사용되어왔다¹⁾.

현재 산업계에서 주로 사용되는 침탄 열처리는 가스 침탄 방식이다. 이 방식은 표면탄소농도조절

이 용이하며, 균일한 침탄층을 얻을 수 있고, 연속적이고 자동화가 가능하여 대량생산에 적합하다는 장점을 갖고 있다¹⁾. 그러나, 이 방식은 침탄성 가스를 사용하는 과정에서 가스침탄로 한 기 당 연수십 ton의 CO₂를 배출하는 유해공정으로 분류되고 있으며, 가스 사용으로 인한 폭발의 위험, flame, 연기, 기름때 등으로 인해 작업 능률이 저하되는 등 여러 가지 문제점이 제기되고 있다. 게다가 최근 자동차 부품들의 고품질화 및 고기능화가 요구됨과 동시에 친환경 공정에 대한 관심이 커지고 있는 추세이다. 따라서 CO₂ 발생이 많은 기존 공정과는 달리 친환경, 고품질, 저원가를 동시에 잡는 새로운 공정기술에 대한 요구가 증대되고 있다.

진공침탄은 미국의 C.I. Hayes사의 H.W. Western에 의해 1968년경부터 연구가 되어 1972년에 발표된 기술로서, 많은 연구자 및 산업계로부터 약 40년간 주목을 받아왔다. 특히, 21C 들어와 일본의 Japan

*Corresponding author. E-mail : wbeom70@kitech.re.kr

Heyes사에서 기존의 프로탄 가스 사용시 발생하던 sooting 문제를 아세틸렌 가스를 사용하여 극저압 (1 kPa 이하)에서 사용하는 공정기술을 개발한 이래로 현재 일본, 독일, 프랑스 등에서 상업화에 성공하여 다양한 산업 분야에 보급되고 있는 상황이다²⁾. 한편, 국내에서도 이와 같은 열처리 산업 환경변화에 맞추어 국내 기술진에 의해 장비 및 공정기술의 국산화가 진행되고 있으며, 장비 및 공정기술에 대한 지속적인 개발 및 연구가 진행 중이다.

기존의 가스침탄에 비해 진공침탄이 우수하다는 것은 열처리 전문가 및 관련 연구자들을 통해 잘 알려진 사실이다¹⁻³⁾. 그럼에도 불구하고 국내에는 아직까지 산업적으로 보급이 늦어지고 있으며, 일부에서는 해외 장비에 의존하고 있는 실정이다. 그 이유로는 국내에서 장비가 개발되었음에도 불구하고 아직까지 시장에서의 신뢰성에서는 부족한 상태이며, 특히 관련 공정기술의 개발이 늦어지고 있는데에서 그 원인을 찾을 수 있다. 즉, 진공침탄 기술은 기존 가스침탄에 비해 높은 공정온도(1050°C)를 요구하며, 표면 흡착에 의한 침탄 방식이기 때문에 탄소농도 조절을 위한 많은 노하우가 필요하다. 또한, 침탄 소재별로 다른 침탄 특성을 갖기 때문에 많은 실험을 통해 최적조건을 도출해야 하는 어려움을

갖고 있다.

현재까지는 두 공정사이의 장단점에 대한 정확한 분석, 특히 경제적 가치에 대한 고찰 및 데이터의 부족과 공정기술의 미비로 인하여 그 보급이 늦어지고 있는 것으로 보인다. 이에 본 고에서는 국내에서 제작된 장비를 이용한 진공침탄을 이용한 침탄 공정기술의 개발 결과에 대해서 서술하고자 한다. 또한, 실제 자동차 변속기 부품에 대해 기존의 가스침탄과 진공침탄 공정을 비교 분석함으로써 두 공정에 대한 보다 정량적인 비교를 하고자 하였다.

2. 진공침탄의 특징

아래 표 1에 가스침탄과 진공침탄의 침탄기구를 나타내었다. 가스침탄은 브도아 반응식(Boudouard reaction)에 따라 활성화된 탄소가 피처리물의 표면과 화학반응하여 침탄이 된다. 이러한 반응에 의하여 공정 중에 이산화탄소가 발생하게 된다. 하지만 진공침탄은 진공 중에서 가열되어 활성화된 피처리물의 표면에 침탄성 가스에서 분해된 탄소가 직접 침투 확산되므로 이산화탄소가 발생되지 않는다.

진공침탄은 이와 같은 방식에 의해 침탄이 이루어지고 있다. 이에 따라 많은 연구자들에 의해 진

Table 1. Carburizing mechanism of (a) Gas carburizing, (b) Vacuum carburizing process

(a) Gas carburizing		(b) Vacuum carburizing	
Input gases	RX Gas (CO, N ₂ , H ₂ , H ₂ O, CO ₂ , CH ₄)	Input gases	Hydrocarbon (CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₈ ...)
Chemical reaction	$2\text{CO} = [\text{C}]_{\text{active}} + \text{CO}_2$ $\text{CO} + \text{H}_2 = [\text{C}]_{\text{active}} + \text{H}_2\text{O}$	Chemical reaction	$\text{CH}_4 = [\text{C}]_{\text{active}} + 2\text{H}_2$ $\text{C}_2\text{H}_2 = 2[\text{C}]_{\text{active}} + \text{H}_2$

Table 2. Advantage of vacuum carburizing technology

	Advantages	Features
Environmental friendly	CO ₂ emission zero	Global warming
	No generation of flame and smoke	Good working condition
High quality	Not existence of internal oxidation	Improvement of fatigue strength and adhesion
	Flexible quenching processs	Reduction of deformation after quenching by oil surface pressure control
	Easy control of standard process	Good uniformity and repeatability
	Good surface quality	Decrease of post process
	Possible of various carburizing process	Carburizing, carbonitriding, supercarburizing, SUS carburizing 0.1 mm foil carburizing, Carburizing of deep narrow and dogged hole
Improvement of working condition	Worming up and siezing not needed	Acceptance of five day work week
	Good quality of workding condtion	
Cost reduction	Reduction of working time	Control of Sooting problem
	Low gas consumption	1/8 gas consumption in comparision to gas carburizing
	Shot peening process not needed	
	Unnessesariness of RX gas generator	

공침탄에 대한 장점이 보고되고 있다^{1,2)}. 표 2는 진공침탄의 특징에 대해 정리한 내용이다.

3. 진공침탄 장치 및 처리 공정

3.1 진공침탄 장치

그림 1은 국내에서 개발한 진공침탄 장치의 개략도이다. 그림에서 보듯이 본 침탄로의 구성품은 본체(장입테이블, 냉각실, 가열실), 진공펌프, 가스공급설비, 제어반으로 크게 구분되어 있다. 본체의 냉각실은 처리품 이송장치, 냉각유 가열히터, 냉각유 냉각장치, 냉각유 교반기등이 장착되어 있다. 그리

고 가열실의 히터 및 단열재는 모두 흑연으로 제작되어, 고온진공침탄이 가능하도록 설계되었다. 표 3은 본 장비의 기본 사양을 보여주고 있다.

3.2 진공침탄 공정

진공침탄은 표 2에서도 나타나 있듯이, 처리공정 상에서 고온진공침탄이 가능하며, 표면에 흡착되는 방식에 의해 깊은 홈이 있는 부위에도 침탄이 잘 되는 특징을 갖고 있다. 그림 2는 기존의 가스침탄과 진공침탄에 대해서 깊은 홈이 있는 상태에서 침탄을 행한 결과를 보여주고 있다. 침탄 시험은 SCM415, 구멍의 크기는 $\varnothing 6$ mm, 깊이는 50 mm의

Fig. 1. Vacuum carburizing furnace.

Table 3. Specification of vacuum carburizing furnace

		heating chamber	Transfer Chamber
Dimension		760 W × 1220 L × 700 H	
Weight		900 kg/charge	
Mas temperature		1100°C	180°C
Max degree of vacuum		under 10 Pa (0.075 Torr)	
Electrical capacity	Heaters	3 phase 150 kW	3 phase 40 kW
	Others	3 phase 30 kW

Fig. 2. Comparison of two carburizing process of specimens with a deep hole; (a) gas carburizing process, (b) vacuum carburizing process.

시험편을 제작하여 진행한 결과이다.

그림에서 알 수 있듯이 가스침탄의 경우에는 흠 안쪽에는 침탄이 잘 이루어지지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 반면에 그림 2(b)에서 보듯이 진공침탄의 경우에는 깊은 흠이 있는 부분에서도 고르게 침탄이 진행되었음을 확인할 수 있다.

침탄 공정은 다음과 같은 간단한 식으로 표현된다.

$$D = k\sqrt{T_t}$$

여기서 D 는 유효경화 깊이이며, T_t 는 총 침탄시간이다. 여기서 총 침탄시간(T_t)는 침탄시간(T_c)과 확산시간(T_d)의 합으로 나타난다. 즉, 침탄 공정은 확산에 의한 공정으로 k 상수에 의해 각각의 침탄 공정을 비교할 수 있다.

또한, 침탄시간(T_c)은 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

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

여기서 C_1 은 확산종료시의 표면탄소농도, C_2 는 침탄종료시의 표면탄소농도, C_0 는 모재의 탄소량이다. 즉, 침탄열처리 공정을 설계하기 위해서는 K 상수를 아는 것이 필요하며, 가스침탄에 대해서는 F.E Harris¹⁾에 의해 실험식이 보고되고 있다.

진공침탄의 경우에는 브도아 반응식을 따라 공정이 진행되지 않는다. 또한 표면에 흡착되는 탄소포텐셜의 값을 구하기가 불가능한 상황이다. 즉, 진공침탄의 경우에는 작동되는 진공도, 투입되는 가스량 및 가스투입방법, 공정 온도에 따라 K 값이 변하게 된다. 특히, 가장 중요한 부분은 진공침탄의 경우 소재마다 공정 및 K 값이 다르게 나타나 최적공정을 구하는데 어려움이 발생한다.

이에 따라 본 연구에서는 우선적으로 가장 많이 사용되는 침탄용 소재 SCM420에 대하여 진공침탄

공정을 적용하여 K 값을 구하였다. 그림 3은 SCM420소재에 대하여 가스침탄 및 국내외 진공침탄에 대하여 침탄 결과에 대해 비교한 결과이다. 그림 3(a)는 가스침탄에 대한 침탄시간 대비 유효경화깊이에 대한 결과를 보여주고 있다. 그리고 그림 3(b)는 그림 1에 제시한 장비를 사용하여 SCM420소재에 대해 침탄 시험을 행한 결과이며, 그림 3(c)는 일본 J사의²⁾ 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 900°C에서는 진공침탄과 가스침탄의 차이가 크게 나타나지 않고 있으나, 930°C로 온도가 증가함에 따라 k 값의 변화가 크게 나타나며 침탄속도의 차이가 점차로 넓어지고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 3(b)와 그림 3(c)를 비교할 때 침탄속도는 유사하게 나타나고 있으며, 고온에서는 오히려 국산장비가 더 빠른 침탄속도를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 진공침탄 공정상에서 서로 다른 진공도에서 침탄 공정이 진행되며, 투입되는 가스의 종류 및 투입 방법의 차이에 의해 나타나는 것으로 보인다. 즉 이와 같은 시험 결과를 통하여, 최적의 침탄 공정 설계가 가능하다.

4. 자동차 부품 적용 시험

그림 4는 그림 3(b)의 침탄 그래프를 이용하여 최적공정을 설계한 후 6속 자동변속기의 핵심부품인 annulus gear에 대하여 침탄 시험을 행한 결과이다. Annulus gear는 SCR420소재에 표면경도 650 Hv, 침탄 유효경화깊이는 0.4~0.7 mm를 요구하고 있다(그림 4(a)). 현재 annulus gear는 가스침탄 후 고주파 열처리와 플러크 퀴칭을 통하여 제조되고 있는 부품이다. 침탄 후 고주파 열처리 및 플러크 퀴칭을 행하는 이유는 annulus gear의 변형 기준이 매우 엄격하기 때문이다. 이러한 부품을 진공침탄을 통하여 공정 시간을 단축함과 동시에 변형을 제어하는 경우에는 그 효과가 지대할 것으로 보인다.

Fig. 3. Variation of effective carburizing depth with various process time; (a) gas carburizing process, (b) vacuum carburizing process of present work, (c) vacuum carburizing process of J. Heyes²⁾.

Fig. 4. Results of various carburizing process : (a) annulus gear specimens (b), carburizing process and (c) the hardness profiles and microstructure of specimens.

그림 4(b)는 annulus gear에 대하여 그림 3에 나타난 침탄그래프를 사용하여 적용된 최적화된 가스 침탄 열처리 공정, 진공침탄 열처리 공정을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 부품의 품질 기준을 맞추기 위하여 가스침탄에서는 총 침탄시간이 4시간 걸리는 반면, 진공침탄에서는 3시간으로 침탄 시간이 30% 이상 단축되었음을 알 수 있다. 즉 가스침탄에서는 $k = 0.35$ 을 갖고 있으나, 진공침탄에서는 0.46~0.51 수준으로 가스침탄에 비해 높은 값을 갖기 때문에 침탄시간이 단축되게 되는 것이다. 그림 4(c)는 진공침탄을 통한 시험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 침탄 깊이는 약 0.6 mm 이상이었으며, 표면에 침탄 층이 고르게 형성되어 있음을 알 수 있었다.

4.1 자동차 부품에 대한 침탄 공정 비교

앞에서도 주지하다시피, 진공침탄의 특징은 형상에 관계없이 고르게 침탄이 진행된다는 것이다. 이것은 침탄이 가장 많이 적용되는 기어류에 매우 중요한 요소이다. 각종 기계부품에 필수적으로 적용되는 기어류는 내구성이 요구되는 부품으로 침탄 공정을 통해 내마모성을 향상시킨다. 그러나, 일반적으로 치저 부위에는 침탄이 잘 되지 않아 내구성이 하락하는 문제점이 발생한다. 이런 경우 진공침탄은 좋은 대안이 될 수 있다. 그림 5는 annulus gear의 헬리컬 기어부위에 대한 외경 및 치저, 피치원지름(PCD)에 대한 경도 분포이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 진공침탄으로 침탄을 행한 경우 모든 부위에서 유사한 경도 분포를 갖고 있었다. 즉, 복잡 형

Fig. 5. Hardness profiles of helical gear after carburizing.

상을 갖고 있는 기어류에 대해서도 균일한 침탄 공정이 가능함을 알 수 있다.

4.2 변형량 검사

Annulus gear는 정밀한 치수공차를 요하는 자동차 변속기에 들어가는 부품 중 하나로서 변형이 일어나면 해당하는 부품뿐 아니라 변속기 자체의 성능, 안정성 및 소음 문제 등에 지대한 영향을 끼친다. 그러므로 해당 부품의 변형량 허용 오차는 필연적으로 엄격할 수 밖에 없기에 변형량 제어 가능성 여부에 따라 열처리 공정의 성패가 좌우된다고 할 수 있다. 표 4와 5는 Annulus gear를 3단계 공정 즉, 가스침탄, 고주파 열처리, 플러그 퀴칭을 실시한 것과 진공침탄만을 한 것을 구분하여 각각 열처리 전후의 치수를 측정된 결과들이다.

표 4는 Annulus gear의 전체적인 치수를 측정된 결과로서 가스침탄의 경우에는 대략 0.1~0.2 mm 사이에서 모두 오차 범위 안에 들어오는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 진공침탄의 경우에는 약 0.1~0.2 mm의 수축이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 침탄공정은 공정 처리 후 수축이 발생되지만, 가스침탄의 경우에는 수축된 것을 플러그 퀴칭 시에 다시 늘리기 때문에 수축된 양상을 보이지 않는다. 즉 이에 따라 가스침탄 공정은 최종적으로 변형량이 허용 오차안에 들어오고 있지만, 진공침탄은 허용오차를 벗어나는 것으로 나타났다. 이것은 초기 가공량을 증가시킴으로써 최종 제품의 형상을 제어함으로써 오차안에 들어올 수 있는 항목이다.

열처리에서 가장 중요한 부분이 동심도이다. 본 연구에서는 가스침탄 및 진공침탄 모두 요구 사양을 만족하는 것으로 측정되었다.

치형은 가공 정확도 및 열변형 제어가 매우 중요한 요소로, 기어의 운전 성능에 직결되며 작동 시

Table 4. Measurements of thermal distortion of Annulus gear before and after heat treatment

(unit : mm)

No.	Measurement Part	Spec	Classification	Process			
				Gas carburizing		Vacuum carburizing	
				1	2	1	2
1	External diameter	$\Phi 143.3 \sim 5$	As-received	143.32	143.29	143.31	143.31
			Variation	0.12	0.14	-0.119	-0.218
2	Concentricity of internal diameter	$\Phi 0.15$	As-received	0.06	0.07	0.07	0.07
			Variation	0.02	0.01	0.06	0.01
3	Concentricity of external diameter	$\Phi 0.15$	As-received	0.07	0.07	0.07	0.08
			Variation	0.01	0.02	0.07	0

Table 5. Measurements of tooth geometry for helical part

(unit : μm)

Process			Gas carburizing		Vacuum carburizing	
Sample No.			1	2	3	4
Measurement part	Profile avg. ($20 \mu\text{m} \downarrow$)	Left	5	7.4	11.2	9.5
		Right	6.6	2.7	9.2	2.9
	Lead avg. ($40 \mu\text{m} \downarrow$)	Left	21	25.1	8.3	24.7
		Right	38.5	32.9	10.3	14.3

에 발생하는 소음에도 많은 영향을 미친다. 표 5는 헬리컬 기어 부분에 대한 치형을 측정 한 결과를 보여주고 있다. 두 공정에 치형의 단면 형상 측정(Profile)을 하였으며, 그 결과 두 공정 다 평균적으로 허용 오차 범위가 $20 \mu\text{m}$ 이내의 결과를 얻었다. 또한 Lead는 기어의 작동방향 측의 형상을 말하는데 이 항목의 허용 오차 범위는 $40 \mu\text{m}$ 이내로 이 항목 역시 두 공정이 다 해당 요구 사양을 만족하고 있다. 이 치형 측정의 경우 lead 부분의 결과가 가스침탄의 경우는 안정적으로 사양을 만족하였으나, 진공침탄의 경우는 편차가 가스침탄에 비해 높게 나타나 앞으로의 개선이 요구된다.

5. 결 론

지금까지 본 보고에서는 현재 열처리 분야에서 가장 각광을 받고 있는 진공침탄공정 기술에 대해서 소개하고 그 적용 및 시험 결과에 대해서 소개하고자 하였다. 21C는 모든 제조업이 친환경화, 녹색화로의 신속한 변화가 요구된다. 열처리 산업도 마찬가지로 기존의 에너지 대량 소비산업, CO_2 다 배출 산업에서 친환경적인 산업으로의 변화가 필요한 시점이다. 이런 상황에서 진공침탄 공정기술은 21C 열처리 산업의 친환경, 녹색화에 큰 역할을 할 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 높은 장비 가격 및 공정기술의 미확보 등으로 인하여 산업체에서 기술 적용 및 양산화 초기단계에 머물러 있는 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 국산 장비를 이용하여 진공침탄 공정 기술을 개발하고자 하였으며, 실제 자동차 부품에 적용을 함으로써 그 결과치에 대해서 객관적으로 표현하고자 하였다. 그 결과 양산화에 충분한 내구성이 확보된 장비를 개발할 수 있었으며, 그 장비를 바탕으로 기존의 가스침탄에 비해 최소 30% 이상 침탄시간이 단축되며, CO_2 가스가 전혀 배출되지 않는 친환경 진공침탄 공정기술을 확보할 수 있었다. 앞으로 좀더 많은 연구를 통해 다양한 침탄 소재에 대한 공정기술 확보 및 열변형 최소화 기술을 접목한다면, 충분히 경쟁력있는 침탄 열처리 기술로 발전될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. H. Y. Kim, S. J. Park, Surface Heat Treatment, WonChang press, 1996.
2. H. Iwata, IHI Technical Report, 45(1) (2005) 15.
3. P. Kula, R. Pietrasik, K. Dybowski, J. Mat. Pro. Tech., 164-165 (2005) 876.
4. Francis T. Farago, Mark A. Curtis, Handbook of Dimensional Measurement 3rd edition, Industrial Press Inc., 1994.
5. F. Chen, L. Liu, Mat. Chem & Phy., 82 (2003) 801.