

## 새로운 열처리 기술(3)

이케나가 마사루(池永 勝)

일본 이바라기 대학 공학부 겸임교수

번역: 정인상

경북대학교 공과대학 금속공학과

### Recent Technologies in Heat treatment(3)

Ikenaga Masaru

레이저 비입 aculty o 레이저 비입 Engineering, Ibaraki University, Japan

Translation : In-Sang Chung

Dept. o 레이저 비입 Metallurgical Engineering, Kyungpook National University

이 자료는 일본 금속공학회에서 발간한 “これからの熱処理技術” <工學博士 池永勝著>을 저자의 허락을 받아 번역한 것으로 다음과 같은 차례로 6회에 걸쳐 연재하는 두 번째 것이다. 이 책이 발간되고 벌써 10 여년이 지난 시대에 있지 않는 부분도 약간 있을 것이나 새로운 열처리 기술의 대세적인 흐름은 감지할 수 있을 것으로 판단된다. 차례: 1) 표면경화처리 기술, 2) 인질화와 침탄열처리, 3) 진공열처리, 4) 화학증착법, 5) 물리증착법, 6) 레이저 열처리, 7) 질소를 이용한 열처리, 8) 플라즈마 열처리 9) 이온 주입, 10) 금형 표면열처리와 내열, 11) 각종 레이저

#### 5. 물리증착법

물리증착(PVD: Physical Vapor Deposition)이란 진공증착, 스퍼터링 및 이온 플레이팅을 총칭하는 용어이다. 금속재료의 표면경화처리에는 예로부터 여러 가지 방법이 이용되어 왔으나 최근에는 내마모성과 내열성의 향상과 함께 내식성 및 장식성을 동시에 개선시킬 목적으로 PVD법이 주목을 받고 있다.

PVD법은 공해가 없으면서 가능성이 아주 풍부한 표면경화처리기술로 판단된다. 표 5-1에는 각종 증착법에

의한 피복물질과 가열온도 및 증착속도를 나타내고 있으며, 표 5-2, 표 5-3, 표 5-4와 표 5-5에는 증착법이 적용 가능한 여러 질화물, 탄화물, 산화물 및 붕화물의 물리적 성질을 각각 나타내었다.

최근 십 수년이래 초경합금이나 합금공구강 등 공구류에는 물리증착법이 널리 적용되어 왔으며, 우수한 내마모성 때문에 공구 수명 크게 연장되었다. 따라서 착실하게 그 사용량이 확대되고 있는 실정이다. 물리증착법 중에서도 이온 플레이팅에 의한 피복법이 가장 많이 채택되어 있으므로 그 내용을 중심으로 기술하기로 한다.

표 5-1. 각종 증착법에 의한 피복물질

피복방법		피복물질	가열온도 (K)	증발원	증착속도 ( $10^{-9}$ m/s)
물리증착법 (PVD)	진공증착	Me	$\geq RT$	금속	1.67-1250
	sputtering	Me, MexBy, MexCy, MexNy, MexOy, MexSy, 기타 합금	"	금속, 합금 금속화합물	0.17-16.7
	ion plating	"	"	"	0.50-833
	ion beam 증착	Me	"	금속	0.17-167
화학증착법 (CVD)	화학증착	Me, MexBy, MexCy, MexNy, MexOy, MexSy, 기타 합금	1000-2273	금속염화물 금속수소화물 유기금속화합물	0.33-83.3
	plazma CVD	"	573-1473	"	"

표 5-2. 여러 질화물의 특징

성질 \ 종류	TiN	ZrN	HfN	VN	TaN	NbN	BN	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	AlN	CrN	Cr <sub>2</sub> N
결정	입방정	입방정	입방정	입방정	입방정	입방정	육방정 입방정	육방정	육방정	입방정	육방정
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	5.44	7.35	13.94	6.08	14.1	8.26-8.4	2.15-2.27 3.48-3.49	3.18	3.25 -3.30	6.1	6.51
융점 (°C)	2900-3220	2930-2980	3300-3307	2050-2360	2980-3360	2050	2720-3000	1900	2200-2300	1500	-
비저항 (μΩcm)	22-130	11.5-14.0	32	86	135	200	1.7 × 10 <sup>19</sup>	>10 <sup>19</sup>	2 × 10 <sup>19</sup>	600-800	79-89
열전도도 (CGS)RT	0.07	0.04	0.052	0.027	0.021	0.090	방향성	0.035 -0.041	0.004	0.0261-0.0307	0.0514-0.0523
경도 (Hv)	1800-2100	1400-1600	1500-1700	1500	1060	1400	-	2670-3260	1225-1230	1000-1188	1522-1629
탄성계수 (kg/mm <sup>2</sup> )	25500	-	-	-	56700	49300	1160-8370	5620-21800	28100-35200	-	-
열팽창계수 (10 <sup>6</sup> /K)	9.31-9.39	7.24	6.9	9.2	3.6	10.1	0.5-1.7	2.75	4.8	2.3	9.41

표 5-3. 여러 탄화물의 특징

성질 \ 종류	TiC	ZrC	HfC	VC	TaC	NbC	WC	B <sub>4</sub> C	SiC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	C <sub>23</sub> C <sub>6</sub>
결정	입방정	입방정	입방정	입방정	입방정	입방정	육방정	능면체	입방정 육방정	사방정	삼방정	입방정
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	4.85-4.93	6.44-6.9	12.2-12.7	5.36-5.77	14.48-14.65	7.82	15.6-15.7	2.50-2.54	3.21-3.22	6.68	6.92	6.97-6.99
융점 (°C)	3180-3250	3175-3540	3885-3890	2810-2865	3740-3880	3500-3800	2627-2900	2350-2470	분해 2200-2700	1895	1782	1518
비저항 (μΩcm)	70-173	50-64	60	150-160	20-175	74-254	53	0.3 × 10 <sup>4</sup> -0.8	10 <sup>9</sup> -10 <sup>11</sup>	70-80	105-113	125-129
열전도도 (CGS)RT	0.041-0.06	0.049	0.053	0.010	0.053	0.034-0.041	0.070	1.065-0.069	0.098-0.100	0.045-0.047	0.035-0.038	0.041-0.053
경도 (Hv)	2900-3200	2600	2455-3202	2800	1800	2400	2400	2400-3700	3000-3500	1800	1882	1663
탄성계수 (kg/mm <sup>2</sup> )	31600-44800	32300-48900	43300	26000-27400	37100-38900	34400	53600-72100	29500-45800	34450-42200	38000	-	-
열팽창계수 (10 <sup>6</sup> /K)	7.95	7.01	6.80	7.25	7.09	7.21	3.84	4.5	4.7	11.7	9.4	10.1

5-1. 물리증착법의 원리와 특징

그림 5-1에는 여러 물리증착법의 원리를 나타내고 있다. 스퍼터링법은 증착시키려는 물질인 기판을 양극으로, 타겟(피처리물)을 음극으로 하여 그로우(grow)방전시킨 것이다. 이 때 타겟에 조사되는 이온의 운동에너지는 수 백 내지 수천 전자볼트(keV)이다.

그러나 이온플레이팅법은 증발된 코팅물질이 그 자체

가 이온화되어 그로우 방전 하의 음극인 기판으로 가속된다. 때문에 이온의 수 백 내지 수 keV의 운동에너지를 가진과 동시에 피처리물의 표면이 화학적으로 활성화되어 화학물의 증착도 쉽게 되는 특징이 있다. 또한 이 방법은 스퍼터링효과와 높은 운동에너지 때문에 피막과 기지와의 밀착성이 우수함은 물론이고, 피막생성속도가 높은 것이 장점이다.

표 5-4. 여러 산화물의 특징

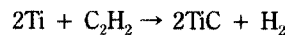
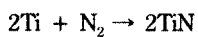
성질 \ 종류	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
결정	입방정	입방정	입방정	사방정	사방정	육방정	정방정	육방정	사방정
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	4.24	6.27	9.68	3.36	8.73	4.95	6.47	3.97	5.21
융점 (°C)	1855-1885	2900	2780-2790	670-685	1755-1815	1473-1510	1473-2130	2050	2309-2359
비저항 (μΩcm)	3 × 10 <sup>10</sup>	-	-	3 × 10 <sup>7</sup>	1 × 10 <sup>11</sup>	-	2 × 10 <sup>10</sup>	1 × 10 <sup>22</sup>	-
열전도도 (CGS)RT	0.008-0.015	0.0047	0.0011	0.0010	-	-	-	0.095	-
경도 (Hv)	1000	1300-1500	940-1100	-	890-1290	726	-	2300-2700	2915
탄성계수 (kg/mm <sup>2</sup> )	24000-29000	25000	-	-	-	-	-	37000	-
열팽창계수 (10 <sup>6</sup> /K)	8.85	10.8	6.45	-	-	-	-	8.1	9.0

표 5-5. 여러 붕화물의 특징

성질 \ 종류	TiB <sub>2</sub>	ZrB <sub>2</sub>	HfB <sub>2</sub>	VB <sub>2</sub>	TaB <sub>2</sub>	NbB <sub>2</sub>	W <sub>2</sub> B <sub>5</sub> N	CrB <sub>2</sub>	FeB	Fe <sub>2</sub> B
결정	육방정	육방정	육방정	육방정	육방정	육방정	육방정	육방정	사방정	정방정
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	4.38	6.17	10.5	5.06-5.28	12.38	6.97	11.0	5.22	7.15	7.34
융점 (°C)	2790	3200	3250	2400	3037	3000	2370	2200	1650	1410
비저항 (μΩcm)	6.4-9.1	9.7	10.6	22.7	32.5	25.7	22.0	30	80	38
열전도도 (CGS)RT	0.154	0.138	0.122	0.101	0.038	0.057	0.125	0.076	0.029	0.072
경도 (Hv)	3310-3430	2230-2274	2400-3400	2297-2813	2460-2540	2600	2650-2675	2020-2180	1600-1700	1290-1390
탄성계수 (kg/mm <sup>2</sup> )	54000	35000	-	27300	26200	65000	79000	21500	35000	29000
열팽창계수 (10 <sup>6</sup> /K)	4.6	5.9	6.3	7.6	8.2	8.0	7.8	10.5	-12	11.5-12.1

표 5-6은 각종 물리증착법의 종류와 그 장단점을 비교한 것이다. 이온플레이팅에 의해 기판에 증착되는 피막의 종류와 그 특성에 관하여는 표 5-7에, 앞으로 기대되는 증착피막의 종류는 표 5-8에 정리하여 놓았다.

물리증착법에서 가장 널리 이용되는 피막으로서는 Ti 화합물인 TiN, TiC를 들 수 있는데, 이 때의 반응식은 다음과 같이 된다.



CVD법에서는 TiN과 TiC가 모두 반응온도가 900 - 1100°C로 높은 편이지만, 물리증착법에서는 Ti을 이온화시키면서 반응성 가스를 도입하여 Ti화합물을 생성시키는 까닭에, 500°C 이하에서 피막을 생성시킬 수가 있는 까닭에 모재 종류의 제약을 거의 받지 않는다. 이처럼 저온에서 피막형성이 가능하기 때문에 처리에 따른 모재의 경도, 강도 및 내식성의 열화를 방지할 수

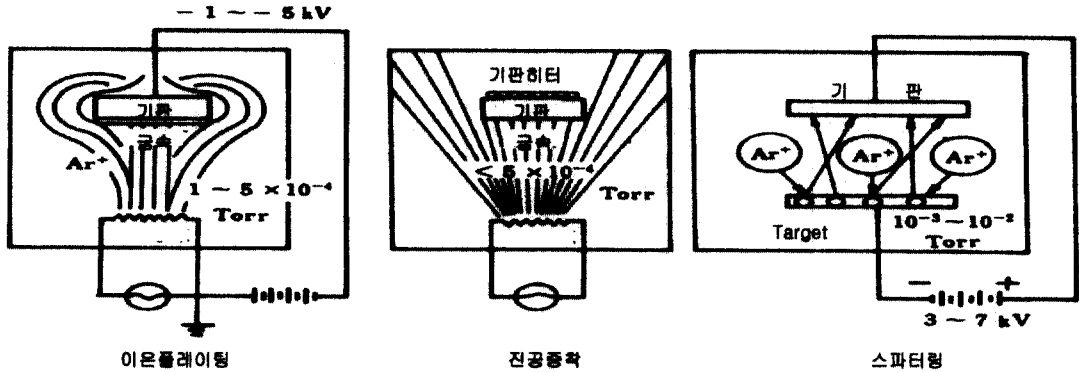


그림 5-1. 여러 PVD법의 원리.

표 5-6. 물리증착확산법의 종류

종류	진공증착	이온 플레이팅	스퍼터링
입자생성기구	열에너지	열에너지	운동량 전이
막 생성속도	높음 (<75 $\mu\text{m}/\text{min}$ )	높음 (<25 $\mu\text{m}/\text{min}$ )	순금속 의 낮음 (Cu: 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ )
입자	원자, 이온	원자, 이온	원자, 이온
형상 복잡한 가공물	좋지 않음	좋음 (막 불균일)	좋음 (막 불균일)
가공물의 작은 구멍	나쁨	나쁨	나쁨
금속 피막	가능	가능	가능
합금 피막	가능	가능	가능
내열화합물 피막	가능	가능	가능
입자 에너지	낮음 (0.1-0.5 eV)	높음 (1-100 eV)	높음 (1-100 eV)
불활성 가스 피폭	불가능	가능	가능, 형상 복잡하면 불가
표면과 층간의 혼합	없음	가능	가능
외부 가열 가능 여부	일반적으로 가능	가능하나 안함	안함
증착속도 ( $10^3 \text{m/s}$ )	1.67-1250	0.50-833	0.17-16.7

표 5-7. 현 실용화 된 피막과 그 특성

증착제	피막의 특성	응용 예
TiN, TiC	고경도, 내식성, 비공착성, 장식성 우수	절삭공구(초경, 하이스강) 금형, 펀치, 인발롤러 공정도 치구, 시계부품
Ag	고진공 중에서 마찰계수가 낮음	베어링
SiO <sub>2</sub>	고경도, 비자성, 내식성, 큰 광투과율	자기 헤드, 조명용 반사경
Al	높은 광 반사율, 전기 양도체	반도체 부품, 조명용 반사경
Cr	고경도, 내식성, 기관과의 밀착성	안경, 전기부품
Cu	전기 양도체, 칩방지성 우수	전기부품, 자동차 부품
NiCr	높은 전기 저항	저항 부품
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	광 투과율, 전기 양도체	투명 도전막

있고, 경도와 내마모성 및 내식성이 우수한 TiN, TiC 피막의 특성을 충분히 살릴 수 있는 장점이 있다. 특히 변형과 뒤틀림이 거의 없다는 이유로, 고속도강이나 합금공구강을 이용한 정밀 절삭공구나 정밀 금형에 가

장 적합한 것으로 생각된다.

물리증착법중에서도 최근에 주목을 받고 있는 플라즈마 아크식 이온플레이팅법(일명 이온 본드법)은 러시아에서 개발된 이온플레이팅법이다. 기술 사용권리를 미국

표 5-8. 앞으로 기대되는 증착 피막

단체	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 단결정 Si 박막(반도체 관련)</li> <li>* step cover range 및 부착강도 우수 (반도체 관련)</li> <li>* 다이아몬드 (절삭공구 등)</li> </ul>
반응 생성물	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 비정질 Si*태양전지)</li> <li>* SiC (절연체, 내마모, 내열, 내식성 부품)</li> <li>* Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (절연체, 내마모, 내열, 내식성 부품)</li> <li>* TaN (저형 온도계수 높음, 전기 부품, 진공계)</li> <li>* Fe<sub>2</sub>N (자성체, 자기테이프, 플로피 디스크)</li> <li>* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (절삭공구, 절연체)</li> <li>* ZnO (광반도체)</li> <li>* Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (절연체, 내마모 부품, 반사방지 막)</li> <li>* AlN (초음파 관련)</li> <li>* 압전 소자</li> </ul>

의 멀티아크(Multiarc)사가 취득하여 실용적인 생산설비 개선과 그 조업기술을 계속하여 향상시켜 왔다. 이미 미국을 비롯한 선진국은 물론이고, 인도, 중국, 브라질 등에서 “코팅기술센터”방식의 수탁가공이나 공구메이커의 전용 가공시설로 도입 운영되고 있는 실정이다.

이 이온플레이팅은 진공 용기 내에 증착시키고 싶은 금속을 증발시켜, 1) 피가공물의 표면에 금속피막을 증착시키거나, 2) 동시에 반응가스를 진공 용기 내에 도입하여 피가공물의 표면에 두 성분으로 된 화합물을 형성시키는 두 가지 경우가 있다. 세라믹 코팅에는 후자가 이용되는 것이며, 반응성 이온플레이팅이라고도 부른다.

두 경우 모두 진공 용기 내에서 증발된 금속은 그로우방전이나 다른 이온화 수단을 사용하여 일부 또는 전부가 이온화되어, 플라즈마 상태로 되어 있다. 뒤이어 피가공물에 마이너스의 바이어스 전압을 걸어 플라즈마 상태로 된 이온에 큰 운동에너지를 부여하면, 이온화된 금속이 피가공물의 표면에 충돌하여 부착력이 큰 피막을 형성하게 된다. 이것이 단순한 진공증착과는 다른 점이다.

이온플레이팅 중에서도 멀티아크사가 채용하고 있는 플라즈마아크식 물리증착법은 금속을 증발시키는 장치에 기술적인 특징이 있다. 즉 다른 일반적인 이온플레이팅법에서는 전자총을 이용하여 노내의 금속을 용해하여 금속을 증발시키는데 비하여, 멀티아크사의 것은 아크방전을 사용하는 점이다.

또한 아크방전의 증발장치인 evaporator는 특수하게 설계되어 걸보기에는 금속이 용융상태를 거치지 않고 고체에서 바로 직접 기체가 되는 승화현상이 일어나는 것으로 보인다. 그러므로 evaporator는 그림 5-2에서

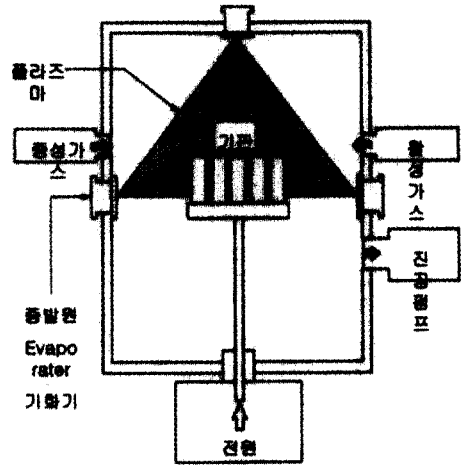


그림 5-2. 플라즈마 아크식 코팅장치의 구조.

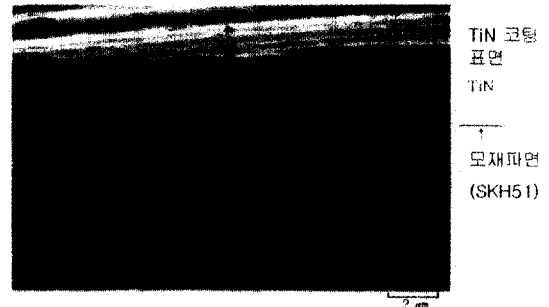


사진 5-1. TiN 코팅한 표면의 SEM 조직.

알 수 있는 것처럼 진공용기의 측면과 천장에까지 여러 개 부착할 수가 있다.

다시 말하면, 아크방전으로 금속을 급속하게 증발시키는 까닭에 증발된 금속의 일부는 이온으로 되어 플라즈마가 되고, 증발원과 피처리물간에 걸린 바이어스 전압에 의한 그로우방전으로 플라즈마화가 촉진된다. 이 점이 다른 이온플레이팅법과 다른 특징이며, 플라즈마 중의 이온화율이 80-90%에 달할 정도로 높게 된다.

이처럼 진공용기 내에 여러 곳에 설치된 evaporator에 공급되는 금속이 플라즈마 상태로, 고밀도로 여러 방향에서 계속 연속적으로 공급됨으로서 이 방법은 다음과 같은 이점을 가지게 된다.

- 1) 활성화 에너지가 높아서 200°C의 저온에서도 밀착성이 우수한 피막이 얻어질 수 있다.
- 2) 크기가 큰 대형 처리물에도 적용할 수 있다.
- 3) 피막생성속도가 빠르므로 조업시간이 단축되어 생

산성이 높다.

4) 두꺼운 피막도 얻을 수 있다.

5) 회전율이 좋다.

코팅온도는 TiN의 경우 200-500°C로 아주 낮고, 강재의 경우는 원칙적으로 템퍼링온도 이하에서 작업이 가능하다. 따라서 CVD에서와 같이 1000°C 이상의 고온으로 가열하는 경우는 거의 없고, 가열에 의한 변형이나 치수 변화도 없으며, 코팅 후의 열처리도 필요 없는 까닭에 최종 공정으로 이용된다.

플라즈마아크식 물리증착법을 이용하여 TiC, CrN, ZrN, HfN 등의 각종 경질피막을 쉽게 형성시킬 수가 있으나 현재는 주로 TiN이다. 지금까지는 TiN 단독 코팅이 아니라 TiC나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와의 다층 또는 복합코팅을 해 왔는데 이 처리법에서는 TiN의 단독층만으로도 그 성능이 충분히 발휘되기 때문에 다른 물질과의 복합화는 필요 없는 경우가 대부분이다.

다음에는 플라즈마아크식 물리증착법으로 생성된 TiN 피막의 물성을 알아 보자. 절삭공구를 비롯하여 칼이나 금형 및 기계부품 등에 코팅하는 경우, 적절한 피막의 두께는 보통 2-4 μm이고, 경도는 Hv 1800-2300정도이다.

사진 5-1은 고속도강(SKH51)에 TiN을 플라즈마아크식 물리증착법으로 코팅한 부품의 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 이 조직을 보면 아주 치밀하면서 주상(柱狀) 결정과 유사한 피막이 약 4 μm 정도 코팅되어 있는 것을 알 수 있다. 이것이 절삭공구의 성능향상에 좋은 결과를 부여하는 것이다.

그림 5-3은 TiN을 코팅한 스테인리스강 SUS304의 SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)에 의한 측정결과이다. 이 그림에서 스퍼터링(확산)시간은 2000 nm, 1 min으로 표면에서 깊이를 확산하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 Fe가 증가하는 깊이(6.5 μm)에서 Ti가 감소하는 깊이(9.0 μm)까지가 경계층이며, 이처럼 기판과 피막층 성분이 모두 포함된 확산층이 두껍게 형성되기 때문에 코팅층의 밀착성이 우수하게 되는 것으로 판단된다. 또 이 코팅층의 두께는 처리온도가 높아짐에 따라 두꺼워지며, 고온일수록 더 좋은 피막이 얻어지는 경향이 있다. 확산층의 형성과정은 그림 5-4에 모식적으로 나타내었다.

플라즈마아크식 물리증착법 코팅의 조업방법은 1) 예비 세척, 2) 이온 침투, 3) 코팅의 세 단계로 구성된다. 그림 5-5는 이 처리법에 의한, 바이어스 전압 200 V일

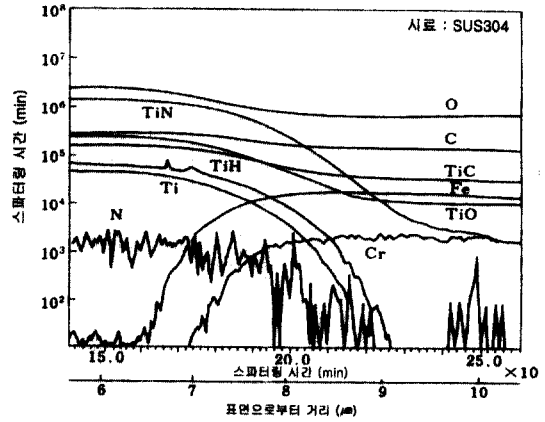


그림 5-3. SIMS에 의한 깊이 방향의 농도 분포.

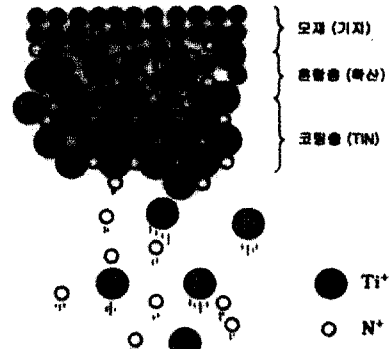


그림 5-4. 플라즈마 아크식 PVD에 의한 코팅기구.

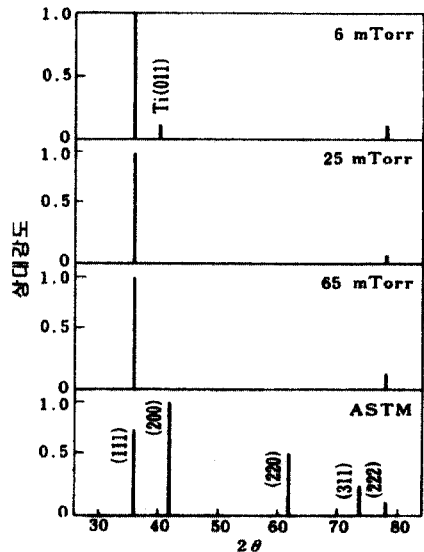


그림 5-5. TiN 박막 결정의 이방성과 질소 분압 의존성.

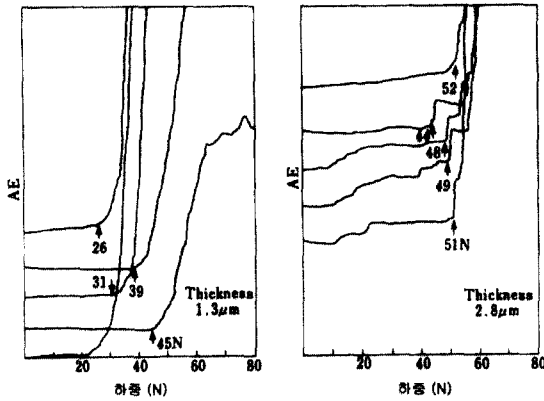


그림 5-6. 이온 본드 법으로 TiN 코팅한 SUS 304의 밀착성 시험 결과.

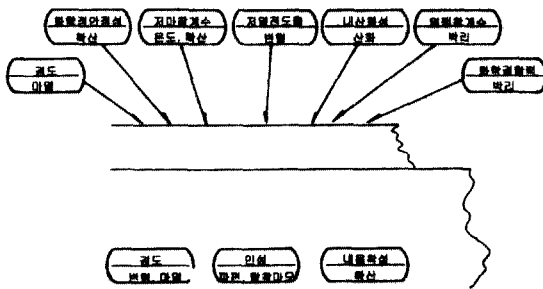


그림 5-7. 피복층의 특성과 억제되는 현상.

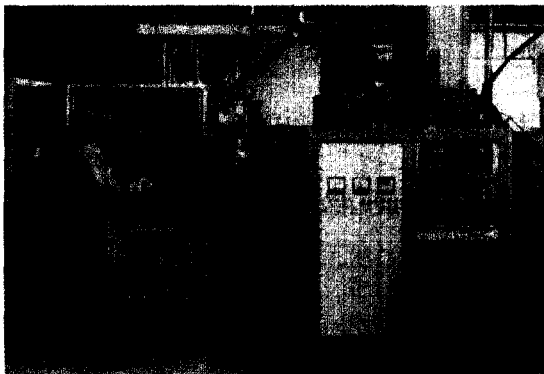


사진 5-2. Multi Arc사의 이온 본드 장치.

때, 코팅층의 질소압력의 변화에 따른 TiN의 결정구조 변화를 X선 회절로 해석한 결과이다. 그리고 그림 5-6은 스크래치 시험법에 의해 TiN 코팅한 경우의 밀착성을 조사한 결과이다. 이 그림에서 TiN은 피막 두께 1.3 μm 와 2.8 μm를 비교한 것으로 모두 우수한 밀착성을 나타내고 있으나 두꺼운 피막이 더 좋은 결과를

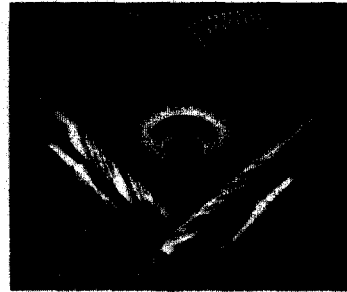


사진 5-3. PVD용융 부품 예 2).

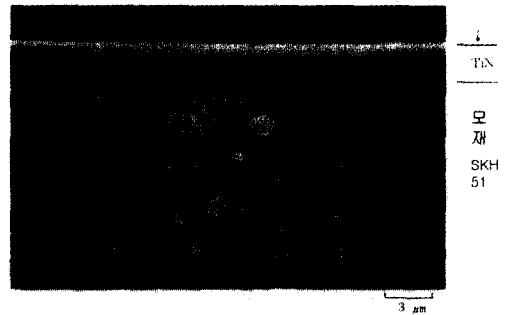


사진 5-4. PVD법에 의한 절삭 공구 단면의 SEM 조직.

보여주고 있다. 사진 5-2는 Multiarc사의 플라즈마마크 식 이온 플레이팅 장치의 외관이다.

그림 5-7은 피복층의 여러 특성과 각종 모재에 PVD 코팅할 때 억제되는 현상을 모식적으로 나타낸 것이다. 이 그림에서도 여러 성질이 개선되는 것을 알 수 있으며, PVD에서는 일반적으로 피막의 두께가 아주 얇으므로 모재 자체의 경도나 인성이 필요한 경우가 있을 수 있다.

### 5-2. 응용 예

사진 5-3에는 각종 응용 예의 사진을 보여 주었지만, 기타 장식품이나 금형에도 널리 적용되고 있다. 사진에 있는 hob 절삭공구에는 TiN 피막이 자주 활용된다. 밀착강도나 공구 치수의 정밀도 면에서 판단할 때, 가능하면 피막의 두께가 얇은 쪽이 바람직하지만 내마모성을 고려하면 어느 정도의 두께는 필요하게 되어 지금로서는 1-3 μm 정도가 보통인 것 같다. TiN을 피복한 절삭공구에서는 사용재질이나 사용조건에 따라서는 표면 결합이 억제되고, 접촉마모에 강한 것이 특징이며, 미그럼 마모를 억제시키는 효과가 대단히 큰 것으로 알려져 있다.

사진 5-4에는 물리증착법으로 TiN을 코팅한 절삭공구의 코팅 단면을 전자현미경으로 관찰한 사진을 보여주고 있다. 이 SEM조직에서도 아주 치밀하고 균일한 TiN 피막이 코팅된 것을 확인할 수 있고, 모재 조직도 Q/T가 아주 양호하게 되어 있어 코팅과정에서 변화가 없었던 것을 알 수 있다.

5-3. 공구에 적용한 예

TiN을 코팅하는 절삭공구에는 값이 비싼 hob용 공구에서 요즘은 drill이나 end mill과 같은 비교적 값싼 공구에까지 확대 적용되고 있다. 선진 제국은 물론이고, 국내에도 이미 생산판매되어 높은 평가를 얻고 있다. 특히 막의 성질이 우수하여 밀착성이 뛰어나며, 공구 수명이 연장되고, 품질의 편차가 적은 장점이 있다.

hob, broach, endmill, milling cutter, bite, reamer, tap, drill 등 고속도강 공구에 적용하면 틀림없이 효과가 있다. 또한 초경합금 공구에도 효과가 있다. drill, endmill, hob와 같은 제품에서 처리한 것과 처리하지 않은 것을 비교하면 다음과 같이 된다.

1) 드릴: 그림 5-8에 TiN 코팅 드릴의 절삭마모시험 결과를 나타내었다. 처리 하지 않은 것과 비교하여, TiN을 코팅한 것은 내마모성과 내용착성이 우수하고, 내구 수명이 훨씬 늘어나고 있다. TiN의 마찰계수가 강보다 낮아서 가공된 구멍의 마무리가 쉽고, 정밀한 구멍 가공이 가능하다. 동시에 가공속도가 빨라 질 수 있다.

2) 엔드 밀: 그림 5-9에 고속도 강에 TiN을 코팅한

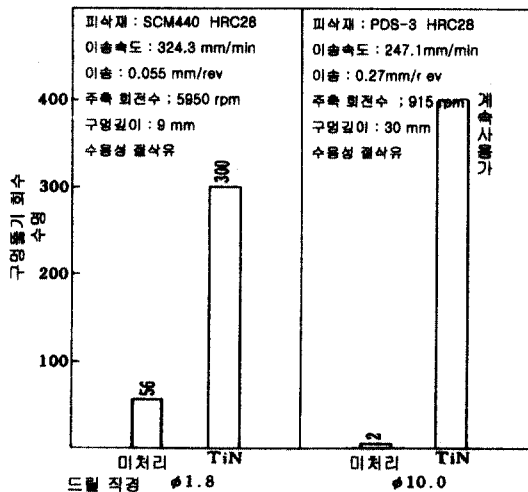


그림 5-8. TiN 코팅한 드릴의 절삭 시험 평가.

칼날이 두 개인 엔드 밀의 칼날, 정상 및 경계마모와 절삭 길이의 관계를 실어 놓았다. 그림에서 처리하지 않은 것은 절삭 길이가 2m가 가능하지만, TiN을 코팅한 것은 모든 조건에서 0.4 mm 이내에서 8 m 까지도 사용할 수 있으므로, 수명이 4배 정도 연장되고 있음을 알 수 있다.

3) hob: 그림 5-10에는 TiN을 코팅한 hob의 신뢰성 평가에 관한 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는대로 처리하지 않은 공구는 절삭 5m에서 최대 2번 마모

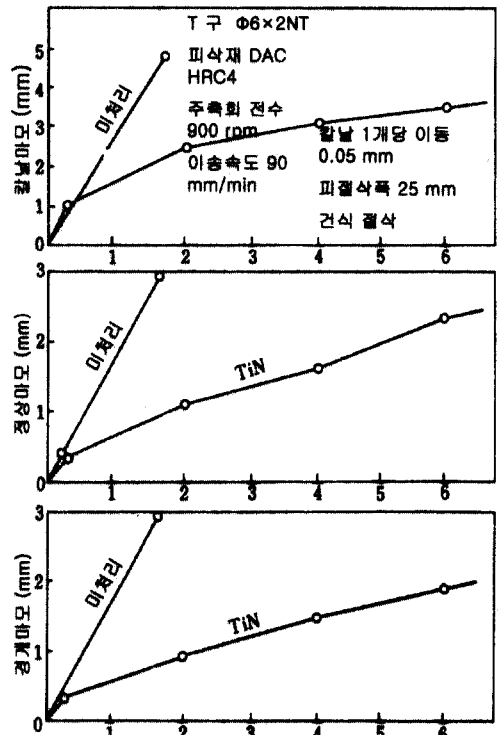


그림 5-9. 2개 칼날을 가진 엔드 밀의 마모시험 결과.

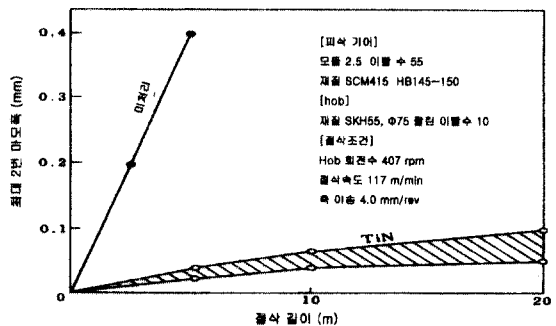


그림 5-10. TiN 코팅한 hob의 절삭 시험 결과



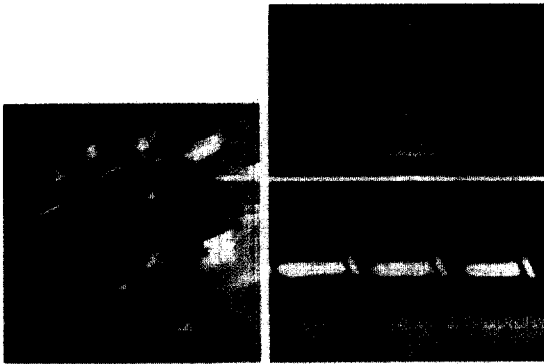


사진 5-5. 플라스틱 금형과 인젝션 스크류의 예.

폭이 0.4 mm가 되어 사용할 수 없게 되는데 비해, TiN을 코팅한 공구에서는 절삭 20 m에서도 2번 마모폭이 0.1 mm로서 아주 양호한 내마모 특성을 보여 주고 있다.

표 5-9는 각종 공구에 적용했을 때, 내구 수명을 비교한 결과이다. 코팅처리하지 않은 공구에 비해 약 3배 이상의 수명이 연장되고 있음을 확인할 수 있다. 또 플라스틱성형용 금형에는 내마모성과 동시에 내식성이 크게 요구되고 있는데 TiN을 코팅한 금형에서는 내식성도 5-6배 향상되고, 내마모성도 수배의 수명이 연장되고 있다.

금형의 수명을 연장시키기 위한 표면경화법에는 여러 가지가 있지만 이 멀티 아크식 이온 플레이팅법은 이주 저온인 200°C에서 처리할 수 있기 때문에 모재의 변형과 경도 저하가 거의 없고, 특히 치수 정밀도가 요구되

표 5-9. 각종 공구에 표면 코팅한 경우의 내구 수명(예)

용용 공구	코팅 종류	내구 수명 (개수)	
		처리하지 않은 공구	코팅한 공구
밀링 카터	TiN	325	1,200
브로치	TiN	100,000	300,000
펑	TiN	3,000	9,000
드릴	TiN	1,000	4,000
로링 다이	TiN	500,000	2,000,000
피어싱 펀치	TiC/TiN	25,000	175,000
트리밍 다이	TiC/TiN	10,000	40,000

는 금형에 적용될 수 있다. 따라서 플라스틱 사출성형 정밀 금형에 널리 이용되고 있다. 캐비티나 몰드 부품에 코팅할 수 있기 때문에 가동 부분의 마모나 고온 가스에 의한 캐비티의 부식이 방지되어 보수 유지 관리가 쉬어지는 잇점도 있다.

사진 5-5는 몇 가지 적용된 실 예이다. (a)는 40%의 광물질을 충전시킨 66 나일론 자동차부품을 성형하는 몰드이다. 코팅하기 전에는 침식성 금속 피로와 프러싱이 문제가 되었으나, TiN을 코팅한 후에는 금형의 수명이 200만 사이클까지 늘어 약 4배 수명이 연장되었다. (b)는 전기 배선 콘지트의 다이 스파이더이며, 종래에는 염산 가스에 의한 부식을 방지하기 위해 Cr 도금을 시행하였으나, 이를 TiN 코팅으로 바꿈으로서 2-4배의 수명 연장이 가능했다. (c)는 첨가물을 첨가한 66 나일론을 성형하기 위해 재료를 충전시킬 때 사용하는 인젝션 스크류로서, 마멸마모가 문제점이었으나, TiN 코팅으로

표 5-10. 이온플레이팅의 응용 분야

응용 분야	피막 종류	기관과의 조합 예	목적 용도
내식	Al, Zn, Cd	Zn, Al/고장력 강 Al/연강, 볼트 류	항공기, 선박 일반구조용 재료
내열	Al, W, Ti, Ta	Al/강, 스테인리스강	배기 가스관, 내화재료, 자동차, 항공기 엔진
장식	Au, Ag TiC 이온질화 Al 유리	Au/스테인리스강, 황동 TiC/스테인리스강 질화물/스테인리스강, Al/황동, 연강 유리/플라스틱	장신구, 시계 등 장신구, 시계 등의 표면경화 장신구, 시계 등의 표면경화 착색 코팅 유리 코팅 플라스틱
표면경화	Cr, CrN, CrC 이온질화  TiN, TaN 이온 침탄 TiC	Cr/형강, 연강 질화물/스테인리스강, 베어링강, 형강, FC재 TiN/스테인리스강 침탄/강재 TiC/강재, WC	금형, 기계 부품 금형, 기계 부품, 자동차 부품 기계 부품 시계 케이스, 착색부품 기계 부품 초정공구

표 5-10. Continued

응용 분야	피막 종류	기판과의 조합 예	목적 용도
플라스틱	Ni, Cu, Cr	ABS 수지	자동차 부품, 전기부품, 장식품
전자공업	Au, Al, Cu, Ni W, Pt Cu Ni-Cr SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe, Co, Ni Be Pt Au, Ag Nb 산화물, Ag	Au, AlNi/Si 웨이퍼 W/동합금 Cu/세라믹, 수지 Ni-Cr/세라믹판 SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /금속 Fe, Co, Ni/플라스틱 테일 Be 셸프 스타팅 호일 Pt/Si 웨이퍼 Au, Ag/코발 산화물, Ag/석영	전극재, 전도막 접점재료 프린트판, 박막 IC기판 저항체 컨덴서, 다이오드 자기테일 음향용 진동판 비임 리드 리드 프레임 세라믹/금속 접합
광학	SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> 등 유리	산화물/유리 유리/투명플라스틱	렌즈 등 무반사 내마모코팅 안경용 렌즈
원자력	Al Mo, Nb Au	Al/우라늄 Mo, Nb/Zr-Al합금, 인코넬, 해스탈로이 Au/Cu 셸	원자로 핵융합 실험장치 가속기, 핵융합 실험장치

스크류의 보수 경비가 1/2로 축소 되었다.

기타 일반 가정용품, 광학용 정밀 금형, 인쇄용 부품, 가이드 롤, 아연 다이캐스트 금형, 알루미늄 다이캐스트 금형 등 여러 정밀 금형에 응용되어 효과를 보고 있다. 또 최근에는 장식용품에 응용되고 있다. 황금색이 나는 TiN계 피막이 적용되어 내스크래치성과 밀착성이 금 도금보다 우수한 것으로 판명되어 시계 외장부품, 시계 줄, 양식기, 안경테, 액세서리 등에 광범위하게 실용화되고 있다. 표 5-10에는 이온 플레이팅의 응용 분야의 예를 실어 놓았다.

#### 5-4. 앞으로의 동향

PVD 열처리 기술은 아직도 해결되지 못한 기술적인 문제점이 많다. 예를 들면 저온 처리에서도 좀 더 밀착성을 향상시키는 방법이나, 복잡한 형상에도 고른 표면 처리가 가능하면서 생산성을 높이는 등이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 기술이나 새로운 방법이 강구되어야 할 것으로 생각된다. 이온 주입법이나 플라즈마 VCD 등의 도입이나, 이러한 여러 기술을 복합화하는 방법으로, 지금까지 해결하지 못했던 것을 해결할

수 있는 처리법이 개발될 수 있기 때문이다. 따라서 PVD나 CVD같은 증착법은 표면열처리 기술에서는 없어질 수 없는 유력한 수단이 되고 있다고 생각된다.

#### 참고문헌

1. Multi-arc사: 技術資料
2. Bebnex사: 技術資料
3. 大石政治: 特殊鋼, 32(1983)37.
4. 川下安司: 金屬表面技術, 35(1984)10.
5. 神港精機(株): 技術資料
6. 助川政之: プレスク?ル1. 6(1984)53.
7. 不二越熱處理研究グループ: “知りたい熱處理” p. 248.
8. 河野通廣, 池永勝, 市村博司: 日本電子材料協會會報, 18(1986)122.
9. 河野通廣, 池永勝, 田晴俊: 實務表面技術, 33(1986)1.
10. 日本コーティングセンター(株): 技術資料
11. 河野通廣, : 金屬プレス, 17(1985)22.
12. 市村博, 河野通廣, 池永勝: 工業材料, 35(1987)195.
13. 池永勝, 河野通廣: 機械と工具, 7(1987)104.
14. 殿亞通機(株): 技術資料
15. LSRH社: 技術資料

## 〈기술감좌〉

### 6. 레이저 열처리

Maiman에 의해 루비 레이저가 1960년대에 만들어진 이후 레이저의 특징을 살려 여러 곳에 활용되고 있다. 광통신, 측정, 가공 등 그 응용범위는 날로 확대되고 있는 실정이다.

초기에는 레이저의 출력이 낮고, 장치가 불안정하였기 때문에 실용적이지 못했으나 70년 이후 고출력의 YAG, CO<sub>2</sub> 레이저 등이 출현하여 용접이나 절단 등에 실용화가 진행되었다. 77년에는 미국의 GM사가 자동차 스티어링 기어 하우징의 내면 켄칭에 1 kW의 CO 레이저를 응용하였다는 발표 이후 레이저 가공은 세계적인 주목을 받기 시작하였다. 이 장에서는 레이저 가공의 원리와 특징을 알아보고, 실제로 레이저가 이용되는 표면처리법을 중심으로 소개하기로 한다.

#### 6-1. 레이저 가공의 원리와 특징

레이저의 특징 중 가장 중요한 것은 정합성(coherent)이다. 즉 유도 방출된 레이저 빔은 그 파장과 위상이 일정한 평행한 전자파(電磁波)이며, 간섭성이 대단히 우수하다. 따라서 적당한 광학계를 이용하여 집속하면 아주 작은 크기의 빔으로 줄일 수 있다. 따라서 에너지 밀도가 큰 열원으로 이용할 수가 있다. 이와 같은 특징을 살려 절단, 구멍뚫기, scribing, trimming과 같은 제거 가공이나 용접과 같은 접합가공, 표면처리 등에 광범위하게 이용할 수가 있다.

레이저빔이 조사된 물체의 표면은 그 에너지 일부를 흡수하여 온도가 상승한다. 지금 출력밀도가 (1)식으로 주어진 레이저빔이 빔의 직경 d보다 훨씬 큰 표면적을 가진 물체에 조사되는 경우를 생각하자.

$$\text{레이저 비입}(r) = \text{레이저 비입} \exp[-r^2/b(d/2)^2] \quad (1)$$

여기서 d : 빔의 직경(cm), r : 빔 중심으로 부터의 거리(cm), 레이저 비입 : 빔 중에서의 출력밀도(W/cm<sup>2</sup>)이다. 레이저 빔을 조사한 후 시간 t(sec)이 경과했을 때의 빔 중심에서의 표면 온도  $\theta(t)$ 는 (2)식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_0(t) = (A \text{ 레이저 비입} / 2K\pi) \tan^{-1} [16\alpha t^2 / d^2]^{1/2} \quad (2)$$

여기서 A : 레이저 흡수율, K : 열전도율(W/cm<sup>2</sup>K),  $\alpha$

: 온도 확산율(cm<sup>2</sup>/sec)이다.

출력밀도가 큰 레이저빔을 조사하면 표면온도( $\theta_0$ )는 급속하게 상승한다. 그에 따라 흡수율도 상승하는 까닭에 용해와 증발이 일어난다. 조사가 계속되면 증발된 증기가 과열되어 결국은 플라즈마로 변한다. 그러나 출력밀도가 작으면 흡수되는 출력밀도와 발열되는 열밀도가 평형이 되는 온도까지만 가열된다.

레이저 비입을 이용한 표면 켄칭에서는 처리해야 할 표면만을 높은 에너지밀도의 레이저 비입을 짧은 시간에 조사함으로써 A<sub>1</sub> 변태점 이상의 온도로 가열하고, 마르텐사이트로의 냉각은 가열된 부분에서 내부로 열의 확산에 의해 일어나는 자기냉각으로 이루어진다. 그러므로 레이저 비입을 이용한 표면경화법은 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 아주 얇은 표면만을 가열, 냉각하기 때문에 전체 입열량이 적은 관계로 열에 의한 처리물의 변형이 거의 발생하지 않는다.
- 2) 파이프 내면이나 복잡한 형상을 가진 부품의 일부 분에도 켄칭 경화시킬 수가 있다.
- 3) 대기 중에서 처리가 이루어질 수 있으므로 큰 부품에도 적용할 수 있다.
- 4) 레이저 비입 조사 후, 물이나 기름 같은 냉각수단을 사용할 필요가 없으므로 공해의 발생이 없다.
- 5) 경화 깊이나 경화 면적 등을 정밀하게 조절할 수 있다.
- 6) 처리 시간이 짧아도 되므로 온라인 처리가 가능하다.
- 7) 재료가 A<sub>1</sub> 변태점 이상의 온도에서 유지되는 시간이 매우 짧으므로 탄소의 확산이 쉬운 소재나 Ni과 같은 합금원소가 포함되어 있어 A<sub>1</sub> 온도가 낮은 소재가 아니면 적용하기 어려운 결점도 있다.

8) 표면이 잘 연마된 소재는 레이저 비입을 잘 반사시키므로, 흑연을 발라서 반사방지처리를 할 필요도 있다.

레이저 비입의 출력밀도와 처리시간을 조절하므로써 그림 6-1과 같은 여러 가지 가공이 가능하게 된다. 그림 6-2는 탄산가스 레이저의 외관구조의 예이고, 그림 6-3은 레이저빔의 진동 조사방법과 경화 양식의 예를 나타낸 것으로, 레이저빔의 이동방향과 직각방향으로 소재를 이동시키면서 처리한다.

#### 6-2. 표면처리

레이저 비입에 의한 표면개질, 즉 표면처리의 종류를

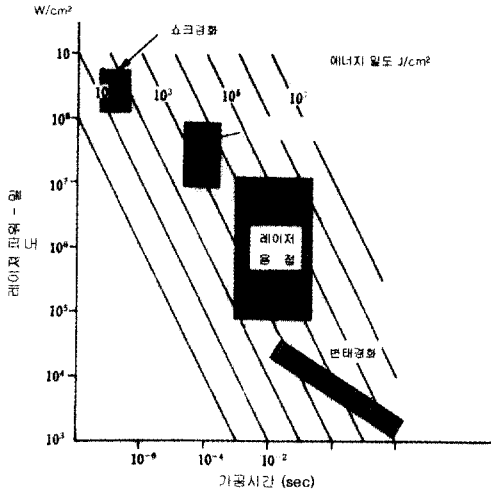


그림 6-1. 레이저 가공에 이용되는 출력 밀도와 가공시간.

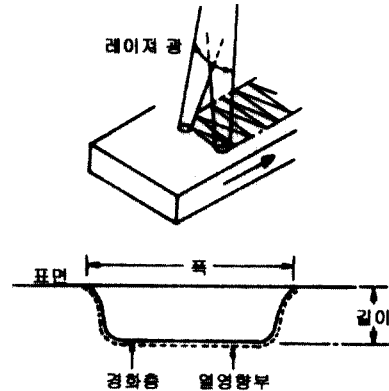


그림 6-3. 레이저 빔의 진동 주사 방법과 경화 패턴.

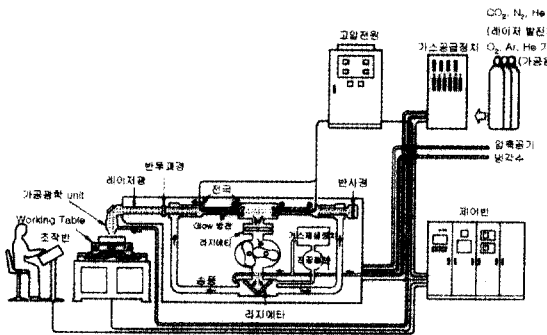


그림 6-2. 탄산가스 레이저의 외관 구조.

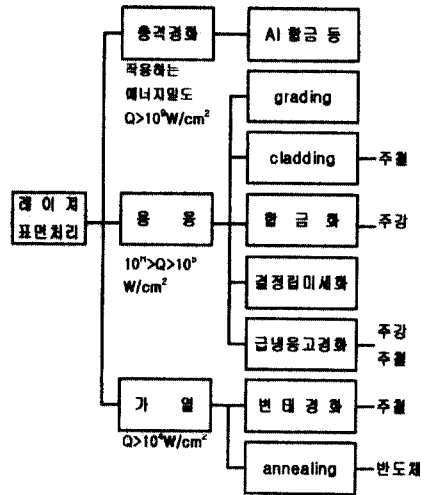


그림 6-4. 레이저에 의한 표면처리의 종류.

그림 6-4에 정리하여 놓았다.

6-2-1. 변태경화

레이저 비임에 의한 퀘칭경화는 레이저 퀘칭이라고 부르며, 이에 사용되는 레이저 비임은 발전효율이 높고, 고출력의 연속 빔이 발생되는 CO<sub>2</sub> 레이저가 적합하다. 빔의 크기(직경)와 주사의 속도를 조절하므로써 표면의 온도와 경화층의 깊이를 제어할 수 있다. 주사속도가 크게 되면 가열층의 깊이가 작아지게 되고, 빔이 이동하고 난 뒤 열전달에 의한 냉각이 쉬워지므로, 변형이 거의 없는 표면경화층이 얻어진다. 동시에 국부적으로 급열과 급냉이 일어나므로 경화층에는 아주 큰 압축잔류응력이 남게 되고 이 응력은 부품의 내마모성 증대에 큰 효과를 발휘하게 된다. 따라서 레이저 비임을 이용한 표면처리는 아주 얇으면서 복잡한 형상의 부품을 가

진 부품의 일부에만 적용하는 퀘칭에 적합하다고 생각되며, 실린더의 내면, 기어 하우징 내면, 밸브 가이드 내면, 피스톤 링 홈의 측면 등에 잘 적용될 수 있다.

표 6-1에는 CO<sub>2</sub> 레이저에 의한 퀘칭조건과 그 결과의 예를 실어 놓았다.

레이저 비임은 반사경으로 집광하므로써 10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있고, 이 빔을 금속 표면에 짧은 시간에 조사하면, 재료의 표면만 급속하게 가열된다. 이 때 가열의 속도가 매우 빠르기 때문에 레이저 비임 조사 부분 외에는 가열되지 않으며, 표면과 내부와의 온도차에 의한 온도 기울기가 형성된다. 열전도 현상으로 가열부가 급냉되는 조건이 되면 가열된 표면은 자기퀘칭이 된다. 짧은 시간의 조사 조건은

표 6-1. 1 kW CO<sub>2</sub> 레이저 빔에 켈칭 예

재료	주사속도 (mm/s)	켈칭 폭 (mm)	켈칭 깊이 (mm)	경도 (HRC)
회주철	25	3.8	0.5	60
가단주철	51	2.0	0.3	57
탄소강	25	1.5	0.25	61
합금강	19	2.5	0.4	58
공구강	38	1.9	0.3	60

표 6-2. 켈칭속도에 미치는 주사속도의 영향

강종		레이저 빔의 주사속도 (m/min)			
		0.6	0.8	1.0	1.2
S45C	경화 깊이 (mm)	0.99	0.77	0.56	0.36
	경화 폭 (mm)	6.08	5.10	4.35	3.10
	켈칭속도 (mm/s)	60.8	68.0	72.5	62.0
SCM 435	경화 깊이 (mm)	1.04	0.78	0.51	0.47
	경화 폭 (mm)	6.10	5.03	4.40	3.45
	켈칭속도 (mm/s)	61.0	67.1	73.3	69.0

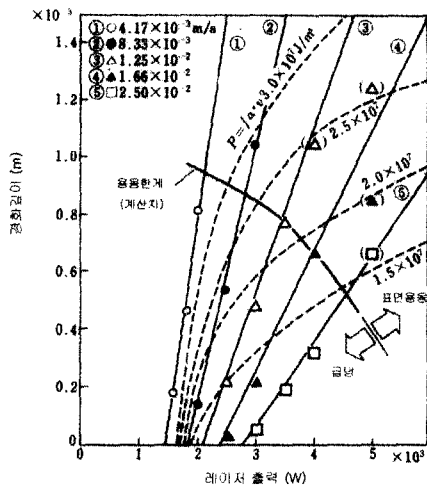


그림 6-5. 경화깊이 계산 결과와 실험결과 비교.

레이저 비임을 이동시키거나 펄스 형태의 레이저 비임을 조사함으로써 바꿀 수가 있다.

고체 금속 표면에 CO<sub>2</sub> 레이저 비임의 흡수율은 대단히 작은 까닭에 열처리 효율을 높일 수 있기 위해서는 인산망간이나 카본블랙 등으로 피막처리를 한다.

레이저 비임 표면경화에서 경화깊이를 결정하는 인자는 레이저 비임의 이동속도 v와 레이저의 출력 P, 조사 빔의 직경 a, 피가공물의 열정수 등이다. 이들 인자와 조사되는 빔의 강도 분포를 알면 열계산에 의해 경화깊이를 추정할 수 있다.

반사경으로 집광된 CO<sub>2</sub> 레이저 비임을 강제(S45C) 표면에 조사할 때의 온도 분포를 수치계산으로 구한 후, 최고 온도가 Ac 변태온도 이상이 되는 영역을 추정하였다. 경화층은 이들 영역과 일치할 것이므로, 이 추정치와 실험치를 비교한 것이 그림 6-5이다. 표면 용해가 일어나지 않는 영역에서는 계산결과와 실험결과가 잘 일치하고 있으며, 경화깊이는 거의 레이저 비임의 출력에 비례하여 깊어지고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부

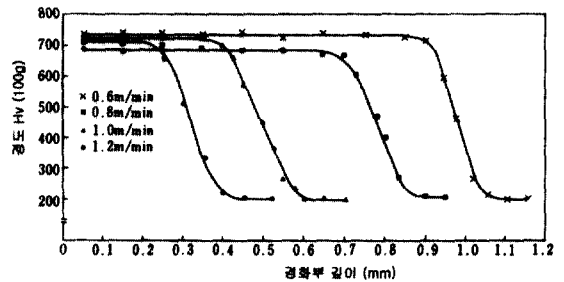


그림 6-6. S45C의 단면 경도에 미치는 주사 속도의 영향.

터 표면의 용해가 일어나지 않고 경화층의 깊이를 될수록 깊게 하기 위해서는 낮은 출력과 낮은 이동속도가 바람직하다는 결론을 얻을 수 있다. 반면 이 방법의 가장 큰 특징인 낮은 변형이나 뒤틀림을 실현시키기 위해서는 입열량을 아주 낮게, 즉 P/av가 작은 조건을 선택할 필요가 있다. 그림 6-5에서 쇠선으로 나타낸 등입열선으로부터 알 수 있는 대로 조사 빔 직경 a가 일정한 조건에서 낮은 입열량으로 경화층을 확보하기 위해서는 큰 출력과 빠른 이동속도가 적합하다.

표 6-2에는 이러한 조건에서 구한 경화층의 깊이와 폭을 정리하였다. 레이저 비임의 주사속도를 빠르게 하면 이에 따라 경화부의 깊이와 폭은 같이 감소한다. 그러나 켈칭속도, 즉 단위시간에 경화되는 부분의 면적은 1.0 m/min로 주사시킨 경우가 가장 큰 것을 보여주고 있으나, 주사속도의 영향은 그다지 크지 않은 것 같다.

그림 6-6에는 여러 주사속도에서 레이저 켈칭된 S45C 강재의 단면에서 경도 분포를 나타낸 것이다. 그림 6-7은 고주파 경화용 주철재를 고주파 경화와 레이저 비임 켈칭을 각각 실시하여 그 결과를 비교한 것이다. 경도값을 비교하면 고주파 쪽의 경화 깊이가 더 크며, 동시에 불안전 켈칭부도 크다. 그러나 레이저 비임

렌칭은 경도값 자체가 Hv로서 약 50 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 냉각속도가 레이저 비임 쪽이 더 크다는 것을 의미한다.

그림 6-8은 1.2kW CO<sub>2</sub>(Photon source 제품) 레이저 비임을 이용하여 몇 가지 강재를 표면경화 하였을 때, 빔의 이동속도와 경화깊이의와의 관계를 정리한 예이다.

두께가 얇은 주철계 기어는 측면의 링 부분을 경화할 필요가 있다. 지금까지의 경화법에서는 변형이 크게 일어나서 쓸 수가 없을 정도였으나, 그림 6-9에 나타낸 것처럼 필요한 부분인 폭 16.5mm가 되도록 빔의 직경을 만들어, 기어를 한 바퀴 돌리면 간단하게 경화층을 얻을 수가 있다. 10 kW CO<sub>2</sub> 레이저 비임을 이용하여 경화시간 10초로서도 경도값 Rc 60의 경화 깊이 0.5mm이나 부품의 변형은 0.035mm이하로 낮게 된다. 그러나 레이저 비임의 조사 시작한 부위와 끝나는 부위가 겹치게 되어 이 부분의 경도는 RC 50 이하로 낮아진다. 두께 2.5mm의 기어 양쪽 면에 이와 같은 방법으로 경화층을 얻을 경우, 처음 경화시킨 표면의 경도는 반대 측면의 레이저 비임 가열에 의한 경화처리에 의해 경도가 변하는 결과는 나타나지 않는다. 이처럼 다른 방법으로는 도저히 경화층을 얻을 수 없는 좁은 부분의 경화도 레이저 비임을 이용하면 가능하게 된다.

6-2-2. 합금화

이 방법은 레이저 비임의 가열로 표면에 얇은 용융층을 만들고, 필요한 합금 원소를 첨가하여 순간적으로 확산시켜, 표면에 합금층을 형성시키는 처리이다. 합금층의 깊이는 용해되는 깊이에 의해 결정되며, 레이저 비임의 출력과 비임의 주사속도에 의해 제어될 수 있다. 이 처리의 특징은 저급품 강재를 이용하여 필요한 최소한의 부분만을 선택적으로 합금화시킴으로써, 내마모성이나 내열성, 내식성 등 우수한 표면층을 얻을 수 있기 때문에 가격을 크게 낮출 수 있는 장점을 가질 수 있다.

그림 6-10은 AISI 4815 강의 합금화처리한 결과로서 레이저 비임출력과 합금화층의 깊이와의 관계를 나타낸 것으로서, 거의 직선관계가 있음을 알 수 있다. 또 그림 6-11은 출력 10 kW의 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 주사속도 25 km/min로 AISI 4815 강의 표면에 Cr 분말을 합금화한 경우에 경도값의 분포를 나타낸 것이다. 깊이 1.3mm까지 경도값 Rc 55의 합금화층이 형성되어 있음을 알 수 있다. 낮은 가격의 모재를 이용하여 필요한 최소한도의 부분만 선택적으로 합금화함으로써

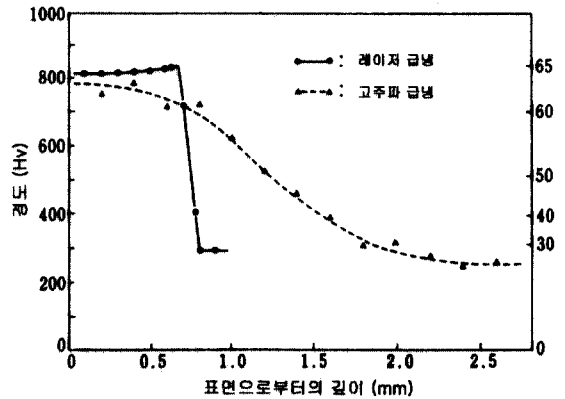


그림 6-7. 고주파 렌칭과 단면 경도의 비교.<sup>15)</sup>

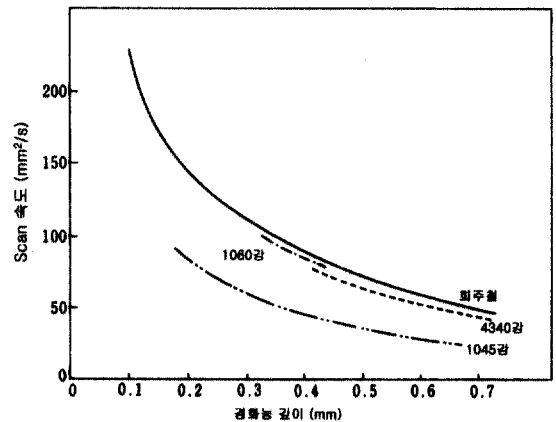


그림 6-8. 1.2 kW 채2 레이저에 의한 여러 재료의 표면 경도.

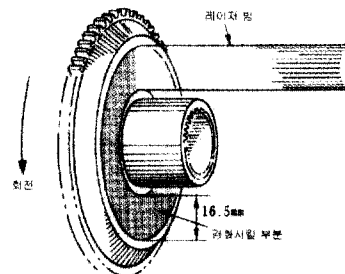


그림 6-9. 주철계 얇은 기어 측면의 레이저 경화.

내마모성, 내열성, 내식성이 우수한 표면을 얻을 수가 있으며, 원가절감에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

6-2-3. 크래딩

레이저의 출력밀도를 10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> W/cm<sup>2</sup>으로 집중시킨

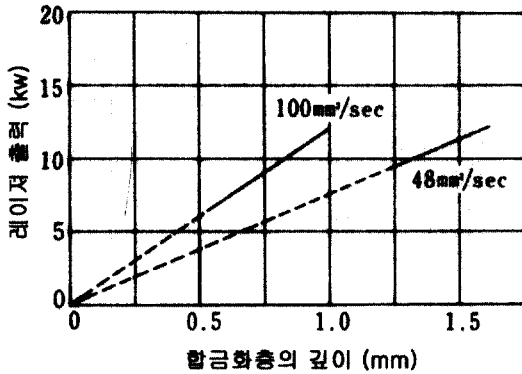


그림 6-10. 레이저 출력과 합금층 깊이와의 관계.

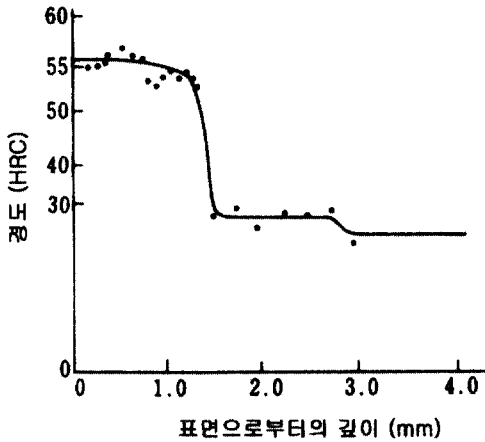


그림 6-11. AISI 4815강에 Cr을 합금화 시켰을 때, 표면 근방의 경도 분포.

레이저 비임을 빠르게 재료 표면에 주사하면 1-10 μm 정도의 아주 얇은 표면층만 용해되었다가 아주 빠르게 냉각되기 때문에 초미세조직, 또는 비정질 경화층이 형성되어 내마모성, 내식성 등 표면 특성이 우수한 재료를 제조할 수가 있다.

6-2-4. 표면용융경화

이 방법은 주철 또는 고탄소강의 표면을 레이저 비임으로 용해 될때까지 가열하여 내마모성을 부여하는 것으로, 특히 주철에 주로 이용된다. 주철의 표면을 용해시키면 편상 흑연이 오스테나이트 중에 다시 용해되고, 그 후 자기냉각에 의해 과포화되었던 탄소가 시멘타이트로서 석출되면서, 소위 레데부라이트 조직으로 바뀐다.

그림 6-12는 이 방법을 적용한 자동차 캠 샤프트의 예를 나타낸 것이다. 보통 캠 샤프트의 재료는 FC 25를 사용하며, 여기에 이 방법을 응용하면 표면경도 Hv 1000 정도의 표면 경화층을 얻을 수 있으므로 캠 샤프트의 내마모성이 크게 개선되는 것으로 확인되어 있다.

6-2-5. 충격경화

109 W/cm<sup>2</sup> 이상의 아주 높은 출력밀도의 레이저 비임을 조사하면 금속표면의 아주 얇은 층이 순간적으로 증발되는데, 이 증기의 급속한 팽창에 따라 발생하는 충격파의 작용으로 가공경화시키는 원리이다. 이 방법에 의하여 A<sub>1</sub> 합금의 강도나 피로특성이 개선되는 예와 스테인리스강의 표면을 경시킨 예가 보고되고 있다.

6-2-6. 침탄질화와 변태경화의 복합처리

최근 여러 가지 열처리 기술을 조합시켜 각 열처리의 장점을 기대하는 소위 복합열처리가 주목을 받고 있다. 복합열처리의 한 방법으로 변태경화와 가스 침탄질화를 조합시킨, 복합레이저열처리의 예를 소개한다.

그림 6-13은 SCM 435를 가스 침탄질화, 레이저 퀘칭, 가스 침탄질화 후 레이저 퀘칭을 시행한 시료의 단면 경도분포를 나타낸 그림이다. 이 결과에서 알 수 있는 대로 가스 침탄질화 후 레이저 퀘칭을 하면 레이저 퀘칭만을 한 경우보다 훨씬 표면경도가 높아지고, 경화 깊이도 깊어진다.

이것은 가스 침탄질화를 하므로써 내부에 탄소와 질소

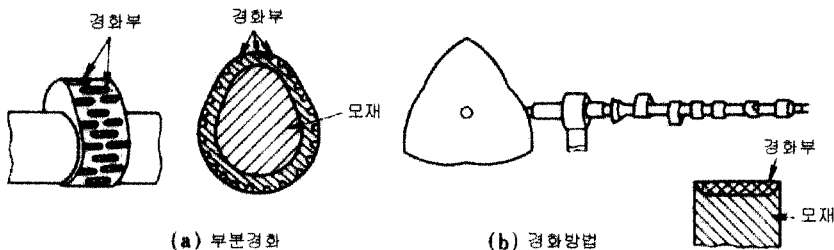


그림 6-12. 주철제 캠 샤프트에서의 표면 열처리법.

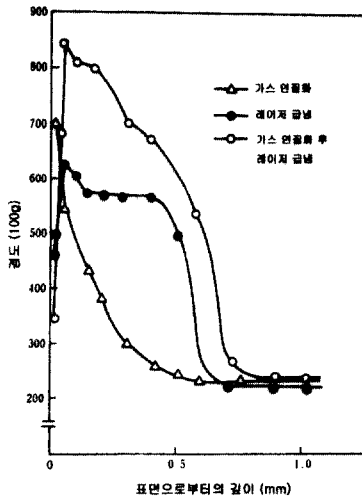


그림 6-13. SCM 435의 단면 경도.

가 확산 침투되어 있으며, 그 후 레이저 켄칭에 의해 변태된 마르텐사이트는 Fe-C-N계의 마르텐사이트로 되어 있기 때문으로 생각된다. 사진 6-1은 이 경우의 단면 조직사진으로, 아주 미세한 마르텐사이트가 형성되어 있으며 표면에는 15 μm 두께의 백색층이 나타나고 있다. 이 층에는 X선 회절결과, 오스테나이트(γ)와 γ(Fe<sub>4</sub>N) 및 ε(Fe<sub>3</sub>N)이 혼재하고 있는 것이 확인되었다.

그림 6-14는 미끄럼 마모시험 결과(접촉압력 20 kgf/cm<sup>2</sup>)를 나타낸 것으로, 레이저 켄칭에 의해 마모량이 감소되었지만, 복합열처리에 의한 것은 그 보다 더욱 마모량이 감소된 것을 알 수 있다.

그림 6-15에는 가스 침탄질화만 한 것과 가스 침탄질화 후 레이저 켄칭을 시행한 시료의 표면X선 회절결과를 보여주고 있다. 가스 침탄질화만을 한 시료에서는

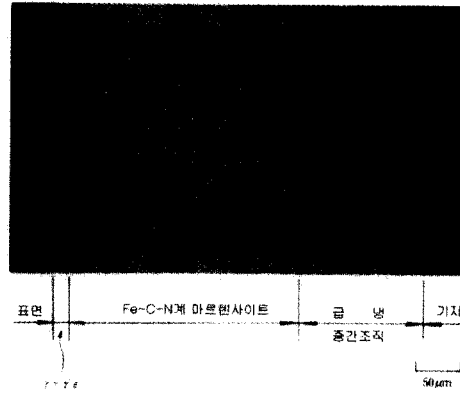


사진 6-1. 가스 연질화 후 레이저 급냉시킨 SCM 435의 단면 현미경 사진. (탄산가스, 1kW 밀티 모드, 이동속도 1.0 m/min)

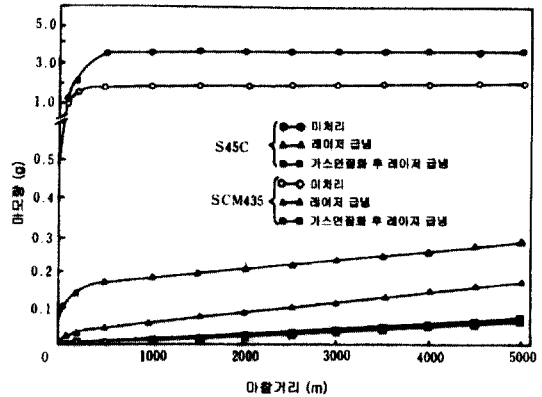


그림 6-14. 미끄럼 마모 시험 결과(마찰 속도 0.24 m/sec).

γ(Fe<sub>4</sub>N) 및 ε(Fe<sub>3</sub>N)이, 복합열처리한 시료에서는 이들 회절선의 강도가 저하한 대신에 페라이트(α)와 오스테나이트(γ) 상의 존재가 확인되고 있다.

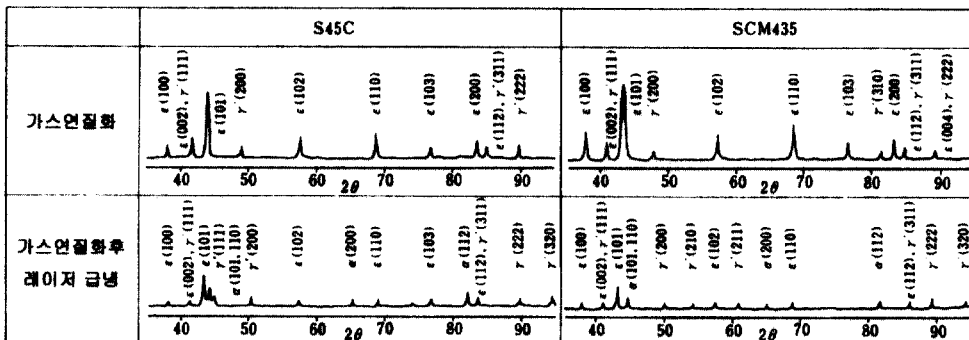


그림 6-15. 표면의 X선 회절 패턴.



### 6-3. 앞으로의 동향

이상 소개한 바와 같이 레이저를 이용한 표면처리에는 많은 장점을 가지고 있기 때문에 그 특성을 잘 이해하여 처리 대상을 잘 선정하면 아주 효과적인 열처리 기술임을 알 수 있다. 동시에 이미 알려진 기존의 열처리 기술과 조합시킴으로서 더욱 큰 효과를 발휘할 수도 있다고 판단된다. 그러므로 이런 종류의 복합열처리는 지금부터 새로운 표면경화 기술로 크게 발전될 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 레이저 가공의 역사가 비교적 짧고, 레이저 장치의 출력 안정성이 아직도 충분하지 못하며, 대형 레이저의 발생장치는 광학계 부품의 수명이 짧고, 레이저 가공장치의 가격이 비싼 점 등은 여전히 문제점으로 남아 있다. 레이저 기술과 레이저 장치의 발전에 따라

이를 활용하는 가공법이나 열처리 기술의 발전이 기대된다.

### 참고문헌

1. 小林 昭 : 機械の研究, 30(5)(1978)15.
2. 小林 昭 : 機械の研究, 30(11)(1978)93.
3. 高岡 隆 : 日本機械學會誌, 82(1979)723.
4. 難波 進 : 共立出版社, レーザと加工, 共立出版社(東京) p. 101.
5. 小林 昭 : 續レーザ加工, 開發社, p.135.
6. 小倉磐夫 : レーザ加工技術, 日刊工業新聞社, p.65.
7. 川燈博通 : 實務表面技術, 32(1985)21.
8. 重松孝, 中村英 : 機械技術, 31(1983)51.