

## 레이저빔에 의한 철강재의 Ti 표면합금화에 미치는 C함량의 영향

최준영·김도훈\*

연세대학교 공과대학 금속공학과

Effect of C-Content for Ti Surface-Alloying Treatment on Steel by CO<sub>2</sub> Laser Beam

June-Young Choi and To-Hoon Kim

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

**초 록** 레이저빔에 의한 철강재의 Ti 표면합금화에 미치는 C함량의 영향을 관찰하였다. 철강재상에 Ti 코팅 후 레이저빔 조사시 질소를 취입가스로 사용하면 부분적으로 TiN과 Fe<sub>2</sub>Ti가 형성된다. 저탄소강의 경우 Ti 함량의 증가에 따라 임계냉각 속도의 증가로 마르텐사이트화가 억제된다. 고탄소강의 경우 Ti의 함량이 1.5%정도 임에도 웨라이트 조직이 형성되지 않고 마르텐사이트 조직이 형성되어 경화된다. 그리고 고탄소강의 Ti 표면합금층 형성에 부분적인 TiC의 석출이 있어 더욱 경도를 증가시키는 것으로 생각된다.

**Abstract** When N<sub>2</sub> was used as shielding gas during the formation of Ti surface-alloyed layer by irradiation of CO<sub>2</sub> laser beam on steel, TiN and Fe<sub>2</sub>Ti were formed regardless of carbon-content in steel. When Ti content was increased in low carbon-content steel, formation of martensitic structure was suppressed due to increase of critical cooling rate for martensitic transformation. In case of high-carbon steel, even though Ti content was about 1.5% in alloyed layer, hardness was increased by formation of martensitic structure instead of ferrite. In addition to that structure, hardness was increased further by precipitation of TiC in Ti alloyed-layer of high carbon-steel.

### 1. 서 론

철강재상에 여러가지 성분의 합금원소 혹은 금속간화합물을 표면합금화시키는 경우 기지조직의 강인성을 유지하면서 표면층의 내마모성, 내식성 또는 내열성을 향상시킬 수 있어 신소재 개발의 방법을 제시하여 주고 있다. 특히 용융점이 높은 금속이나 금속간화합물의 경우에는 레이저빔에 의한 방법으로 가능하며, 레이저빔의 출력, 집속조건 및 주사속도의 적당한 선택으로 합금층의 용융과 응고조건을 조절할 수 있다. 철강재의 내마모성 향상을 위하여 텅스텐 혹은 금속간화합물의 표면합금화에 관한 연구는 많이 발표되었다.<sup>1~4)</sup>

TiN은 화학적으로 인정하고 적은 마찰계수를 가지며, 매우 높은 경도와 내식성을 가지고 있어, 정밀공구의 내마모성을 증가시키기 위하여 그 표면에 화학증착법(CVD) 혹은 물

리증착법(PVD)에 의하여 TiN 코팅층을 형성시킨다. 이러한 방법들을 이용하면 정밀한 코팅층을 형성시킬 수 있으나, CVD법에서는 처리온도가 높아 기지재료가 정밀한 코팅층을 형성시킬 수 있으나, CVD법에서는 처리온도가 높아 기지재료가 연화되고, PVD법에서는 처리온도는 낮으나 장시간이 소요된다. 그러나 레이저빔에 의한 표면합금화는 CVD 혹은 PVD 방법과 같이 정밀한 코팅층을 형성시키지 않으나, 기지조직에 열적인 영향을 주지 않고 처리시간이 짧은 장점이 있다. 따라서 정밀성이 요구되지 않는 일반적인 공구강이나 다이의 내마모성을 향상시키기 위하여 레이저빔에 의한 표면합금화 처리가 고려될 수 있다. 그러나 레이저빔에 의한 공구강의 TiN 표면합금층 형성 시에는 취입가스의 영향이 중요하며, 질소가스를 사용 시에는 경도가 크게 증가되나 알곤가스를 사용 시에는 오히려 경

도가 저하되었다.<sup>5)</sup> 이것은 TiN이 고온에서 쉽게 분해되므로, 불활성인 알곤가스 하에서 TiN이 분해하여 Ti 용융구역에 남고 N은 외기로 방출되기 때문으로 추정되었다.

만일 Fe에 Ti이 1.2% 이상인 경우에는 상 상태에서 오스테나이트 구역이 폐쇄되어 용융점에서 상온까지 체라이트 상으로 되므로 마르텐사이트 조직을 얻을 수 없다.<sup>6)</sup> 그러나 철강재에 존재하는 C는 오스테나이트 조장시키는 원소이며, Ti와 결합하여 TiC를 형성시키는 결합력이 크다. 그러므로 TiN이 분해하여도 Ti가 C와 결합되므로 Ti의 역할이 소멸되어 마르텐사이트 조직을 형성시키게 될 것이다.

본 연구실에서는 TiN 표면합금층 형성에 따른 철강재의 C함량에 관한 연구를 수행하였다.<sup>7)</sup> 이 결과에 의하면 취입가스로 질소를 사용하는 경우에는 TiN이 분해되어 금속 Ti로 형성되지 않고, 코팅된 고융점의 TiN이 분

쇄되어 표면합금층에 미립자 형태로 분산된 결과를 나타내었다. 이러한 경우에 표면합금층의 정도는 저하되지 않고 매우 증가된 현상을 보여 주었으며, 철강재의 C함량에 따른 기지조직의 Fe와 Ti 사이의 관계를 규명하기 힘들었다. 따라서 본 연구에서는 레이저빔에 의한 철강재의 표면합금화에서 Fe와 Ti의 상호작용과 철강재 내에서 Ti의 거동에 대한 C함량의 영향을 규명하기 위하여 수행하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 시편들은 탄소량이 각각 0.03%, 0.15%, 0.45% 및 0.78%인 철강재이다. 시편의 크기는 20mm×50mm로 절단하고 두께는 10mm가 되도록 연마시켰으며, 920°C의 진공노에서 한 시간 동안 유지시켜 조직을 균질화시켰다. 그 후 시편들을 연마 및 세척시켜, DC Magnetron 스퍼터링기를 이

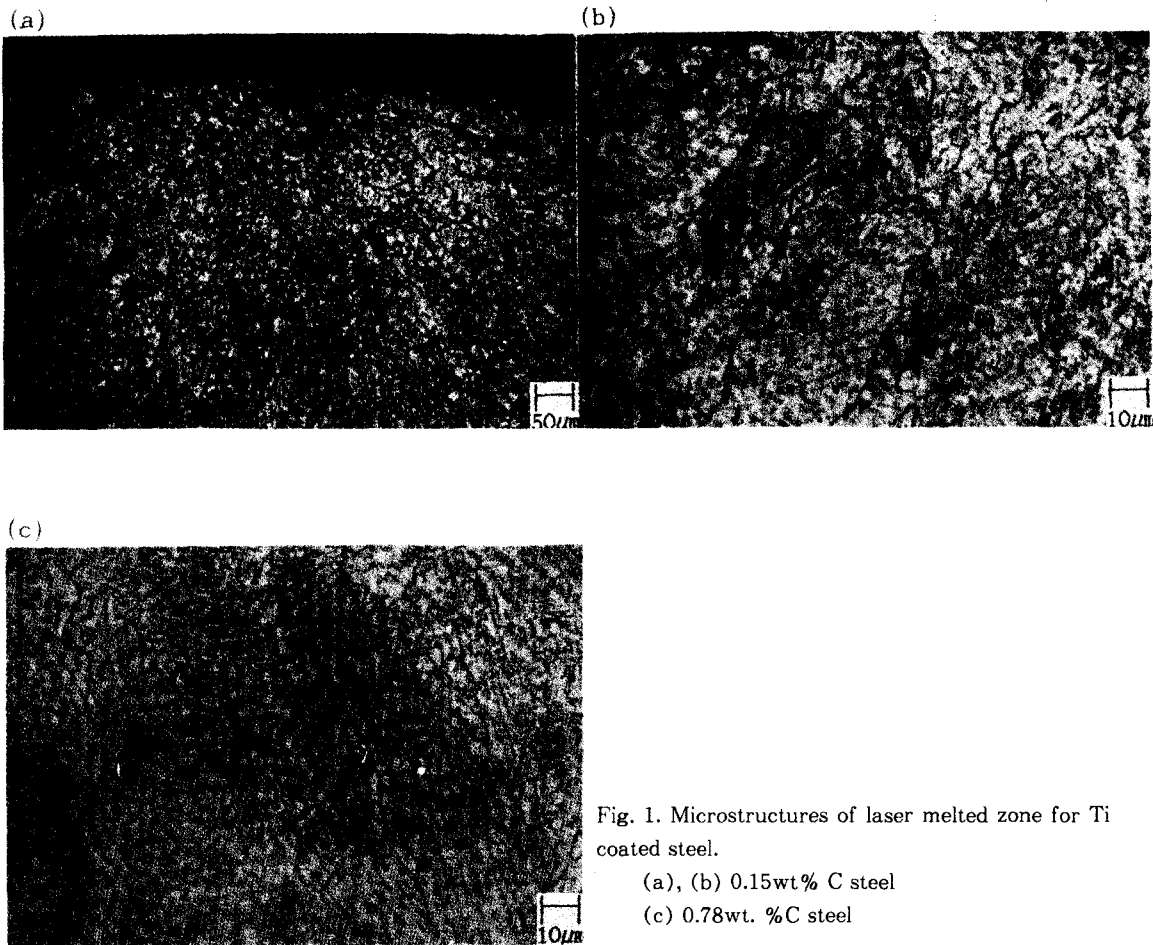


Fig. 1. Microstructures of laser melted zone for Ti coated steel.

- (a), (b) 0.15wt% C steel
- (c) 0.78wt.% C steel

용하여 6 $\mu$ m의 Ti 코팅층을 형성시켰다.

본 실험에서 사용한 CO<sub>2</sub> 레이저빔의 출력은 3.5kW이고, 계산된 빔 직경은 3.2mm이었으며 빔모드는 multi-mode이었다. 그리고 레이저빔의 조사시간은 주사속도의 변화에 따라 0.192~0.038sec로 변화되었다. 레이저빔의 주사속도는 1~5m/min이었으며, 취입가스는 질소를 사용하였다. 레이저빔이 조사된 시편은

광학 현미경으로 조직을 관찰하였으며, 미소경도기(하중 300g)를 이용하여 표면합금층의 경도를 측정하였다. 그리고 표면합금층의 성분과 조성을 알아보기 위하여 X-선 회절분석과 EPMA 분석을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

레이저빔이 조사된 Ti 표면합금층에서 용용

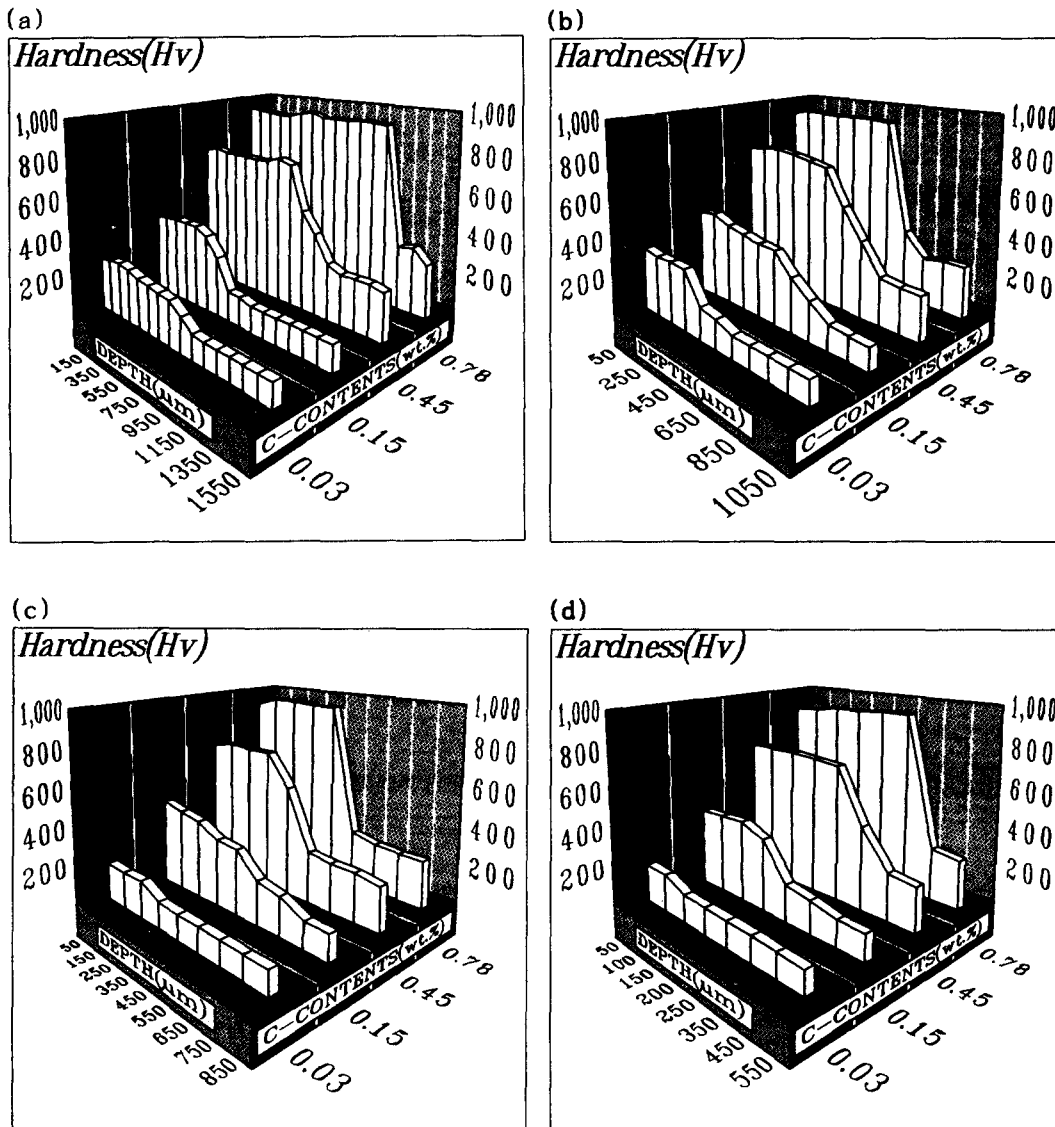


Fig. 2. The microhardness in Ti surface-alloyed layer as functions of the depth from surface and C-content for various laser scanning speed.

(a) 1m/min (b) 2m/min (c) 3m/min (d) 5m/min

부의 용고형태는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 C 함량에 따라 차이가 있어 저탄소의 0.03%C와 0.15%C의 경우에는 주로 세포상 조직인 반면에 고탄소의 0.45%C와 0.78%C의 경우에는 주로 수지상 조직을 나타내었다. 이러한 조직의 양상은 TiN 표면합금층의 경우와 매우 유사하였다.<sup>7)</sup> 이들 시편들에서 레이저빔의 주사속도에 따라 인입된 레이저 에너지밀도가 변하므로 용융부 및 열영향부의 깊이는 변하나, 주사속도에 따른 용고조직의 형상은 크게 변화하지 않고 C 함량에 따라 변한다. 그리고 주사속도에 관계없이 시편의 C 함량이 증가되면 레이저빔 조사구역에서 마르텐사이트 형성이 두드러지게 나타나고 있다.

Fig. 2는 레이저빔이 조사된 Ti 표면합금층의 탄소함량, 깊이에 따른 경도를 나타내는 3차원 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 주사속도에 관계없이 탄소함량이 적은 경우에는 경도가 크지 못하나 탄소함량이 증가됨에 따라 경도와 경화층의 깊이는 증가하고 있다. 일정한 주사속도에서 탄소함량의 증가에 따라 경화깊이가 증가된 것은 탄소함량의 증가에 따라 표면에서 인입된 레이저 에너지 밀도의 증가를 의미한다. 금속의 레이저빔 에너지 흡수능은 전기전도도의 감소에 따라 증가된다.<sup>8)</sup> 따라서 탄소함량이 증가됨에 따라 전기전도도의 감소를 초래하므로 일정한 주사속도 하에서는 레이저빔의 흡수가 증가되므로 상대적인 에너지밀도의 증가와 같기 때문이다. EPMA 분석에 의하면 레이저빔에 의하여 용융된 Ti 표면합금층에서 Ti의 농도는 비교적 균일하며 그 조성은 Table 1과 같다. 이것

Table 1. Ti element contents of laser melted zone for Ti coated steel.

scan speed(m/min)	1	2	3	4	5
Ti(wt.%)	0.342	0.678	0.830	1.217	1.434

은 레이저빔 주사속도의 증가에 따라 용융층의 깊이가 감소하므로 Ti의 농도는 증가하게 되는 것이며, 5m/min의 주사속도에서 약 1.4%로 분석되었다. Fig. 3은 Fe와 Ti의 상태로서 Fe의 Ti이 1.2% 이상인 경우에는 오스테나이트 구역이 완전히 폐쇄되고 페라이트 구역으로 되므로 마르텐사이트 조직이 형성되

지 못하여 경도는 높지 못하게 된다. 따라서 용융구역 내에서 약 1.4%로 측정된 Ti는 유리된 금속상태로 존재하는 경우에는 Fe-Ti 상태를 고려하여 볼 때 페라이트 구역에 있게 되므로 경도가 크게 증가되지 않아야 한다. 만일 용융층의 Ti가 금속간화합물로 존재하게 되면 오스테나이트 형성을 억제하는 금속 Ti의 영향이 소멸된다. 그러나 Fig. 1에서 보면 0.45%C의 경우 주사속도가 5m/min에서 용융층의 경도는 매우 높아 마르텐사이트 조직을 가지는 것으로 나타나고 있다. 따라서 X-선 회절분석에 의하여 Ti 표면합금층을 관찰하였으며, 이 결과에 의하면 저탄소강에서 상당량의 TiN과 Fe<sub>2</sub>Ti가 존재하였다. 이러한 현상은 일부 Ti가 Fe와 결합되었으며, 또한 취입가스로 사용한 질소와 Ti가 결합하여 형성된 것이다. 그리고 C가 많은 고탄소강에서는 TiC도 형성될 것으로 기대된다. 표면합금층에서 이러한 금속간화합물의 형성은 Ti의 상당부분을 소모시키게 되므로 표면합금층에서 금속 Ti의 양은 저하되어, Fe-Ti 상태도의 오스테나이트 구역을 통과시키는 결과를 초래하여

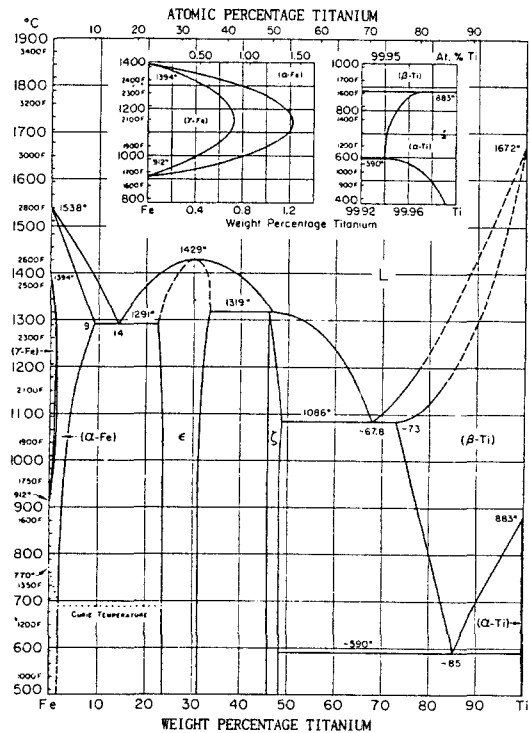


Fig. 3. Phase diagram of Fe-Ti.<sup>6)</sup>

마르텐사이트 조직이 형성된 것으로 생각된다.

탄소함량이 다른 철강재의 용융구역에서 Ti의 거동을 규명하기 위하여 Ti 코팅층과 TiN 코팅층을 형성시킨 시편상에 레이저빔을 조사시킨 후 경도를 측정하여 비교하였다. Fig. 4는 주사속도를 3m/min으로 하였을 경우의 경도 분포이다. 여기서 TiN 코팅된 시편의 두께는 11 $\mu$ m이었으므로 용융부에서 Ti의 함량은 1.2%이었으며,<sup>7)</sup> Ti 표면합금층의 경우는 표 1과 같이 약 0.8%이었다. 그림에서 보듯이 탄소함량이 많은 경우에는 기지금속은 물

론 Ti 혹은 TiN 표면합금층에서 마르텐사이트가 형성되었다. 특히 0.45% C 강의 경우에는 Ti를 첨가시킨 경우에 비하여 TiN을 첨가시킨 경우가 약간 높았으며, 이것은 TiN의 용융점이 3280 $^{\circ}$ C 정도로서 TiN이 완전히 용융되지 못하고 분쇄되어 용융층에 분포되므로 분산강화 효과가 추가된 것으로 생각된다. 0.78% C 강의 경우에는 경도의 차이가 거의 없으며, Ti 혹은 TiN 코팅시키지 않은 기지조직의 레이저 조사된 구역에 비하여 약 100Hv 정도 높다. 이것은 탄소함량이 증가함에 따라 Ti가

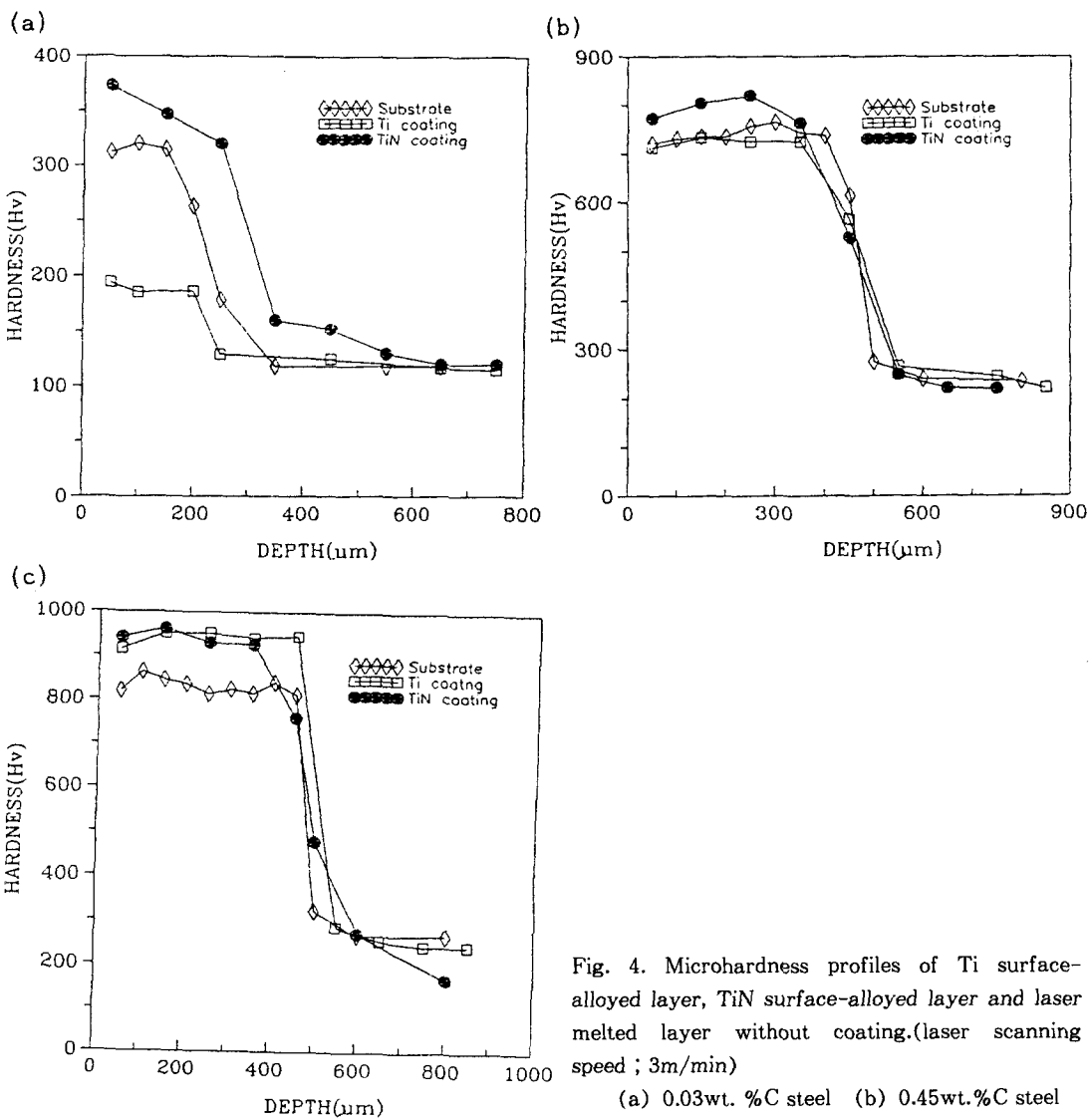


Fig. 4. Microhardness profiles of Ti surface-alloyed layer, TiN surface-alloyed layer and laser melted layer without coating.(laser scanning speed ; 3m/min)  
 (a) 0.03wt. %C steel (b) 0.45wt.%C steel  
 (c) 0.78wt.%C steel

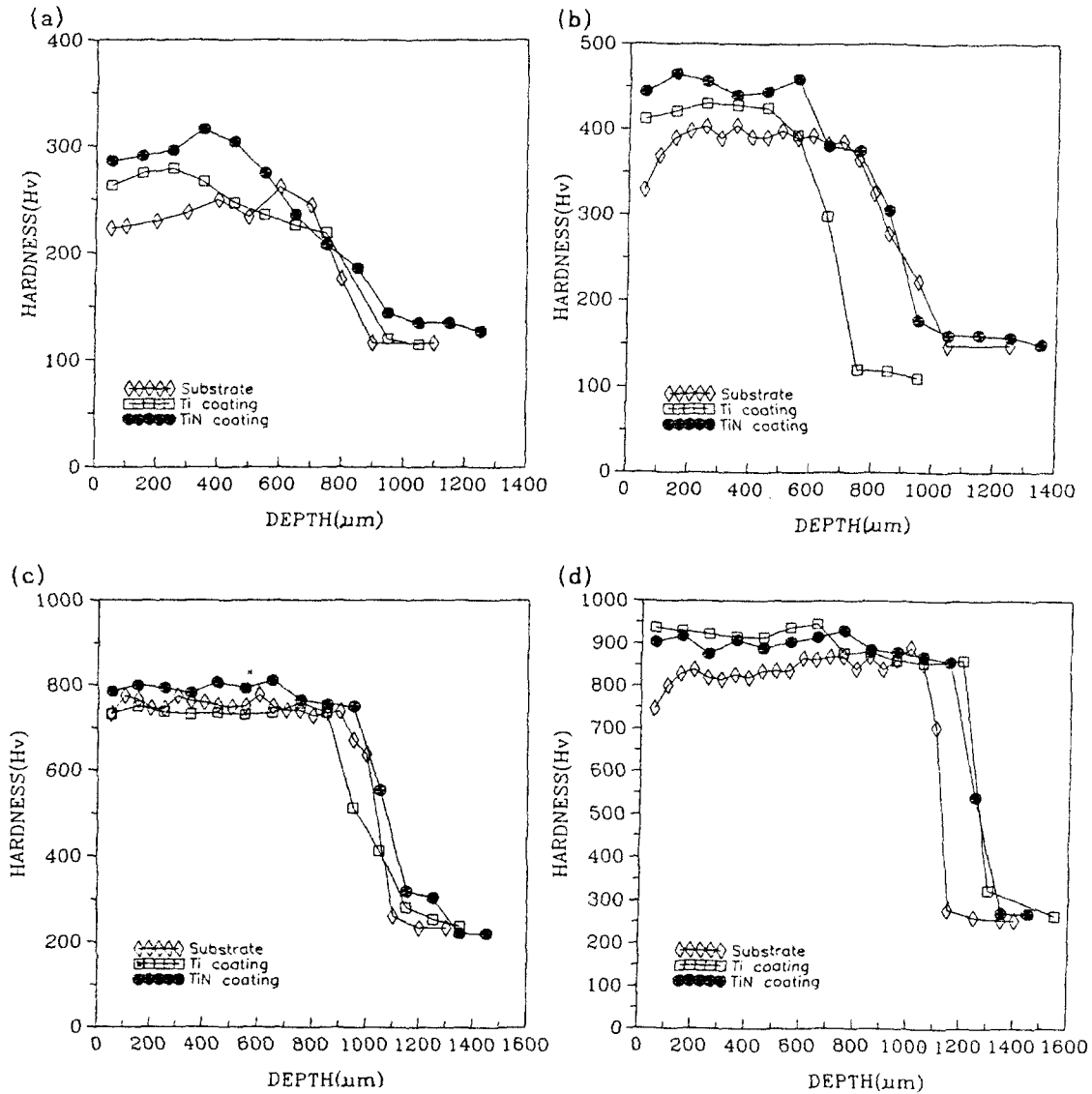


Fig. 5. Microhardness profiles of Ti surface-alloyed layer, TiN surface-alloyed layer and laser melted layer without coating.(laser scanning speed ; 1m/min).

(a) 0.03wt.%C steel    (b) 0.15wt.%C steel    (c) 0.45wt.%C steel    (d) 0.78wt.%C steel

C와 결합하여 TiC가 형성되므로 TiN을 첨가시킨 경우와 비슷하게 석출경화에 의한 기여가 첨가되기 때문으로 생각된다. 이러한 현상은 레이저 주사속도가 1m/min인 경우의 Fig. 5에서도 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 Fig. 4(a)에서 보듯이 C함량이 매우 작은 경우에는 용융층에서의 경도가 기지조직에 비하여 증가되기는 하였으나 (b), (c)와

같이 완전히 마르텐사이트 조직을 형성하였다고는 할 수 없다. 이러한 경도증가의 원인은 용융층에서 급냉에 의한 결정입의 미세화, Ti 원소들의 고용강화 및 TiN의 분산 강화등으로 기대된다. 여기에서 TiN을 첨가시킨 경우가 기지조직 및 Ti 첨가의 경우에 비하여 높은 것은 TiN의 분산강화에 기인한 것으로 생각된다. 0.03%C의 저탄소강에서 Ti 표면합

금층과 Ti의 첨가없이 레이저빔을 조사시킨 용융층의 경도를 비교하여 보면 주사속도가 1m/min인 경우 Ti 함량이 0.3%임에도 고용강화등의 효과로 인하여 경도는 Ti가 첨가되지 않은 경우보다 높다. 그러나 주사속도가 3m/min인 경우에는 Ti 표면합금층에서 Ti의 함량이 약 0.8%임에도 경도는 Ti를 첨가시키지 않은 경우에 비하여 낮다. 이러한 이유는 다음과 같이 설명할 수 있을 것으로 생각된다. 즉 일반적으로 저탄소강에서는 마르텐사이트 변태가 일어나지 않으나, 냉각속도가 매우 크면 부분적으로 마르텐사이트 변태가 일어난다.<sup>9)</sup> 따라서 철강재상에 레이저빔 조사 후의 냉각속도는 매우 크므로 0.03%C의 경우에도 적은 양의 마르텐사이트화가 있을 것이다. 그러나 Fig. 3에 의하면 Ti가 0.7% 이상인 경우에는 냉각시 오스테나이트와 웨라이트 공존 구역을 통과하게 되므로 Ti가 없는 경우보다 마르텐사이트화 시킬 오스테나이트의 양이 줄게 된다. 또한 철강재내에서 Ti의 증가는 Fig. 6에서 보듯이 철강재를 마르텐사이트화 시키는 임계냉각 속도를 크게 증가시키므로 철강재 내의 Ti가 존재하지 않은 경우에 비하여 마르텐사이트화를 힘들게 한다.<sup>10)</sup> 따라서 Fig. 4 (a)에서 보듯이 저탄소강에서 주사속도가 3m/min인 경우 Ti의 존재로 인하여 오히려 Ti가 없는 조직보다 경도가 저하된 것으로 생각된다. 반면에 주사속도가 1m/min인 경우에는 입열량이 많으므로 용융구역이

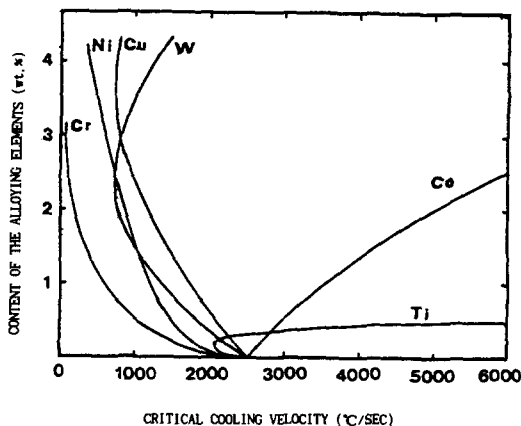


Fig. 6. Effects of various elements on critical cooling velocity of steel.

증가되어 Ti함량이 적으므로 Fig. 3에서 보듯이 오스테나이트 구역을 통과하며, 또한 Fig. 6에서 보듯이 임계냉각속도의 증가에 기여하지 못하므로 Ti이 없는 경우보다 경도가 높다.

#### 4. 결 론

철강재상에 Ti 코팅후 레이저빔의 조사에 의한 Ti 표면합금층 형성에 질소가스를 취입 가스로 사용하면 저탄소강의 경우 부분적으로 TiN과 Fe<sub>2</sub>Ti가 형성된다. 저탄소강의 경우 Ti 함량이 증가됨에 따라 임계냉각속도의 증가로 마르텐사이트화가 억제된다. 고탄소강의 경우 Ti 함량이 1.4% 정도 임에도 웨라이트 조직이 형성되지 않고 마르텐사이트 조직이 형성되어 경화된다. 그리고 고탄소강의 Ti 표면합금층 형성에서는 부분적인 TiC의 석출이 있어 더욱 경도가 증가된다.

#### 후 기

본 연구는 1991년도 문교부 학술연구조성비(신소재분야)의 지원을 받았음.

#### 참 고 문 헌

1. C. W. Draper and C. A. Ewing, *J. Mater. Sci.* **19**, 3815(1984).
2. 김도훈, 김영근, *대한금속학회지*, **23**권 11호. 1241(1985).
3. T. H. Kim and M. G. Suk, *Proceeding of LAMP '87 Osaka*, 413 (May, 1987).
4. T. H. Kim, M. G. Suk, B. S. Park, K. H. Suk, *Opto Electron Magaz.*, **4**, 518(1988).
5. T. H. Kim and B. G. Seong, *J. Mater. Sci.*, **25**, 3583(1991).
6. *Metal Handbook*, 8th Ed, Vol. **8**, ASM, Metal Park, OH., 307 (1973).
7. 김도훈, 최준영, *금속학회지에 투고중*.
8. 김도훈, "레이저가공학", 경문사, 서울 (1980).
9. G. Krauss, "Principles of Heat Treatment of Steel" ASM, Metal Park, OH.(1980).
10. 양훈영, 김수영, "금속재료학", **237**, 문운당, 서울(1984).