

플라즈마/레이저 복합용사에 의한 $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ 코팅층의 미세구조 및 기계적 특성

Microstructures and Mechanical Properties of $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ Coating Layer by Plasma/Laser Complex Spraying

김영식 · 오명석

Y. S. Kim and M. S. Oh

Key Words : Laser Irradiation(레이저 조사), Plasma Spraying(플라즈마 용사), $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ (이트리아 안정화 지르코니아), Microstructure(미세구조), Microhardness(미소경도)

Abstract : This study was aimed at observing the influence of laser irradiation on a $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ ceramic coating layer fabricated by plasma spraying. The $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ ceramic powder was plasma sprayed onto SS400 carbon steel substrate and laser irradiated on the coating layer under various conditions of laser power and beam diameters. As to the as-sprayed specimen and laser-treated specimen, a hardness test and a microstructure analysis were performed. Hardness was measured by a microhardness tester; microstructure was observed by an optical microscope and a scanning electron microscope. The result was that the microstructure of the laser-irradiated coating layer was dense; porosities almost disappeared and hardness increased. It was also observed that microcracks occurred in the laser-irradiated coating layer.

1. 서 론

1960년 미국 Hughes 연구소의 Maiman¹⁾이 인공 루비를 사용하여 적색 펄스 레이저를 발진시키는데 성공한 이후, 레이저가 가진 고유의 특성 때문에 그 응용기술은 비약적인 발전을 거듭해왔다. 현재 레이저는 재료가공, 계측, 통신, 의료 등 넓은 분야에 이용되고 있지만, 그중에서도 특히 절단이나 용접 등 레이저의 고에너지원으로서의 특징을 살린 재료가공 분야에의 이용이 가장 활발하게 이루어지고 있다²⁾. 다만 표면개질에의 레이저 이용은 아직 연구단계에 머물러 있어 실용화에는 이르지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 용사코팅층은 크랙, 미접합부, 미용융입자, 기공 등의 많은 결함을 가지고 있다. 이러한 결함에 대해 최근 고에너지밀도의 레이저 빔을 용사코팅층의 표면에 조사하여 가열, 재용융시킴으로써 코팅층을 치밀화, 균질화하고 아울러 내마모

성, 내식성 등의 기계적 특성도 향상시키고자하는 시도가 미국, 일본을 중심으로 활발히 이루어지고 있으나³⁻⁵⁾, 아직 국내에서는 이와 관련된 연구보고를 찾아보기 힘들다.

본 연구는 플라즈마와 레이저의 열원을 복합화하여 용사코팅층의 기계적 특성을 개선하기 위한 기초적 연구로서, 플라즈마 용사된 $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ 세라믹 코팅층의 표면에 공정조건을 달리하여 레이저 조사를 실시하고, 조직시험 및 경도시험을 통해 플라즈마 용사된 $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ 세라믹 코팅층에 미치는 레이저 조사의 영향을 분석하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 코팅시험편의 제작

코팅시험편의 제작을 위한 용사장치로는 Metco 사제의 플라즈마 용사장치(Plasmadyne)를 사용하고, 기재로서는 일반 구조용강판인 SS400(50×60×3mm)를 사용하였다. 또한 코팅 재료로는 이트리아가 함유된 부분안정화 지르코니아($ZrO_2-8\%$

접수일 : 2000년 10월 31일
김영식, 오명석 : 부경대학교 기계공학부

Y₂O₃)분말을 사용하였다.

전처리로서 #24 알루미나 블라스트에 의해 기재 표면을 조면화하고 아세톤으로 초음파 세척을 행한 후, 용사건으로부터 기재까지의 용사거리를 80, 120, 160mm로 변화시키면서 용사한 3종류의 단층 코팅시험편을 제작하였다.

2.2 레이저 조사

전술한 바와 같이 용사거리를 달리하여 제작된 코팅시험편에 대해 레이저 조사에 의한 재용융처리를 실시하였다. 재용융처리를 위한 레이저 장치는 Mitsubishi사제의 출력 1kW급 CO₂ 레이저 발진기를 사용하였다.

재용융처리시 공정변수는 레이저 출력과 빔의 직경으로 하여, 출력은 100, 300, 500W로, 빔의 직경은 0.8, 1.4, 2.8mm로 변화시키면서 각각의 코팅 시험편에 대한 레이저를 조사하였다.

Table 1, 2는 각각 본 실험에 사용한 기재 및 분말의 화학조성을, Table 3, 4는 각각 플라즈마 용사조건과 레이저 조사조건을 나타낸다.

2.3 특성평가시험

전항과 같이하여 제작된 코팅시험편 및 레이저 조사에 의해 재용융처리된 시험편에 대해 조직시험과 미소경도시험을 실시하였다.

조직시험으로는 광학 현미경과 주사형 전자현미경(sanning electron microscope: SEM)을 이용하여, 코팅층의 단면 및 표면의 미세구조를 관찰하였다.

미소경도시험으로는 500gf의 압자를 이용한 마이크로 비커스 경도시험기에 의해 코팅층의 단면 미소경도를 측정하였다. 하중 유지시간은 10초로 하고, 시험편당 측정개소는 코팅층의 상부, 중간부, 하부에 각각 3개소씩 모두 9개소로 하였다.

Table 1 Chemical composition of substrate (wt%)

| | | | | | |
|------|------|------|-------|------|-------|
| Fe | Mn | C | P | Si | S |
| Bal. | 1.01 | 0.14 | 0.019 | 0.23 | 0.004 |

Table 2 Chemical composition of powder used (wt%)

| | | | | |
|------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| ZrO ₂ | Y ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | HfO ₂ |
| Bal. | 7.57 | 0.14 | 0.20 | 1.42 |

Table 3 Plasma spraying conditions

| | | |
|--------------------|--------------|---------|
| Primary gas(Ar) | 0.41 | [MPa] |
| Auxiliary gas(He) | 0.62 | [MPa] |
| Amperes | 850 | [A] |
| Gun traverse speed | 6 | [m/min] |
| Step interval | 5 | [mm] |
| Spraying distance | 80, 120, 160 | [mm] |

Table 4 Laser irradiation conditions

| | | |
|-------------------------|---------------|----------|
| Laser scanning velocity | 100 | [mm/sec] |
| Interval of path | 0.75 | [mm] |
| Defocus length | 0.00 | [mm] |
| Beam diameter at focus | 0.8, 1.4, 2.8 | [mm] |
| Laser power | 100, 300, 500 | [W] |

3. 결과 및 고찰

3.1 용사거리의 변화에 따른 코팅층의 미세구조

Fig. 1은 용사거리를 80, 120, 160mm로 달리했을 때의 코팅층의 미세구조를 나타낸 것으로서, 아래쪽에 밝게 보이는 부분이 기재이고, 그 위의 부분이 용사코팅층이다.

용사거리 80mm일 때 조직이 가장 치밀하고 기공이 적는데 비해 용사거리가 120, 160mm로 커짐에 따라 점차 조직이 불균일하고 또한 조대한 기공들이 많이 나타나고 있다. 용사거리가 80mm인 경우에는 전체적으로 직경 10 μ m이하의 균일하고 미세한 기공들이 관찰되었고, 용사거리가 120mm 이상인 경우에는 직경 30~40 μ m 정도의 조대한 기공들이 관찰되었다.

이와 같이 용사거리가 커질수록 조직이 불균일하고 기공이 조대해지는 이유는 비행중인 용사입자의 온도와 속도가 저하되어, 충분한 운동에너지를 갖지 못한 용융입자가 기재에 충돌하여 적층되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig 2는 용사거리를 80, 120, 160mm로 달리한 코팅층의 표면 SEM 사진이다.

용사거리 80mm일 때 용융입자의 편평상태가 가장 양호하며, 용사거리가 증가할수록 편평상태가 양호하지 못하고 특히 용사거리 160mm일 경우에는 다수의 용융입자가 미용융상태, 또는 반응용상

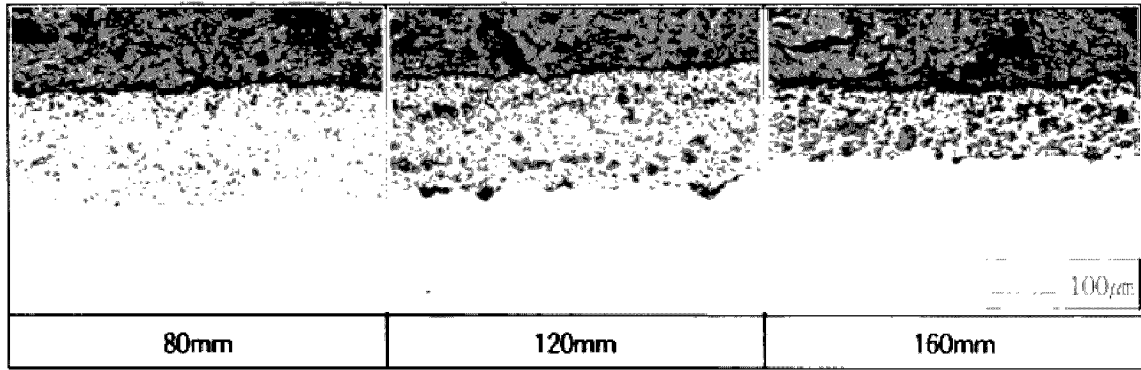


Fig. 1 Microstructure of the cross section of coating layer with different spraying distance

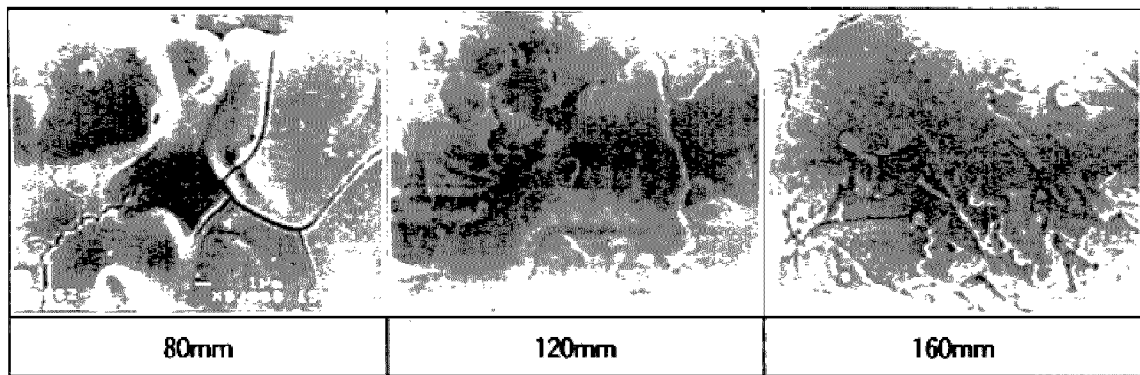


Fig. 2 SEM photograph of the coating surface with different spraying distance

대로 적층되었다는 것이 잘 나타나 있다. 이는 Fig. 1에서 언급한 바와 같이 용사거리가 커질수록 비행 중인 용융입자의 온도와 속도가 저하되어 충분한 운동에너지를 갖지 못한 용융 입자가 기재에 충돌하여 적층되기 때문인 것으로 생각된다.

한편 용사거리 80mm일 경우 편평된 용융입자 내에 길고 선명한 균열이 나타나 있고 이 균열은 용사거리가 커질수록 작고 희미해지는데, 이는 전술한 바와 같이 용사거리 80mm일 때의 용융입자가 상대적으로 높은 온도와 비행속도를 가지고 있어, 다른 편평입자들과 충돌하는 순간 용융입자가 편평되는 면적이 크고 또한 상대적인 열팽창계수의 차가 커서 급속한 수축이 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

이러한 결과로 미루어 볼 때, 용사거리 80mm일 때 코팅층 단면의 조직사진에 기공으로 보이는 많은 결함들은 편평된 용융입자 내에 존재하는 균열이 상당부분 차지하는 것으로 생각된다.

3.2 용사코팅층의 미세구조에 미치는 레이저 조사의 영향

Fig. 3은 용사거리를 80, 120, 160mm로 달리한

3종류의 코팅시험편에 대해 빔의 직경을 0.8mm로 고정시키고 출력을 100, 300, 500W로 변화시키면서 레이저를 조사한 코팅층 단면의 미세조직을 나타낸다.

용사거리에 관계없이 출력이 100, 300, 500W로 증가할수록 코팅층은 더욱 치밀해져 기공이 점차 사라지며 레이저 영향부도 깊어진다는 사실이 잘 나타나 있다. 이와 같이 레이저 조사의 출력이 증가할수록 코팅층이 치밀해지고 기공이 사라지게 되는 것은 레이저 조사에 의한 표면 재용융시 코팅층 내에 존재하고 있던 기공의 소멸과 기공 내에 존재하고 있던 공기의 방출 때문인 것으로 생각된다. 한편 레이저를 조사한 코팅층에는 수직방향의 균열들이 많이 나타나고 있는데, 이것은 레이저 조사에 의해 코팅층이 용융된 후 재응고과정에서 코팅층이 수축되면서 생긴 것으로 알려져 있다^{6,8)}.

한편 Fig. 3의 결과를 보면 레이저의 출력이 증가할수록 코팅층 내에 발생한 균열과 흠도 커진다는 사실이 잘 나타나 있는데, 특히 용사거리를 적정거리로부터 멀리한 시험편일수록 레이저를 조사했을 때 상대적으로 더 큰 균열과 흠이 나타나고 있다. 이러한 이유는 용사거리를 멀리한 시험편의 경우 코팅층내부에 상대적으로 더 크고 많은 기공

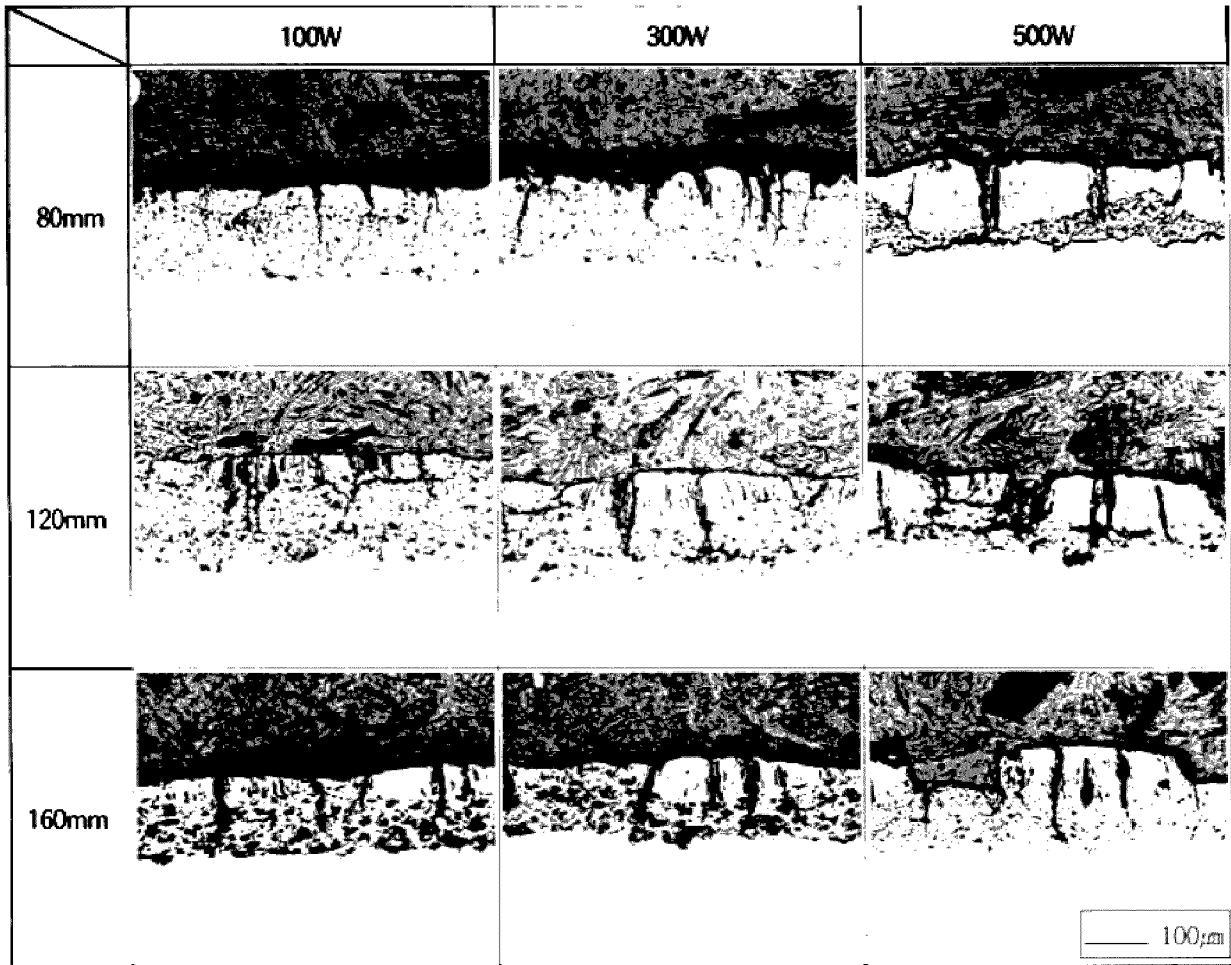


Fig. 3 Microstructure of the cross section of coating layer with different spraying distance and laser power

들을 포함하고 있고, 따라서 레이저 조사시 이 기공들이 소멸되면서 상대적으로 더 큰 수축이 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 4는 레이저 출력을 100W로 일정하게 유지하고 빔의 직경을 0.8, 1.4, 2.8mm로 변화시켰을 때의 코팅층 단면의 미세조직을 나타낸다.

레이저 빔의 직경 0.8mm일 때 레이저 조사의 영향을 가장 강하게 받고, 빔의 직경이 커짐에 따라 레이저 조사의 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있는데, 빔의 직경이 0.8mm인 경우 코팅층의 약 1/3정도가 직접적인 레이저의 영향을 받아 조직이 치밀해지고 기공이 감소되며 또한 상대적으로 크고 긴 수직균열이 형성되는데 반해, 빔의 직경이 2.8mm인 경우 코팅층의 조직에는 큰 영향을 미치지 않고 다만 미세한 수직균열이 관찰되었다.

전술한 바와 같이 레이저 조사를 실시했을 때 코팅층 단면에 나타나는 수직균열은 용융후 재응고되는 과정에서 코팅층이 수축되기 때문인데,

Fig. 4의 결과에서 빔의 직경이 2.8mm인 경우 레이저 조사가 코팅층의 조직에 큰 영향을 미치지 않는 것은 빔의 밀도가 적어져 레이저 열원의 강도가 약해지기 때문이다.

3.3 용사코팅층의 경도에 미치는 레이저 조사의 영향

Fig. 5는 용사거리를 80, 120, 160mm로 달리하여 용사한 코팅층의 단면 미세경도를 나타낸 것이고, Fig. 6은 용사거리를 달리하여 제작된 코팅시편에 레이저의 출력을 100, 300, 500W로 변화시키면서 재용융처리를 실시한 시험편의 단면 미세경도를 나타낸 것이다.

용사거리가 멀어질수록 코팅층의 경도가 감소하는 것은 전술한 바와 같이 용사거리가 멀어질수록 용융입자의 비행속도와 온도가 낮아지고, 따라서 많은 용융입자들이 미용융 또는 반용융 상태로 적층됨으로써 조직이 치밀하지 못하고 많은 기공을 함유하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

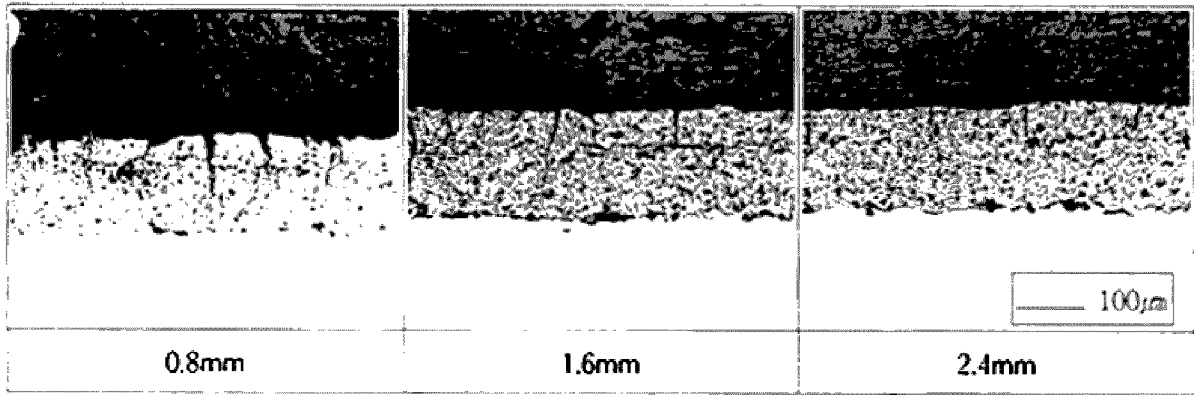


Fig. 4 Microstructure of the cross section of coating layer with different beam diameter

레이저 조사의 출력이 증가할수록 경도가 증가 되는 것은 출력에 비례하여 레이저 빔의 강도가 더강하고 또 코팅층 표면으로부터 더 깊은 범위까지 미치게 되므로, 표면 재용융시 상대적으로 더 많은 코팅층 내부의 기공이 소멸됨으로써 코팅층이 더욱 치밀해졌기 때문인 것으로 생각된다.

한편 Fig. 6의 결과를 보면 레이저의 출력이 커질수록 측정데이터의 편차가 크게 나타나고 있는데, 이는 레이저의 영향을 가장 많이 받는 코팅층의 상부와 상대적으로 적게 받는 하부에서의 측정데이터의 차가 크게 나타나기 때문이다.

4. 결론

본 연구는 플라즈마와 레이저의 열원을 복합화하여 용사코팅층의 기계적 특성을 개선하기 위한 기초적 연구로서, 플라즈마 용사된 $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ 세라믹 코팅층의 표면에 공정조건을 달리하여 레이저 조사를 실시하고, 조직시험 및 경도시험을 통해 플라즈마 용사된 $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ 세라믹 코팅층에 미치는 레이저 조사의 영향을 분석하였다.

용사거리가 적정거리로부터 멀어질수록 코팅층의 조직이 불균일하고 기공이 조대해지며, 또한 경도도 감소되었다. 용사후 레이저 조사에 의한 재용융처리를 실시함에 의해 코팅층의 조직은 치밀해지고 경도가 높아져 코팅층이 개선될 수 있다는 사실이 확인되었다. 반면 레이저 조사에 의해 코팅층이 용융되어 다시 재용고되는 과정에서 코팅층과 수직한 방향으로 다수의 균열과 흠이 생성됨으로서 코팅층에 부정적인 영향일 미친다는 사실도 아울러 확인되었다. 이러한 부정적 영향은 코팅층의 기공도가 높을수록 더욱 현저하게 나타났다.

금후 고에너지원인 레이저 열원을 용사코팅층의 개질에 적용시키기 위해서는 레이저에 의한 열전달 및 물질유동의 해석과 코팅층의 물성평가 등

앞으로도 많은 연구가 더 진행되어야 할 것으로 생각되며, 이는 차후의 과제로 남겨둔다.

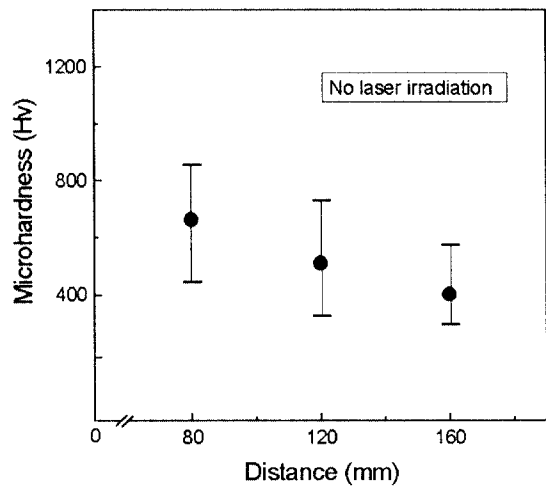


Fig. 5 Microhardness of coating layer with different spraying distance

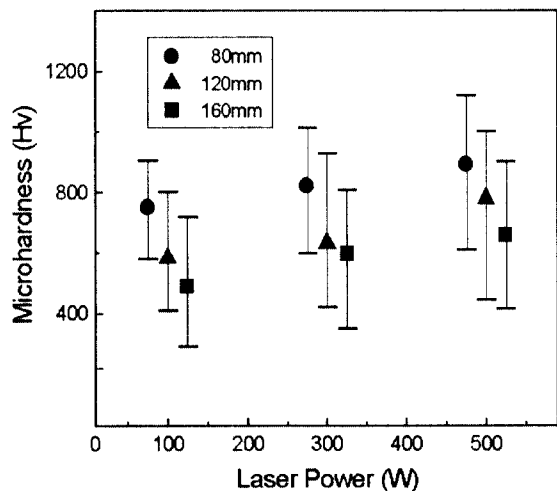


Fig. 6 Microhardness of coating layer with different laser power

후 기

본 연구는 1999년도 부경대학교 학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. T. H. Maiman, "Nature", 187 p. 493, 1960
2. R. M. Macintyre, "Application of Laser for Materials Processing", p. 253, 1983
3. 松田純, "レーザ溶射法によるTi-TiN系組成傾斜皮膜の作成及びその機械的特性に関する研究", 九州工業大學 博士論文, p. 42, 1992
4. Z. Zhou and N. Eguch, "Microstructure Control of Zirconia Thermal Barrier Coating by using YAG Laser Combined Plasma Spraying Technique", Proc. of UTSC, pp. 315~322, 1997
5. S. Yerrameddy S. Bahadur, "The effect of laser surface treatments on the tribological behavior of Ti-6Al-4V", Wear 157, pp. 245~262, 1992
6. A. Ohmori and K. Kamada, "Laser Processing of Plasma Sprayed Coatings", Trans. of JWRI, Vol. 18, No. 2, 1989
7. A. Ohmori, Y. C. Zhang, S. Hirano and Y. Arata, "Reaction Spray by Laser-Plasma Jet-Synthesis of TiN Coatings", Trans. of JWRI, Vol. 20, No. 2, 1991
8. K. Kamada and A. Ohmori, "Improvement of alumina coatings by use of a laser-plasma system", Journal of Materials Science Letters 11, pp. 108~110, 1992