

## 가압소결에 의해 제조된 FeAl계 금속간 화합물의 플라즈마 질화에 의한 미세조직 및 표면경화

박 지 환 · 박 윤 우  
성균관대학교 금속·재료공학부

### Microstructure and Surface Hardening of Pressure-assisted Sintered FeAl-base Intermetallic Compound by Plasma Nitriding

J. H. Park and Y. W. Park

Division of Materials Science and Engineering Sungkyunkwan University, 300 Chunchun-dong, Suwon, 440-746

(1999년 8월 23일 받음, 1999년 9월 21일 최종수정본 받음)

**초 록** FeAl 기지 복합재료는 hot-pressing에 의해서 성공적으로 제조할 수 있다. 이러한 FeAl 합금의 기계적 특성에 대한 연구는 많이 진행되었으나 플라즈마 질화에 의한 표면 경화특성에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 hot-pressing으로 제조된 소결 복합재료의 미세구조와 플라즈마 질화처리시 표면경화와의 관계를 분석하였다. FeAl을 기지로 하는 합금은 플라즈마 질화처리에 의해서 표면경도가 상승하는 경향을 보였고, 이러한 경향은 질화처리 시간이 증가할수록 더욱 뚜렷하였다 (H, 100gf, 확산층 : 1100~1450 kg/mm<sup>2</sup>, matrix : 330~360 kg/mm<sup>2</sup>). FeAl 합금에서 플라즈마 질화처리에 의해서 매우 우수한 표면경화특성을 얻을 수 있었다. 확산층은 플라즈마 질화처리시간이 증가할수록 두꺼워졌으며, SiC<sub>p</sub>의 함유량이 증가함에 따라 확산층은 감소하였다.

**Abstract** FeAl matrix composite was fabricated successfully by hot-pressing. The mechanical properties of FeAl alloys have been widely studied, but their behaviors of surface hardening effect by plasma nitriding has not yet been studied. This study was to analysis the relationship between microstructure of the sintered composite by hot-pressing and surface hardening at plasma nitriding treatment. Surface hardening of FeAl base alloys was improved by plasma nitriding with increasing plasma treatment time. Excellent surface hardness in the FeAl alloys could be obtained by plasma nitriding (H, 100gf, diffusion layer : 1100~1450 kg/mm<sup>2</sup>, matrix : 330~360 kg/mm<sup>2</sup>). Diffusion layer size increased with increasing plasma nitriding times and decreased with increasing SiC<sub>p</sub> content.

### 1. 서 론

금속간 화합물은 1839년 독일의 화학자인 Karl Karsen에 의해 처음으로 발견된 이래로 그 고유의 특성인 구성원자들간의 강한 화학적인 결합으로 인한 경도의 상승과 높은 온도에서도 쉽게 분해되지 않는 매우 이례적인 성질로 인하여 여러 종류의 금속간 화합물에 대한 광범위한 연구가 이루어져 왔으며, 최근에는 재료의 경량화와 우수한 기계적 성질 및 내환경성을 요구하는 고기능 신소재 개발의 필요로 인하여 세라믹 강화상이 첨가된 금속간 화합물을 기지로 하는 복합재료에 대한 관심이 대두되고 있다. 금속간 화합물 기지 복합재료의 경우 기지와 세라믹 강화상의 젖음성이 우수하여 기계적 및 화학적 특성이 향상된 재료의 개발이 가능하다.

FeAl계 금속간 화합물의 경우 원자간의 결합이 강하여 강도와 경도가 높고, 경량이며 고온에서의 산화 및 내부식성도 우수해서 고온구조용 재료로서 많은 연구가 이루어져 왔으나, 대기 중에서의 환경취화로 인한 불충분한 연성으로 인하여 많은 잠재성에도 불구하고 실용화에 걸림돌이 되어

져 왔다. 그러나, 최근에는 미국의 Oak Ridge National Lab. 등에서 알루미늄이 36~40at.%까지 함유한 FeAl 합금에 미량의 합금원소 및 세라믹 강화상의 첨가로 인하여 위와 같은 문제점의 개선이 이루어져 실용화의 가능성을 보여주고 있다.<sup>1~5)</sup>

그리고, FeAl 금속간 화합물을 기지로 하고 미세한 세라믹입자들로 강화된 복합재료의 제작시 재료 조직내의 미세한 결정립과 첨가된 세라믹 강화상의 균일한 분포를 가지게 하기 위해서 분말야금법으로 제조하는 것이 매우 유리하며 분말야금법으로 제조시에 야기되는 기공 또는 내부 결합의 효과를 최소화하기 위하여 hot pressing을 이용하여 가압소결하는 것이 조직이 균일하고 밀도가 높은 합금을 얻기에 유리하다. 또한, M. Inoue 등의 연구에 의하면 세라믹 강화상이 첨가된 FeAl기 복합재료가 hot pressing을 이용하여 성공적으로 제조되고 있으며, 특히 SiC 강화상을 첨가하여 제작한 FeAl기지 복합재료는 FeAl 금속간 화합물보다 기계적 성질이 향상됨을 보고하였다.<sup>1, 2)</sup>

Hot pressing으로 제조된 FeAl기지 복합재료는 열에너지뿐만 아니라 외부에서의 유압에 의한 기계적 에너지에 의

해서 성형체 내부의 기공 등의 결함을 최소화하여 기계적 특성을 향상시켰다. 이렇게 제조된 성형체에 플라즈마 질화 처리를 이용한 열화학적 표면처리를 수행함으로써 표면 경도의 증가와 내마모성의 향상 및 피로강도의 증가, 내식성이 매우 향상될 수 있다.<sup>3)</sup> 최근에 많은 문제점으로 대두되고 있는 Liu 등이 제안한 대기 중에서 FeAl 합금의 환경 취화는 대기중의 수분과 알루미늄 원자사이에서 반응으로 인한 수소원자의 생성에 기인하는 것이다.<sup>1,2)</sup> 그 반응은  $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H$ 와 같은데 이렇게 생성된 수소원자가 변형시 균열의 선단에 확산하여 파괴강도를 저하시키는 원인이 된다. 또한 Gleason 등은 FeAl의 표면에서의 수분과의 반응을 연구하였는데, 표면에서 산화알루미늄의 형성과 수소의 생성이 동시에 일어남을 관찰하였으며, 수분이 표면에서 흡수되거나 분해될 때 알루미늄이 산소와 결합하고, 수소의 흡수와 분해는 철원자에 의한 주된 영향으로 일어나게 된다고 제안하고 있다.<sup>2)</sup>

위와 같은 영향으로 인하여 합금의 표면조건을 개선함으로써 FeAl 합금의 환경취화를 감소시키려는 연구가 진행되고 있으며,<sup>4)</sup> 또한 내열성 및 내마모성이 요구되는 고온, 고압의 가혹한 환경에서도 표면특성의 향상으로 우수한 물성을 유지할 수 있다. 그러나, 이러한 장점에도 불구하고 FeAl 합금에 대한 표면처리 특성에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다.

종래에 많이 사용되던 표면열처리인 염욕 도금공정이나 가스질화 등은 소결체 내부의 기공과 상호작용을 일으켜서 표면개질의 감소를 가져오거나 소결체 내부의 결함을 유발할 수 있으며, 세라믹이나 금속간 화합물과 같은 취성재료나 복합재료 등의 표면처리 방법으로는 적당하지 않다.

플라즈마를 이용한 질화공정은 이러한 단점이 발생하지 않으며, 상기의 공정보다 표면 처리된 층의 연속성이 더 우수하며, 일반적인 질화보다 낮은 공정온도와 적은 열변형 및 무공해 공정이라는 장점을 가지고 있다.<sup>5,6)</sup>

본 실험에서는 hot pressing을 이용하여 가압소결법으로 제조된 FeAl 금속간 화합물과 FeAl/SiC<sub>2</sub> 복합재료를 플라즈마 질화처리하여 질화층의 미세조직 및 표면경화특성을 비교 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

FeAl계 금속간 화합물 제조시 Fe분말(평균 입도 45 $\mu$ m)과 40at.%의 Al분말(평균 입도 75 $\mu$ m)을  $\alpha$ -SiC particle 분말(평균 입도 1.5 $\mu$ m)과 함께 불밀링에 의해서 24시간동안 혼합하였으며, SiC<sub>2</sub>의 분율을 각각 0~10vol.%로 변화시켰다.

혼합된 분말을 4톤의 압력으로 30분간 냉간 성형한 후에 압분체를 10<sup>-3</sup>Torr의 진공분위기에서 1000~1200 $^{\circ}$ C의 소결온도로 가압소결하였다. 몰드는 graphite를 사용하였으며, 몰드 내벽과 시편사이에 BN을 도포한 carbon foil을 삽입하여 몰드와 시편과의 반응을 차단하였으며, 몰드의 임계압력(50MPa) 내에서 가압하여 소결하였고 몰드내의 열이 외부로 방출됨을 방지하기 위하여 SiO<sub>2</sub> 분말을 시편의

아래 위로 5mm정도 도포하였다. 소결유지시간은 1시간에서 3시간까지 유지하였으며, 소결공정중에 20~40MPa의 압력으로 가압하여 소결체 내부의 기공감소를 유도하였다. 소결된 성형체는 연마하여 X선회절분석 및 광학현미경과 주사전자현미경으로 미세조직을 관찰하였으며, 아르키메데스의 원리를 이용한 측정법으로 소결체의 밀도를 측정하였다.

제조된 소결체를 마이크로 커터기로 절단한 후 연마하여, 초음파 세척후 플라즈마 질화 장비에 장입하여 5 $\times$ 10<sup>-3</sup> Torr의 초기진공도까지 배기하였으며, 표면의 이물질이나 산화막의 제거를 위해서 1.5 $\times$ 10<sup>-1</sup> Torr의 아르곤 분위기에서 30분간 플라즈마 세정을 행하였다.

플라즈마 세정 후에 질소와 수소의 비율 3:1로 혼합한 분위기에서 pulsed DC전원을 이용하여 글로우 방전시켜 550 $^{\circ}$ C의 처리온도에서 플라즈마 질화처리를 실시하였다. 질화처리된 시편을 수직 절단 연마하여 에칭액(33ml HNO<sub>3</sub> + 33ml HCl + 33ml H<sub>2</sub>O + 1ml HF)으로 부식시킨 후 미세조직을 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였다.

질화층의 경도분포는 마이크로 비커스 경도기를 이용하였으며, 측정하중은 100g으로 하였고, 질화층의 표면화합물의 분석은 Cu-K $\alpha$  선을 이용한 X선 회절시험기를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 FeAl계 합금의 소결특성

일반적인 소결은 분말입자사이의 neck의 형성으로 인한 모세관압력과 확산 등으로 치밀화되지만, hot pressing을 이용한 가압소결법은 외부에서 가해지는 압력의 영향으로 인하여 치밀화속도가 높아지게 된다. 따라서, 밀도의 비약적인 향상을 가져올 수 있으며, 일반소결보다 소결온도를 낮출 수 있을 뿐 아니라, 소결시간의 단축도 가능하다. 가압소결은 분말혼합체나 냉간성형체를 다이에 넣어 일축방향으로만 압력을 가하는 방법으로써 보통 heater급의 고온도 흑연다이를 사용하며, 흑연의 임계 사용압력(50MPa) 내에서 소결이 이루어진다. 가압소결의 치밀화의 구동력은 외부압력이 실제로 분말입자간의 접촉면에서 얼마만큼 가해지는가에 따라 분말에 가해지는 유효압력이 달라지게 된다. 가압소결의 소결기구를 살펴보면, 체확산이나 임계확산뿐 아니라 상압소결에서는 무시할 수 있는 소성변형과 creep도 중요한 소결기구로써 작용한다. 따라서 가능한 모든 치밀화기구가 동시에 작용할 수 있기 때문에 일반소결에서와 같이 치밀화율은 각 기구에 따른 치밀화율의 총합으로서 나타나며, 주어진 계에서 소결온도, 소결압력이나, 분말입자크기, 목(neck)의 크기 등에 따라 치밀화의 지배기구가 달라지게 된다.<sup>7)</sup> FeAl 금속간 화합물의 경우 가압소결시에 Al과 Fe의 원료분말사이에서 반응확산으로 인하여 새로운 화합물의 생성이 가능하여 시편전체에 균일한 FeAl상의 생성이 가능하다. 이러한 가압소결의 용도를 살펴보면, 보통의 소결법으로 소결이 불가능한 공유결합 재료

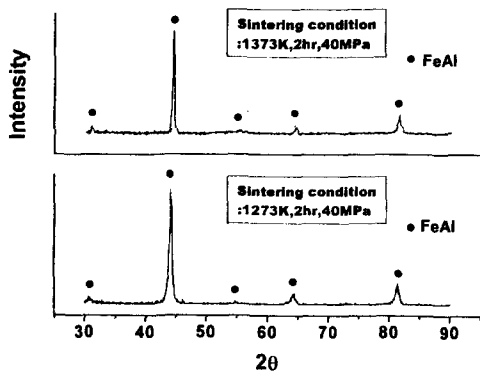


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of sintered FeAl alloys.

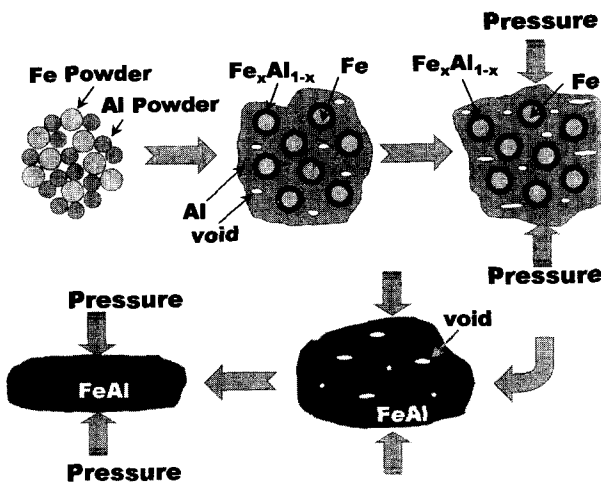


Fig. 2. Schematic diagram of Fe-Al diffusion mechanism during pressure-sintering.

등의 소결이 가능하며, 특히 소결이 어려운 복합재료의 소결에도 유용하다. 또한 소결첨가제를 완전히 제거하거나 그 첨가량을 최소화 할 수 있으므로 소결체의 오염이 최소화되며, 가압으로 인한 소결시간의 감소로 인해 결정립성장을 최소화 할 수 있으며, FeAl기 금속간 화합물의 경우 진공 중의 극소량의 산소와 시편중의 Al과의 반응으로 인한 결정입계중의 미량의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자의 생성으로 인해 장시간 소

결함에도 불구하고 결정립성장이 최소화된다는 연구결과가 있다.<sup>7,8)</sup>

그림 1은 가압소결한 FeAl 합금의 X선 실험결과이다. 시편전체에 FeAl상이 균일하게 형성된 것을 알 수 있다. 가압소결시 혼합된 Fe분말과 Al분말은 280℃에서 초기 고상반응으로 인하여 FeAl<sub>3</sub>상이 형성되기 시작하며, 660℃에서 α-Fe, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl상을 포함하는 복잡한 미세구조의 형성으로 강한 발열반응과 열의 방출로 인해 액상반응이 일어나게 되며, 760℃ 이상에서는 FeAl상으로의 균질화가 이루어진다.<sup>9)</sup>

온도의 상승 중에 천이액상의 형성에도 불구하고, 1000℃ 이하의 소결온도에서는 이론적 밀도에 도달하지 못한다. 그 이유는 그림 2에서의 Al과 Fe의 확산기구의 모식도와 같이 소결초기에 액상의 Al이 Fe입자의 주위를 감싸게 되면, Al이 Fe로의 반응확산으로 인해 화합물의 생성 및 기공이 발생하게 된다. 이때 기공이 발생한 이유는 Al이 Fe 방향으로의 우선적인 확산에 지배를 받는 Kirkendall 효과에 기인한 것으로 알려져 있으며, M. Inoue, Y. Itoh 등의 연구에 의하면 이러한 기공의 발생이 1000℃ 이하에서 활발히 일어남을 관찰하였다.<sup>10)</sup> 발생한 기공은 소결이 진행되면서 증가한 소결온도와 소결압력으로 인하여 소멸 및 감소하게 된다. 그림 3의 가압소결한 시편의 미세조직 사진에서 보는 것과 같이 1000℃ 이상에서 시편에 가한 소결압력, 소결유지시간을 증가시킴에 따라 내부에 형성된 기공들이 현저히 감소한 것을 관찰할 수 있다.

위와 같은 방법으로 제조된 소결체의 밀도를 아르키메데스의 원리를 이용하여 측정된 결과 이론적 밀도의 97% 이상을 얻을 수 있었으며, FeAl을 기지로 하는 SiC, 강화상 복합재료에서도 1000~1100℃의 소결온도에서 소결압력과 소결유지시간을 증가함으로써 이론밀도와 유사한 소결체를 얻을 수 있었다.

3.2 플라즈마 질화처리

플라즈마 질화법은 1930년경에 개발된 표면처리법으로써 유럽 및 구미지역에서 현재 실용화되고 있는 기술이며, 무공해 표면처리법이다. 플라즈마 질화는 1~10 Torr의 낮은 가스압력에서 발생하는 방전을 이용한 것으로서, 저압



(a) Sintering condition : 1273K, 1hr, 30MPa (X1200)



(b) Sintering condition : 1373K, 2hr, 40MPa (X1200)

Fig. 3. SEM micrographs of pressure-assisted sintered FeAl alloys.

의 혼합가스 분위기 내에서 양극(chamber)과 음극(피처리물) 사이에 수백 볼트의 pulse 전압을 가하면 글로우방전이 발생하며, 이때 혼합가스가 이온화되면서 플라즈마가 발생하게 된다. 발생한 플라즈마는 피처리물의 표면을 감싸게 되고, 이러한 표면층으로 가스 이온들이 이동하면서, 피처리물에서의 음극강화현상으로 가스 이온들이 가속되어 충돌로 인해 피처리물 온도의 상승 및 구성원소의 증발이 발생하게 된다. 이렇게 증발된 원소들이 질소와 결합하여 질화철 및 질화알루미늄을 형성하며 이러한 화합물은 피처리물 표면에 증착되고 표면에서부터 내부로 질소가 확산 침투하게 된다. 따라서 플라즈마 질화처리시 혼합가스의 이온화와 피처리물에서 구성원소의 표면증발, 그리고 화합물의 흡착 및 확산과정으로 이루어지게 된다.<sup>6)</sup>

공정 중에 발생하게 되는 pulsed DC 플라즈마는 DC 플라즈마와 비교하여 다양한 플라즈마 변수를 제공한다. DC 플라즈마의 경우 계에 연속적인 전압을 제공하며 표면의 에너지밀도도 연속적인 값을 가지므로 피처리물의 온도제어를 위한 전압의 증감이 요구되며, 복잡한 형상의 경우 이온의 밀집현상이 강하게 일어나서, 불순물에 의한 전하의 축적을 제어하기 힘들다. 그러나 pulsed DC 플라즈마의 경우 전압과 플라즈마 전류에 대한 불연속적인 값을 가지므로 플라즈마 발생시 온도제어가 용이하며, 방전기와 방전휴지가 존재함으로써 아크발생율의 감소와 형상에 따른 이온 밀집 현상이 심하지 않으며, 균일한 온도제어가 가능하고, 불순물에 의한 전하축적 현상을 제어할 수 있다.<sup>11)</sup>

이러한 장점으로 인하여 본 실험에서 pulsed-DC전원을 이용하여 플라즈마 질화처리하였다.

3.3 질화처리된 표면의 화합물층 형성

그림 4는 플라즈마 질화처리한 FeAl계 합금의 표면을 X선 분석 실험한 것이다. SiC가 첨가되지 않은 경우 FeAl합금을 X선 분석 실험결과 플라즈마 질화 처리시간이 4시간인 경우 표면의 화합물층이 Fe<sub>3</sub>N( $\gamma'$ )과 Fe<sub>2-3</sub>N( $\epsilon$ ), AlN로 구성되어 있으며, 질화처리 시간이 6시간 이상인 경우

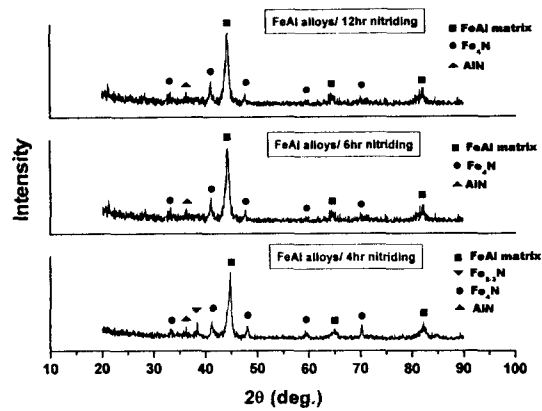


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of nitrided surface of FeAl alloys.

는 Fe<sub>3</sub>N과 미량의 AlN이 형성되었음을 알 수 있으며, SiC가 첨가된 시편의 경우에도 질화시간이 증가할수록 Fe<sub>3</sub>N과 AlN으로 구성되어 있다.

질화층 표면에서의 철질화물인  $\gamma'$  상과  $\epsilon$ 상이 혼합된 화합물층의 경우  $\gamma'$  상과  $\epsilon$ 상의 계면에서의 결합이 취약하며, 서로 다른 열팽창계수를 가지므로 미세균열이 발생하기 쉽고, 외부의 충격에 대한 저항력이 약해지게 된다. 따라서, 이러한 취약성을 피하기 위해서 FeAl계 합금의 경우 질화시간의 증가로 인한  $\gamma'$  단상의 생성이 유리하며, 질화처리 시간을 6시간 이상으로 유지한 경우에는  $\epsilon$ 상이 감소하여  $\gamma'$  과 AlN만이 형성된다. 이러한 화합물층은 미량의 AlN의 형성으로 인한 격자변형으로 화합물층의 부근에서 정도의 상승효과를 가져올 수 있으며, 강인하고 내마모성이 우수한 표면층을 얻을 수 있다.<sup>6,12)</sup>

3.4 질화층의 형성

그림 5는 질화처리한 시편의 표면에서 내부로의 심도경도분포를 측정된 그래프와 질화된 시편을 표면에서 수직 절단한 미세조직을 비교한 것이다.

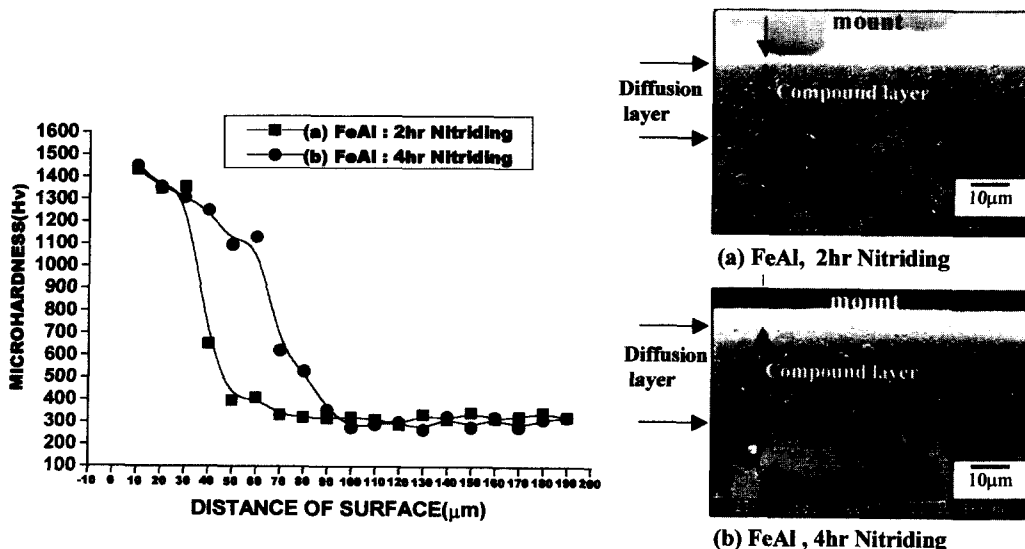


Fig. 5. Hardness distribution and SUM micrographs of nitrided FeAl alloys.

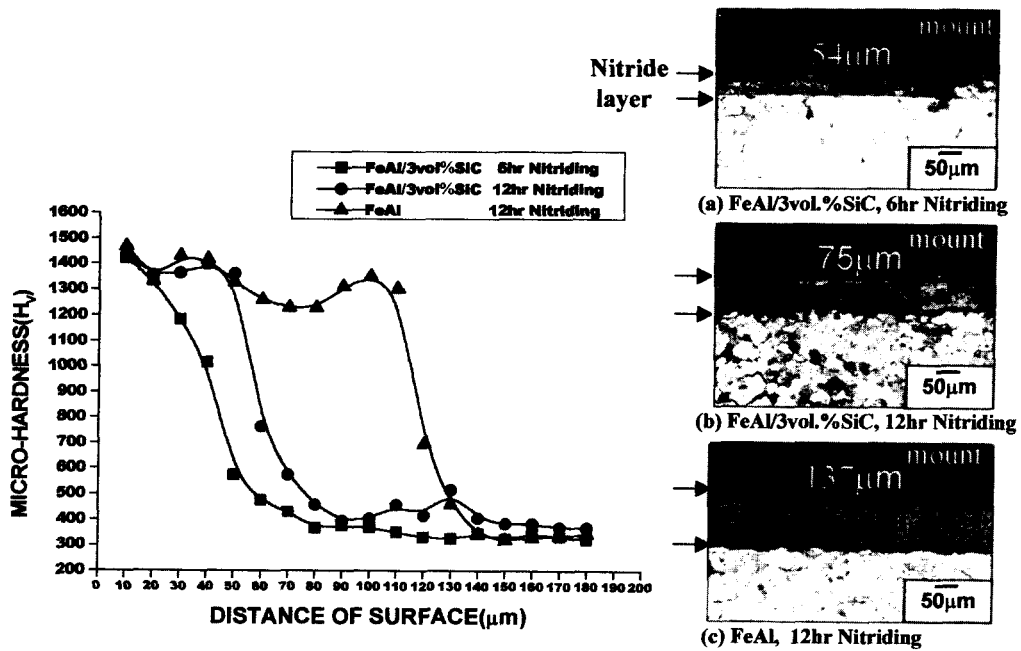


Fig. 6. Hardness distribution and optical micrographs of nitrided FeAl base alloys.

FeAl 금속간 화합물의 경우 질화처리시간을 각각 2시간과 4시간으로 한 경우 심도경도값의 그래프를 통해서 그림 5의 (a), (b)에서와 같이 화합물층과 확산층을 포함한 질화층의 형성 차이를 관찰할 수 있다. 시간이 증가할수록 질화층의 두께와 내부로의 심도경도의 분포도 증가함을 알 수 있으며, 화합물층의 두께 또한 증가함을 알 수 있다. 경도 분포를 살펴보면 질화층에서 FeAl의 모재의 경도(100gf. H<sub>v</sub> : 330~360)보다 매우 향상된 경화층(H<sub>v</sub> : 1100~1350)을 얻을 수 있었는데, 이는 시편표면에 형성한 철질 화물내에 AlN의 존재로 인한 화합물층의 격자변형과 질소의 확산층으로 인한 경도상승이라 여겨지며, 비교적 단시간의 질화처리에서도 표면에서 높은 경도값을 가질 수 있음을 관찰하였으며, FeAl계 금속간 화합물이 플라즈마 질화처리에 의해 효과적으로 표면 경화됨을 알 수 있다.

그림 6은 SiC가 함유될 경우의 심도경도분포와 미세조직 특성을 나타낸 것이다. SiC가 첨가되지 않은 FeAl계 금속간 화합물에서 표면에서 내부로의 심도경도분포가 3vol.%의 SiC가 첨가된 FeAl기 SiC<sub>0.5</sub> 복합재료의 경도분포보다 깊고, 동일한 질화처리 시간에 비해 질화층이 두꺼운 것을 알 수 있다. 그림 6의 미세조직을 살펴보면 (a), (b)와 같이 SiC가 함유된 경우 SiC가 함유되지 않은 (c)에 비해서 질화층이 감소한 것을 관찰할 수 있는데, (a), (b)가 (c)에 비해 질화층이 감소한 이유는 기지내의 SiC의 존재로 인한 질소의 확산방해 및 지연으로 인한 감소라 생각된다.

그림 7은 SiC의 분율증가와 질화처리시간에 따른 질화층의 두께를 나타낸 그래프이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 동일한 질화처리시간에서 SiC 함유량이 3vol.%에서 10vol.%로 증가할수록 질화층이 현저히 감소하는 것을 알 수 있으며, SiC가 3vol.% 이상에서부터 질화처리시간의 증가에 따른 질화층두께의 증가율이 현저히 감소함을 알 수

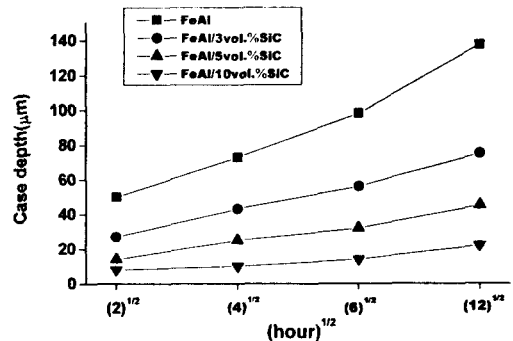


Fig. 7. Variation of the case depth with the nitriding time.

있다. 이론적으로 질화처리시간과 질화층의 두께와의 관계를 고려할 때 질화층의 깊이  $X = \sqrt{2Dt}$  (D : 확산계수, t : 질화처리시간)의 관계식을 가지고 있다. 본 실험에서 질화층의 두께와 처리시간의 제곱근의 관계가 그림 6과 같이 선형적인 증가곡선을 나타냄에 따라 확산층의 증가가 질소의 확산에 의한 성장임을 알 수 있다.<sup>11,12)</sup>

FeAl계 합금의 질화특성을 살펴본 결과 강화상인 SiC의 분율이 증가할수록 질화층이 감소한 것을 볼 수 있지만, FeAl/SiC<sub>0.5</sub> 복합재료 제조시 M. Inoue 등의 연구에 의하면 가압소결로 제조된 Fe-40at.%Al에 5vol.% 첨가된 SiC의 경우가 가장 높은 인장강도를 가졌으며, TiC, TiB<sub>2</sub>가 함유된 경우보다 인장강도가 증가함을 보고하고 있다.<sup>1-9)</sup> 따라서 SiC의 첨가로 인하여 질화층의 감소가 야기되었지만, SiC가 5vol.% 함유된 경우 모재의 기계적 특성의 향상뿐만 아니라 표면층이 모재에 비해 상대적으로 경도 및 내마모성이 향상될 수 있으리라 생각되며, 기계적 성질의 향상을 위해 첨가한 SiC 입자의 분율에 따라 질화층이 감소하는 경향을 보였지만, 표면에서의 최고경도값은 감소하지 않

았다. 따라서, 질화처리시간과 SiC 입자의 분율을 적절히 조절함으로써 FeAl계 합금의 기계적 성질 및 표면경화의 향상을 동시에 얻을 수 있을 것으로 기대하며, 상기의 공정으로 제조 및 표면 처리된 FeAl계 합금은 우수한 고온 내산화성과 경량성으로 석유에너지 교환시스템에서의 구성요소나 칩탄환경에서 작동되는 산업구조물의 구조용재료, 다양한 식품설비의 부품(Ni, Cr을 함유하지 않으므로 인한 무독성으로 stainless steel의 대용재료로 관심이 대두), 자동차배기계, 열교환기 등 차세대 내열 구조용 재료로 응용 가능성이 매우 높을 것이라 생각된다.<sup>13)</sup>

#### 4. 결 론

1) FeAl계 합금을 소결온도 1100℃에서 40MPa의 압력으로 가압소결한 결과 이론적 밀도 97% 이상의 소결체를 제조할 수 있었으며, 소결유지시간과 소결압력의 증대로 소결체의 균질화 및 내부기공의 현저한 감소를 관찰할 수 있었다.

2) 질화층의 표면화합물층에서 플라즈마 질화처리 시간이 4시간인 경우 표면의 화합물층은 Fe<sub>4</sub>N(γ)과 Fe<sub>2-3</sub>N(ε), AlN의 다상으로 구성되어 있었으나, 질화처리 시간이 6시간 이상인 경우에 Fe<sub>4</sub>N과 AlN가 형성됨을 알 수 있었다.

3) 플라즈마 질화처리한 결과 FeAl계 합금의 질화층의 경도값(H<sub>v</sub> : 1100~1350 kg/mm<sup>2</sup>)과 모재경도값(H<sub>v</sub> : 330~360 kg/mm<sup>2</sup>)을 비교할 때 표면근처의 경도값이 매우 향상되었으며, 비교적 단시간의 질화처리에서도 높은 경도값을 얻을 수 있었다. 따라서 플라즈마 질화처리공정이 FeAl계 합금의 표면처리에 유리할 것이라 생각된다.

4) FeAl계 SiC<sub>n</sub> 강화상 복합재료를 질화처리한 결과 SiC<sub>n</sub>의 분율이 증가할수록 질화층의 현저한 감소를 가져왔으며, 이는 기지 내에 분포한 SiC 강화상들이 질소의 확산

방해 및 지연으로 감소한 것이라 생각되며, 질화층의 경도값은 SiC 강화상의 첨가로 인해 감소하지는 않았다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Inoue, K. Sukanuma, and K. Nihara, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **460**, 755(1997).
2. I. Baker, and P. R. Munroe, *International Materials Reviews*, **42**(5), 181(1997).
3. Pee-Yee Lee et al., *Materials Science and Engineering*, **A239**, 736(1997).
4. S. Frangini, F. Pierdominici, J. Lascovich, S. Tosto, and P. Di Lazzaro, *Materials Science and Technology*, **13**(6), 526(1997).
5. N. C. Pereira et al., *J. of Materials Science*, **30**, 4817(1995).
6. T. Spalvins ed., "Ion Nitriding", ASM International, PA(1986).
7. 강석중 저, *소결*, 과학문화사, 1998.
8. M. L. Huckabee, *Am. Cerm. Soc. Bull.*, **5**, 574(1972).
9. M. Inoue, H. Nagao, K. Sukanuma, and K. Nihara, *Materials Science and Engineering*, **A258**, 298(1998).
10. M. Inoue, Y. Itoh, K. Sukanuma, *J. Jpn. Inst. Light Metals*, **46**, 327(1996).
11. P. Bruzzoni et al., *Surface and Coating Technology*, **110**, 13(1998).
12. 정구환, 김명호, 박주승, 이종현, *대한금속학회지*, **36**(9), 1470(1998).
13. C. T. Liu et al., *Materials Science and Engineering*, **A258**, 84(1998).