

## 저온 분사 공정을 통하여 형성된 Al/Ni 복합소재 코팅의 특성 평가

변경준\* · 김재익\* · 이창희\*<sup>†</sup> · 김시조\*\* · 이 성\*\*\*

\*한양대학교 공과대학 신소재공학부

\*\*안동대학교 기계설계공학과

\*\*\*국방과학연구소

## Property Evaluation of Kinetic Sprayed Al-Ni Composite Coatings

GyeongJun Byun\*, JaeIck Kim\*, Changhee Lee\*<sup>†</sup>, SeeJo Kim\*\* and Seong Lee\*\*\*

\*Division of Materials Science &amp; Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*Dept. of Mech. Design Eng., Andong National Univ., Andong 760-749, Korea

\*\*\*Agency for Defense Development, Daejeon 305-152, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received August 4, 2014 ; Revised September 30, 2014 ; Accepted October 6, 2014)

## Abstract

Shaped charge(SC) ammunition is a weapon that penetrates directly the target by made jet from metal liner on impacting at a target. In SC, the liner occupies significantly important role causing an explosion and penetration of the target. The Al-Ni composite coating was deposited on copper liner in a solid state via kinetic spraying to improve the explosive force. The mechanical properties, reactivity and microstructure were investigated to confirm the possibility of kinetic sprayed Al/Ni composite coating as a reactive liner material. Reactive liner using Al/Ni composite exhibited much enhanced reactivity than pure copper liner due to Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) reaction with significantly improved adhesive bond strength. Especially, among the Al/Ni composite coatings, AN11 (the Al versus Ni atomic percent ratio is 1:1) showed the greatest reactivity due to its widest reaction area between deposited Al and Ni.

Key Words : Al-Ni composites, Kinetic spraying, Thermal reactivity, Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) reaction, Differential Scanning Calorimetry(DSC)

## 1. 서 론

성형작약탄(Shaped charge ammunition)은 목표물에 충돌하는 순간 화약 폭발에 의해 금속 라이너가 jet로 변하면서 빠른 속도로 목표물을 제압하는 무기체계이다. 성형작약탄의 관통 및 폭발 성능은 핵심 부품인 라이너(liner)의 재료에 의해 좌우된다<sup>1,2)</sup>. 따라서 라이너 부품의 특성상 높은 관통력과 폭발력을 가져야 하는데, 전통적으로 Cu 라이너의 경우 높은 밀도에 의해 관통력이 높아 라이너 소재로서 주로 사용되어 왔

며, 최근 반응성 재료를 적절히 조합하여 관통 후 효과를 증대시키고자 하는 노력이 진행되고 있다. 클래딩(cladding)과 열용사(thermal spray) 공정을 이용하여<sup>3,4)</sup> 라이너 후면에 반응성이 높은 소재를 접합함으로써 충돌 과정 중 반응성 소재가 반응 및 폭발하여 기존 Cu 라이너에 비해 무기의 살상력을 향상시킬 수 있는 연구가 진행되고 있다<sup>5-7)</sup>. 이 반응성 코팅층은 라이너와 폭발성 물질 간의 접합 공정을 이용하여 제조되며 라이너의 소성 변형을 수용할 수 있는 높은 접합력과 관통 시 산소 및 반응성 금속과 접촉하여 일으키는 폭발력의 두 가지 요구 조건을 모두 충족시켜야 한다<sup>5-7)</sup>.

그러나 클래딩의 경우 안정적인 접합층을 형성하여 라이너 변형에 대한 수용성이 높지만, 클래딩 층은 치밀한 벌크(bulk)로 형성되어 충돌 시 표면에 노출되는 면적이 적어 폭발 반응성이 높지 않을 가능성이 있다. 또한 열용사 코팅의 경우, 충돌 시 입자와 입자 간 결합이 끊어지면서 입자 단위로 산소에 노출되어 폭발 반응성이 크다는 장점이 기대되지만, 열용사 코팅이 대기 중에서 진행되는 경우 높은 공정 온도로 인하여 공정 중 분말 소재가 쉽게 산화되어 화학적으로 안정한 산화물을 형성함으로써 라이너의 폭발력이 제한되어질 가능성이 있다<sup>6,8)</sup>. 이러한 단점을 극복할 수 있는 코팅법으로 보다 낮은 온도에서 산화를 억제하면서 공정을 수행하는 방법이 저온 분사 공정(cold or kinetic spray, supersonic particle coating)이다. 저온 분사 공정 코팅 기술은 5 ~ 40  $\mu\text{m}$  금속 분말을 초음속 가스 유동장에 장입, 초음속으로 가속시켜 모재에 충돌한 후 충돌 계면에 국부적으로 높은 변형속도와 변형율을 발생시켜 국부 계면 온도를 높여 금속 결합을 형성함으로써 코팅층을 육성시키는 공정이다<sup>9-13)</sup>. 저온 분사 공정 코팅기술을 라이너에 적용시킬 경우 크게 세가지 이점을 기대해 볼 수 있다. 첫째, 기존의 열용사 코팅기술과는 달리 상온에 가까운 가스를 이용하여 고상상태로 코팅소재를 적층시킬 수 있다. 따라서 공정 중에 소재의 결정성장이나 기화 및 산화가 발생하지 않으므로 반응성이 높은 금속 소재를 상변화나 산화 없이 직접적으로 코팅에 적용할 수 있으며 저온의 공정기술을 적용함으로써 모재의 열적 변형을 최소화시킬 수 있다<sup>14-16)</sup>. 둘째, 코팅 분말소재의 금속 결합(metallic bonding)과 기계적 결합(mechanical interlocking)이 코팅의 결합 기구로 작용하여 금속 소재의 경우 높은 접합 강도를 가져 우수한 기계적 특성을 나타낸다. 마지막으로 저온 분사 공정 코팅은 단일층(mono-layer), 이중층(multi-layer) 및 경사층(gradient layer) 등 다양한 구조의 코팅을 형성할 수 있으며, 이중 이상의 분말을 혼합하여 코팅함으로써 별도의 공정 없이 복합 소재 코팅층 제작이 가능하다.

Cu 라이너의 폭발력을 극대화시키기 위해 저온 분사 공정을 이용한 반응성 코팅층 제작 연구를 진행하였다. 코팅층의 소재로서 자가연소 합성반응(self-propagating high temperature synthesis) 재료를 사용하였다. 자가연소합성반응은 재료간의 반응이 시작될 수 있는 기본적인 열원이 외부에서 공급될 경우 소재에 점화반응을 일으켜 순간적으로 높은 발열반응을 일으키는 반응을 말하는데, 이 때의 발열반응은 소재간 금속간화합

물 형성에 의해 일어나며, A/B 간 금속간화합물의 형성은 연속적이고 빠른 시간 내에 일어난다. 자가연소합성반응의 소재가 Cu 라이너에 적용 시, 급속한 소성변형을 일으키는 Cu 라이너 열에너지를 이용하여 소재의 온도가 점화온도까지 올라가게 되고, 이후 자가적인 A/B 소재 간의 금속간 화합물 형성 반응에 의해 생성열이 방출하게 된다. 자가연소합성반응에 의한 생성열에 의해 라이너의 폭발성이 더욱 높아지는 효과를 기대할 수 있다

본 연구는 기존 Cu라이너의 폭발력을 증대시키기 위해 반응성 코팅층을 접합시킨 폭발형 라이너를 제작하는 것을 목적으로 수행되었다. 기본적인 열원을 제공할 경우 자가연소합성반응을 일으키는 Al/Ni 복합 소재를 반응성 코팅층 제작에 사용하였으며, 재료의 고상 상태를 유지하며 이중 이상의 재료를 적층시킬 수 있는 저온 분사 공정을 Al/Ni 복합 코팅층 제작에 적용하였다. 이 저온 분사 공정을 통해 기계적 특성 및 폭발성을 가지는 반응성 코팅 제조 기술 개발에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 방법

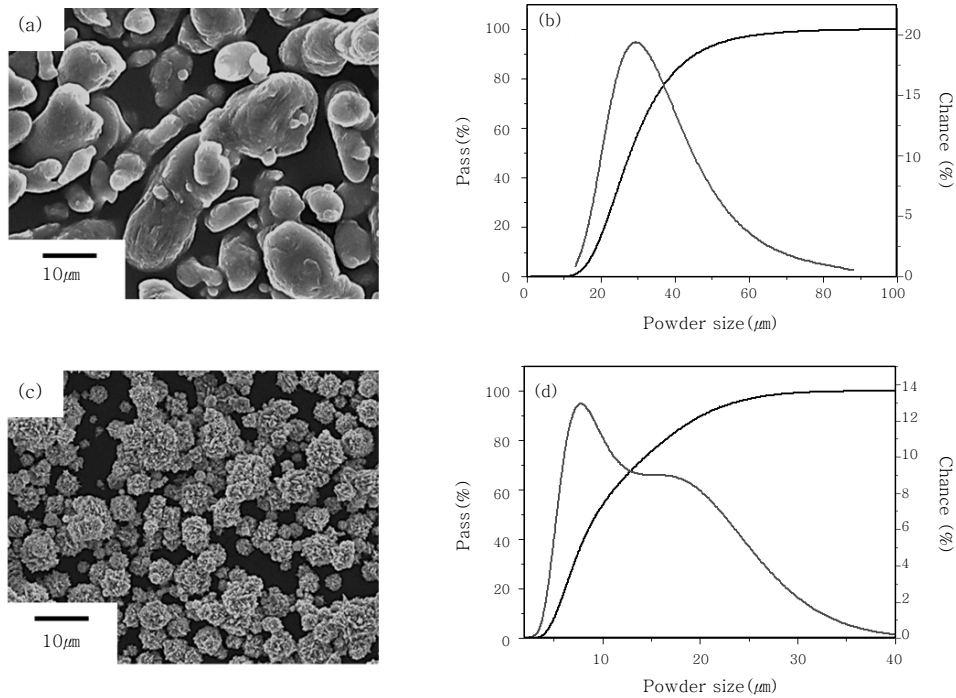
### 2.1 사용 분말

Fig. 1 (a), (b)와 같이 순도 99% 이상의 20  $\mu\text{m}$  고순도 Al 분말을 사용하였으며, 5~22  $\mu\text{m}$ 의 입도분포를 가진 99% 이상의 고순도 Ni 분말을 사용하였다. 입자 속도가 분말의 밀도와 지름에 영향을 받으므로 Al 분말과 비슷한 입자 비행 궤적을 부여하기 위하여 식 (1) empirical equation에 따라 Ni 분말의 크기를 10  $\mu\text{m}$ 로 설정하였다(Fig. 1 (c), (d))<sup>17)</sup>.

$$V_p = \frac{1}{\frac{1}{M} \sqrt{\frac{M}{\gamma RT}} + 0.85 \sqrt{\frac{D}{x} \sqrt{\frac{\rho_p}{P_0}}}} \quad (1)$$

여기서  $V_p$ 는 입자속도,  $M$ 은 가스 분자 질량,  $P_0$ 는 가스 압력,  $R$ 은 몰 기체 상수,  $x$ 는 속도를 측정하는 광선의 위치,  $T$ 는 가스 온도,  $\gamma$ 는 비열 비,  $\rho_p$ 는 입자 밀도,  $D$ 는 입자 지름을 의미한다.

Al과 Ni 혼합 분말을 준비하는데 있어서 생성되는 금속간 화합물의 비율을 고려하여 atomic% 비율로 Al : Ni = 1:1, Al : Ni = 3:1, Al : Ni = 1:3을 각각 AN11, AN31, AN13으로 명명하였다. (선행 연구에 따르면, 자가 연소 합성 반응 시에 생성되는 금속간 화합물은  $\text{NiAl}_3$ 를 시작으로  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}$ 까지 생성이 진



**Fig. 1** SEM micrographs of (a) Al, (b) Ni and powder size distribution of the as-received (c) Al feedstock, (d) Ni feed stock

행되거나  $Ni_3Al$ 까지 연속적으로 생성된다<sup>18,19</sup>.

본 연구에서는 일반적인 이중층 라이너에 사용되는 Cu 소재를 모재로 선정하였으며, 코팅 공전 전 코팅-모재 간의 기계적 접합력을 향상시키기 위하여 모재에 grit-blasting 전처리하였다.

## 2.2 저온 분사 공정

본 연구에서는 저온 분사 공정 polybenzimidazole (PBI) 노즐 (nozzle)이 장착된 상용 저온 분사 시스템 (KINETIC 3000, CGT)을 사용하였다. 저온분사공정의 공정 가스로 질소를 사용하였으며 공정 가스의 압력, 온도는 각각 27 bar, 400 °C로 설정하였다. 출구에서 모재까지의 거리를 뜻하는 코팅 거리 (stand-off distance)는 30mm로 일정하게 유지하였으며, 분말 송급률 (feed rate)은 4 g/min으로 설정하였다. 저온 분사 공정 시 스프레이 건의 이동속도는 80 mm/s로 설정하여 모재 상에 전면 코팅을 수행하였다. 예열을 통한 코팅층의 기계적 성질 향상에 관한 연구를 수행하기 위하여 시편의 조건을 Table 1과 같이 0 °C, 100 °C, 200 °C 온도에서 예열처리를 하여 실험을 진행하였다.

## 2.3 코팅 조직 분석 및 특성 평가

코팅 층의 미세조직은 기계적 연마를 진행한 뒤 1 μm 다이아몬드 현탁액을 이용하여 미세 연마 후 관찰을 실

**Table 1** Kinetic spray coating specimen condition

| Specimen | Component ratio (Al : Ni) | Powder preheating (°C) |
|----------|---------------------------|------------------------|
| AN11-0   | 1 : 1 at%                 | -                      |
| AN11-1   | 1 : 1 at%                 | 100                    |
| AN11-2   | 1 : 1 at%                 | 200                    |
| AN31-0   | 3 : 1 at%                 | -                      |
| AN31-1   | 3 : 1 at%                 | 100                    |
| AN31-2   | 3 : 1 at%                 | 200                    |
| AN13-0   | 1 : 3 at%                 | -                      |
| AN13-1   | 1 : 3 at%                 | 100                    |
| AN13-2   | 1 : 3 at%                 | 200                    |

시하였으며, 코팅의 단면을 OM(BX61M OLYMPUS), SEM(JCM-5700, JEOL)을 이용하여 관찰 및 분석을 실시하였다. 또한 코팅 후 공정 변수에 따른 기초 기계적 특성인 접합 강도 평가는 각 시편을 1 Cm × 1 Cm 크기로 잘라 0.3 μm 알루미늄으로 표면 미세연마 후 stud pin을 코팅 표면에 200 °C 에서 2시간 열처리를 통해 접착시켜 접합강도를 평가하였다.

Al/Ni composite 저온 분사 공정 코팅 시 자가 연소 합성 반응에 의한 발열반응과 성분비에 따라 어떠한 발열 반응을 나타내는지 비교하기 위해 시차주사 열량 측정법(DSC, DSC404 F1, NETZSCH)를 이용하여 Al 코팅 층의 반응성을 분석하였으며, Al/Ni 코팅 층의 반응성 또한 블렌딩(blending) 비율 별로 분석하였

다. 시차주사 열량 측정법은 라이너의 폭발과 비슷한 환경에서 반응을 분석하기 위해 대기에서 진행하였으며, 가열속도는 DSC의 최대 속도인 50K/min으로 하여 각 조건에서 DSC 분석을 수행하였다.

Al과 Ni은 상변화에 따라 발열 반응이 일어나는데 코팅의 초기 상태와 열처리 상태의 시편에 대해 발열 반응에 따른 상변화를 관찰하기 위하여 코팅의 단면을 OM (BX61M OLYMPUS), SEM(JCM-5700, JEOL)을 이용하여 미세조직을 관찰하고 EDS(Thermo NORAN System 7), XRD(X-ray diffractometer)를 이용하여 성분 분석하였다.

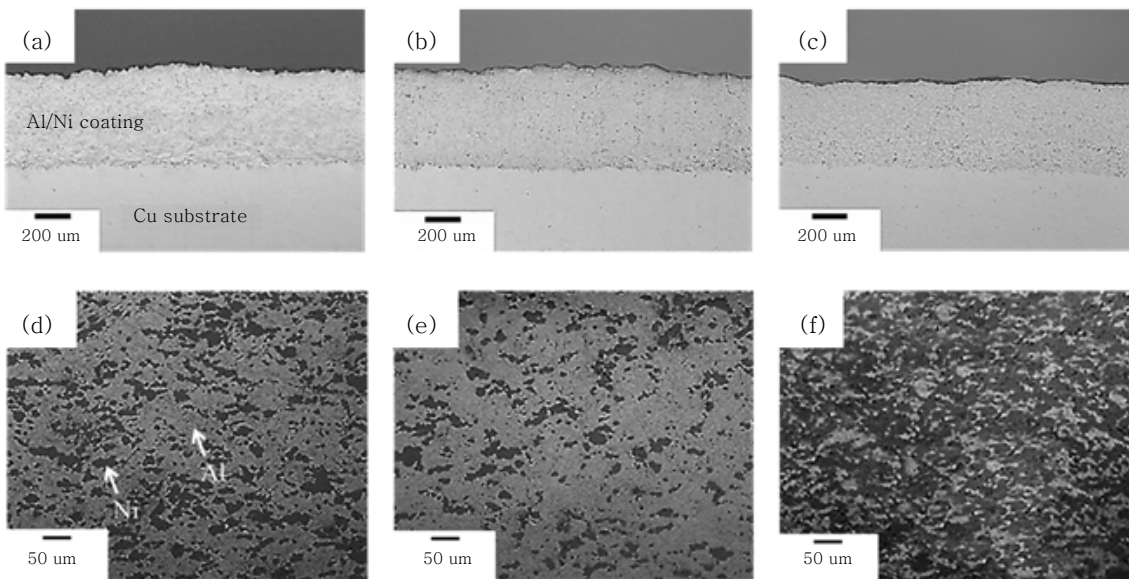
### 3. 실험 고찰

#### 3.1 공정 조건에 따른 미세조직

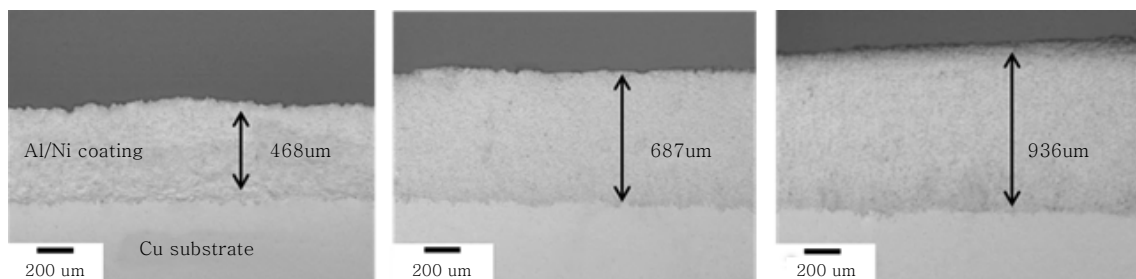
Fig. 2 (a)-(c) 그리고 Fig. 2 (d)-(f)은 각각 Al/Ni 비율에 따른 AN11, AN31, AN13 코팅의 단면과 그 미세조직을 나타내고 있다. 동일한 저온 분사 공정 공

정조건에서 AN11, AN31, AN13을 Cu 모재 상에 코팅할 경우 Al/Ni 혼합비에 관계없이 기판 위에 성공적인 적층이 이루어진 것을 볼 수 있다. 또한 비슷한 입자 비행 궤적을 갖기 위해 20  $\mu\text{m}$  Al과 10  $\mu\text{m}$  Ni로 입자크기를 조절하여 코팅함에 따라 Fig. 2 (d)-(f)와 같이 코팅층 내에 Al과 Ni이 구분되어 불균일하게 적층되지 않고 층 내에 균일하게 분포하게 적층된 것을 확인할 수 있다. Al과 Ni이 고루 분포할수록 코팅층 내의 Al/Ni이 접합되어있는 표면적이 증가되기 때문에 Al과 Ni 간의 반응할 수 있는 면적이 넓어지게 될 것을 예상할 수 있으며, 이에 따라 Al/Ni의 금속간 화합물의 양을 증가시킬 수 있고, 결과적으로 자가연소합성 반응을 더욱 활성화시킬 수 있을 것을 기대할 수 있다.

다음으로 Al/Ni 복합 코팅의 적층 효율을 높이기 위하여 분말을 적층 공정 전 0  $^{\circ}\text{C}$ , 100  $^{\circ}\text{C}$ , 200  $^{\circ}\text{C}$ 에서 예열처리 진행한 결과, Fig. 3 (a)-(c)에서 볼 수 있듯이 100  $^{\circ}\text{C}$ , 200  $^{\circ}\text{C}$ 로 분말예열처리를 했을 경우 as-sprayed 상태보다 적층 두께와 적층 효율이 증가하였



**Fig. 2** OM cross-sectional micrographs of Al/Ni coating specimens of (a) AN11, (b) AN31, and (c) AN13, and (d), (e), (f) higher magnification of (a), (b), (c), respectively



**Fig. 3** OM cross-sectional micrographs of AN11 specimen under different powder preheating conditions

다. 또한 예열처리 시 발생하는 분말의 열적연화 현상으로 인하여 동일한 kinetic energy에서 더 큰 소성변형이 일어날 수 있기 때문에, 예열처리를 한 경우에는 그렇지 않은 경우보다 전단불안정(shear instability)에 의한 점성유동(viscous flow) 현상이 더욱 두드러지게 발생하게 되었다. 이에 따라 예열처리 시, 분말소재에 따른 적층 임계속도(critical velocity)가 감소되어 적층 효율이 향상된다<sup>20-21)</sup>.

그러나 분말 예열처리 후 코팅을 하는 경우, 코팅층 내부에 금속간 화합물이 형성되기 쉽고, 이에 따라 실제 라이너 사용에 있어서 폭파 시 금속간 화합물의 생성열이 낮게 방출되어 폭발력이 감소 할 수 있으므로 적층 공정 후 코팅층 내부의 화합물 형성 여부를 확인할 필요가 있다. Fig. 4 (a)는 예열처리 후 코팅을 한 각 시편의 XRD 결과를 나타내고 있다. 이를 통해 100 °C 와 200 °C 예열 처리 후에 저온 분사 공정을 실시하여도 Al/Ni 간의 금속간 화합물이 형성이 되지 않았음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4 (b)를 통해 예열처리에 따른 코팅층의 발열 에너지 변화는 없는 것으로 사료된다. 따라서 예열 처리한 분말이 저온분사 적층 시 계면

부에 순간적인 온도 상승으로 인하여 금속간 화합물이 생성 될 수 있으나 그 생성되는 양이 XRD를 통해 검출되지 않을 정도로 미량이며 라이너의 폭발력에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 사료된다<sup>22)</sup>.

### 3.2 코팅 특성 평가

Fig. 5은 Al 코팅층과 Al/Ni 복합코팅 층의 접합강도 값을 나타내고 있다. 일반적으로 연한 분말을 사용하고 있는 Al 코팅의 접합강도는 40 MPa로 나타내고 있다<sup>23,24)</sup>. 그러나 Al/Ni 복합 코팅 접합 강도의 경우 성분비에 상관없이 50 MPa 이상의 접합강도 값을 갖는다. 이는 경한 분말인 Ni 입자가 연한 분말인 Al 입자와 같이 분사되면서 연한 Al 분말만 사용하는 경우보다 더 효과적으로 tamping이 발생되기 때문에 높은 접합강도를 갖는 것으로 사료된다<sup>5)</sup>. 이중층 라이너의 경우 발사 시 급격한 소성변형과 함께 타겟을 향해 날아가게 되며, 코팅과 모재의 접합력은 이때의 소성변형을 견딜 수 있을 정도의 접합강도를 가져야 한다. 선행 연구를 통해 Al/Ni 복합 코팅층의 접합강도 값은 라이너가 발사된 이후 급격한 소성변형을 견딜 수 있을 정도의 접합강도임을 알 수 있었다<sup>25)</sup>.

순수 Al 코팅층과 성분비에 따른 Al/Ni 복합 코팅층의 반응성을 분석하기 위해 Fig. 6과 같이 시차주사 열량 측정법을 실시하였다. Fig. 6과 같이 Al, Al/Ni 복합코팅층은 전반적으로 발열반응을 나타낸다. 발열량은 시차주사 열량 측정법 데이터의 전체 면적으로 나타나며, AN11이 가장 높은 에너지를 방출하고 이후 AN31, AN13, Al 코팅 순으로 많은 양의 에너지를 방출하였다. 이 에너지의 발생 원인은 크게 알루미늄의 격자변형에 의한 발열반응과 Al/Ni 간의 자가연소합성반응으로 나눌 수 있다. 알루미늄의 경우 비정질 알루미늄이 점점 성장함에 따라 400 °C까지 미세한 발열량을 나타

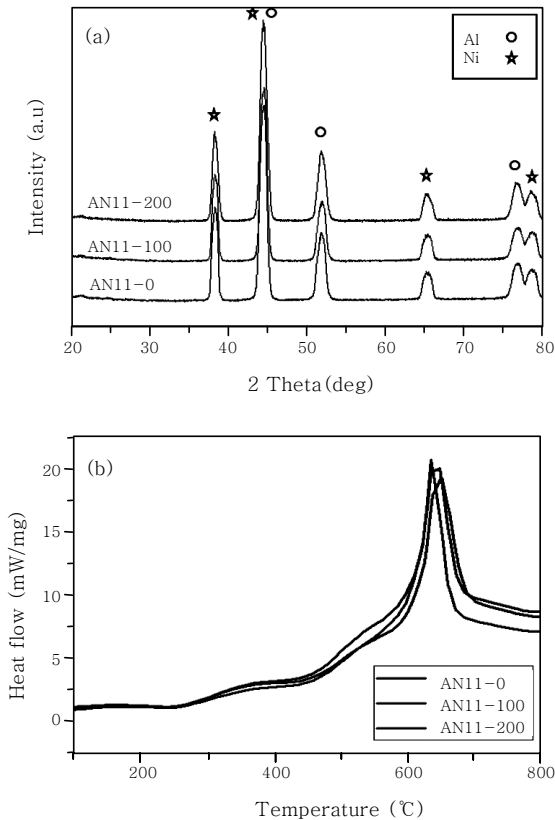


Fig. 4 (a) XRD patterns of AN11 coating specimens under different powder preheating conditions and (b) DSC thermograms of AN11 coating under different powder preheating conditions

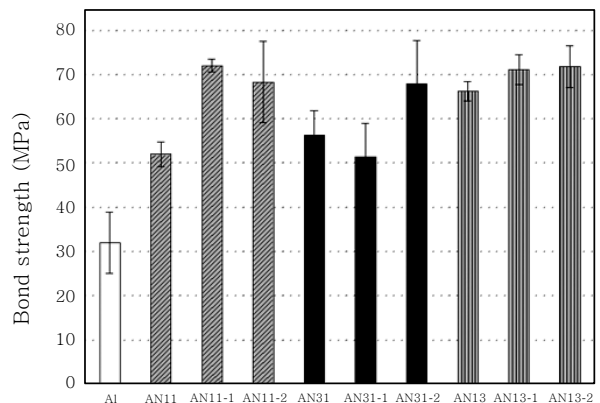
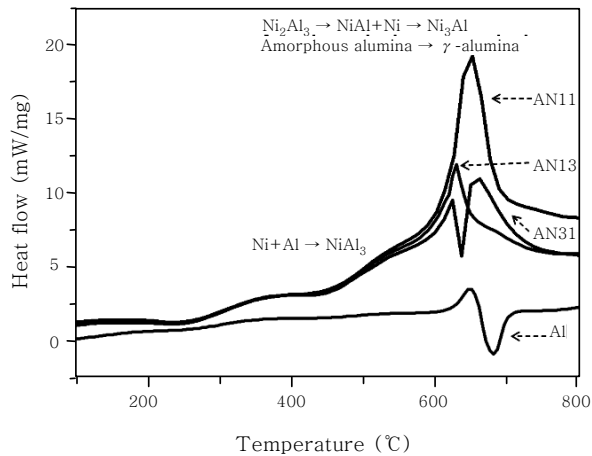


Fig. 5 Adhesive strengths of tested coating specimens under different powder preheating conditions



**Fig. 6** DSC thermograms of Al, AN11, AN31 and AN13 coating specimens

내고 있다<sup>26)</sup>. 이후 Al의 용융 온도 650 °C부근에서 비정질 알루미늄이  $\gamma$  상으로 격자변형이 이루어지며 발열 peak이 나타나는 것을 볼 수 있다. Al 코팅의 경우 단순히 알루미늄의 격자 변형에 의해 발열 에너지의 총량이 결정되는 것으로 사료된다.

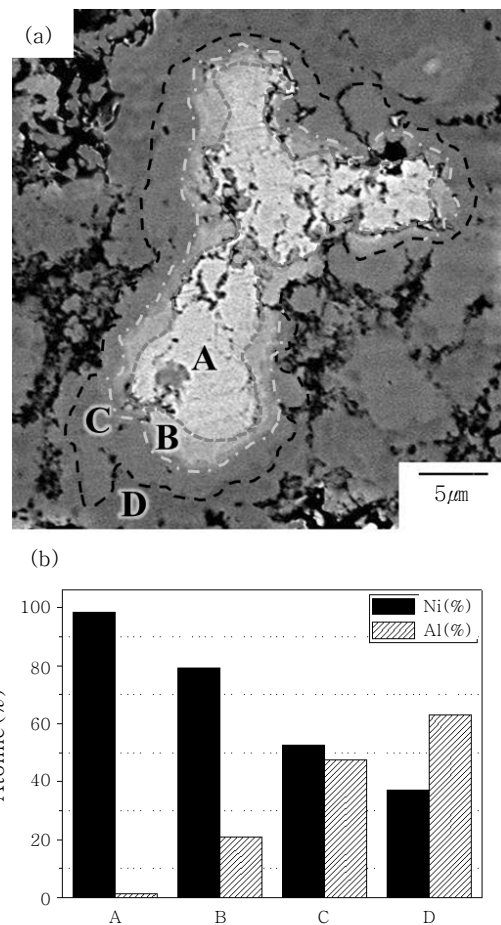
이와 달리 Al/Ni 복합코팅의 경우 성분비에 상관없이 알루미늄의 격자 변형에 따른 발열 에너지와 Al/Ni 간의 자가연소합성반응을 통해 많은 양의 발열 에너지를 방출하고 있다. 자가연소합성반응은 반응물 A와 B가 반응하여 상의 구조가 붕괴된 이후, 액상 등의 무질서한 상태를 거치면서 순간적으로 화합물  $A_xB_y$ 를 형성하면서 생성물과 반응물 간의 엔탈피 차이로 반응열이 발생하는 과정을 말한다. 이 때 화합물 형성에 따른 높은 생성열로 인하여 여러 종류의 화합물이 연속적으로 형성될 수 있다. 이 경우 한번 점화 시 많은 양의 발열 에너지가 방출하게 된다. Cu 라이너에 접합 시킨 Al/Ni 또한 자가연소합성반응을 나타낸다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b) EDS 값을 비교하여 분석할 경우 A지점 Ni를 중심으로  $Ni_3Al$ ,  $NiAl$ ,  $Ni_2Al_3$ 가 생성 되었다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 반응은 Al과 Ni간의 자가연소합성반응은 Al의 확산계수가 Ni보다 약 2배가량 높아 Ni 주변부로 Al이 확산해가며 일어나는 것으로 사료된다. 400 °C까지 점진적으로  $NiAl_3$  금속간 화합물을 형성해 가며 발열반응이 일어나며, 이후 Al의 용융온도 부근인 650 °C에서 Al의 용융으로 무질서한 상태가 형성되고, 용융된 Al이 코팅층 내의 Ni과의 접촉면적이 증가하게 된다. 접촉면적이 증가한 Al과 Ni은 급격하게 금속간 화합물을 형성하며 발열반응이 나타난다. 이는 Table 2와 같이 Al과 Ni이 반응하여 생성물인  $Ni_2Al_3, NiAl, Ni_3Al$ 을 연속적으로 생성하는 것으로써 이때 생성물과 반응물 간의 엔탈피 차이로 인해 반

**Table 2** Heat of formation calculated for Ni-Al intermetallic compounds (kJ/mole) (- : Exothermic, + : Endothermic)

| From \ To                       | NiAl <sub>3</sub> | Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> | NiAl    | Ni <sub>3</sub> Al |
|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------|--------------------|
| Ni + Al                         | -150.62           | -282.42                         | -118.40 | -153.13            |
| NiAl <sub>3</sub>               | -                 | -131.79                         | -68.19  | -103.92            |
| Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> | -                 | -                               | -24.26  | -59.00             |
| NiAl                            | -                 | -                               | -       | +2.51              |

응열이 방출되게 된다<sup>18-19,27-29)</sup>.

결과적으로 Al/Ni간의 자가연소합성반응에 의한 Al/Ni 복합코팅이 순수 Al 코팅에 비해 발열 에너지가 더 많이 방출되는 것으로 사료되며, Al과 Ni이 반응할 수 있는 양과 표면적이 가장 많은 비율인 AN11이 시차주사 열량 측정법 데이터 상에서 높은 발열 에너지를 나타냈다. 그러나 Fig. 7에서 반응 이후 AN11의 Ni 주변부를 살펴보면 발열에너지가 가장 높았던 AN11에서



**Fig. 7** (a) SEM micrograph of Ni-Al intermetallic compounds after SHS reaction and (b) EDS of Ni-Al intermetallic compounds

도 완전히 자가연소합성반응을 일으키지 못하고 잔존해 있는 순수한 Ni이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Al과 Ni간의 반응 면적이 충분히 넓지 못하기 때문에 순간적인 자가연소합성반응 과정에서 모든 Al과 Ni이 반응하지 못하고, Ni이 남아있는 것으로 사료되며, 반응성 코팅층의 순간적인 발열에너지를 높이기 위해 Al과 Ni간의 반응면적을 높일 필요가 있는 것으로 생각할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 Al 분말의 밀도 및 크기를 고려하여 동일한 비행 궤적을 갖도록 Ni 분말의 크기를 조절하여 함께 블렌딩(blending)한 뒤 저온분사공정을 이용해 적층하고 미세조직 및 특성을 분석하였으며, Al과 Ni의 비율에 따른 발열량 차이를 살펴보았다. 그 결과 Al 분말과 Ni 분말의 비례가 적절히 잘 제어되어 두 성분이 균일하게 분산된 코팅 조직을 얻을 수 있었으며, 분말 예열에 따라 적층 효율이 증가하는 것을 확인하였다. 또한 예열을 통한 분말의 열적연화 현상에 의해 접합강도 또한 증가됨을 확인하였다. 200 °C까지는 분말 예열을 진행하더라도 Al과 Ni간의 반응을 통해 금속간 화합물이 형성되지 않아 라이너의 폭발시의 발열량의 차이가 없었다.

다음으로 시차주사 열량 측정법을 이용하여 발열량 측정 및 미세조직 분석을 진행한 결과 Al/Ni 코팅의 경우 Al/Ni 간의 확산을 통한 금속간 화합물 형성을 시작으로 자가합성반응을 통해 짧은 시간 내에 연속적인 금속간 화합물을 형성을 하면서 높은 발열에너지를 발생시키는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 자가합성 반응을 통해 Al/Ni 코팅의 발열량이 Al 코팅보다 더 많다는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 Al/Ni 코팅 시 블렌딩(blending) 한 비율에 따라 발열에너지의 차이가 발생하는데 AN11 조건의 경우 금속간 화합물 형성할 수 있는 표면적이 가장 넓으며, 반응 할 수 있는 양도 가장 많기 때문에 Al : Ni = 1 : 1의 경우가 최적의 발열량을 낼 수 있는 비율로 사료된다. 또한 자가연소합성반응 이후에도 잔존해있는 순수한 Ni이 존재하고 있는 것으로 보아 반응성 코팅층의 폭발력을 높이기 위해서는 Al과 Ni간의 반응 면적을 넓힐 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 정부의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.(No. 111115-911004001)

#### Reference

1. J.F. Molinari et al. : Finite element simulation of shaped charges, *Finite. Elem. Anal. Des.*, **38** (2002), 921-936
2. C. Feng et al. : Aspects of dynamic recrystallization in shaped charge and explosively formed projectile devices, *Metall. Mater. Trans. A.*, **27A** (1996), 1773-1778
3. J. Wu et al. : The rebound phenomenon in kinetic spraying deposition, *Scripta Mater.*, **54** (2006), 665
4. G. Bae et al. : Bonding features and associated mechanisms in kinetic sprayed titanium coatings, *Acta Mater.*, **57** (2009), 5654
5. G. Bae et al. : General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings, *Acta Mater.* **56** (2008), 4858
6. R.C. Dykhuizen et al. : Gas dynamic principles of cold spray, *J. Therm. Spray. Technol.*, **7** (1998), 205
7. A.P. Alkhimov et al. : The features of cold spray nozzle design, *J. Therm. Spray. Technol.*, **10** (2001), 375
8. T. Schmidt et al. : Development of a generalized parameter window for cold spray deposition, *Acta Mater.*, **54** (2006), 729-742
9. Kicheol Kang et al. : Deposition Behavior and Properties of Carbon Nanotube Aluminum Composite Coatings in Kinetic Spraying Process, *Journal of KWJS*, **26**(2008), 5 (in Korean)
10. Kicheol Kang et al. : Oxidation Effects on the Critical Velocity of Pure Al Feedstock Deposition in the Kinetic Spraying Process, *Journal of KWJS*, **25** (2007), 4 (in Korean)
11. W.Y. Li et al. : Optimal design of a novel cold spray gun nozzle at a limited space, *J. Therm. Spray. Technol.*, **14** (2005), 391
12. J. Wu et al. : Measurement of particle velocity and characterization of deposition in aluminum alloy kinetic spraying process, *Appl. Sur. Sci.*, **252** (2005), 1368
13. J. Pattison et al. : Standoff Distance and Bow Shock Phenomena in the Cold Spray Process, *Sur. Coat. Technol.*, **202** (2008), 1443
14. Assadi : Bonding mechanism in cold gas spraying, *H. Acta Mater.*, **51** (2003), 4379-4394
15. Eui Hyuk Kwon et al. : Particle behavior in supersonic flow during the cold spray process, *MMI.*, **11** (2005), 377-381
16. Hyun-Boo Jung et al. : Effect of the expansion ratio and length ratio on a gas-particle flow in a converging-diverging cold spray nozzle, *MMI.* **15** (2009), 967-970
17. Jingwei et al. : Measurement of Particle Velocity and Characterization of Deposition in Aluminum Alloy Kinetic Spraying Process, *Appl Sur Sci.*, **252** (2005), 1368-1377

18. P. Swaminathan et al. : Three-dimensional Poole-Frenkel analytical model for carrier transport in amorphous chalcogenides, *J. Appl. Phys.*, **113** (2013)
19. In Jin Shon et al. : Fabrication of Ni3Al intermetallic alloy by combustion synthesis, *Korean J. Met. Mater.*, **31** (1993) (in Korean)
20. Xian-Jin Ning et al. : The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process, *Appl. Sur. Sci.*, **253** (2007), 7449-7455
21. Jae-Nam Hwang et al. : Effects of Powder Morphology and Powder Preheating on the Properties and Deposition Behavior of Titanium Coating Layer Manufactured by Cold Spraying, *J. Kor. Powd. Met. Inst.*, **5** (2012), 19 (in Korean)
22. S. Guetta et al. : Influence of Particle Velocity on Adhesion of Cold-Sprayed Splats, *J. Therm. Spray. Technol.*, **18** (2009), 331-342
23. K. Spencer et al. : The use of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys, *Sur. Coat. Technol.*, **204** (2009), 336-344
24. Juyeon Won et al. : Bonding, Reactivity, and Mechanical Properties of the Kinetic-Sprayed Deposition of Al for a Thermally Activated Reactive Cu Liner, *J. Therm. Spray. Technol.*, **23** (2014), 818- 826
25. A.M.S Hamouda et al. : Mechanical properties of aluminium metal matrix composites under impact loading, *J. Mater. Pro. Tec.*, **56** (1996), 743- 756
26. Mikhaylo A. Trunov et al. : Effect of polymorphic phase transformations in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on oxidation kinetics of aluminum powders, *Combust. Flame.*, **140** (2004), 310- 318
27. A. G. Gasparyan et al. : Macrokinetics of reaction and thermal explosion in Ni and Al powder mixtures, *Combust. Flame.*, **24** (1988), 324- 330
28. Yong Jae Cho et al. : Reaction synthesis of annealed Ni-50at%Al powder compact, *Korean J. Met. Mater.*, **49** (2011)(in Korean)
29. A. Biswas et al. : Comparison between the microstructural evolutions of two modes of SHS of NiAl: key to a common reaction mechanism, *Acta mater.*, **52** (2004), 257-270