

# NiAl/Ni 미세적층복합재료의 고속변형거동

김희연\* · 김진영\*\* · 정동석\*\*\* · M. Enoki\*\*\*\* · 홍순형\*\*\*\*

## High Strain-rate Deformation Behavior of NiAl/Ni Micro-laminated Composites

Hee-Yeoun, Kim<sup>\*</sup>, Jin-Young Kim<sup>\*\*</sup>, Dong-Seok Jeong<sup>\*\*\*</sup>, Manabu Enoki<sup>\*\*\*\*</sup> and Soon-Hyung Hong<sup>\*\*\*\*\*</sup>

**Key Words** : High Strain-rate Deformation, NiAl/Ni, Laminated Composite, Reaction Synthesis, Split Hopkinson Pressure Bar

### ABSTRACT

High strain-rate deformation behavior of NiAl/Ni micro-laminated composites was characterized by split hopkinson pressure bar(SHPB). When the strain rate increased, the compressive stress of micro-laminated composites were increased a little. When the intermetallic volume fraction increased, the compressive stress of micro-laminated composites increased linearly irrespective of strain rate. Absorbed energy during the quasi-static and SHPB tests was calculated from the integrated area of stress-strain curve. Absorbed energy of micro-laminated composites deviated from the linearity in terms of the intermetallic volume fraction but merged to the value of intermetallic as the strain rate increased. This was due to high tendency of intermetallic layer for the localization of shear deformation at high strain rate. Microstructure showing adiabatic shear band(ASB) confirmed that the shear strain calculated from the misalignment angle of each layer increased and ASB width decreased when the intermetallic volume fraction. Simulation test impacted by tungsten heavy alloy cylinder resulted that the absorbed energies multiplied by damaged volume of micro-laminated composites were decreased as the intermetallic volume fraction increased. Fracture mode were changed from delamination to single fracture when the intermetallic volume fraction and this results were good matched with previous results[1] obtained from the fracture tests.

#### 기호설명

SHPB : Split Hopkinson Pressure Bar  
VHP : Vacuum Hot Press  
ASB : Adiabatic Shear Band  
SHS : Self-propagating High-temperature Synthesis

\* 박사과정, 한국과학기술원 신소재공학과  
\*\* 선임연구원, 국방과학연구소  
\*\*\* 부교수, 창원기능대학 재료과  
\*\*\*\* 조교수, 동경대 재료공학과  
\*\*\*\*\* 교수, 한국과학기술원 신소재공학과

#### 1. 서론

최근 NiAl 금속간화합물은 탄성계수와 강도가 높으며 creep 특성이 우수하여 많은 산업적 응용이 기대되에도 불구하고, 상온에서 인성이 낮고 가공성이 좋지 않은 단점에 의해 상용화에 어려움이 많았다. 이러한 금속간화합물의 단점을 극복하기 위해 금속간화합물/금속 적층복합재료의 새로운 개념의 신소재가 제안되고 있으며, 이로부터

금속간화합물의 장점인 높은 강도와 탄성계수 및 creep 특성을 유지하면서 금속 층의 존재로 파괴인성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 재료의 개발이 가능하게 되었다.

종래에는 금속복합재료를 무가압침법, 가압주조법, 분말야금법, 스퍼터링법 등으로 제조하였으나 생산단가가 높고 대형 부품을 만드는 것이 힘든 단점이 있었으나, NiAl/Ni 계 적층복합재료는 금속 박판을 적층하여 고온에서 자전고온반응(SHS)에 의해 금속간화합물 층을 형성하는 방법을 적용함으로써, 사용박판의 두께의 조절에 의해 미세조직과 기계적 특성을 제어할 수 있는 장점이 있다. NiAl/Ni 계 적층복합재료는 군사용 방탄재료, 우주항공용 고온재료, 자동차용 흡음재료 등 다양한 분야로의 응용범위를 넓히고 있으나, 재료에 가해지는 변형률속도 및 미세조직에 따른 기계적 특성의 거동이 아직 명확하게 밝혀져 있지 않아서 이와 관련된 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 NiAl/Ni 계 적층복합재료의 미세조직에 따른 고속변형거동의 변화를 관찰하기 위하여 금속간화합물의 부피분율을 달리한 시편을 제조하고, 이전 연구[1]에서 얻어진 정적상태의 기계적 물성을 기초로 변형률속도에 따른 기계적 특성의 변화를 관찰하기 위하여 Quasi-static 압축 시험 및 SHPB 를 이용한 고속압축변형시험을 수행하였다. 고속변형시 흡수에너지, ASB 두께, 파괴모드의 변화를 분석하여 적층복합재료의 미세조직에 따른 고속변형거동을 해석하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 적층복합재료 제조

실험에 사용된 금속박판은 Goodfellow 사의 99.0% 이상 순도의 Ni(75, 50, 25  $\mu\text{m}$ ), Al(10  $\mu\text{m}$ ) 박판을 사용하였으며, 각 두께비별(Ni:Al=7.5:1, 5:1, 2.5:1)로 Ni 과 Al 박판을 교대로 적층하였다. 적층된 박판은 VHP 내에서 확산접합단계, 반응단계, 가압후열처리공정에 의해 적층복합재료를 얻었으며, 얻어진 3 가지 종류의 적층복합재료의 미세조직은 Table 1.에 요약하여 나타내었다.

Table 1 Summary of microstructural factors in NiAl/Ni micro-laminated composites.

Thickne ss ratio (Ni:Al)	Final Thickness ( $\mu\text{m}$ )		Intermetallic Volume Fraction	Aluminid es phases present
	Ni	NiAl		
7.5:1	55	20	0.27	NiAl, Ni <sub>3</sub> Al
5:1	40	20	0.34	
2.5:1	12	20	0.63	

### 2.2 Quasi-static 압축시험

Quasi-static 상태의 압축시험은 5mm×5mm 크기의 실린더형태로 시편을 가공하여 Instron 4206 Machine 에서  $10^{-3}$  및  $10^{-1}$ 의 변형률속도에서 수행하였다. 이때 표면마찰에 의한 시편의 불균일 변형을 방지하기 위하여 grease 를 충분히 사용하였다. Quasi-static 실험에서 얻어진 응력-변형률 곡선은 다음식을 사용하여 진응력-진변형률 곡선으로 환산하였다.

$$\sigma = \frac{4Ph}{\pi D_0^2 h_0}, \quad \epsilon = \ln \frac{h_0}{h}$$

### 2.3 SHPB 시험

Quasi-static 실험과 동일한 시편을 사용하여 SHPB 시험을 수행하였다. 먼저 동일한 시편에 대해 gas gun 의 압력(20~50psi)에 따른 시험을 수행한 후 40psi 의 동일한 압력(40psi)에서 3 가지 종류의 시편에 대한 시험을 수행하였다. 이때 변형률속도는 gas gun 의 압력에 따라 1000~3000/s 의 범위에 있었다. 응력-변형률 곡선은 입력봉 및 출력봉에 설치된 strain gage 에서 얻어진 신호( $\epsilon_T$ ,  $\epsilon_R$ )를 아래식을 이용하여 진응력-진변형률 곡선을 얻었다.

$$\sigma_r(t) = E \frac{A_0}{A_s} \epsilon_r(t)$$

$$\epsilon_r(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R(t) dt$$

$\sigma_r(t)$ : Temporal history of stress experienced by specimen

$E$ : Elastic modulus of output bar

$A_0$ : Cross sectional area of output bar

$A_s$ : Cross sectional area of specimen

$\epsilon_r(t)$ : Transmitted strain history at output bar S.G.

$\epsilon_s(t)$ : Temporal history of specimen strain

$\epsilon_R(t)$ : Reflected strain history at input bar

$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ : Infinite wavelength wave velocity in input bar

$L$ : Initial length of specimen

(1)

그리고, 응력-변형률 곡선의 적분면적은 고속변형시 재료의 흡수에너지에 관계되므로, 재료의 최대응력을 나타내는 변형률까지의 흡수에너지를 측정하여 비교하였다.

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

위 실험과 별도로 지름 3mm 의 텅스텐 중합금 실린더를 이용하여 충격모사실험을 수행하여 실제 고속충격 상황시 재료의 미세조직변화를 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 변형률 속도의 영향

Fig. 1 에 변형률 속도에 따른 50  $\mu\text{m}$  Ni/10  $\mu\text{m}$  Al 시편의 응력-변형률 곡선을 나타내었는데, 변형률 속도가 증가할수록 강도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 재료의 강도는 가공경화, 변형률속도, 온도등에 의해 변하는데, 변형률속도가 증가할수록 재료의 강도는 아래식에 나타난 것처럼, 변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity, m)에 따라 증가한다.[2]

$$m = \left( \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon} \quad (3)$$

적층복합재료에서도 변형률 속도의 의존성을 확인하였다. 적층복합재료는 Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 고속변형시험동안 NiAl 층의 파괴로 인한 ASB가 선명히 관찰되는데, 이로부터 변형률 속도에 따른 전단밴드의 두께와 전단변형률을 아래와 같이 측정하였다.[3]

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4)$$

측정결과, 변형률 속도가 증가할수록 ASB 폭은 88, 175, 256  $\mu\text{m}$ 으로 증가하였고, 전단변형률도 11.2, 22.8, 30.4%로 증가를 확인하였다. 이는 본 적층복합재료에서 변형률속도의 증가에 따른 강도의 향상은 국부적인 변형의 증가에 의한 것으로 판단된다.

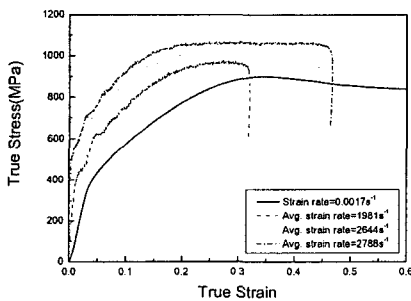


Fig. 1 SHPB test results of 50  $\mu\text{m}$  Ni/10  $\mu\text{m}$  Al specimen according to strain rate.

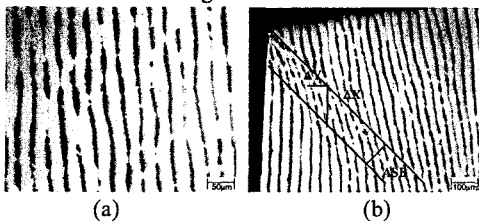


Fig. 2 Microstructures of (a) interior and (b) edge of SHPB tested specimen.

#### 3.2 금속간화합물 분율의 영향

Fig. 3 은 3 가지 종류의 시편에 대한 SHPB 시험 결과를 나타내었는데, 금속간화합물의 분율이 증가함에 따라 강도는 더 커짐을 확인하였다. 이러한 결과는 Quasi-static 물성과 동일한 경향을 보여주며, 변형률 속도와 금속간화합물의 부피분율을 동시에 고려하여 나타낸 Fig. 4 의 결과에서 알 수 있듯이 적층복합재료의 압축강도는 전반적으로 순수한 Ni 강도와 NiAl 강도의 ROM(Rule of Mixture)을 따르는 것을 확인하였다.

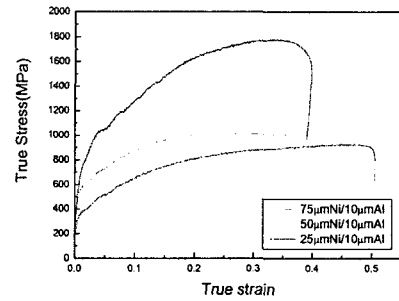


Fig. 3 SHPB test results of micro-laminated composites according to intermetallic volume fraction at constant strain rate(2500/s)

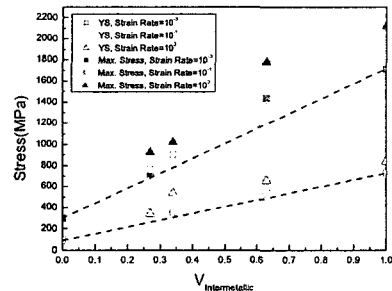


Fig. 4 Compressive strength with respect to strain rate and intermetallic volume fraction

적층복합재료의 흡수에너지를 측정하여 Fig. 5 에 나타내었는데, 낮은 변형률 속도에서 흡수에너지는 금속간화합물의 분율에 따라 큰 차이를 나타내었으나, 높은 변형률 속도에서는 흡수에너지의 편차가 상대적으로 줄어들음을 확인하였는데, 이것은 Quasi-static 변형에 비해 고속변형시 대부분의 변형은 ASB 의 생성에 의해 일어나며 금속간화합물층의 부피분율이 증가함에 따라 ASB 생성경향이 커지기 때문으로 판단된다. 이것은 Fig. 6 에 나타낸 것처럼 고속변형동안 부피분율에 따른 미세조직의 변화에서 확인할수있었다. Fig. 6 을 이용하여

금속간화합물층의 부피분율이 증가함에 따라 전단 변형률은 15, 18, 48%로 증가하였고, ASB 두께는 330, 175, 38  $\mu\text{m}$ 로 감소하였다. 이것은 금속간화합물층의 부피분율이 증가함에 따라 변형이 국부적으로 더욱 크게 일어났다는 것을 증명한다.

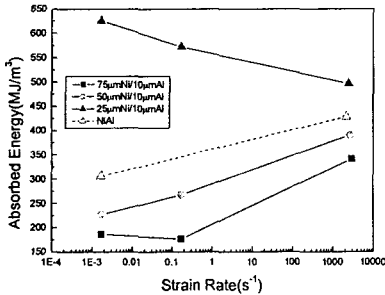


Fig. 5 Absorbed energy of microlaminated composites with respect to strain rate and intermetallic volume fraction.

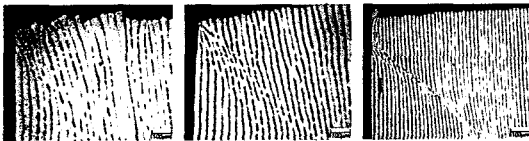


Fig. 6 Microstructures showing ASB width and shear strain as intermetallic volume fraction of microlaminated composites increased.

고속변형후 파괴된 시편의 형상은 금속간화합물의 부피분율이 증가함에 따라 변화하는데, 낮은 부피분율에서는 delamination 경향이 나타나며, 부피분율이 증가함에 따라 single fracture 경향이 나타난다. 이것은 Fig. 6에서 나타난 금속간화합물층의 국부변형의 증가에 기인한 것이다. 본 시편의 3점 굽힘시험에 의한 파괴인성 측정시 동일한 파괴모드의 양상을 나타내었는데[1], 이러한 경향은 변형률 속도가 변화더라도 동일하게 나타남을 확인하였다.

### 3.3 고속충돌모사시험 결과

텅스텐 중합금 실린더를 이용한 고속충돌모사 시험후 시편의 미세조직을 Fig. 7에 나타내었다. 금속간화합물의 부피분율이 증가함에 따라 변형된 부분의 부피가 4.97, 2.98, 1.81mm<sup>3</sup>으로 줄어들음을 확인하였다. 이러한 실험에서는 충돌체와 피충돌체의 흡수에너지가 동시에 나타나므로 응력-변형률곡선에서 피충돌체만의 흡수에너지는 도출할 수 없다. 그러나, Fig. 5에서 고속변형시 측정된 흡수에너지는 금속간화합물의 부피분율이 증가함에 따라 342, 391, 497MJ/m<sup>3</sup>로 측정되었으므로, 이러한

결과로부터 상대적으로 금속간화합물층의 부피분율이 증가함에 따라 충격에 대한 저항성이 커짐을 알 수 있고, 따라서 변형된 부피가 줄어드는 것으로 판단된다. 그러나, 실제로 방탄재료로서의 응용을 위한 재료의 최적설계를 위해서는 충격흡수에너지뿐만 아니라, 재료의 파괴형태도 동시에 고려하여야 하므로 좀 더 추가적인 연구가 필요하다.

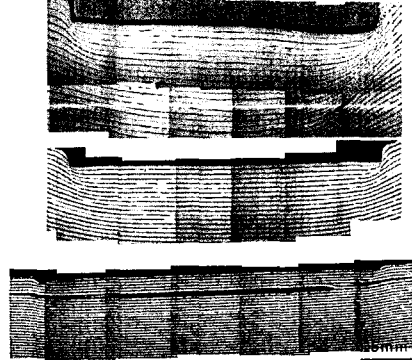


Fig. 7. Microstructures of micro-laminated composites impacted by tungsten heavy alloy cylinder.

## 4. 결론

반응합성법에 의해 제조된 NiAl/Ni 미세적층복합재료의 고속변형률 속도와 미세조직에 따른 기계적 물성의 변화를 관찰하였다. 변형률속도와 금속간화합물의 부피분율이 증가함에 따라 강도는 향상되었으나, 국부적인 변형이 더욱 크게 일어나 파괴모드의 변화가 일어남을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 한국과학기술기획평가원이 지원하는 국제공동연구과제로 수행한 것이며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 김희연, 정동석, M. Enoki, 홍순형, "Mechanical Properties of Intermetallic/Metal Micro-laminated Composites by Reaction Synthesis", 제 4회 한일복합재료 심포지움 논문집, Oct. 16, pp. 57-58, 2003.
- (2) G.E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill, pp. 306-309, 1986.
- (3) S. Liao and J. Duffy, "Adiabatic shear bands in a Ti-6Al-4V titanium alloy", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 46, No. 11, pp2201-2231, 1998.