

보론/티타늄 나노박막다층 내 이중금속간 화학반응 전파특성 해석연구

김경진^a · 박중윤^{a,*}

Computational Study of Intermetallic Reaction Propagation in Nanoscale Boron/Titanium Metallic Multilayers

Kyoungjin Kim^a · Joong-Youn Park^{a,*}

^aDepartment of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

*Corresponding author. E-mail: jypark@kumoh.ac.kr

ABSTRACT

The analytical modeling has been established on the self-propagation of intermetallic reaction in the spanwise direction of highly reactive boron and titanium nanoscale multilayers. Assuming that the reaction obeys Arrhenius kinetics, two-dimensional computations are carried out for heat and atomic species diffusion with exothermic reaction model in order to simulate the self-propagation of intermetallic reaction. The effects of bimetallic layer thickness and thickness ratio on the reaction propagation speed are tested and discussed in addition to the assessment of pre-mixing zone effects.

초 록

빠른 반응성 및 자체전파특성을 가지는 보론/티타늄 나노 다층박막구조를 대상으로 박막층 수평방향으로의 이중금속간 화학반응 및 화염 전파현상 해석 모델링을 수립하였다. 이중금속간 화학반응은 Arrhenius 반응식을 가정하여 모델링하였으며, 열 및 화학종 확산, 발열 화학반응에 따른 화염 자체전파 현상에 대하여 2차원적 전산해석을 수행하였다. 보론 및 티타늄 박막층의 두께 및 두께비 등 나노구조 형상의 영향을 비롯하여 접촉층 예혼합 정도가 화염 자체전파속도에 미치는 영향을 분석하였다.

Key Words: Intermetallic Reaction(이중금속간 화학반응), Nanoscale Multilayers(나노 박막다층구조), Flame Self-propagation(화염 자체전파), Computational Modelling(전산해석모델)

1. 서 론

금속성 나노입자 또는 나노구조 등을 기반으로 하는 나노에너지 기술분야(nanoenergetics)가 최근 들어 여러 산업분야에서 주목을 받고 있다. 특히 추진 및 방산기술에서 고에너지 물질 점화, 추진제 연소 등 여러 세부분야에서 장치 소형화

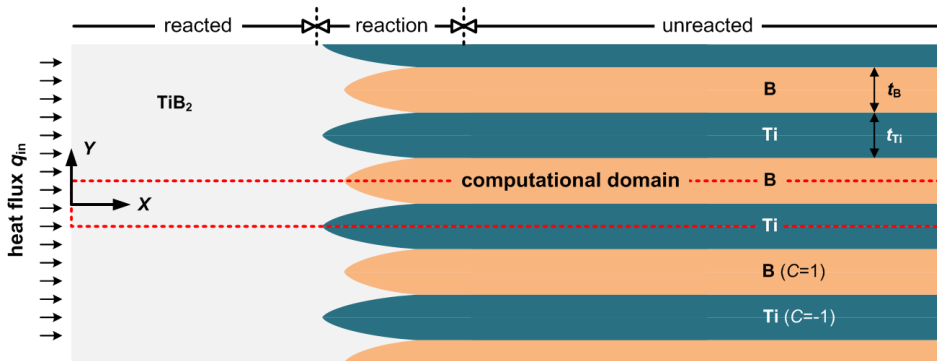


Fig. 1 Schematic on self-propagation of intermetallic reaction between binary metal multilayers of boron and titanium.

및 경량화, 반응성 및 에너지 밀도 향상과 같은 고성능화, 안전성 및 신뢰성 개선 등 여러 기술적 장점으로 활발한 관련 연구개발 활동이 진행되고 있다[1]. 이러한 나노에너지 기술의 일종으로 금속성 나노입자의 경우, 나노 알루미늄 입자를 로켓 추진제에 첨가하여 추진제 점화 및 연소특성을 개선하거나[2,3], 금속 및 산화제 나노입자 복합분체로 구성된 나노 테르밋 물질로 기존 테르밋 성능을 향상시키려는 등 많은 연구성과가 있었다[4-6].

좀 더 최근의 나노에너지 기반 기술로서 이종금속으로 구성되는 나노 박막다층구조 내 이종금속간 화학반응 현상 역시 상당한 주목을 받고 있다[7-10]. 이종금속의 나노두께 다층박막은 기관 상 기상박막증착 등 MEMS 제작공정으로 이루어짐이 일반적이다[7]. 나노 박막구조를 갖는 이종금속간 화학반응은 높은 발열을 동반하며 빠른 반응성 및 자체전파특성을 보인다. Gavens 등[8]과 Besnoin 등[9]은 알루미늄/니켈(Al/Ni) 박막 다층구조를 대상으로 실험적 연구 및 1차원적 간소화 모델을 이용한 이론적 연구를 수행하였으며, Al/Ni 이종금속간 화염의 자체전파속도가 10 m/s 이상에 이르는 것을 보였다.

이러한 이종금속 나노 다층구조를 적용하여 고에너지 물질 점화장치의 성능 향상 가능성에 대한 연구들이 진행되었다[11-14]. Baginski 등[11]은 보론/티타늄 나노 다층구조의 점화장치 적용을 제안하고, 이에 대한 시험적 연구를 수행하였다. 또한 새로운 점화장치 개념에 대하여

Kim[13]과 Choi 등[14]은 기폭회로와 연계하여 각각 1차원 및 3차원 비정상 전산해석을 수행하였다.

앞서 소개된 선행연구에서 보듯이 현재까지는 Al/Ni 나노 다층구조를 대상으로 주로 시험적, 해석적 연구가 수행되었다. 보론/티타늄 이종금속 다층박막구조에 대해서는 최근 들어 빠른 점화특성 및 높은 화학반응성 등 장점으로 초소형 점화장치 응용 가능성이 대두되고 있다[12,15]. 하지만 아직 기초적 연구가 부족하고 기본적인 해석모델링 연구의 필요성이 있는데, 최근 Kim[16]은 다층구조 내 수직방향으로의 화학반응 자체전파에 대한 1차원적 전산해석을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 나노두께의 보론/티타늄 나노박막다층구조를 대상으로 하여 수평방향의 이종금속간 화학반응 전파특성에 관한 물리적 모델링 및 2차원적 전산해석을 시도하였다.

2. 박막다층구조 화염전파 해석모델

본 연구의 모델링 및 전산해석 대상은 보론/티타늄(B/Ti) 이종금속 나노 다층박막구조이며, 그 구체적 형상은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 나노두께의 보론(B)과 티타늄(Ti) 재질 박막이 교차하여 적층된 나노구조물이다. 보론과 티타늄 간의 이종금속간 화학반응에 의한 화염의 자체전파는 박막다층의 수평방향(X방향)으로 진행된다. 여기서 수직방향(Y방향)으로의 이종금속 박막다

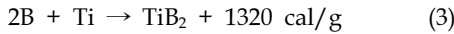
층의 반복성 및 대칭성을 이용한다면, Fig. 1에서 표시한 것처럼 2차원적 모델링 및 해석영역은 B/Ti 단일 박막층의 절반을 대상으로 할 수 있다. 이에 따라 각 금속 단일층 중심을 가르는 해석영역 수평면에는 대칭 경계조건이 적용된다.

이종금속간 화학반응에 따른 다층구조 내 발열을 고려한 비정상 에너지 방정식 및 발열량 산출은 다음과 같이 표현된다[5].

$$\frac{\partial(\rho_i c_{pi} T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T) + \dot{q}_R \quad (1)$$

$$\dot{q}_R = -\rho_i \Delta H_f \frac{\partial C^2}{\partial t} \quad (2)$$

위의 식에서 발열량은 화학종 농도(C)의 시간 변화율에 비례함을 가정하였으며, ΔH_f 는 B/Ti 화학반응열(1320 cal/g 또는 5.52 MJ/kg)이다. 각 금속 박막층의 질량밀도(ρ_i), 비열(c_{pi}), 열전도도(k_i) 등 물성치들은 보론($i=B$)과 티타늄($i=Ti$) 층에 대하여 온도의 함수로서 주었다. 여기서 해당하는 B/Ti 화학반응은 다음과 같다.



이 종금속간 화학반응은 Arrhenius 반응식을 따른다고 가정하였으며, 금속 박막층간의 양방향 원자 확산에 따른 화학종 농도는 Eq. 4의 확산방정식 및 확산계수(D)로 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (4)$$

$$D = D_0 \exp(-E_a/RT) \quad (5)$$

각 금속층에 대한 화학종 농도로서 순수 보론은 $C = 1$, 순수 티타늄은 $C = -1$ 로 정의하였으며, 이붕화티타늄(TiB_2)으로의 화학반응이 진행된다면 그 값이 0에 접근하게 된다. 이에 따라 두 금속 박막층의 접촉면에서 예혼합(pre-mixing)이 없다면 화학종 농도의 초기조건은 박막다층 수평방향으로 최대 1, 최소 -1의 단위 계단함수

형태로 표현된다.

이종금속간 화학반응 계산에 필요한 활성화 에너지(E_a) 및 전지수인자(pre-exponential factor, D_0) 값들이 비교적 잘 확립된 Al/Ni 화학반응 연구에 비교하여, B/Ti 화학반응의 경우에는 해당 데이터가 상대적으로 잘 알려져 있지 않다. B/Ti 나노박막다층을 이용하는 착화장치의 선행 연구[13,14]에서는 Al/Ni 화학반응에 해당하는 데이터를 이용한 바도 있지만, 나노 다층구조 내 화학반응 점화 및 자체전과 특성은 이러한 데이터에 상당히 민감하게 영향을 받는다. 이 연구에서는 B/Ti 이종금속 화학반응의 활성화에너지는 Pacheco[17]의 B/Ti 혼합분말 반응 자체전과 측정시험에서, 그리고 전지수인자는 Tikekar[18]의 시험연구에서 Darken 공식으로 얻은 값들을 피팅하여 구하였는데, 이러한 데이터를 정리하면 $E_a = 65.2 \text{ kJ/mol}$, $D_0 = 1.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.

이종금속간 화학반응의 점화는 Fig. 1에 도시된 바처럼 다층구조의 한쪽 면에서 일정시간 동안 열유속을 적용하여 모사하였는데, 인근 다층구조의 온도가 일정 이상 유지되면 B/Ti간 화학반응이 시작된다. 적용된 점화 시작조건으로 모든 케이스에 대하여 30 GW/m^2 의 열유속이 초기시간부터 $0.5 \mu\text{s}$ 동안 지속되도록 설정하였다. Al/Ni 박막구조 대상의 타 연구[9]에서는 점화 조건으로 일정 이상의 온도를 경계조건으로 주었는데, 이보다는 열유속 조건이 레이저 또는 브릿지 점화 등 실제 점화방식과 더 일치한다고 판단된다. 한편 초기온도는 모든 영역에서 300 K로 주었다.

이러한 일련의 모델링에 기반을 두어 B/Ti 다층구조 내 이종금속간 화학반응 점화 및 자체전과 현상 분석을 위한 온도 및 화학종 농도의 비정상 2차원적 해석계산을 다물리 전산해석 패키지인 COMSOL MULTIPHYSICS 3.1을 이용하여 수행하였다.

3. 전산해석 결과 및 고찰

이 연구의 전산해석 대상은 무한히 반복되는

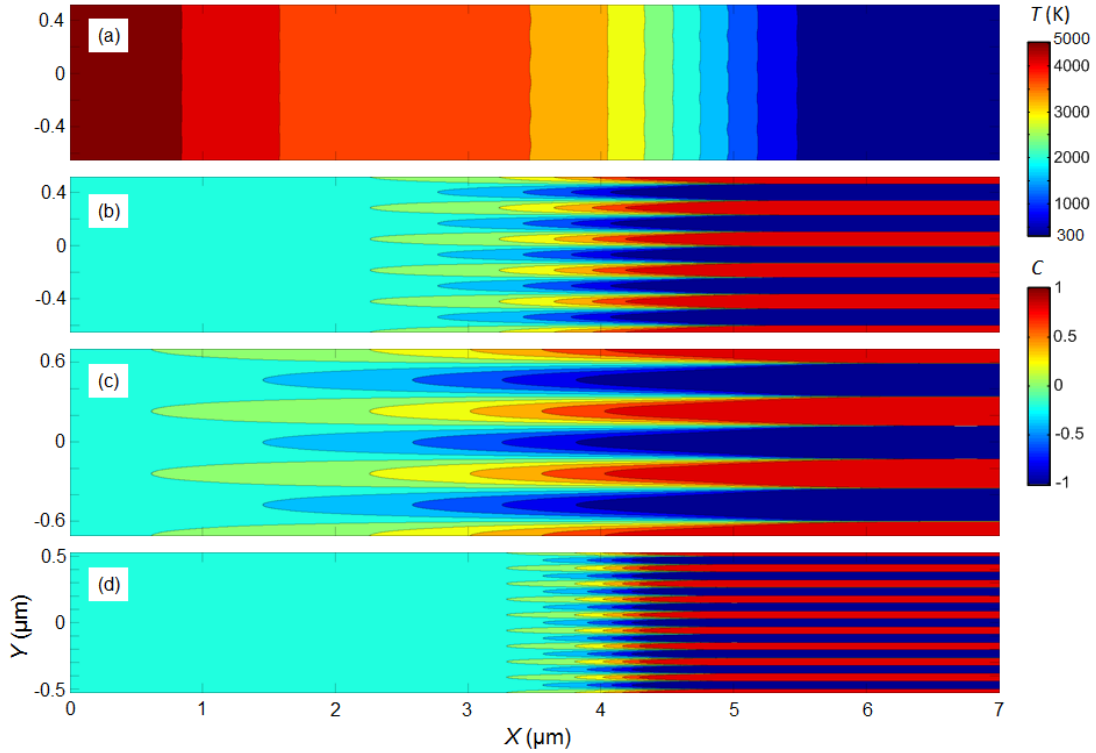


Fig. 2 Contours of temperature (a) and B/Ti species concentration (b, c, d) in nano-sized binary metallic multilayers: (a) and (b) case of $t_B = 110$ nm and $t_{Ti} = 125$ nm at $t = 0.5$ μ s; (c) case of $t_B = 220$ nm and $t_{Ti} = 250$ nm at $t = 1.0$ μ s; (d) case of $t_B = 55$ nm and $t_{Ti} = 62.5$ nm at $t = 0.25$ μ s.

B/Ti층 다층구조에서 박막층 수평방향으로의 이중금속간 발열 동반 화학반응 및 화염 자체전파 현상이다. Eq. 3에 나타난 B/Ti 화학반응의 2:1 몰비 및 각 금속 질량밀도 등을 고려하면 B/Ti 박막층 두께비는 약 $t_B : t_{Ti} = 1:1.165$ 이다. Baginski 등[11]의 선도적 착화장치 시험연구에서는 B/Ti 박막층 두께를 각각 220 nm 및 250 nm로 설정하였다. 보론이 약간 과다한 이 두께비(1:1.136)는 앞서의 B/Ti 2:1 몰비 해당 두께비보다 약간 낮기는 하지만, 본 연구에서도 보론 및 티타늄 박막층 두께를 각각 110 nm 및 125 nm로 하여 기본 형상조건으로 삼았다.

따라서 기본 형상조건에 대한 계산영역은 Y방향으로 각 박막층 절반씩을 포함하는 117.5 nm이다. 화염 자체전파는 반무한영역으로 진행되는 가정에 따라 X방향 계산영역 길이는 10 μ m로 충분히 길게 주었으며, 그 끝단을 단일 경계

조건으로 처리하였다. 격자 민감도 시험을 진행하여 80×500 정렬격자가 계산영역 차분에 충분함을 확인하였으며, 화학반응 시 화학종 농도가 가파르게 변하는 이중금속 접촉면 인근에 Y방향 격자를 좀 더 조밀하게 배치하였다.

기본 형상조건에 대하여 이중금속간 화학반응 접화 이후 형성된 화염의 전파특성이 Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)에 0.5 μ s 시간의 온도 및 화학종 농도 분포로서 나타나 있다. 앞서 언급한 바처럼 실제 해석영역은 B/Ti 단일 복합층의 절반이지만, 해석결과 관찰의 편의성을 위하여 여러 박막 복합층 영역에 대하여 계산결과를 표현하였다.

화학종 농도 분포를 통해 이중금속간 화학반응이 두 박막층 접촉면에서 박막층 중심으로 퍼져나가며 앞으로 전진함을 볼 수 있으며, 화염 영역 두께는 최소 1 μ m에서 최대 2 μ m까지 계산되었다. 온도장은 박막다층 수직방향으로 상당

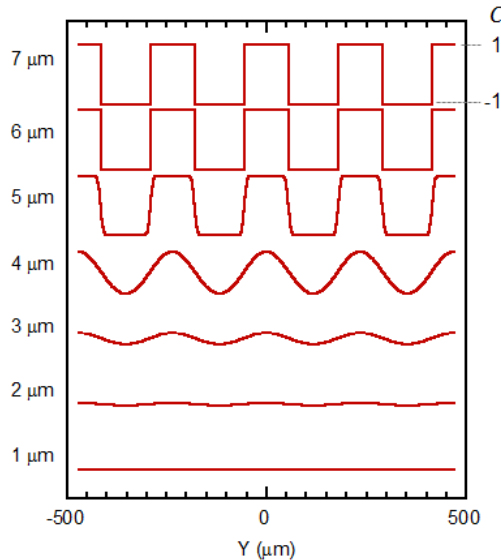


Fig. 3 Spatial variation of species concentration in B/Ti multilayers of 110 and 125 nm thickness for 7 spanwise locations at 0.5 μ s.

히 균일한데, 이는 나노 두께의 수직방향으로의 금속 내 지배적 열전도에 의함이다. 화염 영역의 상류 쪽에 관찰되는 예열영역(pre-heating zone)은 전파되는 화염 내 화학반응 도달 직전 영역에서 이중금속 접촉면에서 원자 확산에 충분한 온도를 확보하기에 화염 자체전파에 중요한 역할을 한다. Fig. 3에는 동일 시간대에 7개 수평방향 위치에서 수직방향으로의 화학종 농도 변화가 나타나 있다. 2 μ m 위치 전에는 이중금속간 반응이 거의 완결되었으며, 5 μ m 위치 후에는 아직 화염전파가 도달하지 않았는데, 그 사이 영역에서 반응이 활발히 진행되는 화염영역이다.

나노 박막다층구조에서 이중금속간 반응에 의한 화염전파 특성은 박막층 두께에 따라 그 전파성이 크게 영향을 받는다. Fig. 2(c) 및 Fig. 2(d)에는 두께비를 동일하게 유지하면서 박막층 두께를 각각 두 배 및 0.5배로 한 경우에 대한 해석결과를 보여준다. 두 경우 모두 화염전파가 3-4 μ m 위치를 통과할 때인 1 μ s 및 0.25 μ s 시간대의 화학종 농도분포이다. 박막층 두께가 작아지면 반응성이 증가함에 따라 화염 자체전파속도가 증가하며, 화염영역이 좁아짐이 관찰된다.

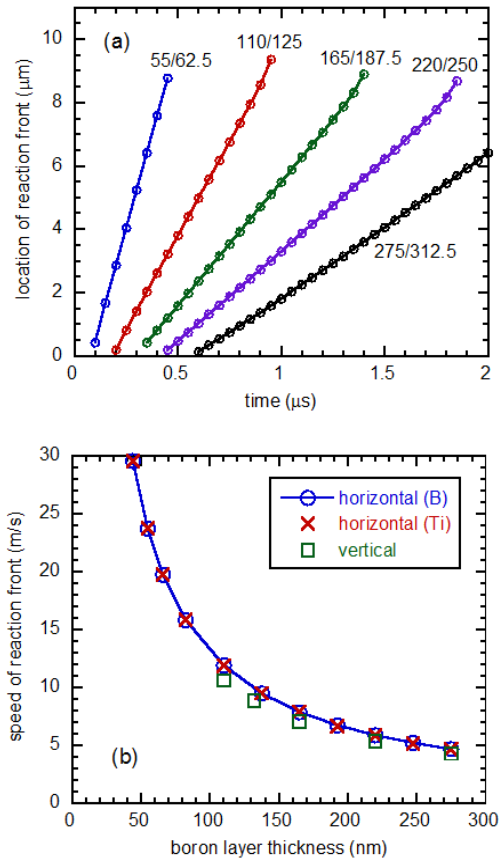


Fig. 4 Effects of B/Ti layer thickness on location (a) and speed (b) of reaction propagation front. All cases have identical B/Ti thickness ratio of 1:1.165.

이러한 박막층 두께 변화에 따른 영향을 자세히 관찰하기 위하여 동일 두께비 조건에서 다섯 박막층 두께 경우의 화염 전파위치를 찾아 Fig. 4(a)에 나타내었다. 박막층이 얇아지면 화염전파가 시작되는 시간, 즉 점화시간이 짧아짐을 관찰할 수 있으며, 기준 형상조건(110 nm/125 nm)의 경우 점화시간이 약 0.2 μ s이다. 반대로 박막층 두께가 커지면 점화가 상당히 지연됨을 알 수 있다. 화염 전파위치의 선형성으로 보아 일정한 전파속도를 동반하는 화염 자체전파 현상이 성립됨이 판단된다. 다만 박막층 두께가 큰 경우(220 nm/250 nm 이상)에는 계산영역 끝 무렵에 선형성이 약간 어긋나는데, 이는 예열 및 화학반

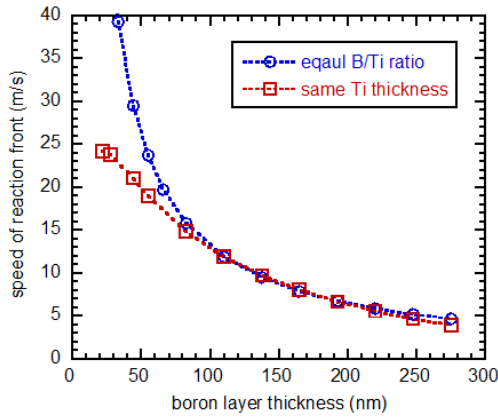


Fig. 5 Effects of B/Ti layer thickness ratio on speed of reaction propagation front. The cases of equal Ti thickness (125 nm) are compared with the cases of identical thickness ratio at 1:1.165.

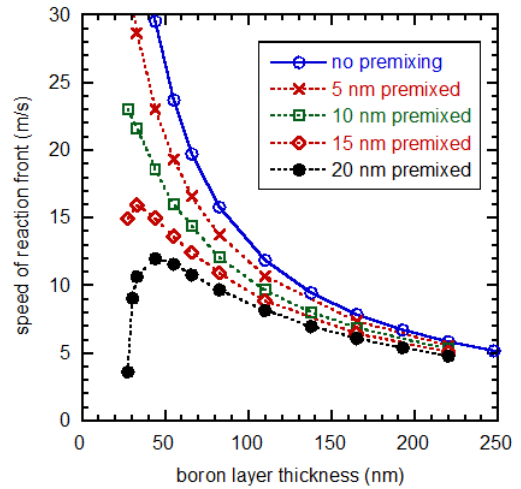


Fig. 6 Effects of premixing zone width on speed of reaction propagation front. All cases have identical B/Ti thickness ratio of 1:1.165.

응 영역이 상당히 길어지며 끝단의 임의적 단일 조건 영향이 나타나기 때문이다.

화염 전파위치의 선형적 시간 변화 기울기는 화염 전파속도이며, 끝단 단일조건 영향이 나타나는 시간대를 제외하여 선형회기분석으로 박막층 두께에 따른 화염 전파속도를 Fig. 4(b)와 같이 구하였다. 참고로 화염 전파위치는 각 금속 박막층 중심선에서 화학종 농도가 +0.5(보론) 또는 -0.5(티타늄)에 도달하는 지점을 기준으로 하였는데, 이 그래프에서 보는 바처럼 두 기준에 따른 결과가 동일하다. 기준 형상조건에서 화염 전파속도는 약 12 m/s에 달하며, 나노 박막층이 얇아지며 그 전파속도가 상승한다. 이는 매우 짧은 점화 지연과 더불어 나노에너지 구조체의 효율성을 보여주어, 초소형 점화장치 성능 개선 등에 유용할 수 있다.

선행연구[16]에서는 B/Ti 박막다층구조 내 수직방향으로의 이중금속간 화학반응 자체전파에 대한 1차원적 전산해석을 수행하였는데, 그 수직방향 화염 전파속도 결과를 현 연구의 수평방향 경우와 Fig. 4(b)에서 비교하였다. 두 방향 모두 화염 전파속도의 차이가 별로 없었는데, 이는 나노 다층구조에서 박막층 두께가 화학반응의 반응성을 결정하는 주요 요인임을 의미한다.

동일한 두께비를 유지하며 B/Ti 복합층 두께 변화가 화염 전파속도에 주는 영향에 대비하여, Fig. 5에서는 티타늄 박막층 두께를 125 nm로 고정하여 보론 박막층 두께만을 조정하였을 때 화염 전파속도의 변화를 살펴보았다. 나노 복합층이 상대적으로 두꺼우면 두께비가 2:1의 B/Ti 몰비에서 벗어나더라도 전파속도에 큰 영향이 없다. 하지만 복합층의 두께가 100 nm 정도 이하로 얇으면 두께비가 이상적인 B/Ti 몰비에서 멀어짐이 전파속도에 큰 영향을 미치고 있어, 매우 얇은 나노 다층구조에서는 이상적인 B/Ti 몰비를 유지함이 중요하다고 판단된다.

지금까지의 해석에서는 B/Ti 접촉면에서 금속층간 예혼합 효과가 없다고 가정하였으나, 실제 나노 다층구조 제작공정에서는 어느 정도의 예혼합이 일어날 수 있다. 이러한 효과가 화염 전파속도에 미치는 영향을 보기 위하여, B/Ti 접촉면에서 $\pm t_m$ 의 두께에 해당하는 예혼합 영역폭에 대하여 다음과 같은 공식을 이용하여 화학종 농도 초기조건에 예혼합 정도를 반영하였다.

$$C_0(y) = \begin{cases} -1, & -t_T/2 < y < -t_m \\ \sin(\pi y/2t_m), & -t_m < y < t_m \\ 1, & t_m < y < t_B/2 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 y 는 B/Ti 접촉면을 기준으로 하는 박막다층 수직방향 좌표이다. 동일한 두께비를 유지하며 예혼합 영역폭을 $t_m = 5-20$ nm로 변화시키면서 화염 전파속도를 구하였으며, Fig. 6에서 예혼합이 존재하지 않는 경우와 비교하였다. 접촉면에서의 예혼합 정도가 커지면서 나노 다층 구조의 반응성과 화염 전파속도가 낮아진다. 특히 예혼합 영역폭이 커지면서 복합층이 100 nm 정도 이하로 얇아지면 오히려 화염전파속도가 감소하고 있다. 이는 예혼합 정도에 따라 최고 화염 전파속도가 도출되는 B/Ti 박막층 두께 및 두께비가 존재함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 보론 및 티타늄 나노 박막다층 구조 내 이중금속간 화학반응 점화 및 화염 자체전파 현상을 대상으로 모델링 및 2차원적 전산해석을 수행하였다. 해석 결과, 박막층 수평방향으로의 화염 전파는 1 μ s 이내의 매우 빠른 점화 반응성과 10 m/s 정도의 높은 자체전파속도가 가능함을 보였다. 한편, 동일 박막층 두께에서는 수직방향 화염 전파속도와는 큰 차이가 없음을 밝혔다. B/Ti 박막층의 두께 및 두 금속층간 두께비에 따라 자체전파속도가 매우 민감하게 변화하며, 금속간 접촉면의 예혼합 정도에 따라서도 큰 영향을 받는다. 따라서 최적 반응성을 얻기 위해 각 금속층 두께 및 예혼합도를 세밀히 고려할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문이다.

References

1. Dreizin, E.L., "Metal-Based Reactive Nanomaterials," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 141-167, 2009.
2. Armstrong, R.W., Baschung, B., Booth, D.W. and Samirant, M., "Enhanced Propellant Combustion with Nanoparticles," *Nano Letters*, Vol. 3, pp. 253-255, 2003.
3. Yetter, R.A., Risha, G.A. and Son S.F., "Metal Particle Combustion and Nanotechnology," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, pp. 1819-1838, 2009.
4. Bockmon, B.S., Pantoya, M.L., Son, S.F., Asay, B.W. and Mang, J.T., "Combustion Velocities and Propagation Mechanisms of Metastable Interstitial Composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, pp. 064903-1-7, 2005.
5. Wilson, D.E. and Kim, K., "A Simplified Model for the Combustion of Al/MoO₃ Nanocomposite Thermites," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, A.L., U.S.A., AIAA 2003-4563, July 2003.
6. Son, S.F., Asay, B.W., Foley, T.J., Yetter, R.A., Wu, M.H. and Risha, G.A., "Combustion of Nanoscale Al/MoO₃ Thermite in Microchannels," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, pp. 715-721, 2007.
7. Adams, D.P., "Reactive Multilayers Fabricated by Vapor Deposition: A Critical Review," *Thin Film Solids*, Vol. 576, pp. 98-128, 2015.
8. Gavens, A.J., Van Heerden, D., Mann, A.B., Reiss, M.E. and Weihs, T.P., "Effect of Intermixing on Self-Propagating Exothermic Reactions in Al/Ni Nano-Laminate Foils," *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, pp. 1255-1263, 2002.
9. Besnoin, E., Cerutti, S., Knio, O.M. and

1. Dreizin, E.L., "Metal-Based Reactive

- Weih, T.P., "Effect of Reactant and Product Melting on Self-Propagating Reactions in Multilayer Foils," *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 9, pp. 5474-5481, 2002.
10. Gachon, J.C., Rogachev, A.S., Grigoryan, H.E., Illarionova, E.V., Kuntz, J.J., Kovalev, D.Yu., Nosyrev, A.N., Sachkova, N.V. and Tsygankov, P.A., "On the Mechanism of Heterogeneous Reaction and Phase Formation in Ti/Al Multilayer Nanofilms," *Acta Materialia*, Vol. 53, pp. 1225-1231, 2005.
11. Baginski, T.A., Taliaferro, S.L. and Fahey W.D., "Novel Electro-Explosive Device Incorporating a Reactive Laminated Metallic Bridge," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 1, pp. 184-189, 2001.
12. Tanaka, S., Kondo, K., Habu, H., Itoh, A., Watanabe, M., Hori, K. and Esashi, M., "Test of B/Ti Multilayer Reactive Igniters for a Micro Solid Rocket Array Thruster," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 144, pp. 361-366, 2008.
13. Kim, K., "Numerical Modeling of Thermal Characteristics in a MEMS-Based Micro-Initiator with Intermetallic Thin Film Layers," *Proceedings of First Thermal and Fluids Engineering Summer Conference*, New York, N.Y., U.S.A., Aug. 2015.
14. Choi, J. and Kim, K., "Numerical Investigations on Flame Propagation in Thin-Film Initiator with Intermetallic Multilayers," *Proceedings of 2016 KSPE Spring Conference*, Jeju, Korea, May 2016.
15. Yan, Y.C., Shi, W., Jiang, H.C., Cai, X.Y., Deng, X.W., Xiong J. and Zhang, W.L., "Characteristics of the Energetic Igniters Through Integrating B/Ti Nano-Multilayers on TaN Film Bridge," *Nanoscale Research Letters*, Vol. 10, pp. 244-1-6, 2015.
16. Kim, K., "Analysis of Self-Propagating Intermetallic Reaction in Nanoscale Multilayers of Binary Metals," *Metals and Materials International*, Vol. 23, No. 2, pp. 326-335, 2017.
17. Pacheco, M.M., "Self-Sustained High-Temperature Reactions: Initiation, Propagation and Synthesis," Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, 2007.
18. Tikekar, N., "Novel Double-Layer Titanium Boride Coating on CP-Ti and Ti-6Al-4V Alloy: Kinetics of Boron Diffusion and Coating Morphologies," Ph.D. Dissertation, The University of Utah, 2007.