

[논문] - 공학기술논문집
Journal of Engineering & Technology
 Vol.18, (December 2008)

경사기능재료 방법을 이용한 다층 니켈-알루미나 접합에 관한 연구

박종하*, 류새희*, 좌용호*, 이선영**, 이재철***, 안성훈***

A Study on the Multiple Ni-Al₂O₃ Joining using Functionally Graded Material (FGM) Method

Jong-Ha Park*, Sae-Hee Ryu*, Yong-Ho Choa*,
 Caroline Sun-Yong Lee**,
 Jae-Chul Lee***, Sung-Hoon Ahn***

*Division of Materials and Chemical Engineering, Hanyang University

**Corresponding author: sunyonglee@hanyang.ac.kr, Division of Materials and Chemical Engineering, Hanyang University

***School of Mechanical and Aerospace Engineering and institute of Advanced Machinery and Design, Seoul National University

(Received September 26, 2008)

요 약

경사 기능 재료는 조성의 연속적인 변화를 주어 삽입 층의 잔류 응력을 최소화하여 서로 특성이 다른 재료를 접합할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는, 크랙이 없는 니켈과 알루미나 접합을 위해 경사 기능 재료 방법을 사용하였다. 또한, ANSYS 시뮬레이션을 사용하여 시편의 잔류 응력을 계산하여 크랙을 예측해보았다. 인텐터를 사용하여 각 경사 층의 경도 및 물성 값을 측정하였다. 그 결과, 측정된 시뮬레이션 값과 이론 값이 잘 일치한다는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Functionally Graded Materials is a technique where dissimilar materials can be joined by varying its composition continuously to minimize the residual stress at the interlayer. In this study, we fabricated a crack-free joining of Ni and Al₂O₃ using functionally graded method. ANSYS simulation tool was used to calculate the residual stress. And hardness and modulus of each graded layer were measured using an indenter. These experimental values matched the calculated results.

1. 서 론

FGM (Functionally Graded Materials)은 같이 서로 다른 재료를 조성의 변화를 주어 중간층들을 삽입함으로써 경사 방식으로 접합하는 방법이다. 물성의 점진적인 변화를 통해 재료에 다양한 특성을 확보할 수 있다. 최근 FGM은 다층구조재료, 고온재료, 에너지 흡수재료, 생체재료 및 구조재료 등 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 그림 1은 FGM을 이용하여 제작되는 복합재 압력 관이다. 고온을 견디기 위해 내부는 세라믹으로 되어 있고 외부로 갈수록 기계적 강도를 위해 금속으로 구성되어 있다. 또한, 내부 금속의 인성과 외부 세라믹의 강도가 동시에 필요한 기어나 우주선 터빈 등 우주선 재료 뿐만 아니라 야구화 스파이크와 일본도 등 생활 주변에서도 응용되고 있다 [1].

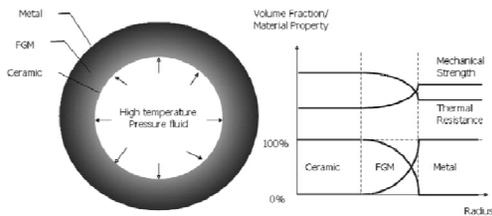


Fig. 1 Schematic of pressure pipe composed of two different materials with FGM method

기계적 강도와 내열성의 두 가지 특성을 만족시키기 위해서 두 종류의 재료를 단순히 직접 접합하지 않고 FGM을 사용하는 이유는 다음과 같다. 두 재료의 직접적인 접착은 경계 면에서 발생하는 열 잔류응력(thermal residual stress)의 차이로 인하여 경계면 박리(delaminating) 현상을 초래한다. 이를 해결하기 위해 두 재료를 점진적으로 혼합하

는 FGM이 적용되어야 한다. 이러한 두 재료의 직접적인 접착과 FGM의 열 잔류 응력 특성은 그림 2의 이중 세라믹의 접합에서 잘 알 수 있다. FGM의 경우 잔류응력차이를 최소화함으로써 구조적인 안정성을 확보할 수 있고 이는 경계에서의 박리나 파단을 막을 수 있다.

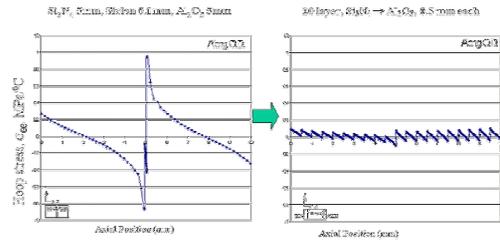


Fig. 2 Thermal residual stress graphs of directly combined aeolotropy material and aeolotropy material combined by FGM method

FGM은 여러 가지 방법으로 제조할 수 있는데 열스프레이 공정, 파우더 프로세싱, 인필트레이싱 캐스팅 등이 있다 [2]. 본 연구에서는 파우더프로세싱을 이용하여 금속-세라믹 접합 중 Ni과 Al_2O_3 의 접합을 FGM방식으로 수행하였다 [3]. Al_2O_3 는 우수한 내열성 및 내마모성, 전기절연성 및 내약품성을 가지고 있으며 소결이 쉽게 되고 강도가 높아 여러 분야에 응용되고 있다. 또한 세라믹 재료 중에서 열팽창계수가 높아($8.8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$), 열팽창계수가 큰 금속과의 접합에 적합하다 [4]. Ni은 산화에 강하고 단조가 가능하며, 구리보다는 낮지만 전기전도율이 높은 편이다. 연성이 풍부하며 약간의 자성도 띄고 있어 널리 이용되고 있는 금속이다. 이러한 특성 때문에 Al_2O_3 와의 접합에 있어 많은 선행 연구가 수행 되어 왔다 [5]. 금속-세라믹 FGM 제조에서 두 재료의 경계 면에서 발생

하는 열 잔류응력을 줄이기 위해 여러 혼합된 중간 층을 삽입하는 방법 외에 그림 3과 같이 분말의 크기를 다르게 섞어주어 기공의 크기를 조절하는 방법(Powder size mix method)이 있다. 이는 소결 시 일어나는 시편의 수축률을 줄임으로써 결함(crack)을 줄일 수 있다.

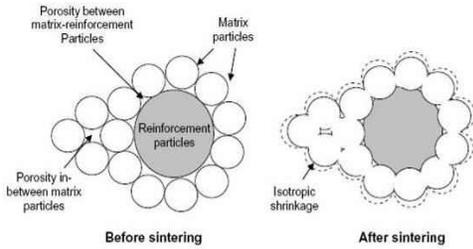


Fig. 3 Porosity and density before and after sintering using different particle size [6]

하지만 이러한 방법으로도 큰 열 잔류응력 차이를 완벽히 극복하지 못해 결함이 없는 FGM을 제조하는데 어려움을 겪고 있다.

본 연구에서는 powder stacking method를 이용하여 Ni과 Al₂O₃의 FGM 접합을 시도하였다. 기존의 연구에 추가하여 혼합 삽입 층의 수와 혼합 입자 용량을 조절하였고, 입자 크기 혼합법과 효율적인 입자 분산 공정을 통해 수축에 의한 결함을 최소화하여 결함이 없는 FGM에 가까운 Ni- Al₂O₃시편을 얻었다. 또한, 제조된 시편의 열 잔류응력에 대한 수치해석을 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 통해 확인해 보았으며, 제조된 시편의 물성 변화를 확인하기 위해 압입시험기(indenter)를 이용하여 비커스 경도(Vickers hardness)를 측정하였다.

2. 실험과정

2.1 문헌 기술을 이용한 FGM 시편 제조

선행 기술을 참고하여 Ni과 Al₂O₃의 효율적인 열 잔류응력 분산을 위해 총 8개의 Ni-Al₂O₃혼합 층(0, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100vol% Nickel)을 제조하였다 [2]. 평균입도 크기 3 μ m(Sigma Aldrich Korea, co., Ltd)의 Ni과 0.16 μ m(TAIMICRON, co., Ltd)의 Al₂O₃가 사용되었다. 조성 비율대로 각각의 입자들을 용매(Solvent: 99% Ethanol)에 넣고 초음파로 5분 동안 균일하게 분산시켜 주었다. 입자와 혼합된 용매를 열판 자력 교반기(hot plate)에서 자성 막대(magnetic bar)를 사용하여 섞어주며 건조하였다. 하지만 자성이 있는 Nickel이 자성 막대에 붙는 현상과 밀도가 높은 Nickel이 가라앉는 현상이 발견되었다. (Ni: 8.90g/cm³, Al₂O₃:3.97g/cm³) 건조된 입자를 걸름체(sieving)를 통해 고르게 내리고 지름 1인치의 원주형 금형에 표 1의 용량과 같이 순서대로 쌓았다.

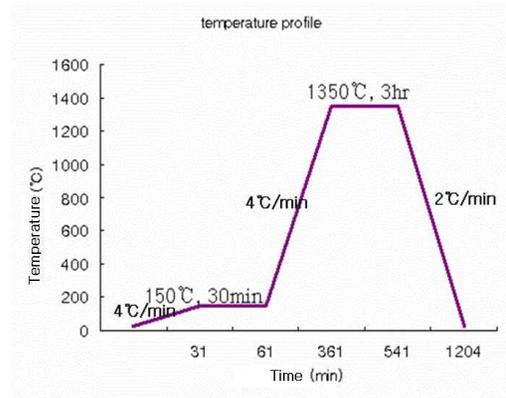


Fig. 4 Temperature profile used for sintering of Ni-Al₂O₃ FGM

이를 통해 얻어진 소결 전 시편을 아르곤(Ar) 분위기의 관상로에서 압력 없는 소결(Pressureless sintering)을 수행하였다. 최고

온도는 Nickel의 녹는점(1455°C)에 맞추어 1350°C이고, 냉각 시 잔류응력을 최소화하기 위하여 2°C/min으로 서냉 하였다. 열처리 곡선은 그림 4와 같다. 완성된 시편의 단면 관찰을 위해 시편을 절단하고 폴리싱(polishing)한 후 광학현미경으로 관찰하였다. 이 과정을 통해 얻어진 시편의 단면은 그림 7과 같으며, 입자의 분산 여부를 광학현미경을 이용하여 그림 9와 같이 확인하였다.

2.2 입자 크기 혼합법 및 새로운 건조 방법을 이용한 FGM 시편 제조

일반적으로 각각의 Ni과 Al₂O₃입자는 소결 공정에서 일어나는 수축을 줄이기 위해 표 1과 같이 디자인되었다. Ni의 평균 입도크기는 3 μ m(Sigma Ardrich Korea, co., Ltd)와 15 μ m(AOmetal, co., Ltd)이 사용되었고, Al₂O₃의 평균 입도크기는 0.16 μ m(TAIMICRON, co., Ltd)와 18 μ m(Kojundo Korea, co., Ltd)가 각각 사용되었다.

Table 1. Powder size and weight of each FGM layer [7]

조 성	분말 크기				용량
	Ni		Al ₂ O ₃		
	3 μ m	15 μ m	0.16 μ m	18 μ m	
100%Al ₂ O ₃			75%	25%	2g
5%Ni/95%Al ₂ O ₃		O	O		4g
10%Ni/90%Al ₂ O ₃		O	O		4g
20%Ni/80%Al ₂ O ₃	10%	10%	O		4g
30%Ni/70%Al ₂ O ₃	15%	15%	70%		4g
40%Ni/60%Al ₂ O ₃	20%	20%	60%		6g
60%Ni/40%Al ₂ O ₃	O		20%	20%	6g
70%Ni/30%Al ₂ O ₃	O		15%	15%	6g
80%Ni/20%Al ₂ O ₃	O		10%	10%	6g
100%Ni	75%	25%			4g

본 실험은 앞의 실험에서 나타난 밀도차이에 의한 층 분리 현상을 해결하기 위해 증발건조 과정 중 가열 기능만 있는 water

bath 대신 가열 및 초음파 분산 기능이 있는 ultra-sonicator를 연결하여 증발 공정과 초음파 분산 공정이 동시에 진행될 수 있도록 하였다. 새로운 방식으로 완전히 건조된 혼합 분말을 걸름체 통해 고르게 내리고, 지름 1인치의 원주형 금형에 표 1과 같이 무게대로 쌓았다. 소결을 위한 관상로 분위기 및 소결 온도 곡선은 전과 동일하게 실시하였다. 완성된 시편의 외부와 단면은 그림 8과 같으며, 입자의 분산 여부를 광학현미경을 이용하여 그림 9와 같이 확인하였다.

2.3 새로운 방법으로 제작된 FGM 시편의 수치 해석

입자 크기 혼합법 및 새로운 분산 방법을 이용한 FGM 시편의 열 잔류응력을 수치 해석하기 위해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

2.3.1 FGM의 재료 물성 산출 및 유한요소 모델 정의

FGM의 열 응력을 계산하는 데 있어 각 혼합 층의 물성 산출은 매우 중요하다. FGM의 물성 산출에 대한 연구는 최근에도 많이 연구되고 있으며 가장 보편적으로 사용되는 이론은 선형혼합법칙(Linear rule of mixture)이다 [4,8]. 본 연구의 수치해석에서는 이종재료간에 이상적인 결합과 분산이 이루어진 것으로 가정하고 아래와 같은 선형혼합법칙을 이용하여 탄성계수(elastic modulus), 브아송비(Poisson's ratio), 열팽창계수(coefficient of thermal expansion) 그리고 임계파괴강도(critical failure strength)를 산출하였다.

$$E_c = V_1 E_1 + V_2 E_2 \quad (1)$$

$$\nu_c = V_1 \nu_1 + V_2 \nu_2 \quad (2)$$

$$\alpha_c = V_1 \alpha_1 + V_2 \alpha_2 \quad (3)$$

$$S_c = V_1 S_1 + V_2 S_2 \quad (4)$$

위의 식에서 E_c , ν_c , α_c , S_c 는 각각 혼합물의 탄성계수와 브라운비, 열팽창계수 그리고 임계과피강도를 나타낸다. V_1 과 V_2 는 각각 재료 1과 재료 2의 부피 비를 나타내며, $V_1 + V_2 = 1$ 이다.

표 2는 유한요소 해석에 사용될 FGM의 재료 물성과 임계과피강도를 식 (1), (2), (3), (4)에 의해 계산한 값이다. 여기서 열팽창계수는 온도 구간에 따라 각각 다른 값을 가지지만 본 해석에서는 평균 열팽창계수를 사용하였다.

Table 2. Calculated material properties and tensile strength of two materials used for finite element analysis [4]

Composite	Elastic modulus [GPa]	Poisson's ratio	CTE [*10e-6/°C]	Critical strength [MPa]
100%Al ₂ O ₃	300	0.22	7.33	300
5%Ni/95%Al ₂ O ₃	295	0.22	7.62	309
10%Ni/90%Al ₂ O ₃	291	0.23	7.91	318
20%Ni/80%Al ₂ O ₃	281	0.24	8.49	336
30%Ni/70%Al ₂ O ₃	272	0.25	9.06	354
40%Ni/60%Al ₂ O ₃	263	0.26	9.64	372
60%Ni/40%Al ₂ O ₃	244	0.27	10.79	408
70%Ni/30%Al ₂ O ₃	235	0.28	11.37	426
80%Ni/20%Al ₂ O ₃	226	0.29	11.95	444
100%Ni	207	0.31	13.10	480

수치 해석에 사용된 유한요소 모델은 그림

5와 같이 3차원 형상을 축대칭 요소 (axisymmetric element)를 사용하여 2차원 형상으로 바꾼 모델을 사용하였다. (그림 5) 사용된 요소는 ANSYS에서 지원되는 2차원 8-node plane element(PLANE82)로 축대칭 옵션을 사용하였으며, 요소의 크기는 0.1mm이다. Node는 82217이며 element는 27178이 사용되었다.

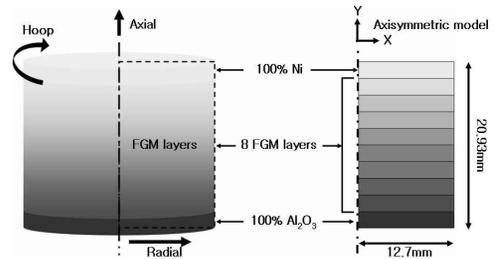


Fig. 5 Sample geometry and coordinate systems [7]

일반적으로 세라믹이나 유리와 같은 취성 (brittle)재료의 파괴 예측에는 최대 인장 응력 이론(Maximum tensile stress theory)과 최대 주 응력 이론(Maximum principal stress theory) 등을 적용하고 금속 재료와 같은 연성(ductile)재료의 파괴 예측에는 최대 변형에너지설(Maximum distortion energy theory, Maximum von-Mises stress theory)을 적용한다.

2.4 비커스 경도 실험

일반적으로 비커스 경도 실험(Vickers Hardness Test)은 제조된 FGM의 물성이 선형혼합법칙과 같이 선형적으로 변하는가를 확인하기 위해 수행되었다. 실험은 제작된 시편을 절단하고 절단된 표면을 폴리싱한 뒤, 각 층에 1kgf의 하중을 주어 비커스

경도 값을 측정하였다. 측정된 값과 선형 혼합법칙에 의해 산출된 경도 값을 비교하여 제작된 시편 층의 물성 분포가 올바른지 살펴 보았다.

3. 결 론

3.1 문헌 기술을 이용한 FGM 제작 결과

선형 기술을 참고하여 8개의 층으로 제작된 FGM 시편의 소결 후 단면도는 그림 7과 같다. 80% Ni / 20% Al_2O_3 층과 60% Ni / 40% Al_2O_3 층 사이에서 층간 분리현상이 크게 발생하였다. 또한, Al_2O_3 에서 Ni 층으로 갈수록 삽입 층의 부피가 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

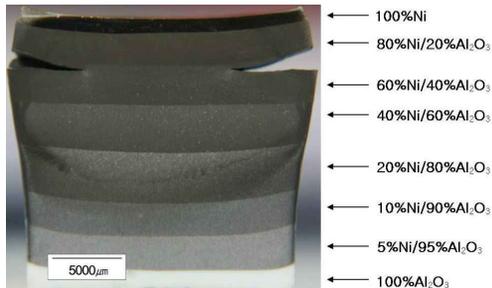


Fig. 7 Cross-section of FGM with eight layers

3.2 입자 크기 혼합법 및 새로운 건조 방법을 이용한 FGM 시편의 결과

본 실험에서는 결함을 최소화하기 위해서 2개의 삽입 층(30% Ni / 70% Al_2O_3 , 70%Ni/30% Al_2O_3)을 추가하고, 삽입된 입자의 용량을 조절함으로써 시편의 열간류응력을 줄이도록 하였다. 또한, 혼합 층 제조 시 기공을 줄이기 위해 삽입되는 입자 크기를 달리하여 섞어주는 방법을 이용하여

FGM 시편을 제조하였다. 이렇게 제조된 시편의 단면은 그림 8과 같이 시편 내부에는 결함이 발생하지 않았다. 하지만 시편의 외부에는 60% Ni / 40% Al_2O_3 층과 70% Ni / 30% Al_2O_3 층 사이에서 층간 분리 현상이 발생하였다.

또한, FGM 층에서 Nickel이 주도적인 층의 부피를 그림 7과 그림 8을 통해 비교해 볼 때 새로운 분산 방법을 사용한 그림 8의 시편이 부피가 더 작음을 알 수 있다.

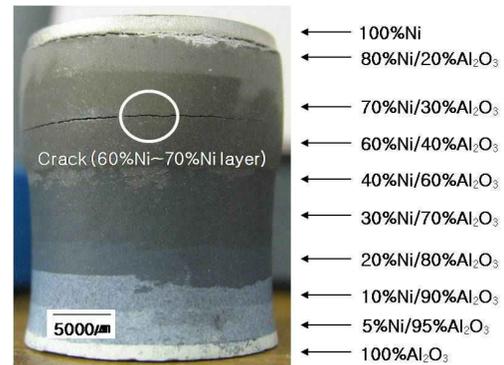


Fig. 8 Outside of FGM with ten layers [7]

이는 소결할 때 발생하는 기공이 더 줄었음을 의미한다. 이를 좀 더 명확하게 확인하기 위해 두 시편에서 기공이 가장 많은 60% Ni / 40% Al_2O_3 층의 일부분을 광학현미경으로 확대하였다. (그림 9.)

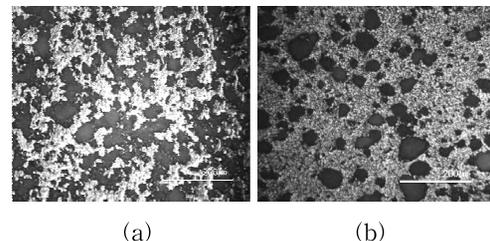


Fig. 9 Magnified view of 60%Ni / 40% Al_2O_3 layer in FGM specimen
(a) Eight layered FGM (b) Ten layered FGM [7]

또한, 두 층의 밀도를 측정해 본 결과 문헌 기술을 이용한 FGM 시편의 밀도는 $4.47\text{g}/\text{cm}^3$ 이었고, 새로운 건조방법으로 제작된 시편의 밀도는 $5.59\text{g}/\text{cm}^3$ 이었다. 이 결과를 통해 본 연구에서 제시한 새로운 건조 방법은 기존 방법보다 기공을 줄일 수 있어 좀 더 조밀한 FGM을 제작하는데 크게 기여할 것으로 판단된다.

3.3 새로운 방법으로 제조된 FGM 시편의 수치 해석 결과

새로운 방법으로 완성된 FGM 시편의 열 잔류응력을 확인하기 위해 표 1과 표 2를 근거로 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과는 크게 3가지의 파손이론으로 나누어 확인하였다.

3.3.1 최대 주 응력 이론

최대 주 응력이 인장이나 압축 항복 강도보다 크면 파손이 일어난다는 이론으로 주요 식은 식 (5)와 같다.

$$|\sigma_1| \geq \sigma_{yt,yc} \text{ or } |\sigma_2| \geq \sigma_{yt,yc} \text{ or } |\sigma_3| \geq \sigma_{yt,yc} \quad (5)$$

위 식에서 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 각각 1st, 2nd, 3rd 최대 주 응력을 나타내며, $\sigma_{yt,yc}$ 는 인장이나 압축 항복 강도를 나타낸다.

최대 주 응력 이론에 근거하여 유한요소로 계산된 FGM의 1차, 2차, 3차 주 응력을 선형혼합법칙으로 계산한 각 조성의 임계 파괴 강도와 그림 10과 같이 비교하였다. 비교 결과, 1번(100% Al_2O_3) 층의 1차 주응력이 임계파괴강도를 넘어 파손이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 4번(20% Ni / 80% Al_2O_3)과 7번(60% Ni / 40% Al_2O_3) 그리고

8번(70% Ni / 30% Al_2O_3) 층의 1차 주 응력이 임계파괴강도에 가까게 접근하는 경향을 보였다.

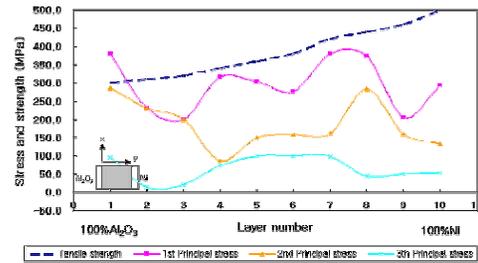


Fig. 10 Comparison of maximum principle stress with the critical failure strength based on maximum principle stress theory

위의 수치 해석 결과에서는 1번(100% Al_2O_3) 층에서 결함이 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 실제 제조된 시편에서는 7번(60% Ni / 40% Al_2O_3)과 8번(70% Ni / 30% Al_2O_3) 사이에서 결함이 발생하였다. 이렇게 수치 해석 결과와 실험 결과가 다른 이유는 수치 해석에서 입자들끼리 이상적인 결합된 것으로 가정한 것과 다르게 실험에서는 기공이 많이 발생하여 이상적인 결합이 안 되었기 때문이다. 따라서, 기공에 의해 물성이 어떻게 변화하였는지를 비커스 경도 실험을 통해 간접적으로 분석해 보았다.

3.4 비커스 경도 실험

문헌에 나와 있는 경도 물성과 선형혼합법칙으로 계산된 이론값과 압입시험기(indenter)를 통해 측정된 각 층의 경도를 비교해보았다. 문헌에 따르면 100% Ni의 비커스 경도는 약 1600Hv이며 100% Al_2O_3 는 약 1200Hv이다 [9]. 일반적으로 경도는 강도와 탄성계수에 비례적인 관계를 가진다. 또한,

기공도는 탄성계수와 반비례 관계를 갖는다. 비교 결과, 100%Al₂O₃ 층에서 100%Ni 층으로 가는 동안 경도 값이 조성에 따라 경사 거동을 띠며 작아지는 것을 알 수 있었다. 또한, Nickel이 0%인 1번(100% Al₂O₃)층의 측정 경도 값이 1300Hv로 이론값인 1200Hv보다 높기 때문에 시뮬레이션에서의 임계 파괴강도가 높아진 이유를 확인할 수 있었다. 그리고 Nickel이 60%, 70%, 80%인 7번(60% Ni / 40% Al₂O₃), 8번(70% Ni / 30% Al₂O₃), 9번(80% Ni / 20% Al₂O₃) 층의 측정 경도가 이론값보다 낮게 나옴을 알 수 있었다. 그 이유는 샘플 내에 기공이 있기 때문으로 생각될 수 있고 임계파괴강도와 탄성계수는 기공도의 증가에 의해 수치 해석에 사용된 값보다 낮아진 것으로 판단할 수 있다.

4. Conclusions

Powder stacking method를 이용하여 Ni-Al₂O₃접합을 시도하였다. 기존에 발생하였던 60% Ni / 40% Al₂O₃과 80% Ni / 20% Al₂O₃부근의 열 잔류응력에 의한 결함을 제어하기 위해 삽입될 혼합 층의 수와 삽입 입자 용량을 조절하였다. 또한, 공정상의 문제점을 해결하기 위해 기존의 실험에서 결함이 많이 발생한 60% Ni / 40% Al₂O₃과 70% Ni / 30% Al₂O₃부근의 기공을 없애는 시도를 하였다. 입자 크기를 다르게 하여 섞어주어 소결 공정에서 일어나는 수축률을 줄였다. 또한, 밀도의 차이가 나는 Ni과 Al₂O₃입자를 효과적으로 섞어주기 위해 건조 공정 중 분산 공정을 함께 실시하였으며, 그 결과 잘 분산된 혼합 입자들을 얻을 수 있었다. 이 입자들을 혼합한 층을 가지고 소결 실험을 실시한 결과, 내부에서

는 결함이 없는 Ni-Al₂O₃ FGM시편을 얻을 수 있었다. 실험 결과를 통해 본 연구에서 제시한 새로운 건조 방법은 기존 방법보다 기공을 줄일 수 있어 결함이 없는 FGM을 제작하는데 크게 기여할 것으로 판단된다.

제조된 FGM 시편의 열 잔류응력을 계산하기 위해 유한요소법을 이용하였고, FGM의 물성 산출을 위해 선형혼합법칙을 사용하였다. 수치 해석 결과, 100% Al₂O₃층과 70% Ni / 30% Al₂O₃층에서 파손이 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 실제 제조된 FGM은 70% Ni / 30% Al₂O₃층에서만 결함이 발생하였다. 이를 분석하기 위해 비커스 경도 실험을 수행하였고, 이론값과 측정값을 비교한 그래프를 이용하여 임계파괴강도와 탄성계수의 변화를 확인할 수 있었다.

수치 해석 결과, 결함이 발생하는 것으로 나타난 1번(100% Al₂O₃)과 7번(60% Ni / 40% Al₂O₃)층에서 임계파괴강도가 낮아진 7번 층이 임계파괴강도가 높아진 1번 층보다 먼저 결함이 발생하고, 이 결함에 의한 응력 방출에 의해 1번(100% Al₂O₃)층에서는 결함이 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

다음 연구에서는 FGM의 각 층의 물성을 측정하여 실제 제작된 FGM 시편과 비교 분석하고, 이를 기반으로 결함이 없는 FGM 설계하여 새로 제시한 방법으로 FGM을 제조할 것이다.

참고문헌

- [1] Micheal L. Pine, Hugh A. Bruck, Pressureless sintering of particle-reinforced metal-ceramic composites for functionally graded material: Part I. Porosity reduction

- models", *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 1457–1465, (2006)
- [2] Hugh A. Bruck, "A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves" *Solids Struct.*, Vol. 37, pp. 6383–6395, (2000)
- [3] R. Watanabe, "Powder processing of functionally gradient materials", *MRS bull.*, (1995)
- [4] Caroline S. Lee, G. Thomas, "Three dimensional analysis of thermal stress and prediction of failure of polytypoidally joined $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ functionally graded material (FGM)", *Mat. Trans.*, Vol. 48, No. 9, pp. 2489–2493, (2007)
- [5] Andrew N. Winter, Ivar E. Reimanis, "Fabrication of graded Nickel–Alumina composites with a thermal–behavior–matching process", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, No. 9, pp. 2147–2154, (2000)
- [6] Yasser M. Shabana, Hugh A. Bruck, "Modeling the evolution of stress due to differential shrinkage in powder–processed functionally graded metal–ceramic composites during pressureless sintering", *Solids Struct.*, Vol. 43, pp. 7852–7868, (2006)
- [7] Jong-ha Park, Caroline S. Lee, "Fabrication and simulation of a $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ crack-free joining for multiple metal–ceramic composites using a new functionally graded material (FGM) method", *Adv. Mater. Res.*, Vol. 47–50, pp. 523–527, (2008)
- [8] Jae Chul Lee, Caroline S. Lee, "Reduction of functionally graded material layers for $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ system using three–dimensional finite element modeling", *Mat. Trans.*, Vol. 49, No. 4, pp. 829–834, (2008)
- [9] McLean J. W., Hughes T. H., "The reinforcement of dental porcelain with ceramic oxides", *Brit. Dent. J.*, Vol. 119, No. 6, pp. 251–267, (1965)