

알루미늄-스테인레스스틸-구리 경사기능재료의 제조 및 특성평가

박광재* · 김다솜* · 권한상*†

Fabrication and Evaluation of the Al-STS-Cu Functionally Graded Materials

Kwangjae Park*, Dasom Kim*, Hansang Kwon*†

ABSTRACT: Aluminum (Al) and copper(Cu) are non-ferrous alloys with excellent electrical and thermal conductivity but have relatively lower mechanical properties than iron alloys. Stainless steel(STS), an iron alloy, is a high-strength industrial material due to its excellent mechanical properties and corrosion resistance compared to non-ferrous Al and Cu. In this research combined Al, Cu, and STS to fabricate as a functionally graded material (FGM) through a powder metallurgical process. The produced FGM exhibited lightweight and excellent surface hardness compared to copper and iron alloys and also showed higher thermal conductivity than single Al and STS materials.

초 록: 비철계 합금인 알루미늄과 구리 합금은 전기 및 열전도성이 우수하지만 철계 합금대비 상대적으로 기계적 특성은 낮다. 철계 합금인 스테인레스 스틸은 비철계인 알루미늄과 구리 대비 가공성은 나쁘지만 기계적 특성과 내부식성이 우수하여 고강도 공업용 소재로 사용되고 있다. 본 연구에서는 알루미늄과 구리 그리고 스테인레스 스틸을 융복합화 하여 기능 맞춤형 경사기능재료를 분말프로세스를 이용하여 제조하였다. 제조된 경사기능재료는 구리와 철계 합금 대비 경량의 우수한 표면 경도를 나타내었으며 열전도도 역시 단일 알루미늄과 스테인레스 스틸 소재 보다 높은 값을 나타내었다.

Key Words: 알루미늄(Aluminum(Al)), 스테인레스스틸(Stainless Steel (STS)), 구리(Copper(Cu)), 경사기능재료(Functionally GradedMaterials (FGM)), 방전플라즈마소결(Spark Plasma Sintering (SPS))

1. 서 론

소재산업은 기술 집약형의 고부가가치 산업으로 최첨단 핵심 소재부품은 다양한 산업분야에서 그 중요성이 점차 증대되고 있다. 금속소재는 전체 산업용 기초소재의 60% 이상을 담당하고 있는 핵심 기반소재로서, 인프라산업(교량, 항만, 건축, 발전 등), 기간산업(화학, 기계, 자동차, 플랜트, 조선 등)에 널리 활용되고 있을 뿐 아니라, 자동차, 로봇, IT산업 등 신 성장 동력산업의 핵심기반소재로서 활용

범위가 매우 포괄적이다. 최근 들어 전 세계적으로 에너지 저감 정책 및 CO2배출규제 강화에 따라 환경·에너지 문제에 대응하는 기능성 금속소재에 대한 기술개발 필요성이 다양한 산업분야에서 점차 증가하고 있는 추세이다[1]. 특히, 수송기기 중 CO2배출량의 85%를 차지하는 자동차에 대한 연비 및 CO2배출규제는 점점 강화되고 있으며 이에 대응하기 위해 전기구동 기반의 하이브리드 및 전기자동차 등의 친환경차량 개발이 지속적으로 증가하고 있다. 친환경차량의 주행거리 및 안정성 확보 측면에서 외장재 및

Received 24 June 2023, received in revised form 28 June 2023, accepted 30 June 2023

*Department of Advanced Material Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

†Corresponding author (E-mail: kwon13@pknu.ac.kr)

차량에 탑재되는 모터, 배터리 등의 전기전자부품 케이스에 고기능성(고방열, 고내식, 고내열, 경량) 금속소재 적용이 필수적으로 고려되고 있다. 상업적으로 많이 활용되는 대표적인 금속 소재로서 Stainless Steel(STS), Aluminum(Al), Copper(Cu) 등이 있으며 STS는 부식에 대한 저항성(내부식성) 및 기계적 강도가 우수하기 때문에 산업용 소재부품, 자동차 및 항공우주 구조물, 건설재료, 요리기구 등 다양한 용도로 활용되고 있다[2]. Al은 STS 대비 약 1/3 수준의 낮은 밀도를 가지는 대표적인 경량금속 소재로 전기자동차 및 차세대 수송기기용 기능성 소재로 널리 사용되고 있다. Cu는 우수한 열 및 전기전도성을 가지는 금속 소재로 IT, 전기전자, 반도체산업 등에 필수적으로 사용되는 금속 소재이다. 그러나 최근 산업계에서 요구하는 다기능성 소재부품을 구현함에 있어서는 단일 금속 소재로는 그 기능의 한계가 있기 때문에 각 금속 소재의 성능을 복합화 시킨 금속 복합소재에 대한 요구가 커지고 있는 실정이다. 복합소재는 단일 소재로서 구현이 어려운 다기능성을 효율적으로 구현할 수 있는 공업 소재로서 그 활용 가치가 높아지고 있다. 예를 들어 STS는 기계적 특성은 우수하나 방열성능을 개선시키는데 한계가 있어 방열성능이 우수한 Cu 및 Al 소재를 복합화할 경우 기계적 특성과 방열성능을 동시에 개선할 수 있는 것으로 기대를 모으고 있다. 그러나 철계인 STS와 비철계인 Cu 및 Al 합금들은 합금화 시 발생하는 소재간 계면인자(interface factor)로 인해 결합이 없는 우수한 벌크 복합소재를 제조하는 것이 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 STS의 표면에 Cu 및 Al을 도금 및 코팅하는 방법이 시도되고 있으나 소재의 물성 차이에 의해서 도금층이 쉽게 박리되는 문제가 있다. 경사기능재료(FGM)는 물성이 서로 다른 이종 소재가 조성에 경사를 두고 접합되어 있는 구조의 복합소재로서 융합하고자 하는 소재의 종류 및 함량에 따라 다양한 기능 맞춤형 소재의 구현이 가능하다. 즉, FGM 컨셉을 기반으로 STS와 Cu 및 Al 합금을 융복합화 할 경우 경량·고방열·고내부식·고강도 특성을 동시에 만족할 수 있는 이종복합소재를 제조할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 FGM을 제조함에 있어 종래의 압연 및 용융공정 대비 이종소재 간 계면물성 조절이 용이한 분말프로세스 기반의 방전플라즈마소결(spark plasma sintering: SPS) 공법을 적용하고자 하였다. SPS법은 기계적인 가압을 받는 분말 입자 사이에 전기에너지(전류)를 인가하여 순간적으로 발생하는 높은 에너지(Joule heating 또는 plasma)를 이용하는 소결법으로 주로 난소결성 소재의 단시간 융합 공정에 사용되고 있다. SPS 공정을 통해 제조된 Al-STS-Cu FGM은 미세구조 분석과 열전도도 특성 및 경도 측정을 통해 공업용 소재 부품으로서의 사용 가능성에 대한 분석을 진행하였다.

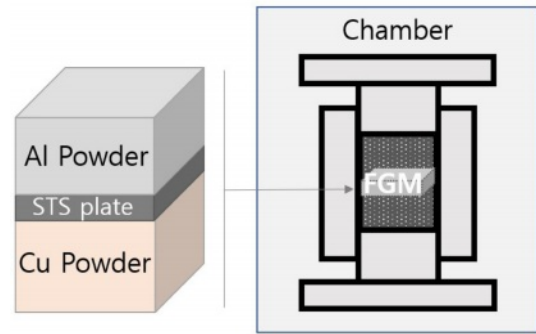


Fig. 1. Schematic diagram of fabrication procedure for Al-STS-Cu functionally graded material (FGM) by spark plasma sintering

2. 실험 방법

10 × 10 mm 탄소 몰드 내에 평균 입자크기 약 45 μm 의 구형의 Al과 Cu 분말 사이에 0.1 mm 두께의 STS 박판을 삽입하여 Fig. 1의 모식도와 같이 챔버 내에 장입하고 방전플라즈마소결기(SPS321LX, Fuji Electronic Industrial Co. Ltd., Japan)를 이용하여 6 Pa의 진공에서 소결 온도 600°C, 가압력 250 MPa, 유지시간 5분, 승온속도 100°C/min의 조건으로 FGM을 제조하였다.

SPS 소결된 FGM의 기공도를 분석하기 위해 아르키메데스 원리를 이용하여 밀도를 측정하였다. FGM의 미세조직과 구성 원소를 분석하기 위하여 주사전자현미경(SEMEDX, Tescan, Czech)을 이용하여 분석하였다. 상온에서 Laser Flash Analysis (LFA)법(LFA427/3/G, Netzsch, Germany)을 이용하여 샘플당 5회씩 열확산도를 측정하고 그 평균값으로 열확산도×비열×밀도를 모두 곱하여 열전도도 값을 구하였다. Thermo Mechanical Analysis (TMA Q400, TA Instruments, USA)를 이용하여 열팽창계수를 측정하였다. 또한 간단한 기계적 물성 특성을 분석하고자 200 g의 하중 조건으로 샘플당 5회씩 비커스 경도(HM-101 Vickers hardness tester, Mitutoyo Corporation, Japan)를 측정하여 그 평균값을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 본 연구에 사용된 (a and d) Al 분말 및 (b and e) Cu 분말의 광학 및 SEM 이미지이며 (c)는 STS 박판의 광학 사진이다.

(f)는 SPS 공법으로 제조된 FGM의 광학 사진을 나타내었다.

SPS 소결시 전류·전압의 거동은 각 소재가 가지는 전기적 물성값에 따라 거동이 다르게 나타날 수 있다. Fig. 3(a and b)에서 알 수 있듯이 Cu 단일 소재의 전류·전압치의 거동은 Al-STS-Cu FGM과 Al 단일 소재의 경우와 비교해 볼 때 Cu의 전류·전압치가 낮은 것을 알 수 있는데 이는 Cu의 높은

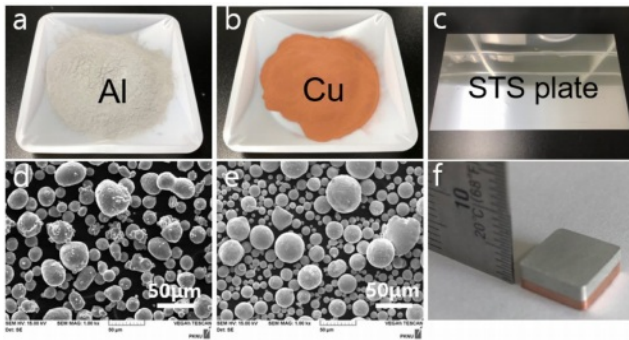


Fig. 2. Digital images of the (a) Al and (b) Cu powder (c) STS plate, and (f) fabricated FGM. (d) and (e) are SEM micrographs of the (a) and (b)

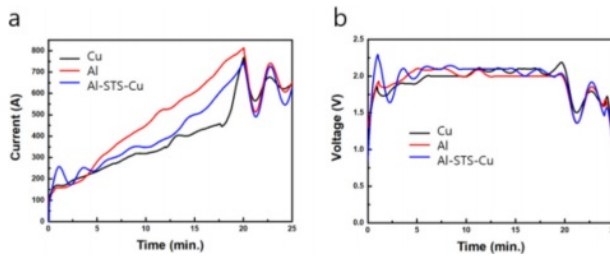


Fig. 3. Variation of (a) the current and (b) voltage during the SPS process depending on the materials

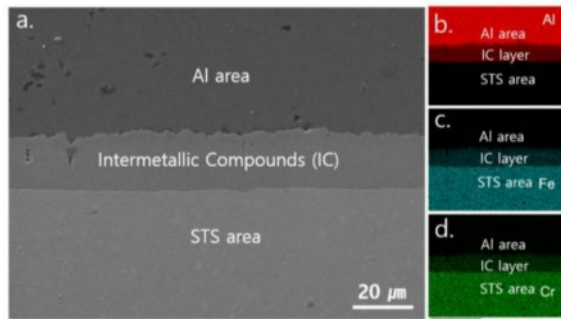


Fig. 4. Secondary electron image between (a) the Al and STS areas and the elemental mapping of (a) for (b) Al, (c) Fe, and (d) Cr

전기전도도로 인한 통전량에 차이에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 FGM의 미세조직 및 이종소재간 계면 성분 분석의 SEM 및 EDS mapping 결과이다. 특이하게도 Al과 STS 사이에서 Al, Fe, Cr 성분이 모두 검출이 되었는데 이는 금속간 화합물(Intermetallic Compounds: IC) 층의 생성에 의한 것으로 판단된다.

일반적으로 IC층은 SPS 공정 중 방전 플라즈마 효과에 의해 Al과 STS의 주성분인 Fe와 단시간에 반응하여 AlFe_3 , $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 와 같은 IC가 생성될 수 있다고 보고되어지고 있다 [3,4]. 또한 Line scan 결과에서도 알 수 있듯이 계면에 IC층이 존재한다는 것을 명확하게 관찰할 수 있었다(Fig. 5).

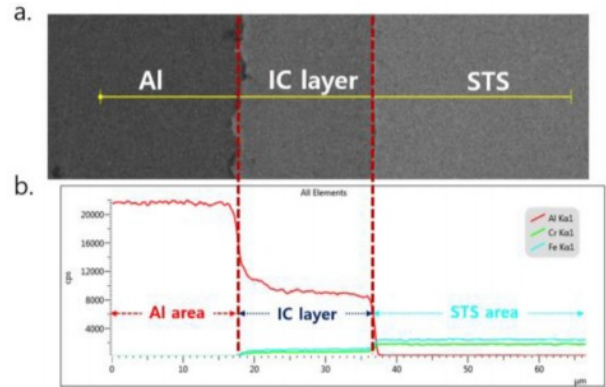


Fig. 5. Secondary electron image (a) the Al, IC, and STS. (b) elemental line mapping of the (a)

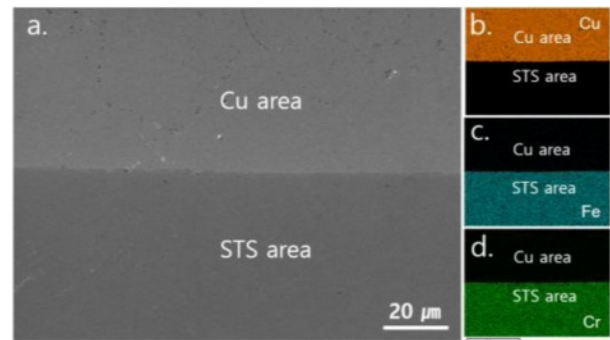


Fig. 6. Secondary electron image between (a) the Cu and STS areas and the elemental mapping of (a) for (b) Cu, (c) Fe, and (d) Cr

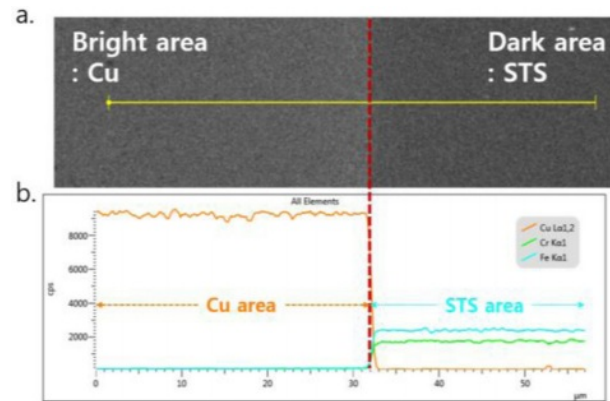


Fig. 7. Secondary electron image of the (a) Cu and STS and (b) elemental line mapping of the FGM

일반적으로 금속간 화합물은 취성적 성질로 인해 재료에 부적절한 영향을 미칠 수도 있지만, 적절한 미량의 금속간 화합물은 이종 소재의 계면 간에 강한 화학적 결합을 형성하여 응력을 효율적으로 전달할 수 있어 경우에 따라서는 강화재로 사용이 될 수 있는 것으로 보고되고 있다[5]. 본 연구에서 관찰된 Al과 STS 사이에 생성된 IC층 역시 Al과 STS 계면 간에 강한 화학적 결합을 유도 형성할 수 있기

Table 1. Some properties of the SPSed FGM

Sample	Density			Vickers Hardness (HV)	Heat capacity (J/g·K)	Diffusivity		Thermal conductivity	
	Theoretical density (g/cm ³)	Experimental density (g/cm ³)	Relative density(%)			Theoretical Diffusivity (mm ² /s)	Experimental Diffusivity (mm ² /s)	Theoretical thermal conductivity (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Experimental thermal conductivity (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Al	2.700	-	-	23	0.9	97	-	230	-
Cu	8.940	-	-	70	0.4	113	-	375	-
STS	7.980	-	-	180	0.5	3.3	-	16	-
FGM (intermetallic compound layer)	5.890	5.511	93.5	313	0.6	102	79	360	298

에 효율적 응력 전달 효과에 의한 우수한 기계적 물성과 열 전도성을 지닐 수 있을 것으로 예측된다. Cu-STs 표면의 경우에는 Al-STs 사이에서 확인된 것과 같은 어떠한 성분의 IC층도 관찰되지 않았다. 일반적으로 STS의 주성분인 Fe는 Fe-Cu 상태도에서 두 물질간 생성되는 금속간 화합물이 존재하지 않기 때문에 본 연구에서도 Cu와 STS 사이에는 IC 층이 없는 순수한 Cu와 STS 계면이 접합 소결된 것을 알 수 있었다.

또한 SPS 공정에 의해 제조된 FGM은 Cu와 STS의 융점보다 현저히 낮은 온도인 600°C에서의 소결 공정임에도 불구하고 Cu와 STS의 계면에 기공이 거의 존재하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 SPS 공정이 Cu 분말의 넓은 표면적을 소결의 구동력으로 작용시켜 Cu와 STS 계면을 안정적으로 접합 소결시켰다는 것을 의미한다. 즉, Al-STs-Cu FGM의 소결에 분말프로세스 기반의 SPS 공정이 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1에서 알 수 있듯이 FGM의 Al과 Cu 영역의 비커스 경도는 각각 평균 23 HV와 70 HV 값을 나타내었고 STS 영역은 약 180 HV의 값을 나타내었다. 측정된 경도 값들은 일반적인 Al, Cu 그리고 STS의 비커스 경도와 유사하게 측정이 되었다. 그러나 IC층의 비커스 경도는 평균 313 HV로 매우 높은 값을 나타내었다. 일반적으로 AlFe₃, Al₁₃Fe₄와 같은 IC의 비커스 경도는 대략 690~900 HV의 값을 나타낸다고 알려져 있다[6]. 따라서 고경도 IC층은 Al과 Fe의 조합에 의해 생성될 수 있는 전형적인 금속간 화합물이 혼재되어 있는 영역임을 알 수 있다.

이는 IC의 생성 비율에 따라 비커스 경도의 제어 역시 가능하다는 것을 의미한다. 즉, STS는 Al-Cu FGM에서 존재 유무 만으로도 기계적 특성을 향상시킬 수 있지만 FGM 내부에서 IC 생성 함량을 효율적으로 제어할 경우에는 추가적인 다양한 물성 상승 효과를 얻을 수 있을 것으로도 생각된다. 이러한 시너지 효과를 얻기 위해서는 명확한 강화 메커니즘의 연구와 보다 더 깊이 있는 상분석과 미세구조 분석 등이 반드시 함께 수반되어야 할 것이다.

열전도도는 아래의 식 (1)과 같이 재료의 밀도와 비열 그

리고 열확산계수의 곱으로 나타내어진다.

$$\lambda(T) = a(T) \times C_p(T) \times \rho(T) \quad (1)$$

일반적으로 단일 소재의 비열용량의 측정은 Differential Scanning Calorimeter(DSC)을 사용하여 비열용량을 측정한다. 그러나 복합소재의 비열용량은 측정의 어려움으로 인해 모델링에 의한 이론적 비열용량 값을 계산하여 주로 사용하고 있다.

FGM의 열전도도 값은 순수 Cu 보다는 다소 낮게 측정이 되었지만 Al과 STS소재 대비 약 0.3배와 19배 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 FGM을 구성하는 각 소재들이 기공이 없는 우수한 계면 결합력을 지니고 있다는 의미이며 이는 Fig. 4-7의 SEM 이미지에서도 확인할 수 있었다. 무엇보다도 FGM의 열전도도 값이 단일 Al과 STS소재 대비 높게 측정된 것은 Cu의 높은 열전도성이 강화재로서 효과를 낼 수 있었던 것으로 생각된다. 이는 FGM을 구성하는 물질들의 성분 함량 조정만으로도 다양한 특성의 구현이 가능하다는 것을 의미한다. 예를 들어 FGM에서 Al 첨가 함량을 높이면 경량성 확보가 용이 하며 STS 첨가량을 증가시키면 고강도 특성을 확보할 수 있을 것이다. 또한 Cu 함량의 비율 조절에 따라 전도 특성을 증가시킬 수도 있을 것이다. 이러한 점으로 볼 때 FGM은 구성하는 소재 조성의 구성만으로도 본 연구에서 제안한 경량 고강도 고방열 특성의 기능 맞춤형 소재 구현이 가능하다는 것을 시사한다.

Thermo mechanical analysis (TMA)는 시료에 온도 프로그램을 적용하여 온도와 시간의 함수를 활용하여 수축과 팽창에 의한 크기 변화를 측정할 수 있다. 특히 TMA를 사용하면 zero에 가까운 하중부터 수 N의 하중을 가하여 시료의 미세 수축 및 팽창을 측정할 수 있다.

SPS 공정으로 제조된 Al-STs-Cu FGM을 고내열성 제품에 적용할 경우 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion: CTE)는 중요한 성능 지표의 인자로 작용할 수 있다. 열팽창계수가 낮으면 열에 대한 저항이 크기 때문에 재료의 팽창/수축에 의한 기계적 응력을 견딜 수 있어 결과적으로 소재의 내구성 향상을 기대할 수 있어 고내열성 재료로 활용할

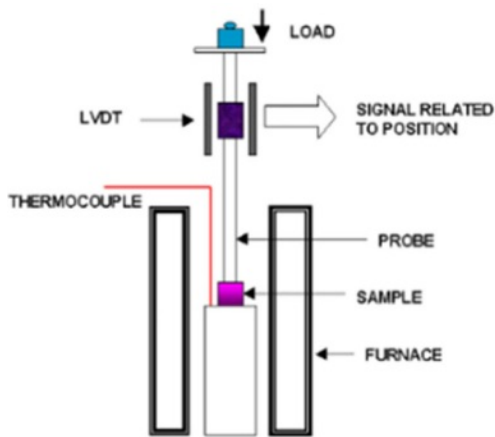


Fig. 8. Schematic diagram of TMA [7]

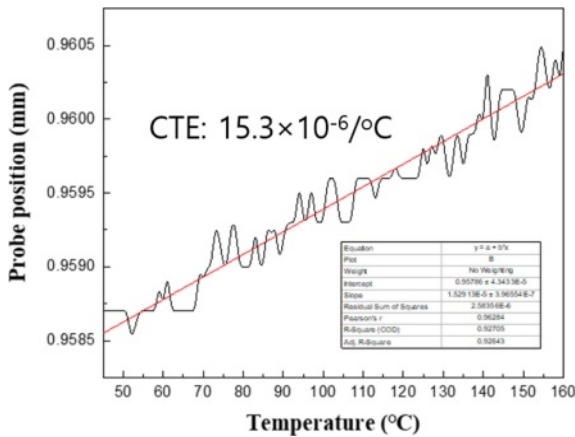


Fig. 9. Coefficient of thermal expansion of the FGM

수 있을 것이다. 본 연구에서 제조된 FGM은 Al과 Cu 성분이 각각 45%이며 나머지 구성 성분은 STS로 되어 있다. 일반적으로 Al, Cu 그리고 STS의 열팽창계수는 각각 $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 값을 나타낸다. TMA로 측정된 FGM의 열팽창계수 값은 약 $15.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 으로 Al과 Cu 대비 상대적으로 낮은 값을 나타내었는데 그 이유는 반응에 의해 생성된 IC의 영향과 함께 소량의 비율임에도 불구하고 열팽창계수 값이 낮은 STS의 첨가에 의한 영향으로 판단된다.

4. 결 론

Al-STS-Cu FGM을 분말 프로세스 기반의 SPS 공정을 통해 성공적으로 제조할 수 있었다. 제조된 FGM은 미세구조 분석과 열기계적 특성 분석을 통하여 평가한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Al과 STS 사이에는 락스 형태의 영역이 관찰되었는데 이는

구성 물질 간의 반응에 의한 금속간 화합물 생성의 영향임을 알 수 있었다. 또한 Cu와 STS 사이는 금속간 화합물의 생성 없이 STS와 Cu의 계면 구조로 되어 있다. FGM의 열전도도는 298 W/mK 으로 Al과 STS 대비 약 0.3배와 19배 증가하였다. 얻어진 열전도도 값은 이론적 계산값 보다는 약 20% 낮은 값을 나타내었으며 이는 SPS 공정 중 반응에 의해 생성된 금속간 화합물의 영향으로 판단된다. 또한 금속간 화합물의 비커스 경도는 평균 313 HV로 매우 높은 것을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 방전플라즈마소결공정을 통한 경사기능재료의 개념을 활용하면 용접이 서로 다른 이종 소재의 경우에도 다양한 기능 맞춤형 복합소재의 제조가 가능할 것으로 판단된다. 다만 우수한 물성의 경사기능재료를 공업용 소재부품으로 적용하기 위해서는 더욱 더 명확하고 깊이 있는 강화기구의 해석과 기초 실험 데이터의 확보가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021)에 의하여 연구된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Al-Ghamdi, K.A., and Hussain, G., "SPF of Cu/steel Clad Sheet: Annealing Effect on Bond Force and Formability," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, No. 6, 2016, pp. 758-763.
- Manesh, H.D., and Taheri, A.K., "Bond Strength and Formability of an Aluminum-clad Steel Sheet," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 361, No. 1-2, 2003, pp. 138-143.
- Park, K., Park, J., and Kwon, H., "Fabrication and Characterization of Al-SUS316L Composite Materials Manufactured by the Spark Plasma Sintering Process," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 691, No. 13, 2017, pp. 8-15.
- Park, K., Kim, D., Park, J., Cho, S., Takamichi, M., and Kwon, H., "Intermetallic Compounds in Al-SUS316L Composites," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 20, No. 10, 2018, pp. 1-6.
- Kwon, H., Estili, M., Takagi, K., Miyazaki, T., and Kawasaki, A., "Combination of Hot Extrusion and Spark Plasma Sintering for Producing Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Carbon*, Vol. 47, No. 3, 2009, pp. 570-577.
- Park, K., Kim, D., Kim, K., and Kwon, H., "Aluminum /Stainless Steel Clad Materials Fabricated via Spark Plasma Sintering," *Materials*, Vol. 13, No. 1, 2020, p. 239.
- UKEssays, "Thermomechanical Analysis (TMA) Instrumentation." [ukessays.com](https://www.ukessays.com/essays/physics/thermomechanical-analysis-tma-5265.php?vref=1), November 2018. Web. 23 June 2023. <<https://www.ukessays.com/essays/physics/thermomechanical-analysis-tma-5265.php?vref=1>>.