







2020년 2월 석사학위 논문

표면 온도 측정을 위한 스마트 페인트 개발

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

안 주 훈



표면 온도 측정을 위한 스마트 페인트 개발

Development of Smart Paints for Surface Temperature Measurement

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

안 주 훈



표면 온도 측정을 위한 스마트 페인트 개발

지도교수 이 창 열

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

안 주 훈

조선대학교 대학원

2019 년 11 월

위원장 조선대학교 교 수 김 태 규 (인) 위 원 조선대학교 교 수 이 현 재 (인) 위 원 조선대학교 교 수 이 창 열 (인)

안주훈의 석사학위논문을 인준함





목 차

LIST OF TABLES iii
LIST OF FIGURES iv
ABSTRACT vii
제 1 장 서 론
제 2 장 이론적 배경 4
제 1 절 온도센서 4
제 2 절 지능형 세라믹
제 3 장 스마트 페인트의 재료에 따른 특성 12
제 1 절 재료 첨가 순서
제 2 절 세라믹 비율
제 4 장 스마트 페인트의 공정에 따른 특성 27
제 1 절 교반 시간
제 2 절 경화 특성
제 5 장 표면 안정성

제	1	절	코팅	제	제작	및	도포	••••	••••	• • • •	••••	•••	••••	• • • •	•••	••••	•••	37
제	2	절	코팅	후	특성		•••••	••••		••••	••••	• • • •	•••	•••	• • • •	• • • • •	••	41

제 6 장 온도 분포 특성	••••	47
제 1 절 온도 분포 측정 세팅	• • • • • • • •	47
제 2 절 온도 분포 측정	•••••	50



LIST OF TABLES

2.1.	Type of temperature sensors. 6
2.2.	Characteristics of the thermal and quantum types of temperature sensors.
2.3.	Chemical composition of crystal state for thermistor types
3.1.	Resistance at temperature and 200 $^\circ\!C$ and thus resistance variations. \cdots 19
3.2.	Resistance at temperature and 200 $^\circ \!\! C$ and thus resistance variations. \cdots 25
4.1.	Parameters for experiments on curing process
4.2.	Comparison of resistance variation for curing process
5.1.	Rotation speed and time parameters of the spin coater used for coating.
	 2.1. 2.2. 2.3. 3.1. 3.2. 4.1. 4.2. 5.1.



LIST OF FIGURES

Fig. 2.1. Schematic diagram of Seebeck effect
Fig. 2.2. Resistance characteristics of PTC and NTC thermistors
Fig. 2.3. Schematic diagram of crystal structure and phase change for $BaTiO_3$.
Fig. 2.4. Curie temperature varies with substitution of $Ba Ti O_3$ 11
Fig. 3.1. Fabrication algorithm of smart paint sensor for surface temperature measurement
Fig. 3.2. Schematic of experimental setup for measuring resistance that varies with temperature. 16
Fig. 3.3. The resistance and temperature history for 20°C to 200°C 16
Fig. 3.4. SEM photographs of experimental specimens prepared in the different order (2000X)
Fig. 3.5. The resistance history of test specimens according to manufacturing sequence. 18
Fig. 3.6. Experimental specimen of smart paint manufactured with different ceramic addition ratios. 22



Fig. 3.7. SEM photographing according to ceramic addition ratios (2000X).
Fig. 3.8. The resistance history at different ceramic addition rates 24
Fig. 3.9. Comparison of resistance variation for ceramic additive ratios 26
Fig. 4.1. SEM photographing of smart paints with different stirring time (2000X).
20
29
Fig. 4.2. The Resistance history by stirring time
Fig. 4.3. SEM photographing of smart paints made with curing process using
temperature and time parameters (10000X)
Fig. 4.4. The resistance history by curing time and curing temperature
Fig. 5.1. Fabrication algorithm of coating solution
Fig. 5.2. Spin coater used in the experiment for coating
Fig. 5.3. Experimental specimens before coating. 43
Fig. 5.4. Experimental specimens with changes in coating 44
Fig. 5.5. Effectiveness of coating identified using Kaptoon tape 45
Fig. 5.6. Resistance history by uncoated substrate and coated substrate 46



Fig. 6.1. Painting design for measuring temperature distribution. 47

Fig.	6.2.	Schematic	of	experimental	setup	for	measuring	resistance	that	tempera	ture
distri	ibutic	n				•••••			• • • • • •		48

Fig. 6.3. The resistance history by temperature distribution. 50



ABSTRACT

Development of Smart Paints for Surface Temperature Measurement

Ju-Hun Ahn

Advisor : Prof. Chang-Yull Lee, Ph.D. Department of Aerospace Engineering Graduate School of Chosun University

Thermal energy is a fatal factor that causes errors in mechanical parts such as aircraft and satellites. Temperature is measured with a temperature sensor to monitor the source of thermal energy. However, the commercially available temperature sensor has a limited shape and a number of temperature sensors are required to measure the temperature distribution. If the shape of the temperature sensor is limited, it is difficult to attach to the curved surface, resulting in measurement error. In addition, the use of numerous temperature sensors to measure the temperature distribution increases the likelihood of error. To overcome these drawbacks, smart paint has been proposed. This adds conductivity and temperature measurement properties to liquid paints. Smart paints use conductive materials and are made by imparting certain properties to conductive paints, which are commonly used in the field of circuit printing. Smart paint has been mainly used to measure vibration and pressure using piezoelectric materials, but research on smart paint to measure temperature is still insufficient.

This paper has developed smart paint for surface temperature measurement, and further confirmed the possibility of temperature distribution measurement. The PTC thermistor features a principle of increasing resistance when the temperature rises. $Ba Ti O_3$, a ferroelectric ceramic, was used as the main material of the PTC thermistor. Polymer solutions were prepared for the proper viscosity of the paint and ferroelectric ceramics were added to enable temperature measurements. Ag paste was also added to



have electrical conductivity. Previous studies confirmed the possibility of smart paint by experimenting with the property of increasing resistance when the temperature rises. Smart paint needed to be optimized for production. The optimization experiment was carried out by dividing into two kinds of characteristics according to the material and process.

The order of addition of the materials used to make the paint was experimented. The unstructured order of adding materials will affect the resistance and temperature measurement capabilities of smart paint. Therefore, optimization was necessary. Next, the characteristics according to the ceramic ratio were experimented. The higher the ceramic ratio, the better the PTC characteristics. However, it was expected to affect the resistance characteristics and it was necessary to identify the most economic ratio of ceramics. In the manufacturing process, a stirrer and a convection oven were used. The experiment was carried out to enable a stable paint production through the stirring time of the stirrer. In addition, through the curing characteristic experiments using a convection oven was optimized for the storage of paint at room temperature and the appropriate curing method.

The produced smart paint had a defect that the surface was not stable because of very low adhesion. In order to solve this problem, a coating was proposed. Commercially available epoxy coating solutions were not stable at elevated temperature, resulting tn new coating solutions. The coating method of the new coating solution was optimized and the rotational speed and rotation time of the spin coater were experimented to verify the coating properties. The coating ensured surface stability. Application experiment of smart paint confirmed the possibility of measuring distribution. As a result of the distribution measurement, the resistance with temperature was measured stably.

The smart paint produced by this study can measure the temperature of curved surface and the temperature distribution of the desired position. Furthermore, if the monitoring technology for temperature distribution is secured, it is expected to be a highly available temperature sensor.



제 1 장 서 론

온도 측정은 열이 발생하는 요인과 열로 인해 발생하는 문제점을 모니터링하기 위해 온도센서가 사용되고 있다. 이러한 열적 요인들은 위성을 비롯한 항공기의 부 속품, 일상생활에 사용되는 전자제품 등에서 직접적인 영향을 끼치게 된다. 위성의 경우 극한의 우주환경에서 운영되며, 안정적인 궤도 순항을 위해 궤도 열 해석을 진행하고 있다[1]. 해당 열적 요인들은 위성 내부의 PCB(printed circuit board)등에 영향을 주고, PCB의 과다한 열로 인한 오류는 미션 성공에 영향을 주게 된다. 이 를 방지하기 위해 위성의 설계 단계에서 열 해석이 필수적으로 진행되고 있다[2]. 또한, 위성의 구조적 안정성을 위해 열 설계 또한 진행되고 있다[3]. 항공기의 엔진 의 경우 과다한 열을 제어하지 못하면 재난 수준의 인명피해가 발생할 수 있으며, 이를 위한 항공기 엔진의 열 해석이 진행되고 있다[4]. 더 나아가 UAV(unmanned aerial vehicle)를 위한 하이브리드 엔진의 해석이 진행되었다[5]. 항공기 착륙 시 발 생하는 타이어와 브레이크의 마찰열을 제어하지 못할 경우 제동에 문제가 발생하 게 되면서 탑승자의 안전에 직접적인 영향을 주게 되며, 타이어와 브레이크의 허용 온도의 확인을 위해 열 해석이 진행되고 있다[6]. 최근 자동차의 엔진에서 발생하 는 열을 제어하지 못하여 자동차가 전소되어 피해가 발생한 사례들이 있으며, 이런 문제점을 해결하기 위한 방법 또한 연구되었다[7]. 현재 연구가 활발히 진행 중인 전기 자동차의 경우 자동차가 고열을 받게 되면 더 큰 피해가 발생할 수 있으며, 피해를 미리 막기 위해 배터리의 열 해석이 연구되고 있다[8].

본 논문은 PTC(positive temperature coefficient) 서미스터를 기반으로 온도가 상승 할 때 저항이 상승하는 특징을 이용하였다. 이러한 특징을 이용해 Shin et al.은 배 선의 온도상승을 감지하며 제어하는 전기안전 제어장치를 연구하였다[9]. 또한, PTC 서미스터는 위성의 온도 측정에 주로 사용이 되며, Suk et al.은 저 궤도 위성 에 적용을 위해 서미스터의 측정 정확도에 대한 분석하였다[10]. 이러한 PTC 서미 스터는 열을 전기에너지로 변환시키지만 반대로 전기에너지를 열에너지도 변환시 켜 히터로 사용이 가능하다. 이러한 특징을 이용해 Rowlands and Vaidhyanathan는 PTC 서미스터의 주재료인 *BaTiO*₃를 3D 프린터로 출력하여 히터를 제작하였다 [11]. 또한 전기 자동차는 차량 온도를 높이기 위해 PTC 히터와 열펌프를 사용하나 겨울철 열펌프의 효율이 급격히 저하되어 대용량 PTC 히터가 필요하게 된다. 하지 만 무게가 늘어난다는 단점이 있으며, Park and Kim은 가열 성능과 가열 밀도가 높 은 PTC 히터를 연구하였다[12].

상용화 되어있는 온도센서는 형상과 크기가 제한적이다. 이는 구형을 비롯한 곡 면의 부착이 힘들어 해당 표면의 온도 측정이 어렵다는 단점을 가지게 된다. 또한 특정 범위의 표면 열전달 분포 측정을 계획할 경우 수많은 온도센서가 필요하며, 센서가 많을 경우 경제적으로 불리하고 데이터 수집 단계에서 오류에 대한 취약성 이 있는 단점을 가진다. 이러한 단점을 해결하기 위해 Qu et al은 NTC 서미스터를 기반으로 박막형태의 온도센서 제작을 하였다[13]. 박막형태의 경우 곡면이 부착이 가능하다는 단점을 가지지만 열전달 분포 측정은 어려우며, 해당 두 가지 단점을 개선하기 위해 본 연구는 액체 상태인 페인트에 전도성과 온도를 측정하는 기능을 첨가한 스마트 페인트를 제안하였다.

전도성 페인트는 Ag, Ni, 카본 등을 재료로 하며, 회로 인쇄 분야에서 주로 사용 되고 있다. 이러한 전도성 페인트를 이용하여 Lee et al은 전기수력학적 프린팅에 적용하였으며, 제작한 미세회로를 통해 작은 크랙을 감지하는 센서를 제작하였다 [14]. 또한 Alkaraki et al은 X-Band 안테나를 3D 프린터로 제작하기 위해 전도성 페 인트를 사용하여 금속화하는 연구를 진행하였다[15]. Kuroda et al은 전도성 페인트 의 경제적인 제작을 위한 재료로 전도성은 좋으나 빠른 산화로 인해 사용이 어려 웠던 Cu를 연구를 통해 페인트로 제작하였다[16]. 이렇게 전도성 페인트의 활용과 페인트 재료에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

스마트 페인트는 전도성 페인트에 지능 재료를 첨가하여 특정 성질을 가지고 있 는 페인트를 말한다. Payo and Hale은 PZT(lead zirconite titanate)를 이용한 스마트 페인트를 제작하여 이축 변형에서 페인트의 동적특성에 대한 연구를 진행하였다 [17]. 또한 Han and Kang은 폴링 조건에 따른 압전 특성을 확인하였다[18]. Selvan et al은 향상된 압전 성능과 유연성을 위해 PVDF(polyvinylidene fluoride) nanofiber를 사용하여 페인트를 제작하였다[19]. 더 나아가 Mutsuda et al은 압전 페인트와 진동 이 발생하는 유연한 물체를 이용하여 하베스팅을 하는 연구를 진행하였다[20]. 현 재까지 스마트 페인트의 연구는 압전 재료를 이용하여 압력과 진동에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 반면 온도를 측정하는 페인트의 연구는 아직 부족한 상황이다.

본 논문에서는 표면온도 측정을 위한 스마트 페인트를 제조하였다. 해당 페인트 를 제조하는데 있어 많은 조건들이 발생하였으며, 제조에 따라 센싱 특징이 달랐



다. 따라서 페인트 제조의 최적화가 필요하였으며, 이를 최적화하는 실험을 진행하 였다. 먼저 페인트의 재료적 특성과 재료의 비율에 따른 센싱 해상도 및 안정에 대 한 확인으로 재료적 최적화를 진행하였다. 또한 공정 과정에서 발생하는 조건들 중 교반과 경화를 통해 변화하는 센싱 해상도와 안정성에 대한 공정 최적화를 진행하 였다. 제작한 페인트는 표면 안정성이 좋지 못한 단점으로 쉽게 떨어졌으나 해당 단점을 해결하기 위해 코팅의 방법을 제안하여 진행하였다. 마지막으로 표면 온도 분포 측정 가능성을 확인하기 위한 실험을 진행하여 표면온도 측정을 위한 스마트 페인트의 측정 결과를 도출하였다.



제 2 장 이론적 배경

제 1 절 온도센서

온도센서는 측정 방법에 따라 접촉식 온도센서와 비접촉식 온도센서로 나누게 되며, 재료에 따라 양자형과 열형으로 나누어진다. 온도센서의 종류는 Table 2.1.에 나타냈었으며, 양자형과 열형의 특징은 Table 2.2.에 나타내었다[21]. 우선 비접촉식 온도센서는 열형과 양자형으로 분류가 되며, 양자형의 경우 PC(photoconductive), PV(photovoltaic), QW(quantum well)의 종류가 있다. 이중 PC는 불순물의 유무에 따 라 내인성과 외인성으로 나뉘게 된다. 하지만 양자형의 경우 주로 군용으로 사용되 어 일반적인 사용자의 접근이 쉽지 않다. 일반적으로 사용되는 비접촉식 온도센서 는 열형을 주로 사용하며, 열형의 경우 전기적 효과를 발생시키는 것과 기구적으로 변화가 나타나는 것, 광학적인 변화의 효과가 발생하는 것으로 나뉘게 된다. 전기 적인 효과를 발생시키는 것은 볼로미터, 초전체, 서모파일이 있으며, 기구적으로 변 화를 나타내는 것은 Golay cell이 있고 광학적인 변화에서는 광섬유가 있다. 이중 가장 일반적으로 많이 사용되는 비접촉 온도센서는 적외선 온도센서로 초전체에 속해 있다.

접촉식 온도센서는 열형만 존재하며, 전기적 효과, 기구적 효과, 열색상 효과 세 가지로 분류되어 있다. 기구적 효과를 가진 접촉식 온도센서는 수은온도계라고 불 리는 유리온도계와 바이메탈이 있으며, 열색상 효과로 측정하는 감온성 액정, 류코 염료, 무기재료가 있다. 전기적 효과를 가진 접촉식 온도센서는 열전대와 열저항이 있으며, 열저항은 RTD(resistance temperature dentectors), 서미스터, 다이오드의 종류 가 있다. 열전대의 원리는 Fig. 2.1.에 나타내었으며, 열전대는 Seebeck 효과를 이용 한 것으로 두 가지 이상의 다른 금속의 전위차를 이용하여 온도를 측정하는 원리 를 가진다. 열전대의 J-type, K-type, T-type, E-type 등의 종류가 있으며, 해당 종류들 은 각 측정 온도 범위가 다르며 원하는 온도 범위에 따라 선택할 수 있다. 저항을 이용하여 온도를 측정하는 서미스터는 NTC(negative temperature coefficient), PTC(positive temperature coefficient) 서미스터 등의 종류가 있으며, 서미스터의 대표



적인 재료는 Table 2.3.에 나타내었다. NTC 서미스터는 온도가 높아지면 저항이 떨 어지는 특징을 가지고 있으며, 고온용으로는 Spinel 계, Perovskite 계, ZrO 계의 재 료를 사용하고 저온용으로는 Spinel 계 재료가 사용된다. PTC 서미스터는 온도가 높아지면 저항이 떨어지는 특징을 가지고 있으며, 재료로는 BaTiO 계열, ZnTiNiO 계열, Polymer 계열이 사용되고 있다[22]. PTC 서미스터와 NTC 서미스터의 온도에 따른 저항 변화 특징은 Fig. 2.2.에 나타내었다[23].



			양자형						
구분	열	ල්	Р	С	DX/	QW			
			내인성	외인성	ΓV				
	전기적	기구적			InSb HgCdTe				
비저초시	볼로미터	Golay Cell	PbSe InSb	Si:X		GaAs/Al			
	- VOx - α-Si 초전체	광학적	HgCdTe	GaAs:X		GaAs			
	서모파일	광섬유							
	전기적	기구적							
		유리온도계 바이메탈							
접촉식	열저항 - RTD - 서미스터 - 다이오드 열전대	열색상							
		감온성 액정 류코염료 무기재료							

Table 2.1. Type of temperature sensors.



특성	열형	양자형
반응속도	느림	빠름
반응 파장 대역	넓음	제한적임
동작 온도	상온	냉각
मुक्	저가	고가
주요 응용 분야	민수용	군사용

Table 2.2. Characteristics of the thermal and quantum types of temperature sensors.



Fig. 2.1. Schematic diagram of Seebeck effect.



구분		결정 상태	화학조성
NTC	고 오	Spinel 계	$\begin{aligned} Al_2O_3 - CoO - CaSiO_3 \\ Al_2O_3 - CoO - MnO - CaSiO_3 \\ Al_2O_3 - NiO - CoO - CaSiO_3 \\ MgO - Cr_2O_3 - MgO - Fe_2O_3 \\ MgO - Al_2O_3 - NiO - Cr_2O_3 \end{aligned}$
	प ठ	Perovskite 계	$BaO - TiO_2 - MgO - Fe_2O_3 - Mn_2O_3$ $PbO - TiO_2 - MgO - Fe_2O_3 - Mn_2O_3$
		ZrO 계	$ZrO - Y_2O_3 - ZrO - CeO_3$
	저 온 용	Spinel	Mn - Ni - Co $Mn - Ni - Co - Cu$ $Mn - Ni - Cr$
РТС		BaTiO ₃ 계열	Curie 온도 조절용 : Pb, Sr, Sn, Zr 소결 촉진용 : Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₃
		ZnTiNiO 계열	
		Polymer 계일	

Table 2.3. Chemical composition of crystal state for thermistor types.





Fig. 2.2. Resistance characteristics of PTC and NTC thermistors.



제 2 절 지능형 세라믹

세라믹은 도자기, 타일 등에 사용이 되는 내열성, 내화성이 좋은 절연재료이다. 하지만 전자공업이 발달하면서 금속재료와의 혼합으로 반도체의 재료로 사용되고 있다. 반도체 및 센서로 사용되고 있는 세라믹을 지능형 세라믹이라 하며, 지능형 세라믹으로는 진동의 특성을 가진 세라믹과 열의 특성을 가진 세라믹 등 첨가되는 원소의 특징에 따라 각기 다른 특성을 가지고 있다. 먼저 진동의 특성을 가진 압전 세라믹은 PZT를 기반으로 페로브스카이트 구조를 가진 강유전체 세라믹이다. 압전 세라믹은 외부에서 압력이 가해질 경우 해당 물리 에너지를 전기 에너지로 변환시 키며, 이러한 특징을 이용하여 가속도 센서, 압력센서 등의 주재료로 사용되고 있 다. 또한 이러한 특징을 이용하여 버려지는 에너지를 전기에너지로 변환시키는 하 베스팅을 위한 연구가 진행되고 있다[24]. 반대로 전기를 인가하였을 때 압전 세라 믹에서는 진동이 발생하게 되며, 이는 초음파 세척기 등에 사용되고 있다.

열의 특성을 가진 세라믹은 열전 세라믹과 강유전체 세라믹으로 나눌 수 있으며, 펠티어 소자가 대표적인 열전 세라믹이다. 열전 소자의 경우 Seebeck 효과와 반대 의 효과를 사용한 개념으로 전위차를 주었을 때 한 면에서는 발열이 발생하며, 반 대의 면에서는 흡열이 발생하게 된다[25]. 특별한 점은 전류가 흐르는 방향을 반대 로 하였을 때 양쪽 면의 특징이 반대로 바뀌게 되는 특징이 있다. 이러한 열전 세 라믹은 자동차의 온도조절 시트, 반도체의 냉각판 등에 사용되고 있다.

본 연구에 사용된 *BaTiO*₃는 강유전체 물질로 PTC 서미스터의 주재료로 사용되는 강유전체 세라믹이다. 페로브스카이트 분자 구조이며, Fig. 2.3.에 분자 구조와 *BaTiO*₃ 페로브스카이트 특징을 나타내었다. 분자 내 구성은 Ba 이온이 만든 정육 면체의 면 중심에 O 이온이 존재하며, 정육면체 중심에는 Ti 이온이 존재하는 구성이다. 특정 온도 이상의 온도를 받게 되면 분자 구조의 한 변이 늘어나는 상변화가 이루어지며, 이런 분자의 이동으로 인해 저항이 변하게 된다[26]. 분자구조를 변하게 하는 특정 온도는 큐리 온도(Curie Temperature)라 하며, *BaTiO*₃는 해당 온도에서 저항이 급격히 상승하게 된다. 이러한 큐리 온도는 세라믹의 성분을 다른 물질 로 치환시켜 고온 또는 저온으로 큐리 온도를 조절할 수 있다는 특징을 가지고 있으며, 이는 Fig. 2.4.를 통해 확인이 가능하다[27,28].





Fig. 2.3. Schematic diagram of crystal structure and phase change for $BaTiO_3$.



Fig. 2.4. Curie temperature varies with substitution of $Ba Ti O_3$.



제 3 장 스마트 페인트의 재료에 따른 특성

제 1 절 재료 첨가 순서

표면 온도 측정을 위한 스마트 페인트의 가능성을 확인하기 위한 실험을 우선 진행하였다. 스마트 페인트를 제작을 위한 전체적인 알고리즘은 Fig. 3.1.에서 보여 주고 있다. 페인트 제작에 앞서 고분자 용액을 제작하였으며, 용매는 DMF(N,N-Dimethylmethanamide, 99.5%, DaeJung)를 사용하였다. DMF는 냄새가 없고 강한 산과 강한 염기에서 안정하지 않은 특징을 가지고 있으며, 극성 유기 용매로 용액이다. 주로 고분자 화학반응에 이용되는 용질로 첨가되는 물질은 PEO(Polyethylene Oxide, Mw = 10000, AlfaAesar)를 사용하였다. PEO는 에테르기의 친수성으로 물에 잘 녹으며, 내화학성의 특징을 가지고 있는 물질로 의약품 등에 가소재로 사용되고 있는 고분자이다. DMF에 넣는 PEO 양에 따라 각기 다른 점도 의 페인트의 제작이 가능하며, 실험을 통해 결과를 얻은 용매 대비 용질의 양은 7%~8%가 적당하였다. 제작된 고분자 용액에 강유전체 세라믹인 $BaTiO_3$ (Barium Titanate, Nanopowder < 100nm, Sigma Aldaich)와 전도성을 위한 Ag paste(60-80%, < 400nm, 1µm, Changsung Nanotech Corporation)를 첨가하여 스마트 페인트를 완성시 켰다. 완성한 페인트는 가로 100mm, 세로 50mm, 두께 3mm의 유리판에 페인트용 붓을 이용하여 최대한 일정하게 도포한 후 오븐을 이용해 경화를 진행시켜 실험용 기판을 완성시켰다. 온도 측정을 위한 실험 세팅은 Fig. 3.2.에 보여주고 있다. 측정 은 실험용 기판 양쪽 끝에 저항을 측정할 수 있는 전극을 연결해 주었으며, 챔버 내부의 온도를 측정해주는 온도센서를 챔버 안에 배치시켜 페인트의 저항 데이터 와 챔버 내부 온도 데이터를 챔버 외부에 배치된 DAQ를 이용하여 실시간으로 데 이터를 수집하였다. 챔버는 고온의 환경을 조성하기 위해 사용되었으며, 상온(약 2 5℃)에서 부터 약 200℃까지 온도를 상승시키는 환경을 만들어주었다. 온도에 따른 저항 데이터는 Fig. 3.3.에 나타내었으며, 온도가 상승할 때 저항 또한 상승하는 PTC 특성을 확인할 수 있다.

제작 공정에 대한 최적화를 위해 재료 첨가 순서에 따른 저항 측정을 진행하였 다. 첨가 순서는 총 4가지 조건을 설계하였다. 첫 번째 페인트는 위에서 설명한 바 와 같이 제작한 고분자 용액에 세라믹을 첨가하여 4시간동안 교반 후 Ag를 첨가하 여 20시간동안 교반하여 페인트를 제작하였다. 두 번째 페인트는 제작한 고분자 용 액에 Ag를 첨가하고 4시간동안 교반 후 세라믹을 첨가하여 20시간 동안 교반하여 페인트를 제작하였다. 세 번째 페인트는 제작한 고분자 용액에 세라믹과 Ag를 동 시에 첨가하여 24시간동안 교반하여 페인트를 제작하였다. 네 번째 페인트는 용매 인 DMF에 고분자 분말인 PEO와 세라믹, Ag를 한 번에 첨가하여 24시간동안 교반 하여 페인트를 제작하였다. 도포 방법은 4가지 페인트 모두 동일하게 진행하였으 며, Fig. 3.4.는 4가지 페인트의 도포 이후 2,000배율로 촬영한 SEM (scanning electron microscope) 결과를 보여준다. 첫 번째, 두 번째, 세 번째 페인트인 Fig. 3.4. (a), (b), (c)는 모두 구형으로 응집된 세라믹 입자형상을 보였으며, 그 주위로 Ag 입 자들이 배열되어 있었다. 네 번째 페인트인 Fig. 3.4. (d)는 응집되는 세라믹 입자 내부에 Ag 입자들이 같이 응집되는 현상이 발생하였다. 세라믹 응집은 세 번째 페 인트인 Fig. 3.4. (c)에서 가장 크게 나타났으며, 첫 번째 페인트인 Fig. 3.4. (a)에서 가장 작게 나타났다. 하지만 두 번째 페인트인 Fig. 3.4. (b)가 빈 부분이 없이 가장 빽빽한 배열을 보여 배열적으로는 가장 안정적인 결과를 나타내었다.

챔버를 통해 온도를 상승시켜 변화하는 저항 데이터를 얻을 수 있었으며, 해당 데이터는 Fig. 3.5.에 타나내었다. 데이터는 센싱 노이즈와 관련된 그래프의 노이즈 와 센싱 해상도와 관련된 저항 변화에 대해 도출하였다. 저항 측정 결과 200℃까지 의 저항 변화는 네 가지 페인트 모두 발생하여 PTC 특성이 나타났다. 하지만 저항 의 노이즈와 저항변화가 다르게 나타났다. 노이즈는 Ag를 세라믹보다 먼저 첨가한 두 번째 페인트에서 가장 심하게 발생하였으며, 세라믹과 Ag를 같이 첨가한 세 번 째 페인트가 다음으로 많은 노이즈가 발생하였다. 반면에 세라믹을 첨가한 후 Ag 를 첨가한 첫 번째 페인트가 노이즈가 가장 적게 발생하였다. 따라서 세라믹을 첨 가한 후 Ag를 첨가한 첫 번째 페인트가 가장 안정적인 측정을 가능하게 해준다는 결과를 도출할 수 있다. Table. 3.1은 상온에서의 저항과 200℃에서의 저항을 나타 내었으며, 이를 이용해 저항 변화를 도출하였다. 세라믹을 첨가한 후 Ag를 첨가한 첫 번째 페인트의 저항 변화는 1.513Ω이었으며, Ag를 첨가한 후 세라믹을 첨가한 두 번째 페인트의 저항 변화는 1.639Ω이었다. 또한 세라믹과 Ag를 한 번에 첨가한 세 번째 페인트의 저항 변화는 1.905요이었으며, 고분자를 포함한 모든 재료를 한 번에 첨가한 네 번째 페인트의 저항 변화는 0.88Ω이었다. 저항 변화가 가장 큰 값 을 나타낸 페인트는 세라믹과 Ag를 한 번에 첨가한 세 번째 페인트였으며, 가장



저항 변화가 작은 고분자를 포함한 모든 재료를 한 번에 첨가한 네 번째 페인트와 약 1.02Ω의 차이가 발생하였다. 노이즈와 저항 변화의 결과를 종합해 보았을 때 안정적인 측정이 가능하고 준수한 저항 변화 값을 가진 페인트는 세라믹을 먼저 첨가한 첫 번째 페인트로 최적의 제조순서라는 결과를 도출하였다.





Fig. 3.1. Fabrication algorithm of smart paint sensor for surface temperature measurement.





Fig. 3.2. Schematic of experimental setup for measuring resistance that varies with temperature.

Fig. 3.3. The resistance and temperature history for 20°C to 200°C.





Fig. 3.4. SEM photographs of experimental specimens prepared in the different order (2000X): (a) Ceramic first, (b) Ag first, (c) Ceramic and Ag together, (d) PEO, Ceramic and Ag together.





Fig. 3.5. The resistance history of test specimens according to manufacturing sequence.



Table 3.1. Resistance at temperature and 200°C and thus resistance variations: (a) Ceramic first, (b) Ag first, (c) Ceramic and Ag together, (d) PEO, Ceramic and Ag together.

Case	Resistance at room temp. (Ω)	Resistance at 200° C (Ω)	Resistance variations (Ω)
(a)	5.313	6.826	1.513
(b)	5.346	6.985	1.639
(c)	5.152	7.057	1.905
(d)	5.552	6.432	0.88



제 2 절 세라믹 비율

선행 연구를 통해 도출한 최적의 제작순서를 이용하여 세라믹 비율에 따른 온도 측정 특성을 확인하였다. 세라믹 비율은 Ag와 대비한 비율로 25%부터 200%까지 25%씩 세라믹의 양을 늘려가면서 페인트를 제작하였으며, 총 8가지의 조건으로 제 작하여 실험하였다. 페인트 도포 방식은 페인트용 붓을 이용한 동일한 방식으로 진 행하였으며, 챔버를 이용한 온도 환경 또한 상온(약 25℃)에서부터 약 200℃까지 온도를 높여주면서 변화하는 저항을 측정하였다. 도포한 페인트의 사진은 Fig. 3.6. 에 타나내었으며, 세라믹 비율에 따른 SEM 촬영 결과는 Fig. 3.7.에 나타내었다. 세 라믹 비율이 낮을 경우 페인트는 Ag paste색에 가까운 은색이 진하게 나타나며, 비 율이 높아질수록 페인트의 색은 회색을 띄었다. SEM는 2,000배로 촬영하였으며, 결 과를 비교해 보았을 때 세라믹 비율이 높아질수록 세라믹의 응집 크기가 더 커지 고 있었다. 또한 응집된 세라믹의 양이 더 많아졌다. 입자의 배열은 응집된 세라믹 입자 주위로 비교적 작은 Ag 입자들이 배열되어 있으며, 세라믹의 비율이 높아질 수록 촬영 면적 내의 Ag 입자가 더 적게 분포하고 있었다. 페인트를 도포한 실험 용 기판의 색이 회색에 가까워지는 것은 SEM을 통해 설명이 가능하며, 응집된 세 라믹 입자 주위에 분포된 Ag 입자들이 많을수록 은색에 가까우며 적을수록 회색에 가까워진다는 결과를 도출할 수 있다. 온도 측정은 Fig. 3.2.의 방법으로 진행하였으 며, 온도 측정 결과 그래프는 Fig. 3.8.에 나타내었다. 모든 비율의 측정 결과에서 온도가 상승할 때 저항이 상승하는 PTC 특성이 나타나 온도측정을 위한 스마트 페 인트가 제조되었음을 알 수 있다. 비교적 낮은 비율인 25%를 첨가한 Fig. 3.8. (a), 50%를 첨가한 Fig. 3.8. (b), 75%를 첨가한 Fig. 3.8. (c)는 많은 노이즈가 발생하였 다. 비율 100%를 첨가한 Fig. 3.8. (d)에서는 노이즈가 발생하였지만 비교적 노이즈 가 조금 발생하였다. 비율 125%를 첨가한 Fig. 3.8. (e), 150%를 첨가한 Fig. 3.8. (f), 175%를 첨가한 Fig. 3.8. (g), 200%를 첨가한 Fig. 3.8. (h)에서는 노이즈가 거의 발 생하지 않았다. 따라서 125% 이상의 비율을 첨가한 페인트는 모두 안정적인 측정 이 가능하다는 결과를 도출하였다. Table 3.2.는 각 비율에 대한 상온에서의 저항과 200℃에서의 저항을 측정하여 계산한 저항변화를 나타내며, Fig. 3.9.는 계산한 저항 변화를 통해 도출한 그래프를 나타낸다. 첨가비율 25%와 50%의 저항 변화는 0.07 Ω으로 동일하게 나타났으며, 75%에서는 0.09Ω으로 25%, 50%와 0.002Ω로 아주



미세한 차이가 발생하였다. 하지만 이는 오차범위 이내의 값으로 저항변화가 거의 같았다. 첨가 비율 100%의 저항 변화는 1.05 Q 이었으며, 125%의 저항 변화는 1.11 Q 이었고 150%의 저항 변화는 1.31 Q 이었다. 첨가 비율 100% 이상에서는 비율이 높아질수록 저항 변화의 값의 변화가 발생하고 있었다. 첨가 비율 175%의 저항 변 화는 2.47 Q 이었으며, 200%의 저항변화는 25.47 Q으로 나타났다. 첨가 비율을 선형 적으로 상승시켰을 때 저항 변화는 비선형적으로 급격하게 상승하고 있었다. 해당 결과를 통해 더 높은 첨가 비율을 더 높일 경우 더욱 큰 폭의 저항 변화 결과를 획득할 수 있을 것이라 사료되었지만 너무 높은 세라믹 첨가비율은 오히려 전기전 도성을 가지지 못하였다. 따라서 센싱 해상도가 가장 좋은 세라믹 첨가 비율은 200%였으나 가장 경제적인 비율은 100%였다. 노이즈와 저항 변화를 통해 도출한 가장 경제적이고 안정적인 측정이 가능한 비율은 노이즈가 거의 발생하지 않고 저 항 변화가 준수한 값을 나타내는 125%가 가장 최적의 비율 조건으로 결과를 도출 하였다.





Fig. 3.6. Experimental specimen of smart paint manufactured with different ceramic addition ratios: (a) : 25%, (b) : 50%, (c) 75%, (d) 100%, (e) 125%, (f) 150%, (g) 175%, (h) 200%.





Fig. 3.7. SEM photographing according to ceramic addition ratios (2000X): (a) : 25%, (b) : 50%, (c) 75%, (d) 100%, (e) 125%, (f) 150%, (g) 175%, (h) 200%.





Fig. 3.8. The resistance history at different ceramic addition rates: (a) : 25%, (b) : 50%, (c) 75%, (d) 100%, (e) 125%, (f) 150%, (g) 175%, (h) 200%.



Case	Ceramic Rate (%)	Resistance at room temperature (Ω)	Resistance at 200°C (Ω)	Resistance variations (Ω)
(a)	25	5.00	5.07	0.07
(b)	50	5.10	5.08	0.07
(c)	75	5.00	5.09	0.09
(d)	100	5.04	6.09	1.05
(e)	125	5.04	6.15	1.11
(f)	150	5.03	6.31	1.31
(g)	175	5.06	7.53	2.47
(h)	200	5.16	30.63	25.47

Table 3.2. Resistance at temperature and 200°C and thus resistance variations.





Fig. 3.9. Comparison of resistance variation for ceramic additive ratios.



제 4 장 스마트 페인트의 공정에 따른 특성

제 1 절 교반 시간

스마트 페인트의 공정 중 교반 시간에 대한 최적화를 실험하였다. 페인트 제작 순서는 최적화를 진행하였던 고분자 용액에 세라믹을 첨가한 후 Ag를 첨가하는 방 법으로 진행하였으며, 세라믹 비율은 노이즈가 거의 발생하지 않고 가장 작은 양을 사용하는 125%의 비율을 사용하였다. 교반시간에 대한 최적화를 확인하기 위해 Ag 첨가 후 교반 시간을 달리하여 실험을 진행하였으며, 교반 시간은 6시간, 24시간, 96시간으로 총 3가지 실험 조건을 사용하였다. Fig. 4.1.은 2,000배율로 촬영한 SEM 결과를 나타낸다. 6시간 교반한 Fig 4.1. (a)는 중앙에 응집된 세라믹 입자 주위로 Ag 입자들이 위치하는 배열을 보이고 있으며, 24시간 교반한 Fig. 4.1. (b) 또한 응 집된 세라믹 입자 주위로 Ag 입자들이 위치하고 있다. 6시간 교반한 시편의 경우 면적대비 많은 Ag 입자들이 보이고 있지만, 그 반면에 24시간 교반한 시편은 비교 적 적은 Ag 입자들이 보이고 있다. 하지만 96시간 교반한 Fig. 4.1 (c)는 응집된 세 라믹 입자 주위로 응집된 세라믹 입자들이 배열되어 있으며, Ag 입자들은 거의 보 이지 않는 것을 확인할 수 있다.

측정 실험을 앞서 실험한 방법과 동일한 방법으로 챔버를 이용해 진행하였으며, 온도 또한 상온에서부터 200℃까지의 범위에서 측정을 진행하였다. Fig. 4.2.은 온도 에 따라 변화하는 저항 측정 결과를 보여준다. 세 가지 실험 조건인 6시간, 24시간, 48시간의 교반 시간들 중 96시간 교반을 진행한 시편은 초기저항이 구현되지 못하 였다. 이는 SEM 촬영 결과를 통해 해석이 가능하였으며, 너무 오래 진행된 교반으 로 인해 Ag 입자의 배열이 안정적이지 못하고 너무 크게 응집된 세라믹 입자로 인 해 전기전도성이 구현되지 못한 결과로 볼 수 있다. 나머지 조건인 6시간과 24시간 교반시킨 시편의 경우 96시간 교반시킨 시편과 다르게 초기저항이 구현되어 측정 을 진행하였다. 6시간과 24시간 모두 노이즈는 거의 발생하지 않았지만 12시간 교 반한 시편의 결과가 비교적 노이즈가 더 적은 것을 확인할 수 있다. 저항 변화는 6 시간에서 약 1요이었으며, 24시간에서는 약 0.8요으로 미세하지만 6시간 교반한 시 편이 더 큰 저항변화를 보여주었다. 하지만 6시간 교반한 시편의 경우 약 180℃의



온도 환경에서 저항이 하강하면서 측정이 안정적이지 못하였다. 이는 짧은 교반시 간으로 인해 세라믹과 Ag가 안정적으로 섞이지 못하여 발생한 현상으로 안정적인 페인트 제작을 위한 최적의 조건은 24시간 교반하는 것으로 결과를 도출하였다.





Fig. 4.1. SEM photographing of smart paints with different stirring time (2000X): (a) 6 hours, (b) 24 hours, (c) 96 hours.





Fig. 4.2. The Resistance history by stirring time.



제 2 절 경화 특징

최적화를 위한 실험의 마지막으로 페인팅 후 경화를 진행하는 단계에서 경화 시 간,경화 온도의 최적의 조건을 찾기 위한 실험을 진행하였다. Table 4.1.은 경화 특 징에 대한 실험 조건을 나타내었다. 경화 온도 조건은 25℃, 50℃, 100℃의 세 가지 조건을 제시하였으며, 시간은 각각 12시간, 24시간, 48시간씩 경화하여 실험을 진행 하였다. 제작한 실험용 시편의 SEM 촬영 결과를 Fig. 4.3.에 나타내었다. SEM은 20,000배율로 Ag 입자가 중심에 위치하며 세라믹 입자가 모서리 부분에 배치되도 록 촬영을 진행하였다. 온도 조건 25℃에서 12시간 경화한 Fig. 4.3. (a), 24시간 경 화한 Fig. 4.3. (b), 48시간 경화한 Fig. 4.3. (c)는 Ag 입자가 원형으로 형성되어 있 었으며, 세 가지 시간 조건에서의 차이점은 없었다. 온도 조건 50℃에서 12시간 경 화한 Fig. 4.3. (d)에서는 25℃의 결과와 비슷하였으며, Ag 입자가 원형으로 형성되 어 있었다. 하지만 온도 조건 50℃에서 24시간 경화한 Fig. 4.3. (e)와 48시간 경화 한 Fig. 4.3. (f)에서는 목이 형성(Neck Formation)되어 Ag 입자간 연결 되어 있는 것 을 확인할 수 있다. 또한 온도 조건 100℃에서 12시간 경화한 Fig. 4.3. (g), 24시간 경화한 Fig. 4.3. (h), 48시간 경화한 Fig. 4.3. (i)에서도 목이 형성 되었으며, 경화 시 간이 길수록 형성된 목이 더 많아졌다. 이러한 목 형성으로 인해 Ag가 더 안정적 으로 연결되고 있다는 결과를 도출할 수 있다.

경화 특징에 따른 저항 측정 결과를 Fig. 4.4.에 나타내었다. Fig. 4.4. (a)는 25℃ 환경에서 경화시킨 실험용 기판의 측정 결과이며, Fig. 4.4. (b)는 50℃ 환경 경화시 킨 실험용 시편의 결과를 Fig. 4.4. (c)는 100℃ 환경에서 경화시킨 실험용 시편 결 과를 나타낸다. 모든 측정 결과에서 온도가 상승함에 따라 저항이 상승하여 온도측 정을 위한 페인트가 제작되었음을 보여준다. 온도 조건 25℃에서 경화시킨 Fig. 4.4. (a)의 세 가지 시간조건인 12시간, 24시간, 48시간은 노이즈가 거의 발생하지 않은 안정적인 측정을 보여준다. 온도 조건 50℃에서 경화시킨 Fig. 4.4. (b)의 시간조건 인 12시간, 24시간, 48시간 중 12시간 경화시킨 시편과 48시간 경화시킨 시편의 측 정 결과에서 노이즈가 발생하였으며, 그 중 48시간에서 노이즈가 가장 심하게 발생 하였다. 24시간 경화시킨 시편은 측정결과에서는 노이즈가 거의 발생하지 않은 안 정적인 측정을 보여준다. 온도 조건 100℃에서 경화시킨 Fig. 4.4. (c)의 세 가지 조 건인 12시간, 24시간, 48시간 중 48시간 경화시킨 Fig. 4.4. (c)의 세 가지 조 12시간 경화시킨 시편과 24시간 경화시킨 시편은 노이즈가 거의 발생하지 않은 안 정적인 측정을 보여준다.

Table 4.2.는 각 실험용 시편의 상온과 200℃에서의 저항을 나타내며, 이를 이용 한 저항변화를 나타내고 있다. 저항 변화가 가장 큰 시편은 온도 조건 50℃에서 48 시간 경화시킨 시편과 100℃에서 12시간 경화시킨 시편이었으며, 다음으로 저항 변 화가 큰 시편은 온도 조건 50℃에서 24시간 경화시킨 시편이었다. 온도 조건 25℃ 에서 경화시킨 세 가지 시편의 저항 변화는 약 0.1요 정도로 거의 차이가 나지 않 았다. 온도 조건 50℃에서 경화시킨 세 가지 시편의 저항 변화는 약 0.3요 정도로 온도 조건 25℃와 마찬가지로 거의 차이가 없었다. 하지만 온도 조건 100℃에서 경 화시킨 세 가지 시편은 12시간에서 1.78요이었고 24시간과 48시간에서는 각각 0.75 Ω, 0.73Ω으로 12시간에 비해 2배 이상의 차이를 보여주었다. 해당 측정 결과로 상 온과 가장 비슷한 온도 조건인 25℃에서 저항 변화의 차이가 매우 작고 노이즈 또 한 큰 변화가 없는 것으로 보아 상온에서의 페인트 보관이 페인트에 영향을 끼치 지 않는다는 결과를 도출할 수 있다. 온도 조건 50℃에서의 경화는 시간이 지남에 따라 저항 변화의 큰 차이는 없었지만 12시간과 48시간의 경화에서 노이즈를 발생 되었기 때문에 50℃에서 12시간 이하, 48시간 이상의 경화를 진행할 경우 안정적이 지 못한 결과물이 발생한다는 결과를 도출할 수 있다. 온도 조건 100℃에서 경화는 24시간이후 저항 변화가 급격히 낮아졌기 때문에 100℃에서 너무 긴 시간 경화는 안정적이지 못한 결과물이 발생한다는 결과를 도출할 수 있다. 따라서 온도 조건 50℃에서 24시간 경화를 진행하거나 온도 조건 100℃에서 12시간 경화를 진행하는 것이 가장 최적의 경화 조건이라는 결과를 도출하였다.



Case	Temperature (° C)	Time (h)		
(a)	25	12		
(b)	25	24		
(c)	25	48		
(d)	50	12		
(e)	50	24		
(f)	50	48		
(g)	100	12		
(h)	100	24		
(i)	100	48		

Table 4.1. Parameters for experiments on curing process.





Fig. 4.3. SEM photographing of smart paints made with curing process using temperature and time parameters (20000X): (a) 25° C and 12 hours, (b) 25° C and 24 hours, (c) 25° C and 48 hours, (d) 50° C and 12 hours, (e) 50° C and 24 hours, (f) 50° C and 48 hours, (g) 100° C and 12 hours, (h) 100° C and 24 hours, (i) 100° C and 48 hours.





Fig. 4.4. The resistance history by curing time and curing temperature:(a) Curing temperature of 25°C, (b) 50°C, (c) 100°C.



Curing Temperature (°C)	Curing Time (h)	Resistance at room temp. (Ω)	Resistance at 200°C (Ω)	Resistance variations (Ω)	
	12	5.04	6	0.96	
25	24	5.04	5.78	0.74	
	48	5.03	5.86	0.85	
	12	5.03	6.52	1.49	
50	24	5.03	6.77	1.74	
	48	5.03	6.81	1.78	
	12	5.02	6.80	1.78	
100	24	5.02	5.77	0.75	
	48	5.03	5.76	0.73	

Table 4.2.	Comparison	of	resistance	variation	for	curing	process.



제 5 장 표면 안정성

제 1 절 코팅제 제작 및 도포

페인트의 코팅은 일반적으로 에폭시 코팅을 사용한다. 하지만 에폭시 코팅을 하 였을 경우 온도를 측정하기 전에 녹아내리는 현상을 확인되었으며, 에폭시 코팅은 고온의 환경에서 사용되는 온도센서 스마트 페인트에는 적합하지 못한 코팅 방법 이었다. 높은 온도에서 안정적으로 사용이 가능한 코팅 용액을 생각하였으며, 내화 학성과 내열성이 뛰어난 PI(Polyimide) 용액을 코팅제로 사용하였다. IP용액 제작 순 서 알고리즘은 Fig. 5.1.에 나타내었다. 코팅제는 DMAc(N,N-Dimethylacetamide, 99.5%, DaeJung)를 용매로 하여 ODA(4,4'-Oxydianilne, 98%, Alfa Aesar)를 충분히 녹 인 후 교반 상태에서 PMDA(Pyromellitic Dianhydride, 98%, TCI)를 서서히 첨가하며, 약 24시간 동안 추가 교반하여 PI 용액을 제작하였다[29].

코팅은 일반적으로 코팅 및 용액 도포에 주로 사용되는 Spin Coater를 사용하였 다. Spin Coater는 회전을 이용하여 용액을 일정하게 도포하는 형식으로 해당 장비 는 Fig. 5.2.에 타나내었다. Spin Coater에 사용 가능한 파라미터로는 속도, 시간 등 이 있으며, 사용하는 용액의 점도와 기판의 종류에 따라 파라미터가 다르게 적용되 어야 한다. Spin Coater를 이용한 코팅의 최적화 실험을 진행하였다. 최적화는 속도 변수 4가지와 시간 변수 2가지를 이용하였으며, 실험에 사용한 변수 세팅은 Table 5.1.에 나타내었다. 코팅을 위해 용액은 가로와 세로로 한 줄씩 용액을 배치 시켰으 며, 유리판의 가운데를 고정시킨 후 코팅을 진행하였다.





Fig. 5.1. Fabrication algorithm of coating solution.





Fig. 5.2. Spin coater used in the experiment for coating.



Case	Rotation Speed(RPM)	Time(s)		
(a)	250	30		
(b)	250	60		
(c)	500	30		
(d)	500	60		
(e)	750	30		
(f)	750	60		
(g)	1000	30		
(h)	1000	60		

Table 5.1. Rotation speed and time parameters of the spin coater used for coating.



제 2 절 코팅 후 특성

코팅 전 사용한 기판은 Fig. 5.3.에 나타내었으며, Table 5.1.의 파라미터를 이용하 여 코팅한 결과의 사진은 Fig. 5.4.에 나타내었다. 200RPM의 30초인 Fig. 5.4. (a)는 코팅 용액이 전체적으로 퍼지지 못하여 처음에 세팅한 가로 세로 모양이 그대로 남아 있었다. 이는 너무 느린 속도와 너무 짧은 코팅 시간으로 인해 코팅 용액이 퍼지지 못하여 발생한 결과이다. 200RPM의 60초인 Fig. 5.4. (b)와 500RPM의 30초 인 Fig. 5.4. (c), 750RPM의 30초인 Fig. 5.4. (e)는 코팅용액이 비슷하게 퍼져 있었 다. 해당 실험용 시편들은 전체적으로 코팅 용액이 깔끔하게 퍼지지 않았으며, 코 팅이 되지 못한 부분이 시편 끝부분에 남아있었다. 이것은 200RPM의 30초의 결과 에 비해 용액이 코팅되는 시간과 속도는 빨라졌지만 아직 용액의 최적코팅 속도와 시간이 아니었다는 결과를 도출할 수 있다. 500RPM의 60초인 Fig. 5.4. (d), 750RPM의 60초인 Fig. 5.4. (f), 1000RPM의 30초인 Fig. 5.4. (g)에서는 전체적으로 용액이 퍼지고 비교적 깔끔한 코팅이 되어있었다. 마지막으로 1000RPM의 60초인 Fig. 5.4. (h)에서는 깔끔한 코팅이 가능하였던 500RPM의 60초, 750RPM의 60초, 1000RPM의 30초와 비슷하게 전체적으로 용액이 퍼진 모습을 확인할 수 있다. 하지 만 도포 되어있던 페인트에 작은 유격이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 너무 빠른 속도에서 너무 긴 시간 코팅을 진행하였기 때문에 용액이 도포되어 있는 페 인트까지 끌어당기면서 발생한 것이다. 코팅 최적화 결과 비교적 느린 속도인 250RPM에서는 코팅이 불안정하였으며, 500RPM과 700RPM의 짧은 시간에서 또한 코팅이 불안정하였다. 하지만 500RPM과 700RPM의 긴 시간에서는 코팅이 안정적 으로 되었다. 1000RPM의 짧은 시간에서는 코팅이 안정적이었으나, 긴 시간 코팅에 서는 유격이 발생하여 너무 빠른 속도로 긴 시간 코팅을 진행하였을 경우 코팅용 액이 페인트에 직접적인 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 따라서 가장 최적의 코 팅 방법은 500RPM의 60초, 750RPM의 60초, 1000RPM의 30초라는 결과를 도출하였 다.

코팅의 부착성이 높아 졌는지에 대해 확인하기 위해 페인트만 도포한 실험용 기 판과 코팅이 완료된 실험용 기판으로 부착 실험을 하였다. 실험은 일반적으로 손쉽 게 페인트의 부착 강도를 확인하는 방법인 테이프를 이용한 방법을 선택하였으며, 실험용 기판의 동일한 위치에 테이프를 10회 반복적으로 붙였다가 떼는 방식으로



진행하였다. 부착 실험에 대한 결과는 Fig. 5.5.에 나타내었다[30]. 페인트만 도포한 실험용 기판의 경우 세라믹과 Ag가 테이프에 묻어나왔으며, 10회의 반복 실험으로 인해 테이프의 끈적임이 없어질 정도로 분진이 부착된 것을 확인할 수 있다. 반면 에 코팅한 실험용 기판의 경우 테이프에 묻어 나오는 것이 없었으며, 테이트의 끈 적임 또한 그대로였다. 해당 실험 결과를 통해 페인트의 부착성과 표면 안정성이 코팅으로 인해 향상되었음을 확인하였다. Fig. 5.6.는 코팅한 실험용 시편과 코팅하 지 않은 실험용 시편의 온도에 따라 변화하는 저항 측정 결과를 나타낸다. 해당 실 험 또한 200℃까지의 온도를 측정하였으며, 코팅한 시편과 코팅하지 않은 시편의 저항 그래프가 유사하였다. 따라서 코팅이 온도측정을 위한 스마트 페인트에 큰 영 향을 끼치지 않고 표면 안정성을 높여준다는 결과를 도출할 수 있다.





Fig. 5.3. Experimental specimens before coating: (a) 250RPM and 30s, (b) 250RPM and 60s, (c) 500RPM and 30s, (d) 500RPM and 60s, (e) 750RPM and 30s, (f) 750RPM and 60s, (g) 1000RPM and 30s, (h) 1000RPM and 60s.





Fig. 5.4. Experimental specimens with changes in coating: (a) 250RPM and 30s, (b) 250RPM and 60s, (c) 500RPM and 30s, (d) 500RPM and 60s, (e) 750RPM and 30s, (f) 750RPM and 60s, (g) 1000RPM and 30s, (h) 1000RPM and 60s.





Fig. 5.5. Effectiveness of coating identified using Kaptoon tape: (a) Before coating, (b) After coating.





Fig. 5.6. Resistance history by uncoated substrate and coated substrate.



제 6 장 온도 분포 특성

제 1 절 온도 분포 측정 세팅

유리판의 전체적인 면을 이용한 온도 측정이 아닌 선으로 도포하여 온도를 측정 하는 분포 특성 실험을 진행하였다. 페인트 제작 방법은 최적화 실험을 통해 도출 한 결과를 바탕으로 제작하였으며, Ag 대비 세라믹의 비율은 125%의 비율을 첨가 하였다. 유리판은 이전과 다른 크기인 가로 100mm, 세로 100mm, 높이 3mm의 정 사각형을 사용하였으며, 40mm의 선 간격을 가지도록 하였다. 각 선의 두께는 약 10mm로 세 개로 도포해 주었으며, 완성한 실험용 기판의 모습은 Fig. 6.1.에 나타내 었다. 실험은 이전과 같은 챔버를 이용해 유리 전체적으로 같은 온도 환경을 가지 도록 실험 세팅을 하였으며, 측정을 위한 전극 세팅은 Fig. 6.2.에 나타내었다. 저항 기호로 나타낸 부분이 페인트가 칠해진 부분을 의미하며, 각각의 저항에 한 개씩 양극(+)을 연결시켜 주고 반대쪽에는 음극(-)을 하나 연결시켜 측정을 진행하였다. 해당의 측정의 경우 반대로 연결하였을 때 각 선의 저항 값이 나오지 않기 때문에 양극과 음극의 위치가 중요하다. 각 지점에 연결된 양극과 음극 총 4개의 선을 모 두 DAQ에 연결시켜 온도 변화에 대한 각 선의 저항 변화를 측정하였다.





Fig. 6.1. Painting design for measuring temperature distribution.





Fig. 6.2. Schematic of experimental setup for measuring resistance that temperature distribution.



제 2 절 온도 분포 측정

온도 분포 측정 실험 결과를 Fig. 6.3.에 타나내었다. 분포 측정을 위해 설계한 선 인 a, b, c 모두 온도가 상승할 때 저항이 상승하는 결과가 도출되어 각 선에 대한 측정이 정상적으로 이루어지고 있는 것을 확인하였다. 또한 약간의 노이즈는 발생 하였으나 측정에 문제를 주지 않을 만큼 미세한 노이즈였다. 선 a의 상온에서의 저 항은 5.2요이었으며, 200℃에서의 저항은 10.8요으로 저항 변화폭은 5.6요이었다. 선 b의 상온에서의 저항은 5.2요이었으며, 200℃에서의 저항은 9.5요으로 저항 변화 폭 은 4.3요이었다. 선 c의 상온에서의 저항은 5.1요이었으며, 200℃에서의 저항은 9.7 요으로 저항 변화 폭은 4.6요이었다. 각 선의 저항 변화 폭은 약 1요 정도의 차이 가 있음을 확인하였다. 이는 도포 단계에서 일정하지 못한 선의 두께와 페인트 도 포 두께로 인해 발생한 현상으로 정형화된 도포 단계를 도입할 경우 해당 문제는 해결될 것으로 사료된다. 해당 결과를 통해 측정을 원하는 면에 전체적으로 도포하 여 측정하는 방법이 아닌 일정한 두께의 선 또는 형상으로 페인트를 위치시켜 측 정이 가능한 것을 확인하였다. 이것으로 형상에 제한이 없고, 여러 배치로 온도 분 포를 측정할 수 있는 온도센서로의 가능성이 확인되었다.





Fig. 6.3. The resistance history by temperature distribution.



제 7 장 결론

본 연구는 표면의 곡선과 형상에 제한이 없는 표면 온도 측정용 스마트 페인트 를 제작하였다. 고분자 용액을 제작하여 페인트의 점도를 제어해 주었으며, 열에 반응하는 강유전체 세라믹과 전도성 물질을 고분자 용액에 첨가하여 온도에 따른 저항 측정을 가능하게 해주었다. 제안한 페인트의 제작과정에 대해 가장 효율적인 제작 방법에 대해 연구가 부족한 상황이었으며, 이를 해결하기 위한 최적화를 진행 하였다. 최적화는 재료적 관점의 최적화와 공정 관점에서의 최적화로 나누어 진행 하였다. 재료적 관점의 최적화는 제작 과정에서의 재료 첨가 순서에 대한 실험과 강유전체 세라믹의 첨가 비율에 대한 실험을 통해 이루어졌으며, 공정 관점에서의 최적화는 교반에 시간에 대한 실험과 페인트의 경화 과정에 대한 실험을 통해 이 루어졌다.

최적화 실험 이전에 온도 측정 가능성을 확인하는 실험을 하여 제작하는 페인트 가 온도가 상승함에 따라 저항이 상승하는 특징을 가진 것을 확인하였다. 재료적 관점의 최적화 중 재료 첨가 순서에 대한 실험은 총 4가지 실험 세팅으로 확인하 였으며, 제작한 고분자 용액에 세라믹을 첨가한 후 전도성 물질을 첨가하는 방법이 노이즈가 적고 저항 편화 폭이 크고 안정적인 측정이 가능한 최적의 제작 순서였 다. 세라믹 첨가 비율에 대한 실험은 총 8가지 실험 세팅으로 측정을 진행하였으 며, 저항 변화 폭은 세라믹의 비율이 높아질수록 높아졌으나 안정적인 측정은 일정 비율 이상에서는 모두 가능하였다. 이는 원하는 측정 해상도에 따라 센서의 변화가 가능하다는 장점이 되며, 가장 경제적인 비율은 125%의 비율이었다.

공정 관점의 최적화 중 교반 시간에 대한 실험은 총 3가지 실험 세팅으로 진행 되었으며, 너무 오래 교반할 경우 전기적 특성이 나타나지 못하고 너무 짧은 시간 교반할 경우 안정적인 측정이 어려웠다. 따라서 적당한 시간 교반시간이 필요했으 며, 약 24시간 교반한 결과가 가장 최적의 교반 조건이었다. 경화 과정에 대한 실 험은 총 9가지 실험 세팅으로 진행되었으며, 온도가 높고 시간이 길수록 경화과정 에서 전도성 물질에 나타는 형상인 목 형상이 많아졌다. 하지만 전도성의 효율이 좋다하여 온도 측정 특성이 좋아지는 것은 아니었으며, 100℃ 환경에서 약 12시간 경화시키는 결과가 저항 변화 폭이 가장 크고 안정적인 측정이 가능하였다. 제작한 페인트는 온도에 대한 저항 특성은 나타났지만 부착성이 낮아 쉽게 떨어 지는 표면 안정성이 낮다는 단점을 가지고 있었다. 이러한 단점을 해결하기 위해 코팅의 방법을 고려하였으며, 코팅은 높은 온도에서도 안정적인 사용이 가능해야했 기 때문에 일반적인 에폭시 코팅이 아닌 PI 용액을 이용한 코팅을 진행하였다. PI 용액을 제작해 주었으며, Spin Coater를 이용하여 코팅을 진행하였다. 코팅을 위한 Spin Coater의 변수는 속도와 시간 등이 있었으며, 실험에는 총 8가지의 세팅으로 진행하였다. 너무 느린 속도와 너무 짧은 시간의 코팅은 용액이 완벽히 퍼지지 못 하였으며, 너무 높은 속도와 너무 긴 시간의 코팅은 도포한 페인트까지 벗겨지는 특징이 나타났다. 가장 안정적인 코팅은 750RPM에서 60초 동안 진행한 경우와 1000RPM에서 30초 동안 진행한 경우였으며, 코팅에 따른 스마트 페인트의 저항 측 정에는 영향을 끼치지 않아 안정적으로 사용 가능한 코팅 용액이라는 결과를 도출 하였다.

스마트 페인트의 재료적 관점에서의 최적화와 공정 관점에서의 최적화의 결과들 을 이용하여 분포 측정을 위한 실험을 진행하였으며, 실험은 40mm간격의 10mm의 선으로 페인트를 도포시켜 진행하였다. 각각의 선에 저항측정을 위한 전극을 연결 시켜 주었으며, 각각 선으로 도포된 페인트가 온도에 따른 저항특성을 도출하기 위 해 챔버를 통해 측정을 진행하였다. 측정 결과 각 선에 대해 약 1요 정도의 저항 변화 폭 오차가 발생하였지만 노이즈가 적고 안정적인 측정이 되었다. 저항 변화 폭의 오차는 일정하지 못한 도포 단계에서 발생한 오차로 볼 수 있으며, 이것은 도 포를 정형화 시켰을 경우 해결 가능한 오차로 사료된다.

최적화 실험을 통해 표면 온도 측정용 스마트 페인트의 효율적인 제작이 가능해 졌으며, 코팅을 통해 페인트의 표면 안정성을 향상시켰다. 또한 면으로의 측정이 아닌 선으로의 측정 또한 가능하여 분포도 측정의 가능성을 확인하였다. 추후 기판 으로 사용되는 물질의 열 전도성을 고려하여 실질적인 측정으로 분포도 측정이 이 루어질 예정이며, EHD 잉크젯 프린팅을 적용한 스마트 페인트의 가능성을 확인할 예정이다. 더 나아가 온도 분포에 대한 모니터링 기술이 확보될 경우 활용성이 매 우 높은 온도센서가 될 것으로 사료된다.



참고 문 헌

[1] A. Farrahi and I. P. Grande, "Simplified analysis of the thermal behavior of a spinning satellite flying over Sun-synchronous orbits," *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp. 1146-1156, 2017.

[2] S. W. Kim, B. S. Hyun, C. H. Kim and D. S. Hwang, "A study on the verifying structural safety of satellite structure by coupled load analysis," *The Journal of Korea Society of Communication and Space Technology*, vol. 5, pp. 75-79, 2010.

[3] A. Boudjemai, A. Mankourm, H. Salem, R. Amri, R. Hocine and B. Chouchaoui, "Inserts thermal coupling analysis in hexagonal honeycomb plates used for satellite structural design," *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, pp. 352-361, 2014.

[4] J. Sousa, G. Paniagua and E. C. Morata, "Thermodynamic analysis of a gas turbine engine with a rotating detonation combustor," *Applied Energy*, vol. 195, pp. 247-256, 2017.

[5] Z. Ji, J. Qin, K. Cheng, H. Liu, S. Zhang and P. Dong, "Thermodynamic analysis of a solid oxide fuel cell jet hybrid engine for long endurance unmanned air vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 183, pp. 50-64, 2019.

[6] J. G. Bauzin, N. Keruzore, N. Laraqi, A. Gapin and J. F. Diebold, "Identification of the heat flux generated by friction in an aircraft braking system," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 130, pp. 449-456, 2018.

[7] B. Zhang, Z. Lu, Z. Liu, G. Liang and Y. Chen, "Investigation of a vehicle fire caused by manufacturing defect," *Engineering Failure Analysis*, vol. 91, pp. 28-34, 2018.

[8] J. W. Kim, J. W. Oh and H. S. Lee, "Review on battery thermal management system for electric vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 192-212, 2019.

[9] M. Y. Shin, S. H. Lee, D. Y. Jung and D. K. Kwak, "A study on development of electric safety control system by using electrochemical characteristics of PTC thermistor," *2006 KIFSE Spring Conference*, 2006.

[10] B. S. Suk, Y. K. Lee and N. Y. Lee, "Accuracy analysis on the temperature measurement with thermistor," *Korea Aerospace Research Institute*, vol. 7, pp. 115-120, 2008.

[11] W. Rowlands and B. Vaidhyanathan, "Additive manufacturing of barium titanate based ceramic heaters with positive temperature coefficient of resistance (PTCR), *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 3475-3483, 2019.

[12] M. H. Park and S. C. Kim, "Heating performance enhancement of high capacity PTC heater with modified louver fin for electric vehicles," *Energies*, vol. 12, pp. 2900, 2019.

[13] J. J. Qu, S. Li, F. Liu, C. L. Yuan, D. J. Zhou and H. L. Lin, "Effect of structures and substrate temperatures on $BaZn_{0.06}Bi_{0.94}O_{3-\delta}$ perovskite based NTC thermistor thin films," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 91, pp. 239-245, 2019.

[14] Y. C. Lee, J. H. Ahn and C. Y. Lee, "Bending characteristics of Ag micro circuits using electrohydrodynamics printing technology," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 13, pp. 37-42, 2019.

[15] S. Alkaraki, Y. Gao, S. Stremsdoerfer, E. D. Gayets and C. Parini, "3D printed antennas metallized using conductive paint at X-Band," *13th European Conference on Antennas and Propagation*, 2019.

[16] J. Kuroda, R. Uda, H. Tanabe, K. Yamanaka and H. Taguchi, "Production of high purity Cu microparticles and development of conductive paints using electrostatic colloid solution," *International Journal of GEOMATE*, vol. 17, pp. 122-128, 2019.

[17] I. Payo and J. M. Hale, "Dynamic characterization of piezoelectric paint sensors under biaxial strain," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 163, pp. 150-158, 2010.

[18] D. H. Han and L. H. Kang, "Piezoelectric characteristics of PNN-PZT/Epoxy paint sensor according to the poling conditions," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 269, pp. 419-426, 2018.

[19] R. T. Selvan, W. A. D. M. Jayathilaka, A. Hilaal and S. Ramakrishna, "Improved piezoelectric performance of electrospun PVDF nanofibers with conductive paint coated electrode," *International Journal of Nanoscience*, vol. 19, pp. 1950008, 2020.



[20] H. Mutsuda, Y. Tanaka, Y. Doi and Y. Moriyama, "Application of a flexible device coating with piezoelectric paint for harvesting wave energy," *Ocean Engineering*, vol. 172, pp. 170-182, 2019.

[21] 정용택, "최신 온도센서 기술동향-접촉식, 비접촉식 온도센서의 동작 원리 및 응용," *홍릉과학출판사*, 2015.

[22] H. Ueoka and M. Yodogawa, "Ceramic manufacturing technology for high performance PTC thermistor," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 3, pp. 77-82, 1974.

[23] K. E. Jack, E. O. Nwangwu, I. A. Etu and E. U. Osuagwu, "A simple thermistor design for industrial temperature measurement," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, pp. 57-66, 2016.

[24] H. G. Lee, U. S. Lee, H. W. Gang and M. J. Yu, "마이크로 에너지 변환 지능 형 세라믹 소재 기술," *The Korean Ceramic Society*, vol. 12, pp. 61-69, 2009.

[25] G. Min and D. M. Rowe, "Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module," *Energy Conversion and Management*, vol. 41, pp. 163-171, 2000.

[26] K. Song, Y. J Kim, K. H. Kwon, J. G. Kim, S. M. Moon and N. H. Cho, "Structure determination of Nano-crystalline, $BaTiO_3$, using precession electron diffraction," *Korean Journal of Microscopy*, vol. 39, pp. 341-348, 2009.

[27] J. H. Ahn and C. Y. Lee, "Resistance measurements of smart paint according to characteristics of ceramic material," *KSAS 2018 Fall Conference*, 2018.

[28] J. W. Joo, J. H. Kim, H. Kin and S. J. Park, "The changes in the electrical properties of $BaTiO_3$ -based PTCR materials due to the addition of (Ca, Sr) TiO_3 ," *Korean Journal of Materials Research*, vol. 7, pp. 347-353, 1997.

[29] S. H. Xie, B. K. Zhu, X. Z. Wei, Z. K. Xu and Y. Y. Xu, "Polyimide/ $BaTiO_3$ composites with controllable dielectric properties," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, pp. 1152-1157, 2005.

[30] J. H. Ahn and C. Y. Lee, "Fabrication and resistance characteristics of smart paint for temperature sensor,"*Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 13, pp. 43-50, 2019.