

Development of high functional PTFE-ZnO composite coating agent for Non-stick cookware

Sujin Woo, Yoorim Rho and Kangduk Kim[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received March 21, 2025)

(Revised April 4, 2025)

(Accepted April 16, 2025)

Abstract A PTFE-ZnO composite coating was manufactured to improve the thermal and mechanical properties while maintaining the non-stick properties of the PTFE (Poly Tetra Fluoro Ethylene, $(C_2F_4)_n$) coating agent for cookware. As a result of electron microscopic observation, the aggregation of particles was observed as the amount of ZnO powder added to PTFE was increased, and the best dispersibility was shown when 5 wt% was added. The addition of ZnO powders to PTFE resulted in a decrease in the coefficient of friction with time. As a result, the coefficient of friction increased with time when using ATS as a coupling agent. When 5 wt% of ZnO powders were added to PTFE, the thermal conductivity of the coating increased more than two times from 100 to 120 W/mK at 50~65 W/mK. In addition, as a result of the 72 hours salt spray test for examining the chemical stability of the coating solution, ZnO was stable without whitening or peeling regardless of whether or not the ZnO was added.

Key words PTFE-ZnO composite coating, Non-stick, Cookware, Thermal conductivity, Friction coefficient

Non-stick 조리기구용 고기능성 PTFE-ZnO 복합 코팅제 개발

우수진, 노유림, 김강덕[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2025년 3월 21일 접수)

(2025년 4월 4일 심사완료)

(2025년 4월 16일 게재확정)

요약 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene, $(C_2F_4)_n$) 코팅제의 Non-stick 특성을 유지하면서 열적, 기계적 특성을 향상시키기 위해 스프레이 코팅이 가능한 조리기구용 PTFE-ZnO 복합 코팅제를 제조하였다. PTFE에 분산제로 NMP와 증류수를 15 wt% 첨가하여 500 cp의 점도를 갖는 코팅액을 제조하였다. 전자현미경 관찰 결과, PTFE에 ZnO 분말을 첨가한 양이 증가함에 따라 ZnO 입자의 응집이 관찰되었으며, 5 wt%를 첨가했을 때 가장 좋은 분산성을 나타내었다. PTFE에 ZnO 분말을 첨가함에 따라 마찰 계수는 감소하고, ATS를 커플링제로 함께 사용하는 경우 마찰 계수가 더욱 감소하였다. PTFE에 ZnO 분말을 5 wt% 첨가했을 때 코팅막의 열전도도는 50~65 W/mK에서 100~120 W/mK로 2배 이상 증가하였다. 또한 코팅액의 화학적 안정성을 평가하기 위해 72시간 염수분무시험을 실시한 결과, ZnO 첨가 유무에 상관없이 백화나 박리 현상이 나타나지 않음을 확인하였다.

1. 서론

조리기구의 경우 200~300°C 온도에서 음식물이 조리기구의 표면에 달라붙는 것을 방지하기 위해 표면에 에너지가 낮은 소재를 표면에 코팅하는 것이 일반적이며, 현재 테프론(Teflon) 소재를 이용한 표면 코팅이 주를 이루고

있다[1,2]. 테프론은 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)계 불소수지로, PFA(Perfluoroalkoxy alkanes), FEP(Fluorinated ethylene propylene) 그리고 ETFE(Ethylene Tetra fluoro Ethylene) 계열 불소수지에 비해 비교적 내열성이 높아 현재 대부분의 조리기구에 활발히 사용되고 있다. 또한 탄소성분의 강력한 화학 결합으로 인해 매우 안정된 화합물을 형성하여, 우수한 화학적 비활성과 비점착성(Non-stick), 그리고 낮은 마찰계수 등 우수한 물리/화학적 특성들을 가지고 있다[3-6]. 현재는 다양한 코팅방법

[†]Corresponding author
E-mail: solidwaste@kyonggi.ac.kr

에 의해 주방용기부터 자동차·반도체·우주 항공 산업 부품 소재의 표면특성 제어까지 그 사용범위가 광범위하다는 장점을 가지고 있다[7,8]. 그러나 불소수지 코팅제의 경우 조리기구 사용 시 200~300°C의 온도조건에서 장시간 사용에 대비해 비점착성을 유지하는 것은 물론, 열팽창계수 및 열전도도와 같은 열적특성의 안정성을 가져야 한다[9]. 그 외에 금속/세라믹 소재의 조리도구와의 마찰에 견디는 고내구성 및 내마모성이 요구되며, 식초 및 육류 등의 산성 식품의 침식을 견디기 위해 내화학성 특성이 우수하여야 한다[10]. 만약 조리기구의 코팅제가 벗겨지는 경우 조리 기구의 stainless 및 aluminum 금속표면에서 납(Pb), 과망간산칼륨(KMnO₄) 등 유해한 성분이 용출되어 나올 가능성이 있으며, 이는 인체에 악영향을 미칠 수 있다[11].

조리 기구의 표면 코팅제로 적절한 불소수지의 우수한 비점착(Non-stick) 특성을 유지하면서 조리온도와 시간에 따른 열적 안정성 및 내구성을 증가시키기 위해서 현재 대부분의 조리 기구는 불소수지에 세라믹 분말을 혼합한 후 코팅하는 방법들이 연구되고 있으며, 첨가되는 세라믹으로는 산화물 계열로 TiO₂, SiO₂, ZrO₂ 등이 많이 사용되고 있다[12-15]. ZnO의 경우 우수한 열적, 화학적, 표면 및 미세구조적으로 광범위하게 주목받으며 코팅제로서 오염 방지 및 내구성 등이 요구되는 많은 응용분야에 사용되고 있다[16-20]. 특히 ZnO의 열전도도는 50 W/mK 이상으로 다른 산화물계 SiO₂(1.1~1.5 W/mK)와 TiO₂(4.8~11.8W/mK)에 비해 높은 값을 나타낸다[21-23]. 비록 질화물계의 AlN(170~321 W/m·K)과 BN(> 700 W/mK)에 비해 열전도도는 낮지만 NaCl 및 산성식품에 대한 내침식성이 우수하여 조리기구용 코팅제로 적합하다[24-27].

본 연구에서는 기존 불소수지의 비점착 특성을 유지하

면서 열적 안정성과 내구성이 우수한 조리기구용 코팅제의 개발을 위하여 PTFE 용액에 열전도도가 우수한 산화물계 ZnO가 첨가된 PTFE-세라믹 복합 코팅제 제조하고 물성을 평가하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 PTFE 용액은 국내 'D'사의 코팅액을 사용하였으며, PTFE 외에 계면활성제 역할을 하는 Polyoxyethylene(10) octylphenol 가 혼합되었다. PTFE-세라믹 코팅액 제조를 위한 세라믹 분말로 ZnO(고순도화학, 일본, 99.9%)를 사용하였다. PTFE-ZnO 코팅액의 알루미늄 기판 접착특성을 향상시키기 위하여 ATS(Aminopropyltrimethoxysilane, C₆H₁₇NO₃Si, Sigma-Aldrich. Co, U.S.A.)를 커플링제로 사용하였다. PTFE-ZnO 코팅액의 배합비는 Table 1에 나타내었다. PTFE-ZnO 코팅액의 제조는 2단계로 진행되었다. 먼저 배합비에 따라 칭량된 NMP와 증류수를 자석교반기(1 hr, 25°C)로 혼합 후 ZnO 분말과 함께 불밀($\Phi = 10$ mm, 1 hr, RPM = 50)로 혼합하였다. 혼합된 용액은 PTFE 용액과 혼합 후 다시 불밀

Table 1
Batch composition of the PTFE-ZnO primer

	Coating agent (wt.%)		*Dispersant (wt.%)		
	ZnO	PTFE	NMP	DW	ATS
PZ0	0	100	7.5	7.5	0
PZ2.5	2.5	97.5	7.5	7.5	0
PZ5	5	95	7.5	7.5	0
PZ5A	5	95	7.5	7.5	5
PZ7.5	7.5	92.5	7.5	7.5	0

*Weight percentage based on the amount coating agent

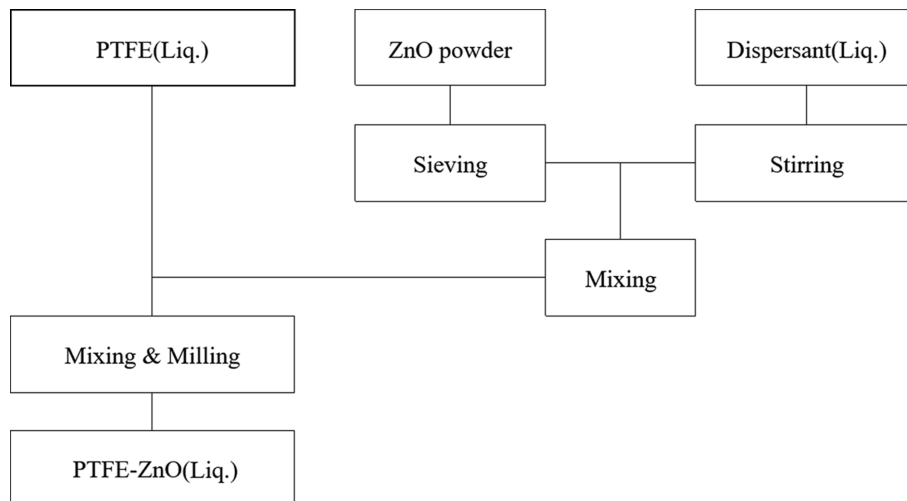


Fig. 1. PTFE-ZnO primer manufacturing process.

($\Phi = 10$ mm, 1 hr, RPM = 50)을 진행하여 최종 코팅액을 제조하였다.

일반적인 불소수지 코팅 조리기구의 경우 알루미늄 기판 위에 각각 Primer, Mid, Top 의 3단계 코팅층을 형성시킨다. 본 연구에서는 PTFE-ZnO 코팅액을 제조하여 조리기구의 코팅층 중에 가장 두껍고 물리/화학적 성질에 큰 영향을 미치는 Primer 층에 코팅하였다(Fig. 1). 코팅 방법은 기존 알루미늄 후라이팬에 적용되는 스프레이 코팅 방식을 적용하였으며, 코팅층의 균일성을 위하여 스프레이건의 분사각과 코팅횟수 등을 변수로 분사조건 예비 실험을 진행하였다. 분사조건 시험에서 최적 분사조건은 분사각 81° /코팅횟수 4회의 조건에서 기존 후라이팬의 코팅 두께와 유사한 30~40 μm 를 나타내었다. 알루미늄 기판에 Primer 코팅 후 $230^\circ\text{C}/15$ min 조건에서 1차 열처리를 진행하였으며, Mid, Top 코팅 후 $430^\circ\text{C}/$

10 min 조건에서 2차 열처리하여 시편을 제조하였다(Fig. 2).

코팅액의 점도는 점도계(DVEERTJ0, Brookfield, USA)를 이용하여 측정하였다. 코팅에 사용된 ZnO는 PTFE와의 균일한 혼합을 위하여 입도분포(MASTERSIZER 3000, Malvern Instruments Ltd., United Kingdom)와 열전도도(LFA 447, NETZSCH, Germany) 분석을 수행하였다. ZnO와 코팅막의 미세구조는 광학현미경(DCS-105, Sometech Vision, Korea)과 전자현미경(S-4800, HITACHI Co, Japan)으로 관찰하였다. PTFE에 ZnO가 혼합된 PTFE-ZnO 코팅제를 제조 후 코팅 및 열처리하여 마찰계수 및 내마모성(Tribometer, Korea, 40×40 mm²), 열전도도(LFA 447, NETZSCH, Germany), 그리고 내부식성(KS D 9502, 염수분무시험방법)을 측정하였다.

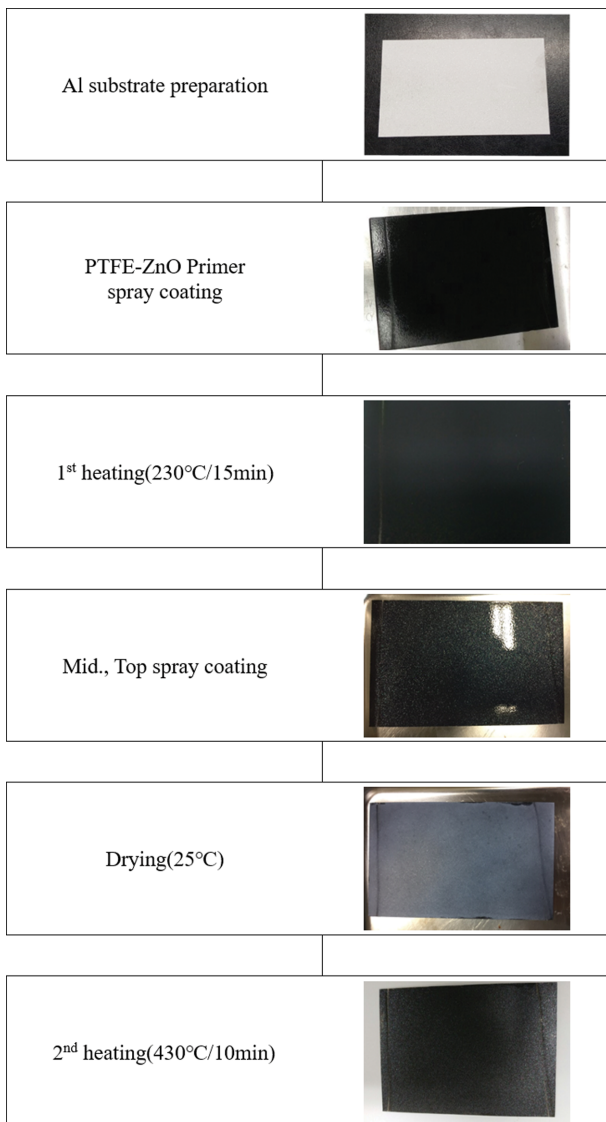


Fig. 2. Application process of coating agent on Al substrate.

3. 결과 및 고찰

Figure 3과 Fig. 4에 PTFE에 첨가될 ZnO 분말의 입도분포 및 미세구조를 나타내었다. ZnO는 0.3~20 μm 의 입도분포를 나타내었으며, 미세구조 관찰결과 대부분의 입자들이 모서리가 각진 형태의 불균일한 부정형을 나타내었다.

PTFE에 ZnO 분말을 분산시키기 위해 분산제로 NMP와 증류수(DW)를 사용하였으며, 분산제 첨가량에 따른 코팅액의 점도를 Fig. 5에 나타내었다. NMP의 경우 끓는점(204°C)이 높아 PTFE 용액과 세라믹 분체와의 혼합 및 분쇄 과정에서 쉽게 휘발하지 않으며 실란 처리 온도인 $60\sim 70^\circ\text{C}$ 에서 비산하거나 발화하지 않아, 타 극성 유기용매에 비해 많이 사용되고 있다[28-30]. 세라믹을 첨가하지 않은 PTFE 용액의 경우 800 cp 정도의 값을 나타내며, 증류수를 단독 분산제로 사용한 경우 첨가

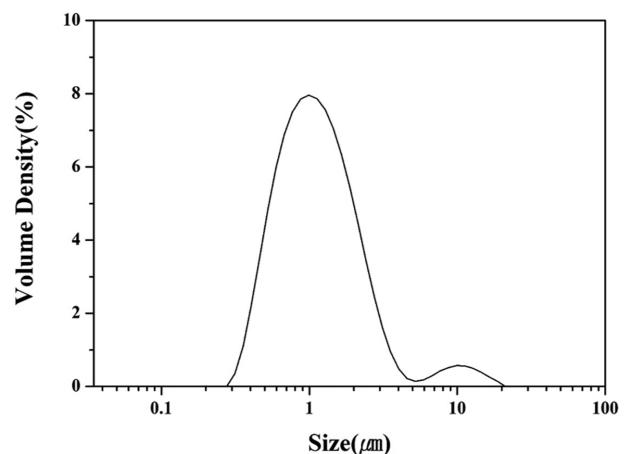


Fig. 3. Particle size distribution of the ZnO powder.

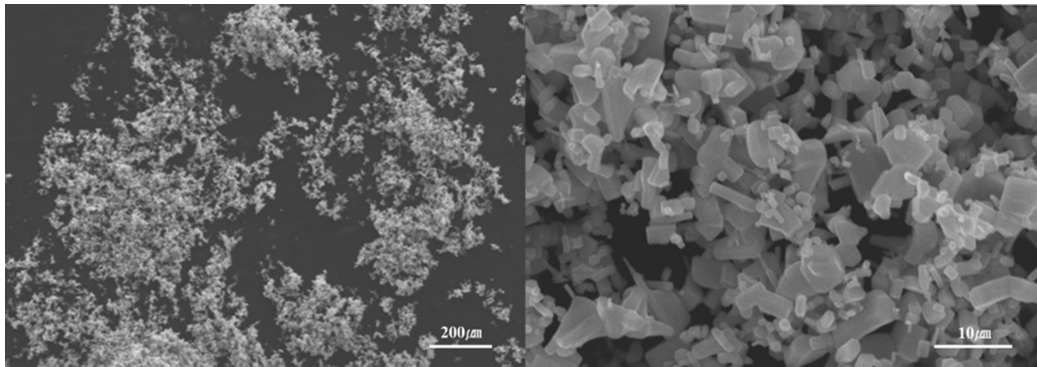


Fig. 4. Scanning electron microscope images of the ZnO powder.

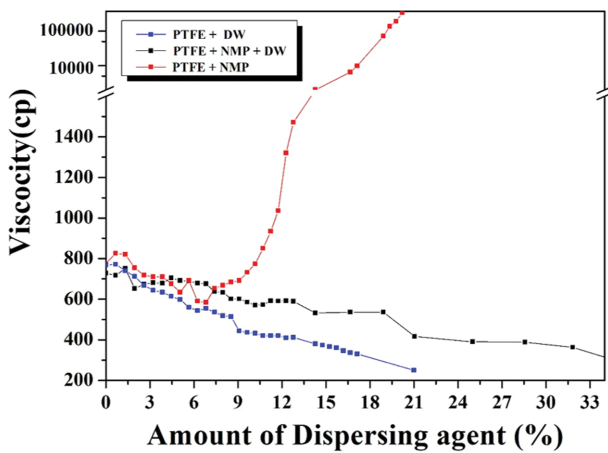


Fig. 5. Viscosity of PTFE primer agent according to addition of dispersant.

량이 증가함에 따라 코팅액의 점도는 점차 감소하여 300 cp까지 감소하였다. NMP와 증류수를 분산제로 동시에 사용할 경우 또한 코팅액의 점도는 점차 감소하여 416 cp까지 감소하였다. 그러나 NMP를 단독으로 사용한 경우 그 첨가량이 9 wt% 이하인 경우 점도가 점차 감소하는 경향을 보이나, NMP의 첨가량이 9 wt% 이상이 되는 경우 점도가 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 스프레이 코팅에 적당한 용액의 점도는 400~800 cp 범위로 알려져 있으며, 분산제로 NMP 단독 9 wt% 이상을 첨가하는 경우 해당 범위를 초과하여 스프레이 코팅에 적합하지 않음을 알 수 있다[31]. 본 연구에서는 PTFE+ZnO 기준으로 분산제를 15 wt% 첨가하여 코팅액을 제조하였다.

Figure 6는 ZnO의 첨가량 변화에 따른 PTFE-ZnO 코

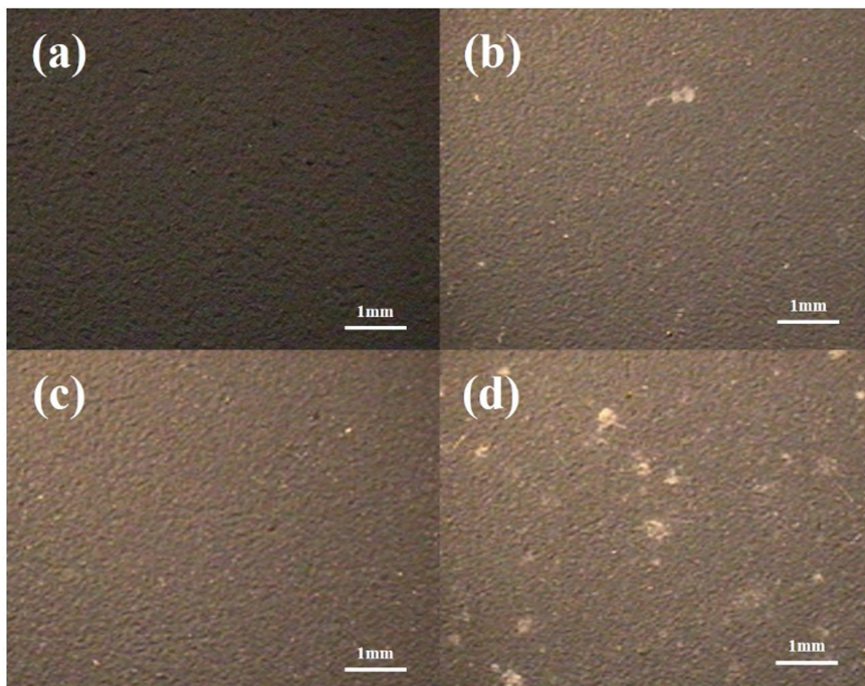


Fig. 6. Optical microscope images of PTFE-ZnO Primer with different amounts of ZnO addition: (a) PZ0, (b) PZ2.5, (c) PZ5, and (d) PZ7.5.

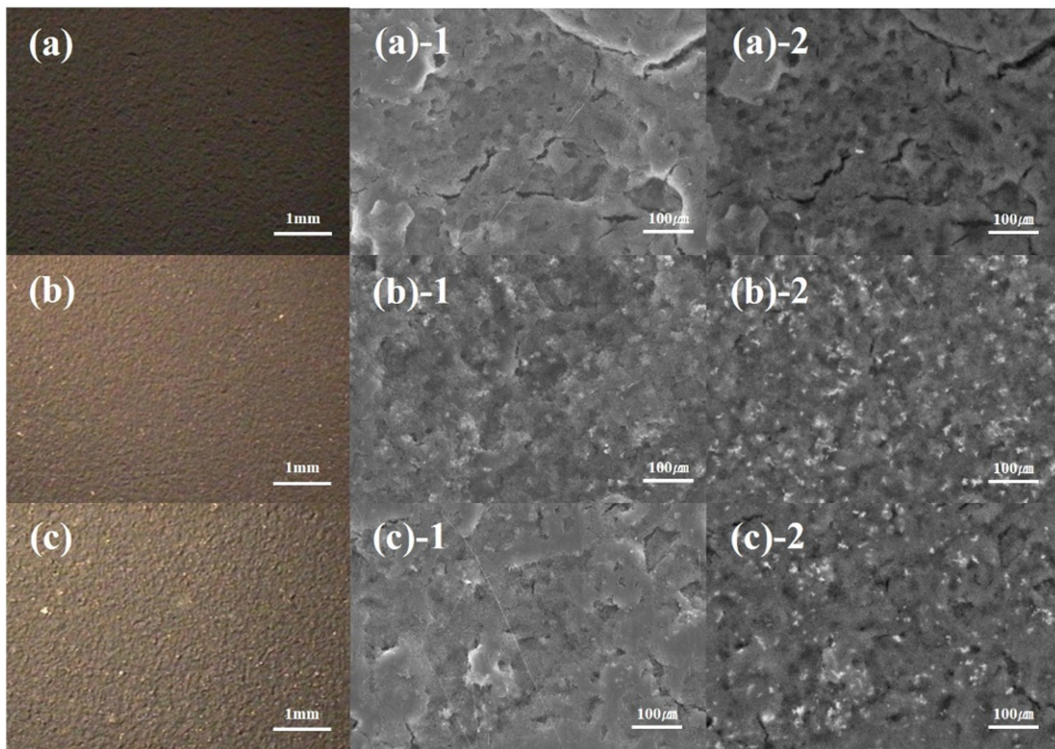


Fig. 7. Optical/scanning electron microscope images of PTFE-ZnO Primer with/without ATS addition: (a) PZ0, (b) PZ5, and (c) PZ5A optical microscope images; (a)-1, (b)-1, and (c)-1 scanning electron microscope SE mode; (a)-2, (b)-2, and (c)-2 scanning electron microscope BSE mode.

팅액의 광학현미경 관찰 이미지 결과이다. ZnO 첨가량은 각각 2.5, 5, 7.5 wt%로 PTFE에 혼합 후 금속기판에 분무법으로 코팅하였다. ZnO의 첨가에 따라 코팅층 표면에 ZnO가 응집된 것으로 보이는 백색의 얼룩들이 관찰되었다. ZnO 분체는 높은 표면에너지와 큰 비표면적을 가지고 있어 PTFE와 같은 고분자 매트릭스에서 분산성이 저하될 수 있다[32]. 따라서 본 연구에서는 정전기적 반발력 및 입체장애를 통한 ZnO의 응집을 억제하기 위한 분산제로 물과 잘 혼합되며 극성을 나타내는 NMP 유기화합물을 사용하였다[33,34]. 이때 ZnO가 각각 2.5와 5 wt% 첨가된 PZ2.5와 PZ5에서는 백색 얼룩이 적게 관찰되었으나 ZnO 첨가량이 7.5 wt%로 증가시 응집에 의한 백색 얼룩이 증가함을 확인하였다.

Figure 7은 PZ5 코팅액에 커플링제 ATS의 첨가 유무에 따른 이미지를 광학현미경과 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 광학현미경을 통한 표면이미지 관찰 결과, ATS 첨가에 따른 PZ5A 코팅액 표면의 큰 차이는 없으나 부분적으로 백색의 얼룩이 관찰되었다. 전자현미경을 통한 SE(Secondary Electrons)와 BSE(Back Scattered Electrons) 이미지 관찰결과, BSE 모드에서 PTFE에 혼합된 ZnO 입자들이 흰색 점으로 관찰되었다. ATS가 첨가된 경우, 첨가되지 않는 경우에 비해 ZnO 입자들이 부분적으로 뭉쳐서 응집체를 형성하고 있는 것이 관찰되

었다[35,36]. 이는 PTFE-ZnO 코팅액에 ATS가 첨가될 경우 금속기판과의 접착성능은 향상될 수 있으나, ZnO 분체의 분산성이 낮아지면서 코팅층의 불균질한 물성의 원인이 될 수 있을 것으로 판단된다[37-39].

Figure 8은 ZnO 첨가량 변화에 따른 PTFE-ZnO 코팅액의 마찰계수를 측정된 결과이다. 공통적으로 조리기구의 마찰계수 기준치 0.2보다 낮은 수치를 나타내었다. ZnO가 첨가되지 않은 PZ0 코팅액의 경우, 초기 마찰계

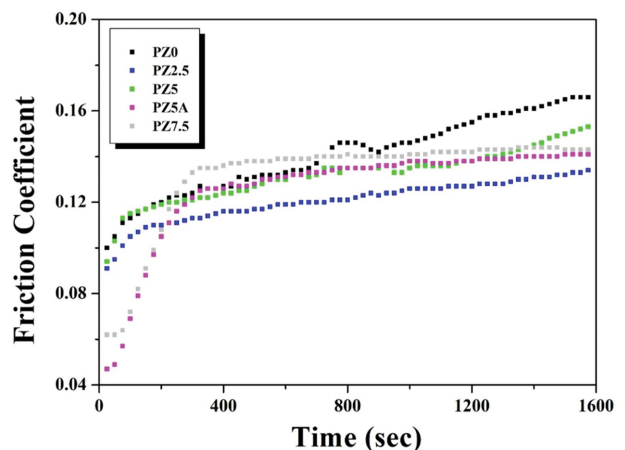


Fig. 8. Friction coefficient of PTFE-ZnO Primer coated Al substrates according to the difference amounts in ZnO addition.

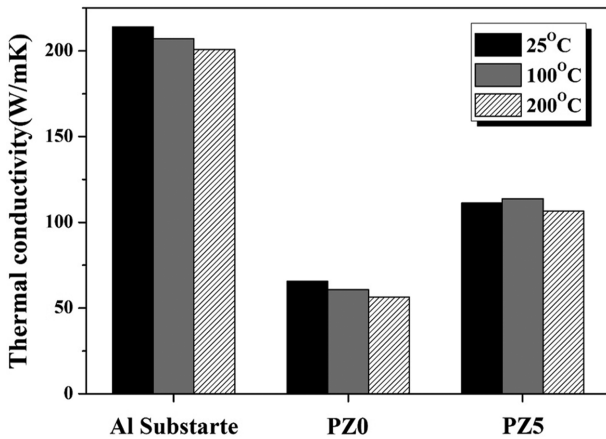


Fig. 9. Thermal conductivity of PTFE-ZnO primer coated Al substrates.

수 값은 낮게 관찰되었지만, 900초 이후부터 마찰계수 값이 서서히 증가하여 1500초 이후의 마찰계수는 0.167을 나타내었다. PZ5 코팅액의 경우 0.154의 마찰계수를 나타내었으며, ATS가 첨가된 PZ5A의 경우 0.134로 마찰계수 값이 낮아지는 경향을 나타내었다[40]. 이는 ATS가 금속기판과 코팅액의 결합력을 향상시켰기 때문으로 판단된다[41]. PTFE에 일정량의 ZnO 분체를 첨가하면, ZnO 입자들이 표면에 미세하게 분산되어 PTFE와 함께 마찰면에 안정적인 이착막을 형성함으로써 마찰계수를 낮추는 데 기여한다. 그러나 ZnO 첨가량이 임계치를 초과할 경우, 입자 간 응집이 발생하여 분산성이 저하되고, 이로 인해 오히려 마찰계수가 증가하는 현상이 나타난다. 본 실험 결과에서도 이러한 경향이 확인되었으며, 이는 ZnO 입자의 응집이 코팅액의 마찰 특성에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다[42]. 본 실험에서는 PTFE 용액에 ZnO 분체를 첨가하여 조리기구 표면의 Non-stick 성능을 저해하지 않는 코팅액 제조가 가능하다는 것을 확인하였다.

Figure 9은 순수한 알루미늄(Al) 기판, PZ0가 코팅된 알루미늄 기판 그리고 PZ5가 코팅된 알루미늄 기판의 열전도율을 측정된 결과이다. 순수한 알루미늄 금속 기판의 경우, 온도조건에 상관없이 200.0 W/mK 이상의 열전도율이 관찰되었다. PZ0 코팅액을 이용하여 코팅한

기판의 경우, 열전도율이 상온에서 65.7 W/mK의 값을 나타내었으며, 온도가 100°C, 200°C로 증가할수록 소폭 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 PZ5 코팅액을 이용하여 코팅된 기판의 경우, 열전도율은 상온에서 111.3 W/mK의 값을 나타내고 100°C에서 약간 증가한 후 200°C에서 다시 감소하여 106.3 W/mK를 나타내었다. 일반적으로 PTFE 소재의 열전도율은 0.2 W/mK로 알려져 있고, 본 실험에 사용된 ZnO 분체의 열전도율 측정 결과, 상온에서 0.9 W/mK의 열전도율을 나타내었으며, 100와 200°C에서 0.8 W/mK의 열전도율을 나타내었다[43-45]. 이에 따라 PTFE만 단독으로 사용된 코팅액보다 PTFE에 ZnO(5 wt%)가 첨가된 코팅액의 열전도도가 높게 관찰되었다[46]. ZnO 분체는 PTFE 내에서 열 전달 경로 형성에 영향을 미치며, 이때 ZnO가 응집될 경우 표면이 불균일해져 열전달 경로가 부분적으로 차단되고 전체적인 열전도율이 저하된다. 따라서 ZnO 첨가 시 가장 균일한 표면 형상을 보인 PZ5의 열전도율이 증가한 것은 ZnO의 응집 거동이 열전도 특성에 영향을 미친 것으로 판단된다[47]. 주방용 조리 기구의 경우 불꽃온도에 따라 약 800~1,400°C의 온도범위에서 사용되며, 가열조건의 조리 기구에서 중요한 물성 중 하나가 열전도율이다. 조리기구가 높은 열전도율을 나타낼수록 음식의 조리시간이 짧아지고 음식이 고루 익혀지는 장점을 나타내기 때문이다. 본 실험에서는 PTFE에 ZnO를 5 wt% 첨가하여 낮은 마찰계수를 통한 비점착성 특성을 유지하면서 높은 열전도율을 갖는 코팅액을 제조하였다.

Figure 10는 NaCl 5% 수용액을 기판에 분사한 후 72시간 경과, 부풀음과 백화현상 유무를 판단하는 염수 분무 시험법에 따른 광학이미지 결과이다. PZ0와 PZ5 코팅액 모두 부풀음 및 백화 현상이 발생하지 않음을 표면 이미지 관찰을 통해 확인할 수 있다. 염도가 높은 음식을 조리 시 NaCl 성분으로 인해 조리기구 표면의 고분자 코팅층에 부풀음이나 백화 현상을 발생할 수 있으므로, 음식물이 닿는 조리기구 표면의 부식의 저항성을 나타내는 내부식성은 매우 중요한 물성이다[48]. PTFE에 ZnO를 첨가 시 기존 내부식성에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.



Fig. 10. Optical image after 72-hour salt spray test of PTFE-ZnO Primer: (a) PZ0, (b) PZ5, and (c) PZ5A.

4. 결 론

조리기구용 코팅제의 비점착성은 유지하면서 열적/기계적 특성을 향상시키기 위해 PTFE-ZnO 복합 코팅제를 제조하였으며, 다음과 같은 특성을 확인하였다.

1) 전자현미경 관찰결과, PTFE에 ZnO 분체 첨가량이 증가할수록 입자들의 응집이 관찰되었으며, 5 wt% 첨가 시 가장 우수한 분산성을 나타내었다.

2) PTFE에 ZnO 분체를 첨가 시 시간에 따른 마찰계수의 증가폭이 낮아 2.0 이하의 우수한 비점착성을 유지하였다. 특히 커플링제로 ATS를 사용 시 시간에 따른 마찰계수의 증가폭이 감소하였으며, 이는 코팅제와 금속 기판의 결합력 향상에 기인한 것으로 판단된다.

3) PTFE에 ZnO 분체를 5 wt% 첨가 시 코팅액의 열전도율이 50~65 W/mK에서 100~120 W/mK로 2배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4) 화학적 안정성 검토를 위한 72시간 염수분무 시험 결과, ZnO가 첨가 유/무에 상관없이 백화나 부풀음 현상이 없는 안정한 상태를 나타내었다.

PTFE에 ZnO가 첨가된 PTFE-ZnO 복합 코팅제의 경우 비점착성의 저하 없이 열전도율, 경도, 내부식성이 향상됨을 확인할 수 있었으며, 향후 다양한 세라믹 분체의 첨가를 통해 비점착성을 유지하면서 우수한 열적/기계적 특성을 갖는 복합 코팅제에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] S. Rossi, G. Gai and R. De Benedetto, "Functional and perceptive aspects of non-stick coatings for cookware", *Mater. Design.* 53 (2014) 782.
- [2] N. Rungraeng, Y.C. Cho, S.H. Yoon and S. Jun, "Carbon nanotube-polytetrafluoroethylene nanocomposite coating for milk fouling reduction in plate heat exchanger", *J. Food Eng.* 111 (2012) 218.
- [3] E.J. Kim and Y.K. Park, "Teflon coating of fabric filters for enhancement of high temperature durability", *J. Korean Appl. Sci. Technol.* 28 (2011) 232.
- [4] A. Satyaprasad, S.K. Nema, N.K. Sinha and B. Raj, "Deposition of thick and adherent Teflon-like coating on industrial scale stainless steel shell using pulsed dc and RF PECVD", *Appl. Surf. Sci.* 256 (2010) 4334.
- [5] Z.X. Zhang, T. Zhang, X. Zhang, Z. Xin and K. Prakashan, "Fabrication of a thin-layer PTFE coating exhibiting superhydrophobicity by supercritical CO₂", *Prog. Org. Coat.* 111 (2017) 322.
- [6] C.C. Qin, A.T. Mulroney and M.C. Gupta, "Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of PTFE Teflon particles for wind turbine blades", *Mater. Today Commun.* 22 (2020) 100770.
- [7] A. Satyaprasad, V. Jain and S.K. Nema, "Deposition of superhydrophobic nanostructured Teflon-like coating using expanding plasma arc", *Appl. Surf. Sci.* 253 (2007) 5462.
- [8] L.L. Radulovic and Z.W. Wojcinski, "Encyclopedia of Toxicology", Academic Press. 3rd ed (2014) 1133.
- [9] H.H. Shim and O.K. Kwon, "Friction and wear characteristics of PTFE-polyimide composite", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.* 11 (1995) 28.
- [10] L. Wu, X. Guo and J. Zhang, "Abrasive resistant coatings—a review", *Lubricants.* 2 (2014) 66.
- [11] J.D. Weidenhamer, M.P. Fitzpatrick, A.M. Biro, P.A. Kobunski, M.R. Hudson, R.W. Corbin and P. Gottesfeld, "Metal exposures from aluminum cookware: an unrecognized public health risk in developing countries", *Sci. Total Environ.* 579 (2017) 805.
- [12] L. Odochian, C. Moldoveanu, A.M. Mocanu and G. Carja, "Contributions to the thermal degradation mechanism under nitrogen atmosphere of PTFE by TG-FTIR analysis. Influence of the additive nature", *Thermochimica Acta.* 526 (2011) 205.
- [13] S.A. Ntim, S. Norris, K. Scott, T.A. Thomas and G.O. Noonan, "Consumer use effects on nanoparticle release from commercially available ceramic cookware", *Food Control.* 87 (2018) 31.
- [14] H.S. Kang, "Non-Stickable Ceramic & P.T.F.E. Coated Cooking Ware", Korean Patent 10-0703881 (2007).
- [15] B.H. Lee, "The method of preparing frypan of double coating layers using ceramics composition of high hardness", Korean Patent 10-2015-0095305 (2015).
- [16] P. Pascariu and M. Homocianu, "ZnO-based ceramic nanofibers: Preparation, properties and applications", *Ceram. Int.* 45 (2019) 11158.
- [17] J. Lu, P. Dong, Y. Zhao, Y. Zhao and Y. Zeng, "3D printing of TPMS structural ZnO ceramics with good mechanical properties", *Ceram. Int.* 47 (2021) 12897.
- [18] H. Yamaguchi, Y. Chonan, M. Oda, T. Komiyama, T. Aoyama and S. Sugiyama, "Thermoelectric properties of ZnO ceramics co-doped with Al and transition metals", *J. Electron. Mater.* 40 (2011) 723.
- [19] F. Giovannelli, C. Chen, P. Diaz-Chao, E. Guilmeau and F. Delorme, "Thermal conductivity and stability of Al-doped ZnO nanostructured ceramics", *J. Eur. Ceram. Soc.* 38 (2018) 5015.
- [20] S. Sulaiman, I. Sudin, U.M.B. Al-Naib and M.F. Omar, "Review of the nanostructuring and doping strategies for high-performance ZnO thermoelectric materials", *Crystals.* 12 (2022) 1076.
- [21] M. Sahu and A. Satapathy, "Processing and characterization of TiO₂ filled polymer composites", *Mater. Today Proc.* 44 (2021) 4945.
- [22] W.Y. Tsai, G.R. Huang, K.K. Wang, C.F. Chen and J.C. Huang, "High thermal dissipation of Al heat sink when inserting ceramic powders by ultrasonic mechanical coating and armoring", *Mater. (Basel).* 10 (2017) 454.
- [23] L. Sang, M. Liao and B. Shen, "AlN as interlayer for effective thermal dissipation from gallium nitride to CVD diamond using nanocrystalline diamond seeding", *Information Funct. Mater.* 1 (2024) 331.
- [24] M. Ghobadi, F. Rahimzadeh Lotfabad, S.M. Zebarjad and R. Ebrahimi, "Quantitative analyzing the effect of h-BN on the thermal conductivity of HDPE-BN com-

- posite through multi-objective optimization”, *Polym. Adv. Technol.* 33 (2022) 2966.
- [25] Z. Liu, B. Wu and M. Gu, “Effect of AlN particles on the corrosion behavior of Al/AlN P composites”, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 5736.
- [26] T.A. Parthasarathy, C.A. Folsom and L.P. Zawada, “Combined effects of exposure to salt (NaCl) water and oxidation on the strength of uncoated and BN-coated Nicalon™ fibers”, *J. Am. Ceram. Soc.* 81 (1998) 1812.
- [27] A. Mostafaei and F. Nasirpour, “Epoxy/polyaniline-ZnO nanorods hybrid nanocomposite coatings: Synthesis, characterization and corrosion protection performance of conducting paints”, *Prog. Org. Coat.* 77 (2014) 146.
- [28] B. Chen, Z. Lei and J. Li, “Separation on aromatics and non-aromatics by extractive distillation with NMP”, *J. Chem. Eng. Japan.* 36 (2003) 20.
- [29] N.S. vBasma, T.F. Headen, M.S. Shaffer, N.T. Skipper and C.A. Howard, “Local structure and polar order in liquid N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)”, *J. Phys. Chem. B.* 122 (2018) 8963.
- [30] B. Zhou, P. Zhao, J. Guo, Y. Qiao, S. Hu, X. Guo and C. Li, “Unlocking the potential of antisolvent-free perovskite solar cells: Modulating crystallization and intermediates through a binary volatile additive strategy”, *Nano Energy* 124 (2024) 109487.
- [31] J.M. Martins, F.D. Magalhães, L. Carvalho, A. Henriques, C. Coelho and J.M. Ferra, “Introduction of advanced functionalities in laminates for wood-based panels: surface quality evaluation. In J. Davim & A. Aguilera (Cap. 1)”, *Wood Composites: Materials Manufacturing and Engineering 1* (2017).
- [32] N. Khurana, P. Arora, A.S. Pente, K.C. Pancholi, V. Kumar, C.P. Kaushik and S. Rattan, “Surface modification of zinc oxide nanoparticles by vinyltriethoxy silane (VTES)”, *Inorg. Chem. Commun.* 124 (2021) 108347.
- [33] A.L. Ahmad, J. Sugumaran and N.F. Shoparwe, “Anti-fouling properties of PES membranes by blending with ZnO nanoparticles and NMP-acetone mixture as solvent”, *Membranes* 8 (2018) 131.
- [34] T.C. de Oliveira, F.V. Ferreira, B.R. de Menezes, D.M. da Silva, A.S. dos Santos, E.Y. Kawachi and L.S. Cividanes, “Engineering the surface of carbon-based nanomaterials for dispersion control in organic solvents or polymer matrices”, *Surf. Interfaces* 24 (2021) 101121.
- [35] S. Tasaki, J. Tatami, H. Nakano, T. Wakihara, K. Komeya and T. Meguro, “Fabrication of ZnO ceramics using ZnO/Al₂O₃ nanocomposite particles prepared by mechanical treatment”, *J. Ceram. Soc. Japan.* 118 (2010) 118.
- [36] V. Srivastava, D. Gusain and Y.C. Sharma, “Synthesis, characterization and application of zinc oxide nanoparticles (n-ZnO)”, *Ceram. Int.* 39 (2013) 9803.
- [37] A.Z. Noor, S. Bibi, M. Asrar, M. Imran, S. Afzal, S. Abdal and M. Atif, “Revolutionizing applications: the impact of controlled surface chemistry on marble powder”, *RSC Adv.* 14 (2024) 35727.
- [38] M.S. Masraff, A.M.N.A.A. Rahman, M.R. Ramli, M.K.M. Jamil, M.K. Abdullah, M.Z. Ali and Z. Ahmad, “Alignment of silver nanoparticles in polysiloxane crosslink network under direct electric field”, *Compos. Sci. Technol.* 203 (2021) 108611.
- [39] V. Purcar, R. Şomoghi, S.G. Niţu, C.A. Nicolae, E. Alexandrescu, I.C. Gîfû and L.O. Cintează, “The effect of different coupling agents on nano-ZnO materials obtained via the sol-gel process”, *Nanomaterials* 7 (2017) 439.
- [40] F. Li, K.A. Hu, J.L. Li and B.Y. Zhao, “The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene”, *Wear.* 249 (2001) 877.
- [41] Y.G. Kim, I.K. Hwang, S.M. Choi, I.W. Yeo, S.G. Ahn, J.S. Kim, S.S. Lee and J.S. Park, “PTFE COATING AGENT, METHOD OF PREPARING AND USING THE SAME”, Korean Patent 10-1080725 (2011).
- [42] S.J. Park, S.H. Im, J.R. Lee and J.M. Rhee, “Thermal, frictional and wear behavior of carbon nanofiber/poly(methyl methacrylate) composites”, *Polym. Soc. Korea.* 30 (2006) 385.
- [43] C. Pan, K. Kou, Y. Zhang, Z. Li and G. Wu, “Enhanced through-plane thermal conductivity of PTFE composites with hybrid fillers of hexagonal boron nitride platelets and aluminum nitride particles”, *Compos. Part B: Eng.* 153 (2018) 1.
- [44] J. Blumm, A. Lindemann, M. Meyer and C. Strasser, “Characterization of PTFE using advanced thermal analysis techniques”, *Int. J. Thermophys.* 31 (2010) 1919.
- [45] M. Jebali, G. Colangelo and A.I. Gómez-Merino, “Green synthesis, characterization, and empirical thermal conductivity assessment of ZnO nanofluids for high-efficiency heat-transfer applications”, *Materials* 16 (2023) 1542.
- [46] F.K. Farhan, Z. Al-Ramadhan and W.A. Abd-Al Hussein, “Thermal properties of UPE-PMMA blend reinforced by ZnO nanoparticles”, *EJ-ENG.* 2 (2017) 45.
- [47] A.H. Rasheed, H. Alias and S.D. Salman, “Thermophysical properties for ZnO-water nanofluid: Experimental study”, *Mater. Sci. Forum.* 1025 (2021) 9.
- [48] A. Rüdiger and U. Köster, “Corrosion behavior of Al-Cu-Fe quasicrystals”, *Mater. Sci. Eng. A.* 294 (2000) 890.