



펄스 전류 하에서 AZ31 마그네슘 합금의 플라즈마전해산화 피막의 형성 거동

문성모^{a,b*}

^a한국재료연구원 나노표면재료연구본부, ^b과학기술연합대학원대학교 신소재공학과

PEO Film Formation Behavior of AZ31 Mg Alloy under Pulse Current

Sungmo Moon^{a,b*}

^aSurface Technology Division, Korea Institute of Materials Science, Republic of Korea

^bAdvanced Materials Engineering, University of Science and Technology, Republic of Korea

(Received 24 October, 2022 ; revised 26 October, 2022 ; accepted 27 October, 2022)

Abstract

In this study, PEO (plasma electrolytic oxidation) film formation behavior of AZ31 Mg alloy under application of 300 Hz pulse current was studied by the analyses of V-t curve, arc generation behavior, PEO film thickness and morphology of PEO films with treatment time in 0.05 M NaOH + 0.05 M Na₂SiO₃ + 0.1 M NaF solution. PEO films was observed to grow after 10 s of application of pulse current together with generation of micro-arcs. PEO film grew linearly with treatment time at a growth rate of about 5.58 $\mu\text{m}/\text{min}$ at 200 mA/cm² of pulse current but increasing rate of film formation voltage became lowered largely with increasing treatment time after passing about 250 V, suggesting that resistivity of PEO films during micro-arc generation decreases with increasing film formation voltage at more than 250 V.

Keywords : Plasma electrolytic oxidation; AZ31 Mg alloy; Anodic oxide film; Pulse current.

1. 서 론

AZ31 마그네슘 합금은 판재로 성형 가능한 합금으로서 높은 비강도, 치수 안정성, 진동 흡수성 및 전자파 차폐능 등의 우수한 특성으로 인하여 자동차, 항공기, 레저용품, 주방용품, 스피커 진동판 및 케이스류 소재로 각광을 받고 있다. 마그네슘은 구조용 금속 중 이온화 경향이 가장 높아 산성용액 또는 염소이온이 포함된 중성용액에서 빠르게 부식되는 문제를 나타낸다. 따라서 마그네슘 합금을 산업적으로 이용하기 위해서는 마그네슘 합금의 낮은 내식성의 문제를 해결해야 한다.

특히 마그네슘 합금은 우수한 기계적 물성을 확보하기 위하여 다량의 합금원소가 첨가되어 있어서 갈바닉 커플링에 의해 부식이 쉽게 가속된다. 따라서 자연산화피막만으로는 내식성의 향상에 한계가 있다.

마그네슘 표면에 내식성을 획기적으로 높일 수 있는 방법으로는 마그네슘 합금 소재 위에 보호성 피막을 만들어주는 표면처리법이 있다. 마그네슘 합금의 내식성을 향상시킬 수 있는 화학적 표면처리법으로는 제품을 용액 중에 침지시켜 안정된 화합물 층을 형성시켜 주는 화성처리법 [1-3], 용액 중에서 전기에너지를 인가하여 두꺼운 산화피막을 인위적으로 두껍게 형성시켜 주는 아노다이징법 및 플라즈마전해산화법 (PEO, Plasma Electrolytic Oxidation) 등이 있다. 화성처리법

*Corresponding Author: : Sungmo Moon
Surface Technology Division, Korea Institute of Materials Science,
Tel: +82-55-280-3549; Fax: +82-55-280-3570
E-mail: sungmo@kims.re.kr

은 전착도장과 함께 사용하여 저렴한 비용으로 높은 내식성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 마그네슘 합금의 PEO처리는 제품에 높은 전압을 인가하여 표면 산화피막의 유전체 파손을 일으킴과 동시에 아크의 발생으로 고온의 플라즈마 분위기에서 단단하고 두꺼운 산화피막을 만들어주는 방법이다. PEO피막의 물성 및 성장 특성은 전해질의 조성에 크게 영향을 받으며, 규산이온 [4-7], 수산화 이온 [7,8], 불소이온 [10-12], 탄산이온 [14] 및 인산 이온 [15-18]의 영향에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 많은 연구가 진행되어 왔음에도 PEO 피막의 형성 및 성장기구에 대한 이해는 여전히 부족한 실정이다. 특히 피막의 형성전압과 성장속도의 관계 그리고 피막의 구조와 유전체 파손의 관계에 대한 고찰은 충분하게 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 0.05 M NaOH + 0.05 M Na₂SiO₃ + 0.1 M NaF 용액에서 300 Hz, 200 mA/cm²의 펄스전류를 AZ31 마그네슘 합금에 인가하고 처리 시간에 따른 PEO 피막의 형성거동을 피막형성 전압, 아크의 발생 양상, 피막의 두께 및 미세구조를 관찰하여 연구하였다. 또한 얻어진 실험결과들을 바탕으로 PEO피막의 형성전압과 성장속도의 관계 및 PEO피막의 구조와 유전체 파손의 관계에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 시편은 두께 1mm의 AZ31 마그네슘 합금 판재 (wt.%, Al 2.94, Zn 0.8, Mn 0.3, Si < 0.1, Fe < 0.005, Cu < 0.05, and Mg balance)를 약 10 mm x 80 mm 크기로 절단한 후 표면을 SiC paper 및 knife-abrading method [19]로 연마한 후 시편의 한쪽 끝을 마스킹 테이프로 감아서 약 15 cm²의 면적이 노출되도록 마스킹 후 실험에 사용되었다. 사용된 플라즈마 전해산화 용액은 3 L의 0.05 M NaOH + 0.05 M Na₂SiO₃ + 0.1 M NaF이었으며, 상대 전극으로는 스테인리스 판을 사용하였다. 전해질은 이중 재킷 구조의 유리 비커 내에서 냉각액을 순환시켜 20 °C로 유지한 후 실험을 시작하였고, PEO 처리 시 마그네틱 스테어링으로 30 °C가 넘지 않도록 전해질의 온도를 유지하였다. 플라즈마전해산화 실험에 사용된 펄스 전류는 300 Hz, 양극전류밀도 rms 200 mA/cm² 및 음극전압은 50 V로 고정된 형태로 설정되었다. 플라즈마전해산화 피막 처리된 시편은

수돗물로 세척 후 air gun으로 건조하였다. 플라즈마전해산화 시 시편 표면은 디지털 카메라도 촬영되었으며, 피막의 두께는 코팅 두께 측정 방치 (Fisher, ISOSCOPE FMP10)를 이용하여 측정하였고, 피막의 표면 및 단면의 미세구조는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, JSM-6610LV)을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 1은 AZ31 마그네슘 합금 소재에 200 mA/cm², 300 Hz 펄스 전류를 인가했을 때 시간에 따른 전압의 변화를 보여주는 결과이다. 펄스 전류 인가 초기에는 14 V/s의 속도로 매우 빠르게 전압이 증가하다가 약 12초 이후 전압의 증가 속도가 느려져 약 1.4 V/s로 증가한 후 다시 약 80초 이후에는 0.2 V/s로 더 느리게 증가하였다. 그리고 약 160초 이후에는 전압증가가 거의 일어나지 않고 일정한 값을 나타내었다. 전류인가 초기 빠르게 전압이 증가하는 것은 장벽형 피막의 성장이 일어나기 때문이며, 약 12초 후 전압의 증가속도가 느려지는 것은 아크가 발생하여 다공성의 PEO피막이 성장하기 때문으로 해석할 수 있다. 80초 이후 피막형성전압이 다시 감소하는 이유는 아크의 발생 거동 (그림 2) 및 형성된 PEO피막의 구조를 관찰한 결과 (그림 5 및 6)를 토대로 토의될 것이다.

그림 1에서 약 160초 이후 전압증가가 거의 일어나지 않은 것은 그림 2(n)과 2(o)에서 보는 것처럼 아크의 발생 거동이 크게 변하지 않은 사실로 설명할 수 있다. 즉 정전류 모드로 PEO 처리 시

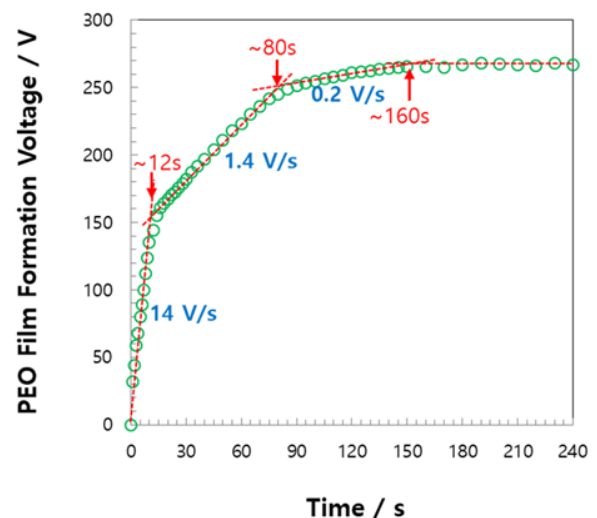


Fig. 1. Plot of film formation voltage of AZ31 Mg alloy with time at 200 mA/cm² of 300 Hz pulse current in 0.05 M NaOH + 0.05 M Na₂SiO₃ + 0.1 M NaF solution.

가해지는 전압의 크기는 피막의 유전체 파손 저항에 비례하며 피막의 유전체 파손은 아크의 크기, 색상 및 개수를 결정할 것이다, 따라서 아크의 크기 및 개수가 일정하게 나타난 180 초 ~ 240 초 사이에서는 피막의 성장이 일어나더라도 피막의 유전체 파손저항이 증가하지 않아서 피막 형성전압의 증가가 일어나지 않는다고 할 수 있다.

한편, PEO피막의 유전체 파손 저항은 피막의 구조와도 관계되어 있을 것으로 판단된다. 피막의 구조와 유전체 파손 저항에 대한 토의는 그림 6에서 보다 심도 있게 이루어질 것이다.

그림 2는 AZ31 마그네슘 합금 소재에 200 mA/cm², 300 Hz 펄스 전류를 인가 시 시간에 따라 시편 표면에서 발생된 아크의 양상을 보여주는 결과이다. 펄스 전류 인가 초기 약 8초까지는 아크가 발생하지 않고 가스만 발생되었고, 약 10초 이후에는 미세한 아크가 발생하여 시편 전체 표면이 붉은 색상을 띠었다. 그리고 약 30초 후에는 주황색의 큰 아크들이 국부적으로 뚜렷하게 나타났고, 전류인가 시간에 따라 커다란 주황색 아크의 수가 점차 증가하다가 약 80초 이후에는 전 표면에서 균일하게 발생되었다.

그림 3은 AZ31 마그네슘 합금 소재에 200 mA/cm², 300 Hz 펄스 전류를 인가하여 얻은 PEO 피막의 두께를 시간에 따라 도시한 결과이다. PEO 피막의 두께는 약 0.093 $\mu\text{m}/\text{s}$ 의 속도로 선형적으로 증가하였으며, 그림 4에서 외삽법으로 얻은 피막의 성장이 시작되는 시간은 약 9.9초로 얻어졌다. 그림 2에서 보면 아크의 발생이 약 10초부터 시작되고 그림 3에서 외삽법으로 얻은 PEO 피막의 두께가 두꺼워지기 시작하는 시간과 거의 일치함을 알 수 있다. PEO 피막의 성장속도 0.093 $\mu\text{m}/\text{s}$ 를 분당 성장속도로 환산하면 5.58 $\mu\text{m}/\text{min}$ 이

다. 황산 아노다이징에서 30 mA/cm²의 직류를 인가 시 얻을 수 있는 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 양극산화피막의 성장속도와 비교해 보면 매우 빠른 피막 성장속도라 할 수 있다. 200 ~ 300 V의 높은 전압 및 100 ~ 300 mA/cm²의 고전류밀도 하에서 성장시키는 PEO공정의 특성상 같은 두께의 피막을 얻기 위해서는 아노다이징법에 비해서 5 ~ 10 배의 전력량이 소모된다. 반면에 피막의 성장속도를 3 ~ 6배 빠르게 할 수 있으며, 용액의 냉각에 상대적으로 적은 양의 에너지를 사용하는 장점이 있다.

한편 PEO피막의 전류효율을 황산아노다이징법과 비교해 보면, 황산 아노다이징 시 200 mA/cm²의 직류를 인가할 경우 전류효율이 변하지 않는다고 가정하면 약 6.67 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 성장속도로 계산된다. 따라서 본 연구에서 얻어진 PEO피막의 성장속도 5.58 $\mu\text{m}/\text{min}$ 과 비교해 보면, PEO피막의 형성 효율은 황산 아노다이징 피막 형성효율의 약 83.5%라고 할 수 있다.

산성용액을 사용하는 아노다이징 공정의 경우 100 mA/cm² 이상으로 가할 경우 다량의 열 발생으로 용액의 온도가 과다하게 오르고 그 결과 산에 의한 반응이 급격하게 진행되어 형성된 산화피막의 물성이 급격하게 저하되는 문제가 있다. 반면에 PEO 공정의 경우 알칼리 용액을 사용하기에 다량의 열 발생으로 용액의 온도가 올라가더라도 화학반응에 의한 피막의 손상이 거의 일어나지 않는다. 따라서 PEO공정은 용액온도에 크게 구애받지 않고 높은 전류밀도를 인가하여 빠르게 성장시킬 수 있는 장점이 있다.

한편, 용액의 온도가 약 60 ~ 70 $^{\circ}\text{C}$ 이상으로 올라가고 인가전압이 과다하게 높을 경우 PEO공정에서도 아크가 국부적으로 집중되어 피막이 손상되는 버닝이 일어날 수 있다. 그러한 버닝현상은

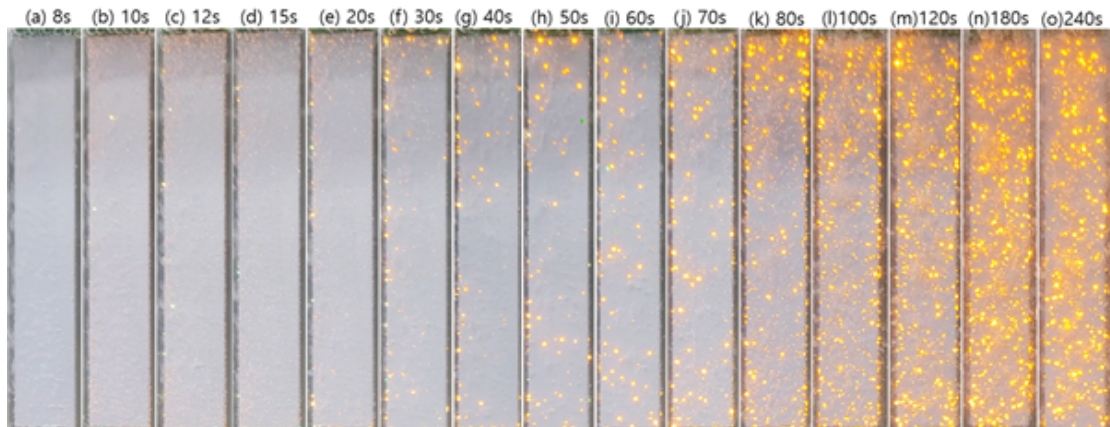


Fig. 2. Digital photographs of AZ31 Mg alloy with time at 200 mA/cm² of 300 Hz pulse current in 0.05 M NaOH + 0.05 M Na₂SiO₃ + 0.1 M NaF solution.

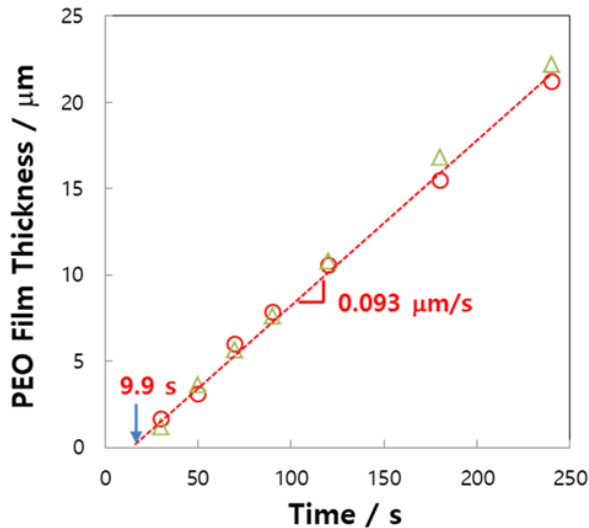


Fig. 3. PEO film thickness formed on AZ31 Mg alloy with film formation voltage at 200 mA/cm^2 of 300 Hz pulse current in $0.05 \text{ M NaOH} + 0.05 \text{ M Na}_2\text{SiO}_3 + 0.1 \text{ M NaF}$ solution.

시편의 재질 및 용액의 조성에 따라 발생하는 정도가 다르다. 따라서 작업조건 설정 시 시편의 재질에 따라 인가 전류밀도, 인가전압 및 처리 시간을 제어하여 국부적 버닝이 일어나지 않도록 제어해야 한다.

그림 3은 PEO 피막의 두께와 전압의 관계를 보여주는 결과이다. 그림 1에서 보면, 약 80 초 이후 전압의 증가속도가 현저하게 느려지다가 약 160 초 이후에는 전압증가가 거의 일어나지 않는다. 한편 PEO피막의 성장은 그림 3에서 보는 것처럼 전압증가 속도가 느려지는 것과 관계없이 같은 속도로 일어나고 있음을 알 수 있다. PEO 피막의 형성전압은 피막의 두께를 알려주는 지표로 사용할 수 있다. 그림 4에서 표시한 것처럼 250 V 이하에

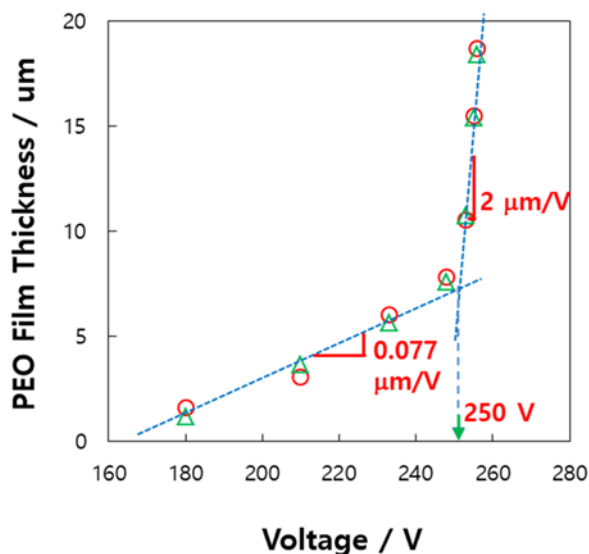


Fig. 4. PEO film thickness formed on AZ31 Mg alloy with film formation voltage at 200 mA/cm^2 of 300 Hz pulse current in $0.05 \text{ M NaOH} + 0.05 \text{ M Na}_2\text{SiO}_3 + 0.1 \text{ M NaF}$ solution.

서는 $0.077 \mu\text{m/V}$ 의 속도로 피막의 두께가 증가하다가 250 V 이상에서는 약 $2 \mu\text{m/V}$ 로 약 26배 증가하였다. 즉 250 V 이하에서 형성된 피막은 유전체 파손이 쉽지 않은 반면, 250 V 이상에서는 PEO피막이 쉽게 유전체 파손이 쉽게 일어난다고 할 수 있다.

그림 1과 그림 2에서 보면 약 80초 후 250 V에 도달하고 동시에 매우 큰 아크들은 전 표면에서 발생되기 시작함을 알 수 있다. 이는 250 V 이상에서 PEO피막이 형성될 경우 두꺼운 피막의 유전체 파손을 일으켜야 하므로 매우 큰 아크들이 발생함을 알려준다. 즉 250 V 이상에서 일어나는 PEO 피막의 유전체 파손은 매우 큰 아크의 발생으로 국부적으로 매우 높은 열을 발생시킴으로써 더욱 쉽게 일어난다고 할 수 있다.

그림 5는 AZ31 마그네슘 합금에 펄스전류를 인가했을 때 시간에 따른 PEO 피막의 표면구조를 보여주고 있다. 아크가 발생하기 시작한 직후 10 초 후 피막은 약 $0.5 \mu\text{m}$ 이하의 매우 미세한 기공을 포함한 얇은 PEO 피막이 형성되어 있었으며 처리시간이 증가함에 따라 점차 기공의 크기가 커지고 있음을 볼 수 있다. PEO 피막 내부에 형성된 기공의 크기는 발생된 아크의 크기에 비례하게 나타난다 (그림 2 참조). 따라서 기공의 크기가 작은 PEO 피막을 형성시키기 위해서는 발생하는 아크의 크기를 작게 만드는 기술이 필요하다. 일반적으로 주파수가 높은 교류 전류 또는 아노딕/캐소딕 펄스를 주기적으로 인가함으로써 아크의 크기를 미세하게 만들 수 있다. 또한 용액의 조성을 달리하여 아크의 크기를 조절할 수 있다. 인가된 펄스 전류 파형의 종류 및 용액의 조성에 따른 아크의 크기 변화 및 PEO피막의 구조변화에 대한 연구는 지속적으로 연구될 필요성이 있다.

한편 미세한 아크의 발생은 일반적으로 피막의 성장속도가 느린 단점을 가진다. 반면에 큰 아크의 발생은 기공의 크기가 큰 반면 빠른 피막의 성장속도를 나타낸다. 미세한 기공을 가진 PEO 피막을 저렴하게 얻을 수 있는 공정을 개발하기 위해서는 피막의 성장속도를 높이면서 동시에 피막 내부 기공의 크기를 줄일 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 한 가지 예로 아노다이징 피막이나 다공성의 PEO피막을 먼저 형성시킨 후 미세한 기공을 만들 수 있는 조건에서 PEO처리를 하는 방식을 들 수 있다. 이처럼 저렴하면서 우수한 물성을 나타내는 PEO공정기술에 대한 연구가 지속적으

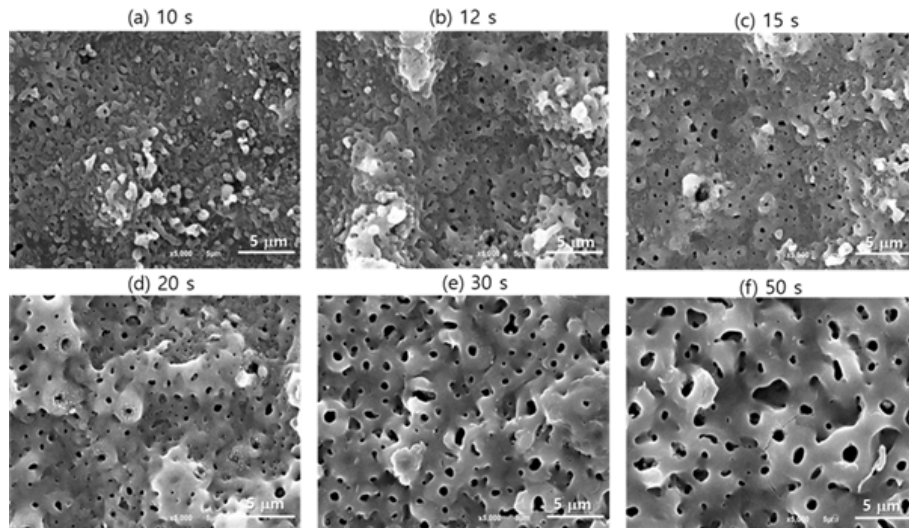


Fig. 5. SEM micrographs of the AZ31 Mg alloy surface with PEO treatment time at 200 mA/cm^2 of 300 Hz pulse current in $0.05 \text{ M NaOH} + 0.05 \text{ M Na}_2\text{SiO}_3 + 0.1 \text{ M NaF}$ solution.

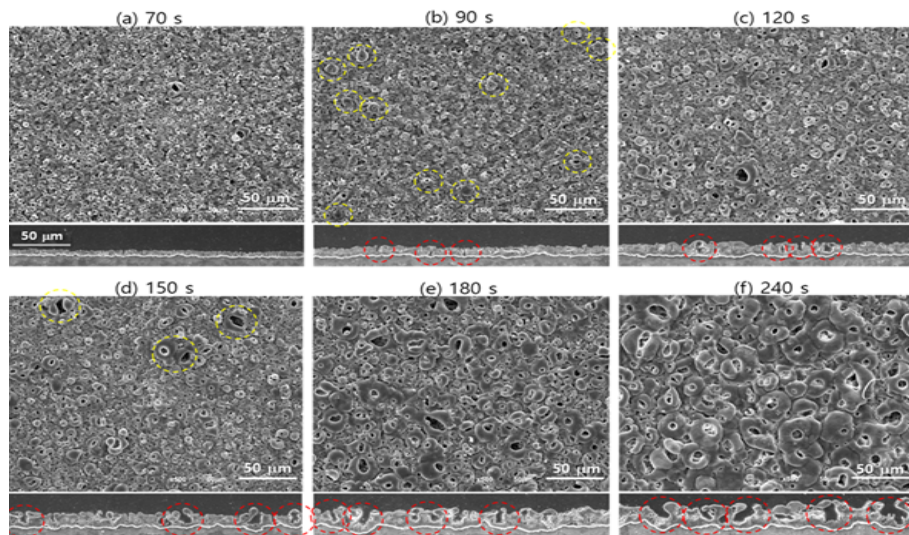


Fig. 6. Surface and cross-sectional morphologies of PEO films formed on AZ31 Mg alloy with time at 200 mA/cm^2 of 300 Hz pulse current in $0.05 \text{ M NaOH} + 0.05 \text{ M Na}_2\text{SiO}_3 + 0.1 \text{ M NaF}$ solution.

으로 이루어져야 할 것이다.

250 V 이상에서 PEO 피막의 유전체 파손이 더 쉽게 일어나는 원인을 이해하기 위해서는 형성된 PEO 피막의 구조를 정밀하게 관찰하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 피막형성전압이 250 V에 도달하기 전인 70초와 도달 후인 90초 처리한 PEO 피막의 구조를 비교해 보면 (그림 6), 그림 6(b)의 표면사진에서 노란색 점선의 원으로 표시한 것처럼 약 $10 \mu\text{m}$ 내외의 크기를 가진 노물들이 형성되기 시작했다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 6에서 표면사진 아래 부분에 도시한 PEO 피막의 단면사진을 관찰해 보면 적색의 점선으로 표시된 원 안에서 보는 것처럼 커다란 기공들이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 즉 250 V 이상에서 250 V 이하에서보다 PEO 피막의 유전체 파손이 더 쉽

게 일어나는 것은 피막 내 기공 결함들이 크기가 커져서 유전체 파손저항이 낮아졌기 때문이라 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 $0.05 \text{ M NaOH} + 0.05 \text{ M Na}_2\text{SiO}_3 + 0.1 \text{ M NaF}$ 용액에서 AZ31 마그네슘 합금에 300 Hz, 200 mA/cm^2 의 펄스전류를 인가하여 플라즈마 전해산화 피막을 형성시키고, 시간에 따른 피막 형성 전압, 아크의 발생 양상, 피막의 두께 및 미세 구조를 관찰하여 PEO 피막의 형성거동에 대하여 연구하였다. 실험 결과 PEO 피막은 펄스 전류 인가 후 약 10초 후부터 아크의 발생과 함께 성장하기 시작하였으며, 피막 형성전압은 전류인가 초기 10초

초기 10초까지는 4 V/s의 매우 빠른 속도로 증가 후 약 10 초 이후 아크의 발생과 함께 전압의 증가 속도가 약 1.4 V/s으로 느려지고 약 80 초 후에는 다시 0.2 V/s로 더 느려지는 현상이 관찰되었다. PEO 처리 시간에 따라 피막 형성전압이 감소하는 현상은 높은 전압 하에서 피막의 유전체 파손이 더욱 쉽게 일어나기 때문으로 사료된다. PEO 피막의 성장속도는 피막 형성전압과 관계없이 정전류 모드에서 약 5.58 $\mu\text{m}/\text{min}$ 로 일정하게 나타났다. 피막의 두께와 인가전압의 관계를 살펴본 결과 250 V 이하 및 이상에서 각각 0.077 $\mu\text{m}/\text{V}$ 및 2 $\mu\text{m}/\text{V}$ 로 나타났다. 250 V 이상의 전압에서 AZ31 Mg 합금 표면에 형성된 PEO피막의 유전체 파손이 쉽게 일어나는 현상은 피막 내 기공 결함들이 크기가 커져서 유전체 파손저항이 낮아졌기 때문으로 여겨진다.

감사의 글

This research was financially supported by a research grant of KIMS.

REFERENCE

- [1] N. V. Phuong, M. Gupta, S. Moon, Corrosion performance of magnesium phosphate conversion coating on AZ31 magnesium, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 27 (2017) 1087-1095.
- [2] B. R. Fazal, S. Moon, Formation of cerium conversion coatings on AZ31 magnesium alloy, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 49 (2016) 1-13.
- [3] B. R. Fazal, S. Moon, Effect of fluoride conversion coating on the corrosion resistance and adhesion of E-painted AZ31 magnesium alloy, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 49 (2016) 395-400.
- [4] D. Kwon, P. K. Song, S. Moon, Formation behavior and properties of PEO Films on AZ91 Mg alloy in 0.1 M NaOH + 0.05 M NaF solution containing various Na_2SiO_3 , *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 53 (2020) 59-66.
- [5] S. L. Aktuđ, S. Durdu, I. Kutbay, M. Usta, Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ concentration on microstructure and mechanical properties of plasma electrolytic oxide coatings on AZ31 Mg alloy produced by twin roll casting, *Ceram. Int.*, 42 (2016) 1246.
- [6] S. Moon, C. Yang, S. Na, Effects of hydroxide and silicate ions on the plasma electrolytic oxidation of AZ31 Mg Alloy, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 47 (2014) 147-154.
- [7] H. Duan, C. Yan, F. Wang, Effect of electrolyte additives on performance of plasma electrolytic oxidation films formed on magnesium alloy AZ91D, *Electrochim.*, 52 (2007) 3785-3793.
- [8] S. Moon, Y. Kim, C. Yang, Effect of NaOH concentration on the PEO film formation of AZ31 magnesium alloy in the electrolyte containing carbonate and silicate Ions, *J. Surf. Sci. Eng.*, 50 (2017) 308-314.
- [9] S. Moon, D. Kwon, Anodic oxidation behavior of AZ31 Mg alloy in aqueous solutions containing various NaF concentrations, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 55 (2022) 196-201.
- [10] S. Moon, D. Kwon, Anodic oxide films formed on AZ3 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation method in electrolytes containing various NaF concentrations, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 49 (2016) 225-230.
- [11] S. Stojadinović, R. Vasilic, Jelena R. P., M. Perić, Characterization of plasma electrolytic oxidation of magnesium alloy AZ31 in alkaline solution containing fluoride, *Surf. Coat. Technol.*, 273 (2015) 1-11.
- [12] B. Kazanski, A. Kossenko, M. Zinigrad, A. Lugovskoy, Fluoride ions as modifiers of the oxide layer produced by plasma electrolytic oxidation on AZ91D magnesium alloy, *Appl. Surf. Sci.*, 287 (2013) 461-466.
- [13] J. Liang, B. Guo, J. Tian, H. Liu, J. Zhou, T. Xu, Effect of potassium fluoride in electrolytic solution on the structure and properties of microarc oxidation coatings on magnesium alloy, *Appl. Surf. Sci.*, 252 (2005) 345-351.
- [14] S. Moon, Y. Kim, Anodic oxidation behavior

- of AZ31 magnesium alloy in aqueous electrolyte containing various Na_2CO_3 concentrations, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 49 (2016) 331-338.
- [15] S. Moon, J. Kim, Effect of Na_3PO_4 concentration on the formation behavior of PEO films on AZ31 Mg alloy, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 52 (2019) 265-274.
- [16] S. Yagi, A. Sengoku, K. Kubota, E. Matsubara, Surface modification of ACM522 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation in phosphate electrolyte, *Corros. Sci.*, 57 (2012) 74-80.
- [17] J. Liang, P. B. Srinivasan, C. Blawert, M. Störmer, W. Dietzel, Electrochemical corrosion behaviour of plasma electrolytic oxidation coatings on AM50 magnesium alloy formed in silicate and phosphate based electrolytes, *Electrochim. Acta*, 54 (2009) 3842-3850.
- [18] R. Arrabal, E. Matykina, F. Viejo, P. Skeldon, G. E. Thompson, Corrosion resistance of WE43 and AZ91D magnesium alloys with phosphate PEO coatings, *Corros. Sci.*, 50 (2008) 1744-1752.
- [19] S. Moon, A blade-abrading method for surface pretreatment of Mg alloys, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.* 48 (2015) 194-198.