

에폭시 기반 연성 폴리머 콘크리트의 자외선 노출에 의한 기계적 물성평가

노인택* · 정경채* · 장승환**†

Evaluation of Mechanical Property Variation of Epoxy Based Compliant Polymer Concretes Exposed to UV Light

In-Taek Roh*, Kyung-Chae Jung*, Seung-Hwan Chang**†

ABSTRACT: This paper aims to evaluate material property variation of polymer concretes under ultra-violet exposure condition. The components and mixing ratio of the polymer composite specimens were determined by the previous research results. The equivalent UV exposure time was calculated with the consideration of the power of metal halide lamp and maximum 3 years were selected for the experiments. From the tests, it was found that the generated heat during UV exposure affected much the material properties of polymer concrete by means of post cure. As a result, the compressive strength increased and ductility factor decreased.

초 록: 본 연구에서는 공항 포장용 유지보수 재료로 사용되는 폴리머 콘크리트의 자외선 노출에 대한 기계적 물성 변화를 확인하기 위해 자외선 노출 전/후 시편의 압축강도 및 연성인자의 변화를 평가하였다. 현재 공항 포장용으로 사용되는 폴리머 콘크리트의 비율과 선행연구를 통해 얻은 최적 배합비율을 참고하여 시편을 제작하였다. 자외선 발생 램프의 출력을 고려하여 자연상태에서 노출되는 등가시간을 계산한 후 최대 3년에 해당하는 시간만큼의 등가시간 동안 시편을 노출시켰다. 실험결과, 자외선 노출 자체는 재료물성에 거의 영향을 주지 않았으며, 자외선 노출에 따른 온도상승에 의한 재료물성 변화가 주로 관찰되었다. 자외선에 의해 발생된 열에 노출된 후 모든 시편에서 인성은 감소하고, 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었다.

Key Words: 폴리머 콘크리트(Polymer concrete), 자외선 노출(Ultra violet exposure), 압축강도(Compressive strength), 연성인자(Ductility factor)

1. 서 론

포틀랜드 시멘트 콘크리트 (Portland cement concrete)는 현대 토목, 건축 구조물에서 가장 널리 사용되는 재료로서, 경제적이고 형상을 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있으며, 충분한 압축강도와 내구성을 가진 재료이다. 하지만 포틀랜드 시멘트 콘크리트는 낮은 휨강도와 인장강도, 동결융해,

중성화, 염화 등 구조적으로 다소 취약한 특성도 가지고 있다. 이에 따라 많은 연구자들이 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 단점을 개선한 고강도, 고 내구성을 위한 연구를 진행해 왔으며[1-4], 기존 시멘트 재료의 단점을 근본적으로 개선할 수 있는 방법으로 결합재료 시멘트 대신 수지를 사용하는 폴리머 콘크리트(Polymer concrete)를 제안하였다. 폴리머 콘크리트는 결합재료 에폭시 수지(Epoxy resin), 폴리우

Received 10 October 2014, received in revised form 2 December 2014, accepted 4 December 2014

*School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

**†School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Corresponding author (E-mail: phigs4@cau.ac.kr)

레탄 수지(Polyurethane resin), 불포화 폴리에스터 수지(Unsaturated polyester resin), 메틸 메타아크릴레이트(Methyl methacrylate) 등과 같은 수지를 사용하는 콘크리트로 중성화, 염해, 동결융해, 화학적 침식 등에 대해 뛰어난 내구성을 가지고 있다[5]. 또한 다른 물질과의 부착성능이 뛰어나며, 강도가 우수하기 때문에 고속도로 또는 활주로의 보수공사, 댐, 교량, 파이프 라인 등의 수선재료로 사용된다. 또한 활주로의 보수는 조속한 개방을 필요로 하기 때문에 짧은 시간에 강도발현이 가능한 폴리머 콘크리트가 적합한 재료이며, 실제 활주로 유지보수 재료로 널리 사용되고 있다[6]. 하지만 현재 공항 활주로 포장용 유지보수 재료로 사용되는 에폭시 계열의 폴리머 콘크리트는 자외선에 의해 재료의 물성이 민감하게 변화하는 재료로 알려져 있다. 자외선에 노출된 에폭시의 경우 화학적 구조에 따라 광열화 현상(Photo-degradation)이 다르게 일어나며, 광열화 반응을 통해 재료의 물리적 특성이 변화한다[7]. 따라서 본 연구에서는 에폭시 계열의 폴리머 콘크리트를 사용한 공항 활주로 유지보수 재료의 자외선에 의한 기계적 물성 변화여부를 자외선 발생기를 이용하여 실험적으로 규명하는 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 시편 제작

2.1 실험재료

본 연구에서는 기존 활주로 보수 공사에 사용되는 동일한 종류의 에폭시(Epoxy)와 경화제(Hardener)를 사용하여 시편을 제작하였다. 에폭시는 비스페놀(Bisphenol A) 계열로 Jungdo E&P사의 ERR200 제품을 사용하였고, 경화제는 폴리아미드(Polyamide) 계열의 ERH200 제품을 사용하였다. 에폭시와 경화제의 배합비율은 업체에서 제공하는 중량비율(5:1)을 사용하였다. 골재(Aggregate)는 4호사(0.85~1.2 mm)와 6호사(0.25~0.6 mm)를 2:1의 비율로 배합하여 사용하였다. 또한 연성 폴리머 콘크리트를 제작하기 위하여 분말 형태(0.2~0.5 mm)의 페타이어(Tire waste)를 첨가하였다. 시편의 표기는 '골재:수지:타이어 분말'로 표기하였다. 예를 들어 72:20:08 (T) 시편의 경우, 골재, 수지, 페타이어 분말이 각각 72%, 20%, 8%의 비율로 구성되어 있음을 의미한다. 배합비율의 선정은 기존 활주로 유지보수에 사용되는 배합비율과, 선행연구[8]를 통해 얻은 배합비율을 참고하였다. 각 배합비율은 중량비율로 표기하였으며, ASTM C192[9]에 제시된 배합방법을 참고하여 약 3분 동안 배합

하였다. 각 재료의 배합비율은 Table 1에 표기하였다.

2.2 시편 제작 및 실험

본 연구에서는 Table 1에 제시한 배합비율에 따라 각 재료를 배합한 후 상온에서 6시간 동안 경화시켜 폴리머 콘크리트 시편을 제작하였다. 자외선 노출조건에 따른 폴리머 콘크리트의 기계적 물성의 변화를 평가하기 위해 압축강도를 측정하였다. 압축강도 실험은 ASTM C579-01[10]을 참고하여 시편 크기($20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$)와 압축속도(1.25 mm/min)를 결정하였다. Fig. 1에 실험에 사용한 장비와 지그(Jig)를 나타내었다.

2.3 연성 인자(Ductility factor)

폴리머 콘크리트의 연성(Ductility)의 정량화를 위해 일정 소성구간의 변형률을 탄성영역의 변형률로 나누어 준 값(μ)으로 연성인자를 정의하여 식 (1) [11]로 표현하였다.



Fig. 1. Experimental test setups; (a) Compressive test, (b) UV exposure test

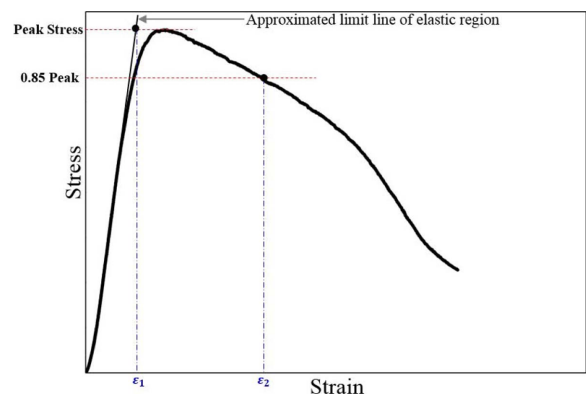


Fig. 2. Illustration of the calculation procedure for ductility factor

Table 1. Mixing ratio of polymer concretes (wt%)

Mixing ratio	Course aggregate	Fine aggregate	Epoxy	Hardener	Tire waste powder
90:10	60.00	30.00	8.33	1.67	-
72:20:08(T)	48.00	24.00	16.66	3.34	8.00

$$\mu = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 \quad (1)$$

여기서 ε_1 은 탄성 거동의 한계 변형률로, 최대 응력과 탄성구간 기울기의 연장선과 만나는 지점으로 정의된다. ε_2 는 소성구간의 변형률로, 최대 응력의 85%에 대응되는 변형률로 정의되며, ε_1 과 ε_2 를 구하는 방법을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 자외선 노출 실험

3.1 자외선 촉진 내후성 시험

본 연구에서는 자외선에 대한 폴리머 콘크리트의 재료 물성 변화를 파악하기 위해 실험용 챔버를 제작하였다. 챔버 내에는 자외선 조사를 위한 램프와 챔버 내부의 온도를 균일하게 유지하기 위한 팬이 장착되었다. 자외선 촉진 내후성에 영향을 미치는 인자는 세 가지로 각각 태양 복사량(Solar radiation), 온도, 수분이다. 하지만 이러한 요소들만이 재료의 노화에 영향을 미치는 것이 아니며 서로 다른 형태의 태양 복사량, 수분과 온도주기 등에 따라 복합적으로 영향을 미친다[12-14].

지구 표면에 도달하는 자외선은 295~400 nm의 파장을 가지는 빛으로 총 태양 복사의 4~7% 만을 차지하지만, 태양광 중 재료 물성의 저하에 큰 영향을 미친다. 따라서 자외

Table 2. Equivalent UV exposure time to natural exposures

Exposure time [hours]	1 year	2 years	3 years
	122	244	366

선 촉진 내후성을 평가하기 위해 적절한 광원을 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서 사용한 장비의 광원은 메탈 할라이드 램프(Metal halide lamp)로 128.75 W/m²의 출력을 가지는 램프를 사용하였다. 메탈 할라이드 램프는 태양광이 방출하는 분광 영역과 매우 흡사한 자외선을 방출하며, 균일하고 안정된 복사조도를 가진다. 자외선 촉진 내후성 시험 사이클은 KS F 2274[13]과 ASTM G151[14]를 참고하여 진행하였다. 자외선의 조사는 12시간 동안 유지하였고, 12시간동안 소등하는 사이클로 진행하였다. 램프에 의해 자외선이 조사되는 동안 챔버 내부의 온도가 약 50°C로 유지되었다.

자외선에 노출시키기 전/후 시편의 모습을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 자외선에 노출시킨 시편의 경우 표면이 변색된 것을 관찰할 수 있었다. 자외선이 폴리머 콘크리트의 내부로 어느 정도 영향을 미치는지 확인하기 위하여, 자외선 노출 후의 시편의 단면을 잘라 재료 내부를 관찰하였다. 관찰결과, Fig. 3(b)에서 보이는 바와 같이 자외선에 노출된 시편의 단면에서 주목할만한 변색 또는 이상현상을 찾을 수 없었다. 따라서 자외선의 영향은 시편 표면에 집중되는 것으로 보이며, 따라서 표면을 제외한 나머지 부분에서는 자외선의 영향에 의한 주목할만한 영향은 없는 것으로 판단된다.

3.2 가속실험을 위한 자외선 등가 노출시간

본 연구에서는 자연상태에서의 3년간의 자외선 노출을 기준으로, 제작된 챔버 내에서의 자외선 등가 노출시간을 계산하여 실험하였다. 가속실험을 위한 자외선 노출시간의 결정은 선행연구[12]를 참조하여 등가시간을 계산하였으며, 이러한 실험방식은 가속실험을 통한 물성의 변화를 실험적으로 결정한 연구들[15-17]에서도 동일한 방식으로 적용되어 본 실험의 타당성을 간접적으로 확인할 수 있다. 지표면에 도달하는 자외선의 양은 Cho 등[18]의 연구를 참고하여 UV-A와 UV-B의 일적산 복사량을 산출하였다. 지표면에 도달하는 자외선 복사량은 서울지역을 기준으로 하였고, 연평균 155 kJ/m²으로 나타났다. 자외선 촉진 내후성 장비로 자외선 조사 및 그에 따른 발생 열에 대한 조건을 동시에 고려하여 모사한 등가 노출시간은 Table 2와 같다.

4. 실험 결과

4.1 자외선 노출에 의한 강도변화

본 논문에서는 기존 활주로 유지보수 재료로 사용되는 폴리머 콘크리트를 개량한 연성 폴리머 콘크리트(72:20:08

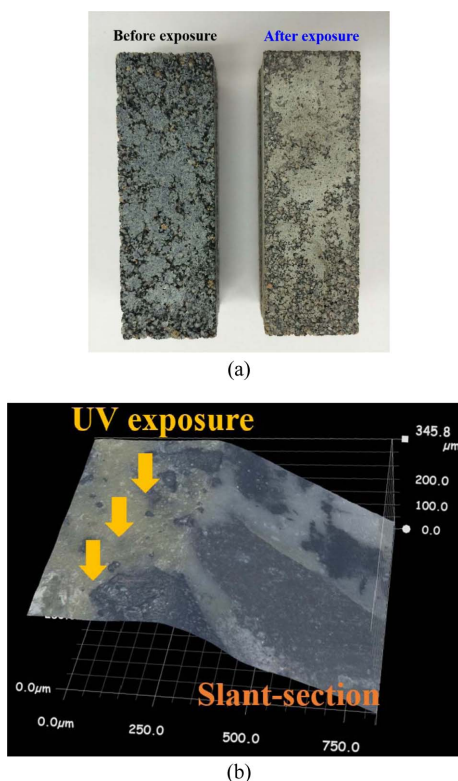


Fig. 3. Specimens for UV exposure test; (a) Before and after UV exposure, (b) Micrograph of the slant-section of a specimen

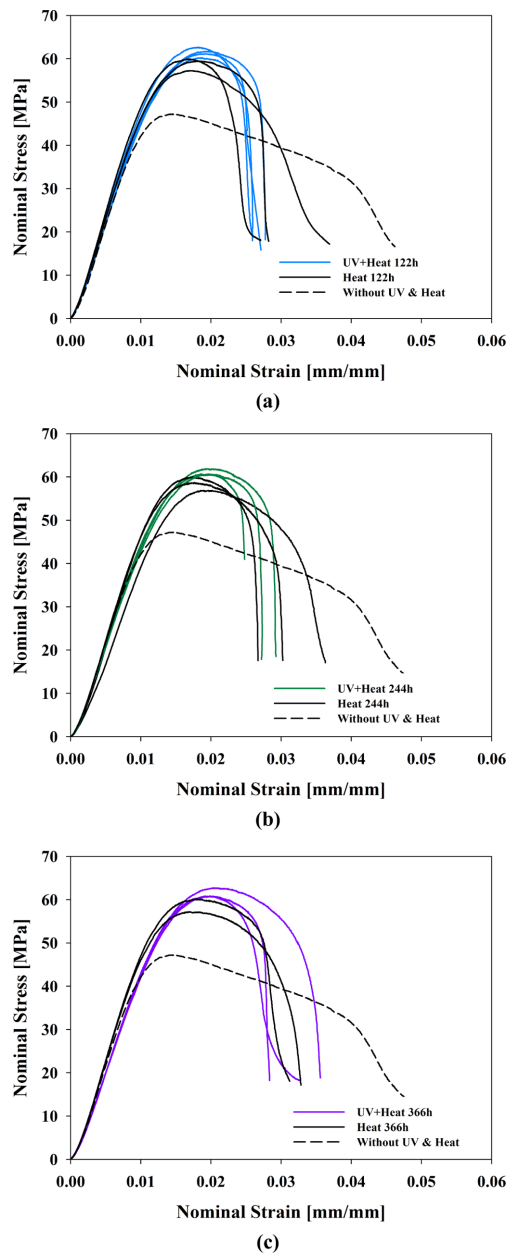


Fig. 4. UV exposure experiments: compressive test after (a) 122 hours, (b) 244 hours, (c) 366 hours exposure

(T))의 자외선 노출에 의한 기계적 물성의 변화를 실험적으로 평가하였다. 폴리머 콘크리트는 시멘트 콘크리트에 비해 환경온도의 변화에 민감하다. 본 연구에 사용된 자외선 조사 챔버의 경우 자외선의 출력에 의해 챔버 내의 온도가 약 50°C로 유지되는 점을 고려하여, 자외선만의 영향을 파악하기 위해 자외선 노출시편과 동일한 시편을 준비하여 시편의 외부를 알루미늄 호일로 감싸 자외선을 차단한 채 동일한 온도환경에 노출시킨 대조군 시편을 준비하였다. 실험은 1년(122시간)을 단위로 3년(366시간)까지 진행하였다. 압축강도 실험결과와 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과 1년, 2년, 3년 시편 모두 일반 시편에 비해 강도가 증가

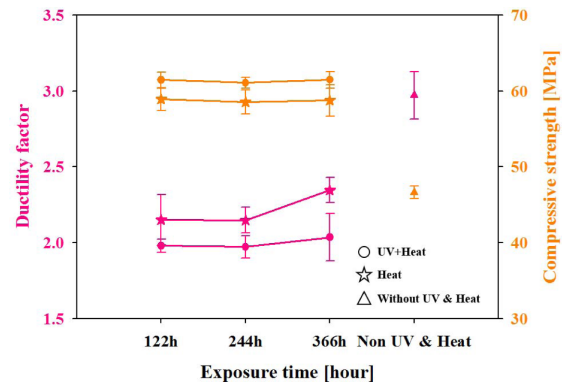


Fig. 5. Ductility factor and compressive strength according to UV exposure time

하고 파괴 변형률이 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 변화가 자외선에 의한 것인지 여부를 확인하기 위해 자외선이 차단된 상태에서 동일한 온도에 노출된 시편의 응력-변형률 선도를 비교하였다. 자외선과 열에 모두 노출시킨 시편과 열에만 노출시킨 시편은 노출시간에 따라 각각 4.35%, 4.34%, 4.66% 정도의 미미한 강도차이를 가짐을 알 수 있었다. 반면, 열에만 노출시킨 시편은 아무것에도 노출시키지 않은 일반 시편에 비해 각각 26.29%, 25.54%, 25.97%의 강도 증가를 보였다. 또한 노출시간에 따른 압축강도 차이는 거의 발생하지 않아(1% 미만) 실험에 사용한 등가노출시간 범위 내에서는 자외선 노출에 따른 물성차이는 없는 것으로 판단된다.

4.2 자외선 노출에 의한 연성의 변화

자외선과 열에 모두 노출시킨 시편과 열에만 노출시킨 시편, 그리고 아무것에도 노출시키지 않은 일반 시편의 강도와 연성 인자(Ductility factor)를 식 (1)에 따라 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 실험결과와 강도변화 실험결과와 같이 자외선에 의한 영향보다는 열에 의한 영향이 주요한 것으로 판단되며, 장시간 고온환경에 노출됨에 따라 연성이 감소하는 경향을 보였다. 연성인자 측정결과 자외선과 열에 모두 노출시킨 시편은 열에만 노출시킨 시편에 비해 노출시간에 따라 각각 7.94%, 8.15%, 13.19%가 감소하였다. 하지만 열에만 노출시킨 시편은 아무것에도 노출시키지 않은 일반 시편에 비해 각각 27.58%, 27.66%, 21.03%의 감소를 보였다. 이와 같은 실험결과를 바탕으로 에폭시 기반의 폴리머 콘크리트 물성변화의 주원인은 자외선 자체라기 보다 자외선 조사에 따른 온도의 상승에 의한 것으로 판단된다.

4.3 기존 폴리머 콘크리트와의 비교

자외선과 열에 모두 노출시킨 에폭시 기반 연성 폴리머 콘크리트 시편과 기존 활주로 유지보수 재료로 사용되는 일반 폴리머 콘크리트(골재:에폭시 = 90:10)시편과의 압축강도 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 4.1절에서 언급하였

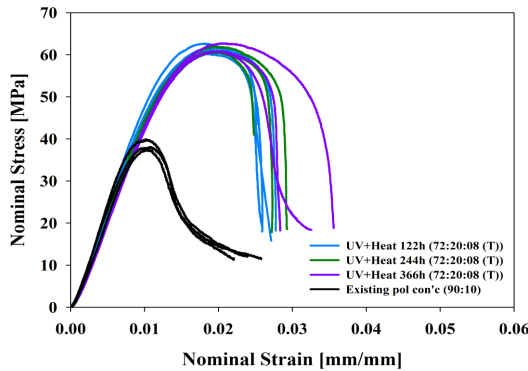


Fig. 6. Stress-strain relationships of polymer concretes according to the exposure time of UV.

듯이 자외선과 열에 모두 노출시킨 시편은 실험에 사용한 노출시간에 따른 영향은 없는 것으로 판단되며, 3년의 자외선 촉진 내후성 실험 이후에도 기존의 활주로 유지보수 재료보다 훨씬 높은 강도를 나타내는 것으로 판단된다. 강도는 기존 재료보다 노출시간에 따라 각각 59.65%, 58.69%, 59.73% 증가하였고, 연성인자는 23.52%, 23.11%, 27.00% 더 큰 값을 가지는 것을 확인하였다. 즉, 개량한 연성 폴리머 콘크리트(72:20:08 (T))의 자외선 촉진 내후성 시험 이후에도 일반 폴리머 콘크리트보다 강도와 인성이 모두 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존 활주로 유지보수 재료로 사용되는 폴리머 콘크리트에 일정비율의 페타이어 분말을 첨가하여 개량한 에폭시 기반의 연성 폴리머 콘크리트(72:20:08 (T))의 자외선 촉진 내후성 시험을 수행하였다. 자외선 발생 램프(메탈 할라이드 램프)를 이용한 챔버를 제작한 후 램프의 출력(128.75 W/m^2)에 따른 자외선 등가 노출시간을 계산하여 자연상태에서 1년, 2년, 3년의 노출시간을 모사한 시간 동안 자외선 노출실험을 수행하였다. 자외선에 노출된 시편의 압축강도와 연성 인자 측정을 통해 자외선 노출에 따른 재료물성 변화를 평가하였다. 자외선 노출에 의한 영향을 정확히 평가하기 위해 자외선 노출과 그에 따라 부가적으로 발생하는 열에 모두 노출시킨 시편, 열에만 노출시킨 시편과 아무것에도 노출시키지 않은 일반시편과 비교하였다. 자외선 노출에 의해 발생하는 열에 의한 챔버 내 온도는 약 50°C 이며, 팬에 의한 강제대류 방식으로 온도를 일정하게 유지시켰다. 실험결과 자외선 노출시간에 따른 재료의 물성 차이는 미미하였으며, 자외선보다는 자외선 노출에 의해 부가적으로 발생하는 열에 의한 영향이 주요하게 작용하였다. 자외선과 열에 모두 노출시킨 시편과 열에만 노출시킨 시편과의 압축강도 차이는 5% 미만인 반면 열에만 노출시킨 시편과 아무것에도 노출시키지 않은 시

편과는 약 25~27%의 차이를 나타내었다. 연성 인자의 경우 압축강도에 비해 자외선의 영향이 다소 증가하였다. 자외선과 열에 모두 노출시킨 시편은 열에만 노출시킨 시편에 비해 연성 인자가 약 7~13%가 감소하였지만, 열에만 노출시킨 시편은 아무것에도 노출시키지 않은 시편에 비해 약 21~28% 정도의 큰 감소를 나타내었다.

이와 같은 현상은 자외선이 폴리머 콘크리트 내부로 깊게 침투하지 못해 에폭시 수지 분자 내의 연결고리의 형성 및 절단에 크게 영향을 미치지 못하는 반면, 자외선에 의해 발생된 열에 의해 폴리머 콘크리트의 후경화가 발생하여, 그 물리적 특성이 변화하는 것으로 판단된다. 후경화가 발생한 만큼 강도는 증가하였지만, 취성이 증가하여 인성이 감소하는 것으로 판단된다. 하지만 개량한 연성 폴리머 콘크리트는 일반 활주로 유지보수 재료보다 훨씬 뛰어난 인성과 강도를 가지기 때문에 개량한 폴리머 콘크리트는 장기간 자외선 환경에 노출되는 조건에서도 필요한 기계적 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 개선된 기계적 특성은 활주로 보수부의 수명을 증가시켜 공항 운영상의 효율향상에도 도움을 줄 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 국토해양부와 한국건설교통기술연구원의 국토해양기술 연구개발사업인 “저탄소 녹색 공항 포장 시공 및 유지관리 기법개발”의 연구지원으로 중앙대학교 녹색공항포장 연구단 산하에서 수행되었으며 이에 관계자분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ignacio, C., Ferraz, V., and Oréface, R.L., “Study of the Behavior of Polyester Concretes Containing Ionomers as curing Agents,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108 No. 4, 2008, pp. 2682-2690.
- Lee, C.H., Park, J.E., Choi, J.H., Kweon, J.H., Che, W.S., and Kim, S.H., “A Study on the Manufacture of Polymer Concrete Using the Waste Paint,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 147, No. 2, 2004, pp. 21-27.
- Jung, K.C., Roh, I.T., and Chang, S.H., “Stress Analysis of Runway Repaired Using Compliant Polymer Concretes with Consideration of Cure Shrinkage,” *Composite Structures*, Vol. 119, 2015, pp. 13-23.
- Jung, K.C., Roh, I.T., and Chang, S.H., “Thermal Behavior and Performance Evaluation of Epoxy-based Polymer Concretes Containing Silicone Rubber for Use as Runway Repair Materials,” *Composite Structures*, Vol. 119, 2015, pp. 195-205.
- Nóvoa, P.J.R.O., Ribeiro, M.C.S., Ferreira, A.J.M., and Marques, A.T., “Mechanical Characterization of Lightweight Polymer Mortar Modified with Cork Granulates,” *Composites science and Technology*, Vol. 64, No. 13, 2004, pp. 2197-2205.

6. Gopal, R., "Polymer Concrete Composites for Enhancement of Mobility of Troops in Desert Operations," *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 132, No. 1, 2006, pp. 129-133.
7. Rosu, D., Rosu, L., Mustata, F., and Varganici, C.D., "Effect of UV Radiation on Some Semi-interpenetrating Polymer Networks Based on Polyurethane and Epoxy Resin," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 97, No. 8, 2012, pp. 1261-1269.
8. Jung, K.C., Roh, I.T., and Chang, S.H., "Evaluation of Mechanical Properties of Polymer Concretes for the Rapid Repair of Runways," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, 2014, pp. 352-360.
9. ASTM C 192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
10. ASTM C 579-01, Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes.
11. Lokuge, W., and Aravinthan, T., "Effect of Fly Ash on the Behaviour of Polymer Concrete with Different Types of Resin," *Materials & Design*, Vol. 51, 2013, pp. 175-181.
12. McGreer, M., Atlas Weathering Testing Guidebook, Chicago: Atlas Material Testing Technology LLC, 2001.
13. KS F 2274, Recommended Practice for Accelerated Artificial Exposure of Plastics Building Materials.
14. ASTM G 151, Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources.
15. Woo, R.S., Zhu, H., Leung, C.K., and Kim, J.K., "Environmental Degradation of Epoxy-organoclay Nanocomposites due to UV Exposure: Part II Residual Mechanical Properties," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, 2008, pp. 2149-2155.
16. Kumar, B.G., Singh, R.P., and Nakamura, T., "Degradation of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 24, 2002, pp. 2713-2733.
17. Kim, J.H., and Suh, Y.C., "Laboratory Evaluation of Polysulfide Epoxy Overlay Material for Bridge Deck," *Korean Society of Road Engineering*, Vol. 13, No. 2, 2011, pp. 159-166.
18. Cho, H.K., Lee, B.Y., Lee, J.S., and Park, S.W., "A Seasonal Climatology of Erythral Ultraviolet Irradiance over Korea," *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 37, No. 5, 2001, pp. 525-539.