

막구조 건축물의 유지관리를 위한 표면 및 코팅층의 열화 진단

Deterioration Diagnosis of Surface and Coating Layer for Maintenance Managements of the Membrane Structure

강 주 원*
Kang, Joo-Won

이 승 재**
Lee, Seung-Jae

요 약

본 연구에서는 막구조 건축물의 유지관리를 위한 막재의 표면 및 코팅층의 열화진단을 수행하였다. 막재는 내화학성능 및 내부식 성능을 포함하는 내구성능이 가장 중요시 되는 재료이다. 일반적으로 대공간 건축물의 지붕재료로 사용되는 막재의 유지관리 진단 항목은 막재의 표면 열화진단, 막재의 코팅층 열화진단, 막재의 코팅층 및 섬유포 사이의 열화진단, 막재 전면에 걸친 열화진단, 로프의 열화진단, 보강벨트의 열화진단, 커버고무 등의 열화진단 등으로 대별된다. 본 연구는 대공간 건축물의 지붕재료로 많이 사용되는 PVDF계 막재를 대상으로 표면 및 코팅층의 열화도 진단 결과를 보고한다.

Abstract

This paper contains of descriptions of deterioration diagnosis of the surface and a coating layer for maintenance managements of large spatial structures with membrane structure. Membrane is a roofing material of the structures that its performance of durability including its performance of chemical resistance and corrosive resistance is considered to be highly important. In general, the items of diagnosis for maintenance managements such as membrane extensively include the diagnosis of deterioration of the membrane surface, of a coating layer of membrane, the diagnosis of deterioration between a coating layer and fiber, of overall surface of membrane, of the class of ropes, of reinforced belts, and of the cover of rubber. The object of this study that needs maintenance managements of the membrane with PVC and PTFE which are commonly used and shows the diagnosis results of deterioration of the surface and a coating layer.

키워드 : 막구조 건축물, 유지관리, 열화진단, 표면 및 코팅층, 공기막구조

Keywords : Membrane Structure, Maintenance Management, Deterioration diagnosis, Surface and coating layer

1. 서 론

초대형 연성구조물을 구성하는 지붕재료로서 채택하고 있는 막재는 일반 산업현장에서 사용되는 막재와는 달리 내화학성능 및 내부식성능 등을 포함하는 내구성능이 가장 중요한 재료이다. 막재의 내구성능은 막재의 구성요소인 직포(Fabric), 코팅(Prime Coating), 토폭(Top Coating)에 사용되는 재

료의 성능에 좌우된다. 일반적으로 막재의 유지관리의 진단항목은 막재의 표면열화진단, 막재의 코팅층 열화진단, 막재의 코팅층 및 섬유포 사이의 열화진단, 막재 전면에 걸친 열화진단, 로프류의 열화진단, 보강벨트의 열화진단, 커버 고무 등의 열화진단^{1),2)} 등으로 대별된다. 막재는 표면열화로 인하여 코팅층의 균열 및 박리, 수분 및 오염물질의 침투 등으로 인하여 급속히 막재 고유 성능이 저하되며, 이것이 막재의 내구연한을 단축시키는 가장 큰 원인이 되고 있다. 대공간 건축물의 유지관리 기술의 선진국이라 할 수 있는 일본, 유럽, 미국^{1),2),3)} 등에서는 체계화된 대공간 건축물의 유지관리 기술을 보유하고 있다. 그러나 국내에서는 막구조 건축물의 지붕구체

* 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사

** 교신저자, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
Tel: 041-560-1334 Fax:041-560-1224
E-mail : leeseung@kut.ac.kr

부분을 시공하는 시공업체가 막재의 유지관리와 관련한 매뉴얼을 공급하는 것이 실상이다. 국내 시공업체가 보유하고 있는 유지관리 매뉴얼은 보수 및 보강과 관련하여서는 자세한 내용이 언급되어 있으나, 막재의 열화와 관련하여서는 정보가 부족한 것이 사실이다. 특히, 막구조 건축물은 막재료의 경량감, 색채감 등이 사용자에게 부여하는 건축적 아름다움이 크다는 것은 부인할 수 없다. 따라서, 막구조 건축물의 경년에 따른 막재의 열화는 막구조 건축물의 건축적 미와 관련하여 가장 중요한 요소이다. 본 논문에서는 PVDF계 막재료를 대상으로 3년 경년에 따른 막재의 표면과 코팅층의 열화도에 대해 연구를 수행하였다.

2. 막재의 표면 및 코팅층 열화

일반적인 막재의 열화진단 방법은 1차 육안검사, 2차 정밀육안검사, 3차 색도계, 광택계, 현미경 등을 사용하여 정밀검사를 실시하게 된다. 이와 같은 검사결과를 바탕으로 손상도를 1등급에서 5등급까지로 나눌 수 있다. 일반적으로 볼 수 있는 열화현상으로는 막재표면의 색변화 및 광택저하, 곰팡이 번식, 표면이 분말화되어 가는 백아화(Chalking) 현상 등이 있다.

막재의 열화요인은 화학적열화와 물리적열화로 나뉘며 열화의 종류로는 자외선열화, 열열화, 약품열화, 응력열화 등이 있다. 자외선 열화는 열화의 주요인이며 열열화는 막재 제조 시의 열화와 사용시 가소제의 휘호로 인하여 열화가 발생하는 경우이다. 약품열화는 반복응력이 작용하거나 뒤틀림 마모 등으로 기포의 접착제의 열화 등이 있다.

막재의 열화도 판정방법은 동종의 시료와 비교하는 방법이 많이 사용된다. 막재의 오염은 공기 중의 먼지가 표면에 일단 부착된 후 가소제 등의 액체성분에 미입 성분이 스며들어, 그 확산에 의해 내부에 침투하여 수질오염이 되는 경우와, 접합부의 막재 단부의 섬유가 오염을 내포한 물을 흡수하면 내면부터 오염이 되는 경우가 있다. 이와 같은 경우의 열화도 측정은 가능한 한 균일한 밝기 아래에서 보존 시험 및 동종의 시료와 비교하여 열화의 정도를

판정하는 것이 바람직하다. 곰팡이는 미생물에 의한 열화가 일어나는 것으로 막재의 내면과 내부 식포에 많이 발생한다. 색변화는 코팅수지의 종류, 안료 및 안정제에 존재하고 있는 것이 많으며 광택저하는 막재 표면에 코팅한 오염방지제의 광열화에 의한 것이다. 색변화와 광택저하의 경우 조사 부위를 물로 닦아낸 후 건조하여 발생하는 것을 균등한 밝기에서 판정하며 보존시료 또는 동종의 시료와 비교하여 열화도를 판정하는 것이 바람직하다.

막재의 코팅층 열화진단 항목으로는 경화, 마모, 균열 등이 있다. 경화는 막재가 장기간 노출된 경우 가소제 등이 빗물에 의해 흘러나오거나 수지의 열화에 의해 가소제가 흘러나오는 것이다. 경화로 인해 막재의 인열강도가 현저하게 저하된다. 마모는 골재, 케이블 등의 마찰에 의해 막재가 마모하게 되며 대부분 육안으로 관찰하여 판정할 수 있다. 균열은 막재를 장기적으로 사용할 경우 표면수지가 열화하여 가소성을 상실하고 미세한 균열이 발생한다. 이와 같은 균열이 발생하면, 막재는 오염이 쉽게 되고 열화가 진행되는 악순환을 반복하게 된다. 이 상태는 육안 또는 돋보기 등의 확대경에 의해 관찰할 수 있다.

본 연구에서는 막재의 표면을 대상으로 표면의 오염정도, 오염원인, 전자현미경 및 에너지분광검출기를 사용한 오염의 정밀분석 결과에 대해 분석한다.

3. 막재의 열화도 분석

3.1 FE SEM 장비를 사용한 분석

막재의 표면열화진단 및 코팅층 열화진단에 사용한 시편은 3년간 사용한 PVDF계 막재이다. PVDF계 막재는 PVC막재에 자외선 저항능력 및 자정능력을 높이기 위해 토평(Poly Vinylene Deneffluoride)을 실시한 재료이다. PVDF 재료의 화학적 특성은 일반적 막재의 구성원소 중 F가 2개 존재하는 구조로서 불소를 수지형태의 액상방법으로 토평을 한다. PVDF계 막재는 내구연한이 10년 내외이며, 색상이 다양하고 제작 및 가공이 용이하며, 가격이 테프론막재 대비 약 70% 전후여서 국내에서

가장 많이 사용되고 있다. 그러나, PVDF계 막재는 외부환경 요인으로 인한 변색 등으로 인해 내구성이 떨어지는 것이 단점이다. 본 연구에서는 PVDF계 막재의 오염도를 분석하기 위해 동종 막재크기 20*10cm, 경년 3년의 시편 A, B, C의 3세트를 대상으로 FE SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy) 장비를 사용하여 막재의 표면 및 코팅층의 오염도를 분석하였다. 또한 분석결과를 사용하지 않은 동종의 막재와 비교하였다. 시험에 사용한 FE SEM의 배율은 사진의 하단에 표시되어 있다.

3.1.1 막재의 종류에 따른 분석

사진 1, 2, 3은 상기의 A, B, C 3 세트의 막재에 대한 오염도를 FE SEM을 사용하여 촬영한 것이다. 사진 1(500배율) 및 사진 2(2000배율)는 외기에 노출되지 않은 즉, 사용하지 않은 동종의 막재이며, 사진 3 및 4는 동 배율의 3년 경년의 막재이다. 사진 1과 2에서는 막재 표면은 깨끗하나 0.2마이크로미터 크기의 찍힘 현상이 나타난다. 이러한 찍힘은 사용 중 막재 내부오염의 원인이 될 수 있으므로 막재의 재단, 제작, 운반, 설치 및 시공 중에 막재의 표면이 접힘, 굽힘 등의 손상이 가지 않도록 해야 한다는 것은 동 사진을 통해 쉽게 알 수 있다.

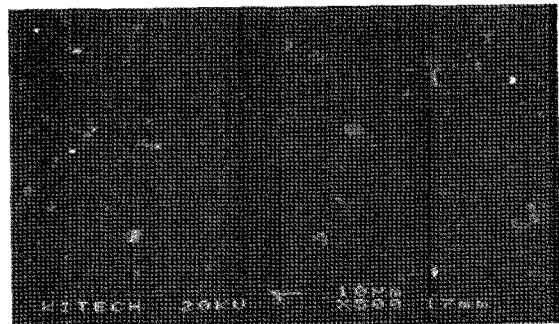
막재 A세트에서는 막재의 코팅이 분리되기 시작하는 것을 알 수 있다. 외부 환경에 노출된 막재는 일차적으로 코팅부분이 외부환경에 영향을 받게 되고, 따라서 섬유면과 코팅부분이 분리된다. 또한 바람, 황사, 먼지 등으로 인하여 토양의 성분 중에서 Si, Al, Ca, Fe는 막재의 광열화 현상을 가속화 시킨다. 광열화는 광선에 의해 재질이 노후되는 것을 말하는데 직사광선에 직접적으로 노출되는 코팅부분은 광열화 현상에 영향을 쉽게 받는다고 할 수 있다. 오염은 전자의 사진에서 볼 수 있듯이 미관 뿐만 아니라 내구성에 심각한 영향을 미친다. A세트 막재의 오염 사진을 보면 막재 표면에 곰팡이가 서식함을 알 수 있다. 곰팡이의 서식은 막재의 부식을 촉진시킬 뿐 아니라 외관상 상당한 불쾌감을 줄 수 있다.

B세트 막재의 경우 A세트와 마찬가지로 외부 환

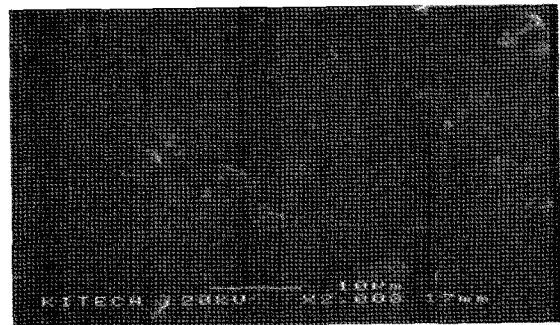
경에 노출되기 때문에 일차적으로 코팅부분이 외부 환경에 영향을 받는다. 전자의 이유로 섬유면과 코팅부분이 쉽게 분리된다.

B세트 막재의 오염 사진을 보면 이미 광열화 현상에 의한 색변화가 일어났으며 90% 이상 코팅면이 박리되어 있는 것을 알 수 있다. 사진 7과 사진 8의 오염사진을 보면 인간 내의 암세포와 같은 형상의 모습을 볼 수 있다. 이것은 막재 내부 성분이 산과 반응하여 부피가 팽창하는 백아화(Chalking)현상에 의한 오염이다. 부피가 팽창되어 표면이 불규칙하게 부풀어 오름과 더불어 곰팡이까지 서식하는 것이 관찰되었다.

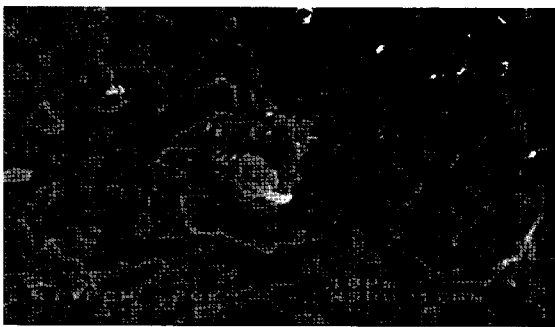
C세트 막재의 사진 11의 경우는 막재 표면의 광택저하가 발견된다. 외부환경과 일차적으로 접촉하는 코팅면은 재질의 특성상 눈, 비, 먼지 등이 쌓이기 어렵게 하기 위하여 매끈한 면의 광택적인 특성을 가진다. 하지만 광열화 등의 이유로 광택이 저하된다. 사진 12의 오염사진은 백아화 현상이 진행되고 있으며, 곰팡이가 서식하고 있는 것을 알 수 있다.



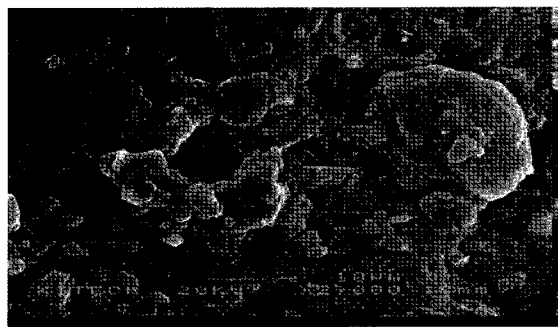
〈사진 1〉 막재 A세트 오염 전(500배율)



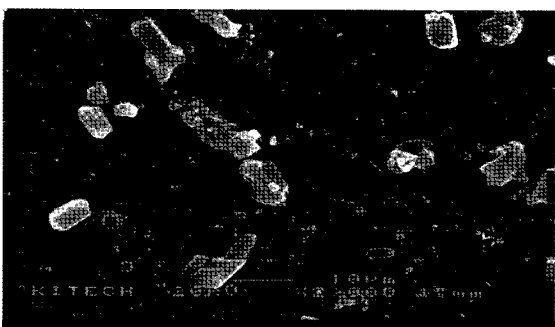
〈사진 2〉 막재 A세트 오염 전(2000배율)



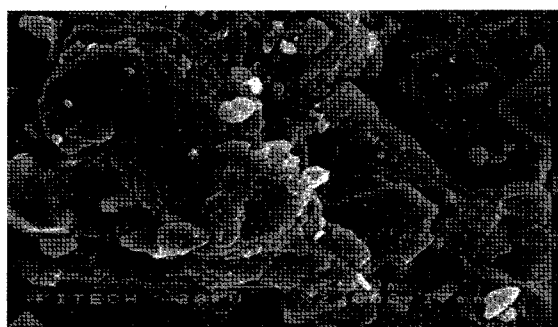
〈사진 3〉 막재 A세트 오염 후(500배율)



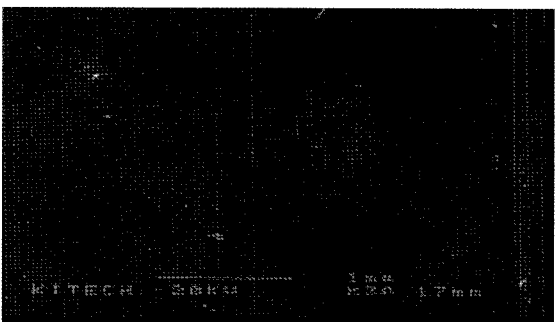
〈사진 7〉 막재 B세트 오염 후(2000배율)



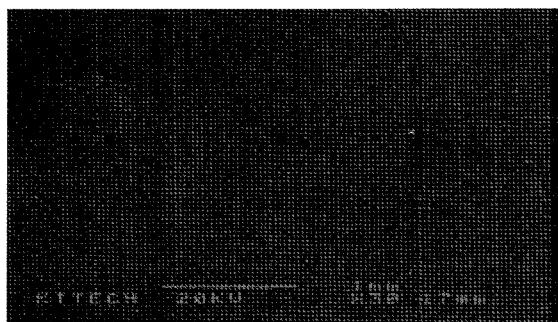
〈사진 4〉 막재 A세트 오염 후(2000배율)



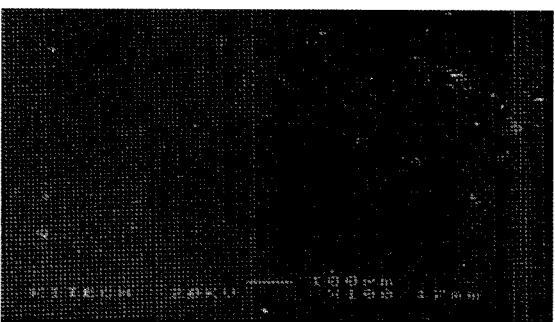
〈사진 8〉 막재 B세트 오염 후(2000배율)



〈사진 5〉 막재 B세트 오염 전(30배율)



〈사진 9〉 막재 C세트 오염 전(30배율)



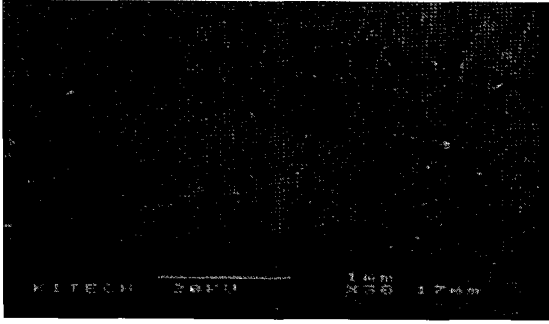
〈사진 6〉 막재 B세트 오염 전(100배율)



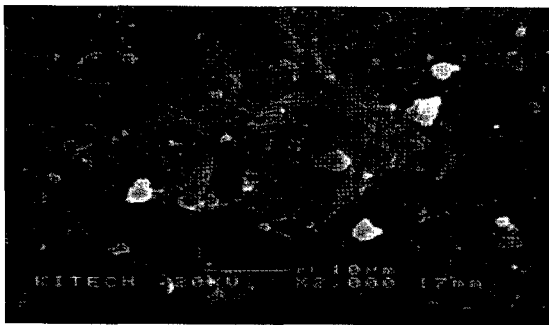
〈사진 10〉 막재 C세트 오염 전(2000배율)

3.2 EDS를 사용한 막재의 오염성분 분석

막재의 표면 및 코팅층의 열화요인 중, 대기의 성분이 막재의 오염에 미치는 영향을 파악하기 위하여 에너지분광검출기인 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 원소분석 장치를 사용하여 막재 표면의 오염도를 분석하였다. 또한 막재의 성분과 대기의 성분을 비교하기 위하여 황사성분을 분석표를 표 1에 나타낸다.



〈사진 11〉 막재 C세트 오염 후(30배율)



〈사진 12〉 막재 C세트 오염 후(2000배율)

〈표 1〉 황사의 성분

성분	미세먼지(PM10)		조대먼지(PM15)	
	정상시 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	황사시 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	정상시 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)	황사시 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)
알루미늄	0.24	5.71	0.26	24.7
철	0.14	2.64	0.42	21.2
칼륨	0.10	0.95	불검출	5.65
나트륨	0.08	0.26	불검출	0.79
아연	0.06	0.19	불검출	불검출
마그네슘	0.11	0.87	불검출	3.43

EDS는 일정 범위의 파장대를 샘플 표면에 주사할 경우, 각 원소마다 일정한 파장값에서 에너지를 나타내게 되는 원리를 이용한다. 오염되지 않은 B세트의 시편 2개의 EDS분석 결과는 표2와 같다.

〈표 2〉 오염되지 않은 PVDF계 막재의 EDS 분석결과

시편	ED Spectrum	성분	Element(%)	Atomic(%)
B세트(1번)		Cl	84.06	87.69
		Ti	15.94	12.31
		Total	100.00	100.00
B세트(2번)		Cl	91.08	93.24
		Ti	8.92	6.76
		Total	100.00	100.00

오염되지 않은 막재의 표면 성분은 코팅재료인 Polyvinylchloride의 원소인 Cl성분이 탁월하며 약 13% 이하의 비율로 Titanium Oxide인 산화티탄 (TiO₂)성분이 검출되었다. 이것은 막의 코팅재료로서 산화티탄의 광촉매 기능을 활용하여 자외선과 반응하여 막표면의 오염을 화학적으로 분해하기 위해 사용된다.

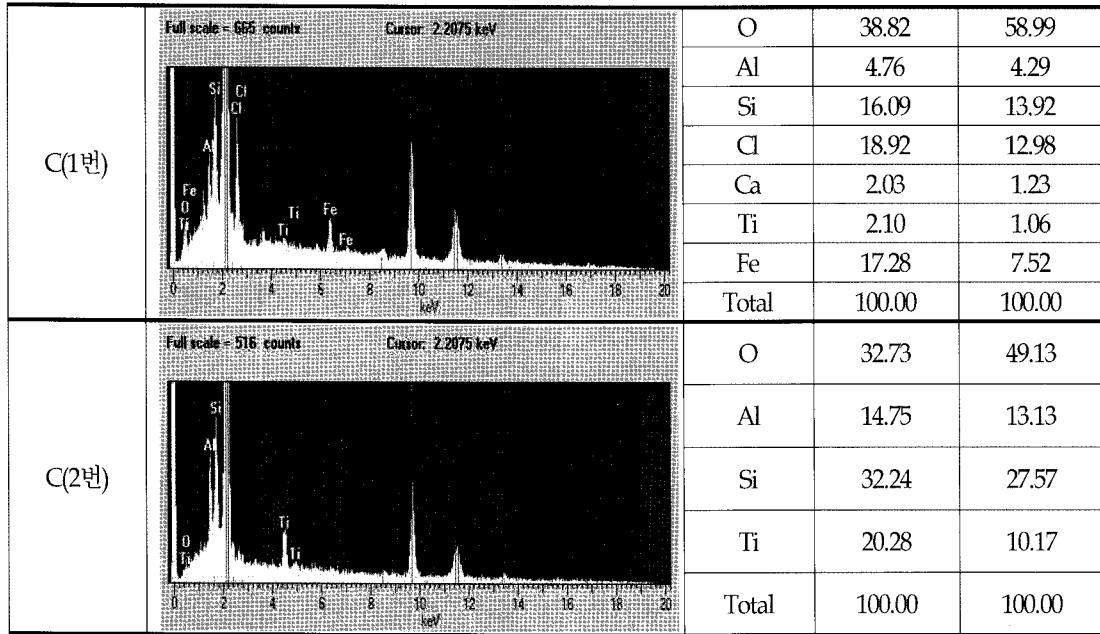
오염된 막재의 EDS 성분 분석 결과는 표 3과 같다. 오염된 막재에서는 Al(5-15%), Si(7-51%), K(2-8%), Cl(3%), Ca(0.75%), Fe(1-26%) 성분이 혼재하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 2006년 국립환경과학원이 한국대기환경학회와 공동으로 수행한 서울의 미세먼지의 성분분석 결과를 인용하면 다음과 같이 설명할 수 있다.

서울지역의 미세먼지는 유기성 탄소화합물 22%, 질산염 22%, 황산염 15%, 토양입자 15%, 원소탄소 8%로 판명하였다. 미세먼지의 성분은 납, 구리, 크롬, 아연, 카드뮴 등과 같은 중금속 물질이 들어있기도 하며, 황산염, 질산염 등과 같은 산성 유해물질이 함유되어 있기도 하다.

본 EDS 원소분석 결과 검출된 오염물질은 황사성분과 유사하며, 황사는 강한 점착력이 있어 잘 씻기지 않고 퇴적되어 막재의 표면을 변색과 퇴색을 촉진하는 요인으로 판단된다.

〈표 3〉 오염된 PVDF계 막재의 EDS 분석결과

시편	ED Spectrum	성분	Element(%)	Atomic(%)
A세트		Al	10.18	13.65
		Si	40.21	51.77
		K	8.82	8.16
		Fe	40.79	26.41
		Total	100.00	100.00
B세트(1번)		O	54.04	70.21
		Na	9.06	8.19
		Si	10.29	7.61
		Cl	6.32	3.70
		K	15.83	8.41
		Ca	1.44	0.75
		Fe	3.03	1.13
		Total	100.00	100.00
B세트(2번)		O	22.60	35.77
		Al	14.48	13.59
		Si	47.24	42.60
		K	4.74	3.07
		Fe	10.95	4.96
Total	100.00	100.00		



4. 결론

본 연구의 결과는 다음과 같다.

FE SEM 장비를 이용한 막재 오염도 분석 결과는 오염 전에도 부분적으로 코팅층이 분리되어 있는 것을 알 수 있으며 이는 일차적으로 외부환경, 즉 직사광선에 직접적으로 노출되는 코팅부분은 광열화 현상에 영향을 받는다는 확인할 수 있다.

3년 경년의 오염된 막재는 표면에 곰팡이가 서식하여 막재의 부식을 촉진시키며 백아화 현상에 의해 막재 내부 성분이 산과 반응하여 부피 팽창이 일어남을 알 수 있다. 또한, EDS 분석결과를 통하여 오염 전의 막재의 성분은 막재의 코팅재료인 Polyvinylchloride의 원소인 Cl성분이 두드러졌으나, 오염 후의 막재 성분은 Cl 이외에도 Al, Si, K, Ca, Fe 성분이 혼재하고 있으며 이것은 황사의 대기성분으로 인함을 알 수 있다.

본 논문은 막재료의 3년 경년 재료를 대상으로 한 표면 및 코팅층의 오염에 관한 내용이다. 국내 막재료의 노출폭로 실험 등을 통하여 경년 후 오염이 발생한 막재료에 대해 강도실험, 색도시험 등을 추가로 추후 실시할 예정이다. 막재의 노후 및 오염과 관련한 데이터가 축적되면 정기적인 점검은 대공간 구조물의 유지관리에 하나의 평가기준이 되리라 판단한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 #'06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 일본막구조협회 “막구조건축물의 유지보전지침·동해설”
2. 일본막구조협회 “막구조건축물의 보수기술지침·동해설”
3. Standard Practice for Measuring Air Leakage by The Fan-Pressurization Method ASTM Designation : E779-81
4. G.T.Tamura : Measurement of Air Leakage Characteristics of House Enclosure : ASHRAE Tr. Vol. 81 Part 1, 1975
5. 鎌田, 加藤 他 : 実験値に基づく住宅の漏水量評価に関する基礎的研究その3. 簡易気密性能測定装置の試作と Grimsrud 等の漏水量予測式の検討 : 日本建築学会大会学術講演梗概集
6. 鎌田, 吉野 : 住宅の気密性能と漏水量 : 日本建築学会環境工学論文集

- ▶ 접수일자 : 2010년 9월 27일
- ▶ 심사 완료일자 : 2011년 1월 14일
- ▶ 게재 확정일자 : 2011년 2월 16일