

지속가능한 막구조 건축물을 위한 과제

An Urgent Assignment for Sustainable Membrane Structures



진 상 욱*
Jin, Sang-Wook

1. 막구조 건축물

우리에게는 인천문학경기장으로 널리 알려진 막구조 건축물은 본래 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고 막구조물 전체가 눈이나 바람에 의한 하중에 견딜 수 있게 되는 구조물이다.

막재는 가볍고 채광이 좋아 에너지 효율이 높고, 지진의 영향을 거의 받지 않아 공공성이 높은 대규모 건축물의 지붕으로 많이 사용되고 있는, 대공간 실현을 위한 장래성이 풍부한 귀중한 건축 재료 중의 하나이다.

막재를 덮어 형성하는 막구조는 초기 투자비용으로 볼 때 같은 규모의 스페이스 프레임 구조형식보다 약 40%나 저렴한 공사비로 실현할 수 있는 공간 구조이다. 그러나 태풍이나 폭설 등으로 파손이나 붕괴 사고가 일어나면 저비용 구조형식으로서 가지

는 장점은 사라져 버릴 뿐 아니라, 막구조 건축물에 대한 국민의 인식 또한 나빠진다. 꾸준하고 세심한 점검으로 이상 징후를 감지하고, 적절한 대처로 관리할 때 막구조 건축물의 장점을 오롯이 누릴 수 있게 된다.

2. 막구조 건축물의 재해사례

막구조 건축물이 전 세계적으로 널리 사용되기 시작한 1970년대 이래로 막구조 건축물의 파손이나 붕괴는 국내외에서 수 없이 발생했다. 대형 막구조물의 재해는 세간의 이목을 끌어 그 사례가 국제학회나 전문 학술지 등에 발표된 것도 있다.

우노는 전 세계 막구조 건축물의 재해사례를 자료와 문헌 등으로부터 <Table 1>과 같이 조사·정리했다¹⁾. 재해는 주로 강풍과 폭설로 인해 발생했고, 지진이나 화재에 의한 재해는 보고된 바 없다. 또한 막구조 건축물로 기인된 재해로 인명피해가 발생한 적도 없다.

일반적으로 막재의 강도는 옥외 폭로상태에서 시

* 한국기술교육대학교 디자인·건축공학부 연구교수, 박사(공학)

Research Professor, School of Design & Arch. Eng.,
Korea Univ. of Tech. & Education

<Table 1> Examples of collapse of membrane structures¹⁾

폭설	골조막구조	<ul style="list-style-type: none"> • 폭설로 적설이 천정부위 또는 지붕 테두리에 체류해 막면에 큰 변형을 일으켜 막면을 파손 • 이층 지붕의 상부 지붕 적설이 하부 지붕 위로 낙하해 막면을 파손
	공기막구조	<ul style="list-style-type: none"> • 에어돔 경기장이 폭설로 막면이 변형, 파손되어 내압유지가 불가능해 짐
바람	인장막구조	<ul style="list-style-type: none"> • 경기장 스탠드 지붕의 막구조 부분이 강풍에 날아감 • 구조계산의 부정확과 막면 강도의 부족이 원인 • 강풍으로 경기장 전체를 덮은 지붕 막면의 접합 결속부가 파손되고, 막재 인열 전파로 크게 파손 • 막재 접합부의 제작 오차로 강도 부족이 원인
	골조막구조	<ul style="list-style-type: none"> • 강풍으로 외벽 출입구가 파손되고, 강풍이 실내로 유입되어 실내 압력의 급격한 상승으로 지붕 막면이 파손 • 소규모를 포함하면 피해사태가 많음 • 출입구 부위의 강도 부족이 원인 • 강풍으로 돔 지붕 막면 파손 • 막재 인열 전파로 크게 파손 • 막재의 열화가 원인
	공기막구조	<ul style="list-style-type: none"> • 돔 지붕면이 강풍으로 변형, 조명기구에 닿아 막면이 파손 • 강풍으로 막면이 크게 필러거리 누름케이블 등의 마찰로 막면이 파손되어 내압유지가 불가능해 짐
비	인장막구조	<ul style="list-style-type: none"> • 호우로 지붕 막면 단부 판넬에 빗물이 대량으로 고여 막면이 파손 • 고인 빗물이 한꺼번에 낙하해 콘크리트 스탠드 파손
비산물, 낙하물		<ul style="list-style-type: none"> • 막면으로 낙하물이 있거나, 강풍으로 인한 비산물로 막면 파손 • 막재인열 전파로 파손 확대

간의 경과에 따라 감소하는데, 이는 다른 구조 재료에서는 볼 수 없는 막구조 고유의 특징으로 막재 강도 관리의 중요성을 일깨워 준다. 그 외 낙하물이나 비산물에 의한 막면의 파손 보고는 소규모의 구조물을 포함하면 비교적 많다.

막구조 건축물은 시간 경과에 따른 응력완화로 강풍 시 필러리는 현상(플러터링)을 일으키는가 하면, 강우 시에는 막면에 빗물이 고이는 현상(폰딩)이 생길 위험이 항상 존재한다. 막구조물의 설계, 시공, 유지관리 시에는 이를 미리 고려할 필요가 있다.

플러터링으로 인한 막구조 건축물의 재해사례는 1990년대부터 전 세계에서 다수 보고되고 있다. 우리나라에서도 2002년 태풍 평센과 루사로 제주월드컵경기장의 지붕막 6개 패널이 파손되었고, 2010년에는 태풍 콘파스로 인해 인천월드컵경기장의 지붕막 7개의 패널이 파괴 또는 손상되었다. 복구비용만 51억 원이 소요된 파손 사고로 플러터링 현상이 하나의 원인으로 거론된다(<Table 2 참조>).

폰딩에 기인한 막구조 건축물의 사용 장애도 규모의 대소는 있으나 예상외로 많다. 폰딩에 의한 재해는 막장력의 유지관리가 정상 작동했더라면 예방도 가능했을 것이다.

2010년 폭설로 지붕막 파손 사고가 있었던 메트로돔(<Table 2> 참조)처럼 막내부의 기압에 의해 그 형상을 유지하는 형식인 공기막구조의 경우, 기상정보에 따라 태풍 등의 강풍이 예상될 때에는 미리 실내나 이중 막 속의 기압을 상승시켜 막면에 도입되는 장력을 평상시보다 높게 설정함으로써 플러터링이나 폰딩, 또는 적설에 의한 장해를 회피할 수 있도록 대책을 세우는 것이 일반적이다.

2014년 폭설로 막구조부 전체가 파손된 쿠마가야 돔(<Table 2> 참조)의 설계 적설하중은 재현기간 50년의 적설량인 30cm로 설계되었다. 당시 적설량은 설계치의 두 배가 넘는 62cm를 기록했는데, 설계당시 상정치 못한 적설하중이 재해의 주원인으로 판명되었다.

〈Table 2〉 Real cases of collapse of membrane structures



막구조 건축물의 안전성을 높여가기 위해서라도 재해의 대소를 가리지 않고 그 사례를 공표하고, 어떤 원인으로 재해가 발생했는지 명확히 밝히고 해결책을 찾아 공유하는 것은 매우 중요하다.

3. 현행 막구조 건축물의 유지관리

막구조 건축물은 전술한 바와 같이 막재 고유의 특성으로 인해 준공 후 꾸준하고 세심한 유지관리 의무를 동반한다. 현재 우리나라 막구조 건축물의 안전 및 유지관리는 시설물 안전관리에 관한 특별법에 정하는 바에 따라 안전점검과 정밀안전진단을

실시하고 있다.

막구조 건축물의 유지관리는 일반적으로 점검을 통해 이루어지는데 통상 일상점검과 정기점검, 그리고 임시점검으로 나누어진다(〈Table 3〉 참조). 점검은 일상점검을 제외하고 전문가가 수행하는데, 막구조부, 막재료, 정착부, 배수구, 막장력 측정, 케이블이 사용된 경우에는 케이블 본체, 케이블장력 측정 등으로 이루어지고, 각각의 항목은 다시 상세하게 세분된다. 또, 점검대상이 되는 구조물의 형상이나 구조 특성에 따라 필요한 항목들이 추가된다.

점검은 막재료 및 구조 상태를 가까이서 점검함으로써 보수나 막의 재시공 여부 및 그 시기를 관리

〈Table 3〉 Type of maintenance for membrane structures

구분	점검내용	실시자
일상점검	일상적으로 구조물의 변형유무, 막체의 파손 등을 육안으로 점검한다.	시설물 관리자
정기점검	준공 후 1년째와 그 후 매 3년마다 막장력 측정을 포함하여 막구조 등의 열화 정도를 점검한다.	정기점검 전문가
임시점검	태풍이나 폭설, 지진 등의 천재지변 후, 또는 특별히 점검이 필요하다고 판단될 때, 막장력 측정을 포함하여 임시로 피해의 유무와 손상정도를 점검한다.	정기점검 전문가

자에게 보고해 적기에 대처할 수 있게 함으로써, 막구조 건축물을 안전하게 이용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

막장력과 케이블 장력은 실측하여 준공 시 도입된 설계장력과 비교 검토한 후, 허용하는 오차 범위를 벗어날 경우, 즉시 장력을 재도입하는 등 필요한 조치를 취할 수 있도록 해야 하며, 이를 가능케 하는 계측장비를 보유하고 능숙하게 조작 가능한 전문가가 수행해야 한다.

유지관리의 여러 점검항목 중에서도 막장력 측정은 막재에 도입된 설계장력의 완화정도를 파악할 수 있어 플러터링이나 폰딩 발생의 가능성을 예상할 수 있는 가장 중요한 자료가 되므로 필수 점검항목이 된다. 그럼에도 불구하고 검증된 막장력 측정장치의 부재로 인한 데이터의 신뢰도 부족과 데이터 비공개로 준공된 막구조 건축물의 장력 도입 실태를 파악하기는 매우 어려운 실정이었다.

4. 막구조 건축물의 막장력 유지관리

막구조 건축물의 독자적인 유지관리를 법적으로 구속하는 기준은 아직 정비되어 있지 않다. 현재 막구조 건축물의 설계나 유지관리는 2010년 한국공간구조학회에서 발행한 막구조 설계기준 및 해설³⁾의 권고를 따른다.

여기에는 형상해석 시 막재의 2축에 도입하는 초기장력으로 A, B종은 2kN/m 이상, C종은 1kN/m 이상으로 적시하고 있다. 또, 유지관리 시 요구되는 막장력 측정에 관해서는 ‘시공 후에 막의 인장값이 설계치를 만족하는 지 검사해야 한다.’고 명시하고 있다. 그러나 해설에서는 ‘지금까지 막의 인장을 정확하게 측정하는 기계는 국내외적으로 없고, 이 기준에서는 강제하지 않지만 경험에 의한 판단이 필요하다.’라고 해설하고 있어, 막장력 측정에 관한 한 과학적이거나 정량적 관리와는 거리가 있어 보인다.

막재는 장력이 도입되어 처음으로 구조재로서의 역할을 할 수 있는 재료이므로, 초기(설계)장력의

유지 여부가 막구조물의 안전을 좌우한다고 해도 과언이 아니다. 따라서 막장력 측정은 유지관리의 가장 중요한 항목이 된다.

저자의 연구로 막장력을 두 축 방향 각각으로 정량적이고 정확하게 측정할 수 있는 장치는 개발되어 있다²⁾. 현재의 권고기준에는 어떤 장치로 측정해야 한다는 강제 사항을 두고 있지는 않으나, 성능이 검증된 장치로 측정하도록 한다.

준공 후 시간이 경과한 막구조물의 막장력은 해당 구조물의 설계장력을 기준으로 판단한다. 일반적으로 막구조물의 시공 시에는 막재의 완화가 충분히 진행된 후 설계장력을 유지하도록 시공 시 설계장력의 3할 정도를 할증해 장력을 도입하는 것이 보통이다. 준공 후 막장력은 설계장력을 상회하는 지 검토하고, 설계장력의 7할을 하회할 경우에는 재인장 등으로 설계장력을 복원시켜야 한다.

5. 막구조 건축물 관리자의 역할

건축물의 유지관리라 하더라도 강구조물이나 콘크리트 건축물과는 달리 막구조 건축물의 유지관리는 접근부터가 다르다. 콘크리트 건축물의 경우에는 결합 없이 수년 안에 주의를 요하는 상태로 되는 경우를 보기 어렵다. 하지만 막구조 건축물의 경우는 다르다. 예를 들어 나뭇가지나 전선 등이 계속해 막재를 긁을 경우 그 부위는 코팅재의 열화가 빨리 진행되어 응력을 부담하고 있는 섬유포가 노출될 위험에 빠질 수 있다. 이런 환경에서는 특히 일상점검이 중요하다. 이상 징후를 조기에 발견하는 센스, 거창하게 말해 위기관리능력은 일상의 상태를 얼마만큼 숙지하고 있는가에 달려있다고 볼 수 있다.

막구조 건축물은 지진에 대해서는 기본적으로 높은 안전성을 확보하고 있으나, 부드러운 막재 한 장으로 외기에 접해 있는 만큼 바람과 눈에 대해서는 충분한 주의를 기울일 필요가 있다.

막구조 건축물에 특히 불리한 요소로 강풍에 날아온 비산물의 충돌이 있다. 막체의 강도에 따라 파



〈Fig. 1〉 Author under maintenance on the Daegu Stadium

손에 이르는 경우도 있으니, 태풍이 지나간 후에는 점검을 통해 확인하고, 필요한 경우에는 매뉴얼에 따라 보수한다.

적설하중은 구조계산 상 안전에 필요한 하중으로 고려하지만, 막구조 건축물은 기본적으로 눈이 지붕에 쌓인 채로 방치하지 않는 것으로 한다. 눈은 막재의 코팅재로 인해 약 11도 이상의 경사가 있으면 자연 낙하한다¹⁾.

막면에 적절한 장력이 도입되어 있지 않으면 눈은 아래까지 미끄러져 내리지 않고 도중에 쌓이게 된다. 이는 폰딩을 일으키고 한 곳으로 모인 눈의 무게를 이기지 못해 막이 파손되면 쌓인 눈이 실내로 쏟아지게 된다. 폭우로도 같은 경우의 재해가 발생할 수 있다. 만약 눈이 쌓여 폰딩이 일어나면 가능한 한 막면 밑에서 적당한 도구로 밀어 올려 눈을 치우고, 기상이 회복되는 대로 전문가에게 막체의 장력 측정을 의뢰해야 한다.

이처럼 막구조 건축물의 지속가능성은 시설물 관리자의 꾸준하고 세심한 일상적 관심에서 비롯되는 만큼 그 역할이 매우 중요하다.

6. 막구조 건축물 전문 점검자 양성

건축에 있어 설계와 시공, 감리의 업무가 분리되어 있듯이, 정기점검 업무도 시공과 감리에 자유로운 업체나 제3의 공익단체가 맡아야 한다. 좋은 예로 이웃 일본은 일본막구조협회가 막구조 건축물 전문 점검자 자격제도를 실시하고 있다.

정기점검에서 중요한 것은 특정 부위의 열화 손

상을 발견 하는 것 외에도, 전체 막장력의 완화 등 이상을 나타내는 시그널을 놓치지 않는 것이다. 따라서 전문 점검자는 평시의 정상적인 상태를 기억해 두어야 할 뿐 아니라, 열화의 진행 패턴을 이해하고, 방치한 경우에 발생할 수 있는 손상을 머릿속에서 그릴 수 있는 능력이 요구된다. 섬세한 관찰로 작은 징후라도 발견하면 방치해도 좋을지, 중대한 손상으로 이어질지 판단할 수 있어야 한다(〈Fig. 1〉 참조).

또, 전문 점검자는 새로운 재료나 구조형식에 대한 지식도 갖추어야 한다. 막재의 세계에서는 리사이클재료, 방오성능, 단열성능, 차음성능 등 모두 중요한 이슈 또는 과제이다. 일반적인 C종 막재라도 나노 기술의 접목으로 방오성능과 내구성능을 높인 막재가 등장하고, 구조재로 알루미늄을 사용한 사례도 늘고 있다.

국내는 막구조 설계 및 시공을 전문으로 하는 엔지니어 업체의 구성원이 전문 점검에 필요한 가장 우수한 능력을 보유하고 있다. 그러나 설계, 시공, 유지관리의 분리를 고려하면, 이들 업체에 전문가 양성 교육을 바라기는 어렵다. 한국공간구조학회나 한국막구조협회, 한국시설안전공단 등과 같은 공익단체에서 소위원회 구성 등을 통한 교육으로 특수 건축물의 전문 점검자를 양성하는 것이 바람직하다.

7. 막구조 건축물 유지관리 기준 정립

현재 우리나라 막구조 건축물의 안전 및 유지관리하는 시설물 안전관리에 관한 특별법에 정하는 바

에 따라 안전점검과 정밀안전진단을 실시하고 있다. 막구조 건축물의 안전진단은 주구조물의 하부구조로 인식되어 수주 진단업체의 하청으로 막구조 전문업체가 도맡았다. 이리다 보니 막구조 전문가의 의견이 옳이 반영되기 어려워 유지관리가 제 기능을 발휘하지 못하는 경우가 많다.

막장력 측정에 국한해서도 지금까지 시공사나 감리사, 유지관리 업체는 경험적 측정수법으로 막장력을 측정하고도 정확도나 안정성에 대한 불안으로 데이터 공개를 꺼려, 관련 전문가들을 막구조물의 안전과 성능 향상을 위한 토론의 장으로 이끌지 못했다.

비록 유지관리의 한 항목이지만 저자가 개발한 음파를 이용한 막장력 측정장치의 이용으로 막장력의 과학적 측정과 데이터 축적으로 토론의 장을 형성할 수 있다. 이를 토대로 막구조 건축물 전반에 관한 기준을 과학적 자료를 근거로 작성할 수 있다. 막구조 건축물의 성능확보는 지속가능성의 필수요소로, 유지관리 기준 마련으로부터 시작할 수 있을 것이다.

8. 맺음말

일본의 대공간 구조물은 'Big Egg'라는 별명을 가진 도쿄돔이 대표한다. 도쿄에 위치하고 요미우리 자이언츠가 사용하는 것 외에도, 1980년대 중반 당시 일본의 법적규제를 뛰어넘어 처음으로 탄생한 전천후 돔형 구장이기 때문이기도 하다.

일본인에게 상징적 존재인 도쿄돔의 지붕막은 내년(2017)으로 30살이 된다. 당시 사용된 PTFE 막재의 수명을 고려해 당국은 수 년 전부터 도쿄돔 지붕막의 시스템 교체를 고민하고 있다.

도쿄돔 지붕막의 시공자이자, 막구조 건축기술을 선도하고 있는 일본의 마크막스 그룹은 현행의 공기막구조는 양보하더라도, 막구조 시스템만은 고수하고자 노력하고 있다. 막구조 시스템의 채택 여부를 떠나, 도쿄돔 지붕막의 리모델링은 막구조 건축의

미래를 가늠할 수 있는 중요한 전환점이 될 것이다.

지금도 막재는 고단열 성능을 장착해 벽재로, 지진 발생 시 천장으로부터의 낙하물을 받을 수 있는 천장재로, 건물외벽 바깥에 설치해 환경부하를 줄이는 외부 피복재 등, 다양한 방식으로 그 영역을 넓혀가고 있다. 또, ETFE 필름은 2중, 3중의 쿠션 구조로 새로운 구조형식과 디자인을 만들며 발전하고 있다.

진정한 에코(ECO; 친환경)는 잘 만들어 잘 관리하면서 오래오래 사용하는 것이다. 거대한 사회 자본이 축적되어 있는 막구조 건축물은 더더욱 친환경이 되어야 한다. 그 시작으로 현행의 유지관리 체계를 검토해 필요하다면 기준을 정립해 법제화하자. 그래서 이를 담당할 전문가를 양성해 성실히 실천함으로써 막구조 건축물이 우리의 삶 속에서 안전하고 오래도록 지속가능하게 하고 싶다.

References

1. Hiroyuki, U., "Assignment of membrane structures from now", Kenchiku Bosai, 2006. 5, pp.31-34.
2. Sang-Wook J., "Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures using Sound Wave", Doctoral dissertation of Nagoya University, 2008.
3. Korean Association for Spatial Structures, Design Code and Commentary for Membrane Structures, Kimoondang, 2010.