

공기막 구조의 설계 및 시공 기술

- 대구달성공원매립장 사례 중심 -

Design and Construction of the Air Dome Structure



조한욱*
Cho, Han-Wook



최 항**
Choi, Hang



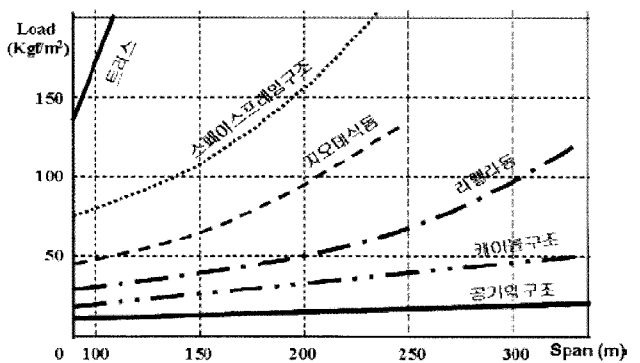
서지현***
Seo, Ji-Hyun

1. 서론

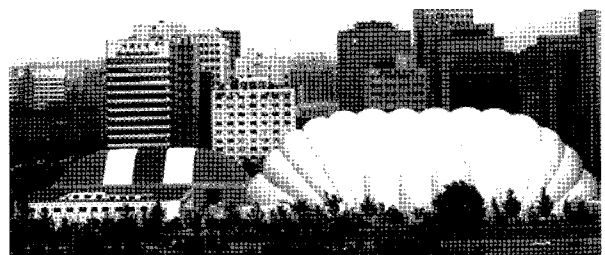
최근, 경제의 발전과 생활의 질적 향상에 따라 대규모 전시, 유통, 레저 및 체육 시설 등을 위한 대공간 구조물의 필요성이 높아지고 있다. 대공간 구조물은 셸의 구조 원리를 이용하여 외부 하중을 면내력으로 저항함으로써 구조 효율을 극대화시킨 구조시스템을 사용한다. 대공간 구조 시스템은 고대에서부터 사용되었으며, 더 크고 더 넓은 무주 공간 창출을 위해 지붕 자중은 경량화 되어 왔다. 현재, 공기막 구조는 그 어떤 구조시스템 보다 더 작은 자중으로 더 큰 공간을 창출할 수 있는 효율적인 대공간 구조시스템이다.

공기막 구조는 공기의 가압을 통해 실내공간을 형성하는 돔 구조로서 내부 지주 없이도 대 공간을 창출할 수 있는 장점으로 인해 최근에 그 적용 범위를 넓혀가고 있다. 공기막 구조는 크게 실내 공간에 가압 송풍된 공기 내압(20~50mm/Aq)을 통해 인장력을 확보하는 단일 공기막과 이중막 내부에 가압 송풍된 공기 내압

(150~650mm/Aq)으로 인장력과 힘을 확보하는 이중 공기막 구조가 있다. 본 기사에서는 당사에서 시공한 대구 달성 공원 매립장 공기막 구조물을 중심으로 단일 공기막 구조물의 설계 및 시공 기술에 대해 소개하고자 한다.

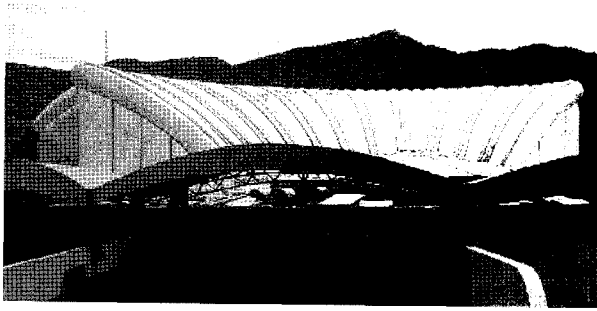


〈그림 1〉 스패น과 자중과의 관계



(a) 단일 공기막 구조(여의도 중소기업 전시장)

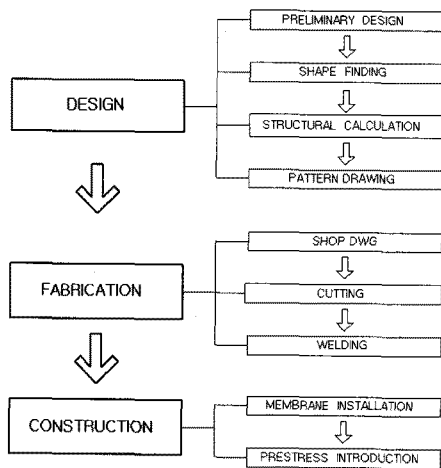
* (주)GS건설 건축사업본부 상무
** (주)GS건설 기술본부 상무
*** (주)GS건설 기술연구소 선임연구원



(b) 이중 공기막 구조(서울 대공원 돌고래 쇼장)

〈그림 2〉 공기막 구조의 종류

2. 단일 공기막 구조의 특징



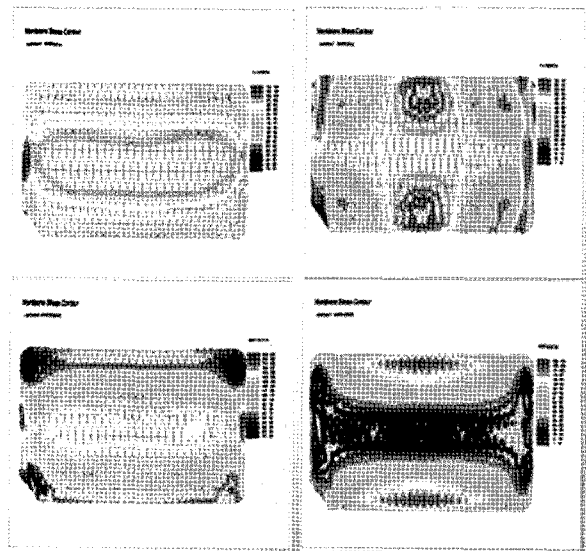
〈그림 3〉 공기 막의 설계 및 시공 프로세스

2.1 막 구조 형상 설계

단일 공기 막 구조 시스템의 설계는 일반적으로 형상 설계, 응력-변형 해석, 재단도 작성, 디테일 설계 및 Shop drawing 과정을 거친다. 막 구조에서 막의 형상은 중요한 설계 요소로서, 막 형상 결정의 기본 원리는 주어진 경계조건에 대하여 모든 방향의 막 장력이 동일한 곡면이 될 수 있도록 하는 것이다. 이는 주어진 경계 조건 내에서 막이 형성할 수 있는 최소면적을 갖는 곡면이므로 이것을 최소면적곡면이라 한다. 막 구조의 규모가 30m 이상이면 바람이 형상 결정에 중요한 요인이 되므로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 바람의 영향을 최소화할 수 있는 최적 공기막 형상을 결정하게 된다. 또한, 공기막은 구조적 안정성이 막에 의해 밀폐된 건물 내부에 압

력이 들어있는 공기를 붙여 넣어 외력에 저항하므로, 막의 파손은 내압의 손실로 이어지며 이는 즉각적인 구조물의 붕괴를 초래할 수 있으므로 설계시 주의해야 한다.

일정 규모 이상의 공기막 구조는 케이블을 보강재료 사용하게 되며, 이 경우 막과 케이블의 유기적인 거동을 고려한 비선형 해석을 통해, 전반적인 응력 분포 및 재료 안전을 검토와 Ponding, Wrinkling 등과 같은 바람직하지 않은 현상이 발생하지 않는지 검토해야 한다.

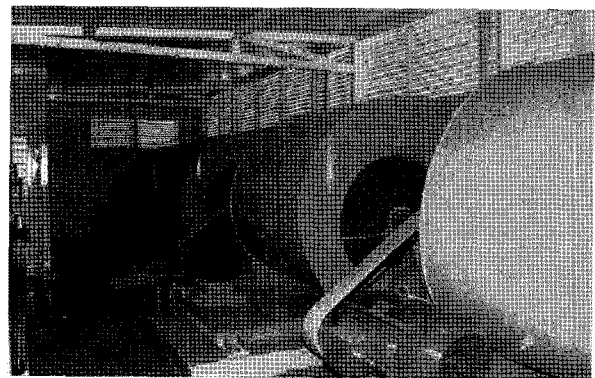


〈그림 4〉 공기막의 응력-변형 해석

2.2 특기 사항

(1) 내부 공기압 자동 제어

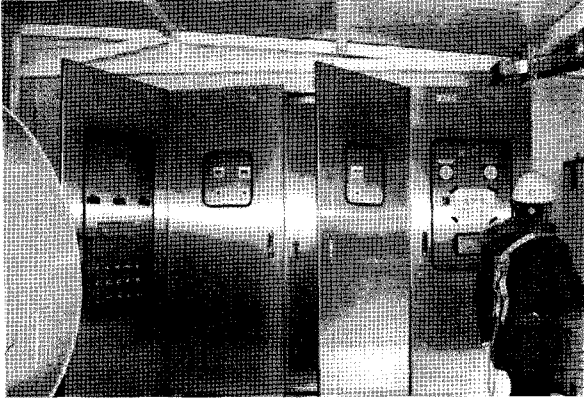
공기막 내부의 압력은 하중이나 운영상의 조건에 따라 변동되기도 하는데, 일정한 공기압을 유지해야 하기 위해 자동 제어기를 설치하여야 한다.



〈그림 5〉 가압 장치

(2) 압력저하 방지 장치

일반적인 공기 막의 경우 코너부는 내압이 저하되어 주름이 발생하는 경우가 많으며, 이같은 문제점을 개선하기 위해서는 별도의 압력저하방지용 코너케이בל을 설치하기도 한다.



<그림 6> 압력 자동 제어 장치

(3) 케이블 처짐 방지 장치

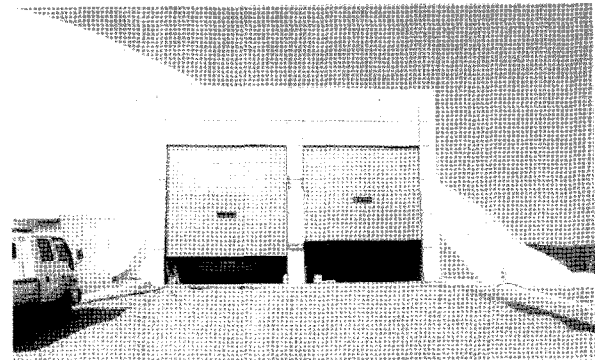
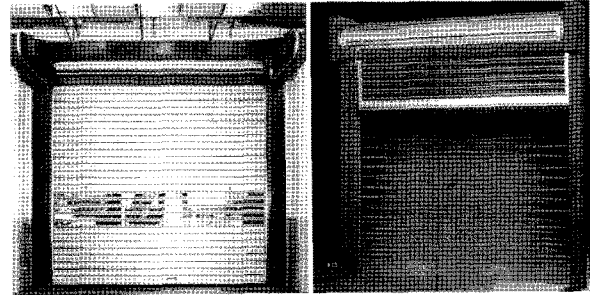
공기막 구조에서 모든 케이블에는 인장력이 발생하여 야 하는데 기초 공사나 막제작 및 설치시의 시공오차에 의해 케이블의 처짐현상이 발생할 수 있다. 케이블의 처짐 현상이 발생하면, 원래의 예상된 거동과는 다른 구조 거동을 보이며, 일부 케이블에서 응력 집중현상이 발생하여 구조적 안정성이 저하될 수 있다. 이런 문제들을 보완하기 위해 케이블의 길이를 조정할 수 있는 장치(end-fitting)를 케이블의 끝단에 장착하기도 한다.

(4) 상부 응설 제거를 위한 이중막 설계

공기 막은 눈이 쌓이기 어려운 2축 유선형의 형태로 일반적인 강설시에는 눈이 흘러내리게 형상이 결정되나, 기상이변으로 인한 폭설로 공기 막 상부에 눈이 쌓이는 경우에는 공기 막 상부에 Hot Air Pocket을 설치하여 눈을 녹일 수 있다.

(5) 차량 출입구

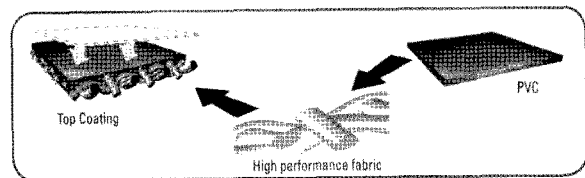
매립지와 같은 용도의 에어돔은 차량의 출입이 빈번하므로 내압과 바람의 영향이 작고 빈번한 개폐에도 고장이 적은 출입문이 요구된다.



<그림 7> 다양한 형태의 차량 출입구

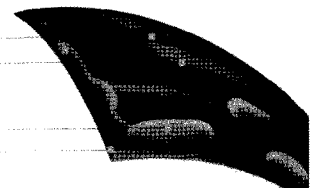
(6) 막재

막재는 기본적으로 유리섬유나 폴리에스테르로 이루어진 기본재의 상하부 표면에 테프론, 실리콘, PVC 등을 코팅하여 만든다. 막재는 인장강도, 인열강도, 접착강도, 신율 등의 역학적 특징과 내구성, 불연성, 내연성을 필요로 한다. 막재는 크게 유리섬유를 기본재로 하는 PTFE 막재와 폴리에스테르를 기본재로 하는 PVC 계열의 막재가 있으며, PTFE 막재는 대부분 구조용으로 사용되며 미국, 일본, 독일 등에서 생산되고 있다.



Structure of Product

- PVDF
- PVC layer
- High Strength Polyester Fabrics
- PVC layer



<그림 8> PVC 계열 막재 (LG CHEM)

3. 달성공원 폐기물 매립장

3.1 개요

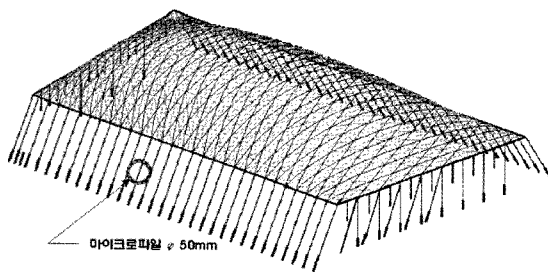
대구 달성공원 폐기물 매립장은 211m×100m 규모의 단일 공기 막 구조로서, 공기 막과 보강 케이블로 구성되어 있으며, 케이블은 마이크로 파일을 통해 지반에 고정되어 있다. 본 매립장은 밀폐된 건물 내부 전체에 공기를 가압(20-60mmAq)하여 구조적인 형태를 구성한다.

〈표 1〉. 달성군 폐기물 처리시설 개요

| | |
|--------|----------------------------------|
| 공사명 | 달성군지방산업단지 지정폐기물매립장 설치공사 |
| 위치 | 대구광역시 달성군 |
| 구조물 용도 | 폐기물처리시설 |
| 에어돔 규모 | 211m × 110m |
| 구조 형식 | 에어돔: 단일 공기막 구조 케이블 앵커: 마이크로파일 |
| 시공사 | GS건설 |
| 막 제조사 | (주)타이가 |

3.2 막 구조 설계

2.1에서 언급한 설계 과정을 통해 막 형상 설계와 상세 구조 설계를 통해 그림 9와 같은 형상의 막 구조물을 얻었다. 구조 설계시에는 상시 조건과 풍하중 조건, 적설하중 조건을 기본적인 설계하중 조합으로 설정하여 막 응력, 케이블 장력, 처짐 등을 평가하였다.



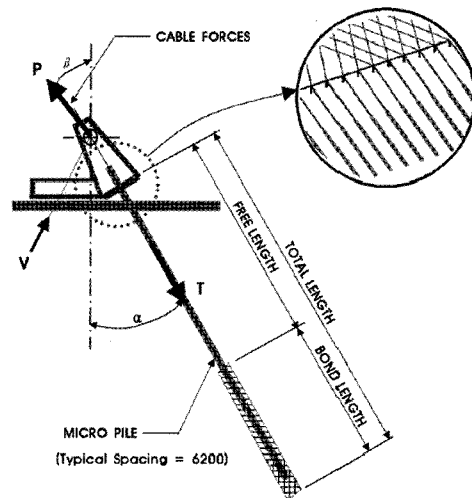
(a) 3D 해석 모델



(b) 횡단면도

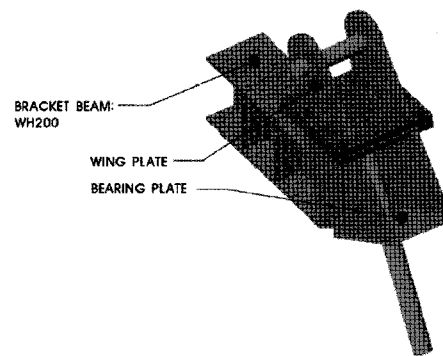
〈그림 9〉 공기 막 형상

일반적으로 막 위에 설치하는 케이블은 눈이나 바람에 의해 막에 가해지는 외부하중을 케이블이 일부 부담하여 이를 기초부로 전달하는 역할을 하는데, 50m이상의 대형 공기 막이나 강풍, 다설 지역에서 사용되고 있다. 본 공기막은 장변의 길이가 200m에 달하는 대형 공기막이므로 케이블을 공기 막 위에 설치하였으며, 이 케이블은 마이크로 파일에 의해서 지반에 고정되도록 설계되었다. 마이크로 파일의 소요 내력은 케이블의 지점 반력을 이용하여 산정하였다. 케이블과 마이크로 파일의 접합을 위해 케이블 앵커 블록과 클램핑 빔(Clamping Beam)을 사용하였으며, 유한요소 해석을 통해 케이블 앵커 블록과 클램핑 빔(Clamping Beam)의 응력을 검토하였다.



WHERE, P : 케이블 장력
T : 마이크로파일 인장력
V : 수직반력
α : 마이크로파일 경각각 (30°)
β : 케이블 경각각 (40°)

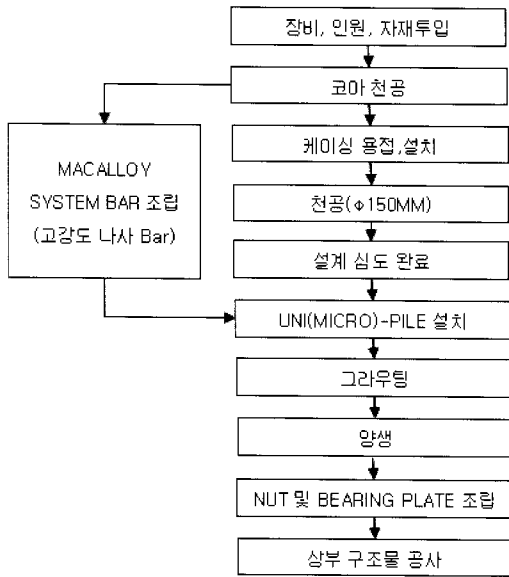
〈그림 10〉 케이블과 마이크로 파일의 상관도



〈그림 11〉 앵커 블록의 유한요소 모델

3.3 시공 Process

마이크로 파일(MICRO PILE)은 0.12~0.3M 사이의 소구경 현장 설치 파일로서 주로 연약지반의 기초 보강이나 타워, 굴뚝 및 송전탑의 기초 파일 및 기존 건물의 기초 보강용으로 사용되고 있으며 시공 순서는 그림 12와 같다. 본 구조물에서 마이크로 파일은 구조물의 특성 및 시공성을 고려하여 60°의 설치 각으로 암반층에 정착하였다.

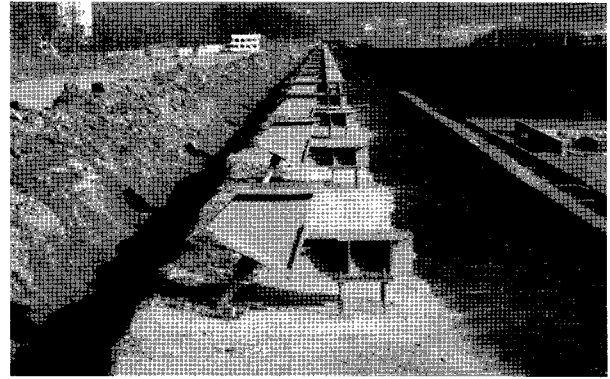


〈그림 12〉 마이크로 파일 시공 순서

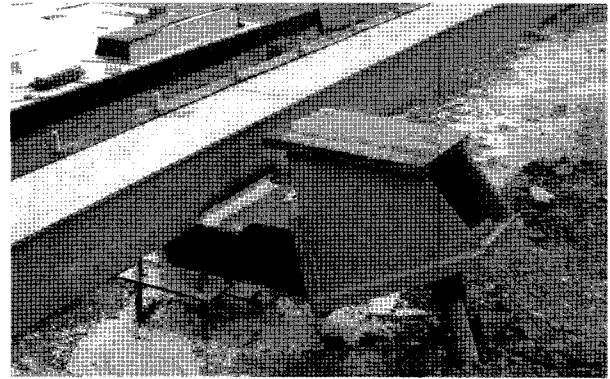


〈그림 13〉 마이크로 파일의 시공 완료 모습

마이크로 파일과 케이블의 원활한 힘 전달을 위해 그림 14, 15와 같은 앵커 블록과 Clamping Beam 을 설치하였다.



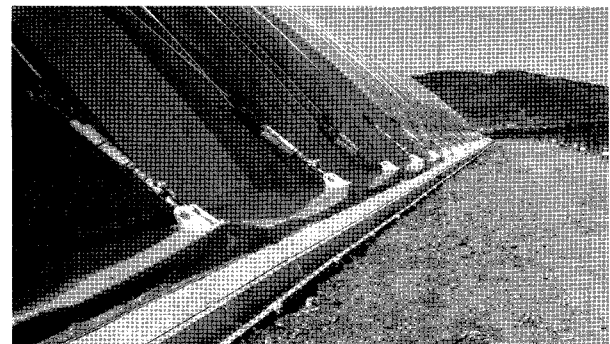
〈그림 14〉 앵커 블록의 모습



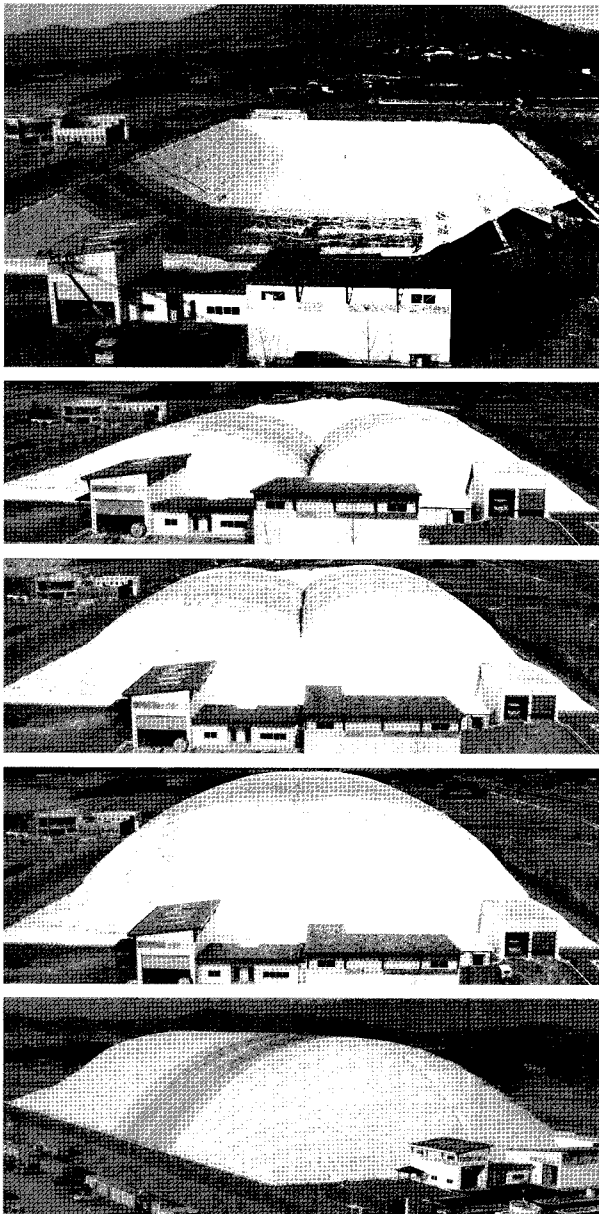
〈그림 15〉 앵커 블록과 Clamping Beam의 연결

마이크로 파일과 케이블의 원활한 힘 전달을 위해 그림 14, 15와 같은 앵커 블록과 Clamping Beam 을 설치하였다.

공기막은 내부 공기압력으로 외력에 저항하므로 공기 누출량을 최소화하는 것은 유지관리비용을 측면에서 중요하다. 이를 위해 당 현장에서는 그림 16과 같이 누름 플레이트와 스킷, 볼트, 너트 등으로 구성된 밀폐형 막고정 시스템을 사용하였다. 그림 17은 공기 가압을 통해 공기 막 구조물을 형성해가는 과정을 보여준다.



〈그림 16〉 막 고정 시스템



〈그림 17〉 내부 모습

로 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 본 기사는 당사에서 시공한 대구 달성공원 쓰레기 매립장 공기 막 구조물의 설계 및 시공 기술에 대해서 간단히 소개한 것으로써, 공기막 구조에 대한 독자들의 이해를 넓히는데 도움이 되기를 바란다.

4. 맺는 말

공기막 구조는 지붕 자중의 경량화, 공기 단축, 공사비 절감, 지주 없는 대공간 창출 등의 장점으로 놀이동산의 단순한 에어 바운스에서부터 대형 전시장, 박람회장, 폐기물 매립장, 경기장 등과 같은 다양한 용도의 구조물에 적용되고 있다. 공기막 구조는 실내압 유지를 위한 공기 유입 비용, 건물 밀폐 및 환기 등의 문제가 있을 수 있으나, 쓰레기 매립장에서는 효율적인 구조 시스템으로 사용될 수 있었으며, 이와 유사한 구조물에서도 효과적으