■ 현장 탐방

새만금 수리시험장
Saemankeum Hydraulic Model Hall

박 상 현*
Park, Sang-Hyun

1. 머리말

새만금 수리시험장은 경기도 안산시 사동에 소재하며 부근에는 한양대학교와 해양연구소 등의 학술 연구기관, 그리고 사회 복지기관인 명휘원과 가까이 위치한다. 수리시험장은 1982년 농어촌진흥공사의 자체자금과 정부의 국고 그리고 UNDP의 외자 지원에 의하여 간척지 59ha를 연구 단지로 조성한 후, 그동안 대호방조제, 금강하구둑, 영산강방조제 등 간척지구 수리시험, 그리고 오동지구, 오성지구의 농업용댐의 물넘이 수리시험을 수행한 바 있다. 또한, 외부의 수탁 사업으로서 소래항의 항로, 평화댐 배수관, 용담댐의 여수로와 취수 및 발전수로, 군산 인공섬, 당진 화력발전시설의 취수로 등의 수리시험을 시행하였다. 1993년 12월, 농어촌진흥공사 본사에 있던 농공기술연구소가 이전됨에 따라 수리시험장의 연구 단지는 환경연구실, 재료 토질연구실과 함께 활용되고 있다.

2. 구조 및 시설개요

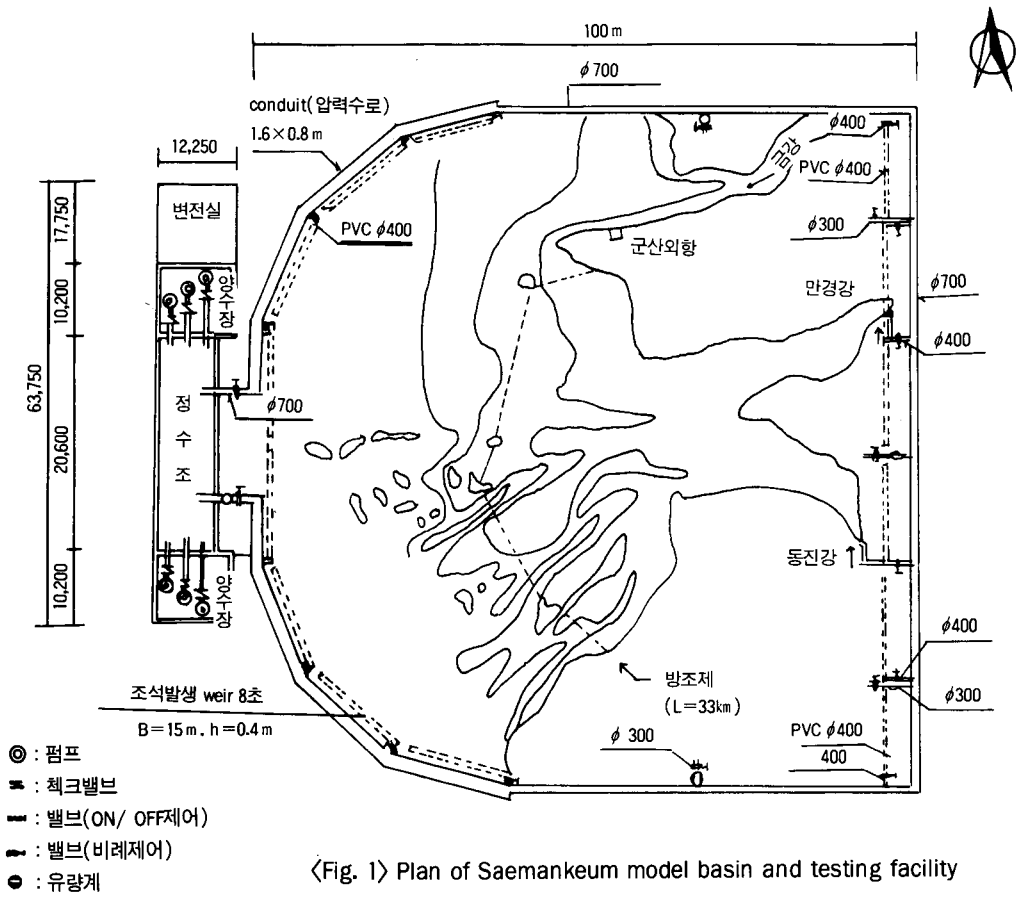
새만금수리시험장은 1991년 11월 착공하여 1994년 5월에 준공되었다. 이의 규모는 가로 100m, 세로 102m, 높이 13m이며, 시험수의 급배수관 시설과 모형 배치내용은 〈Fig. 1〉과 같다. 시험장 내부 공간은 기둥이 전혀 없으며, 지붕의 하중은 철골 트러스로 지지되어 수조바닥과 지하저수조에 고정된다.

수리모형 시험 중, 조석발생시설과 측정 장비는 바람이나 비로부터 보호되고 계측 결과의 정확성을 높이고 전천후 시험을 도모하도록 모형 수조는 지붕을 덮은 실내 시설로서 건립되었다. 지붕의 설계 풍하중은 40m /sec이며, 허용 적설량은 50cm이다.

시험 건물의 기초 토질은 연약한 점토층이 15m 깊이까지 형성되어 있기 때문에 이를 보강하기 위하여 콘크리트 파일을 사방 약 3m 간격으로 총 814개를 타설하였다. 지하에 설치된 저수조는 철골 기둥과 수조바닥에서 전달되는 수직 하중을 기초 지반에 고르게 분산한다.

시험장의 구조공간은 〈Fig.2〉와 같다. 건물의 기둥과 지붕의 철골구조공사는 가로 102.2m, 최대높이 15.5m, 폭 6.7m의 트러스를 16열로 나누어 조립한 후 이동하여 연결 접합토록 하였다. 이를 위하여, 건물 동쪽에 철골 조립과 용접을 위한 가설 구대시설을 설치하고 그 위에 철골 구조물을 지지할 수 있는 Screw jack과 각 부재를 조립 후 들어올릴 수 있는 유압식 Jack을 설치하여 각 부재들을 조립 제작을 착수하였다. 조립이 완료되면, 4대의 유압 Jack를 가압하여 트러스를 밀어 올려서 트러스의 하중이 양측 기둥과 유압 Jack으로 지탱한 후, 하중이 걸리지 않게 된 Screw jack은 제거하였다. 유압 Jack도 점차 압력을 낮추어 구조물이 자립토록 한 후 제거하였다. 이렇게 조립된 트러스 구조물은 벽체 양측 바닥면에 2열로 설치된 레일과 유압식 횡인 Jack을 이용하여 정수조 쪽으로 이동하여 먼저 횡인된 구조물과 연결 접합하였다. 이러한 횡인과 조립작업은 16열에 대하여 반복적으로 실시하였으며, 전체 100m구간을 설치하는데 3개월이 소요되었다. 트러스 구조물의 연결 접합이 끝난 후, 벽체 기둥은 바닥면의 철근과 묶어서 구조물 밖으로 향하는 기둥의 1열당 수평

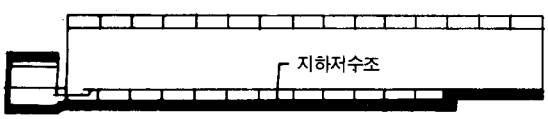
* 농어촌진흥공사 농어촌연구원



〈Fig. 1〉 Plan of Saemankeum model basin and testing facility

력 49ton을 내측으로 당겨주어 구조물의 안정성을 높혀주었다. 건물의 지붕과 벽면은 불소수지 강판을 2중으로 설치하고 그 내부는 석면으로 채워서 외기의 영향을 줄였으며 겨울철 외기온이 −18℃일 때에도 내부는 −3℃ 정도를 유지토록 하였다. '94년도 여름철의 혹서기에도 내부 온도는 30℃ 이하로 유지되었다. 모형수조 내부 공간의 천정 밑에는 凹 모양으로 배치된 공중통로(Cat walk)가 설치되어 있으며 이는 모형의 흐름 특성을 공중에서 파악하고, 방조제 물막이 단계별로 변화하는 유속과 흐름 방향을 촬영하기 위하여 설치된 것이다.

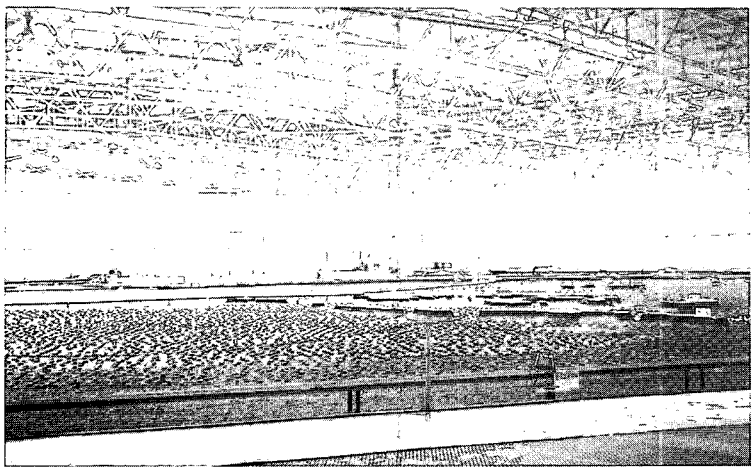
〈Fig. 3〉은 모형 건물의 내부 공간을 보여준다. 이와 같이 건립된 새만금수리시험장 건물은 순경간 102 m, 모형 면적 5,100평방 m로서 세계에서 가장 큰 규모로 건립된 시험장이다. 시험장의 건물 공사비는 73억원이 투자되었다.



〈Fig. 2〉 Framework of Saemankeum model hall

3. 시험용수의 순환계통

모형시험을 위한 시험 용수의 순환은 저수조에서 정수조에 양수된 후 압력관로를 통하여 시험수조에 공급된 후 배수되어 다시 저수조로 유입된다. 지하 저수조에 저류되는 저수 용량은 약 5,500톤으로서 이는 수도물로 공급하게 되는데 겨울철 결빙의 우려가 없고 여름철의 미생물 번식을 막을 수

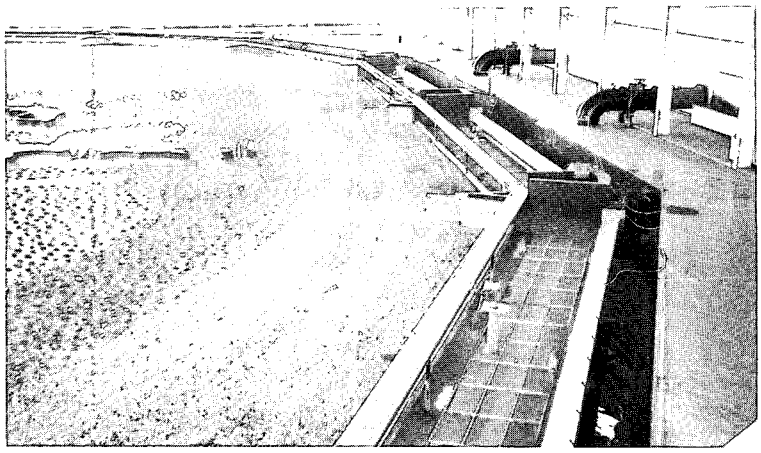


〈Fig. 3〉 Inside structure of model hall

있기 때문에 한번 저류되면 오래도록 사용할 수 있다. 양수장에는 6대의 양수기가 배치되었으며, 6대를 모두 가동할 때 최대 양수량은 초당 3톤이지만 새만금지구의 경우 5대를 가동하여 초당 2.5톤 정도를 사용하고 1대는 여유 대수로 남게 된다. 정수조는 저수조에서 양수된 시험수의 급류속을 완화하여 압력관로로 일정한 수압을 유지하여 공급하기 위한 것이다. 정수조의 규모는 가로 30m, 세로 9m, 높이 3m로서, 양수된 물중 수심 3m를 초과하는 시험수는 저수조 상부에 설치된 월류 Weir를 넘어서 다시 저수조로 배제된다. 여기서, 시험용수는 정수조 바닥에 설치된 2대의 압력관로(직경 7m)를 통하여 나아가서 조석 발생 Weir 내측의 시험수조로 공급된다. 〈Fig. 4〉는 정수조에서 분기되는 두개의 압력관로와 조석 발생시설(Tide generator)과 바다쪽 모형 경계구역을 보여준다.

모형에서 바다쪽의 경계구역 각 위치별 조석의 시간적 변화는 8대의 조석발생 Weir에 의하여 재현되며, 이들 Weir는 폭 15m, 높이 0.4m의 철판으로 되어있다. 여기서, 밀물은 시험수를 공급한후 Weir를 올리므로서 경계구역의 조위를 상승하여 하구쪽으로 물을 이동시키며, 썰물은 Weir를 낮추어 시험수를 배제하므로서 경계구역의 수위를 낮추어 시험수를 외해쪽으로 배제하여 재현한다. 이러한 Weir식 조석발생 시스템은 새만금지구와 같이 방조제 외해쪽이 탁 트인 대형 방조제의 각 위치에서 상이하게 입출하는 조석을 재현하는데 필수적이다.

또한 만경강과 동진강, 금강에서 다양하게 유입되는 홍수 유입량을 정확히 재현하기 위하여 시험용수의 일부는 모형구역 외곽에 가로 1.6m, 높이 0.6m의 사각형의 통수단면을 갖는 콘크리트 압력



〈Fig. 4〉 Tide generator system

수로를 통하여 공급하며, 압력수로 상부는 실내 통로로도 이용토록 하였다. 이들 하천의 시험 유량은 유량조절 발브에 의하여 조절된다.

4. 수리모형의 설계와 제작

이와 같이 대형의 모형시험시설이 필요한 까닭은 새만금 방조제의 규모가 세계에서 시행된 방조제 중 가장 큰 규모이기 때문이다. 즉, 새만금 간척지구의 주요한 사업 내용은 변산 해안, 고군산 군도 및 금강 하구를 연결하는 연장 33㎞의 방조제를 건설하고, 총 간척 면적 40,100ha을 개발하여, 28,300ha는 산업 기지로, 11,800ha는 5천만톤의 수자원을 저장하는 담수호로 조성하는 계획이다. 우리나라에서 현재까지 수많은 방조제가 재래식 시공방법에 의하여 건설되었으나, 새만금방조제는 수심 20m 이상의 심해에서 축조되며, 대조시 조차가 7m에 이르고 조석량도 최대 5억톤으로, 하상은 세립의 모래로서 쉽게 세굴되기 때문에 좀 더 세부적인 계획이 요망된다. 방조제 물막이 공사에 있어서 조석, 파랑, 퇴적, 홍수량에 관한 모든 물리적, 환경적 요소들이 상호 연관되기 때문에 특정한 설계 세목 또는 시공 순서의 변화에 따라서, 방조제 물막이 공사는 이들의 복합적인 영향에 피해를 받을 수 있다.

일반적으로 대형 수리구조물의 설계는 공사 여건에 따라 수리모형 시험과 수치해석 기법 그리고 경험적 공식들이 선택적으로 활용된다. 이 중, 수리모형시험은 시험과정이 가시적이며, 공사구역의 복잡한 지형 영향에 따른 비선형적 흐름과 개방구간의 급류속, 그리고 기초 지반의 세굴과 퇴적 과정을 직접 관측하기 때문에 시험 결과의 파악이 용이하며, 모형의 설계와 검정과정에서 적정 상사법칙을 준용한다면 시험 결과는 가장 신뢰성이 높다. 새만금지구는 수리모형 시험시설이 광대하므로 수치모형 만의 적용도 검토되었으나, 수치모형만으로는 복잡한 해저 협곡지형과 방조제 물막이단계별로 변화하는 다양한 조류 이동을 정확히 재현하기 어렵다. 특히, 끝물막이 단계의 급격한 난류 형태의 수류를 정확히 파악하기 어려우며, 방조제 공사 단계별 밀물과 썰물의 변화 과정과 대처 방안을 모형에서 직접 보여주므로서 사업의 신뢰성을 높히는 효과를 고려하여, 수리모형 시험을 위주로 하고 수치해석 방법은 보조적인 기법으로 채택하였다.

새만금지구는 공사 구역과 이에 따른 영향 구간이 광대하기 때문에 모형 규모를 최소화하는 것은 중요하다. 시험 공간의 최소화 분석을 위하여 외국 기관과도 협의하였으나 용역비가 너무 많이 소요되어 자체 보유한 유한차분해법에 의한 2차원 수치모형분석에 의하여 현재의 시험 공간을 설정하였다.

본 수리시험과 같이 방조제 구역에 대한 전반적인 흐름 특성과 종합적이며 개괄적인 대안을 검토하도록 만든 모형을 전구역 모형(Overall model)이라 하는데 이는 담수호의 유입 하천과 하구 및 외해 쪽의 충분한 해역을 포함한다. 전구역 모형은 수심측량, 지형조사를 거쳐서 모형을 정확히 제작하여야 하고, 해안의 바닥조도와 지구 자전 효과도 고려되어야 한다. 수리모형의 정확도는 축척에 좌우되며 방조제 구역에 대한 대규모 모형에서는 축척의 왜곡(Distortion), 즉, 수평축척과 수직축척을 다르게 하는 일이 불가피하다. 이런 측면에서 모형을 3개의 범주로 나누어 비교하였다.

1) 고 왜곡(왜곡도 > 10) : 이 모형의 경우 조석운동의 주요 특성만 재현할 수 있다. 이는 1차원 수치모형과 비교할 수 있다.

2) 중 왜곡(6 < 왜곡도 < 10) : 이 모형은 조석운동을 보다 세부적으로 시험할 수 있다. 그러나, 왜곡도가 아직도 비교적 커서 모델 전체에 걸쳐서 수직방향의 요소에 추가적인 조도 보정장치가 필요하다. 추가적인 보정장치는 왜곡도의 평방근에 직접 비례하여 필요하다. 이것은 흐름상태의 교란에 영향을 미치며, 유속분포의 재현에 신뢰성이 감소되며, 모형내에서의 관측이 복잡하다.

3) 약 왜곡(왜곡도 < 6) : 이 모형의 경우 인위적인 바닥조도로 왜곡의 영향이 충분히 보정되며 조석운동의 수평분포의 정확한 재현이 가능하다.

본 모형은 방조제 공사의 중요성에 비추어 왜곡비를 1:6 정도로 정하였다. 조석 특성의 재현에 있어서 수직축척(N_h)의 결정이 가장 중요하며, 이로

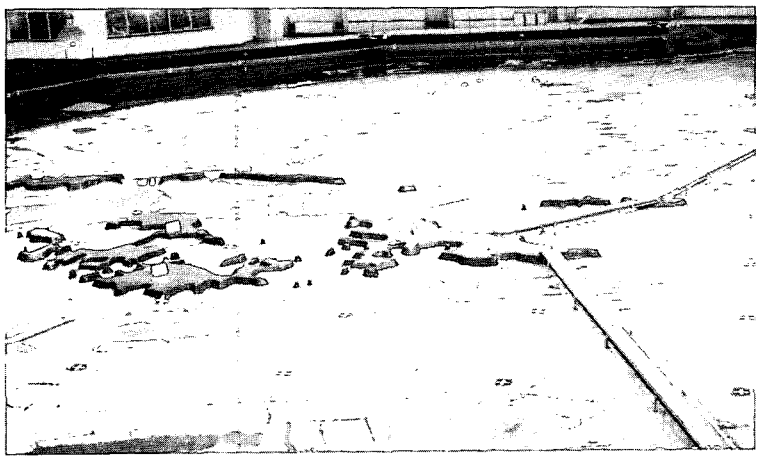
부터 속도축척(N_v)이 유도된다. 허용되는 최대 왜곡도, 요구되는 시간 축척 그리고 시험의 경제성을 고려하여 수평축척이 결정된다. 조석의 흐름은 자유 수면을 갖고, 중력에 지배되며 관성력은 부수적이어서 모형의 축척은 Froude의 상사 이론을 따른다. 모형의 수직 축척은 시험 중 흐름형태가 표면 장력과 바닥 마찰에 의하여 이그러지지 않도록 1/100 이하로 설정된다. 본 모형의 수직축척과 수평축척은 각각 N_h=80, N_l=500으로 정하였으며 이에 따른 모형 축척의 왜곡도(Distortion ratio)는 6이다. 이 값은 앞에서 비교 언급된 약왜곡 모형의 한계 범위이다. 이의 시간축척은 1/56이며, 12시간 25분인 조석주기를 갖는 현장의 여건을 감안할 때, 모형에서는 13분의 아주 짧은 조석주기로 나타난다. 이 주기는 조석발생과 측정, 흐름양상을 정확히 측정할 수 있는 양호한 조건이다.

이러한 시험설계 결과에 의하여 '94년 5월부터 8월까지 수리모형이 제작되었다. 모형의 지형은 우선 모래를 50cm 두께로 깐 다음에 사방 5m로 격자망을 구성하고 물다짐한 후 바닥표고에 맞추어 말뚝을 박은 다음, 실로 팽팽히 묵고 모래를 써래질하였다.

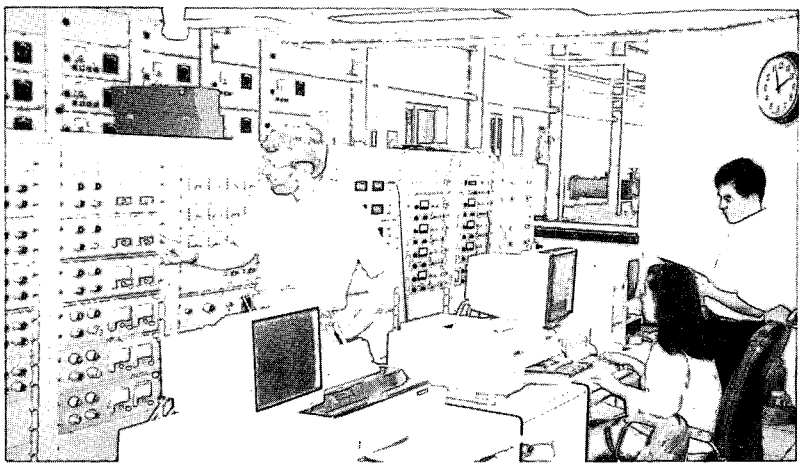
이 위에 다시 등고선을 따라서 실을 팽팽히 당겨서 고정하고 이를 따라서 모르터로 줄띠를 높이 5cm 정도로 형성한 후, 등고선 사이의 표면은 약 5cm의 두께로 모르터로 채웠다. 모형제작에 투입된 재료는 3,000 입방미터의 세척 해사와 1대당 40kg인 레미탈 4,150포대 등이며, 모형 제작에 투입된 인부는 30여명이며 이 중에는 인근 대학교에서 여름방학을 이용하여 참여한 십여명의 학생들도 포함된다. 모형의 제작이 완료된 후, 바다모래의 염수 용탈에 따른 염해를 우려하여 시험용수의 수질을 측정한 결과 염도는 300ppm이나 되고 탁도도 높아서 시험용수는 다시 수도물로 교체되었다.

5. 모형의 보정과 시험 계측

본 방조제 모형은 수평보다 수직축척이 6배나 큰 왜곡 모형이기 때문에 모형의 바닥은 실제 해안의 경사보다 급하다. 따라서, 일부 구간에서 모형의 유속은 현장보다 크게 증대될 수 있으며, 이러한 문제는 모형 바닥의 조도보정 장치(Roughness element)에 의하여 모형의 조도를 현장 해안보다 증대하여 보완한다. 이를 위하여 모형의 표면은 콘크리트 모르터로 바른 후 대나무 비로 써레질하여 거칠게 하였다. 또한, 수심이 깊은 구간은 자갈을 펼쳐놓았으며, 방조제 외곽의 아주 깊은 구간은 가로 10cm, 세로 10cm, 높이 5cm의 시멘트 벽돌 20,000개를 펼쳐놓았다. 〈Fig. 5〉는 모형에 재현된 방조제 외곽의 고군산 군도와 외해쪽의 지형 형상을 보여주고 있다. 현재, 전구역 수리시험은 공사구역의 지형 자료를 모형에서 재현하고 '90년부터 방조제 공사 구역에서 조사된 조류속과 수위 측정



〈Fig. 5〉 Saemankeum overall model



〈Fig. 6〉 Data acquisition system in Saemankeum overall model

자료를 모형에서 정확히 재현시키기 위한 검정 시험이 진행중에 있다. 현장 자료의 정확성은 모형시험의 검정에서 가장 중요한 사항이기 때문에 수리시험장은 매년 현장의 조석자료를 자동계측장비를 이용하여 측정하고 있다. 그러나, 새만금지구의 광활한 지역의 여러 지점의 조석자료를 동시에 관측하기란 곤란하기 때문에 여러 지점에서 각기 다른 시기에 측정된 자료를 동시에 관측된 자료로 보정하는 후측(Hindcast) 프로그램을 이용하여 시계열(Time series)의 자료로 변환한다. 이에 의한 현장자료와 모형의 측정자료가 비교 검정된다. 모형의 상하류 경계 구역과 물막이 구간 등의 중요한 지점에는 자동으로 계측되는 조위계와 유속계를 설치하고 이를 분석 장치와 연결하여 시험계측 결과를 파악하는 자동 계측 시스템이 〈Fig. 6〉과 같이 설치되었다. 이는 모형의 계측자료를 192채널까지 동시에 측정할 수 있으며, 모형의 각 지점의 위치와 유속과 유향 및 조위의 측정 결과를 출력화면으로 파악할 수 있으며, 현장 자료와도 비교할 수 있다. 검정 시험이 완료되면 '95년초부터 방조제 물박이 공사 단계별로 변화되는 조류속과 수위 등을 실험 예측하고, 물막이 방법에 관한 여러가지 대안도 함께 시험할 예정이다. 방조제 물막이에 관한 시험은 공사 현장의 중요한 지점에 대한 공사 단계별 조류속과 조위 및 하상의 세굴특성을 수시로 조사하여 모형에서 비교 보정하고 적절한 대안에 관한 시험을 현장 기술자들과 협의하여 도출하도록 추진하고 있다. 이러한 시험은 방조제 끝 물막이 공사 기간까지 계속될 예정이다.

6. 방조제 물막이와 부대시설의 세부 수리모형시험

방조제 끝물막이 공사계획에 관하여는 좀더 세부적인 시험을 추가할 계획이다. 이는, 새만금 모형은 왜곡도가 6이고 바닥조도를 보완하는 장치를 갖고 있으나 이의 정확성은 여전히 잘 검정된 2차원 수치모형의 정확성과 같은 수준이기 때문이다. 또한, 방조제의 끝물막이 단계에서 개방 구간을 통과하는 흐름 양상, 유량계수, 바닥면 근처에서 Flow force 등과 같은 세목은 3차원적 효과가 중요한 역할을 갖는다는 관점에서 전구역 모형 시험에 의한 수리특성만으로 신뢰성을 보장하기 어렵다. 특히, 방조제 끝물막이 구간의 급격한 흐름은 수리적 평균값과 대표값보다는 각 지점의 국부적 특성값들이 중요하며, 끝물막이 구간의 축조 재료의 안정성과 세굴현상은 평균 유속보다는 방조제 첨단부의 유속에 지배된다. 이러한 과제들은 세부 모형(Detail model)에서 시험토록 계획되었다. 새만금 지구에서 세부 모형시험은 방조제 물막이 단계별 유속의 변화, 와류의 발생과 이동, 파랑의 변형, 그리고 하상의 세굴과 방지 대책 등을 대상으로 하

며, 모형의 축척은 수평과 수직 축척이 같은 정상 모형(undistorted model)로 설정되었다. 방조제 세부모형의 축척은 모형의 흐름이 표면 장력과 바닥 마찰에 의하여 현장보다 왜곡되지 않도록 1:100 이상으로 계획되며, 상하류 경계 조건은 전구역(왜곡) 모형의 시험 결과에 의하여 결정할 계획이다. 방조제 끝물막이에 관한 세부모형시험이 계획된 옥외 시험수조(40m×40m)는 시험용수량이 1.0㎥/sec로서 방조제 체절시험에 필요한 용수량보다 부족하므로 이를 새만금시험장의 시험용수를 옥외수리시험수조로 공급하도록 시험용수 계통을 증설하며, 상하류 조석발생 장치도 Weir식으로 신설하고 수조 면적도 60m×40m로 증대하였다.

본 사업에서, 세부 모형시험은 방조제 물막이 시험뿐만 아니라, 배수갑문의 홍수 배제 능력, 어도(고깃길), 통선문 등의 부대 시설물을 비롯하여, 방조제 건설 후 해빈대의 변형과 고군산 열도에 계획되는 신항구개발 등이 포함된다. 이 중 배수갑문의 통수량과 어도 규모의 적정성 시험은 기존의 수리시험 시설인 댐수로공 시험실을 이용하여 '91년부터 시행되었으며 가력도 배수갑문의 시험은 가로와 세로가 각각 60m×60m인 옥외 수리시험수조를 이용하여 '92년부터 연차적으로 시험되고 있다.

7. 맺음말

새만금수리시험장의 공사가 착수된 이후 현재까지, 현지 주민과 관련기관의 요원을 비롯하여 국내외의 저명한 수리, 건축, 구조분야의 기술자 등 3천여명의 인원이 방문하였다. 그리고 새만금시험장의 일부 여유공간은 현재 다대포항 방파제 규모에 관한 수리시험에 활용되고 있으며, 다른 사업지구의 항만개발과 발전시설 등에 관한 수리시험 요청이 꾸준이 증가되고 있기 때문에, 시험장의 활용성은 앞으로 더욱 증가될 것이다.

이와 같이, 새만금지구의 수리시험은 전구역 모형시험과 세부모형시험으로 구분하여 시행할 수 있도록 시험 수조 규모를 설정하므로서 시험 결과의 정확성이 기대된다. 또한, 방조제 축조과정에 관한 분석은 2차원 수치해석 방법과 수리모형시험을 병행하므로서 방조제 축조 공정계획과 해안 퇴적과 세굴형태 예측 및 하상 세굴보호 등에 관한 신뢰성을 높일 수 있다.

또한, 세부수리모형시험을 병행하므로서 구조물의 안전과 방조제 축조 재료의 최적 규모 결정 그리고 하상 세굴방지 대책에 대한 신뢰성이 제고되었다. 이에 부수적으로 심해 방조제 설계는 파랑과 해일의 피해를 고려하여야 하므로 본 수리시험 사업에서 계획된 모형수조는 파랑내습에 따른 방조제 피복재료의 규격 결정, 적정한 제방 규모에 관한 수리시험을 수행하는데에 충분한 공간을 제공토록 계획되었다. 본 수리모형수조는 방조제 완공후 해안의 퇴적 변화 등의 해안 환경과 고군산 군도에 계획된 신 항구의 수리시험도 가능한 공간으로 구성하였다.

이와같은 종합적인 수리시험을 통하여, 새만금 방조제공사는 구조적으로 안전성과 경제성을 도모할 뿐만 아니라, 담수호의 합리적인 수자원 활용과 수질 및 생태 보존에 관한 수리적인 특성 인자를 제공하고, 해안의 퇴적형태 변화에 관한 환경 변화를 최소화하여 사업의 신뢰성을 높히는데 크게 기여할 것으로 전망된다.

약 력

박 상 현

1974. 서울대학교 농과대학 농공학과 졸업
1982. 건국대학교 대학원 농학석사
1982. 토목기술사(농어업토목)
1990. 서울대학교 대학원 농학박사
현재 농어촌진흥공사 농어촌연구원
수리시험 수석연구원
KCID 관개배수실행분과 위원장 / 편집 및 학술분과위원
ICID 관개배수실행분과 위원