

# 새만금 수리시험장

박 상 현 · 박 창 규  
(농어촌진흥공사 농공기술연구소)

## 1. 머리말

새만금 수리시험장은 경기도 안산시 사동에 소재하며 인근에는 한양대학교와 해양연구소 등의 학술 연구기관, 그리고 사회 복지기관인 명휘원이 위치하고 있다. 1979년 농진공 자체 자금을 의하여 안산 해안의 간척지 56ha를 매립하여 수리시험장 부지가 조성되었으며 뒤 이어 국고 및 UNDP외자 지원에 의하여 서남해안 간척 사업 지원을 목적으로 수리 시험 시설이 1984년 준공되었다. 주요 시험 시설은 60×60m의 옥외 조석 모형 수조, 국내 최대의 풍동 시험 수로, 그리고 유체 역학 실내 시험이 가능한 댐수로공 건물 등이 있다. 본 시설물을 이용하여 1980년부터 대호 방조제, 금강 하구둑, 영산강 방조제 등 간척지구의 수리 시험, 그리고 오동지구, 오성지구의 농업용 댐의 물넘이 수리 시험을 수행한 바 있다. 또한 외부의 수탁 사업으로서 소래항 매립, 평화댐 배수터널, 용담댐의 여수로와 취수 및 발전수로, 군산 인공섬, 당진 화력 발전시설의 취수로 등 다수의 시험을 시행하였다. 그러나 기존의 60×60m의 옥외 조석 모형 수조는 대규모 심해 간척 사업인 새만금 개발 사업을 지원하는데는 용량이 충분치 않아 새만금 전용 수조의 건립이 1980년대 말부터 검토되어 왔으며 이에 따라 새만금 수리시험장을 1991년 12월 착공하여 1994년 5월 준공하였다. 1993년 12월, 농어촌진흥공사 본사에 있던 농공기술연구소가 이전됨에 따라 안산 부지는

환경연구실, 재료토질연구실이 함께 활동하게 되어 종합적인 농공기술 연구 단지로서의 기능을 수행하고 있다.

## 2. 구조 및 시설개요

새만금 수리시험장의 규모는 주건물이 가로 100m, 세로 102m, 높이 13m이며 변전실, 펌프실, 정수조등이 연결되어 있다. 시험 용수의 급배수관 시설과 모형 배치 내용은 Fig. 1과 같으며 모형설치에 장애를 주지 않기 위하여 시험장 내부 공간은 기둥이 없는 구조로 설계되었다. 수리 모형 시험중 조석 발생 시설과 측정 장비는 바람이나 비로부터 보호되어 측정 결과의 정확성을 높였고 전천후 시험이 가능하도록 실내 시설로서 건립되어 이제까지 옥외 시험 수조를 통한 시험에 비하여 모형 가동 일수가 연장되었으며 지하 저수조는 철골 기둥과 모형수조와 일체구조물로 설치되어 건물 하중을 지반에 고르게 분산한다.

건물의 기둥과 지붕의 철골 구조 공사는 가로 102.2m, 최대높이 15.5m, 폭 6.7m의 트러스를 한개 단위로 조립한 후 총 16개의 트러스를 연결 접합하였다. 이를 위하여, 건물 동쪽에 철골 조립과 용접을 위한 가설 구대를 설치하고 그 위에 철골 구조물을 지지할 수 있는 Screw Jack을 설치하여 각 부재들을 조립 제작하였다. 한개 단위의 트러스가 조립이 완료되면 Jack을 제거하게 되며 이때 트러스는 약 30cm의 처짐이 발생하고 그 응력은 양

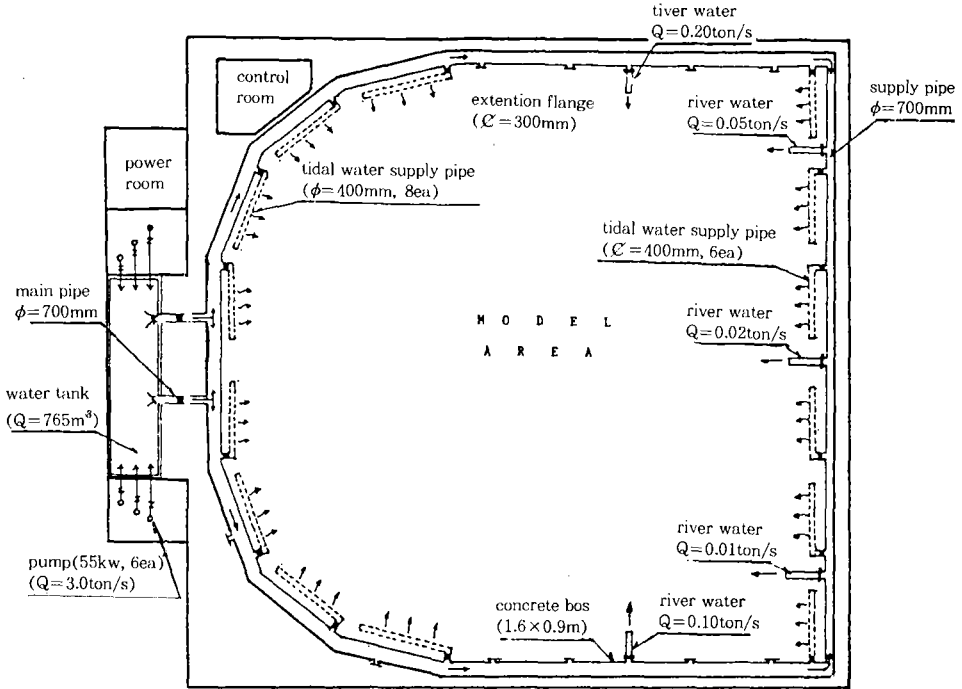


Fig. 1. Water supply system & model layout

단의 수직 빔에 모멘트로 전달되게 된다. 조립된 트러스 구조물을 벽체 양측 바닥 면에 2열로 설치된 레일과 유압식 견인 Jack을 이용하여 정수조 쪽으로 한개 단위폭(6.7m)을 이동한 후 2차 조립된 트러스와 연결 접합하고 다시 횡인 하였다. 이러한 조립, 횡인, 연결작업을 16열에 대하여 반복적으로 실시하였으며, 전체 100m구간을 설치하는데 3개월이 소요되었다. 트러스 구조물의 연결 접합이 끝난 후, 벽체 기둥은 바다 면의 콘크리트 벽을 통하여 기둥 1열당 수평력 49ton으로 내측으로 당겨주어 지붕의 안정도를 높혀주었으며 이러한 시공 방법은 SDC(Stress-Displacement-Control)공법이라 불린다. 건물의 벽면은 불소수지 강판으로 2중으로 설치하고 그 내부는 석면으로 채워서 외기의 영향을 줄여 겨울철 내부 온도가 -3°C 정도를 유지하도록 하였으며 지붕에 반투명 F.R.P 패널을 4열 배치하여 건물 내부로 자연 채광이 가능하도록 하였

다. 모형수조 천정에는 공중통로(Cat walk)가 설치되어 있으며 이는 모형의 흐름 특성을 공중에서 파악하고 방조제 물막이 단계별로 변화하는 유속과 흐름방향을 부자(Float)를 이용하여 장기 노출로 촬영하기 위하여 설치된 것이다. 이와 같이 건립된 새만금 수리시험장 건물은 내부 면적 10,000평방m로서 세계적인 규모의 실내 시험장이며 공사비는 73억원이

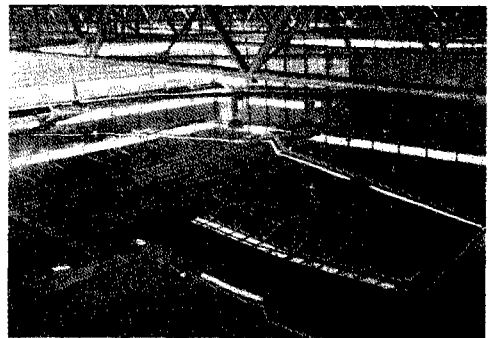


Photo. 1. Saemankeum hydraulic model hall

투자되었으며 Photo. 1은 설치된 모형 전경을 보여주고 있다.

### 3. 시험용수의 순환계통

시험을 위한 용수의 순환은 지하 저수조에서 펌프를 통하여 정수조로 양수된 후 압력관로를 통하여 시험수조에 공급된 후 배수되어 다시 지하 저수조로 유입된다. 지하 저수조의 저류 용량은 약 5,500톤으로서 겨울철 결빙 및 여름철 미생물 번식으로 인한 부패를 방지할 수 있기 때문에 한번 저류하면 계속적으로 사용할 수 있다. 양수장에는 6대의 양수기가 배치되었으며, 동시에 가동할 때 최대 양수량은 3.0m<sup>3</sup>/s이다. 정수조는 지하 저수조에서 양수된 시험수의 급류속을 완화하여 일정한 수두를 유지하여 모형에 공급하기 위한 것으로서 그 규모는 가로 30m, 세로 8, 높이 3m이며 양수된 물중 잉여 용수는 정수조 상부에 설치된 월류 Weir를 넘어서 지하 저수조로 배제된다. 월류 웨어는 1m의 간격으로 배치되어 있어 총 길이는 240m로 2.5m<sup>3</sup>/s의 시험용수를 사용할 경우 정수조의 수두 오차는 3cm이내의 범위로 유지될 수 있다. 시험용수는 정수조 바닥에 설치된 2개의 압력관로(직

경 700mm)를 통하여 모형 수조를 둘러싸고 있는 가로 1.6m, 높이 0.9m의 콘크리트 압력관로로 이어지며 여기서 조석발생 Weir내측의 모형으로 일정 유량이 공급된다. 모형에서 바다 쪽의 경계구역 각 위치별 조석의 시간적 변화는 8대의 조석 발생 Weir에 의하여 상하 10cm 범위(모형)까지 재현되며, 이들 Weir는 폭 15m, 높이 0.4m의 철판으로 되어있다. 여기서, 밀물은 일정유량의 시험수를 공급한 후 Weir를 울림으로서 경계구역의 조위를 상승하여 하구 쪽으로 물을 이동시키며, 썰물은 Weir를 낮추어 시험수 배재량을 공급량보다 많게 함으로서 재현한다. 이러한 Weir식 조석 발생 시스템은 새만금지구와 같이 방조제 외해측이 개방된 대형 방조제의 각 위치에서 상이하게 입출 하는 조석을 재현하는데 필수적이며 Fig. 2는 정수조 및 모형수조의 단면과 급배수 관로를 보여주고 있다. 또한 만경강과 동진강, 금강에서 다양하게 유입되는 홍수 유입량을 정확히 재현하기 위하여 하천류 공급 시설이 필요하다. 각기 다른 하천 유량조건에 대응하기 위하여 10, 20, 50, 100, 200liters/s의 다섯 종류를 설치하였으며 PC입력 데이터에 의하여 자동 조절된다.

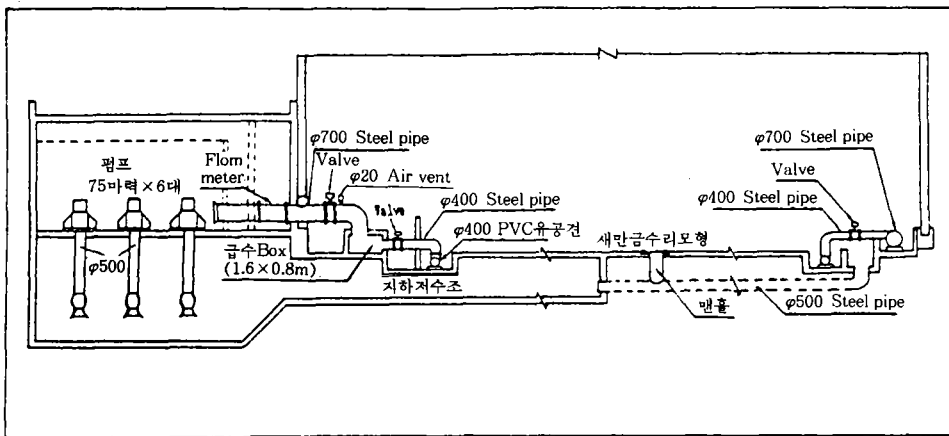


Fig. 2. Cross sectional view of model hall

#### 4. 모형의 설계와 제작

이와 같은 대형의 모형 시험 시설이 필요한 까닭은 새만금 방조제 공사가 세계적인 규모이기 때문이다. 즉, 새만금 간척 지구의 주요한 사업 내용은 변산 해안, 고군산 군도 및 금강 하구를 연결하는 연장 33km의 방조제를 건설하고, 총 간척 면적 40,100ha를 개발하여 28,300ha는 산업기지로, 11,800ha는 5천만톤의 수자원을 저장하는 담수호로 조성하는 것 등이다. 우리 나라에서 현재까지 수많은 방조제가 재래식 시공 방법에 의하여 건설되었으나, 새만금 방조제는 수심 20m 이상의 심해에서 축조되며, 대조차가 6.28m에 이르고 대조시 유출입 조석량도 18억 $m^3$ 로, 하상의 세립질 모래는 쉽게 세굴되기 때문에 세밀한 사전 검토가 필요하다. 방조제 물막이 공사는 조석, 파랑, 퇴적, 홍수량에 관한 모든 물리 환경 요소들이 상호 연관되기 때문에 특정한 설계 세목 또는 시공 순서의 변화에 따라서 영향 또는 피해를 받을 수 있다.

일반적으로 대형 수리 구조물의 설계는 공사 여건에 따라 수리 모형 시험과 수치 해석 기법 그리고 경험적 공식들이 선택적으로 활용된다. 이중, 수리모형 시험은 그 과정이 가시적이며, 공사구역의 복잡한 지형 영향에 따른 비선형적 흐름과 개방 구간의 급류속, 그리고 기초 지반의 세굴과 퇴적 과정을 직접 관측하기 때문에 결과의 파악이 용이하며, 모형의 설계와 검증 과정에서 적정 상사 법칙을 따른다면 신뢰성이 상당히 높다. 새만금 지구는 대상 해역이 광대하므로 수치 모형만의 적용도 검토되었으나 수치 모형은 복잡한 해저협곡 지형과 방조제 물막이 단계마다 변화하는 다양한 조류 이동을 세부적으로 재현하기 어려우며, 특히 끝 물막이 단계의 급격한 난류 형태의 수류를 정확히 파악하는 것이 곤란하다. 결론적으로 방조제 공사 단계별 밀물과

썰물의 변화 과정과 대처 방안을 모형에서 직접 보여줌으로서 사업의 신뢰성을 높이는 효과등을 고려하여, 수리모형 시험을 위주로 하고 수치해석 방법은 보조적인 기법으로 채택하였다.

새만금 지구는 공사 구역과 이에 따른 영향 구간이 광대하기 때문에 모형 적정 범위를 결정하는 것이 중요하며 이를 위하여 자체적으로 유한차분법에 의한 2차원 수치모형을 사용하였다. 본수리 시험과 같이 방조제 구역에 대한 전반적인 흐름 특성과 종합적이며 개괄적인 대안을 검토하도록 만든 모형을 전구역 모형(Overall model)이라 하는데 현재의 새만금 모형은 담수호의 유입 하천과 하구 및 외해쪽의 충분한 해역을 포함한다. 전구역 모형은 수심측량, 지형조사를 거쳐서 정확히 제작하여야 하고, 해안의 바닥 조도와 지구 자전 효과도 고려되어야 한다. 수리 모형의 정확도는 축척에 좌우되며 방조제 구역에 대한 대규모 모형에서는 축척의 왜곡(Distortion), 즉 수평과 수직 축척을 다르게 하는 일이 불가피하다. 통상 왜곡도가 10을 넘을 경우를 고왜곡이라하며 6~10인 경우 중왜곡, 6이하인 경우 약왜곡이라 부른다. 고왜곡은 조석의 주요 특성만을 재현할 수 있으며 중왜곡은 모형에 추가적인 조도재료를 배치하여야 하며 이는 흐름에 장애를 줄 수가 있다. 약왜곡은 인위적인 바닥 조도로 왜곡의 영향이 보정될 수 있으나 모형이 커지게 되므로 경제적인 면이 고려되어야 한다.

본 모형은 방조제 공사의 중요성에 비추어 왜곡비를 1 : 6.25로 정하였다. 조석 특성의 재현에 있어서 수직 축척(Nh)의 결정이 우선하며, 이로부터 속도축척(Nv)이 유도된다. 허용되는 왜곡도, 요구되는 시간 축척 그리고 시험의 경제성을 고려하여 수평 축척이 2차적으로 결정된다. 조석의 흐름은 자유 수면을 갖고, 중력에 지배되며 점성력은 부수적이어

서 모형은 Froude의 상사 이론을 따른다. 모형의 수직 축척은 시험중 흐름 형태가 표면장력의 영향을 받지 않고 바닥 마찰에 의하여 이그러지지 않도록 통상 1/100이하로 설정된다. 본 모형의 수직 축척과 수평축척은 각각  $N_h=80$ ,  $N_l=500$ 으로 정하였으며 이는 앞에서 언급된 약왜곡 모형의 한계 범위이다. 시간 축척은 1/56이며, 12시간 25분인 조석주기를 갖는 현장의 여건을 감안할 때, 모형에서는 13분의 아주 짧은 조석 주기로 나타나며 이는 조석 발생과 측정, 흐름 양상을 정확히 측정할 수 있는 범위에 포함된다.

이러한 모형 설계 결과에 의하여 '94년 5월부터 8월까지 전구역 모형이 제작되었다. 우선 모래를 50cm 두께로 깔은 다음에 사방 5m의 격자망을 구성하고 물다짐한 후 등고선에 따라 말뚝을 박은 다음 실로 수평 연결한 후 시멘트 모르타로 등고선 부분을 제작하고 등고선과 등고선 사이는 5cm두께의 시멘트 모르타로 표면을 마감하였다. 모형제작에 투입된 재료는 3,000입방미터의 세척 해사와 1대당 40kg인 레미탈 4,150포대가 사용되었다. 모형 축조후 바다모래의 염수 용탈에 따른 기계 부식을 우려하여 수질을 측정할 결과 염도는 300ppm이나 되고 탁도가 높아 시험 용수는 모두 수도물로 교체하였다.

## 5. 모형의 보정과 시험계측

본 방조제 모형은 수평보다 수직 축척이 6.25배나 큰 왜곡 모형이기 때문에 모형의 바닥은 실제 해안의 경사보다 급하다. 따라서, 일부 구간에서 모형의 유속은 현장보다 크게 증대될 수 있으며 이러한 문제는 모형 바닥의 조도 보정 장치(Roughness Element)등에 의하여 축척비에 따라 감소된 모형의 조도를 보완하여야 한다. 이를 위하여 모형의 표면을 대나무 비로 써레질하여 거칠게 하였으나 총

분치 못하므로 수심이 얇은 구간은 자갈을 펼쳐 놓았으며 방조제 외곽의 수심이 깊은 구간은 가로 10cm, 세로 20cm, 높이 5cm의 시멘트 벽돌 20,000개를 반으로 나누어 정육면체 형으로 가공한 후 약 30cm의 간격으로 깔아 놓았다. 조석 발생 장치 보정 및 계측 장비 배치후 '90년부터 새만금 현장 해역에서 조사된 조류속과 조위 측정 자료를 모형에 정확히 재현시키기 위한 검정 시험을 1994년 후반기에 수행하였다. 현장 자료의 정확성은 모형시험의 검정에서 가장 중요한 사항이기 때문에 수리 시험장은 매년 현장의 해상 자료를 자동 기록 장치가 내장된 조류속계와 조위계를 통하여 관측, 수집하고 있다. 검정 시험이 완료됨에 따라 '95년에는 방조제 체질 기본 계획안에 대한 수리시험을 수행하여 공사 단계별로 변화되는 조류속과 수위등을 시험 하였으며, 추후 물막이 방법에 대한 여러 가지 대안에 대하여도 지속적으로 시험할 예정이다. 방조제 물막이에 관한 시험은 공사 현장의 주요 지점에 대한 수리 특성을 모형을 통하여 예측하고 현장 기술자들과 협의하여 적절한 대안을 모색하는 방향으로 추진하고 있으며 이러한 시험은 방조제 끝 물막이 공사 기간까지 계속될 예정이다.

## 6. 새만금 사업과 관련된 수리시험

### 가. 방조제 물막이 시험

1994년에는 전구역 모형을 설치하고 조석발생장치의 성능 검정과 그때까지의 현장 관측을 통하여 수집된 현장 자료를 모형 시험 결과와 비교하는 검정시험을 수행하였다. 현장 자료는 관측장비가 제한되어 있고 대상 해역이 넓기 때문에 많은 장소에서 동시에 관측 수집하는 것은 불가능하다. 조석 자료의 경우, 이제까지 수년간 관측된 자료가 있고 각 지점에서 주요 조석 조화 상수의 진폭(Amplitude)

과 지각(Phase Lag)이 파악되어 있기 때문에 이론적 해석이 용이하나 조류속 관측자료는 관측된 날짜와 모형에서 검정되는 날짜가 다를 경우에는 관측 또는 해석에 의한 조위 데이터를 매개 변수로 하여 특정 일자의 조류속과 조류향으로 변환하여 사용하여야 한다. 이러한 자료 처리 방식을 후측(Hindcast)기법이라고 하며 Fig. 3은 현장에서의 조류속 자료와 조위 관측 자료가 모형에서 최종적으로 사용될 수 있는 시계열(Time Series)자료로 변환되는 과정을 보여주고 있으며 여기에 관련된 여러 종류의 전산 프로그램은 1994년 NEDECO용역단의 협조로 마련되었다. 이제까지 수행되었던 조석에 관한 수리 모형 시험에서는 4개의 주요 조석 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )만 고려되었으나 새만금 조석 모형 시험에서는 이를 10개분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $L_2$ ,  $P_1$ ,  $MS_4$ ,  $M_4$ )까지 확대하여 모형의 정밀도를 향상시켰다.

검정 시험 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 모형에서의 조류속, 조류향, 조위는 현장 자료에 근접하는 것으로 판명되었으나 내측 경계 조건에서는 약간의 오차가 발생하였으며 이를 바로 잡기 위하여 금강 하구둑 설치 이전 군산항 수로에서 관측된 조위 조건을 입력 자료로 하여 감조하천 구역에 수위와 유량을 조절할 수 있는 웨어 및 저수조의 규모와 바닥 표고를 계산하고 이를 모형에 추가 설치하였다. 또한 만경강 및 동진강과 연결되는 천해 지역과 군산항 수로에서의 조위가 실제와 차이가 있어 바다 수로의 깊이를 다시 정밀 조정하였으며 방조제 외측 심해 구역은 조도재료(Roughness Element)를 추가 배치하였다. 이제까지 기 수집된 현장 자료는 물론 1995년 7월 현장 관측결과도 입력하여 그 당시 현장에서 방조제 노선 진척도와 동일한 조건에서 검정한 결과 모형에서의 출력은 실제 해양에서의 관측 결과와 거의 부합되는 것으로 판명되었다. 이와 같이 정밀한 모형 검정 작업을 완료한 후 본시험을 수행하였으며 1995년중 시험된 방조제 물막이 안은 3개구간 체절 계획으로 그 구간은 4호 방조제 중앙(비용도-야미도), 2호방조제 측점 No. 25(가력도 북측영), 2호 방조제 No. 90(신신도 남측영)구간이었으며 최종 물막이시 각 구간의 상고공 표고는 각각 EL -5.5m, -6.0m, -8.0m로 설정하고 방조제 체절 순서는 일반체절, 준체절, 최종체절 1단계, 최종체절 2단계등 2단계등 4단계로 구분하였다.

측정은 개방구간의 조류속 및 내외 조위차를 알아 보는 것을 주 목적으로 하였으며 이를 위하여 Fig. 5와 같이 방조제 노선에 따라 3개, 내외측에 2개의 유향 유속계와 방조제 내외측에 수위계등 모두 13대의 유향유속계, 6대의 수위계가 사용되었다. 측정 자료는 현장 시간으로 매 5분(모형에서는 5.38초)마다 PC에 자동 입력 분석되도록 하였으며 이를

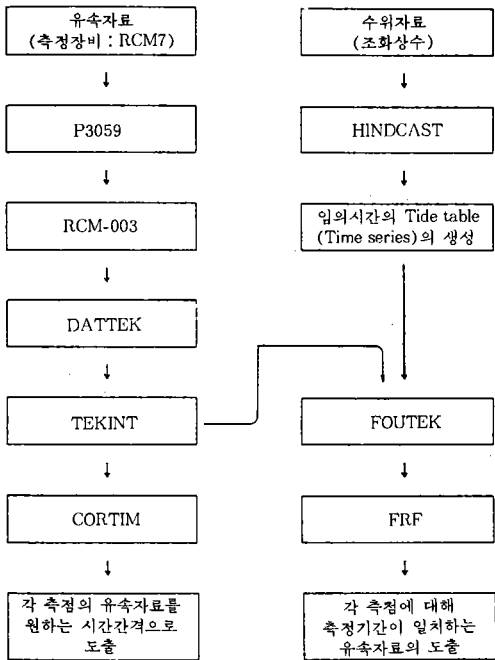


Fig. 3. Field data calibration procedure

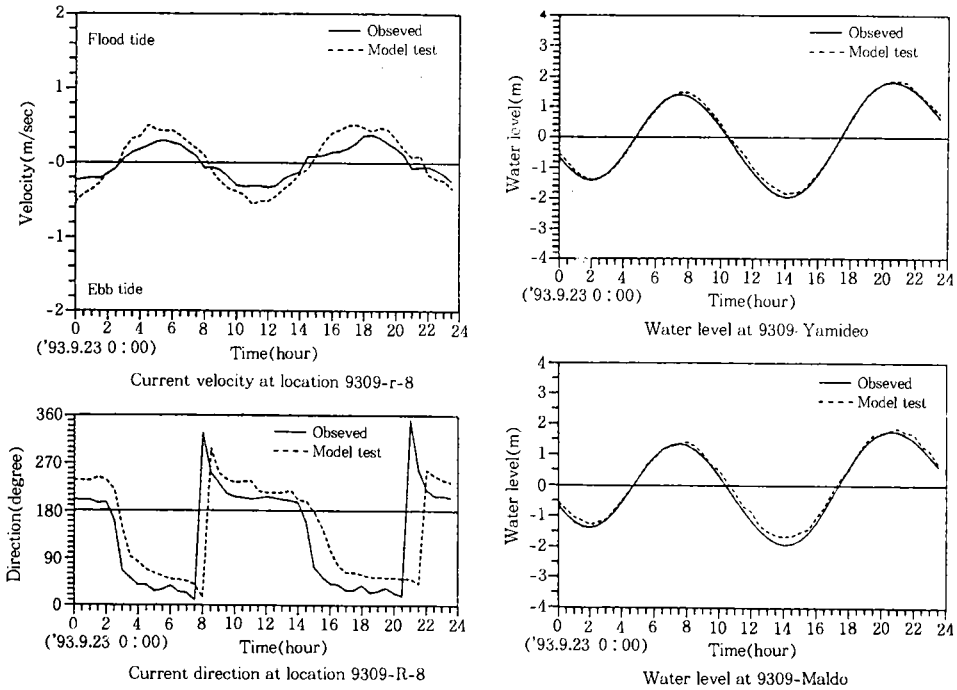


Fig. 4. Model calibration result(Current & Tide)

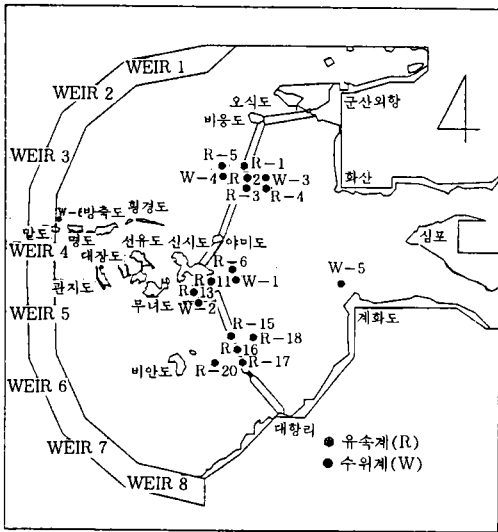


Fig. 5. Location of sensor in model

위하여 PC에 장착가능한 16채널짜리 입력 보 어드(DAS16-G1) 3장과 분석 S/W인 Labtech Notebook이 사용되었다. 따라서 PC에 동시 입력될 수 있는 계측기로부터의 입력 가능

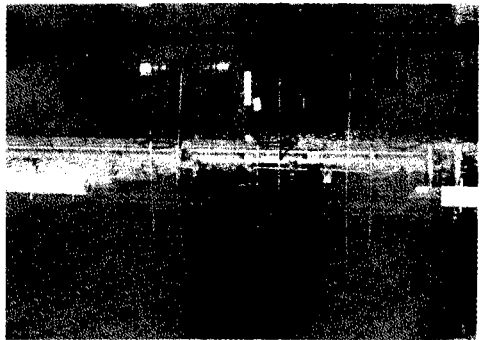


Photo. 2. Instruments display at closing gap

회로수는 최대 48채널이다. 새만금 해역은 범위가 50km에 이르기 때문에 각 지점에서의 조석 특성은 서로 상이하다. 이러한 현장 조건을 모형에서 그대로 재현하기 위하여 현장 관측 자료를 분석하여 10개 조석 분조에 대한 등조석도(Co-Tidal Chart)를 작성하고 이에 따라 외측 경계 조건인 8개의 웨어 설치 지점에서의 각 분조의 진폭 및 위상을 구하고 '94년 마련된 전산 프로그램을 통하여 최종 물막

이 예상 시기인 1998년 2월의 조위 곡선을 계산한 후 현재 적용되고 있는 대조차 5.936m, 평균조차 4.412m, 소조차 2.888m에 근접하는 각기 32시간 동안의 3개 구간을 시험 대상으로 설정하였다. 동일한 조건에서의 모형 조석을 2회 발생하여 모형에서의 오차가 있을 경우 사전에 발견되도록 하고 2개의 측정 자료를 평균하여 최종 관측치로 하였으며 이에 따라 각 구간별, 체절단계별, 창낙조별, 조위조건별로 조류속, 내외조위차, 통과 조석량등이 입체적으로 분석되고 도표로도 출력이 가능하게 되었다. 시험 결과 각 구간별로 각기 독특한 유속 양상을 나타내고 있음이 판명되었으며 개방 구간이 축소되는 과정에서 조류속의 변화 과정이 파악 가능하였다. 최대 조류속은 약 6.2m/s에 이르고 있는 것으로 나타났으며 4호 방조제 중앙의 체절 구간은 유속이 타 구간에 비하여 약한 편이나 2호 방조제의 2개 체절 구간에서의 유속은 강한 것으로 측정되었다. 끝 물막이 단계 단계에서 내외 조위차는 창조시 2.7m, 낙조시 3.2m로 낙조시의 조위차가 0.5m 크나 평균조, 소조의 경우에 창, 낙조시 조위차는 거의 비슷한 것으로 나타났으며 방조제 체절이 진행됨에 따라 방조제 내측의 조위는 대조 낙조시 공사 전에 비하여 약 0.9m 상승되는 것으로 관측되었다. Fig. 6은 준체절 완료후(가력도 북측 1,300m, 4호 방조제 중앙부 1,500m, 신시도 남쪽 1,300m 개방 상태일 때) 신시도 남쪽 물막이 구간에서 대조시 방조제 내외측의 수위 변화 및 수위차를 보여주고 있다. 개방 구간에서의 통과 유속과 수위 관측 자료에 의거하여 통과 조석량을 분석하여 본 결과 4호 방조제 구간과 2호 방조제 No. 90구간은 평균 조차의 조석 조건에서 일반체절, 준체절 완료후의 조석량은 거의 동일하고 최종 체절 2단계에서는 개방구간의 폭과 거리에 비례하여 조석량이 감소하나, 대조차의 조건에서는

각 체절 단계별로 조석량의 감소 현상이 충분히 구별되며 순간 최대 조석량은 일반체절시 50,00cms에서 최종체절 완료후 16,000cms까지 감소하였으며 2호 방조제 No. 25 구간에서는 소조, 평균조, 대조등 모든 조건에서 조석 이동량은 확실히 구분되는 지형적인 특성을 보이고 있었다. Fig. 7은 소조의 조위 조건에서 조량의 변화 과정을 측조 단계별로 보여주고 있으며 Fig 8은 측정된 유속의 Vector 그림이다. 1995년의 시험은 방조제 체절 기본 계획안에 대한 1차적인 시험으로 생각되며 앞으로 방조제 시공 단계를 좀더 세분화하고 물막이 구간의 상고공 표고의 변경에 따른 여러 가지 대안에 대하여 시험하여 그 결과에 대하여 상호 비교하면 방조제 시공 순서 및 공법에 대한 종합적인 비교 분석이 가능 할 것으

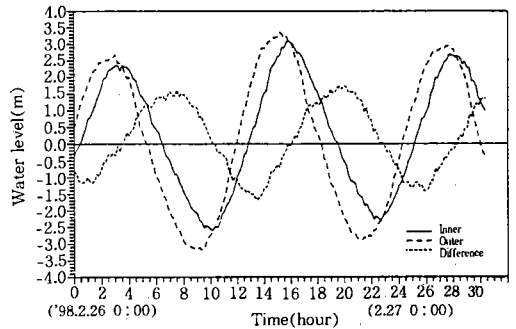


Fig. 6. Water level variation at sea-dike #2

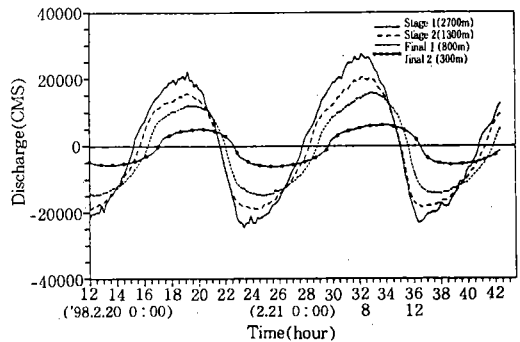


Fig. 7. Discharge variation at Karyuk gap (Neap tide)



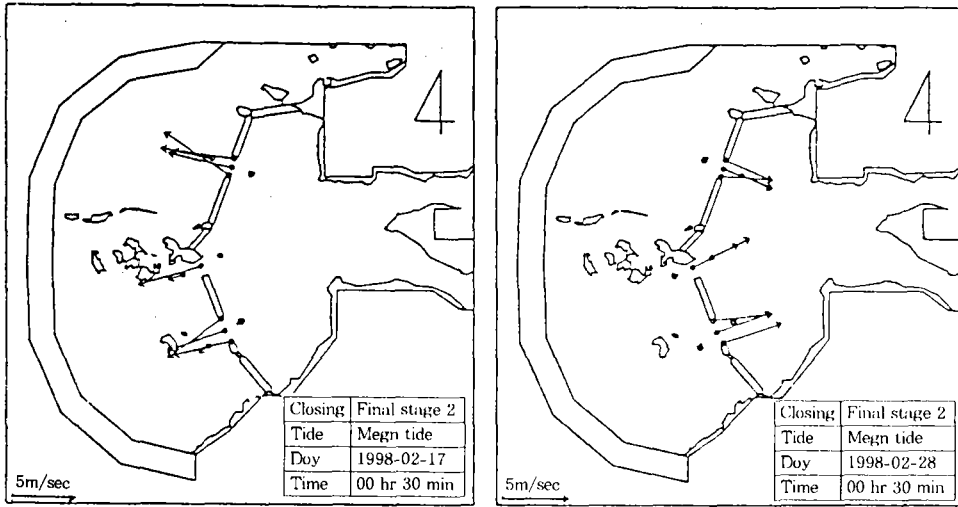


Fig. 8. Current vector diagram

로 기대된다.

나. 방파제 단면 파랑시험

과거 내해 혹은 만에 축조된 방조제는 조석의 차단을 주기능으로 하고 있는 반면에 외해에 설치하는 방조제는 파랑의 진입을 차단하는 방파제의 기능도 가지므로 방조제 외사면의 안정은 매우 중요하다. 파랑 진입시 불투수성에 가까운 방조제의 단면 안정은 투수성이 큰 방파제의 단면 안정과는 상당히 다름에도 방조제 사면에 포설하는 피복석의 중량은 이제까지 주로 Hudson공식에 의하여 결정되었다. 방파제 단면 안정을 위한 시험 및 연구는 어느 정도 진전이 되었으나 불투수성의 방조제에 대한 연구는 초기 단계이다. 방조제의 기능중 또다른 특징은 월파를 허용하지 않는다는 것이다. 이 때문에 방조제의 천단고를 결정하는 것이 매우 중요하며 이는 공사비와도 밀접한 관계가 있다. 비월파 형태의 방조제 단면을 결정하기 위하여 방조제의 제정고에 영향을 주는 파랑은 무엇을 선택하는 것이 중요한 것인지 살펴보아야 한다. 최대파에 의해 발생하는 월파랑은 일반적으로 설계 유의

파에 의해 발생하는 월파랑에 비해 크케는 수천 배나 된다. 과거의 Hudson공식을 사용하는 것은 현재의 해안 공학의 기술 수준과 비교하여 볼 때 바람직하지 못하므로 구조물의 공극, 투과성 및 구조물의 단면과 파랑의 파형 경사 및 쇄파 상사성 매개변수(surf similarity parameter)를 고려한 Van den Meer공식을 사용하는것이 권장된다. 도파고를 결정하기 위한 감소 계수들은 소단(berm), 천해해빈(shallow foreshore), 경사면에서의 조도 및 단봉(short-crested) 및 장봉(long-crested)의 경사 입사파를 포함한다. 도파는 쇄파 매개 변수(breaker parameter)와 감소인자(reduction factor)들로 표현될 수 있다. 감세법에 근거한 공식을 이용하여 4호 방조제 완성 단면 및 시공중의 일차 사석부에서의 피복석 및 피복 블럭의 안정 중량 및 도파고를 계산하여 본 결과 설계파의 주기보다 장주기의 파랑이 엄습할 경우 도파고가 상당히 커지기 때문에 현재 시공중인 제체 및 완공된 방조제의 안정에 상당한 피해가 우려되고 있다. 이와 같은 분석 결과는 반사파 흡수 조절 장치가 수리시험장 2차원 파랑단면 수로에 설치되

는 '96년 이후 시험을 통하여 세부적으로 규명될 수 있을 것이다.

1995년에는 새만금 수리시험장 여유 공간에 폭 5m의 시험 수로를 설치하고 방조제 사면 모형을 축조하여 모형 시험을 수행하였으며 실내에서 수행되어야 하는 파랑 시험의 조건을 충족하고 있다. 수로의 크기는 길이 33m, 폭 5.5m, 높이 1m로 여기에 피스톤식 조파기를 설치하였으며 사용된 조파 장치는 규칙파 및 불규칙파의 발생이 가능하고 조파판 길이는 5.5m, 최대 모형 파고는 30cm이며 파랑의 주기는 임의 조절이 가능하다.

본 방조제 단면 파랑 시험 모형은 축척 효과에 의한 영향을 최소화하기 위하여 1/50의 정상모형으로 제작하였다. 수로는 조파판에서 7m길이의 수평구간을 거친 후 1:100의 바닥 경사로 이루어지고 있으며 방조제의 모형은 수심 22cm로, 원형상에서 11m의 수심을 갖는 방조제의 단면을 표준으로 하였다. 방조제 단면 시험에 사용된 파랑 스펙트럼은 취송 거리가 유사한 Bretschneider-Mitsuyasu방식을 사용하였다. 그 방정식은  $S(f) = 0.257H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3f})^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3f})^{-4}]$ 으로 표시되며 Fig. 9은 동 스펙트럼의 주기별 특성도이다.

방조제 사면 기울기는 1:3, 1:4, 1:5, 1

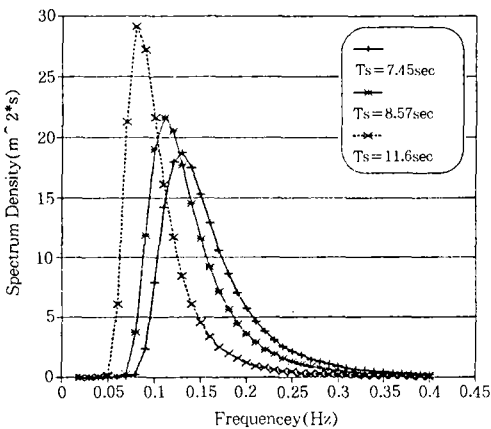


Fig. 9. Bretschneider-Mitsuyasu Spectrum

: 6등 4가지, 파고는 5.19m, 파의 주기는 7.45sec, 8.57sec, 11.6sec의 3가지, 정지수면은 EL +4.52m로 하고 피복사석 중량은 2.7ton, 5.0ton의 두 가지 경우를 조합하여 시험하였다. 시험 결과 사면 기울기 1:5에서 사석 중량 5.0ton은 안정하였으며 사면기울기 1:6에서는 사석중량 27ton, 5.0ton모두의 경우 안정된 것으로 나타났다. Van der Meer공식으로 계산한 값과 시험 결과는 상당히 일치하고 있기 때문에 앞으로는 파랑의 지속 시간을 고려한 시험에 집중하여야 할 것이며 사면에 포설된 2층의 피복 블록의 공극이 생각 외로 상당히 크기 때문에 모형에서 블럭의 상대적 크기는 상당히 작게 나타나고 있다. 이와 같은 사항은 모형방조제의 제작을 새롭게 수정하여야 할 것임을 암시하고 있다.

#### 다. 방조제 필터공 시험

방조제 필터공은 육상에 축조된 댐이나 제방의 필터공과 다른 특성을 가지고 있다. 방조제 필터공의 경우 외조위의 변화에 따라 공극내의 흐름의 방향이 바뀌며 낙조시 성토층 내 간극수의 유출이 발생하게 된다. 방조제 필터공 투수시험은 조위 변화에 따른 성토층 내 수리특성 규명을 위한 시도로서 현장관측 및 모형시험을 통하여 해사 성토층 내의 간극수두 변화를 파악하고 이들 자료를 이용하여 성토층에서 필터층으로 유출되는 간극수의 유출 속도를 추정하여 필터층 기능의 적정성 여부를 판단하는데 목적이 있다. 방조제 성토층 내 여러 지점에 간극 수위계를 설치하여 필터공 인접 지역에서 간극 수두 분포를 측정하였으며 이들 자료로부터 유선망을 유추한 후 유출 분포를 추정할 수 있다. 특정 현장에서의 관측 결과를 다른 조건하의 경우에 직접 적용할 수 없으므로 시험 결과의 범용적인 적용을 위하여 실내 모형 시험을 실시하게 된다. 실내 모형 시험에서는 현장 관측정이 설치된 단

면과 유사한 조건을 설정하여 시험을 실시하여 모형 시험 결과를 현장 관측 결과와 비교하여 그 결과를 검증한 후 다양한 경우를 모형 시험에서 재현할 수 있다.

모형 시험에서는 필터공의 제원, 성토 재료, 외조위 강하 속도등 여러 관련 인자들을 변화시키면서 각 경우에 대한 수리 특성의 비교 검토가 가능하다. 현재 대부분의 방조제에 서로 유사한 형태의 필터공 단면이 적용되고 있으나 수심이 같은 부분에서는 정밀 시공에 상당한 어려움을 겪고 있는 실정이다. 단순하면서도 방조제의 기능에 지장을 초래하지 않는 단면의 계획이 요구되며 방조제 필터공 시험을 통하여 이러한 방향으로 단면의 개선이 가능하게 된다.

#### 라. 현장조사

방조제 공사 진행에 따른 해양 인자 변환 과정 추적과 수리 모형 및 수치모형 검증에 필요한 자료 수집을 위하여 1989년부터 지속적으로 현장조사가 시행되어 오고 있다. 초기에는 휴대형 CM-1 유속계등의 사용으로 관측 시 많은 인력과 시간이 소요되고 약천후시 관측이 불가능하였으나 1992년부터 최신형 자기 기록식 현장 유향 유속계(RCM-7)와 조위계(WLR-7)가 도입되어 장기간 정밀 관측이 가능하게 되었다. 관측 간격도 종래에는 1시간마다 측정하였으나 자기 기록식 장비를 사용할 경우 임의의 시간 간격이 선택 가능하며 본 새만금 현장 조사에는 매 10분마다 관측하였다. 1995년에는 조위를 말도, 선유도, 격포항 3개 지점에서 단기 조석 조화 분해가 가능한 기간인 1개월 이상의 측정하였고 조류속은 방조제 최종 물막이 예정구간 3개소와 외해쪽 해양에서 7월과 10월 2회에 걸쳐 관측하였다. 조위 자료는 최소 자승법에 의한 조화 분해를 통하여 24개 분조의 조화 상수를 산출하였으며 분석 결과 대조차는 말도 5.49m, 격포 5.

56m, 선유도 5.61m로 동북방향으로 갈수록 커지고 있음을 나타내고 있다. 조류속 자료는 반일주, 1일주, 1/4일주조류 및 항류로 분해하여 흐름의 크기와 위상을 구하였으며 4호 방조제 중앙에서 관측유속은 7월에 창낙조시 최대 0.81m/s, 0.77m/s이었으나 10월에는 1.21m/s, 1.11m/s로 방조제 공정이 진행됨에 따른 변화가 나타나고 있음을 알 수 있었다. 2호 방조제 No. 90측점에서는 7월 관측결과 1.57m/s(창조), 1.33m/s(낙조)이었으며 2호 방조제 No. 25에서는 창낙조 최대 유속이 7월에 1.01m/s, 1.05m/s이었고 10월에는 1.16m/s, 1.62m/s로 나타났다. 이와 같은 현장 관측자료는 계속적으로 수집될 예정이며 그 결과는 모형 검증자료 및 추후장기적 유사 이동 분석등에 필요한 기본 자료도 사용될 예정이다.

#### 마. 기타 시험

방조제 축조 재료 안정성 시험이 물막이 공사 단계별 수위 및 유속변화에 관한 전구역 모형 시험 결과를 활용하여 별도의 세부 모형을 통하여 시험되었으며 주 목적은 제체 선단부에서 투하되는 사석재의 적정 크기를 설정하는 것이었다. 시험 결과, 석재 규격을 결정하는데는 수심의 영향이 크며, 끝물막이 단계에서 일시적인 석재 유실이 우려되므로 돌망태의 활용성과 바닥 보호공의 표고별 석재 안정성에 관한 계속적인 연구가 요망되었으며, 이에 관하여는 '96년도에 검토할 계획이다. 일반 물막이 최종 단계에서 개방 구간이 1,500m로 축소되면 최대 유속은 3.0~4.8m/s이며 이때 투하 사석의 소요직경은 0.35m정도이었고 준비 물막이 단계에서 3개소의 개방 구간 중, 4호 방조제의 바닥 높이를 0.5m 정도 높이면 조류속은 4.5~6.0m/s로 증가하며, 석재 소요 직경은 1.5m 정도가 필요하며 끝 물막이 공사 중 3개소의 개방 구간 폭이 각각 1,000m

정도로 축소될 경우 유속은 4.5~6.0m/s으로 유지되지만 간조시 일시적인 사석의 유실이 예상되었다. 추후 검토되어야 할 사항은 끝물막이 초기 단계에서 간조시 부분적인 돌망태의 사용 계획과 바닥 보호공의 표고 변화에 따른 석재 규격별 안정성 등이다.

파랑 관측과 설계 파랑에 관하여는 1992년 이후 방조제 공사 현장의 외곽 해안인 말도와 십이동파도등에서 관측된 자료와 파랑 변화 분석을 위하여 별도로 수리 시험 요원들에 의하여 개발된 2차원 전산 모형에 의하여 검토하였다.

새만금 배수 갑문에 대한 수리학적 응력 검토를 위하여 문비 진동 시험이 수행되었으며 본 시험은 문비 진동으로 인한 문비 및 배수 갑문의 안정성과 문비 진동의 영향을 줄일 수 있는 문비하부 형태 및 수문 조작 지침의 수립을 위하여 1993년부터 수행되어왔다. 1, 2차년도에는 수치모형을 통한 응력 해석을 하였으며 1995년도에는 축척 1:25의 실제 모형을 통한 응력 및 진동 측정과 문비 구조 개선안에 대한 시험이 이루어졌다. 주요 내용은 문비의 고유진동수 측정 및 전산 해석과 상하류 수위 차에 따른 개방고별 수직 및 수류 방향 진동 현상 측정, 문비 인양 속도에 따른 진동 현상 등이었으며 문비 하부 형태를 3가지로 변형하여 개선안을 시험하였다. 시험 결과 문비 기방고 0.5~1.5cm(원형에서 12.5cm~37.5cm)에서 최대 진동이 발생하며 이 범위에서 문비 조작시 주의가 요망되었으며 단판부의 진동 방지를 위해 와류의 영향이 미치는 부위까지 이중판으로 제작하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다. 또한 구조 해석 및 시험 결과 문비의 수평 진동을 가능한 한 구속시키는 것이 초기 진동 모드를 극복할 수 있는 가장 좋은 방법으로 판명되었으며 수류 방향 진동의 진폭은 수직 방향과 비교하여 작게 측정되었다. 향후에는 해측 문비에 대한

진동 영향 및 하부형태 적정성과 하부 고무 seal의 위치에 따른 진동등 세부적인 영향을 검토할 계획이다.

## 7. 기타 세부 수리 모형 시험 검토

방조제 끝물막이 공사 계획에 관하여는 좀더 세부적인 시험을 추가할 계획이다. 이는, 새만금 모형은 왜곡도가 6.25이고 바닥 조도를 보완하는 장치를 갖고 있으나 이의 정확성은 여전히 잘 검증된 2차원 수치모형과 같은 수준이기 때문이다. 또한 방조제의 끝물막이 단계에서 개방 구간을 통과하는 흐름 양상, 유량 계수, 바닥면 근처에서 Flow Force와 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 세굴 현상은 평균 유속보다는 방조제 침단부의 유속에 지배되므로 이러한 과제들은 세부 모형(Detail Model)에서 시험토록 계획되었다. 새만금 지구에서 세부 모형 시험은 방조제 물막이 단계별 유속의 변화, 와류의 발생과 이동, 파랑의 변형 그리고 하상의 세굴과 방지 대책 등을 대상으로 하며, 모형은 수평과 수직축척이 같은 정상 모형(undistorted model)으로 설정되어야 한다. 방조제 세부 모형의 축척은 모형의 흐름이 표면 장력과 바닥 마찰에 의하여 현장보다 왜곡되지 않도록 1:100이상으로 계획되며, 상하류 경계 조건은 전구역 모형의 시험 결과에 의하여 결정될 예정이다. 방조제 끝물막이에 관한 세부 모형 시험이 계획된 옥외 시험수조(40m×40m)는 당초의 시험 용수량이 1.0m<sup>3</sup>/s로서 방조제 체질 시험에 필요한 용수량에 미달하므로 이를 새만금 시험장에서 공급받도

록 별도의 배관망, 상하류 Weir식 조석 발생 장치 및 수조 면적을 60m×40m로 증대하는 공사를 1994년말 시행하였다. 본 사업에서, 세부 모형 시험은 방조제 끝물막이 시험뿐만 아니라, 배수갑문의 홍수 배제 능력, 어도(고깃길), 통선문 등의 부대 시설물을 비롯하여, 방조제 건설 후 해빈대의 변형과 고군산 열도에 계획되는 신항구 개발과 관련된 파랑 시험 등이 포함된다. 이중 배수갑문의 통수량과 어도 규모의 적정성 시험은 기존의 실내 시험 시설인 댐수로공 시험실을 이용하여 '91년부터 시행되었으며 가력도 배수갑문의 시험은 가로와 세로가 각각 60m×60m인 옥외 수리 시험 수조를 이용하여 '92년 시험하였다.

## 8. 맺음말

새만금 수리시험장의 공사가 착수된 이후 현재까지, 현지 주민과 관련 기관 요원을 비롯하여 국내외의 저명한 수리, 건축, 구조 분야의 기술자 등 3,000여명의 인원이 방문하였다. 그리고 새만금 시험장의 일부 여유 공간은 다대포항 방파제 규모에 관한 수리시험등에 활용된 바 있으며, 다른 사험 지구의 항만 개발과 발전 시설 등에 관한 수리 시험 요청이 꾸준히 증가하고 있기 때문에, 시험장의 활용성은 앞으로 더욱 증가될 것이다. 새만금 지구의 수리 시험은 전구역 모형과 세부 모형으로 구분하여 시행할 수 있도록 수조 규모를 설정

함으로서 시험 결과의 정확성이 기대된다.

또한 방조제 축조 과정에 관한 분석은 2차원 수치 해석 방법과 수리 모형 시험을 병행함으로서 방조제 축조 공정 계획, 해안 퇴적과 세굴 형태 예측 및 하상 세굴 보호등에 관한 신뢰성을 높일 수 있다. 세부 수리 모형 시험을 병행함으로서 구조물의 안전과 방조제 축조 재료의 최적 규모 결정에 대한 신뢰성이 제고되었다. 이에 부수적으로 심해 방조제 설계는 파랑과 해일의 피해를 고려하여야 하므로 본 수리 시험 사업에서 계획된 모형 수조는 파랑 내습에 따른 방조제 피복 재료의 규격 결정, 적절한 제방 규모에 관한 수리시험을 수행하는데 충분한 공간을 제공토록 계획되었으며 풍동 시험 수로에 최신 조파 흡수 조절 장치가 1996년 초 도입 설치됨으로서 완벽한 파랑 분석이 가능하게 되었다. 본 수리 모형 수조는 방조제 완공후 해안의 퇴적 변화 등의 해안 환경과 고군산 군도에 계획된 신항구의 수리 시험에도 계속 이용될 예정이다. 이와 같은 종합적인 수리 시험을 통하여 새만금 방조제 공사는 구조적으로 안정성과 경제성을 도모할 뿐만 아니라 담수호의 합리적인 수자원 활용과 수질 및 생태 보존에 관한 수리적인 특성 인자를 제공하고, 해안의 퇴적 형태 변화에 관한 환경 변화를 최소화하여 사업의 신뢰성을 높이는데 크게 기여할 것으로 전망된다.