

論 文

만내의 해수유동에 관한 실험적 연구

김 미 금* · 김 창 제**

An Experimental Study on the Sea Water Flow in Bay

Mi-Kum Kim · Chang-Je Kim

Abstract

Recently, the water pollution of coastal sea area including harbor, bay and inland sea has been very serious and it causes various environmental impacts.

In this study, water flow system of Danghang Bay, which has the narrow and long topographical characteristics with the narrow bay mouth and its flow is influenced principally by the tidal current, is investigated experimentally and numerically.

In order to understand the tidal system of Danghang Bay, harmonic analysis is performed based on measured tidal range and flow velocity. In addition, numerical model for tidal exchange is developed considering conditions of Danghang Bay. Calculated results show good agreement with measurements. Lastly, based on the proposed numerical model, exchange ratio of seawater volume in Danghang Bay is predicted.

제 1 장 서 론

항만, 내해 및 내만을 포함하는 연안해역은 최근 공업화, 해상도시 건설, 매립 및 폐기물 투기 등에 의해 환경오염이 가속화되고 있는 실정이다. 대부분의 만은 폐쇄성 연안해역의 형태로 대체로 입구가 좁고 내수역이 넓은 구조로 되어있어 외해와의 해수교환에 제한을 받으며, 따라서 파도나 해일 등으로부터의 영향도 적게 받으므로 태풍 등의 내습 시에 선박들의 피항처로 이용되기도 한다. 이러한 경우 입구의 폭은 좁을수록 유리하다. 그러나 수질은 일반적으로 물의 흐름에 의해 좌우되므로 오염물질

의 확산 면에서는 그 폭이 작아질수록 불리하다.

만내의 오염방지를 위해서는 만내의 부유물 및 침전물 등의 오염물질이 집중되는 것을 막아야 하며 이러한 오염물질을 만 밖으로 가능한 신속히 배출시켜야 한다.

만내의 유동은 조류에 의한 영향이 가장 지배적이라 할 수 있다. 따라서 해수유동이 존재하는 한, 부근 해역에서 배출되는 오·폐수는 만내로 유입될 수 있으며 따라서 만 일대에 상당한 오염 및 피해가 예상되므로 해수의 만내로의 유입과 순환 여부를 예측할 수 있는 정성적, 정량적 평가수법이 필요하다.

이 연구에서는 만의 일부만이 개방되어 있고 어

* 정회원, 한국해양대학교 승선생활관

** 정회원, 한국해양대학교 해사수송과학부

선이나 군함 등의 선박통항이 빈번한 당항만을 대상 해역으로 하여 폐쇄성 연안해역의 해수유동에 관해 고찰하고자 한다.

당항만은 입구가 좁고 내수역이 넓은 전형적인 폐쇄성 연안의 형태를 하고 있으며, 부근의 마산 등지는 그 동안 대단위 매립사업이나 항만개발이 활발히 진행되어 왔고 앞으로도 계속 진행될 계획이다. 당항만 부근을 매립하고 그 부근에 지방공단 또는 산업시설을 조성할 경우, 공단 또는 산업시설에서 유출되는 오·폐수가 당항만의 수질에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

당항만의 물의 흐름은 조석에 의한 흐름, 강물의 유입에 의한 흐름, 바람에 의한 흐름, 파랑에 의한 흐름 및 태풍 등에 의한 일시적인 흐름 등을 열거할 수 있다. 그러나 당항만은 사면이 산으로 둘러싸여 있으므로 태풍이 당항만 부근을 통과하지 않는 한 바람 및 파랑은 미약하며 부근 하천 등의 연계성을 살펴볼 때 인접하고 있는 대규모의 하천이 없으므로 부근 하천 등으로부터의 강물 유입량도 상당히 적을 것으로 판단된다. 그러므로 당항만 내의 흐름은 조류에 의한 흐름이 지배적이라 할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 현장 관측 결과를 고찰하고 조류모델링에 의한 해수유동과 관측한 결과를 비교·검토하여 만내의 해수유동을 파악하고자 하였다. 즉, 당항만 부근 해역의 자연환경과 현장실험 결과를 검토하고, 해수유동모델에 사용된 지배방정식과 경계조건에 대하여 설명하고 지배방정식을 조류모델링하는 과정 및 결과를 분석하였고, 해석해에 의해 만내의 해수유동을 추정하였다.

제2장 당항만의 환경

2.1 자연환경

당항만은 경상남도 고성군 회화면에 위치한 만으로 입구의 폭은 약 750m, 만의 직선 길이는 4,500m이다. 좁은 입구의 폭에 비해 만내측 정곡 부근에서는 폭이 약 1,600m에 이르는 곳이 있으며 면적은 약 16,500,000m² 이다. 그림 2-1에서 만 입

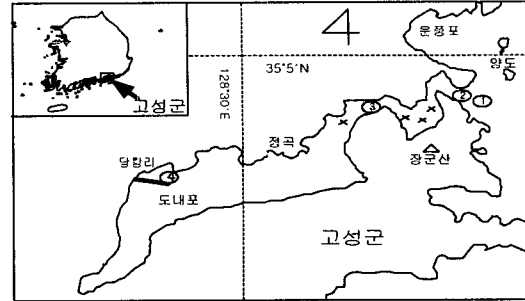


그림 2-1 연구 해역

구에서 약간 외해로 벗어난 지점인①, 만 입구인②와 폭이 가장 좁은③ 그리고 선착장에 인접한④는 파랑계 또는 유속계를 설치하여 실험을 실시한 지점이며 ×는 태풍 등의 내습 시에 소형 군함들의 피항처로 이용되는 부표이다. ①지점의 수심은 22m, ②지점의 수심은 23m, ③지점의 수심은 16m 이며 ④지점의 수심은 4m로, ②~③지점 구간이 ③~④지점 구간에 비해 수심의 변화가 크고, ③~④지점 구간인 정곡에서 도내포에 이르는 구간은 수심이 약 4m~5m로 변화가 거의 없이 일정하다. 그림 2-1에서 보는 바와 같이 만내의 폭은 넓으며, 면적에 비해 입구의 폭이 상당히 좁아 해수교환이 원활하지 않을 것으로 잠정된다.

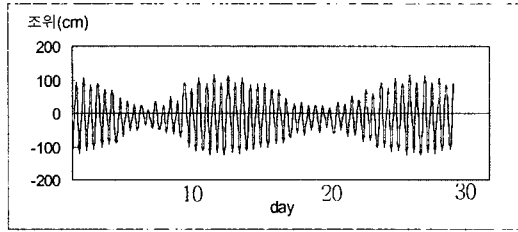
2.1.1 조석 및 조류

(1) 조석

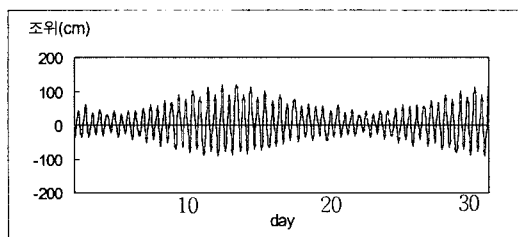
그림 2-2는 당항만에 인접한 진해의 현장관측기간이 포함되는 1999년 2월 및 6월의 조석이다(조석표, 1999). 조석은 일조부등을 나타내며 대조기의 조차는 약 260cm, 소조기의 조차는 약 120cm로 비교적 조차가 크지 않다.

(2) 조류

진해만 해역의 창조류는 가덕수도를 복서류 하여 진해만으로 압류되면서 진해만 내부에서 반시계 방향으로 환류하는 현상이 있으며 일부는 견내량 해협으로 유출되고 낙조류는 이와 반대로 흐른다. 창조(낙)조류는 진해항 저조 전 0.6~저조후 1.1(고조전 0.6~고조 후 0.5)시경에 전류하여 고조전 0.6~고조



(a) 1999년 2월



(b) 1999년 6월

그림 2-2 진해의 조석(1999년 2월 및 6월)

후 0.5(저조전 0.6~저조 후 1.1)시경까지 약 5.6~6.2(6.2~6.8)시간 지속되며 최강 창, 낙조류는 연간 평균 대조기에 15cm/s~50cm/s로써 저(고)조후 2.9~3.8(2.7~4.0)시경에 최강이 일어난다(국립해양조사원, 1982)

2.1.2 파랑

유의파고는 3.1~8.4cm, 유의파주기는 4~6s(국립해양조사원, 2001)로 차폐된 만이기 때문에 파고는 무시할 정도로 작다.

2.1.3 강수량

고성지방의 1999년 한해 강수량은 약 2,580mm, 2000년 한해의 강수량이 약 1400mm 정도이며 강수량이 계절에 따라 매우 불규칙하여 주로 7월, 8월 및 9월에 집중적으로 내리고 동절기에는 그 양이 아주 적다(기상 연보, 1999~2000). 특히 2월과 6월은 강수량이 무시할 수 있을 정도로 적다. 따라서 실험기간 중에 강수량에 대한 해수유동영향은 미미할 것으로 판단된다. 그러나 하계에는 강수량이 해수유동에 미치는 영향이 상당부분 존재하리라 예상

할 수 있으므로 이의 영향을 고려한 해수유동을 고찰하여야 할 것으로 본다.

2.1.4 바람

계절풍의 영향을 받아 겨울에는 북서계절풍이, 여름에는 남서계절풍이 탁월하다. 평균 풍속은 각각 2.41m/s, 2.51m/s로 약한 편이며 월별로 보면 1999년에는 7월의 풍속이 2.9m/s로 가장 크며 11월이 1.9m/s로 가장 작고 2000년에는 2월이 2.9m/s로 가장 크고 8월과 11월이 2.2m/s로 가장 작다. 그러나 월별로 현저한 차이는 나타나지 않는다.

풍향별 발생비율은 북풍의 발생비율이 가장 높으며 남서풍의 발생빈도가 가장 낮다(기상 연보, 1999~2000).

고성지역의 바람은 약한 편이며 특히, 당항만은 지형적으로 사면이 산으로 되어있어 바람이 더욱 약할 것이다.

2.2 인위적 환경

당항만 인근의 마산 및 창원 등지는 대규모의 공단이 자리잡고 있으며 이로 인한 오염물질이 배출될 가능성이 있다. 마산은 수출자유지역으로 신항만 건설 등의 필요성과 함께 만의 매립에 대한 필요성이 부각되고 있어 만의 형태변화에 따른 영향을 심도 있게 고려 할 필요가 있다. 즉, 당항만과 같은 폐쇄된 만 부근의 매립공사는 해수 유동을 변화시켜 주변환경에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

2.2.1 매립 진행 및 계획

당항만에 위치한 경남 고성군 마암면 보전리에서 동해면 내곡리 지역을 보전리에서 내곡리까지 8백 34m에 이르는 방조제를 축조해 면적 99만5천평(3백28만m, 유효저수량 7백21만m)의 담수호 조성하는 사업을 추진하고 있다. 95년 8월 농림부가 농촌용수개발 기본조사를 실시한 이래 96년 5월 기본계획이 나왔으며, 97년 세부설계를 거쳐 99년 7월 환경영향평가를 완료했다. 해양수산부에 의해 공유수면매립이 허가되면 2001년 후반에 실시될 전망이다(농림부, 1996).

2.2.2 부근의 항만 시설과 개발계획

마산항은 해안선의 길이 2,800m, 수역면적 1,400만m²(423만4천980여평)에 이르는 국제 무역항이다.

항만시설의 현황을 보면, 먼저 선박 접안시설인 부두는 일제 말기에 조성된 제1부두, 제2부두 및 중앙부두와 1970년 마산수출자유지역의 설치에 따라 건설된 제3부두, 1985년부터 시작된 마산시의 대단위 매립사업으로 새로이 건설된 서항부두가 있다. 그리고 창원기계공업기지 건설에 따른 지원시설로서 마산항 제4부두, 제5부두 및 한국중공업부두 등이 일반화물 부두로 이용되고 있다(마산시, 2001).

고성인근에는 사천의 첨단산업단지와 사천공항의 국제공항화, 마산 창포지방산업단지, 거제 장목 관광단지, 하동제철소, 통영 안정국가공단, 거가 대교 및 일본~한국(거제)간 해저터널 등의 대규모 사업이 진행중이거나 계획되어있다. 또한 고성은 U자형 국토개발축상에 있으며, 마산, 창원, 통영 및 진해 지역의 기존의 산업벨트와 인접해 있으며, 남해안산업벨트(김해-창원-마산-진주·사천-하동-광양)와 진주~사천~통영을 잇는 신 첨단산업 벨트의 중심에 위치하고 있어 더욱 개발이 가속화 될 것이다(고성군청, 2001).

2.2.3 선박통항

당항만은 어선을 비롯한 선박들이 빈번히 출입하는 곳이며 사면이 산으로 되어있고 입구가 좁아 외해로부터의 바람 및 파랑의 영향이 적어 소형 군함들의 피항처로 이용되고 있는 곳이다. 실험 기간 중 선박 통항을 관측한 결과 하루평균 약 30여척 이상의 선박들이 통항하고 있는 것으로 파악되었다.

2.3 현장실험

이 절에서는 당항만의 해수 유동현상을 파악하기 위하여 현장실험결과를 고찰하고자 한다.

2.3.1 실험개요

실험은 경남 고성군 회화면의 당항만에서 1999년 2월 19-20일 및 1999년 6월 15일-16일 두차례 실시하였다. 1차 및 2차 실험 모두 대조기에서 소조기

로 넘어가는 중간 시기이다. 앞에서 언급한 그림 2-1에서 ① 지점이 1차 실험시 유속과 파랑을 측정 한 지점으로 만 입구에서 외해로 다소 벗어나 있으며 ②지점은 2차 실험시 유속과 파랑을 측정 한 지점이며 ③지점 및 ④지점은 1차 및 2차 실험시 파랑을 측정 한 지점으로 관측위치 및 수심 등은 표 2-1과 같다.

실험에 사용된 유속계와 파랑계의 제원을 표 2-2에 나타낸다.

2.3.2 실험결과

(1) 조석

본 연구에서의 조석은 관측 값에서 파랑 등에 의한 영향을 제거한 값이다. 시간에 따른 조위의 변화를 정현곡선으로 가정하고 최소자승법에 의해 조화분해를 실시하여 각각의 분조에 대한 조화상수를 표 2-3에 나타낸다. 이 해역에서의 유속을 재현하기 위해 각 분조에 대한 진폭의 합계를 뒤에서 설명하는 조류모델링에 있어 개방경계의 강제 조위로 설정하였다.

그림 2-3은 ②번 지점에서의 4대분조를 나타낸다. 또한 그림 2-4에 관측조석과 각 분조의 합성 값을 나타낸다. 그림의 기준값(0cm)은 관측 값을 평균하여 취하였으며 실선은 관측조석이며 점선은 각 분조의 합성 값이다. 조차 약 10cm, 시간 약 30분의 차이는 조화분해 계산시 주요 4분조만을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다.

표 2-1 관측위치 및 수심

관측위치	사용 장비	관측기간	수심
① 35° 03' 83" N 128° 28' 60" E	유속계 파랑계	1차:1999년 2월 19-20일 2차:1999년 6월 15-16일	22m
② 35° 03' 85" N 128° 28' 58" E	유속계 파랑계	1차:1999년 2월 19-20일 2차:1999년 6월 15-16일	23m
③ 35° 03' 58" N 128° 26' 55" E	파랑계	1차:1999년 2월 19-20일 2차:1999년 6월 15-16일	16m
④ 35° 02' 65" N 128° 23' 35" E	파랑계	1차:1999년 2월 19-20일 2차:1999년 6월 15-16일	4m

표 2-2 실험장비의 제원

측기명	유속계(NORTEK)	파랑계(VALEPORT)
정도	방향 : $\pm 0.05\%$ 유속 : $\pm 0.01\%$	$\pm 0.01\%$
관측범위	유향: 360° 유속: $\pm 200\text{m/s}$	35dBar Abs
특징	수심 최고 150m까지, 최소 25cm 간격 측정가능. 3개의 beam이 각 셀의 ENU 또는 XYZ방향의 유속, 유향을 관측·기록	실시간 관측 및 기록. 압력센서를 통한 파랑 측정.
관측원리	30초간 매초 beam을 발사, 자료수집 후 평균.1분 간격으로 과정을 반복.	관측기록의 10분의 평균을 기록, 20분 주기로 파정을 반복.

표 2-3 주요 4분조의 진폭 및 위상각

tidal constituents	height (cm)	phase lag($^\circ$)
M ₂	92.65	252.5
S ₂	38.21	279.4
K ₁	16.05	169.8
O ₁	11.00	144.8

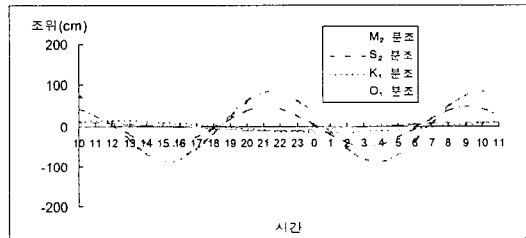


그림 2-3 각 분조(2지점)

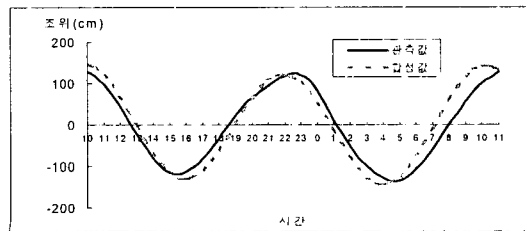


그림 2-4 관측 값과 각 분조의 합성 값 (2지점)

그림 2-5는 1999년 2월 19일 ~20일 실시했던 현장실험 결과이다. 각 고조, 저조 및 고조의 조위 및 시간 등을 표 2-4에 정리한다. 표에서 기호 ㉑, ㉒ 및 ㉓는 관측 시점으로서 ㉑는 첫번째 고조, ㉒는 저조 그리고 ㉓는 두 번째 고조를 나타낸다.

1차 실험결과 만 입구에서 만내로 진행할수록 조차는 대략 2cm 정도씩 작아진다. 이것은 조석이 만내로 진입하여 수로를 통과한 후 만의 폭이 넓어지면서 조석이 분산되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 또한 조시는 만내로 진행할수록 빨라지고 전 시점부터의 시간 즉, ㉑에서 ㉒ 및 ㉒에서 ㉓에 이르는 시간이 길어지는데 이것은 만내부로 진입할수록 수심 및 해상의 지형이 완만해져 만 입구보다 일찍 고조 또는 저조 가까이에 도달한 후 장시간 그 상태의 조위를 유지하면서 머물러 있기 때문으로 보인다.

㉑지점의 조차는 진해보다 약 30cm 더 크고 조시는 약 10~15분 늦다. 조차는 진해의 넓은 해역에서 좁은 방향으로 진행하면서 에너지가 집중되어

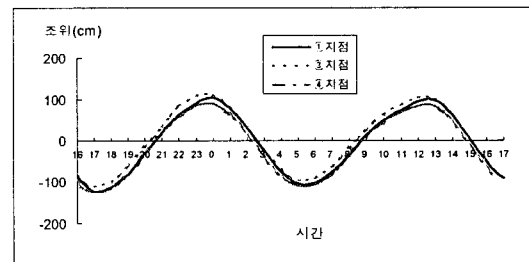


그림 2-5 조석 (990219)

표 2-4 각 시점의 조위 및 시간 (990219)

		㉑	㉒	㉓
조위(cm)	㉑	104	-123	99
	㉒	106	-119	101
	㉓	102	-121	97
시 간	㉑	24:00	05:45	12:15
	㉒	23:50	05:45	12:15
	㉓	23:40	05:45	12:10
전 시점부터 소요시간	㉑	06:00	05:45	06:30
	㉒	06:15	06:05	06:30
	㉓	06:15	06:05	06:25

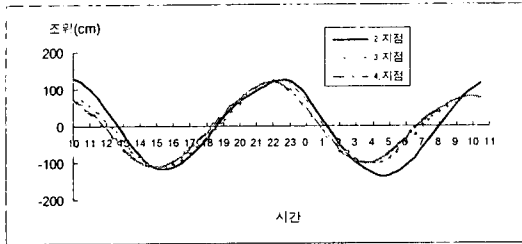


그림 2-6 조석 (990615)

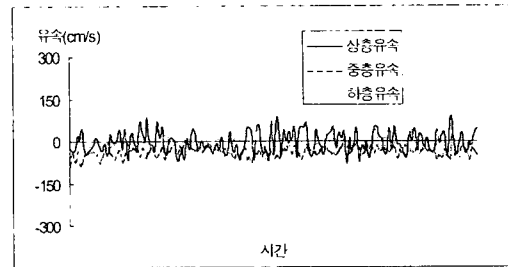


그림 2-7 상, 중, 하층 유속 (990219)

커진 현상으로 볼 수 있으며 조시의 차이는 조류가 진행을 거쳐 방향만까지 진행하는데 소요되는 시간의 차이 때문이다.

그림 2-6은 1999년 6월 15일 ~16일 실시했던 현장실험의 결과이다. 각 저조, 고조 및 저조의 조위와 시간을 표 2-5에 정리한다. 표 2-5에서 기호 ㉑, ㉒ 및 ㉓는 관측 시점으로서 ㉑는 첫 번째 저조, ㉒는 고조 그리고 ㉓는 두 번째 저조를 나타낸다.

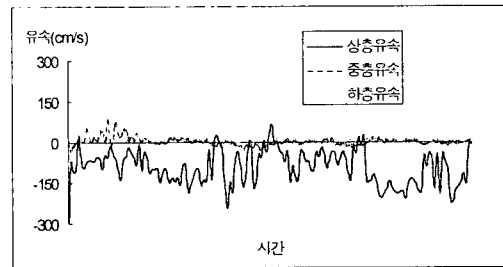


그림 2-8 상, 중, 하층 유속 (990615)

2차 실험결과 1차 실험보다 ㉑지점에서의 조차는 약 10cm, ㉒지점에서의 조차는 약 6cm 크다. 이것은 2차 실험 시기가 대조기에 더 접근하였기 때문이며 또한 대체로 고조간 및 저조간의 시간 간격이 커졌다. 1차 실험결과와 마찬가지로 만내부로 진행할수록 조차가 작아지고 고조 또는 저조에 이르는 시간이 빠르다.

(3) 조류

그림 2-7 및 그림 2-8은 만입구 부근에서의 시간별 유속을 상, 중, 하층으로 나누어 나타낸 것이다. 그림에서 (+)는 유입되는 방향이며 (-)는 유출

되는 방향을 나타낸다. ㉑지점에서 상층은 유입과 유출을 반복하며 중층은 유출하는 흐름이 탁월하고 하층은 유입과 유출을 반복하나 유입하는 흐름이 더 많이 나타난다. ㉒지점에서 상층은 유출하는 흐름이 대부분이고 중층은 유입과 유출을 반복하며 하층은 유입하는 흐름이 탁월하다.

즉 하층으로 유입하고 상층으로 유출하는 형태로서 좀 더 정확한 고찰을 위해서는 만내에서의 유속의 연직분포도 함께 검토할 필요가 있다.

표 2-5 각 시점의 조위 및 시간 (990615)

		㉑	㉒	㉓
조위(cm)	㉑	-117	124	-136
	㉒	-115	120	-106
	㉓	-113	116	-107
시 간	㉑	15:40	22:15	05:00
	㉒	15:20	22:05	04:40
	㉓	15:20	22:00	04:15
전 시점부터 소요시간	㉑	.	06:35	06:50
	㉒	.	06:45	06:35
	㉓	.	06:40	06:15

그림 2-9는 그림 2-8의 결과 중에서 2차 실험 즉, 1999년 6월 15일~16일 ㉑지점에서 고조에서 저조를 거쳐 다시 고조에 이르는 한 주기 동안에 만입구에서 관측한 유속을 너비방향 및 진입방향으로 분리해 각 수심별로 나타낸 것이다.

그림 2-9(a)는 저조 직전 10분간의 유속을 평균하여 층별 유속분포로 나타낸 그림이다. 너비방향의 흐름은 상층에서는 대체로 좌측으로의 흐름이, 중층과 하층에서는 우측으로의 흐름이 나타나며 진입방향의 흐름은 상층은 유출하는 흐름이, 중층과 하층은 유입하는 흐름이 다소 존재하지만 대체로 유출하는 흐름이 지배적이라 볼 수 있다.

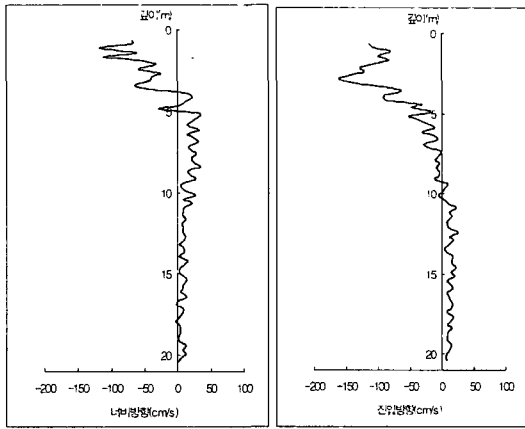


그림 2-9(a) 유속의 연직분포(저조, 990615)

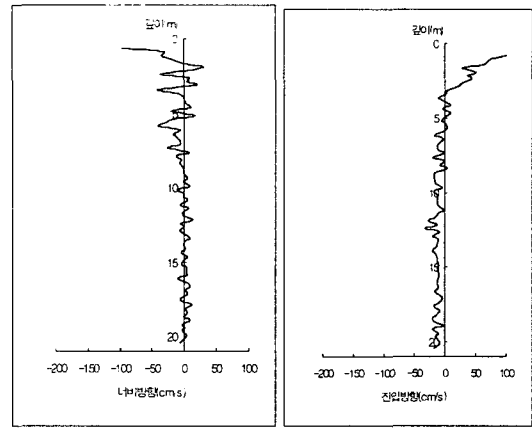


그림 2-9(c) 유속의 연직분포(고조, 990615)

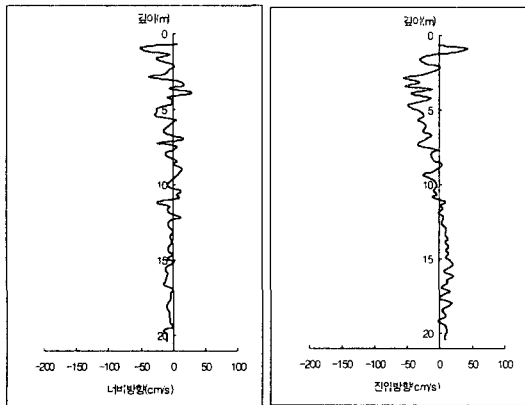


그림 2-9(b) 유속의 연직분포(저조 후 3시간, 990615)

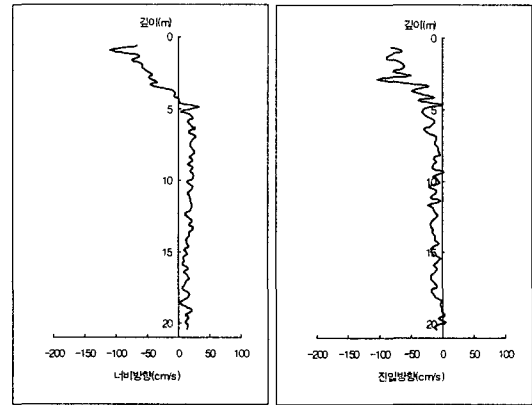


그림 2-9(d) 유속의 연직분포
(고조 후 3시간, 990615)

그림 2-9(b)는 저조 3시간 후인 조위의 기준값 통과시점의 유속 분포로서 진입방향의 유속을 보면 상층에서는 유출하는 흐름이, 중층과 하층에서는 유입되는 방향의 흐름이 나타난다.

그림 2-9(c)는 고조 직전 10분간의 평균치로서 상층에서는 유입되는 흐름이, 중층과 하층에서는 유출되는 흐름이 나타난다.

그림 2-9(d)는 고조 3시간 후인 조위의 기준값 통과시점의 유속으로 상층, 중층 및 하층 모두 유출하는 방향의 흐름이 탁월하다.

제3장 모델링

3.1 지배방정식

3.1.1 좌표계

좌표계로서 직교좌표계(x, y, z)를 사용한다. x 와 y 는 수평축, z 는 평균해면을 원점으로 하고 위 방향이 양(+)인 연직축이고, u, v 및 w 는 각각 x, y 및 z 축 방향의 유속, η 는 수위변동이며 h 는 평균수심이다. 이 연구에서 x 축은 만의 폭방향으로 격

자의 시작점을 원점으로 하고 우측을 양(+)으로 하며 y축은 만의 길이방향으로 격자의 시작점을 원점으로 하고 만내 진행방향을 양(+)으로 한다.

3.1.2 연속방정식과 운동방정식

주기가 긴 장파로 알려진 조류에 의한 연안해역에서의 해수흐름은, 연안해역의 수평 scale이 연직 scale에 비해 상당히 크기 때문에 연직방향으로 중심 평균한 2차원 흐름으로 취급 할 수 있다.

유체는 점성, 비압축성, 압력은 정수압분포라고 하고 연속방정식과 운동방정식을 해면과 해저면에서의 경계조건을 이용하여 $z = -h$ 에서 η 까지 적분하면 다음 식이 된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} = & f q_y - g(\eta+h) \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 q_x - \tau_{bx} \\ & - (\eta+h) \left\{ \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} = & -f q_x - g(\eta+h) \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 q_y - \tau_{by} \\ & - (\eta+h) \left\{ \frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial y} \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.2b)$$

여기에서

t 는 시간(s),

$$q_x = \int_{-h}^{\eta} u \, dz, \quad q_y = \int_{-h}^{\eta} v \, dz,$$

f 는 코리올리 계수 ($= 2\Omega \sin \phi$, Ω 는 지구자전각속도, ϕ 는 위도)

g 는 중력가속도,

A_h 는 수평와동점성계수 ($10^2 m^2/s$),

$$\nabla_h^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

$$\overline{u} = \frac{1}{h+\eta} \int_{-h}^{\eta} u \, dz, \quad \overline{v} = \frac{1}{h+\eta} \int_{-h}^{\eta} v \, dz,$$

$$\overline{\tau_b} = \frac{\rho f}{8} \overline{|\vec{V}| |\vec{V}|}; \text{ 해지면 전단응력} (\rho \text{는 해}$$

수의 밀도, f 는 마찰계수(0.004)) (Dean and Dalrymple, 1984) 이다.

3.2 수치해석

이 연구에서는 양해법인 FTCS(Forward Time difference, Centered Space)법을 수치해석기법으로 적용하였다. 수치계산에 있어서 1차미분항(시간적)에 대하여 전진차분(forward difference)을 적용하였고 2차미분항(공간적)에 대하여 중심차분(central difference)을 적용하였다.

3.2.1 안정조건

계산시간 간격과 공간간격은 계산의 안정성과 해의 수렴성을 결정하는 중요한 요소인데 다음과 같은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)의 안정조건을 고려하여 결정하였다(Rahman, 1988).

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} \geq \sqrt{2gh_{\max}}$$

여기에서, Δs ($= \Delta x = \Delta y$)는 공간간격이며, Δx 와 Δy 는 각각 x 와 y 방향의 공간간격, Δt 는 시간간격, h_{\max} 는 대상해역의 최대수심이다.

이 연구에서는 $\Delta s=75m$, $h_{\max}=24m$ 로 하고 위의 조건을 만족하도록 $\Delta t=3$ 초로 하여 안정 될 때까지 계산을 반복 수행하였다.

3.2.2 유한차분법

(1) 수위변동의 차분화

수위변동 η 의 경우, 연속방정식을 다음과 같이 차분화 한다.

$$\begin{aligned} \eta^{t+1(i,j)} = & \eta^{(i,j)} - FX^{(i+1,j)} + FX^{(i,j)} \\ & - FY^{(i,j+1)} + FY^{(i,j)} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.3)$$

여기에서

$FX (= (\eta+h) u \frac{\Delta s}{\Delta t})$ 는 x 방향 운동방정식의 차분화 변수,

$FY (= (\eta+h) v \frac{\Delta s}{\Delta t})$ 는 y 방향 운동방정식의 차분화 변수이다.

(2) 수심평균유속

수심평균유속은 아래와 같은 방법으로 계산한다.

$$u(i, j) = 2 \frac{\Delta s}{\Delta t} \frac{FX(i, j)}{\eta(i, j) + \eta(i-1, j) + 2dx(i, j)} \dots\dots\dots (3.4a)$$

$$v(i, j) = 2 \frac{\Delta s}{\Delta t} \frac{FY(i, j)}{\eta(i, j) + \eta(i, j-1) + 2dy(i, j)} \dots\dots\dots (3.4b)$$

여기에서

$$dx(i, j) = \frac{1}{2} [d(i, j) + d(i-1, j)]$$

$$dy(i, j) = \frac{1}{2} [d(i, j) + d(i, j-1)] \text{ 이며}$$

dx 및 dy 는 이웃한 두 격자 사이 수심이다.

그림 3-1은 대상해역의 초기 입력수심을 나타낸 그림이다.

3.2.3 경계조건

(1) 해면 및 해저면 경계

해면 및 해저면 경계는 다음 식(3.5a) 및 식(3.5b)을 적용한다.

$$- \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w = 0 \text{ at } z = \eta \dots\dots\dots (3.5a)$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0 \text{ at } z = -h \dots\dots (3.5b)$$

(2) 구조물경계 또는 해안경계

구조물과 바다 또는 육지와 바다를 각각 '0'과 '1'로 표시하고 '0'이 인식된 구조물 또는 육지는 계산에서 제외시킨다(마현호, 1998).

(3) 폐쇄 경계조건

해안선에서는 불 투과성의 경계조건이 성립하지만 평활 과정과 비선형항의 계산에서 불 투과 조건을 만족시키기 위해 다음과 같은 방법을 사용한다.

$$v(i-1, j) = -v(i, j),$$

$$FY(i-1, j) = -FY(i, j)$$

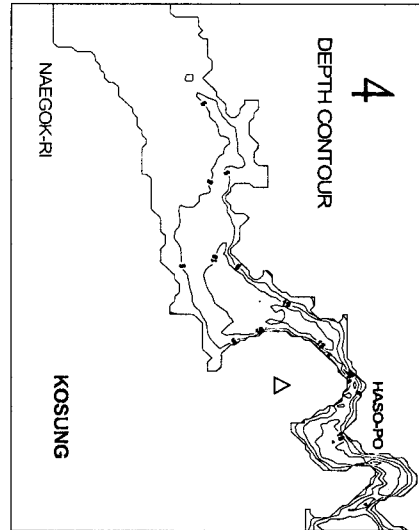


그림 3-1 수심도

(4) 개방 경계조건

관측자료의 조화분석 실행으로 구한 진폭 값 158cm를 강제조위로 입력하여 계산을 수행하였다.

3.3 모델의 흐름

지금까지 설명한 수치해석기법의 수치계산과정을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 계산조건과 환경조건을 설정한다. 즉, 계산조건에는 x, y 방향의 격자수, 계산시간간격, 격자간격, 최종계산시간, 출력시간간격 등이며, 환경조건에는 격자의 수심(약최저저조면 기준), 관측자료에 의한 평균해수면과 약최저저조면의 수위차, 주요 4분조의 특성 등이 있다.
- (2) 초기화과정을 통해 수위변동 η 및 유속 u, v 를 초기화한다.
- (3) 격자의 평균수심과 수위변동을 계산하고, 그 결과로 이류 항을 계산한다. 여기에 해저면 마찰응력에 대한 계산결과를 포함하여 x, y 방향의 FX, FY 를 계산한다.
- (4) 수평혼합항의 계산을 위해 FX, FY 를 평

활화한다.

(5) 각 격자의 η , u , v 를 계산한다.

3.4 모델링 결과

그림 3-2에 ②지점에서의 관측조석과 모델링 결과를 나타낸다. 모델링 결과와 관측조석은 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 3-3은 ②지점에서의 관측유속과 모델링 결과를 비교한 결과이다. 모델링의 경우 최강유속과 방향은 실험결과와 거의 일치하며 최강 창조유속은 저조 후 약 3시간~3시간 30분 경과 후에 나타나고 최강 낙조유속은 고조 후 약 3시간 30분~4시간 경과 후에 나타난다. 그리고 만내에서의 조석과는 중복파의 특징을 보인다.

그림 3-4~그림 3-5는 각각 고조 및 저조의 모델링 결과이다. 만입구에서는 해수유동이 활발히 이루어지고 있으나 만내측 특히, 당항리 부근에는 지

형에 따라 해수유동이 거의 없음을 알 수 있다.

제4장 해수유동추정

4.1 만내 조석 및 수로유속

만 입구의 수로 길이 l , 수로 폭 B 및 수로수심 h 인 일정단면(1차원) 수로에서 만과 바다가 접하고 있는 경우를 고려한다. x 는 앞에서와 마찬가지로 바다 쪽의 끝을 원점으로 하고 만내수역방향을 양(+)으로 하는 좌표이다. S 는 만의 표면적, η_s 는 외해의 수위, η_b 는 만내의 수위, f_c 는 유출입손실계수, v 는 x 방향의 수심평균유속 및 g 는 중력가속도이다.

일차원 수로의 해석해를 구하는 과정을 다음에 약술한다(樋川明生, 1961).

일반적으로 협수로의 길이 l 은 조석파의 파장에 비해 극단적으로 짧으며 수로내의 수면구배는 일정하다는 가정을 하면 유속 v 는 시간 t 만의 함수가 되고 연속식과 유출입 손실을 고려한 운동방정식은 식(4.1)과 같이 된다.

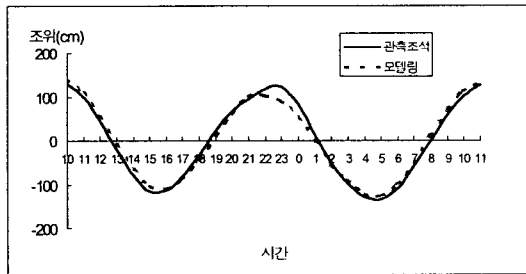


그림 3-2 관측조석과 모델링 결과

구분	① (관측유속)	② (모델링)
유속	<p>310° 47cm/s</p> <p>160° 36cm/s</p>	<p>345° 53cm/s</p> <p>168° 37cm/s</p>

그림 3-3 관측유속과 모델링결과

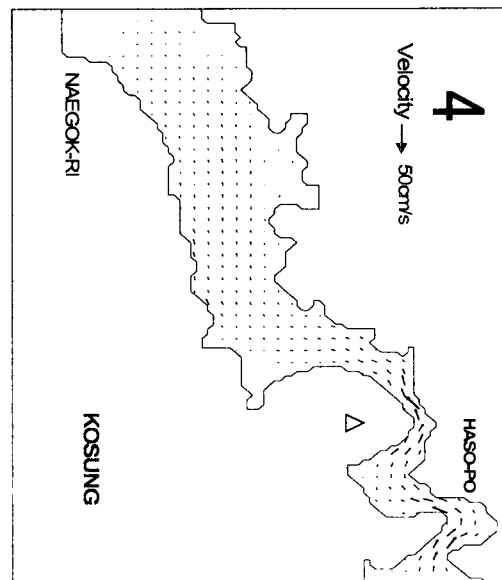


그림 3-4 고조시의 조류

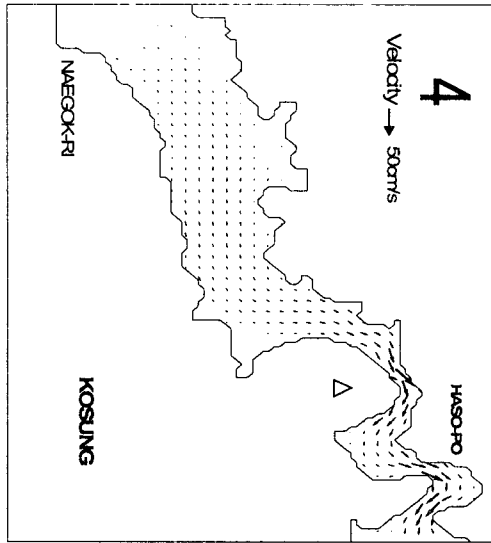


그림 3-5 저조시의 조류

$$Av = S \frac{d\eta_b}{dt} \dots\dots\dots (4.1a)$$

$$\frac{dv}{dt} + g \frac{\eta_b - \eta_s}{l} + kv = 0 \dots\dots\dots (4.1b)$$

여기에서

$$k = 4V(2g n_r^2 - f_c R^{4/3}) / 3\pi R^{4/3}$$

(V는 유속 진폭, R은 경심이며
 n_r 은 등가조도(= $n \left(1 + \frac{f_c R^{4/3}}{2gl n^2}\right)^{1/2}$,
 n 은 manning의 조도계수)이다.

식(4.1)에서 v 와 η_b 를 분리하고 η_s 에 $\eta_{x=0} = a_s \cos \sigma t$ (a_s 는 외해조석의 진폭, $\sigma = 2\pi/T$)를 대입한 후 v 값을 구하면 식(4.2)가 된다.

$$v = - \frac{\beta}{\sqrt{(\alpha - \sigma^2)^2 + k\sigma^2}} \sin(\sigma t - r) \dots\dots\dots (4.2)$$

$$= - V \sin(\sigma t - r)$$

여기에서 $\alpha = Ag/lS$, $\beta = a_s g \sigma / l$,
 $V = \beta / \{ \sqrt{(\alpha - \sigma^2)^2 + (k\sigma)^2} \}$ 및
 $r = \tan^{-1} \{ k\sigma / (\alpha - \sigma^2) \}$ 이다.

식(4.2)를 $k = 4V(2g n_r^2 - f_c R^{4/3}) / 3\pi R^{4/3}$ 을 이용하여 V에 관하여 정리하면 유속의 진폭 V는 다음과 같이 된다.

$$V = \frac{\sqrt{-\left(\frac{AgT^2}{4\pi^2Sl} - 1\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{AgT^2}{4\pi^2Sl} - 1\right)^4 + 4\left(\frac{2g^2 n_r^2 a_s}{3\pi^3 l R^{1/3}}\right)^2}}{2\left(\frac{4T n_r^2 g}{3\pi^2 R^{1/3}}\right)} \dots\dots\dots (4.3)$$

식(4.3)에서 V는 A, h, R, l, n_r 및 S라는 수로의 내수역의 특성과 T 및 a_s 라는 외해조석의 제원 에서 직접 계산된다. 또한 r 는 다음과 같다.

$$r = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^4 + 4\left(\frac{\beta p}{\sigma^2}\right)^2 \right\}}}{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)} \right] \dots\dots\dots (4.4)$$

동일한 방법으로 식(4.1)에서 v 와 η_b 를 분리하고 η_s 에 $\eta_{x=0} = a_s \cos \sigma t$ 를 대입한 후 η_b 를 구하면 다음과 같은 해가 얻어진다.

$$\eta_b = \frac{a_s a \cos(\sigma t - r)}{\sqrt{(\alpha - \sigma^2)^2 + (k\sigma)^2}} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$= a_b \cos(\sigma t - r)$$

여기에서 a_b 는 내수역의 조위진폭이다. a_b 의 a_s 에 대한 비는 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{a_b}{a_s} = \frac{(\alpha / \sigma^2)}{\sqrt{\left\{ \left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^4 + \left(\frac{\beta p}{\sigma^2}\right)^2} \right\}}} \dots\dots\dots (4.6)$$

당항만 입구를 일정단면수로 가정할 때 해수유동 산정에 필요한 요소는 표 4-1과 같다.

표 4-1 계산 요소

요소	l(m)	B(m)	h(m)	S(m ²)	A(m ²) (B × h)
값	3,177	750	11	16,538,237	8,250

외해조석은 1999년 6월 15일 ②지점에서 관측한 값을 준용한다. 해당기간의 외해조석은 그림 2-3 및 그림 2-4에서 보는 바와 같이 반일주조가 지배적이며 일조부등이 심하다. 조화분해 결과는 다음과 같다(표 2-6 참조).

$$\begin{aligned} \eta_s = & 0.07 + 0.9265 \cos\left(\frac{2\pi}{12.461} t - 4.407\right) \\ & + 0.3821 \cos\left(\frac{2\pi}{12} t - 4.876\right) \dots (4.7) \\ & + 0.1605 \cos\left(\frac{2\pi}{23.933} t - 2.964\right) \\ & + 0.11 \cos\left(\frac{2\pi}{25.816} t - 2.527\right) \end{aligned}$$

η_b 는 위 식의 각 분조에 관해서 식(4.4)와 (4.6)에서 a_b, γ 를 계산하고, 이들 내수역 분조의 합으로서 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} \eta_a = & 0.07 + 0.93 \cos\left(\frac{2\pi}{12.461} t - 4.42\right) \\ & + 0.383 \cos\left(\frac{2\pi}{12} t - 4.89\right) \\ & + 0.161 \cos\left(\frac{2\pi}{23.933} t - 2.96\right) \\ & + 0.11 \cos\left(\frac{2\pi}{25.816} t - 2.53\right) \end{aligned}$$

그림 4-1은 1999년 6월 15일~16일에 관측조석(③, ④지점 평균 값), 모델링 및 해석해를 비교하여 나타낸 것이다. 관측조석, 모델링 및 해석해가 거의 일치한다. 또한 만의 수로유속을 식(4.9)에 의해 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V = & 0.21 \cos\left(\frac{2\pi}{12.461} t - 4.42\right) \\ & + 0.11 \cos\left(\frac{2\pi}{12} t - 4.89\right) \\ & + 0.04 \cos\left(\frac{2\pi}{23.933} t - 2.96\right) \\ & + 0.02 \cos\left(\frac{2\pi}{25.816} t - 2.53\right) \end{aligned}$$

그림 4-2에 관측유속, 모델링 및 해석해를 비교하여 나타낸다. 관측 유속 및 모델링은 ②지점에서의 유속이며 해석해는 당항만의 입구를 일정단면 수로로 가정하여 계산한 수로 전체의 유속이다. 관측유속, 모델링 및 해석해가 거의 일치한다.

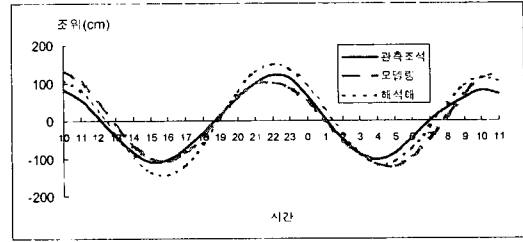


그림 4-1 조석비교

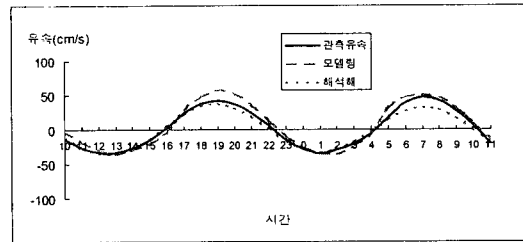


그림 4-2 유속비교

4.2 최대유속수심

최대유속 V_{max} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{max} = \sqrt{\frac{3\alpha\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)}{4\sigma^2 p^2}} \cdot \left(\frac{n_r}{n}\right)^2 \dots (4.8)$$

여기에서 n 은 0.04를 사용했다(近藤倣郎, 1972). 식(4.2)식을 $k=4V(2g n_r^2 - f_c R^{4/3})/3\pi R^{4/3}$ 이용하여 V 에 관하여 정리하고 식(4.8)을 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\beta p}{\sigma^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{9}{4} \left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^2 \left(\frac{\alpha}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{3 \left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^4 \left(\frac{\alpha}{\sigma^2}\right) \left(\frac{n_r}{n}\right)^2}{\dots}} \dots (4.9)$$

여기에서 $p = 4g n^2 T/3 \pi^2 h^{4/3}$ 이다.

최대유속수심은 수로전방의 외해조석의 제원으로 부터 구할 수 있는데 식(4.9)를 만족시키는 h 를 구하면 된다. 당항만의 경우, 외해진폭을 a_s 로 하고, 조차는 M_2 분조가 S_2, O_1 및 K_1 조에 비해 탁월하므로

로 주기로서 다음과 같은 반일주조를 취한다.

$$a_s = 1.58m, T = 12\text{시간}$$

식(4.9)에 위의 값을 대입하여 계산한 결과 당항만 수로에서의 최대유속수심은 7.3m로 추정되며 이는 비교적 안정된 상태이다. 즉, 현재 당항만 수로의 평균 수심은 약 11m 이며 최대유속수심 7.3m에 이를 때까지 수로에 표사 등 부유물이 퇴적된다 하더라도 최대유속수심 7.3m에 이르게 되면 다시 침식되는 과정을 반복하여 수심 7.3m를 유지할 수 있다.

4.3 해수교환율

(1) 관측결과

그림 4-3은 관측 유속을 수심 평균하여 시간 단위로 나타낸 것이다. 관측 유속은 ②지점에서 실시한 실험 결과를 이용한다. 실험은 입구의 중간 지점에서 실시하였으나 계산의 편의를 위하여 이 지점의 수심 평균유속을 단면적 전체의 유속으로 간주하였다.

통상적으로 관로 등의 흐름과 같이 유수면적이 시간적으로 변화하지 않는 흐름에서는 $Q = Av$ (A 및 v 가 일정)가 되나 조석에 의한 흐름의 경우에는 조위에 의해 A 가 변화하므로 이의 영향을 고려하여야 한다.

따라서 당항만의 계산에서 조위에 따른 단면적 변화는 앞의 실험결과 중 각 시간에 해당하는 조위값을 이용하여 결정하였다. 당항만 입구(②지점)의 저조시의 유수단면적은 7,725m² 이다. 그림 4-4 의 평균 유속을 적용하여 유량을 계산하면 다음과 같다.

$$Q_{out} = 90,840\text{ ton} \quad Q_{in} = 90,220\text{ ton}$$

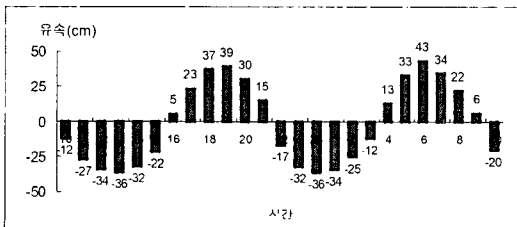


그림 4-3 관측 유속(②지점)

하루동안 유출되는 양이 유입되는 양에 비해 약 600톤 많은데 이는 하천이나 생활하수 등으로 당항만 내에 유입되는 담수의 양으로 추정된다.

(2) 모델링

모델링에 의한 유속의 경우 ②지점에서 ③지점까지의 평균 단면적 및 평균 유속을 계산하여 이용하였다. 평균 단면적은 8,250m² 이었으며 평균 속은 그림 4-4와 같이 나타났는데 이 값을 이용하여 유량을 계산하면 다음과 같다.

$$Q_{out} = 101,750\text{ ton} \quad Q_{in} = 99,990\text{ ton}$$

각 격자점에서의 평균유속을 합산하여 격자수로 나누는 방법, 즉 ②지점에서 ③지점 구간을 일정 단면 수로로 가정한 후 수심을 고려하지 않고 평균 유속을 계산하였기 때문에 유입량과 유출량의 차이가 생겼을 것으로 판단된다.

(3) 해석해

그림 4-5는 해석해에 의한 수심평균 유속을 시간 단위로 나타낸 것이다.

앞에서와 같은 방법으로 단면적을 계산하여 그림

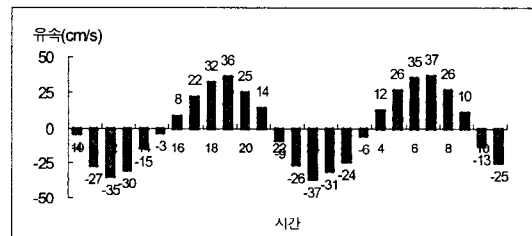


그림 4-4 모델링

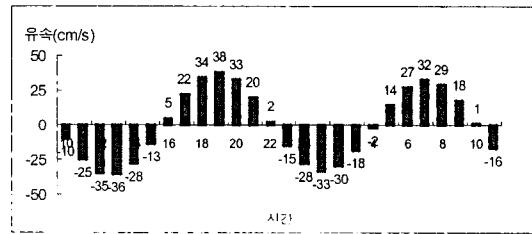


그림 4-5 해석해

4-5의 유속 값을 이용하여 유량을 계산하면 다음과 같다.

$$Q_{out} = 96,750\text{ton} \quad Q_{in} = 99,730 \text{ ton}$$

관측유속, 모델링 및 해석해로 계산한 결과 2조석 주기동안 유입량은 약 90,220ton~101,750ton, 유출량은 약 90,840ton~99,990ton이다.

제5장 결 론

일부만이 개방되어 있고 선박통항이 빈번한 폐쇄성 연안해역의 해수유동에 관해 연구하였다. 또한 모델링 및 해석해를 통해 해수유동을 예측하였으며 당항만을 대상으로 해수유동 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 조석 관측결과 만입구(②지점)의 진폭 약 140cm, 조차 241cm, 중간지점인 10번 부표지점(③지점)의 진폭 약 130cm, 조차 235cm, 만내 측인 ④지점의 진폭 약 125cm, 조차 229cm를 보인다. 만내로 진입할수록 조차는 작아지고 조시는 빨라지며 만내에서는 고조 또는 저조에 일찍 도달한 후 수분간 조위의 큰 변화없이 일정상태를 유지한다.
- 2) 만입구의 유속관측결과 상층에서는 유출하는 흐름이 대부분이며 중층에서는 유입과 유출을 반복하고 하층에서는 유입하는 흐름이 대부분이다. 최강 창조류는 310° 방향으로 47cm/s, 낙조류는 160° 방향으로 36cm/s이며 모델링 결과와 거의 일치한다.
- 3) 만입구에서 ③지점까지는 조류의 변화가 심하

고 유동이 활발하게 이루어지고 있으나 만내로 진입할수록 조류가 매우 약하며 해수유동이 거의 없다.

- 4) 1차원 해석하는 실험값과 거의 일치하며 최대 유속수심은 약 7.3m로 당항만 수로는 안정된 상태를 보인다. 2조석 주기(대략 하루)동안 유입되는 유량은 약 90,220ton~101,750ton, 유출되는 유량은 약 90,840ton~99,990ton이다.

참 고 문 헌

- 1) 김동수, 연안역 해저 구조물의 안전에 관한 연구, 한국해양대학교 해사수송과학과 대학원 석사학위 논문, 2000.
- 2) 마현호, 취송류의 확산 특성에 관한 연구, 한국해양대학교 해사수송과학과 대학원 석사학위 논문, pp. 20~21, 1998.
- 3) Dean, D. G. and R. A. Dalrymple, Water wave mechanics for engineers and scientist, pp. 206~283, 1984.
- 4) Rahman, M, Topics in engineering - The hydrodynamics of waves and tides, with applications, pp. 206~245, 1988.
- 5) 樋口明生, 境水道の水位變動に關する 模型實驗について, 第8回 海岸工學講演會講演集, pp. 119-125, 1961.
- 6) 近藤倣郎, 感潮狭口水路の流速, 内水域潮位および最大流速水深の一解法, 木學會論文報告集, 第206号, pp. 43-57, 1972.