

폐쇄성 해역에서의 유동구조와 빈산소화 기구에 대한 해명 및 환경수복 시험

Construction on the Flow Structure and a Test of Ecological Recovery - A Case Study of The Areas of Amagasaki, Nishinomiya and Ashiya Port

김준현¹, 이동근², 윤종성³
Kim Joon Hun¹, Lee Dong Keun² and Yoon Jong Sung³

1. 서 론

도시역의 발전에 따라, 연안역에 매립이 진행된 지역에서는 방파제와 복잡한 지형에 따라 유속이 작게 되고, 해수교환이 악화된다. 그 결과, 표층에서의 부영양화와 저니에서의 빈산소화가 진행된다. 특히, 대도시 부근에서는 기존의 해안선을 남겨두고 근해에 인공섬을 조성한 것이 많고, 작은 해역과 수로가 생겨 부영양화와 빈산소화는 보다 현저하게 나타난다.

특히 연안역의 저층의 빈산소수화는 적조와 청조 등의 수질오염을 발생시키는 근본적인 원인이 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 폐쇄성해역에서의 수질오염기구에 대한 정성적, 정량적 평가를 위해서는 유동구조의 해석을 포함한 빈산소수화의 진행과정에 대한 정기적인 관측과 아울러, 이를 모의하기 위한 수단의 확립이 필요할 것으로 생각되어진다.

본 연구에서는, 폐쇄성 해역에서의 유동구조의 해명과 빈산소수피의 거동의 재현을 위해 3차원 유동모델과 결합한 수질모델을 구축하였다. 해역에서의 유동구조의 해석을 위해서는 이미 그 유용성이 널리 알려진 P.O.M(Princeton Ocean Model)을 사용하였으며, P.O.M과 결합시킨 수질 Model, 특히 DO의 생성 및 소멸과정을 해명하는데 초점을 맞추어 수질모델을 구축하고자 하였다. 구축한 모델을 아마가사키 니시노미야 아시아항의 가장 내

측에 위치하고 있는 오마에하마를 대상으로 유동과 빈산소수피의 거동을 재현하였다. 그리고, 계산 결과는 현지관측으로 얻어진 실측값과 비교 분석하였다.

그리고 오마에하마 환경개선을 위해 몇 가지의 적용 가능한 환경수복안을 제안, 검토하여 보고하였다.

2. 현지관측의 개요

2.1 대상지역의 개요

본 연구의 대상해역은 오사카만 북부에 위치한 아마가사키 니시노미야 아시아항의 가장 안쪽에 위치해 있는 오마에하마 전 수역이다. Fig. 1에 오마에하마의 주변 해역을 나타낸다. 오사카와 고베 사이에 유일하게 남아있는 자연해빈인 오마에하마는 오사카, 고베 사이라는 지리적 특성 때문에 맨션과 주택이 해안선에 늘어서 있고, 요트와 윈드서핑 등의 해양스포츠를 이용할 수 있는 곳으로 비교적 주민이 접근하기 쉬운 지역이다. 오마에하마는 매립지와 인공섬에 둘러싸여 삼각형의 수역을 형성하고 있다. 오마에하마 해역의 표면적은 약 0.48km²이고, 수심이 5m이하의 얇은 부분의 면적이 약 0.2km²이나 된다. 수심은 전체적으로 얇고 해역에서 가장 깊은 곳은 중앙부 부근에서 약 6.8m 정도이다. 해수의 유출입이 가능한 개구부는

1 인제대학교 건설기술연구소 특별연구원
2 인제대학교 토목공학과 대학원
3 인제대학교 토목공학과 교수

남쪽의 약 150m, 동쪽의 약 50m의 개구부 두 곳
 뿐으로 해수교환이 거의 이루어지지 않는 정체성
 이 강한 해역이다. 수역의 북쪽에 위치하고 있는
 슈쿠가와(夙川)의 하구역에는 1ha 정도의 간석
 지가 형성되어있다. 저질은 해빈부 세립토,
 간석지가 사질토로 형성되어있다.

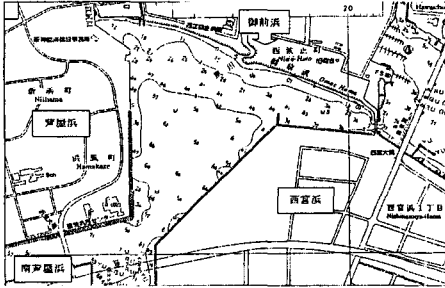


Fig. 1 관측대상해역

2.2 오마에하마의 환경악화 요인 및 현상태

· 유형

폐쇄성이 강하고, 해수의 출입구가 남측
 파동측의 두 곳의 개구부로 한정되어있다.

해역내의 흐름은 약하고, 특히 중·하층의 유속이
 2.0cm/s 이하이다.

· 수질

주변해역으로부터의 부하가 크고, 현탁물질이
 많다. 적조가 발생하고, 하계에는 저층에서 빈산소
 수괴가 형성된다. 바람에 의한 저층의 빈산소수괴
 가 용승한다.

· 저질

유기물의 침강 및 퇴적이 많다. 저질이 악화되
 어, 혐기적 상태가 되어있다.

· 생물

해역에 생식하는 저생생물의 종류·양이 감소하
 고 있고, 하계의 빈산소상태시는 수심 4m 이하에
 서 무생물상태가 된다.

· 경관

파도 소리를 들을 수가 없고, 바닷가의 향이 나
 지 않는다. 표층엔 적조가 발생하고 저질은 흑색
 으로 해변의 풍경에서 바다다움이 떨어진다.

2.3 유동의 현황

유동관측은 2004년 7월 1일 Fig. 2에 실선으로
 표시한 6개의 측선에서 소형선을 이용해서 조사에
 는 RD Instruments사의 ADCP(1200kHz)를 관측선
 에 고정시키고 순회관측을 하였다. 유동관측은 조
 석의 반일주기(12.5시간)를 기한으로 한 반일간 조
 사이다. 15시간, 13회 순회의 단면관측을 실시하

였다.

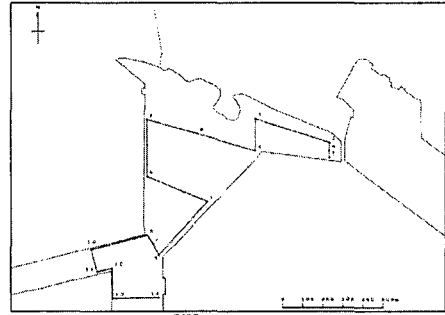


Fig. 2 조사측선

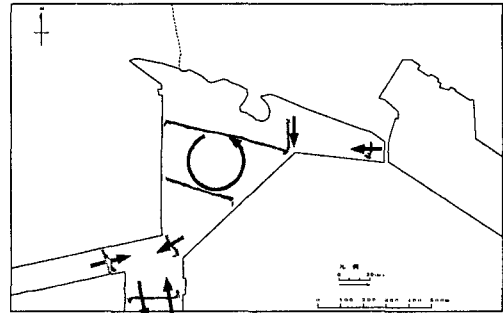


Fig. 3(a) 수심1m에서 일조석 평균치

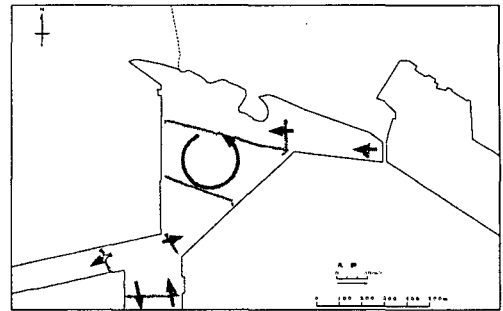


Fig. 3(b) 수심3m에서 일조석 평균치

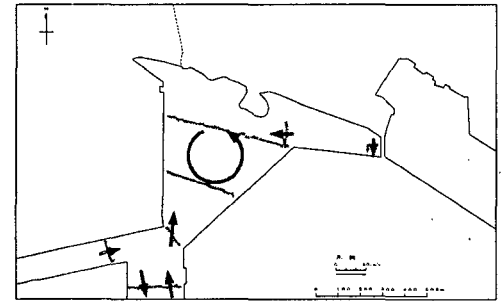
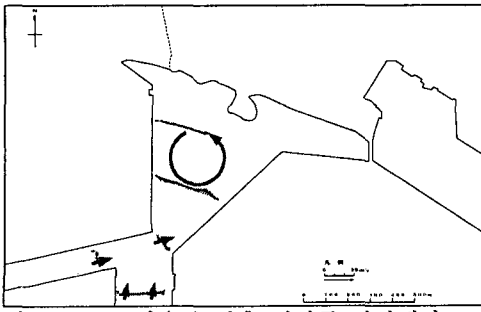


Fig. 3(c) 수심5m에서 일조석 평균치

Fig. 3에 2003년 7월 1일에 오마에하마에서 실



시한 ADCP를 이용한 관측 결과를 나타낸다.

Fig. 3(d) 수심7m에서 일조석 평균치

일조석 평균의 유동관측 결과에서 남쪽 개구부에서는 상층유출-하층유입의 2층 구조를 가지고 있고, 동쪽 개구부에서는 상층에서 유입뿐이다. 해수교환은 주로 남측개구부에서 이루어지고 있는 것이 밝혀졌다. 그리고 수역 중앙부의 상층에는 반시계 방향의 순환이 존재하는 것이 확인되었다.

2.3 유동의 현황

수질 관측은 2002년 6월부터 11월까지 오마에하마의 중앙부에서 실시하였다. Fig. 4는 관측기간 중에 고배해양기상대에서 관측된 바람, 기온, 일조시간, 강수량을 나타낸다. 바람은 하계에는 주로 남서풍이 불고, 저기압의 통과에 따라 북풍이 불기도 한다. 9월 이후의 추계에는 북풍이 많이 분다. 기온은 6월에서 10월까지 평균보다 1.1°C~2.2°C 높고, 11월은 평균보다 1.8°C 낮다. 6월에서 11월까지의 일조시간은 1104시간으로 평균보다 110시간 많다. 6월부터 11월까지의 강수량은 417mm로 평균보다 361mm 적었다. 이것은 장마기 및 9월에 강우량이 적었기 때문이다.

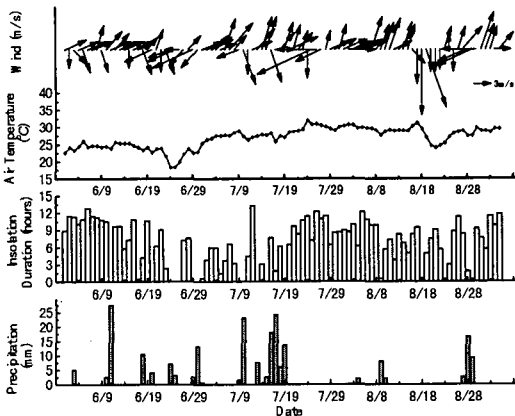


Fig. 4 관측중 풍향·풍속,기온,일조시간,강수량
(날짜는 관측실시일)

Fig. 5에 관측점과 빈산소수피 조사로부터 얻어진 염분, 수질, 클로로필-a의 시간변화를 나타낸다. 6월부터 11월까지 5개월에 걸친 조사에서 저층부에서는 6월부터 10월까지 4개월 동안 3mg/l 이하의 빈산소수피가 형성되어 있는 것이 확인되었다. 6월 25일, 7월 31일, 8월 20일, 9월 19일은 연직방향의 염분농도차가 작은 것을 알 수 있다. 그리고 저층의 빈산소수피가 상층까지 용승해 있는 것이 보인다. 이날들은 강한 북풍과 태풍의 영향으로 상층수가 외해로 밀려나가고 저층수가 용승하여 오마에하마 지역에서, 그동안 오사카만에서는 확인되지 않았던 청조가 큰 규모로 발생하였다.

2.4 용승한계에 관한 검토

저층수의 용승과 저층붕괴 등 바람이 발생시킨 현상에 관해서 Spiegel and Imberger (1980)는 아스펙트 비(L/h)와 성층강도를 표현하는 리차드슨 수(Ri)를 파라메타로서 형상을 4개로 분류했다. Ri=L/2h가 되면 상승이 발생하고 게다가 연속시간이 길어지면 성층붕괴가 이루어진다. Ri=L/2h이 되는 풍속을 한계풍속이라고 부르고, 후지하라(1989)는 세토내해의 용승현상에 적용하고 있다.

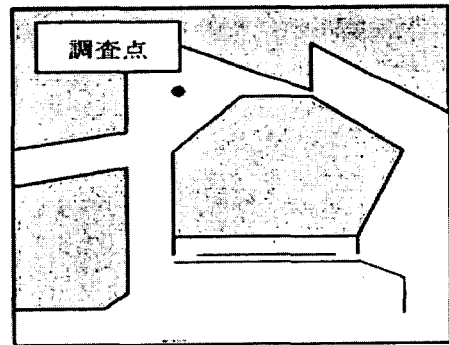


Fig. 5(a) 수질 관측점

한계풍속은

$$U_c = (2\Delta\rho g h^2 / C_D \rho_a L)^{1/2} \dots (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 h:약층수심, C_D:저항계수, Δρ:상층과 하층의 밀도차, ρ_a:공기밀도, L:수역의 길이 스케일, g : 중력가속도이다. 밀도약층의 존재가 확인된 10월 10일까지의 한계풍속과 관측풍속을 Fig. 6에 나타낸다. 8월 19일과 9월 19일의 풍속이 한계풍속에 달하고 있다. 태풍 14호가 통과한 후의 8월 20일의 관측일에는 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 수역전체에서 약층이 소실되

고, 밀도는 연직방향으로 거의 일정치를 나타낸다. 그러나 한계풍속에 도달하지 않은 6월 25일과 10월 21일에도 비교적 수심이 낮은 오마에하마 부근의 수역에 있어서 청조가 확인되었고, 밀도가 연직방향으로 거의 일정화되어 있는 것이 확인되었다. 용승 발생의 목안이 되는 한계풍속보다 작은 풍속에서 청조가 발생하는 원인으로서는, 오마에하마와 그 부근에는 모래해변의 존재, 용승이 일어나기 쉬운 지형, 약층 수심이 항 전체에 비교해서 낮은 것과, 용승의 공간 스케일이 풍향에 따라 다른 것 등으로 생각 되어진다.

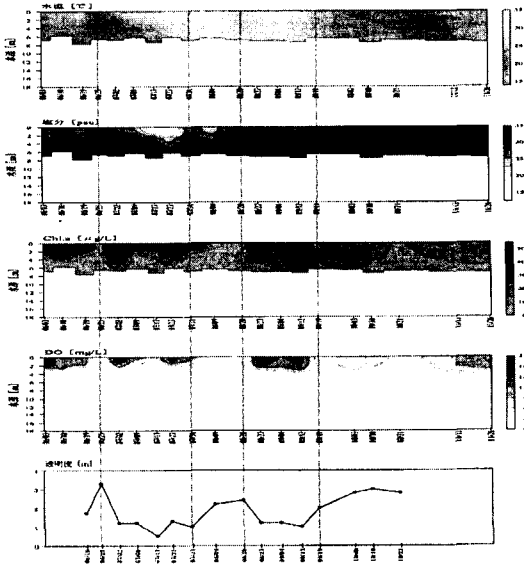


Fig. 5(b) 수질관측 결과
(수온, 염분, Chl-a, DO, 투명도)

한편, 다음 관측 일에서는 성층구조는 풍향변화 전 상태로 돌아온다. 풍향의 연속시간이 짧기 때문에, 등밀도면은 큰 경향을 띠고, 거의 연직이 되지만 항내 전체의 밀도를 동일화하기에는 미치지 않는다. 그러므로, 하계의 복풍은 용승을 초래하는 것으로 강한 연직혼합은 일어나지 않지만, 풍력은 빈산소수피를 해소시킬 정도로는 작용하지 않는다고 말할 수 있다.하고 있다.

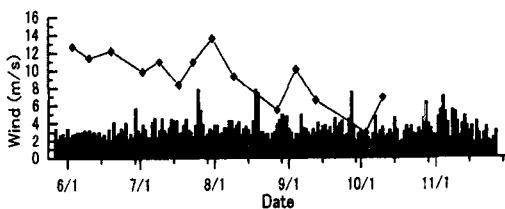


Fig. 6 한계풍속(곡선)과 관측풍속(종봉)

3.3차원 유동 및 수질 수치모델

본 연구에서는 빈산소수피의 거동의 재현을 위해 구축한 3차원 유동모델과 수질 모델을 결합시킨 수치모델을 구축하였다.

3.1 유동모델의 개요

연안역의 유동 시뮬레이션에 이용되어지는 유동 모델은 많이 있고 오픈 스페이스 코드조차 다양하다. 수평방향의 좌표계는 Descarte 좌표계, 직교곡선 좌표계, 일반곡선 좌표계 등이 있다. 본 연구에서는 최종목표가 빈산소수피의 재현이기 때문에 연직방향의 정도 향상을 위해 수표면에서 저면까지를 등분하는 σ 좌표계를 채용했고, 수평방향은 간단하기 때문에 Descarte 좌표계를 채용하였다. σ 좌표계를 채용했어도 좌표변환에서 기인하는 오차에 있어서는 대책을 세우지 않으면 안된다. 본 연구에서는 이런 오차에 대해서 보정을 실시하여 σ 좌표계의 장점을 최대한 활용하여 사용하였다. 본 연구에서는 그 유용성과 범용성이 널리 알려진 P.O.M(Princeton Ocean Model)을 사용하였다.

3.2 수질모델의 개요

지금까지 많은 수질모델이 개발되어 왔다. 수질 모델의 대부분은 영양염과 식물플랑크톤, 동물플랑크톤을 고려한 것으로 개발자에 의해 생태계 모델 또는 영양염화 모델이라고 불리고 있다. 본 연구에서 채용한 모델은 식물플랑크톤과 영양염으로 구성되어 있기 때문에 생태계모델보다는 수질 모델이라고 부르는게 적당하다고 생각되어진다.

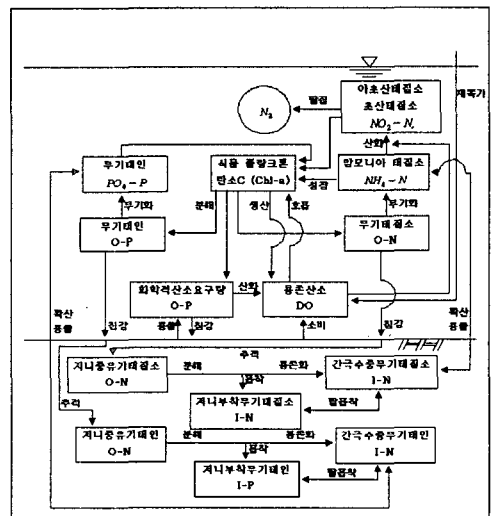


Fig. 7 수질모델의 개요

통상의 수질 모델의 경우는 과도의 빈산소상태를 상정하지 않는다. 무산소상태의 각 영양염의 순환을 재현하는데 꼭 필요하다고 하지 않고 용존산소의 극단적인 과포화상태를 상정하지 않기 때문에 현지실측조사결과와 정확하게 일치하지 않는다. 오사카만과 같이 오염이 심한 「표층과포화·저층무산소」해역에서는 수질모델에 따라 수질의 재현 정도의 저하에 직결한다. 본 연구에서는 극단적인 수질상태를 재현하기 위해 모델을 재구축했다. 기존의 수질모델과의 차이점은 실물플랑크톤의 양을 탄소량으로 평가하고, 클로로필-a의 산출시는 클로로필-a/탄소변화계수를 이용하여 탄소와 질소 및 인과의 환산계수를 명확히 한 것과 무기태질소를 암모니아태와 아소산태+소산태의 2가지 요소로 분할하여, 초화식 산소소비량의 과대평가를 피할 수 있게 한 것이다.

Fig. 7에 해수 중 및 저질층의 모델의 구조를 나타낸다.

4. 수치모델의 현지 적용

4.1 계산영역 및 계산 조건

Fig. 8에 계산대상영역을 나타낸다. 계산영역은 아마가사키 니시노미야 아시야항의 가장 안쪽에 위치하고 있는 오마에하마 전 수역을 중심으로 하였다.

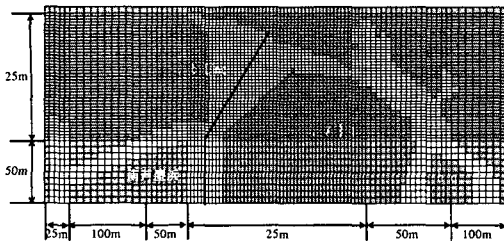


Fig. 8 계산대상영역

계산격자는 오마에하마 전 수역을 25m×25m에서 50m×100m 격자의 가변으로 나누어 계산하였다. 삼각형의 오마에하마 중앙부의 수역에서는 좀더 정밀한 재형을 위해 25m×25m의 격자를 사용하였다. 연직방향은 10층이고 초기의 밀도장은 일정치를 주었다. 수질항목은 초기치는 현지 채수결과를 이용하였다. 경계조건은 수위에서 준다. 수리모형실험의 결과에서 수위는 35cm의 편진폭을 주고 고베와 아마가사키의 검조소에서 M₂조의 위

상차로부터 4개 개구부에 위상차를 주어 계산하였다. 경계에 있어서 수온, 염분, 각 수질항목의 유출입은 방사조건을 이용하고, 수질항목의 경계치는 채수 결과를 기초로 설정하였다. 계산기간은 20일로 하였다.

4.2 계산결과

Fig. 9에 수심 1m와 3m에 있어서의 유동계산결과를 나타낸다. 계산결과와 관측결과를 비교해서 검토를 실시하였다. 수심 1m의 수심에서 유동상태는 실측에서 얻어진 결과와 일치하고, 오마에하마 전 수역에 걸쳐서 반시계 방향의 순환이 확인되었다. 평균 유속은 2~2.5cm/s로 순환하고 있는 것도 일치하고 있다. 수심 3m의 수심에서 잔차류에서도 평균유속 1cm/s정도로 반시계 방향의 순환이 확인되었다. 이 결과로 오마에하마의 유동계산은 실측치와 잘 일치하고, 양호하게 재현 되었다고 할 수 있다.

Fig. 9에 표층과 저층에서의 DO의 분포를 나타낸다. 표층의 DO분포는 5~6mg/l이고, 저층의 DO분포는 수역의 상부를 제외한 수역에서는 거의 "0"으로 무산소상태가 되어있다. DO의 분포도 실측치와 일치하고 있다. 지금까지 오사카만 내측의 협소한 영역에 대한 유동 및 수질의 재현과 연구는 그다지 많지 않았기 때문에 이 계산(유동 및 빈산소분포의 재현)의 적용성과 신뢰성을 검토하기 위해 관측결과와의 비교를 통해서 검토한 결과 2개의 결과가 거의 일치하고 있고 그 정도가 높다고 생각되어 진다.

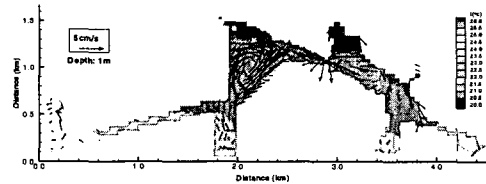


Fig. 9(a) 수심 1m에서의 잔차류

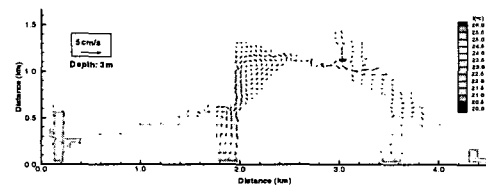


Fig. 9(b) 수심 3m에서의 잔차류

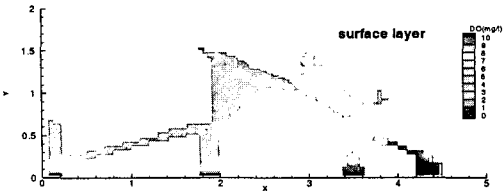


Fig. 9(c) 표면의 DO분포

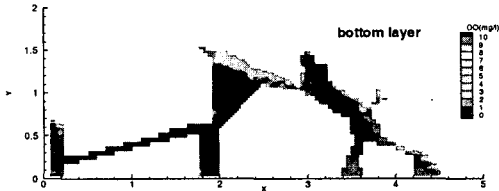


Fig. 9(d) 저면의 DO분포

5. 오마에하마에 대한 환경수복

5.1 유동환경의 수복

- 흐름제어 구조물 설치에 따라 순환류의 형성과 해수교환의 변화 모색
- 지형개조에 따라 유동환경의 개선 모색 (저층에 모래장을 조성하여 유동장의 변화 및 해수교환의 촉진을 모색)

5.2 생물생식환경의 수복

- 저층 쇄석장의 조성에 따른 빈산소수피의 해소 도모
- 유동장의 변화에 따라 생태계의 변화도모 (유속의 증가에 따른 빈산소화의 해소, 유기물의 침강량의 감소에 따라 생물다양성의 향상 도모) 등의 환경수복안이 제안 되었으나 본 연구에서는 그중에서 아래의 세가지 안으로 검토를 실시하였다.

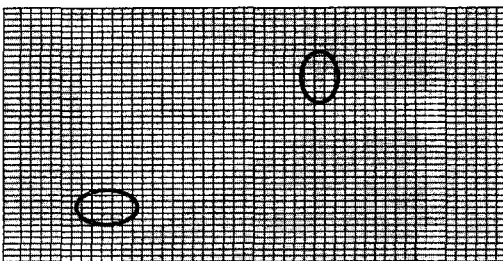


Fig. 10(a) 개구부에 제방을 설치한 경우

- Case I
- 남·동쪽 개구부에 돌출부 설치
- Case II
- 수역 중앙부 저층에 모래장을 설치

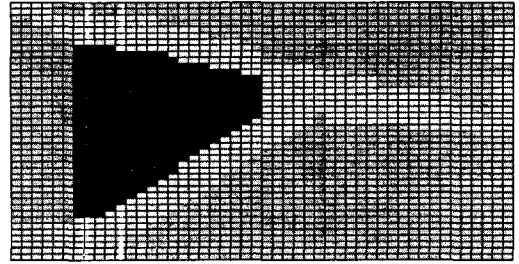


Fig. 10(b) 개구부에 제방을 설치한 경우

· Case III

- 저질개량: 저니부터의 영양염의 용출, 저니에서 산소소비를 "0"로 가정
- Case II + 저질개량 등의 3가지 안을 가지고 3차원 수치 시뮬레이션을 통한 검토를 실시하였다.

5.3 환경수복 안의 검토

Fig. 11, Fig. 12에 Case I, Case II의 수심 1m, 3m에서의 잔차류를 나타낸다. 수심 1m에 있어서 각 Case와 현재의 흐름상태와 비교, 분석하였다. Case I에서는 환경개선기술 적용 전의 흐름 상태와 큰 차이는 없으나 유속은 조금 빨라졌다. Case II에서는 환경개선기술 적용 전보다 유속은 작아졌지만 수역중앙부에 위치해 있는 반시계 방향의 순환류의 중심의 위치가 수복 안 적용전보다 북동쪽으로 이동되어 있는 것이 확인되었다. 수심 3m에 있어서는 Case I의 경우는 유속은 큰 경향을 가지지만 남쪽 개구부에서의 흐름의 방향이 유출방향인 것이 확인되었다. 그러나 Case II의 경우는 유속은 작아지고 남쪽 개구부에서의 흐름은 유입방향으로 되어있는 것이 확인된다.

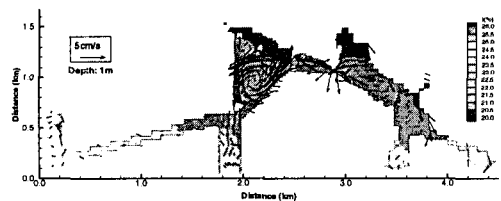


Fig. 11(a) Case I의 수심 1m에서의 잔차류

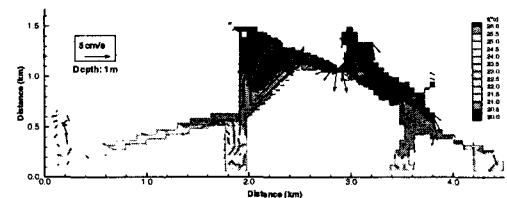


Fig. 11(b) Case II의 수심 1m에서의 잔차류

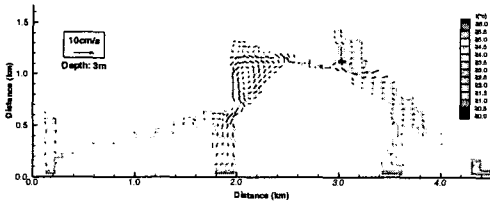


Fig. 12(a) Case I의 수심 3m에서의 잔차류

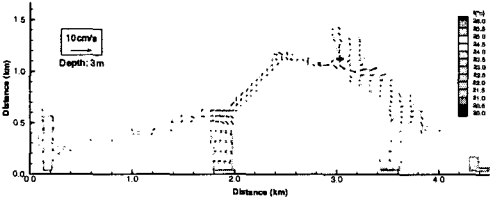


Fig. 12 (a) Case II의 수심 3m에서의 잔차류

Fig. 13에 환경개선기술을 실시한 경우의 수역 내에 있어서 DO농도의 예상결과를 나타낸다. 표 1에 오마에하마 수역의 중앙부에 있어서 DO농도가 3mg/l, 2mg/l, 1mg/l가 되는 수심을 나타낸다.

현재의 DO농도의 상태와 비교한 결과 Case I의 경우, DO의 큰 개선은 확인되지 않지만, DO농도 3mg/l가 되는 수심의 위치가 현황보다 조금 깊은 곳에 존재 하는 것이 확인되었다. 이것은 수평방향의 유속이 커져서 연직방향의 확산이 크게 되어 성층구조에 약간의 영향이 미쳐 DO농도가 조금 개선된 것으로 생각되어진다. Case II의 경우는 모래장 윗부분에서는 빈산소수피가 발생하지 않게 되었지만, 모래장을 설치하지 않은 가장자리는 여전히 빈산소수피가 남아있다. 그 부분은 현황과 비교해 보아도 DO농도가 거의 변하지 않은 상태인 것이 확인된다. Case III의 저니로부터의 용출과 저니의 산소소비가 "0"이라고 가정한 안으로 계산했을 때는 저층의 빈산소 자체의 두께는 거의 감소하지 않았지만, 표 1에서 나타난 것처럼 DO농도가 3mg/l가 되는 수심위치가 현황과 비교해 0.2m나 깊은 곳에 존재하고, DO농도가 1mg/l가 되는 수심위치가 현황보다 0.6m 깊은 곳에 위치하고 있다. 이것은 저층의 무산소상태가 크게 개선되었다고 보여진다. 그리고 저층에 모래장을 조성하고 저니부터의 용출과 저니의 산소소비를 "0"로 둔 경우에는 모래장을 설치하지 않은 남측에도 저층의 무산소화가 개선되었고 DO농도가 3mg/l가 되는 수심의 위치도 현황보다 깊은 곳에 위치하고 있다. 그러나 모래장 설치나 저질개량은 어느정도 시간이 지나면 다시 퇴적물에 따른 저니의 산소소비가 시작되고 저층이 빈산소화 한다고 생각되어지기 때문에 이 효과는 일시적인 것들로

생각되어진다.

Table 1 수역 중앙부에서 빈산소수피의 형성수심

DO	현황(m)	제방설치(m)	저질개량(m)
3mg/l	2.56	2.48	2.79
1mg/l	3.69	3.63	4.31

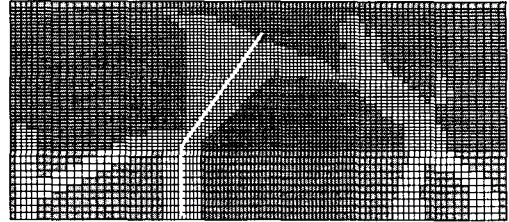


Fig. 13(a) DO종단분포 선

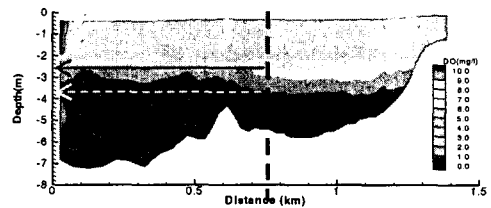


Fig. 13(b) 환경개선기술의 적용결과에 예측 DO종단분포 - 현황

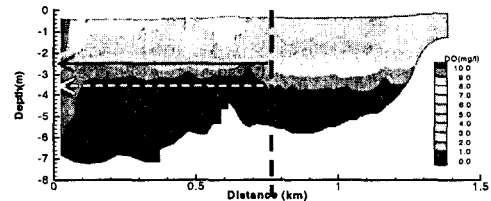


Fig. 13(c) 환경개선기술의 적용결과에 예측 DO종단분포-Case I

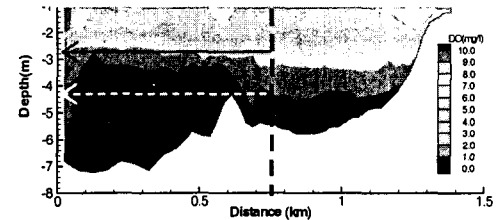


Fig. 13(c) 환경개선기술의 적용결과에 예측 DO종단분포-Case III-1

6. 결과 및 고찰

본 연구에서 얻어진 중요한 결과는 이하와 같다.

- (1) 오마에하마의 유동구조는 남측 개구부에서는

상층유출-하층유입의 2층 구조를 가지고 있고, 동쪽 개구부에서는 상층에서 유입뿐이다. 해수교환은 주로 남측개구부에서 이루어지고 있다. 수역 중앙부의 상층에는 반시계 방향의 순환이 존재한다.

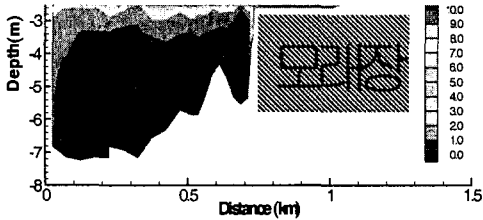


Fig. 13(c) 환경개선기술의 적용결과의 예측 DO종단분포-Case III-2

- (2) 오마에하마의 저층에서는 5월부터 빈산소수피가 형성되기 시작하여 6월 초순에 벌써 전 수역에서 빈산소상태가 되어 있고, 10월까지의 장기에 걸쳐서 빈산소상태가 계속되어 11월에 접어들어서야 소멸되기 시작한다. 수온성층이 소멸되는 10월 이후도, 염분성층에 기인하는 밀도약층에 따라 빈산소상태가 해소되기 어려운 것을 알았다.
- (3) 빈산소수피의 용승 및 청조현상은, 한계풍속에 달하지 않는 경우에서도, 지형이 환경사인 것 등에 따라 발생하기 쉬운 환경이다.
- (4) 폐쇄성이 강한 오사카만 내측의 좁은해역 오마에하마에 대한 유동 및 빈산소수피의 동태의 관측결과와 예상 시뮬레이션의 결과로부터 유속은 상당히 작고 수역전면의 유형은 반시계 방향의 흐름이 형성되고, 저층의 빈산소수피가 형성되어 있는 것들이 잘 재현되었다.

(5) 유형제어, 저질개량 등의 환경개선 기술을 적용한 결과, 그런 환경수복기술은 극소적인 환경개선 효과를 발휘하지만 오마에하마의 빈산소수피를 극적으로 개선하는 방법은 아니다. 오마에하마의 전수역을 포함하는 오사카만 내측부에서 오사카만 자체가 빈산소화 되어 있는 오염되어 있기 때문에 그 외해와의 해수교환에 의해 오마에하마에서의 환경수복기술의 효과는 생각보다 적었다.

참고문헌

藤原建紀・高杉由夫・肥後竹彦 (1989): “風による成層崩壊現象の發生頻度と發生限界風速”, 沿岸海洋研究ノート, 第27巻, 第1号.

藤原建紀・高杉由夫・肥後竹彦: “成層狀態の内灣に風が起す現象”, 沿岸海洋研究ノート, 第27巻, 第1號, pp.38-46, 1989

山根伸之・寺口貴康・中辻啓二: “大阪灣灣奥部のエスチュアリー循環と栄養鹽收支”, 海岸工學論文集, 第45巻, 土木學會, pp.1061-1065, 1998

山根伸之・寺口貴康・中辻啓二: “閉鎖性内灣の貧酸素水塊の形成機構にかんする研究”, 海岸工學論文集, 第45巻, 土木學會, pp.961-965, 1998

中辻啓二・入江政安・西田修三・湯淺楠勝, (2003): “大阪灣灣奥部閉鎖性海域における貧酸素水塊の現地觀測”, 水工學論文集, 第47巻, pp.1285-1290

入江政安: “大阪灣奥部における貧酸素水塊の動態にかんする研究”, 大阪大學博士學位論文, 162 p, 2004

金俊憲: “尼崎西宮芦屋港内の流動構造および貧酸素化機構の解明と環境修復の試み”大阪大學修士學位論文, 81p, 2004