

元門灣에서 低酸素 水塊의 出現과 季節的 變動

李 弼 容

國立水產振興院 環境科

Occurrence and Seasonal Variation of Oxygen-Deficient Watermass in Wonmun Bay

Pil-Yong LEE

National Fisheries Research and Development Agency, Yangsan, Kyungnam 626-900, Korea

The present study was accomplished to understand the occurrence and time serial variations of oxygen-deficient watermass in wonmun Bay from 1989 to 1991. From the results of this work, oxygen-deficient water was periodically observed in bottom layer and in Summer in this region.

The stratification of water began to develop in Spring and the strong formation of oxygen-deficient water showed in Summer but it gradually disappeared in Autumn. It seems that the occurring and continuing period of very low dissolved oxygen watermass is intensively controlled by meteorological conditions and vertical stratification of water column. On formation of oxygen-deficient watermass, high nutrient concentrations in the bottom layer appear to be due to release of nutrients from bottom sediment. The dissolved inorganic phosphate versus AOU shows two linear curves according to the level of AOU. In the relationships between phosphate and AOU, the gradient of a linear curve over approximately 5mg-AOU/l was significantly large, presumably indicating dissolution of phosphate from the sediment.

緒 論

우리나라 養殖産業의 寶庫라 할 수 있는 鎭海灣의 西南端에 위치한 元門灣은 경상남도 통영군 용남면과 광도면으로 둘러싸인 半閉鎖性 內灣海域이다. 이 해역은 옛부터 굴 양식의 주산지로서 널리 알려져 있으나, 최근 저산소수괴의 출현, 적조의 발생 등 환경이 급속도로 악화되어 양식생물의 피해가 자주 일어나고 있다.

해수의 유동이 원활하지 못한 온대 내만 해역에서는 일반적으로 여름철에 육지로부터 담수가 유입되고 표층수의 수온상승으로 해수의 成層化가 이루어져 표층으로부터 저층으로의 산소공급은 적어진다. 또한, 해저에 퇴적된 많은 량의 유기물은

분해되면서 해수중의 용존산소를 많이 소비하게 됨에 따라 저층수는 저산소 또는 무산소상태가 된다. 이러한 저산소 또는 무산소수괴의 출현으로 저서생물이 대량 폐사하게 된다(森, 1961; Jorgensen, 1980; 風宮田, 1988). 따라서, 최근에는 연안 내만 해역에서 저산소 또는 무산소수괴의 발생 메카니즘이나 수질 개선대책에 관해 많은 연구가 진행되고 있다(飯塚·関, 1989; 城, 1989; Sasaki, 1989).

한편, 유기물 함량이 높은 퇴적물은 還元狀態下에서 窒素와 磷을 대량 용출하여 표층보다 저층에서 월등히 높은 磷과 窒素의 농도를 나타낸다(中村·杉浦, 1975; 城等, 1984).

이와같은 저산소 또는 무산소수괴에 대한 국내 연구로서는 Hong(1987)이 1983년 9월 鎭海灣의 저

서생물과 저층 용존산소와의 관계에 대하여 보고한 바 있고, 崔 등(1991)은 용존산소 수지식을 이용하여 북만의 자정능력을 계산한바 있으나, 저산소수괴의 계절적 변화 특성과 그 출현 원인에 대한 상세한 연구 보고는 거의 없다.

따라서, 본 연구에서는 원문만에서 약 2년 6개월 동안 장기적으로 관측을 하여 저산소수괴의 출현 빈도와 계절적 변동, 그리고 저산소수괴를 해역별 수질기준 II등급 수준으로 회복시킬 수 있는 有機物 負荷量을 산정하였다.

材料 및 方法

元門灣의 灣入口에서부터 안쪽까지 3개의 조사 정점(Fig. 1)에서 1989년 7월부터 1991년 12월까지 약 2년 6개월 동안 총 47회에 걸쳐 수심별 수온, 염분 및 DO를 Water Analyzer(Hydrolab. Surveyer II)로 현장에서, 영양염류는 Strickland and Parsons법(1972)으로 현장채수후 실험실에서 측정하였으며, 동 해역의 기상자료는 忠武 測候所 관측자료를 이용하였다.

한편, 적정부하량은 中村·杉浦(1976)가 제안한 다음과 같은 용존산소 수지식을 이용하여 계산하였다. 즉,

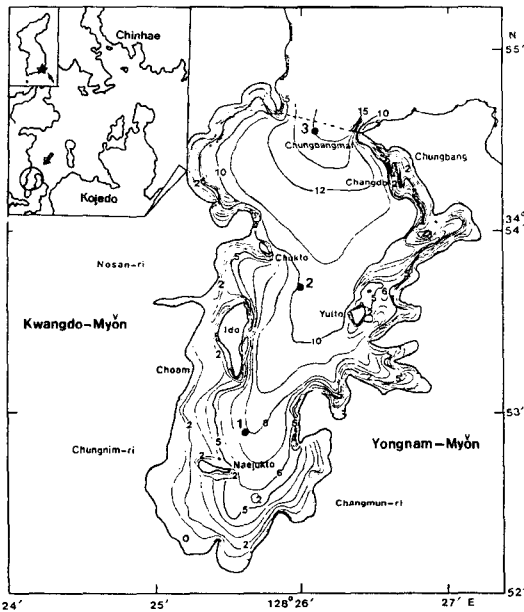


Fig. 1. The location of survey stations and bathymetry (m) in Wonmun Bay.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + LC - I = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 C : 溶存酸素 濃度(ml/l)
 L : 酸素消費 係數(day⁻¹)
 I : 酸素供給 係數(ml/l/day)
 $\frac{\partial c}{\partial t}$: 酸素의 單位 時間當 變化率 (ml/l/day)

이 式에서 L과 I에는 海水交換量, 被酸化性 物質에 의한 脫酸素, 水表面의 曝氣, 海底面의 酸素消費, 光合成 등이 內包되어 있으며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 양식장에서 연속 관측한 용존산소 농도는 그 양식장 환경에서 일어나는 모든 산소소비 및 공급기작을 포함한 것이므로 그 수괴의 고유 특성치라고 생각할 수 있다.

(1)식의 L, I는 Fig. 2로부터

$$t = t_1 = 0 \text{ 일 때 } C = C_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$t = t_2 = T \text{ 일 때 } C = C_2 \dots\dots\dots (3)$$

$$t = t_3 = 2T \text{ 일 때 } C = C_3 \dots\dots\dots (4)$$

$$L = -1/T \ln \frac{(C_1 - C_3) \pm \sqrt{(C_1 + C_3)^2 - 4C_2(C_1 - C_2 + C_3)}}{2(C_1 - C_2)} \dots\dots\dots (5)$$

$$I = \frac{C_2 - C_1 e^{-LT}}{1 - e^{-LT}} L \dots\dots\dots (6)$$

위의 (5)와 (6)식에서 L과 I값은 + 값이다. C₃는 양식장의 최저 용존산소농도이고, C_p는 기준농도 혹은 허용농도이다. 따라서, 최저 용존 산소농도 C₃를 허용농도 C_p 이상으로 유지하는데 필요한 용존 산소 공급량을 O_D라 하면 식 (1)의 I항에 O_D/V를 대입하여 O_D에 관하여 풀면

$$O_D \geq \frac{LV \left\{ \left(C_p - \frac{I}{L} \right) - \left(C_1 - \frac{I}{L} \right) e^{-Lt} \right\}}{1 - e^{-Lt}} \dots (7)$$

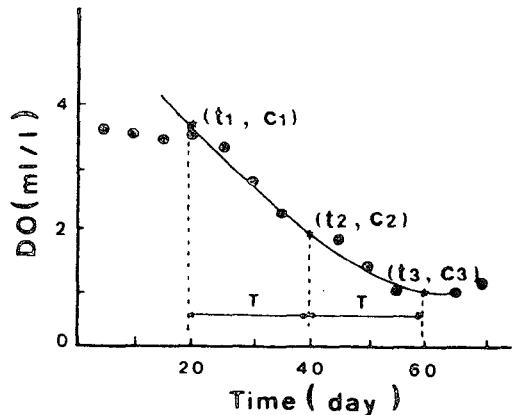


Fig. 2. Typical variation pattern of dissolved oxygen.

이 되며, 이로부터 해당 수역의 계획농도 C_p 를 유지하는데 공급되어야 할 단위 수용적당 산소량을 산출하였다.

結果 및 考察

1. 저산소 수괴의 계절적 변동

1989년 7월에서 1991년 11월까지 3개 정점에서 수심별로 수온, 염분, 용존산소의 계절 변화를 관측한 결과 정점별로는 계절적으로 그다지 차이가 없이 비슷한 경향이였으며, 대표적으로 정점 3에서의 관측치만을 Fig. 3에 나타내었다.

1989년은 7월에서 10월까지 약 4m층을 중심으로 成層이 형성되었고, 이러한 成層形成과 더불어 저층에서는 강한 저산소수괴가 나타났고, 10월 하순 이후 성층의 소멸과 함께 저층의 용존산소도 점차 회복되어 冬季에는 표·저층수의 수직혼합으로 인해 용존산소도 정상적인 상태를 유지하였다.

1990년도는 5월 중순까지는 표·저층이 원활한 循環을 보였으나, 5월 하순경부터 水溫躍層이 형성되면서 저층 용존산소의 감소가 시작되어 6월 중순에는 강한 成層의 형성과 더불어 저층 산소의 급격한 감소를 보였다. 이러한 현상이 8월 하순까

지 지속되다가 9월 초순에 成層의 소멸과 함께 용존산소의 회복이 이루어져 정상적인 환경으로 회복된다.

1991년은 타 년도와는 다소 차이를 나타냈으며, 6월 중순경 약한 成層의 형성과 함께 저층 용존산소의 감소가 시작되었으나, 7월에서 8월 사이에는 成層이 뚜렷하게 형성되지 않았고, 저층 용존산소도 비교적 높은 농도를 유지하였다. 그 후 8월말에서 9월초에 걸쳐 강한 成層이 나타났으며, 따라서 9월 초순경 저층에서는 약 1ml/l 이하의 저산소층이 형성되었다. 이와 같이 저산소층은 9월 중순까지 나타나다가 9월 하순경 成層의 消滅과 더불어 回復되는 현상을 나타내었다. 1991년은 타 년도에 비하여 하계 氣象變動이 심하였으며, 이에 따라 뚜렷한 成層形成이 어려웠던 관계로 저층에서의 저산소수괴 형성도 비교적 늦게 형성되었고, 또한 出現期間도 짧았던 것으로 생각할 수 있다.

수온, 염분, 용존산소의 계절적 변동을 종합하여 보면, 해황변동이 심하였던 1991년을 제외하고, 겨울철에는 비교적 고염, 저온, 고산소의 수괴가 灣内に 垂直的으로 일정한 분포를 나타내고 있으며, 봄이 되면서 표층 부근에서 약한 水溫躍層 현상이 나타나기 시작하고, 저층의 용존산소는 약간씩 감소하기 시작한다. 그 후, 6월 이후 장마시기를 거

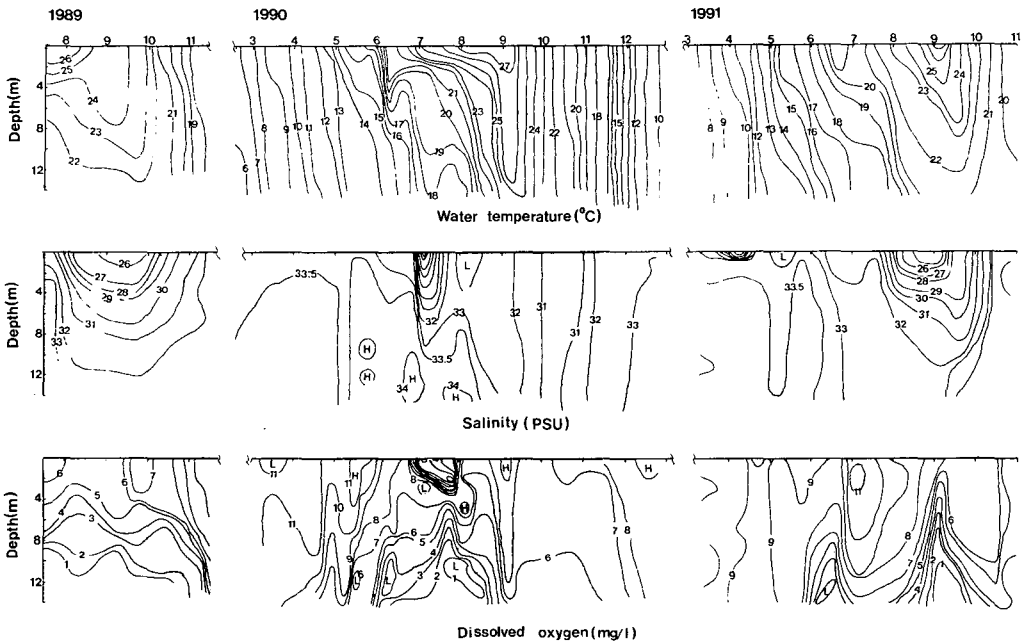


Fig. 3. Monthly variations of water temperature, salinity and dissolved oxygen at station 3.

치면서 陸水의 大量流入과 장마 후 日射量의 급격한 증가에 따라 표층 부근은 저염, 고온상태로 변화됨에 따라 강한 成層이 表面下 水層에 나타나며, 이 成層은 점차 확대되어 중층에까지 발달한다. 이에 따라 저층 용존산소는 급격히 감소하고, 7월 하순에서 8월 사이에 저층 부근은 거의 무산소상태이다. 이러한 저층 부근의 저산소층은 일반적으로 海底地形 및 海況條件에 따라 변동이 심하며, 최악의 경우는 중층 이상까지 저산소층이 확장되기도 하면서 하계동안 유지되다가 9월 이후 기온의 하강과 더불어 成層이 소멸되고 동시에 저산소수괴도 회복된다. 그러나, 1989년은 10월 중순까지 저산소수괴가 장기간 형성된다. 이와 같이 저산소수괴의 출현 또는 형성 시기는 해역 및 연도에 따라 차이가 있으며, 日本의 大村灣은 7월 이후에 발생하여 8월에서 9월 사이에 盛期를 이루었다가 10월경 소실된다(森, 1961). 日本 九州의 Tomioka에서는 5월에 저산소수괴가 형성되기 시작하여 7월말경 완전히 무산소상태를 보이다가 10월에 消失된다고 한다(Tsutsumi and Kikuchi, 1983). Joh(1989)는 大阪灣 저층수의 저산소화는 5월부터 점차적으로 進行하여 日射量이 최고로 강한 8월에 가장 뚜렷하고, 9월에 들어 垂直混合에 의해서 급격히 해

소되는 경향을 나타낸다고 하였다. 한편, Richards (1965), Jorgensen(1980), Rachor(1980)에 의하면 溫帶 해역에서 나타나는 저층 저산소수괴는 일반적으로 수온이 상승하는 봄철에 나타나기 시작하여 늦여름철인 8~9월에 가장 발달하다가 水溫躍層이 사라지는 10월이면 解消되는 週期성을 나타낸다고 하였다.

2. 기상조건에 따른 저산소수괴의 변화

저산소수괴의 형성과 기상변동과는 상당히 깊은 관련이 예상되며, 조사정점 3에서 저층의 용존산소飽和率, 표·저층수의 수온차, 日平均氣溫, 日照時間, 降水量 및 日平均 風速을 연도별로 Fig. 4에서 Fig. 6까지 나타내었다.

조사가 시작된 1989년 7월 20일경은 이미 저층수가 강한 저산소상태를 나타내고 있었고, 그러한 상태가 9월 중순까지 지속되다가 9월 하순부터 약간 회복기미를 보였으나, 다시 10월 중순에는 7~8월보다 더 심한 저산소 상태를 나타낸 후 급격히 회복되는 특이한 양상을 나타내었다. 저산소수괴의 변동과 표·저층 수온차를 비교해 보면, 9월 중순까지는 저산소수괴의 형성에 水溫躍層의 영향이 크게 미친 것으로 나타났으나, 10월 중순에 저산소

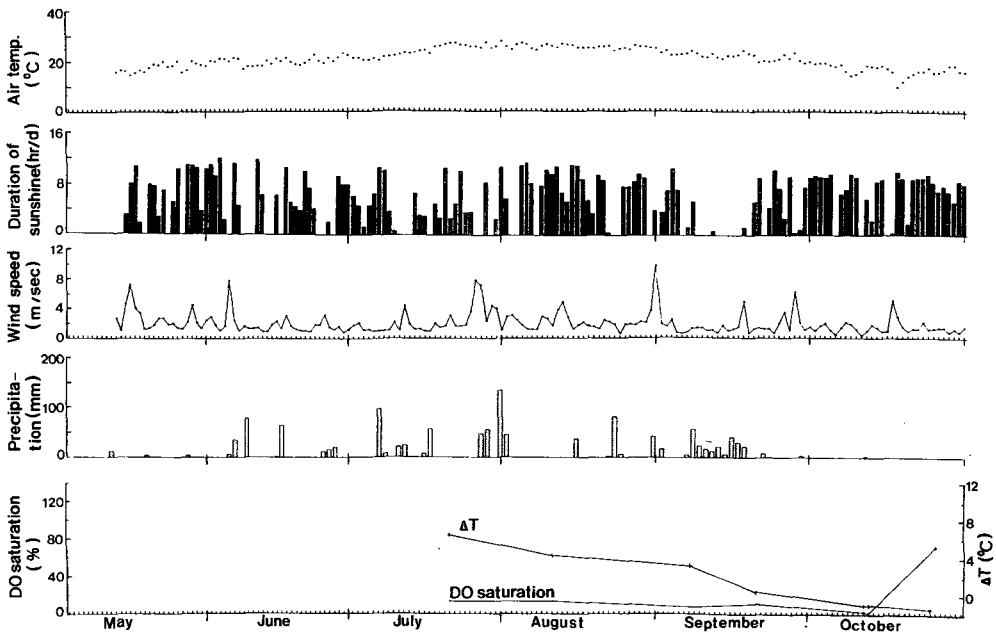


Fig. 4. Time serial changes of meteorological conditions, DO saturation in the bottom layer and difference(ΔT) of water temperature between surface and bottom layer at station 3 in 1989.

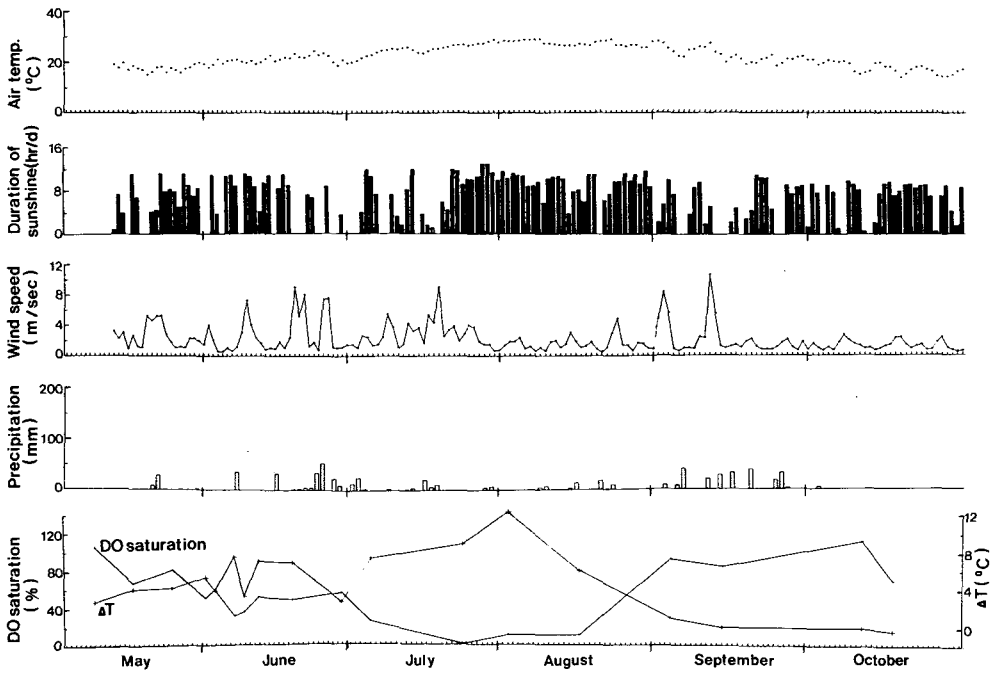


Fig. 5. Time serial changes of meteorological conditions, DO saturation in the bottom layer and difference(ΔT) of water temperature between surface and bottom layer at station 3 in 1990.

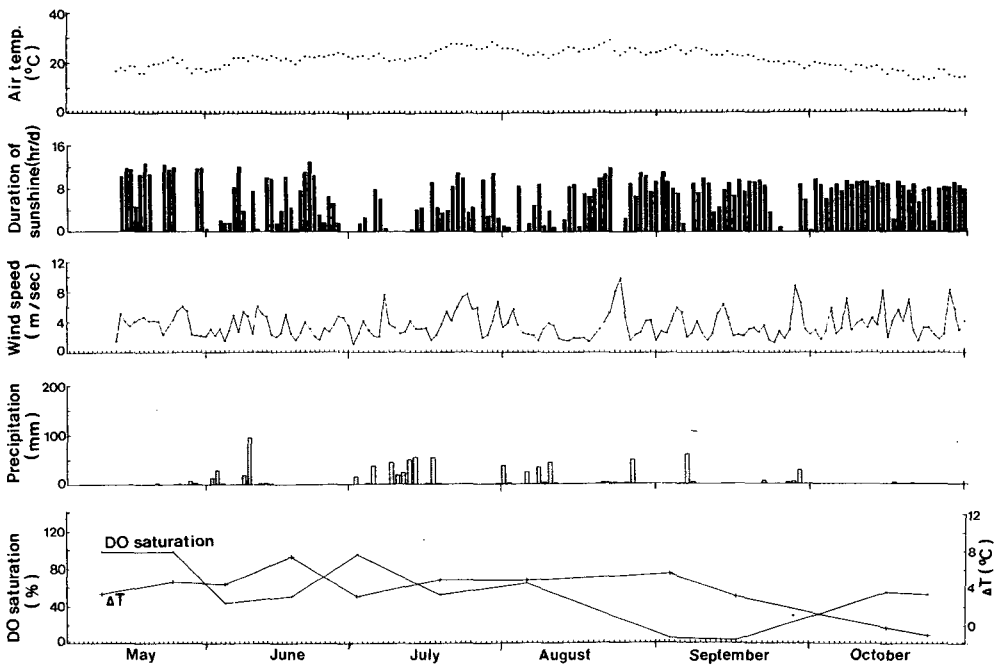


Fig. 6. Time serial changes of meteorological conditions, DO saturation in the bottom layer and difference(ΔT) of water temperature between surface and bottom layer at station 3 in 1991.

수괴가 재 형성될 때는 표·저층 수온차가 상당히 작은 상태이었다. 따라서 그 당시 저산소수괴는 水溫躍層과는 관련이 적은 것으로 예상된다. 즉, 9월 하순부터 용존산소가 약간 상승하는 것은 氣溫이 下降局面에 접어들었고, 또 9월 초순에서 중순까지 계속된 降雨과 日照時間의 단축 등으로 회복기미를 보이다가, 9월 하순경 동 해역에 상당히 심한 赤潮가 발생하였다(國立水産振興院, 未發表). 이는 9월 초순부터 중순까지 降雨가 이 지역의 적조발생에 큰 영향을 미친 것으로 생각되며, 이때 발생한 赤潮生物의 死體가 저층에 퇴적, 분해하면서 용존산소를 급격히 소비하였기 때문에 10월 중순에 극심한 저산소수괴가 형성된 것으로 추측된다.

1990년은 5월 하순까지 표·저층 수온차가 적고, 기온도 낮으며, 降雨量도 적어 저층 용존산소 飽和率이 80% 정도를 유지하였으나, 5월말에서 6월초에 걸쳐 약 1주일 이상 日照時間이 많고 降雨가 없는 날씨가 계속되면서 표·저층 수온차가 커져 저층 용존산소 飽和率이 약 50%로 급격히 저하되고, 특히 6월 6일에서 6월 8일 사이에는 포화율이 약 30%까지 떨어졌다. 그 후 6월 중순에서 하순까지는 장마 및 제5호 颱風 OFFLIA 등 심한 기상변동으로 저층 용존산소는 保合勢를 보였다. 7월 중순 제7호 颱風 ROBYN의 영향에도 불구하고 표·저층 수온차가 크고, 저층 용존산소의 飽和率은 20% 이하로 급격히 낮아져 7월 하순에는 거의 무산소상태를 기록했다. 이러한 상태가 8월 중순까지 지속되다가 8월 하순의 제14호 颱風 ZOLA와 제15호 颱風 ABE가 영향을 미친 후부터 표·저층 수온차가 작아졌고, 저층 용존산소 역시 회복되기 시작하여 9월초에는 飽和率이 90% 이상이었다. 그 후 9월 9일에서 9월 12일 사이의 제17호 颱風 DOT의 영향으로 저층 용존산소는 지속적인 회복 추세로 이어졌다.

1991년은 타 년도에 비하여 기상 변동이 상당히 심하였고, 표·저층 수온차도 예년보다 훨씬 작았다. 특히, 1991년 8월초순의 기온은 예년에 비해 훨씬 낮았고 표·저층 수온차도 작았으며, 하계의 日照時間 역시 타 년도보다 훨씬 불규칙하고 짧았다. 따라서 8월까지 저층 용존산소는 감소 또는 회복을 반복하다가 9월 초순부터 급격히 저하하여 飽和率이 약 3~5%로 최저를 기록하다가 9월 하순 이후 정상적으로 회복되는 경향을 나타냈으며, 3개년중 가장 늦게, 가장 짧은 기간동안 저산소 상태를 보였다.

한편, Hong(1987)에 의하면 하계 停滯期에 閉鎖

性 또는 半閉鎖性 內灣에서 흔히 나타날 수 있는 成層이 저층 부근의 저산소수괴 형성에 크게 영향을 미치며, 이러한 成層이 형성되기 위한 물리적으로 요인은 일반적으로 水溫上昇, 降雨量의 증가 등이라 하였다. Richards(1965)는 하계 수괴의 停滯에 의한 成層의 발달과 플랑크톤의 이상 증식이 저층 저산소수괴 형성 및 확장에 깊은 관계가 있다고 하였다. 따라서, 본 연구기간중 정점 3에서 저층수의 용존산소 농도는 표·저층간의 수온차에 의해 변화되고 있으며, 기온, 日照時間, 바람 및 降雨量에 의해서 저산소수괴의 시간적 변동이 크게 좌우됨을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 元門灣에서는 北半球 中緯度 地方 沿岸水域의 계절 변동 특성과 유사한 형태로 成層構造가 형성, 소멸되며 이와 더불어 저층 용존산소의 농도가 변화하고 있으나, 매년 그 해의 기상 및 해양 조건에 따라서 크게 변화됨을 알 수 있다.

3. 저산소 수괴형성에 따른 영양염류의 농도변화
元門灣의 저산소수괴 출현 시기는 연도별로 여러가지 요인에 의하여 달라지지만, 대체적으로 5~6월경부터 저하하기 시작하여 7~8월경에는 1mg/l 전후의 저산소 또는 거의 무산소 상태를 나타내다가 9~10월경에 회복되는 경향을 보이고 있다.

한편, 저산소 또는 거의 무산소 수괴가 출현할 때 표·저층수중 영양염의 농도변화를 알아보기 위해 정점 2와 3에서 측정된 저층의 평균 용존산소 飽和率과 표·저층의 溶存無機磷(DIP), 溶存無機窒素(DIN), 암모니아질소(NH₄-N)의 시간적 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

1989년의 경우 溶存無機磷(DIP)은 7, 8, 9월에는 표층보다 저층에서 월등히 높은 농도를 보이다가 10월초 垂直混合과 더불어 표·저층 농도차가 작아졌다. 10월 중순의 거의 무산소 상태에서는 표·저층의 농도차가 다시 커진다. 이와 같이 저층 용존산소의 저하와 더불어 표층에 비하여 저층수중의 溶存無機磷 농도가 높아지는 경향은 1990년과 1991년도도 비슷하였으며, 저층 용존산소 농도가 정상적으로 회복된 시기는 오히려 표층이 저층보다 고농도를 나타내거나 거의 같은 농도를 보였다. 이와 같이 저산소 또는 무산소 환경하에서 저층수중 溶存無機磷 농도가 높은 것은 유기물 함량이 높은 해저 퇴적물로부터 다량의 磷이 용출되기 때문이라고 생각된다.

溶存無機窒素의 경우도 溶存無機磷과 거의 비슷

한 변화를 나타내고 있으나, 용存無機磷과 같이 표·저층 농도차가 크지 않고, 또 어떤 시기는 반대경향을 나타내는 경우도 있었다. 그러나 암모니아 질소의 경우는 용存無機磷과 비슷한 경향으로 용存無機窒素보다 표·저층 농도차가 컸다. 즉,還元狀態의 저층으로부터 窒素의 용출은 窒素의 3가지 형태중 암모니아 질소 형태로 용출됨을 示唆한다.

한편, 상기 서술한 저층 용존산소의 저하와 더불어 저질로부터의 영양염 용출 특성, 특히 磷酸磷과

의 相關性을 알아보기 위해 용존산소가 저하되는 6월에서 10월까지 주로 하계에 3개 정점의 자료를 년도별로 AOU(Apparent Oxygen Utilization)와 磷酸磷과의 關係를 Fig. 8에 나타내었다. 1991년을 제외하면 2개의 직선으로 나타낼 수 있었다.

즉, 1989년과 1990년은 AOU 4~5mg/l 이하에서는 AOU 약 4.2mg/l(3ml/l)에 대해 磷濃度가 1µg-at/l로 유기물 분해 모델(Redfield *et al.*, 1963)에서의 窒素와 磷의 농도 비와 비슷하다. 즉, 저산소화가 그다지 심하지 않을 경우 유기물분해에 소비되

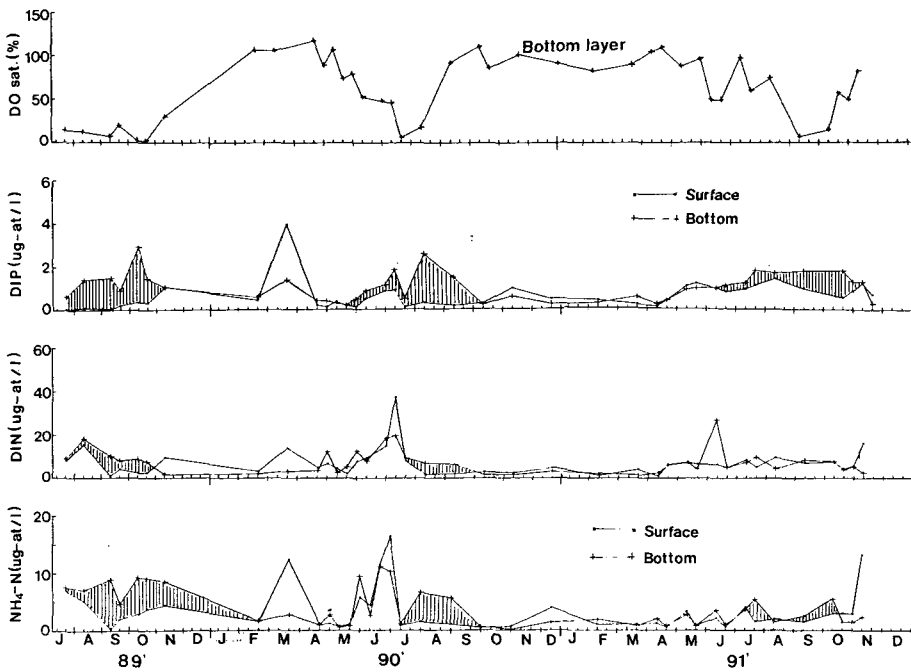


Fig. 7. Time serial variations of mean DO saturation only in bottom water and nutrient contents in seawater at station 2 and 3 during three years.

Shadow shape indicates higher contents in bottom layer then surface water.

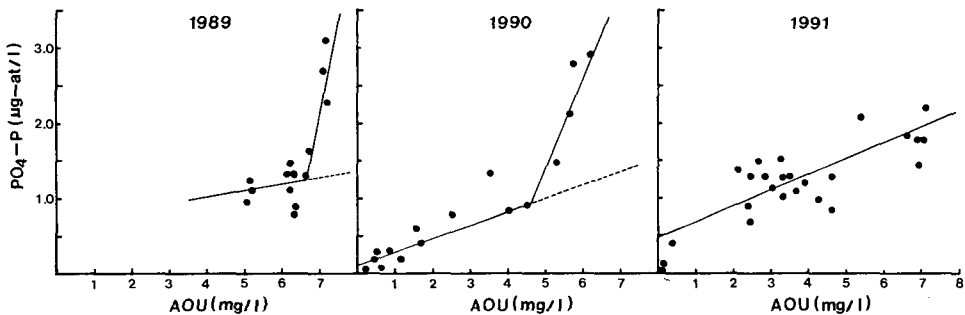


Fig. 8. Plots of phosphate versus AOU in the bottom water at all 3 stations from May to October in each year.

는 산소량에 相應하는 濃도를 보인다. 그러나, AOU가 4~5mg/l 이상의 강한 저산소수괴에서의 급격한 기울기는 還元環境下에서 저질층에 존재하는 磷이 海水중으로 용출하고, 유기물 분해에 따라 재생되는 溶存無機磷이 합쳐져서 고농도를 나타내는 것으로 추측할 수 있다. 이와 같은 저산소수괴의 출현은 연안해역 수산생물에게 용존산소의 缺乏으로 인한 직접적인 피해를 줄 뿐만 아니라 저층의 고농도 영양염이 鉛直混合에 의하여 上層部로 공급될 경우 富營養化와 赤潮發生과 같은 2차적인 영향을 주게 된다.

4. 유기물의 適正負荷量 算定

元門灣에서 출현하는 저산소수괴는 기상 변동에 의하여 그 형성 구조가 크게 좌우되나, 근본적으로 이러한 저산소수괴의 형성은 해수의 成層現象과 自淨能力 범위를 초과하는 유기물의 과다부하로 저층에서 산소 소비가 큰 것에 기인한다고 볼 때, 유기물 부하를 인위적으로 감소시킬 경우 이와 같은 산소저하 현상은 어느 정도 막을 수 있을 것으로 생각된다.

따라서, 1989년부터 1991년까지 관측한 자료중에서 년도별 차이는 있으나, 1990년의 관측 자료로 볼 때 대체적으로 용존산소 농도가 낮아지는 시점을 5월로, 회복하는 시점을 9월경으로 보고, 우선 의 부로부터의 오염부하, 자체 오염부하 및 산소 저하기에 해저면으로부터 2차적인 오염부하까지 고려될 수 있는 정점 2에서 1990년 4월부터 1990년 10월까지 海底 隣接層에서 오전 11시부터 오후 3시 사이에 관측한 용존산소 농도의 변화는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 시간에 따른 용존산소 변화 곡선은 $DO(ml/l) = 9.99 - 0.21 \times (\text{day}) + 0.0015 \times (\text{day})^2 - 0.0000023 \times (\text{day})^3 + \dots$ 와 같은 식으로 나타낼 수 있다. 그리고, 元門灣의 酸素消費 및 供給係數를 구하기 위하여 경계조건으로 5월 3일을 기준으로 하여 6월 2일, 7월 1일로 각각 구분하였고, 이때 용존산소 농도는 각각 4.71ml/l, 1.50ml/l,

0.65ml/l이었다. 이 값을 (5)식과 (6)식에 대입하여 酸素消費係數(L)와 酸素供給係數(I)를 구하고, Fig. 9에서의 최저 산소농도 0.65ml/l(C_3)를 계획농도 3.52ml/l(C_p) 수준으로 유지시키기 위해 요구되는 單位 水容積當 酸素供給量(O_d)은 (7)식에 의하여 계산하였으며 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에서 보는 바와 같이, 酸素消費係數는 0.0458/day, 酸素供給係數는 0.0157ml/l/day였다. 또한, 臨界點의 酸素濃度を 3.52ml/l(海域 II等級基準)以上 維持하기 위해 體積當 供給해야할 酸素量(O_d/V)은 0.141ml/l/day였다. 따라서, 元門灣의 하계 저산소 또는 무산소화를 방지하고 해역 II등급 수질상태(DO로서 3.52ml/l 이상)를 유지하기 위해서는 하루에 0.141ml/l만큼의 산소를 강제 공급하거나 혹은 그 산소량에 상당하는 유기물 流入 負荷量을 감소시켜야 할 것으로 생각된다.

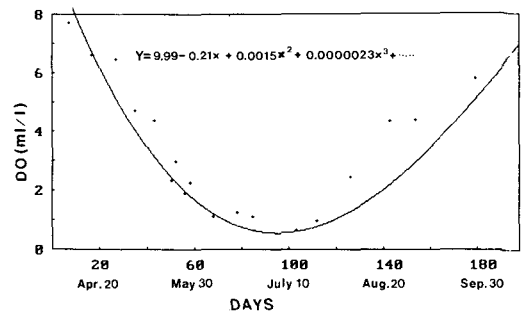


Fig. 9. A regression curve of dissolved oxygen in the bottom water at station 2.

要 約

元門灣에 대하여 저산소수괴의 출현 및 계절적 변동특성을 구명하고, 하계 저층용존산소를 일정 수준 이상으로 유지하기 위한 適正汚染負荷量 산정을 위하여 1989년 7월부터 1991년 12월까지 약 2년 6개월 동안 조사한 결과를 요약하면 다음과

Table 1. Boundary conditions for Nakamura's equation and calculated values

Periods (Declaration Critical point)	Item	C_1 (ml/l)	C_2 (ml/l)	C_3 (ml/l)	L (day ⁻¹)	I (ml/l/day)	$O_d/V(ml/l.day)$	Remark
							$C_p =$ 海域 II等級維持	
May 3~July 1 (58 days)		($t_1 =$ May 3) 4.71	($t_2 =$ June 2) 1.50	($t_3 =$ July 1) 0.65	0.0458	0.0157	0.141	$C_p = 3.52$ ml/l

같다.

1. 저산소수괴의 계절적 변동은 매년 그해의 해양변동에 따라 크게 다르며, 1990년과 1991년은 하계 成層의 형성과 더불어 저층에서의 용존산소 저하현상이 나타났으며, 특히 1990년 元門灣에서는 대체적으로 봄부터 용존산소의 저하가 시작되어 여름에는 강한 저산소 또는 무산소수괴가 형성되었다가 가을에 회복되는 양상을 나타내고 있다.

2. 저산소수괴의 시공간적 변동은 기온, 일조시간, 강우량, 바람 등에 의한 수직성층의 변동과 밀접한 관계를 나타내며, 그 해역에서의 적조발생은 저산소수괴 형성을 촉진시키는 것으로 생각된다.

3. 저층 용존산소 농도가 낮은 시기에는 영양염 농도가 표층에 비하여 저층에서 높은 분포였으며, 저층 산소가 정상적으로 회복된 시기에는 표·저층 영양염 농도가 비슷하거나 오히려 표층에서 높은 농도를 나타냈다. 또한, AOU와 磷酸磷과의 상관성으로부터 AOU 4~5mg/l 이하에서의 직선과 AOU 4~5mg/l 이상에서의 급격한 기울기를 가진 2개의 직선으로 나타났다.

4. 1990년 元門灣의 시간에 따른 용존산소 변화 곡선은 $DO(ml/l) = 9.99 - 0.21 \times (\text{day}) + 0.0015 \times (\text{day})^2 - 0.0000023 \times (\text{day})^3 + \dots$ 와 같이 나타낼 수 있었고, 酸素消費係數 0.0458/day, 酸素供給係數 0.0157ml/l/day로서 臨界點의 산소농도를 3.52ml/l 이상으로 유지시키기 위해 공급되어야 할 산소량은 0.141ml/l/day였다.

參 考 文 獻

- 崔禹政·羅琪煥·全永烈·朴清吉. 1991. 富營養化 된 北灣의 溶存酸素 收支에 의한 自淨能力. 韓水誌 24(1), 21~30.
- 飯塚昭二·関霧虹. 1989. 大村灣における無酸素水塊の形成. 沿岸 海洋 研究ノート 26(2), 75~86.
- 森勇. 1961. 大村灣の苦潮について. 日水誌 27(5), 389~394.
- 城久. 1989. 大阪灣の貧酸素 水塊. 沿岸 海洋 研究ノート 26(2), 87~98.
- 城久·失持進·安部恒之·河合章. 1984. 大阪灣の貧酸素低層水における無機營養鹽濃度について. 日水誌 50(10), 1693~1700.
- 中村 允·杉浦正悟. 1975. 漁場低層水のDO消費に關する實驗的 研究. 農業土木試驗場報告 13, pp. 207~214.
- 中村 允·杉浦正悟·但馬創. 1976. 灣におけるDO收支に關する研究. 第23會 沿岸工學論文集 pp. 539~544.
- 風宮田利夫. 1988. 東京灣にめける貧酸素水の底棲附着動物群集にあたる影響について. 沿岸海洋研究ノート 25(2), 104~113.
- Hong, J. S. 1987. Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay System, Korea. J. Oceanol. Soc. Korea 22(4), 246~256.
- Jorgensen, B. B. 1980. Seasonal oxygen depletion in the bottom waters of a Canish Fjord, and its effect on the benthic community. Oikos 34, 68~76.
- Rachor, E. 1980. The inner German Bight-an ecologically sensitive area as indicated by the bottom fauna. Helgolander Meeresunters. 33, 522~530.
- Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. *The sea*, Vol. 2, M. H. Hill, ed. Wiley, New York, pp. 26~27.
- Richards, F. A. 1965. Anoxic basins and fjords *In* Chemical Oceanography, Vol. 1, ed. Academic Press. pp. 611~645.
- Sasaki, K. 1989. Mechanism of Oxygen deficient water formation in Mikawa Bay. Bull. Coastal Ocean. 26(2), 109~118.
- Tsutsumi, H. and T. Kikuchi. 1983. Benthic ecology of a small cove with seasonal oxygen depletion caused by organic pollution. Publ. Amakusa Mar. Biol. Lab. 7(1), 17~40.

1993년 6월 3일 접수

1993년 7월 7일 수리