

생태계 모델을 이용한 마산만 퇴적물 준설이 수질에 미치는 영향 정량평가

김진호* · 김동명**†

*, ** 부경대학교 생태공학과

Quantitative Assessment of the Effects of Sediment Dredging on Water Quality in Masan Bay using Ecosystem Model

Jin-Ho Kim* · Dong-Myung Kim**†

*, ** Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 46513, Korea

요 약 : 퇴적물 준설은 수생태계에서 오염물질을 영구적으로 제거하는 것으로 수생태계 복원에 있어서 효율적인 방법으로 여겨진다. 본 연구에서는 수괴의 산소 요구율의 계산을 통해 마산만의 퇴적물 준설이 수질에 미치는 영향을 정량화하였다. 이를 위해 수질 및 저질 모델이 포함된 생태계 모델을 마산만에 적용시켰다. 모델 계산 결과, 육상 오염원이 감소할수록 수괴의 산소 요구율이 다소 증가한 반면에 만내측과 만외측의 준설에 의해서는 산소 요구율이 크게 증가하였다. 이러한 결과는 퇴적물 준설이 마산만 수질을 더욱 개선시킬 수 있음을 의미한다. 산소 요구율과 퇴적물 산소 요구량의 상관관계식을 통해 육상 부하량 10% 감소에 의한 수질 개선효과에 상당하는 퇴적물 준설 면적이 만내측에서는 1.68 km²이며, 만외측에서는 3.15 km²임을 계산하였다. 이는 마산만 수질 개선을 위해서는 만내측의 퇴적물 준설이 효율적 방법임을 의미한다.

핵심용어 : 마산만, 생태계모델, 퇴적물 준설, 산소 요구율, 정량평가

Abstract : Sediment dredging can permanently remove pollutants from an aquatic ecosystem, which is considered an effective approach to aquatic ecosystem restoration. In this study, we quantified the effects of sediment dredging on water quality in Masan Bay by calculation of oxygen demanding rate. We applied ecosystem model including water and sediment quality module in Masan Bay. The results showed that the increase of calculated oxygen demanding rate is significant due to sediment dredging of both inner part and outer part of Masan Bay. On the other hand, the increase is gradual due to decrease of anthropogenic load. It meant sediment dredging can improve water quality of Masan Bay more. Using correlation equation between oxygen demanding rate and sediment oxygen demand, we calculated that the area of sediment dredging which is equal to the effects of 10% reduction of anthropogenic load. It is 1.68 km² in inner part and 3.15 km² in outer part of the Masan Bay. This Meant that to improve water quality of Masan Bay, sediment dredging in inner part is efficient method.

Key Words : Masan Bay, Ecosystem model, Sediment dredging, Oxygen demanding rate, Quantitative assessment

1. 서 론

대상해역인 마산만은 인천·시화연안, 광양만, 부산연안, 울산연안과 함께 5대 특별관리해역으로 지정되었으며, 2005년부터 연안오염총량관리제가 도입되어 수질이 개선되고 있다(MOF, 2007; MLTMA, 2008; MLTMA, 2011; MOF, 2014).

하지만, 여전히 수질 저하와 빈산소수괴 발생에 의한 생태계 교란은 매년 반복되고 있다(Lee et al., 2008; Lee et al., 2010; Kwon et al., 2014). 또한, 퇴적물에 있어서도 난분해성 물질, 중금속 등에 의한 오염이 지속되며 이로 인한 저서생태계가 파괴되고 있다(Woo et al., 2007; We et al., 2010). 이러한 문제를 해결하기 위해서 일반적으로 퇴적물 준설을 통해 내부 생성 오염부하를 저감시키고 해역의 수질을 개선하는 방법이 많이 적용된다.

* First Author : tool20@naver.com, 051-629-6545

† Corresponding Author : dmkim@pknu.ac.kr, 051-629-6545

퇴적물 준설은 수서 생태계의 바닥 퇴적물 표면에 있는 오염물질을 영구적으로 제거하는 것으로 주로 호소에서 생태계 복원의 한 방법으로 사용되고 있다(Hadnagy et al., 2015). 이러한 방법은 수서 생태계 복원을 위한 이상적인 방법이 아니기 때문에 여전히 그 효과에 대해서는 논쟁이 되고 있다(Yu et al., 2016). 하지만, 전 세계적으로 수서 생태계의 퇴적물에서 유입되는 내부 오염원 부하를 제거하기 위한 방법으로 퇴적물 준설이 수행되고 있으며, 미국에서는 연간 $10.7 \times 10^6 \sim 21.4 \times 10^6$ m³의 퇴적물이 준설되고 있다(Ravikrishna et al., 2002).

이러한 퇴적물 준설에 의한 수질 개선 효과를 분석하기 위해서 COD가 활용된다(Cho et al., 2002). COD는 수괴에서 산소를 소모하는 유기물을 측정하기 위한 2차 지표에 해당하며, 저질 개선효과에 대한 반영에 난점을 가지고 있다. 이와는 달리, 본 연구에서 사용한 산소 요구율(Oxygen demanding rate)은 식물플랑크톤의 광합성, 동·식물플랑크톤의 호흡, 질산화, 탈질, 재폭기, 유기체설물의 분해, 용존 유기물의 무기화, 퇴적물의 산소 소모로 구성되어 있어 육상오염원의 저감효과나 퇴적물 준설에 의한 수질 개선 효과를 잘 파악할 수 있다. 퇴적물 준설에 의한 수질 개선의 효과에 대한 연구는 호소 및 하천에서 이루어지고 있으며(Cho et al., 1996; Jun and Kim, 1990; Zhang et al., 2010; Kim et al., 2013; Manap and Voulvoulis, 2016; Rehman et al., 2016), 연안역에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 퇴적물 준설에 의한 해역의 수질 개선 효과를 정량화하기 위해 생태계모델을 이용하여 퇴적물 준설에 따른 수층 산소 요구율의 변화량을 산정하였다. 또한, 육상 부하량 삭감에 의한 수질 개선 효과와 비교하여 퇴적물 준설에 따른 수질 개선 효과를 정량적으로 평가하였다.

2. 연구방법

본 연구에서 선행된 연구(MLTMA, 2008)에서 수립된 생태계 모델을 토대로 동일한 매개변수를 이용하여 시나리오 분석을 통해 연구를 추진하였다. 사용한 생태계모델은 2008년 마산만 특별관리해역의 1차 연안오염총량관리제 도입 및 시행을 위해 구성된 EM3(Ecological Model for Marine environmental Management)이다. EM3는 식물·동물플랑크톤, 용존 유기물질, 영양염 등의 수질인자와 저질 현탁태 유기물질, 저질 용존 유기물질, 저질 영양염 등의 저질인자로 구성되어 있다(Fig. 1). 생태계 내 입의 지점에서 수질인자 현존량(Q)의 시간에 따른 농도변화는 다음의 식(1)과 같은 확산방정식에 의해 계산된다.

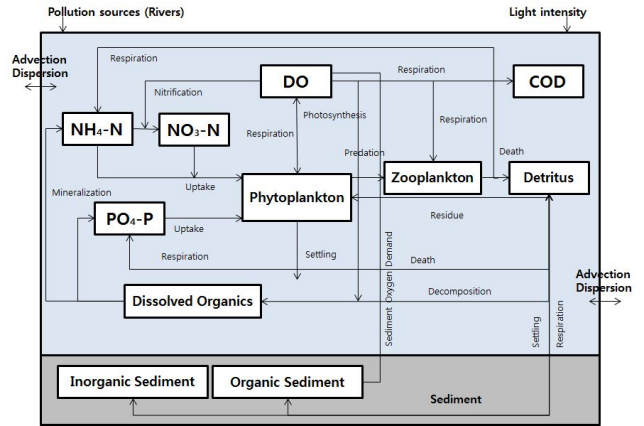


Fig. 1. The schematic diagram of ecosystem model.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -u \frac{\partial Q}{\partial x} - v \frac{\partial Q}{\partial y} - w \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial Q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial Q}{\partial z} \right) + \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

여기서 u, v, w는 x, y, z방향의 유속성분을 나타내며, K_x, K_y, K_z는 각 방향의 와동확산계수를 나타낸다. dQ/dt는 생물·화학적 과정에 의한 단위시간당 변화량을 의미한다. Park et al.(2010)과 Jung et al.(2016)의 연구를 통해 EM3 모델의 적용성이 검증된 바 있다.

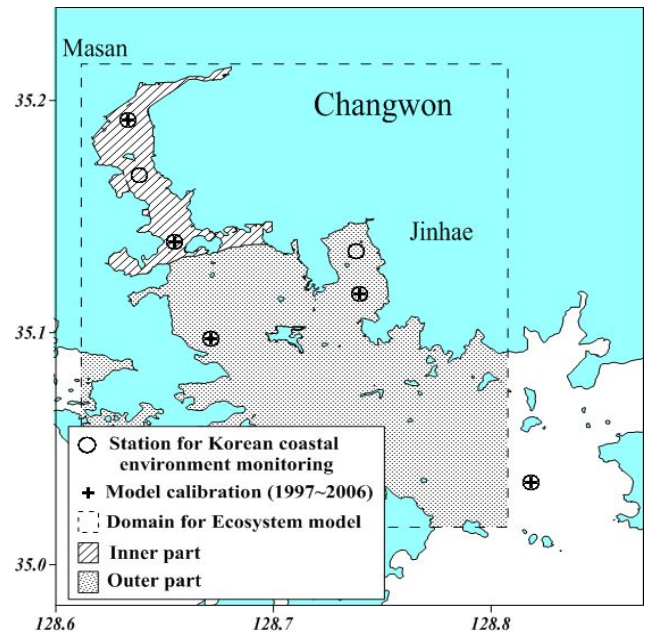


Fig. 2. Domain of ecosystem model of study area, monitoring station and the area of inner and outer part for comparative analysis of sediment dredging.

생태계 모델을 이용한 마산만 퇴적물 준설이 수질에 미치는 영향 정량평가

Table 1. Observed oxygen consumption rate, phosphate release rate and nitrate release rate in Masan Bay (MLTMA, 2008).

Area	Sediment oxygen consumption rate ($\text{mgO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)	Phosphate release rate ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)	Nitrate release rate ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)
Inner part	1,500	6.66	37.0
Outer part	800	2.98	11.3

퇴적물 준설에 의한 수질 개선 효과 비교를 위한 퇴적물의 용존산소 소모율과 인, 질소의 용출율은 2006년의 5회 관측값을 평균하였으며, 퇴적물의 오염도를 고려하여 2개의 해역으로 구분하여 적용하였다(Fig. 2, Table 1). 만 내측영역의 면적은 약 18.38 km^2 이며, 만 외측은 약 162.23 km^2 이다. 선행연구(MLTMA, 2008)에서 국립수산과학원의 해양환경측정망자료(1997~2006) 중, 마산만 특별관리해역 범위 내의 5개 정점에 대한 5월과 8월의 자료를 이용하여 생태계모델의 검증 수행하였으므로 본 연구에서는 이를 생략한다(Fig. 2).

생태계 모델의 수질 농도는 일반적으로 격자 간의 물리적 이동량과 생물학적 과정량의 합으로 계산된다. 수괴 내에서

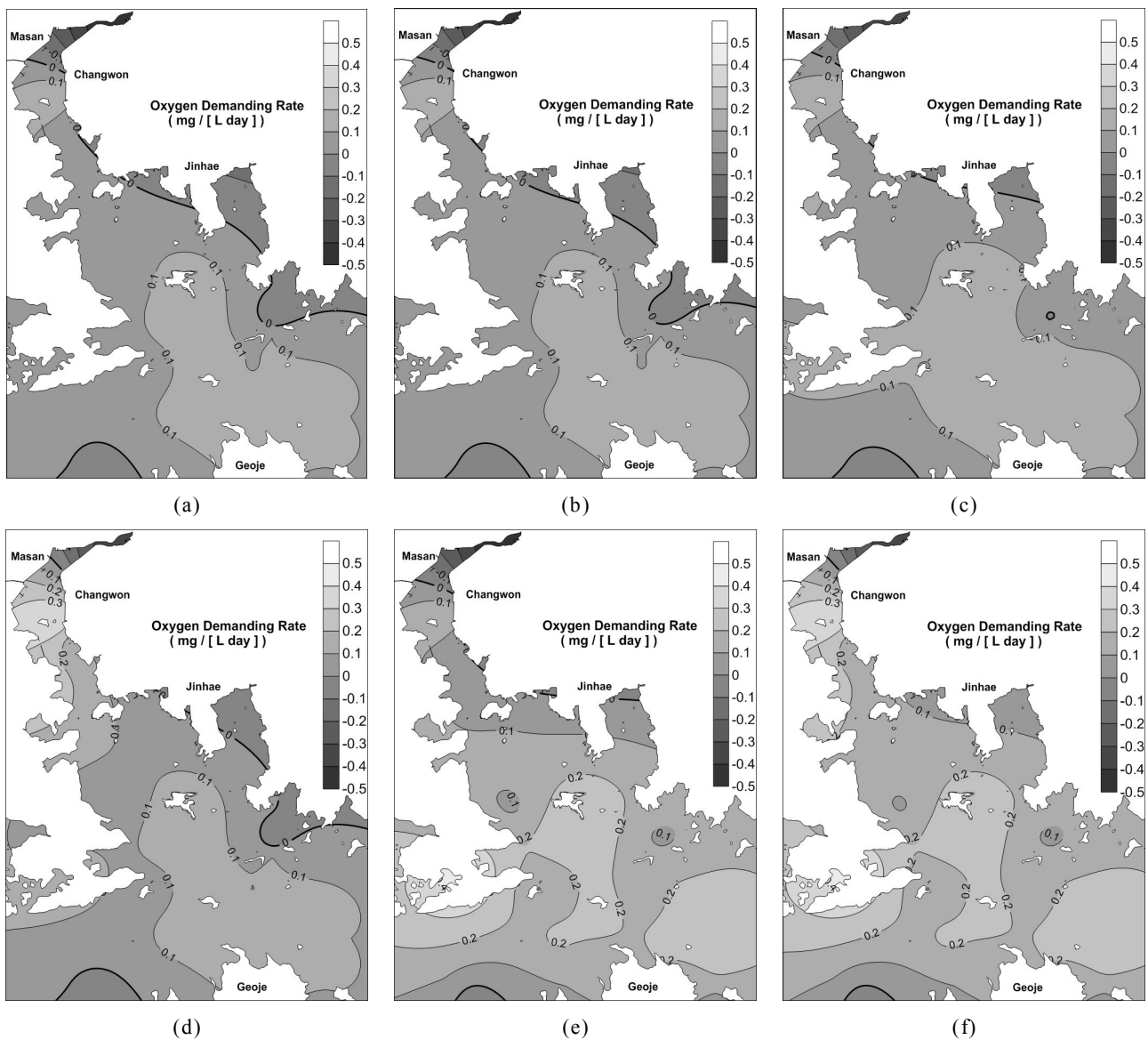


Fig. 3. Spatial distribution of oxygen demanding rate for (a) current status (2008), (b) 10% reduction, (c) 50% reduction of anthropogenic load, (d) dredging on inner part, (e) outer part and (f) all part.

산소 농도의 변화 = (a) 재폭기에 의한 유입 + (b) 기초생산에 의한 산소 생산 - (c) 생물의 호흡 - (d) 유기물의 무기화 및 산화과정 - (e) 퇴적물의 산소소모이다. 산소 요구율의 증감은 이 중에서 f(b, c, d, e)에 의한 생화학적 과정에 의해 단위시간당 산소 농도의 변동을 산소 요구율로 나타낸다. 특히, 퇴적물 준설에 의한 산소 요구율의 증감은 본 항 중에서 (e) 퇴적물의 산소소모 값을 생태계 모델에서 줄여 줄 때 퇴적물 상층의 수층에서의 용존산소 변화 추이를 살펴보는 것이다.

본 연구에서는 퇴적물 준설에 따른 수질 개선의 효과를 비교하기 위해서 2008년에 수립된 모델결과를 기준(current status)으로 육상 부하량을 각각 10~50%까지 10% 간격으로 순차적으로 삭감하였을 경우와 만 내측 및 외측, 만 전체의 퇴적물을 준설할 경우로 총 9개의 case를 구성하였다. 각 case별로 산소 요구율을 계산하였으며, 각 정점별로 계산된 산소 요구율을 전체 해역에 대하여 평균하여 수질 개선 효과를 정량적으로 비교하였다. 생태계 모델에서 준설된 해역에서의 퇴적물에 의한 산소소모 및 영양염 용출은 없으며, 준설된 퇴적물에 의한 2차 오염은 없는 것으로 가정하였다.

3. 준설에 따른 수질 개선 효과

각 case별로 계산된 산소 요구율의 공간분포는 Fig. 3과 같다. 산소 요구율의 변화량이 작은 20%, 30%, 40% 삭감 결

과를 제외한 6개의 case를 비교하였다. 육상 부하량의 10%를 저감하였을 경우, 2008년 모델결과에 비해 산소 요구율의 변화량이 작아 그 차이를 확인할 수 없었다(Fig. 3(b)). 50%를 저감하였을 경우에는 외해에서 0.100 mg·L⁻¹·day⁻¹ 이상의 산소 요구율이 계산된 영역이 확장되는 것을 확인할 수 있어 수질개선의 효과를 확인할 수 있었다(Fig. 3(c)).

퇴적물 준설로 인한 수층 산소 요구율 변화를 살펴보면, 만 내측 준설의 경우 내만에서의 산소 요구율이 0.300 mg·L⁻¹·day⁻¹ 이상 계산되어 만내측의 수질 개선 효과를 확인할 수 있었다(Fig. 3(d)). 또한 만외측 준설의 경우, 외해에서 산소 요구율이 0.100 mg·L⁻¹·day⁻¹ 이상인 지역이 확대되며 해역 중앙부에서 0.200 mg·L⁻¹·day⁻¹ 이상 계산되는 것으로 나타나 수질 개선의 효과를 확인할 수 있었다(Fig. 3(e)). 전체 해역에 퇴적물 준설을 실시할 경우에는 전 해역에서 산소 요구율이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 내만과 외해에서 나타났던 특징들을 전 해역에 걸쳐 확인할 수 있었다.

각 case별로 계산된 산소 요구율의 정량적인 비교를 위해 전 정점에 대해 평균한 결과는 Fig. 4와 같다. 2008년 조건에서의 산소 요구율은 약 0.096 mg·L⁻¹·day⁻¹이 계산되었으며, 단계적으로 육상기인 오염부하량을 10% 간격으로 감소시켰을 경우에 각각 0.098 mg·L⁻¹·day⁻¹, 0.101 mg·L⁻¹·day⁻¹, 0.104 mg·L⁻¹·day⁻¹, 0.109 mg·L⁻¹·day⁻¹, 0.116 mg·L⁻¹·day⁻¹로 계산되었다. 부하량을 삭감함에 따라 산소 요구율이 증가하여 수질이 개선되는 것

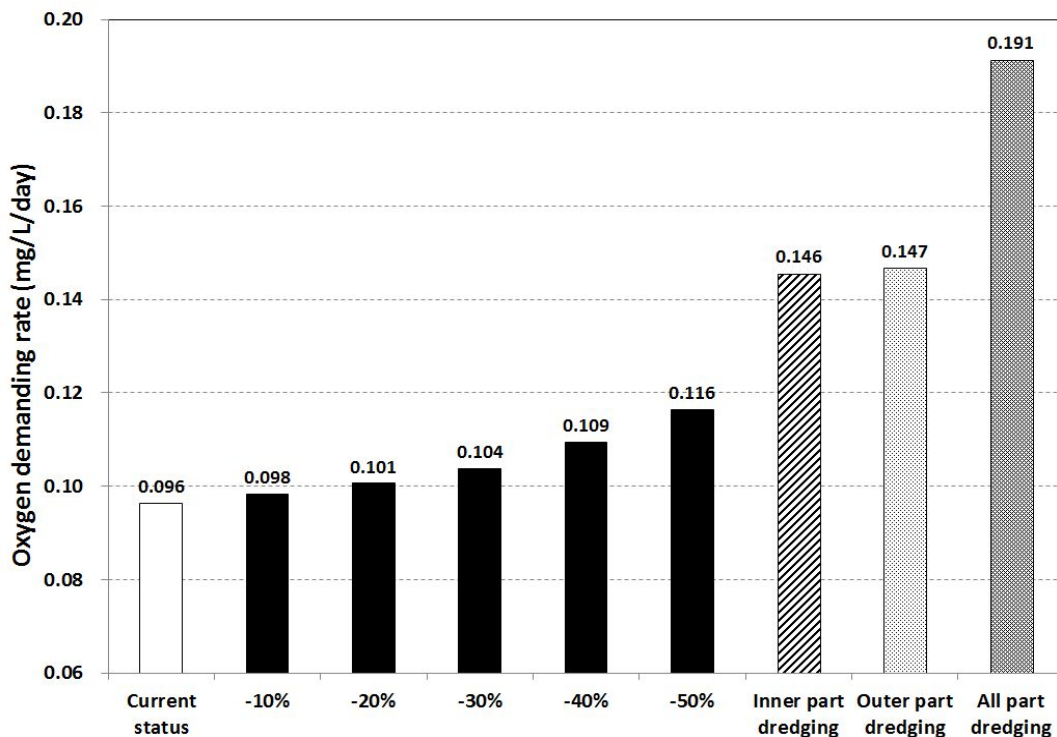


Fig. 4. Computed oxygen demanding rate for each case.

을 확인할 수 있었다. 이는 Yu et al.(2015)은 준설에 의해 퇴적물 내의 질소순환의 속도가 감소하며 수괴로의 영양염 용출량이 줄어들어 수질이 개선되는 것을 밝혔으며, Reddy et al.(2007)은 준설에 의해 인의 용출량이 431일 동안 약 11~38% 감소되는 것을 밝힌 것과 일치한다.

퇴적물 준설에 따른 산소 요구율에 있어서 만내측을 준설할 경우, $0.146 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$, 만외측을 준설할 경우에는 $0.147 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$, 전해역을 준설할 경우에는 $0.191 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ 의 산소 요구율이 계산되었다. 육상 부하량 저감에 비해 크게 수질 개선의 효과가 있는 것으로 판단할 수 있다.

생태계 모델의 계산을 통해 얻은 수괴의 산소 요구율과 퇴적물 산소 요구량과의 상관관계는 Fig. 5와 같다. 이 관계식을 통해 육상 오염 부하 10%를 저감할 경우 증가되는 산소 요구율 $0.002 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ 에 해당하는 퇴적물 산소 요구량은 $7.326 \times 10^4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ 이 계산된다. 이에 상당하는 준설 면적을 산정하기 위해 만내측의 산소 소모율 $1,500 \text{ mg O}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 을 적용하면 약 1.68 km^2 이 계산되며, 이는 만내측 면적의 9.1%에 해당한다. 또한, 만외측의 산소 소모율 $800 \text{ mg O}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 을 적용하면 약 3.15 km^2 이 계산되며, 만외측 전체 면적의 1.9%에 해당한다. 이러한 결과는 퇴적물 준설이 마산만의 연안오염총량관리를 통한 육상 부하량의 저감에 상당하는 수질 개선 효과를 얻을 수 있는 것을 의미한다. 또한, 만외측보다는 만내측의 퇴적물 준설이 수질 개선에 있어서 효율적임을 의미한다.

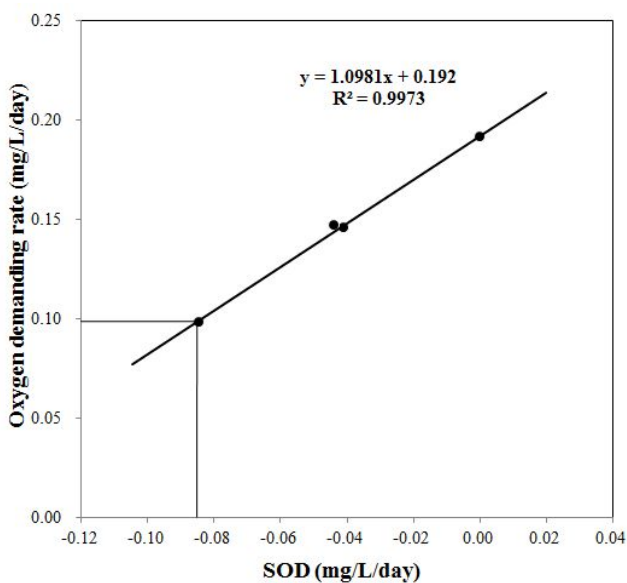


Fig. 5. Correlation between oxygen demanding rate and sediment oxygen demand (SOD).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 수질인자와 저질인자가 포함된 생태계 모델을 이용하여 마산만에서 퇴적물 준설에 따른 수질 개선 효과를 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 육상 부하량을 감소할 때와 퇴적물을 준설할 경우에 대한 시나리오를 구성하여 각각의 경우에 대한 산소 요구율을 계산하여 비교·분석하였다.

시나리오 분석 결과, 육상 부하량을 단계별로 저감함에 따라 산소 요구율이 증가하는 것으로 계산되어 수질 개선이 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 이러한 경향은 마산만 외해역 중앙에 집중되는 것으로 나타났다. 퇴적물 준설에 대한 산소 요구율 계산 결과에서는 육상 부하량 삭감 보다 수질 개선 효과가 큰 것으로 나타났으며, 퇴적물 준설된 해역에 수질 개선 효과가 집중되었다. 만내측과 만외측에서의 퇴적물 준설에 따른 산소 요구율은 유사하게 나타났다.

이렇게 계산된 산소 요구율과 퇴적물 산소 요구량의 상관관계식을 통해 육상 부하량 10%를 삭감할 경우의 수질 개선 효과에 상당하는 퇴적물 준설면적은 만내측에서 약 1.68 km^2 , 만외측에서는 3.15 km^2 로 계산되었다. 이를 통해 만외측보다는 만내측의 퇴적물 준설이 수질 개선에 있어서 가장 효율적인 것으로 판단할 수 있다. 추후, 마산 해양 신도시 건설에 따라 변화된 해안선, 해역의 용적 및 퇴적물 산소 요구량의 적용과 퇴적물 준설에 의한 퇴적물질의 재부유가 수질에 미치는 영향에 대한 연구를 수행할 필요가 있으며, 준설 면적뿐만 아니라, 퇴적물 깊이를 고려하여 총 퇴적물 준설량 (m^3)을 제시할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] Cho, H. J., K. Y. Han and S. H. Kim(1996), Water quality impact assessment due to dredging in the downstream of the Nakdong River, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 29, No. 3, pp. 177-186.
- [2] Cho, H. J., B. H. Lee, J. S. Kim and K. B. Lee(2002), Prediction of water quality variation caused by dredging urban river-bed, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 35, No. 2, pp. 137-148.
- [3] Hadnagy, E., K. H. Gardner, W. H. Chesner, H. Justus, M. Forgione and G. Maxwell(2015), Pilot-scale evaluation of an in situ amendment delivery and mixing device for contaminated sediment remediation applications, Journal of Soils and Sediments, Vol. 15, No. 2, pp. 480-489.

- [4] Jun, S. H. and H. J. Kim(1990), Dredging as water quality control measures in lake Kyungpo, *Journal of Korean Earth Science Society*, Vol. 11, No. 3, pp. 174-180.
- [5] Jung, W. S, S. J. Hong, W. C. Lee, H. C. Kim, J. H. Kim and D. M. Kim(2016), Modelling for pollution contribution rate of the land based in Masan Bay, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 22, No. 1, pp. 59-66.
- [6] Kim, E. S., K. B. Sim and B. S. Kal(2013), Analysis of water quality improvement by lake dredging, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 2, pp. 327-336.
- [7] Kwon, J. N., J. H. Lim, J. H. Shim and T. J. Choi(2014), The Long-term variations of water quality in Masan Bay, South Sea of Korea, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 17, No. 3, pp. 212-223.
- [8] Lee, C. W., H. P. Jeon and S. J. Lee(2010), Evaluation of heavy metal contamination for Bongam tidal flat sediments in Masan Bay, Korea, *Journal of Wetlands Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 15-20.
- [9] Lee, I. C., H. W. Kong and S. J. Yoon(2008), Numerical prediction for reduction of oxygen deficient water mass by ecological model in Jinhae Bay, *Journal of Engineering and Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 15-20.
- [10] Manap, N. and N. Voulvoulis(2016), Data analysis for environmental impact of dredging, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137, pp. 394-404.
- [11] MLTMA(2008), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Study on Total Pollution Load Management (TPLM) of Masan Bay, p. 706.
- [12] MLTMA(2011), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Introduction and implementation of Total Pollution Load Management (TPLM) of Masan Bay, a special management area, p. 980.
- [13] MOF(2007), Ministry of Oceans and Fisheries, Study on basic plan for Total Pollution Load Management (TPLM) of Masan Bay, p. 807.
- [14] MOF(2014), Ministry of Oceans and Fisheries, Study for implementation of Total Pollution Load Management (TPLM) of Masan Bay, a special management area, p. 650.
- [15] Park, S. E., S. J. Hong, W. C. Lee and R. H. Jung(2010), Summer water quality management by ecological modelling in Ulsan Bay, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-9.
- [16] Ravikrishna, R., K. T. Valsaraj, L. J. Thibodeaux, C. B. Price, J. M. Brannon and S. Yost(2002), Volatilization of contaminants from suspended sediment in a water column during dredging, *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 52, pp. 1214-1229.
- [17] Reddy, K. R., M. M. Fisher, Y. Wang, J. R. White and R. T. James(2007), Potential effects of sediment dredging on internal phosphorus loading in a shallow, subtropical lake, *Lake and Reservoir Management*, Vol. 23, pp. 27-38.
- [18] Rehman, M., A. R. Yousuf, M. H. Balkhi, M. I. Rather, N. Shahi, M. Meraj and K. Hassan(2016), Dredging induced changes in zooplankton community and water quality in Dal lake, Kashmir, India, *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 141-149.
- [19] Yu, J., C. Fan, J. Zhong, L. Zhang, L. Zhang, C. Wang and X. Yao(2016), Effects of sediment dredging on nitrogen cycling in lake Taihu, China: Insight from mass balance based on a 2-years field study, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 23, No. 4, pp. 3871-3883.
- [20] Zhang, S., Q. Zhou, D. Xu, J. Lin, S. Cheng and Z. Wu(2010), Effects of sediment dredging on water quality and zooplankton community structure in a shallow of eutrophic lake, *Journal of Environmental Science*, Vol. 22, No. 2, pp. 218-224.

Received : 2016. 08. 04.

Revised : 2016. 08. 19. (1st)

: 2016. 08. 26. (2nd)

Accepted : 2016. 08. 29.