

중금속 원소와 유공충을 이용한 마산만 퇴적물의 오염 역사에 관한 연구

우한준^{1,*} · 조진형¹ · 정갑식¹ · 정창수² · 권수재¹ · 박성민¹

¹한국해양연구원 해저환경 · 자원연구본부, 425-744 경기도 안산시 사동 1270

²한국해양연구원 해양기후 · 환경연구본부, 425-744 경기도 안산시 사동 1270

Pollution History of the Masan Bay, Southeast Korea, from Heavy Metals and Foraminifera in the Subsurface Sediments

Han-Jun Woo^{1,*}, Jin-Hyung Cho¹, Kap-Sik Jeong¹, Chang-Soo Chung²
Su-Jae Kwon¹, and Sung-Min Park¹

¹Marine Geoenvironment & Resources Research Division, KORDI, Ansan P.O. Box 29,
Seoul 425-600, Korea

²Ocean climate & Environment Research Division, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract: Heavy metal concentrations and benthic foraminiferal distributions were investigated in three short sediment cores in order to understand the pollution history in Masan Bay. Sedimentation rates were 0.33 cm/yr, 0.20 cm/yr and 0.33 cm/yr in the inner bay, the out fall of Dugdong sewage disposal plant, and bay mouth, respectively. The rapid increases of copper, zinc and lead concentrations at the core depth of 10 cm the upper part indicated that Masan Bay has been polluted with industrial wastes since the 1940s. Benthic foraminifera in core sediments show that the variations in their distribution were followed by industrial pollution in the bay. The number of individuals and species diversity decreased, whereas agglutinated tests increased upward in the cores with increased heavy metal pollution. These shifts effected the abundance of few tolerant forms and consequently decreased the species diversity. The opportunistic species *Eggerella advena* and *Trochammina pacifica* increased in polluted sediments. These species can be used as an indicator for assessments of environmental quality in Masan Bay.

Keywords: Heavy metals, benthic foraminifera, pollution history, sedimentation rate, assessment of environmental quality

요약: 마산만의 오염과정을 파악하기 위하여 3개 정점의 코어 퇴적물에서 중금속 함량과 저서성 유공충의 분포를 조사하였다. 마산만의 퇴적속도는 마산항 0.33 cm/yr, 덕동 하수종말 처리장 앞 0.20 cm/yr, 마산만 입구 0.33 cm/yr로 나타났다. 퇴적물 깊이 약 15 cm부터 표층까지 Cu, Zn, Pb 함량이 뚜렷하게 증가하는 것은 1940년대 이후 점진적으로 축적되던 오염물질이 1960년대 이후 산업폐기물에 의해 급격하게 증가했기 때문인 것으로 해석된다. 코어 퇴적물에서 나타나는 저서성 유공충의 수직적인 분포는 오염에 따른 유공충의 반응을 잘 나타내고 있다. 퇴적물 상부로 중금속 함량이 증가함에 따라 개체수와 종 다양성은 감소하고 사질유공충의 비율은 증가하였다. 이러한 현상은 오염이 증가함에 따라 몇몇 내성종들만이 존재함으로써 결과적으로 종 다양성이 감소하였음을 반영한다. 기회종인 *Eggerella advena*와 *Trochammina pacifica*는 오염퇴적물에서 뚜렷한 증가를 보였다. 이러한 종들은 마산만의 현생 오염 환경을 평가할 수 있는 유용한 환경 지시자로 사용될 수 있을 것이다.

주요어: 중금속, 저서성 유공충, 오염의 역사, 퇴적물, 환경오염의 평가

*Corresponding author: hjwoo@kordi.re.kr

Tel: 82-31-400-6264

Fax: 82-31-408-5822.

서 론

세계적으로 연안은 1960년대 이후 활용도의 증가에 따라 산업시설 건설 및 인구 증가로 인하여 오수, 산업폐기물, 어업양식 폐기물 등으로 인위적인 오염이 가중되고 있다. 이러한 오염들은 그 지역의 생물서식지 변화를 포함한 생태계 구조에 변화를 가져왔다. 따라서 지난 수십년 동안 연안환경 악화를 초래한 해양오염을 감지하고 추적할 수 있는 다양한 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 해양오염을 추적하는 방법 중의 하나로 중 다양성이 넓으며, 생태적인 요인에 민감하게 반응하는 저서성 유공충을 이용하는 방법이 있다. 연안오염으로 인한 유공충의 생물학적 반응에 관한 연구는 Resig(1960)와 Watkins(1961)에 의하여 시작되어 지난 40여년 동안 오수 배출(Schafer, 1973; Setty, 1982; Collins et al., 1995), 유류 및 온배수(Schafer, 1973; Schafer et al., 1975), 그리고 화학적 또는 중금속(Schafer, 1970; Alve, 1991) 오염 지역에서 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 저서성 유공충이 다양한 근원의 해양오염을 감지하고 추적할 수 있는 지시자로서 유용하게 이용될 수 있다는 것을 증명하였다. 오염에 관련된 대부분의 기존연구는 오염근원지로부터 표층퇴적물내 수평적인 종의 분포 변화에 관련된 것이며, 과거로부터 시간에 따른 오염의 영향변화를 파악할 수 있는 종의 퇴적층내 수직적인 분포 변화 분석은 상대적으로 적은 편이다.

마산만 해역은 수심 20 m 미만의 반폐쇄성 내만으로 가덕수로를 통하여 해수교환이 부분적으로만 이루어지므로 해수의 혼합속도가 느리다. 이 지역은 40여년 전부터 공업단지 및 주변도시의 건설로 인해 각종 오폐수가 유입되어 오염이 가중되었다. 이 해역 퇴적물의 중금속 함량 측정 결과에 의하면 중금속 오염은 1930년대부터 시작되었으며 공업단지가 조성된 1960년대 이후 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr의 함량이 계속 증가하고 있음을 보여준다(Hong et al., 1983; Lee and Lee, 1983; 한국해양연구소, 1986; Lee et al., 1990). Lee et al. (1988)은 마산만에서 퇴적물의 연대측정과 중금속의 수직적 농도 분포 연구를 통해, 1960년대부터 Cu, Pb, Zn의 농도가 증가하고 있다고 보고하였다. 만의 오염은 생태계의 변화를 가져올 것이며 특히 저서생물의 구성과 개체수 등에 영향을 미칠 것이다. 이번 연구는 1960년대 이후 공업단지

및 주변도시의 건설 등으로 오염이 심각해진 마산만에서 코어 퇴적물 내의 지화학적 특성과 오염에 따른 저서성 유공충의 수직적인 군집 변화를 파악하고자 한다. 저서성 유공충 군집과 중금속 원소의 수직적인 변화 양상은 마산만의 오염역사를 밝히는데 큰 도움을 줄 것으로 기대된다.

연구 지역

지역적 특성

마산만은 한반도 남동쪽 진해만의 동북쪽에 깊숙이 위치하고 있고, 해안선의 굴곡이 심하며, 폐쇄성이 매우 강한 내만이다(Fig. 1). 부도 남측을 경계로 하여 마산항, 진해항을 포함한 광역의 마산만으로 구분할 때, 이 해역은 동서방향 약 11.5 km, 남북방향 15.5 km로 병목처럼 좁고 긴 반폐쇄형만이다. 수심은 비교적 얕으나, 지형적 여건에 의해 바람과 해류의 영향을 적게 받아 외양 해수와의 교류가 느리고 해수의 잔류시간도 길다. 또한 조류 소통이 불량하고, 유역하천의 길이도 짧아 하천을 통해 유입되는 산업 폐수와 생활하수가 자체 정화되지 않고 바다에 유입되고 있다. 이로 인해 하계에는 적조현상이 다발하고, 저층에 무산소층이 형성되기도 한다(이찬원 외, 1991; 마산시, 1994; Park, 1982; Hong, 1987).

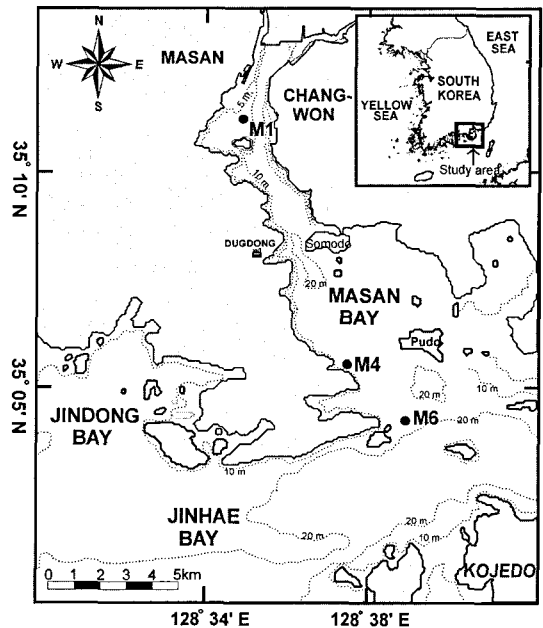


Fig. 1. Sampling locations of sediment cores in Masan Bay.

수리 특성

대조기 창조시는 거제도 우측수로와 가덕수로를 통해 유입된 외양수는 표층에서 최대 약 1 m/sec의 유속으로 북서진하다가 대부분은 진해만으로 유입되고 일부는 마산만으로 유입된다. 마산만 입구에서 표층 유속은 10~20 cm/sec 정도이며, 마산만 내에서는 전반적으로 10 cm/sec 미만이다. 낙조시는 전반적으로 창조시와는 반대로 마산만과 진해만으로부터 흘러나와 거제도 부근에서 서로 합쳐 외해로 빠져나가고, 견내량에서도 외해(충무쪽)로 흘러 나간다. 거제도 동측수로에서 유속은 30 cm/sec 미만이며, 주수로를 제외한 해역에서 유속은 매우 약하다(한국해양연구소, 1997).

지질 특성

마산·진해만의 표층 퇴적물은 모래가 10% 이하인 실트와 점토(평균입도 8~10φ)로 구성되어 있으며, 마산만 내부로 갈수록 세립해진다. 특히 진해만 내 퇴적물의 점토질 퇴적물은 낙동강 유역으로부터 유래되고 있으며, 마산만 입구 및 가덕수로에서는 0.2~0.5 cm/yr의 속도로 퇴적되고 있다(한국해양연구소, 1998; Park et al., 1995; Park and Lee, 1996).

인문사회적 특성

1960년대 중반부터 상공업의 기반이 조성된 진해·마산지역은 1970년에 수출자유지역이 설치되어 국제항구 및 상공업 도시로 급성장하게 되었다(정윤병, 1981).

마산만으로 유입되는 폐수의 배출업소 현황을 보면, 수질환경보전법의 산업폐수 방류수질 기준 등급상 4등급의 적용을 받는 배출업소(폐수 배출량 50 m³/day 이상)는 마산시 20개, 창원시 45개, 그리고 진해시가 8개이다. 그 중 중금속이 함유된 폐수를 배출할 것으로 추정되는 업소가 26개이다(마산시, 1994).

재료 및 방법

연구지역 퇴적물의 중금속 및 저서성 유공충 수직 분포의 특성을 파악하기 위하여 1998년 5월에 마산만 내의 3지점에서 중력식 주상시료 채취기(Gravity corer)를 사용하여 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 입도 분석용 시료 약 5 g을 1,000 ml 비이커에 넣은 후 유

기물을 제거하기 위하여 10% 과산화수소수(H₂O₂)로 24시간 이상 반응시켰다. 조개껍질 등의 탄산염 성분 물질에 의한 오차를 없애기 위해 0.1N 염산(HCl)으로 반응시켜 탄산염을 제거하였다. 입도 분석 준비가 완료된 시료는 4φ체를 이용하여 습식체질(wet seiving)하여 조립질과 세립질 퇴적물로 분리하였다. 4φ 크기 이상의 사질 시료는 건조하여 0.5φ 간격으로 Ro-tap sieve shaker로 약 15분간 체질한 후 입도 등급별로 무게 백분율을 구하였다. 4φ 크기 이하의 니질 시료는 전체를 대표할 수 있는 시료 2 g을 취해 300 ml의 0.1% calgon용액을 넣고 초음파 분쇄기와 자기진동기로 시료를 균일하게 분산시킨 후, 자동입도 분석기(Sedigraph 5100)로 분석하여 입도무게 백분율을 구하였다. 입도별 무게 백분율과 Folk and Ward(1957)의 Inclusive Graphic Method에 의하여 평균입도, 분급도, 왜도, 첨도 등의 통계적인 변수들을 구하였다.

중금속 분석용 시료는 현장에서 시추퇴적물의 산화를 방지하기 위하여 질소가 충전된 Glove box내에서 곧게 세워 하부로부터 퇴적물을 밀어내어 시료를 채취한 후 냉동하였다. 주상시료를 동결건조시켜 Agate Mortar를 이용하여 분말화 하였다. 분말시료는 0.2 g 씩 평량하여 테프론 반응조에 넣은 후 HNO₃(3 ml), HClO₄(1 ml), HF(1 ml)를 첨가하여 가열판에서 용해(dissolution)시킨후, 마개를 열고 가열·건조 시켰다. 0.5 N 염산(HCl)에 녹여 시료량을 10 ml로 맞춘 후, 유도결합 플라즈마 배출분광기(ICP-AES; ICPS-III)를 이용하여 중금속 함량을 측정하였다. 정확도와 정밀도를 구하기 위해 연안퇴적물 표준시료인 BCSS-1 (Canada, NRC)으로 금속원소의 회수율을 구하였으며, 정밀도는 최대 ±7.44% 였다.

유공충 분석용 시료 30 ml중에 포함된 세립질 퇴적물은 4φ체를 이용하여 제거하였다. 모래 크기의 시료를 증발접시에 모은 후에 비누거품을 넣어 가볍게 저어주면 비누성분에 흡착된 유공충은 석영입자 보다 가벼우므로 위로 뜨게 된다. 이 비눗물을 4φ체 위에 부어서 걸러 주었다. 이 작업을 통해 석영 입자와 유공충을 분리시킬 수 있다(Howe, 1941). 체(4φ)에 담긴 유공충을 세척하고 비이커에 옮긴 후 오븐(45~60°C)에서 건조시켰다. 건조된 시료는 실체현미경하에서 세필(5/0)을 이용하여 유공충을 선별한 후, 동정하였다. 건조된 시료에서 유공충이 300개체 이상으로 추정되면 미세 분류기(microsplitter)를 사용하여 시료

를 분리시킨 후 유공층을 분리하였다. 분리된 시료에서 동정된 개체수는 표준화를 위하여 분리된 시료량을 곱하여 30 ml당 개체수로 변환하였다. 동정한 유공층을 각 층으로 분류하여 상대적인 풍부성(%)을 구했으며, 저서성 유공층 군집 특성을 분석하기 위한 종다양도(species diversity) (MacArther and MacArther, 1961)와 균등도(equitability) (Buzas and Gibson, 1969)를 구하였다.

주상시료의 퇴적율을 측정하기 위해 해수에서 적용하는 Po의 농축·분리 방법을 변형하여 적용하였다 (Koide et al., 1972; Fleer and Bacon, 1984; Harada and Tsunogai, 1985). 은판(silver disc)에 전착이 완료된 후 소량의 증류수와 에탄올로 세척 건조시킨 후 SSB 검출기(Silicon Surface Barrier Detector)로 알파 계수(alpha counting) 하였다. ^{210}Po 의 방사능은 ^{208}Po 및 ^{210}Po 의 계수율(cpm)과 ^{208}Po 표준용액의 방사능 및 시료의 양으로부터 아래와 같은 식으로 계산하였다.

$$A_{\text{Po-210}}(\text{dpm/g}) = \frac{^{210}\text{Po}(\text{cpm}) \times A_{\text{Po-208}}(\text{dpm})}{^{208}\text{Po}(\text{cpm}) \times \text{sample}(\text{g})} \quad (1)$$

채취된 시료에서 ^{210}Po ($t_{1/2}=138.3$ day)와 ^{210}Pb ($t_{1/2}=22.3$ year)가 평형에 도달할 만큼 충분한 시간이 경과(510 일) 되었기 때문에 측정된 ^{210}Po 의 방사능은 어미핵종인 ^{210}Pb 에 의해 생성된 것이므로 ^{210}Po 의 방사능은 ^{210}Pb 의 방사능이 된다. 이렇게 계산된 ^{210}Pb 의 총 방사능에서 수직적으로 방사능의 변화가 없는 구간의 값은 어미핵종인 ^{226}Ra 이 붕괴되어 생성된 방사능이므로 ^{210}Pb 의 과잉 방사능을 알 수 있다.

코어의 깊이에 따른 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (과잉 방사능 납) 분포는 아래의 식으로 표현된다.

$$(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_z = (^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_{z=0} \cdot e^{(-\lambda t)} \quad (2)$$

여기서 z 는 퇴적층 깊이 (cm), z_0 는 퇴적층 표면.

위 식에 $t = \frac{z}{S}$ (S 는 퇴적속도, cm/yr)를 대입하여 정리하면,

$$(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_z = (^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_{z=0} \cdot e^{(-\lambda/s)z} \quad (3)$$

$$\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_z = \ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_{z=0} - (\lambda/s)z \quad (4)$$

위 식을 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 로그축과 깊이에 대하여 구한 회귀직선식의 기울기(a)에 적용하면,

$$S = -\frac{\lambda}{a} \quad (5)$$

가 된다. 여기서 a 는 회귀직선식의 기울기(cm^{-1}), λ 은 ^{210}Pb 의 붕괴상수(0.031 yr^{-1})이다.

결 과

마산만 내 정점 M1, M4, M6에서 채취한 코어퇴적물에서 표층에서 깊이 30 cm까지 중금속 함량 및 저서성 유공층의 특성을 분석하였다. 각 정점 코어 퇴적물의 퇴적률은 Fig. 2에 나타내었다. 입자크기 변화에 따른 중금속 원소의 농도 차이를 보정하기 위하여 A1으로 표준화된 Cu, Zn, Pb의 총농도는 퇴적물을 고려하여 깊이별로 연도를 표시하여 Fig. 3에 나타내었다. 마산만의 퇴적률은 0.20~0.33 cm/yr이며,

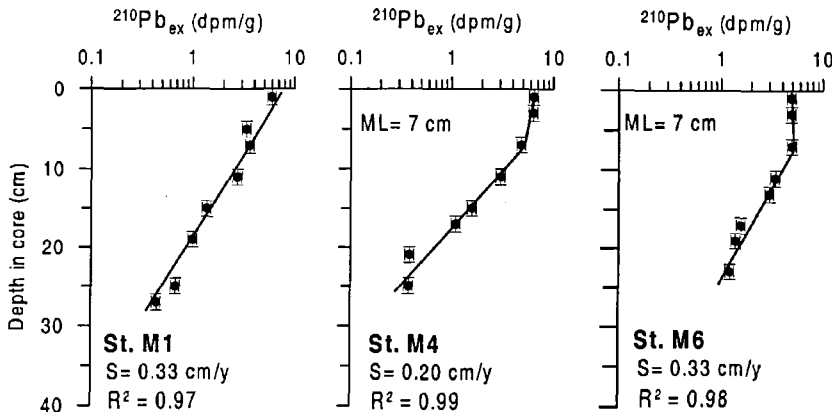


Fig. 2. Excess ^{210}Pb profiles of sediment cores in Masan Bay. S stands for sedimentation rate estimated from $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ profiles; ML, thickness of mixed layer.

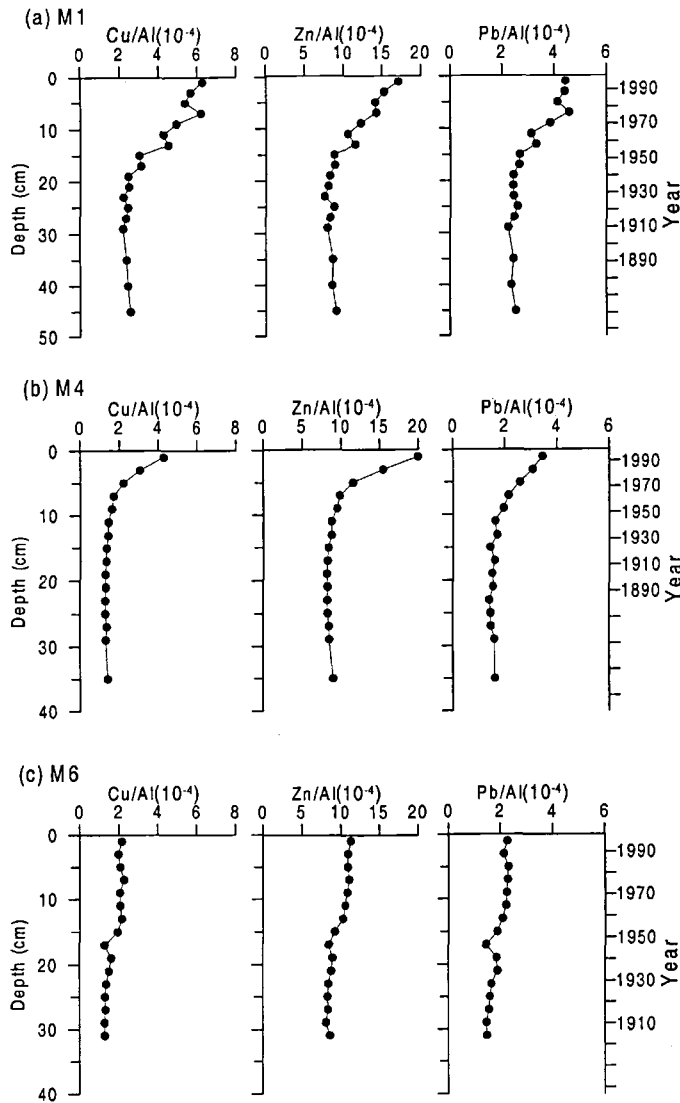


Fig. 3. Distribution of normalized values of Cu, Zn and Pb to Al concentration in sediment cores. The time scales are based on sedimentation rates.

코어 시료에서 분석된 Cu, Zn, Pb의 함량은 표층으로 갈수록 뚜렷한 증가를 보여 주었다. 저서성 유기총은 3개 정점에서 총 90종이 확인되었고, 마산항(M1)보다 마산만 입구(M6) 시료에서 중수, 개체수 그리고 종다양성이 높았다(Appendix). 각 코어에서 나타나는 우점종(dominant species)은 모든 깊이에서 출현하며 어느 한 지점에서라도 5% 이상 나타나는 종으로 정의하였다.

정점 M1은 마산항 근처에 위치하고 있으며 코어 깊이별 퇴적물의 평균입도는 9.38~9.83φ로 세립한 점

토질 퇴적물로 구성되어 있다. ²¹⁰Pb 분석에 의한 이 정점의 퇴적률은 0.33 cm/yr이며, Cu는 21.9~71.6 μg/g, Zn는 74.5~191.5 μg/g, Pb는 27.4~52.6 μg/g의 함량 범위를 나타낸다(Table 1). 이들 원소들은 약 20 cm 깊이에서부터 표층으로 뚜렷한 증가 양상을 보인다. 이들 원소의 함량 증가 깊이와 퇴적률을 고려하면 1940년대부터 중금속 오염이 시작되었음을 보여준다(Fig. 3). 저서성 유기총은 정점 M1 주상시료의 5개 깊이에서 총 28종이 확인되었다. 각각의 깊이마다 11~22종, 30 ml당 개체수는 1,121~3,420개

Table 1. Heavy metal concentration ($\mu\text{g/g}$) and benthic foraminiferal characteristics in core M1 (N=number of individuals per 30ml, H(S)=species diversity). Dominant species indicate relative abundance (%)

Station	Depth (cm)	Mz (phi)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)	N	H(s)	Arenaceous (%)	<i>Amnibaculites filiformis</i>	<i>Eggerella advena</i>	<i>Elphidium etigoense</i>	<i>Textularia earlandi</i>	<i>Trochammina pacifica</i>	
M1	1	9.4	70.4	191.5	49.6	1236	1.2	98.4	8.7	18.1	0.7	9.7	60.2	
	3	-	64.1	173.0	49.9	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5	-	61.6	161.9	47.2	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7	9.8	71.6	164.6	52.6	1121	1.6	80.8	4.4	7.3	10.2	6.1	60.3	
	9	-	60.8	151.5	47.5	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11	-	48.9	121.5	35.7	-	-	-	-	-	-	-	-	
	13	-	50.9	130.3	37.2	-	-	-	-	-	-	-	-	
	15	9.5	35.8	104.0	31.7	3420	2.1	66.2	3.5	7.9	12.3	9.7	43.0	
	17	-	37.4	106.3	31.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	-	29.0	96.6	28.6	1855	1.7	78.8	10.0	7.9	10.0	9.1	51.8	
	21	-	30.0	96.5	29.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	23	-	21.9	74.5	65.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	27.1	97.1	28.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	27	-	27.9	97.7	29.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	9.8	27.1	97.1	27.4	1356	1.8	79.7	8.0	9.3	5.8	12.4	48.2		

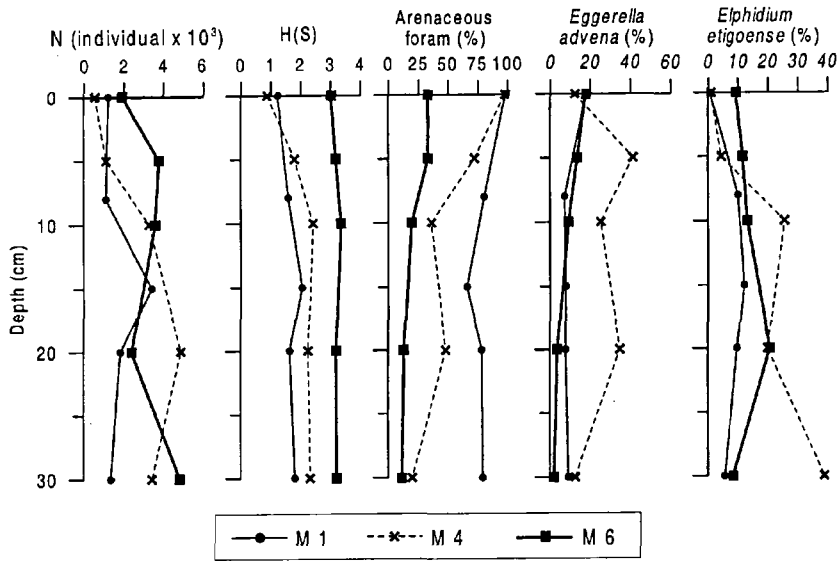


Fig. 4. The vertical distributions of foraminifera in core M1, M4 and M6. N=number of individuals per 30 ml; H(S)=species diversity.

체, 종다양성은 1.23~2.06, 사질유공충의 비율은 66.2~98.4%의 범위를 보인다(Table 1). 30 ml당 개체수와 종다양성은 15 cm 깊이에서 최대값을 보이며 표층으로 갈수록 감소되는 경향을 보였다. 상대적으로 유공충 서식에 좋지 않은 환경에서 빈번히 출현하는 사질유공충의 비는 15 cm 깊이에서 최소값을 보이나 표층으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 정점 M1에서 나타나는 우점종은 *Ammonobaculites filiformis*, *Eggerella advena*, *Elphidium etigoense*, *Textularia earlandi*, *Trochammina pacifica*이다. 사질 유공충인 *A. filiformis*, *T. pacifica* 비율(%)은 15 cm 깊이에서 최소값을 보이며, 상부로 갈수록 점차 증가하였다. *E. advena*, *T. earlandi* 비율(%)은 8 cm 깊이에서 최소값을 나타내며 표층으로 갈수록 증가한다. 석회질 유공충인 *E. etigoense* 비율(%)은 15 cm 깊이에서 최대값을 보였으며 표층으로 갈수록 감소한다(Fig. 4). 이러한 경향은 오염된 환경에 적응이 가능한 기회종인 사질유공충(예, *T. pacifica*)의 비율은 늘어나지만, 오염되지 않은 환경에서 서식하는 종(예, *E. etigoense*)은 감소되기 때문이다.

정점 M4는 마산만의 덕동 하수처리장 근처에 위치하고 있으며 퇴적물의 평균입도는 약 10φ로서 깊이에 따라 거의 변화가 없다. ²¹⁰Pb 분석에 의한 이 정점의 퇴적률은 0.20 cm/yr이며, Cu는 13.3~37.9 μg/g, Zn은 85.0~176.5 μg/g, Pb은 14.4~30.5 μg/g의

함량 범위를 보인다(Table 2). 이들 원소들은 23 cm 깊이에서 최소값을 보이며 약 10 cm 깊이에서 표층을 향하면서 뚜렷한 증가를 보여준다. 정점 M4 주상 시료의 5개 시료채취 깊이에서 총 51종의 저서성 유공충이 확인되었다. 각각의 깊이마다 중수는 10~41 종, 30 ml당 개체수는 568~4,893개체, 종다양성은 0.88~2.43, 사질유공충의 비율은 20.2~97.8%의 범위를 보인다(Table 2). 오염이 시작되는 시점인 1950년대 이후 약 10 cm 깊이에서부터 표층으로 갈수록 위의 3개 원소와 더불어 사질유공충의 비율이 증가하고 있다(Fig. 3). 반면에 30 ml당 개체수와 종다양성은 감소하였다. M4에서 나타나는 우점종은 *Buccella frigida*, *Eggerella advena*, *Elphidium etigoense*, *Trochammina pacifica*이다. 석회질 유공충인 *B. frigida*, *E. etigoense*는 퇴적물 깊이 10 cm부터 표층까지 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4). 사질 유공충인 *E. advena*는 10 cm부터 상부로 갈수록 증가하다 감소하며, *T. pacifica*는 10 cm부터 표층까지 증가하는 경향을 보인다.

정점 M6은 마산만 입구에 위치하고 있으며 퇴적물의 깊이별 평균입도는 9.38~9.88φ로 깊이에 따라 거의 변화가 없다. ²¹⁰Pb 분석에 의한 이 정점의 퇴적률은 0.33 cm/yr로 정점 M1과 같다. Cu는 13.0~22.6 μg/g, Zn은 82.2~110.9 μg/g, Pb은 14.7~22.8 μg/g의 함량 범위로 정점 M1과 M4에 비하여 상대적으로

Table 2. Heavy metal concentration ($\mu\text{g/g}$) and benthic foraminiferal characteristics in core M4 (N=number of individuals per 30 ml, H(S)=pecies diversity). Dominant species indicate relative abundance (%)

Station	Depth (cm)	Mz (phi)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)	N	H(s)	Arenaceous (%)	<i>Buccella frigida</i>	<i>Eggerella advena</i>	<i>Elphidium etigoense</i>	<i>Trochammina pacifica</i>
M4	1	10.0	37.9	176.5	30.5	568	0.9	97.8	0.4	12.3	0.9	77.0
	3	-	27.8	140.3	27.9	-	-	-	-	-	-	-
	5	10.1	22.4	117.6	26.2	1133	1.8	72.7	5.0	41.5	4.4	29.1
	7	-	18.0	103.4	22.6	-	-	-	-	-	-	-
	9	10.2	17.1	100.2	20.7	3293	2.4	36.4	5.1	25.5	25.7	6.3
	11	-	15.8	95.5	17.7	-	-	-	-	-	-	-
	13	-	15.6	95.5	18.5	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	14.7	90.8	15.4	-	-	-	-	-	-	-
	17	-	14.2	87.6	17.1	-	-	-	-	-	-	-
	19	10.0	13.8	87.5	16.2	4893	2.3	48.8	4.6	35.2	20.2	9.3
	21	-	13.9	87.0	16.3	-	-	-	-	-	-	-
	23	-	13.3	85.0	14.4	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	13.5	86.0	15.0	-	-	-	-	-	-	-
	27	-	14.3	88.3	15.2	-	-	-	-	-	-	-
	29	10.0	14.2	90.8	17.1	3448	2.3	20.2	2.4	12.7	39.2	5.2

낮은 함량을 보인다(Table 3). 일반적으로 이들 원소는 깊이 30 cm부터 표층으로 갈수록 함량이 증가하고, 특히 깊이 10 cm부터 표층까지는 비슷한 함량을 보인다(Fig. 3). 이 정점은 오염물질이 유입되는 마산만 하천에서 가장 멀리 떨어져 있고 가덕수호와 인접해 있기 때문에 중금속 함량이 마산만 내부 보다는 상대적으로 적으나, 마산만 및 주변지역 오염과 더불어 오염의 영향을 지속적으로 받은 것으로 보인다. 정점 M6 주상시료에서 총 83종의 유공충이 확인되었으며, 각각의 시료채취 깊이마다 45~53종이 나타났다. 30 ml당 개체수는 1,927~4,840개체, 종다양성은 3.03~3.36, 사질유공충의 비율은 11.6~33.3%의 범위를 보인다(Table 3). 30 ml당 개체수는 표층에서 최소값을 나타내며, 종다양성은 10 cm에서 표층으로 갈수록 점차 감소하였다. 사질유공충의 비율은 상부로 갈수록 증가하나 최상부층(5 cm)은 비슷한 비율(33%)를 보인다. 일반적으로 정점 M6은 M1과 M4에 비하여 30 ml당 개체수와 종다양성은 상대적으로 높은 값을 가지나 사질유공충의 비율은 낮은 값을 나타낸다. 정점 M6에서 나타나는 우점종은 석회질 유공충(*Alabaminella wedellensis*, *Elphidium etigoense*, *Hopkinsina glabra*, *Nonionella stella*, *Pseudorotalia gaimardii*, *Quinqueloculina seminulum*)과 사질유공충(*Eggerella advena*)이다. 석회질 유공충중에서 *E. etigoense*, *P. gaimardii*, *Q. seminulum*는 깊이 20 cm를 기준으로 표층으로 갈수록 감소하나, *H. glabra*는

깊이 10 cm부터 표층으로 갈수록 증가한다(Fig. 4). 사질유공충인 *E. advena*는 깊이 30 cm부터 표층으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다.

토 의

마산시와 창원시로부터 12개의 하천을 통하여 마산만으로 유입되는 하천 유량은 평균 648,305 m³/day이며, 유입하천 주위의 산업 및 공공시설로부터 생활하수, 산업, 축산폐수 등이 배출되고 있다(마산시, 1994). 이러한 오염물질의 배출과 마산만의 반폐쇄성 수리조건은 이 지역의 오염을 가중시켜 왔다. 마산만의 퇴적물은 마산항 부근(M1)과 만의 입구(M6) 정점에서 0.33 cm/yr이며, 만의 중간부분(M4)에서는 0.20 cm/yr로 기존의 연구결과(0.20~0.34 cm/yr)와 유사한 값을 보인다(한국해양연구소, 1993). 마산만의 퇴적물과 인근지역에서 산업기지가 건설되기 시작한 시기(1960년대)를 고려할 때, 3개의 코어에서 오염된 퇴적물은 깊이 15 cm 전후에서 표층까지이며, 이 퇴적물에서 Cu, Zn, Pb의 함량은 뚜렷한 증가를 보여 인위적인 오염을 증명해 주고 있다(Fig. 3). 이들 세 원소의 수직적인 함량은 마산항 근처(M1)에서 가장 높게 나타나며, 마산만의 중간 정점(M4)에서는 4~6 cm 부분부터 만의 입구 정점(M6)보다 함량이 높아지며 상대적으로 큰 폭으로 증가한다. 이는 이들 원소들이 퇴적물과 함께 오염 근원지인 하천으로부터 유

Table 3. Heavy metal concentration ($\mu\text{g/g}$) and benthic foraminiferal characteristics in core M6 (N=number of individuals per 30 ml, H(S)=species diversity). Dominant species indicate relative abundance (%)

Station	Depth (cm)	Mz (phi)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)	N	H(s)	Arenaceous (%)	Alabaminella weddellensis	Eggerella advena	Elphidium etigoense	Hopkinsina glabra	Nonionella stella	Pseudorotalia gainmaritii	Quinqueloculina seminulum
M6	1	9.38	20.5	107.8	21.5	1927	3.0	33.2	8.3	18.0	9.3	13.5	4.8	1.7	2.1
	3	-	19.5	108.0	20.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	9.78	20.2	106.5	22.5	3789	3.2	33.3	3.6	13.6	11.8	9.1	4.5	2.7	3.2
	7	-	22.6	110.9	22.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	9.70	20.1	106.6	22.0	3600	3.4	19.6	7.5	9.2	13.3	4.6	5.8	6.7	3.3
	11	-	20.5	104.7	21.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13	-	21.5	103.0	20.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	19.2	91.8	18.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	-	13.1	86.2	14.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	9.46	16.3	90.0	18.7	2430	3.2	13.2	2.9	3.7	21.0	5.4	2.1	8.2	7.0
	21	-	15.2	88.6	19.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	23	-	14.0	86.9	17.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	13.2	84.1	16.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	27	-	13.6	85.6	15.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	29	9.88	13.0	82.2	14.8	4840	3.2	11.6	2.5	2.1	8.7	4.6	0.8	19.0	5.4

Table 4. The number of individuals of pyrited species

Station No.	M1	M1	M1	M1	M1	M4	M4	M4	M4	M4	M6	M6	M6	M6	M6
Core Depth	0	8	15	20	30	0	5	10	20	30	0	5	10	20	30
No. of pyrited specimens per 30 ml	12	136	555	218	138	10	103	1100	1067	1334	293	1234	1305	900	1900
pyrited specimens/ calcareous specimens (%)	60.00	63.29	48.05	55.56	50.00	80.00	33.33	52.55	42.55	48.49	22.80	49.32	45.08	42.65	44.39
<i>Alabaminella weddellensis</i>								53		46	27	69	165	70	100
<i>Ammonia beccarii</i>								7		5		86	60	30	60
<i>Ammonia ketienziensis</i>		5						7	13	9		17	15	20	80
<i>Anomalina ungeriana</i>								7							
<i>Astrononion stelligerum</i>		8	60		6		10	27	80	18	7		15	10	20
<i>Astrononion umbilicatum</i>		8	75	11				33		18				10	
<i>Astrononion hanyudaense</i>			15					7		9		17		10	
<i>Bolivina decussata</i>									13	5		17			
<i>Bolivina robusta</i>											7				
<i>Bolivina</i> sp. A										5					
<i>Bolivina</i> sp. B										5					
<i>Brizalina pacifica</i>															10
<i>Buccella frigida</i>	4	3				3	33	113	133	46		34	30	20	140
<i>Buccella</i> sp.											7				
<i>Bulimina marginata</i>								7	13	9		17	15		
<i>Bulimina</i> sp.															20
<i>Cibicides inagawaensis</i>															20
<i>Cibicides refulgens</i>													15		
<i>Cribrononion clavatum</i>		8	30	5	6	2	20	27	13	14	27	34	15	30	20
<i>Discorbis australis</i>										5	7			10	20
<i>Discorbis chinensis</i>														10	40
<i>Discorbis</i> sp. A							3								
<i>Discorbis twaiwanensis</i>													15	10	
<i>Elphidium advenum</i>		5	75					60	53	65	20	120	150	90	180
<i>Elphidium crispum</i>									13	9		51	15	10	80
<i>Elphidium etigoense</i>	8	85	195	125	36	5	13	520	480	785	33	326	315	320	240
<i>Epistominella naraensis</i>							3	27		14	13	69	15	40	140
<i>Eponides nipponicus</i>								7							
<i>Evolocassidulina</i> sp.															10
<i>Fissurina agassizi</i>										18					
<i>Fissurina echigoensis</i>										5		17	15		
<i>Fissurina laevigata</i>													15		
<i>Fissurina marginata</i>												17		10	
<i>Fissurina wiesneri</i>														10	
<i>Gyroidinoides nipponica</i>											7				
<i>Hopkinsina glabra</i>		3	15	11	6		13	67	27	51	40	69			60
<i>Islandiella norcrossi</i>								7							
<i>Miliolinella circularis</i>		5	45	11	30								15	10	
<i>Nomionella labradorica</i>												17			
<i>Nomionella stella</i>								27	40	9	47	86	165	30	0
<i>Oolina hexagona</i>										5					
<i>Planobulina</i> sp.											7				
<i>Pseudononion japonicum</i>								27	27		7	34	60	60	40
<i>Pseudorotalia gaimardii</i>										5	20	51	75	20	460
<i>Quinqueloculina seminulum</i>				49	42						13	34	30	40	80
<i>Quinqueloculina stalkerii</i>									40	5					80
<i>Rosalina</i> sp.													15	10	
<i>Rutherfordoides mexicanus</i>		5	45	5	12		7	33	67	138					20
<i>Stainforthia</i> sp. B								40	53	32	7	17	75		
<i>Triloculina tricarinata</i>												34			

입되어 멀리 만의 입구로 갈수록 적은 양이 집적되는 것을 보여주지만, 정점 M4에서 약 5 cm부터 표층으로 함량이 급격히 증가하는 것은 덕동 하수종말처리장에서 처리되지 못하고 방출된 상당량의 오염물질이 퇴적되었기 때문인 것으로 추정된다(마산시, 1994). 저서생물 또는 해류에 의해 약 7 cm 정도의 상부 퇴적물은 심하게 교란되어 중금속 함량이 균질화 되었을 것으로 생각하였으나, 분석결과에 의하면 입자의 혼합속도보다 오염물질을 포함한 퇴적물의 축적속도가 높았기 때문에 상부로 갈수록 지속적으로 중금속의 축적이 진행된 것으로 추정된다(정갑식 외, 2001). 만 입구인 정점 M6은 낙동강에서 배출된 부유물질의 일부가 진해·마산만으로 유입된다는 기존의 연구결과(Kim et al., 1986; Park and Lee, 1996)에 비추어 볼 때, 부유물질에 흡착 또는 포함된 미량 중금속원소가 퇴적되는 것으로 추정된다. 또한 느린 속도로 만의 내부로 유출되는 오염물질의 영향 때문에 상대적으로 작은 폭의 증가가 1960년대 이전부터 있었던 것으로 나타났다.

마산만 코어 퇴적물에서 나타나는 저서성 유공충의 수직적인 분포변화 양상은 마산만 오염의 역사를 잘 반영하고 있다. M1과 M4 정점에서는 10~15 cm부터 표층까지 30 ml당 개체수와 종다양성은 뚜렷이 감소하며, 사질 유공충의 비는 뚜렷이 증가한다. M6 정점에서는 5 cm부터 표층까지 30 ml당 개체수는 감소하며, 10 cm부터 표층까지 종다양성은 감소하고 사질 유공충의 비는 증가한다(Fig. 4). 이러한 현상은 마산만 해수의 오염(1960년대 이후)이 증가함에 따라 과도기적(transitional) 또는 내성(tolerant)을 가진 종들만 점차 증가하다 결국에는 오염에 적응력이 높은 내성종이나 기회종(opportunistic species)으로 대체되었기 때문이다. Ellison et al. (1986)은 중금속에 오염된 미국 메릴랜드의 파타스쿠 강(Patapsco River)과 볼티모어 항(Baltimore Harbour)의 코어 시료에서 작은 수의 유공충(6종)과 개체수를 확인하였으며, 오직 오염에 적응하는 기회종 *Ammobaculites crassus*만이 번성하는 것을 보고하였다. Alve(1991)는 노르웨이 Solfjord의 170~190 cm 코어시료에서 중금속 오염과 함께 개체수의 감소, 사질 유공충의 증가, 변이된 외각(test) 및 황철 반점화된 종의 출현 등 오염에 반응한 저서성 유공충의 특징들을 기술하였다.

마산만 코어 퇴적물에서 나타나는 우세종 중 *Eggerella advena*와 *Trochammina pacifica*는 마산만

(우한준 외, 1999) 및 국외의 중금속 및 유기물에 의하여 오염된 지역(Bandy et al., 1965; Schafer, 1973; Patterson, 1990)들에서 오염에 적응하는 기회충으로 알려져 있다. *Eggerella advena*는 M1과 M6 정점에서 약 10 cm 깊이에서 표층으로 가며 뚜렷이 증가함을 보인다(Fig. 4). M4 정점에서는 *Eggerella advena*가 5 cm 깊이에서 최대값을 보이며 표층으로 올라오며 감소하나, *Trochammina pacifica*는 5 cm 깊이에서 표층으로 큰 폭으로 증가한다. 그러나 비교적 자연적인 만 내의 환경에서 서식하는 *Elphidium etigoense*는 마산만 코어퇴적물 약 10 cm 깊이에서 표층으로 올라오며 감소하는 경향을 보인다(Fig. 4).

중금속에 의하여 오염된 지역에서 특징적으로 발견되는 황철 반점(spot pyrite)이 있는 유공충의 비는 M1 정점에서는 15 cm부터, M4 정점에서는 5 cm부터 표층까지 급격히 증가하나 만의 입구인 M6 정점은 5 cm부터 표층으로 올라오며 감소한다(Table 4). 일반적으로 유공충 각(test)의 황철반점은 무산소환경에서 박테리아의 작용에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다(Berner, 1984). 또한 무산소(anoxic) 환경이 아니라도 중금속에 의하여 오염된 지역에서 박테리아가 살아있는 유공충에 침범하여 산소를 결핍시켜 생기는 일종의 질병에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다(Seiglie, 1975). 마산항과 마산만 중간의 정점 M1과 M4의 황철 반점이 있는 유공충이 증가하는 이유는 봄과 여름철 동안 저층 해수에 빈산소(suboxic) 현상의 발생(한국해양연구소, 1998)과 중금속에 오염되어 황철 반점이 나타나는 것으로 보인다. 마산만 코어 퇴적물에서 빈번히 나타나는 황철 반점이 있는 유공충 종은 *Cribronion clavatum*, *Elphidium etigoense*, *Hopkinsina glabra*이다.

결론

마산만은 주변하천을 통하여 산업시설과 도시에서 배출되는 오폐수가 유입되어 오염이 가중되고 있다. 마산만 오염과 더불어 중금속 함량 및 환경오염 추적자(저서성 유공충)의 시간적인 변화를 분석하기 위하여 마산만내 3개 코어 시료에서 수직적인 변화를 파악하였다. 마산만의 퇴적물은 마산항과 마산만 입구에서 0.33 cm/yr이며, 만의 중간부분은 0.20 cm/yr로 1960년대의 주변 산업기지 건설 시기를 고려하면 오염퇴적층은 깊이 약 10 cm 전후에서 표층까지이며,

이 구간에서 Cu, Zn, Pb 함량이 뚜렷한 증가를 보인다. 이들 원소의 함량은 일반적으로 마산항에서 마산만 입구로 가며 감소하나, 만의 중간부분인 M4 정점에서 표층부터 약 5 cm 구간의 급격한 함량 증가는 덕동 하수처리장에서 배출된 오염물질이 퇴적되기 때문인 것으로 보인다. 마산만 입구인 M6 정점은 1960년대 이전 축적된 퇴적층 깊이에서부터 작은 폭의 금속원소 함량증가를 보여 주변지역의 오염물질이 이곳까지 영향을 미쳤던 것으로 보인다.

마산만 코어퇴적물은 중금속에 의하여 오염된 지역에서 나타나는 저서성 유공충의 수직적인 변화특성이 뚜렷이 나타나 이 지역의 오염정도 변화 역사에 따른 유공충의 반응을 잘 나타내고 있다. 중금속 함량의 증가와 더불어 오염지역에도 서식할 수 있는 내성종이나 기회종들이 환경에 적응하며 존재하고 있으며, 반면에 다른 종들은 감소 또는 소멸함으로써 개체수와 종다양성은 감소하고 있다. 또한 좋지 않은 환경에 많이 존재하는 사질유공충의 비율은 증가하고 있다. 코어 퇴적물에서 나타나는 우세종 중 *Eggerella advena*와 *Trochammina pacifica*는 오염퇴적물에서 뚜렷한 증가를 보이며 반면에 *Elphidium etigoense*는 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 우세종의 증가와 감소는 마산만 오염의 영향에 따른 저서성 유공충 군집 변화에 의한 것이며, 기회종인 *Eggerella advena*와 *Trochammina pacifica*는 이 지역의 오염 상황을 추적(monitoring)할 수 있는 유용한 지시자로 사용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 기관고유사업인 연안역에서의 육지와 해양 상호작용 연구(PE 01819-01) 및 연안역 통합관리를 위한 해양환경변화 특성 규명(PE 83400)의 일부분으로 수행되었다. 귀중한 조언과 수정을 해주신 정대교 교수님과 두 분의 심사위원께 감사드리며, 시료 채취 및 분석에 도움을 주신 강정원, 김효영 연구원에게 감사드립니다.

참고 문헌

마산시, 1994, 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링. 264 p.
우한준, 김효영, 정갑식, 천종화, 김성은, 추용식, 1999, 마산만 퇴적환경 오염에 따른 저서성 유공충 분포 변화.

한국해양학회지 바다, 4, 144-154.
이찬원, 권영택, 한성대, 1991, 진해만 일원 오염실태 조사 보고서. 환경처, 195 p.
정갑식, 조진형, 김기현, 우한준, 2001, 마산만의 중금속 오염의 역사와 오염형 원소(구리, 납, 아연)의 거동. 한국해양학회 2001년도 추계학술발표회, p. 75.
정운병, 1981, 한국경제의 발전과정. 돌베개, 서울, 164 p.
한국해양연구소, 1986, 한국 연안 퇴적물의 중금속 오염 역사에 관한 연구. BSPE 59-104-4, 48 p.
한국해양연구소, 1993, 연안 해양환경에서의 탄소·질소·인·규소의 플럭스 변화에 관한 연구. BSPE 00307-575-4, 84 p.
한국해양연구소, 1997, 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(II). BSPE 97607-00-1040-2, 234 p.
한국해양연구소, 1998, 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(II). BSPE 98703-01-1147-2, 395 p.
Alve, E., 1991, Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sorfjord, Western Norway. Journal of Foraminiferal Research, 21, 1-19.
Bandy, O.L., Ingle, J.C., and Resig, J.M., 1965, Foraminiferal trends, Hyperion outfall, California. Limnology and Oceanography, 10, 314-332.
Berner, R.A., 1984, Sedimentary pyrite formation: an update. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48, 605-615.
Buzas, M.A. and Gibson, T.G., 1969, Species diversity: benthonic foraminifera in western north Atlantic. Science, 163, 72-75.
Collins, E.S., Scott, D.B., Gayes, P.T., and Medioli, F.S., 1995, Foraminifera in Winyah bay and north inlet marshes, South Carolina: relationship to local pollution sources. Journal of Foraminiferal Research, 25, 212-223.
Ellison, R.L., Broome, R., and Ogilvie, R., 1986, Foraminiferal response to trace metal contamination in the Patapsco river and Baltimore harbour, Maryland. Marine Pollution Bulletin, 17, 419-423.
Folk, R.L. and Ward, W., 1957, Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.
Hong, G.H., Park, Y.A., and Lee, K.W., 1983, Partitioning of heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 18, 180-184.
Hong, J.S., 1987, Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay system, Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 22, 246-256.
Howe, H.V., 1941, The use of soap in the preparation of samples for micropaleontological study. Journal of Paleontology, 15, 691.
Kim, M.S., Chu, K.S., and Kim, O.S., 1986, Investigation of some influence of the Nakdong river water on marine environment in the estuarine area using Landsat imagery. Republic. Korea Mining Science Technology,

- 93-147.
- Lee, C.W., Yang, W.J., and Kwon, Y.T., 1990, Metal distribution and contamination in sediments from estuaries of Masan Bay as a potential source of groundwater quality deterioration. *Ocean Research*, 12, 97-104.
- Lee, K.W., Lee, D.S., Lee, S.H., and Matsumoto, E., 1988, History of heavy metal pollution in Masan and Ulsan Bay sediments, *Ocean Research*, 10, 7-13.
- Lee, S.H. and Lee, K.W., 1983, Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 18, 49-54.
- MacArther, R.H. and MacArther, J.W., 1961, On bird species diversity. *Ecology*, 42, 544-598.
- Park, J.S., 1982, Studies on the characteristics of red tide and environmental condition in Chinhae Bay. *Bulletin of Fisheries Research Development Agency*, 28, 55-88.
- Park, S.C. and Lee, K.W., 1996, Modern sedimentary environment of Jinhae Bay, SE Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 31, 43-54.
- Park, S.C., Lee, K.W., and Song, Y.I., 1995, Acoustic characters and distribution pattern of modern fine-grained deposits in a tide-dominated coastal bay: Jinhae Bay, southeast. *Geo-Marine Letters*, 15, 77-84.
- Patterson, R.T., 1990, Intertidal benthic foraminiferal biofacies on the Fraser River Delta, British Columbia: modern distribution and paleoecological importance. *Micropaleontology*, 36, 229-244.
- Resig, J.M., 1960, Foraminiferal ecology around ocean outfalls off southern California. In: *Waste disposal in the marine environment*, Pergamon Press, London, 104-121.
- Schafer, C.T., 1970, Studies of benthic foraminifera in Restigouche Estuary: faunal distribution patterns near pollution sources. *Maritime Sediments*, 6, 121-134.
- Schafer, C.T., 1973, Distribution of foraminifera near pollution sources in Chaleur Bay. *Water, Air and Soil Pollution*, 2, 219-233.
- Schafer, C.T., Wagner, F.J.E., and Ferguson, C., 1975, Occurrence of foraminifera, molluscs and ostracods adjacent to the industrialized shoreline of Canso Strait, Nova Scotia. *Water, Air and Soil Pollution*, 5, 79-96.
- Seiglie, G.A., 1975, Foraminifera of Guayanilla Bay and their use as environmental indicators. *Revista Espanola de Micropaleontologia*, 7, 453-487.
- Setty, M.G.A.P., 1982, Pollution effects monitoring with foraminifera as indices in the Thana Greek, Bombay Area. *International Journal of Environmental Studies*, 18, 205-209.
- Watkins, J.G., 1961, Foraminiferal ecology around the Orange County, California, ocean sewerage outfall. *Micropaleontology*, 7, 199-206.

2003년 6월 26일 원고 접수
 2003년 11월 10일 수정원고 접수
 2003년 11월 15일 원고 채택

Appendix

Appendix. Distributions of benthic foraminifera in core sediments

Station No.	M1	M1	M1	M1	M1	M4	M4	M4	M4	M4	M6	M6	M6	M6	M6
Depth (cm)	0	8	15	20	30	0	5	10	20	30	0	5	10	20	30
No. of Species	11	22	19	15	17	10	24	33	29	41	49	45	53	49	48
No. of individuals per fraction picked	309	411	228	340	226	227	340	494	367	747	289	219	240	243	242
No. of individuals per 30ml	1236	1121	3420	1855	1356	568	1133	3293	4893	3448	1927	3789	3600	2430	4840
Species Diversity (H(s))	1.23	1.60	2.06	1.66	1.83	0.88	1.81	2.43	2.27	2.34	3.03	3.19	3.36	3.21	3.22
Equitability (E)	0.31	0.23	0.41	0.35	0.37	0.24	0.25	0.34	0.33	0.25	0.42	0.54	0.54	0.51	0.52
Arenaceous (%)	98.38	80.78	66.23	78.82	79.65	97.80	72.65	36.44	48.77	20.21	33.22	33.33	19.58	13.17	11.57
Mz. (phi)	9.38	9.75	9.54		9.83	9.96	10.10	10.15	9.97	9.95	9.38	9.78	9.70	9.46	9.88
<i>Alabaminella weddellensis</i>						0.44	0.59	3.24		2.14	8.30	3.62	7.50	2.88	2.48
<i>Ammobaculites exiguus</i>			0.44		0.44		0.29	0.40		0.54		0.45	0.42	0.41	0.41
<i>Ammobaculites filiformis</i>	8.74	4.38	3.51	10.00	7.96	1.32		1.82	0.27						
<i>Ammobaculites obliquus</i>	0.65	0.49	0.88		0.88		0.29	0.40							
<i>Ammobaculites</i> sp.												0.45	0.42		
<i>Ammonia beccarii</i>								0.20		0.13	0.35	2.26	4.17	1.65	2.07
<i>Ammonia ketienziensis</i>		0.73						0.40	0.27	0.27	0.69	0.45	2.50	2.47	3.31
<i>Amphicoryna</i> sp. A											0.13			0.41	
<i>Anomalina ungeriana</i>								0.20	0.54						
<i>Astrononion hanyudaense</i>			0.88					0.20		0.27	0.35	0.90		0.82	
<i>Astrononion stelligerum</i>		1.22	1.75	0.29	0.44		1.47	1.42	3.54	2.68	1.04	0.90	1.25	2.47	0.83
<i>Astrononion umbilicatum</i>		0.97	3.51	0.88	0.44		0.29	2.23	0.82	2.01	0.69			1.23	0.41
<i>Bolivina decussata</i>									0.27	0.40	0.69	1.36	0.42		
<i>Bolivina robusta</i>				0.29							0.69		0.42	0.41	1.24
<i>Bolivina</i> sp. A										0.27			0.42		0.41
<i>Bolivina</i> sp. B										0.13			0.83		
<i>Brizalina pacifica</i>													0.42	0.41	
<i>Buccella frigida</i>	0.65	0.24			0.44	0.44	5.00	5.06	4.63	2.41	1.38	1.81	2.08	0.82	2.89
<i>Bulimina marginata</i>								0.40	0.54	0.54		0.90	0.42		
<i>Bulimina</i> sp.											0.69	0.45	0.83		0.41
<i>Cancris auriculus</i>												0.45		0.41	
<i>Cassidulina carinata</i>														0.41	
<i>Cibicides inagawaensis</i>											0.35			0.41	0.83
<i>Cibicides refulgens</i>											0.35		0.42		0.83
<i>Cribrononion clavatum</i>		1.22	4.39	0.59	1.33	0.44	2.94	1.82	1.36	3.21	1.38	1.36	0.42	1.65	1.65
<i>Discammina emaciata</i>	0.32	0.24			0.44			0.61	0.27	0.40		0.90	1.25	0.82	0.41
<i>Discorbis australis</i>										0.27	0.35	0.45	1.25	0.82	1.65
<i>Discorbis chinensis</i>				0.44							1.04	0.45	0.83	0.41	1.24
<i>Discorbis</i> sp. A							0.29		0.27	0.13	1.04				0.83
<i>Discorbis taiwanensis</i>													2.50	3.70	2.48
<i>Eggerella advena</i>	18.12	7.30	7.89	7.94	9.29	12.32	41.48	25.51	35.15	12.72	17.99	13.57	9.17	3.70	2.07
<i>Elphidium advenum</i>		0.73	2.63					2.43	1.91	3.88	2.08	5.43	5.00	4.94	10.33
<i>Elphidium crispum</i>				0.29					0.27	0.27		2.26	1.67	2.88	4.55
<i>Elphidium etigoense</i>	0.65	10.22	12.28	10.00	5.75	0.88	4.41	25.71	20.16	39.22	9.34	11.76	13.33	20.99	8.68
<i>Epistominella naraensis</i>							0.59	0.81		0.40	3.46	2.71	1.25	2.88	3.31
<i>Epistominella nipponica</i>											1.38			0.41	
<i>Eponides nipponicus</i>							0.29	0.20	0.54						
<i>Eponides</i> sp.											0.35				
<i>Evolvocassidulina</i> sp.															0.41
<i>Fissurina agassizi</i>								1.82	0.82	0.94	0.69				
<i>Fissurina echigoensis</i>							0.88	0.20		0.13		0.45	0.42		
<i>Fissurina laevigata</i>													1.25		
<i>Fissurina marginata</i>										0.13	1.04	0.90		0.82	

Appendix. Continued.

Station No.	M1	M1	M1	M1	M1	M4	M4	M4	M4	M4	M6	M6	M6	M6	
Depth (cm)	0	8	15	20	30	0	5	10	20	30	0	5	10	20	30
<i>Fissurina orbignyana</i>													0.42		
<i>Fissurina wiesneri</i>											0.35			0.82	0.41
<i>Gaudryina niigataensis</i>													0.42		
<i>Globocassidulina parva</i>											0.35				
<i>Gyroidinoides nipponica</i>											0.35				
<i>Hanzawaia</i> sp.											0.35	0.45			
<i>Hopkinsina glabra</i>		0.73	0.44	0.88	1.33		6.47	9.11	4.63	9.10	13.49	9.05	4.58	5.35	4.55
<i>Islandiella norcrossi</i>								0.20				0.45		0.41	
<i>Islandiella norvangi</i>												0.35			
<i>Jadammina</i> sp.									0.27			0.35			
<i>Lagena clavata</i>				0.29			0.29	0.20		0.40		0.45			
<i>Lagena laevis</i>								0.20		0.27					
<i>Lagena parri</i>										0.13			0.42	0.41	
<i>Lagena sulcata</i>													0.42		
<i>Miliolinella circularis</i>		0.97	3.07	1.18	2.65						0.35	0.45	1.67	0.41	0.41
<i>Nonionella labradorica</i>							0.59	0.20	0.54	0.13	0.69	0.90	0.42		0.41
<i>Nonionella stella</i>							0.29	1.01	1.09	0.67	4.84	4.52	5.83	2.06	0.83
<i>Oolina globosa</i>															0.41
<i>Oolina hexagona</i>										0.27					
<i>Paracassidulina sulcata</i>											0.69				
<i>Planobulina</i> sp.											0.35				
<i>Pleurostomella alternans</i>	0.32	0.73	0.44				0.29	0.20							0.41
<i>Pleurostomella</i> sp.		0.73													
<i>Pseudononion japonicum</i>								1.01	0.54	0.40	1.73	2.71	2.50	3.70	1.65
<i>Pseudorotalia gaimardii</i>										0.13	1.73	2.71	6.67	8.23	19.01
<i>Quinqueloculina polygona</i>													0.42	0.41	0.83
<i>Quinqueloculina seminulum</i>		0.49	2.63	5.59	5.31		0.29		0.82		2.08	3.17	3.33	7.00	5.37
<i>Quinqueloculina</i> sp.													0.42		
<i>Quinqueloculina stalkerii</i>		0.24	0.44				0.29		1.63	0.27				2.06	2.07
<i>Reophax difflugiformis</i>											0.69		0.83	0.82	1.65
<i>Reophax</i> sp.	0.32	0.24									1.73	0.45			0.41
<i>Reussella aculeata</i>															0.41
<i>Rosalina</i> sp.													0.42	0.41	
<i>Rutherfordoides mexicanus</i>	0.32	1.46	1.75	0.88	2.21		2.06	2.43	4.36	6.96	0.35	0.45			0.41
<i>Spiroloculina</i> sp. A													0.42	0.41	0.83
<i>Spiroplectammina henmii</i>											0.35	0.90	0.42	0.82	0.83
<i>Spiroplectammina higuchii</i>														1.23	1.24
<i>Spirosigmoilinella</i> sp. A		0.24	0.44							0.67	0.35	1.36	0.83	2.47	0.83
<i>Spirosigmoilinella</i> sp. B									0.54	0.13		0.45	0.83	0.41	
<i>Spirosigmoilinella</i> sp. C												0.90	0.42		0.83
<i>Stainforthia</i> sp. B							0.29	2.83	1.63	1.07	0.69	1.81	2.50		
<i>Textularia earlandi</i>	9.71	6.08	9.65	9.12	12.39	4.40	1.18	1.21	3.00	0.54	2.42	0.45	1.25	1.23	0.83
<i>Triloculina tricarinata</i>											0.35	0.90	0.42	0.41	0.41
<i>Trochammina globigeriniformis</i>						1.76					0.35				
<i>Trochammina japonica</i>												2.26	0.42	0.82	
<i>Trochammina pacifica</i>	60.19	60.34	42.98	51.75	48.23	77.02	29.13	6.28	9.26	5.22	8.99	9.95	2.50		0.83
<i>Trochammina</i> sp.						0.88						0.90	0.42	0.41	0.83