

호기성 공동대사작용에 의한 판지폐수처리 - 현장 적용 테스트 -

The Treatment of Box-mill Wastewater Using Aerobic Cometabolism Process - Practical Plant Test -

조용덕^{1,*} · 이상화²

Cho, Yong Duck^{1,*} · Lee, Sang Wha²

1 에코하이텍

2 경원대학교 화학생명공학과

(2005년 12월 1일 논문 접수; 2006년 2월 10일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This study aims at developing the practical technology in the treatment of box-mill wastewater using the aerobic co-metabolism principle. The conventional activated sludge method exhibited the removal efficiency of TBOD₅ and TCOD_{Mn} as 30~50% and 40~50%, respectively. Color was rather increased by 30~130% because the conventional treatment under the aerobic condition did not induce the conversion of molecular structure of dyeing agents. Meanwhile, when the aerobic co-metabolism principle was applied to the same wastewater, the removal efficiency of TBOD₅ and TCOD_{Mn} were obtained as 92~97% and 90~94%, respectively. In particular, color was significantly reduced down to 65~85%. The enhancement of treatment efficiency was ascribed to occur not only that the non-degradables were converted to the second substrates, but also that the enzyme activity was increased as MLVSS was kept 3000mg/l or more with the first substrates injected.

Key words: Cometabolism, Conventional activated sludge, Substrate, Box-mill wastewater

주제어: 공동대사, 표준활성오니, 기질, 판지폐수

1. 서론

난분해성 물질 중에는 그 물질이 유일한 탄소원으로
로서 분해되는 경우보다 다른 유기물을 공존시키면

난분해성 물질의 분해속도가 오히려 빨라지는 현상이
나타나는데 이것을 공동대사작용(co-metabolism)이라
한다(김성기 등, 1999). Leadbetter와 Foster(1959)는
bacteria의 monooxy genase(메탄 산화반응의 개시단계
에 이용되는 효소)에 의해 일부의 alkane류들이 알코

*Corresponding author Tel: +82-31-492-1052, FAX: +82-31-495-8920, E-mail: eco-high@hanmail.net (Cho, Y.D.)

올로 우연하게 산화되는 것을 발견하고 이를 co-oxidation이라 명하였으며, 현재는 일반적으로 이를 cometabolism이라 칭하고 있다(McCarty, 2000). 공동대사(cometabolism)는 유기독성물질의 분해에 있어서 중요한 현상의 하나이다. 즉, 미생물은 생장 및 증식을 위해서 탄소원 또는 에너지원을 필요로 하고, 이러한 동화작용 및 이화작용의 과정에서 유기오염물질이 분해되는데 직접적으로 탄소원이나 에너지원이 되는 기질을 1차기질(primary substrate)이라고 한다. 그러나 어떤 경우에는 탄소원이나 에너지원이 되지 못하면서 미생물이 갖는 효소에 의해서 다른 화합물로 전환되는 경우가 있는데 이를 2차 기질(secondary substrate)이라고 부르며 2차 기질로 분해되는 현상을 공동대사라고 한다. 공동대사작용으로 분해된 유기독성물질은 이후 다른 미생물에 의하여 지속적인 분해 과정을 거침으로써 무해화 또는 저독성화 될 수 있다(구자공동, 2002). 이러한 현상에 대해 Atlas(1993)는 염료폐수의 색도 제거시 첨가되는 1차 기질은 폐수 내 난분해성 물질의 처리효율을 증가시키는 작용을 한다고 설명하였다. 따라서 본 연구에서는 판지공장 인쇄공정에서 발생하는 난분해성 인쇄 폐수처리의 현장 실용화를 타진하기 위하여 미생물의 호기성 공동대사작용을 적용하였다. 지금까지의 인쇄폐수처리는 대부분이 물리·화학적 처리방법에 의존하고 있는 실정이며 그나마 환경에 관심이 있는 경영주는 생물학적처리방법 중 표준화성오니법을 적용하고 있다. 이러한 이유 중의 하나는 특별한 처리공법이 없거나 또는 실험실에서의 실험은 처리효율이 높아 처리가 가능하다는 연구 보고는 많지만 현장에서의 실용화된 연구 보고는 전무한 상태라고 해도 과언이 아닐 것이다. 본 연구에서는 운전된 미생물의 호기성 공동대사작용에 의해 인쇄폐수의 난분해성 물질인 유기물과 색도가 효과적으로 제거되는 것을 현장 확인하였다. 이것은 미생물이 생육환경에 따라 미생물의 천이가 일어나며 또한 우점종 미생물이 출현하여 난분해성 물질을 생분해 또는 생합성하는 현상이 일어날 수 있다는 가능성을 제시하고 있다. 따라서 판지공장에서 발생하는 난분해성 인쇄폐수의 유기물과 색도 제거효율을 향상시키기 위한 대안으로 미생물의 호기성 공동대사원리를 이용한 가장 경제적이고 합리적인 생물학적 처리시스템을 제안하고자 한다.

2. 장치 및 방법

2.1. 장치

본 연구에 사용된 장치는 현재 운영중인 산업현장의 폐수처리장을 중심으로 시행하였으며 Fig. 1은 연구에 사용된 현장 폐수처리장의 공정에 따른 설계사양을 나타낸다. 현장 폐수처리장은 원수가 발생되면 집수조에서 일정시간 저류 시킨 후 1차 화학적 처리, 2차 미생물 처리를 하고 있다. 처리장의 설계사양은 1차 집수조 22.5m³, 2차 집수조 3.3m³, pH조 0.49 m³, 중화조 0.49m³, 응집조 0.49m³, 1차 침전조 4.7 m³, 1차 처리수 저장조 8.72m³, 미생물 반응조 16.0 m³, 2차 침전조 4.7m³, 2차 처리수조 1.0m³, A/C 여과조 0.58m³, 재이용수조 3.3m³로 구성되어있다.

2.2. 운전

본 연구에서는 경기도 시화공단에 위치하고 있는 종이류 골판지를 가공, 인쇄, 제조하는 공장을 대상으로 하였다. 골판지(BOX) 제조시 접착 공정에서 전분, NaOH, 봉사를 사용하며 인쇄 공정의 잉크는 안료, 아크릴계의 수지, 계면 활성제, 분산제, 실리콘 소포제, 솔벤트, 방향족 탄화수소 등을 포함하고 있다. 근본적인 폐수의 발생은 인쇄 공정에서 필름 세척시 다량 배출되며 절단 작업시 접착공정에서 사용된 물질이 미세 먼지의 형태로 소량 폐수처리장에 유입된다. 유입된 인쇄폐수를 폐수처리장 집수조에 집수하여 1차적으로 pH조정조에서 pH를 조정하고 중화조에서 중화를 시켜 플럭 형성조에서 입자를 크게 한 후 침전조로 유입된다. 침전조로 유입된 플럭은 상등수와 분리되어 상등수는 미생물 반응조로 유입되며 침전된 플럭은 Filter Press에서 여과되어 케이크로 배출된다. 2차적으로 미생물 반응조에서는 기존의 표준화성오니법을 2004. 7. 14~2004. 10. 20까지 적용하여 운전인자에 따른 유기물과 색도 제거효율을 검토하였다. 그 이후 2004. 11. 3~2005. 2. 15까지는 미생물의 호기성 공동대사원리를 적용하여 운전하였다. 호기성 공동대사원리의 적용에 있어서 미생물의 탄소원이나 에너지원으로는 전분을 1차 기질로 사용하였다. 1차 기질의 주입으로 MLVSS 3000mg/l 이상 증식되어 유출수가 일정하게 배출되는 시점을 정상상

Table 1. Characteristics of influent and effluent in aeration tank

Date	Q (m ³ /day)	pH		TN(mg/l)		TP(mg/l)		TBOD ₅ (mg/l)		TCOD _{Mn} (mg/l)		Color(unit)	
		Inf	Eff	Inf	Eff	Inf	Eff	Inf	Eff	Inf	Eff	Inf	Eff
2004-07-14	10	6.1	6.7	26	18	0.07	0.02	280	166	540	314	151	249
2004-07-21	10	6.0	6.8	31	20	0.08	0.03	315	182	605	355	120	235
2004-07-28	9	6.0	7.0	39	21	0.06	0.01	453	197	640	338	220	442
2004-08-04	10	6.0	6.8	44	26	0.04	0.01	321	192	580	340	162	218
2004-08-11	8	6.3	6.9	51	28	0.07	0.02	360	220	526	296	110	195
2004-08-18	7	6.1	6.5	42	19	0.03	0.01	275	185	613	360	210	405
2004-08-25	11	6.1	6.9	47	21	0.05	0.02	415	244	596	345	194	320
2004-09-01	7	6.0	6.6	50	24	0.06	0.02	230	135	562	290	145	305
2004-09-08	10	5.9	6.5	42	62	0.03	0.8	395	205	615	305	110	255
2004-09-15	12	6.3	6.8	48	27	0.07	0.1	254	131	480	236	170	360
2004-09-22	10	6.1	6.6	41	59	0.05	0.06	420	211	550	270	205	430
2004-10-06	9	6.1	6.6	43	35	0.07	0.06	340	165	620	307	174	320
2004-10-13	11	6.0	6.5	52	38	0.06	0.04	206	97	515	247	112	234
2004-10-20	7	6.3	6.7	55	47	0.04	0.05	380	185	576	277	108	221
2004-11-03	12	6.0	7.2	47	32	0.05	0.04	307	22	480	33	152	24
2004-11-10	10	6.3	7.0	41	31	0.09	0.08	420	19	612	42	110	18
2004-11-17	7	6.1	7.1	52	36	0.04	0.04	320	20	552	36	135	31
2004-11-24	10	6.0	7.0	48	34	0.07	0.08	386	18	607	45	180	26
2004-12-07	10	6.0	7.3	42	56	0.07	0.05	314	19	611	45	134	22
2004-12-14	11	6.1	7.2	47	59	0.06	0.04	392	21	562	32	109	18
2004-12-21	8	6.5	7.5	40	49	0.09	0.07	304	20	587	33	151	26
2004-12-28	9	6.1	7.3	51	61	0.06	0.05	365	24	430	42	124	24
2005-01-04	10	6.1	7.5	38	58	0.05	0.05	420	12	620	36	165	32
2005-01-11	11	6.0	7.7	50	64	0.07	0.06	325	21	585	34	124	29
2005-01-18	10	6.0	7.6	43	60	0.04	0.04	381	20	607	38	152	37
2005-01-25	7	6.1	7.8	42	66	0.08	0.05	404	23	536	30	118	41
2005-02-01	10	6.1	7.7	42	62	0.08	0.06	406	20	529	42	106	34
2005-02-05	8	6.0	7.5	51	64	0.07	0.06	318	18	608	38	162	40

태로 보고 유기물과 색도 제거효율에 따른 현장 적용 가능성을 타진하였다. 본 실험의 모든 수질분석은 산업현장 폐수처리장인 점과 수질환경보전법의 규제항목, 규제기준을 감안하여 수질오염공정시험법에 따라 시행하였다.

Table 1 은 미생물 반응조에 유입되는 원수의 농도와 처리수의 농도 특성을 나타내었으며 **Table 2**는 미생물 반응조의 운전조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 표준활성오니법과 호기성 공동대사작용에 의한 유기물/색도 제거 특성

본 연구에서의 표준활성오니법은 2004. 7. 14~2004. 10. 20까지 시행하였으며 연구가 시행되기 전

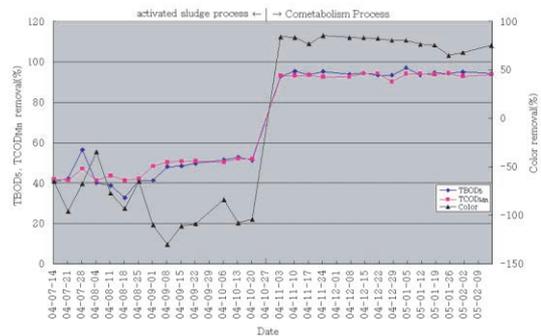


Fig. 2. Removal efficiency of TCOD_{Mn} and Color by cometabolism/activated sludge process.

에 이미 표준활성오니법으로 운전되고 있었기 때문에 별도의 시운전 없이 유기물의 처리효율 즉 TBOD₅, TCOD_{Mn}, Color의 제거효율을 측정하였다. 별도의

Table 2. Characteristics of influent and effluent in aeration tank

Data	MLVSS (ml/l)	F/M ratio		Lv		SRT (day)	Xe (mg/l)	HRT (hr)	R (%)	SV ₃₀ (mg/l)	SVI	Xr (mg/l)	DO (mg/l)
		TBOD ₅	TCOD _{Mn}	TBOD ₅	TCOD _{Mn}								
2004-07-14	1360	0.14	0.28	0.20	0.38	5.2	40	33.6	71.9	212	163	3250	1.2
2004-07-21	1120	0.2	0.38	0.22	0.43	4.8	43	33.6	65.4	185	165	2830	1.8
2004-07-28	1300	0.22	0.31	0.29	0.41	5.2	39	37.3	71.6	220	169	3115	1.7
2004-08-04	1280	0.18	0.32	0.23	0.41	5.1	42	33.6	72.4	245	191	3046	1.6
2004-08-11	1320	0.15	0.22	0.20	0.30	5.0	39	42.0	66.4	190	143	3307	1.5
2004-08-18	1100	0.12	0.27	0.13	0.30	5.0	40	48.0	66.2	252	229	2760	1.8
2004-08-25	1510	0.21	0.31	0.32	0.46	5.4	45	30.5	78.9	207	137	3422	1.7
2004-09-01	1420	0.08	0.19	0.11	0.28	5.7	45	48.0	83.8	220	154	3113	1.7
2004-09-08	1560	0.18	0.28	0.28	0.44	5.4	50	33.6	79.5	215	137	3520	1.5
2004-09-15	1510	0.14	0.27	0.21	0.41	5.3	46	28.0	83.9	254	168	3308	1.9
2004-09-22	1460	0.2	0.26	0.30	0.39	5.7	48	33.6	88.3	221	151	3112	1.8
2004-10-06	1580	0.14	0.25	0.21	0.40	5.8	58	37.3	94.2	195	123	3257	1.7
2004-10-13	1530	0.10	0.26	0.16	0.40	5.4	50	30.5	80.7	215	140	3425	1.6
2004-10-20	1550	0.12	0.18	0.19	0.28	5.8	54	48.0	84.6	230	148	3380	1.6
2004-11-03	3150	0.08	0.13	0.26	0.41	5.0	70	28.0	65.7	720	228	7940	0.5
2004-11-10	3506	0.08	0.12	0.30	0.43	5.5	78	33.6	75.9	690	197	8125	0.3
2004-11-17	3600	0.04	0.07	0.16	0.27	5.8	86	48.0	79.9	810	225	8104	0.4
2004-11-24	3410	0.08	0.12	0.27	0.43	5.7	76	33.6	80.7	775	227	7632	0.2
2004-12-07	3510	0.06	0.12	0.22	0.43	5.4	82	33.6	74.2	782	222	8235	0.3
2004-12-14	3406	0.09	0.13	0.44	0.30	5.5	71	30.5	76.2	675	198	7870	0.5
2004-12-21	3490	0.05	0.09	0.17	0.33	5.6	70	42.0	74.7	810	232	8160	0.4
2004-12-28	3500	0.06	0.07	0.23	0.27	5.2	74	37.3	67.0	825	235	8720	0.4
2005-01-04	3520	0.08	0.12	0.30	0.44	5.8	77	33.6	84.4	765	217	7690	0.3
2005-01-11	3580	0.07	0.12	0.25	0.46	5.5	86	30.5	77.3	790	220	8207	0.3
2005-01-18	3495	0.07	0.12	0.27	0.43	5.4	70	33.6	72.0	810	231	8346	0.1
2005-01-25	3510	0.05	0.07	0.20	0.26	5.2	78	48.0	70.1	785	223	8516	0.2
2005-02-01	3550	0.08	0.1	0.29	0.37	5.0	85	33.6	64.9	840	236	9012	0.3
2005-02-05	3520	0.05	0.09	0.18	0.34	5.4	83	42.0	73.3	832	236	8320	0.3

MLVSS : Mixed Liquor Volatility Suspended Solids

F/M ratio : $\text{kg} \cdot \text{TBOD}_5/\text{kg} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{day}$ or $\text{kg} \cdot \text{TCOD}_{\text{Mn}}/\text{kg} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{day}$

Lv : Loading Volume, $\text{kg} \cdot \text{TBOD}_5/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ or $\text{kg} \cdot \text{TCOD}_{\text{Mn}}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$

SRT : Solids Retention Time

Xe : Effluent biomass concentration

HRT : Hydraulic Retention Time

R : Sludge Recycle

SVI : Sludge Volum Index

Xr : Return biomass concentration

DO : Dissolved Oxygen

시운전이 필요치 않은 것은 이미 활성화오니가 활성화 되어 정상운전이 행해지고 있었기 때문이다. Fig. 2에 따르면 표준활성오니법에 의한 TBOD₅ 및 TCOD_{Mn}는 각각 30~50%, 40~50% 제거되었으나 Color은 오히려 30~130% 증가하는 현상이 나타났다. 그러나 호기성 공동대사작용에 의해 운전된 2004. 11. 3~2005. 2. 15에서의 TBOD₅, TCOD_{Mn}, Color 제

거효율은 각각 92~97%, 90~94%, 65~85%로 나타났다. 호기성 공동대사작용에 의한 TBOD₅, TCOD_{Mn}, Color의 제거효율이 표준활성오니법에 비해 매우 높게 나타났다. 이러한 제거효율의 향상은 미생물의 탄소원이나 에너지원으로 전분을 1차 기질로 투입하여 MLVSS 3000mg/l 이상을 유지한 후 분해속도가 빨라지는 현상에 기인하며, 이는 미생물의

활성을 제한하는 환경조건이 바뀌었음을 의미하며 특히 1차 기질의 투입에 따른 MLVSS의 증가로 효소의 활성이 증대하여 난분해성 물질이 분해되는 것으로 사료된다. 즉 1차 기질의 투입에 따른 원수 중 난분해성 물질이 2차 기질로 전환되어 미생물이 쉽게 분해하고 있음을 알 수 있었다. 특히 색도제거효율 측면에서 볼 때 표준활성오니법에서는 30~130% 감소하였으나 호기성 공동대사작용에서는 65~85% 증가하는 현상이 나타났다.

색도제거 특성에 대하여 많은 연구가 시행되고 있는데, 일반적으로 호기조건에서의 색도는 azo dye의 경우 azo 결합이 파괴된 후 hydroxylation과 방향족 중간생성물의 분자구조 변환에 의해 제거되는 것으로 알려져 있다(Zissi and Lyberatos, 1996).

또한 호기조건에서의 색도제거는 대부분 biosorption에 의한 것이며 이는 호기조건에서 일어나는 색도의 제거현상이 염료 분자구조의 변환을 수반하지 않는 것으로 알려져 있다(Shaul et al., 1987; Pansuwan and Panswad, 1997). Azo reactive dye를 대상으로 수행한 Panswad et al.(2001)의 연구결과, 혐기조건에서 35~63%의 색도제거효율을 얻었으며 호기조건에서의 색도제거는 15~18%로 나타나 혐기조건에서의 색도제거효율이 더 높게 나타나는 것을 확인하였다. 이들은 이러한 현상을 색도제거의 주요기전 즉, 미생물에 의해 혐기조건에서 염료의 공유결합이 생화학적으로 파괴되어 aromatic amine을 형성하는 현상과 미생물 floc에 흡착되는 현상으로 설명하였다. Luangdilok과 Panswad(2000)의 연구에 따르면 혐기조건에서 azo dye의 경우 57%, anthraquinone dye의 경우에는 31%의 색도제거효율을 보였다. 또한 호기조건에서는 azo dye의 경우에는 색도 제거효율이 2%로 매우 낮았으며 anthraquinone dye는 오히려 색도가 증가하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서의 실험결과는 호기조건에서 염료 분자구조의 변환을 수반하지 않지만 혐기조건에서 염료분자의 생화학적 분해 및 플럭 흡착에 의해 제거가 일어난다는 Luangdilok과 Panswad(2000)의 연구 보고와 유사함을 알 수 있었다. 따라서 호기성 공동대사작용에서 Color의 제거효율이 65~85% 증가하는 현상이 나타났는데 이러한 현상은 MLVSS 농도를 3000mg/l 이상 유지하고 DO 농도를 0.5mg/l 이하로 유지하였기 때문에 무산소 조

건에서 일어나는 염료 분자구조의 변환을 수반하였다는 결과로 사료된다.

본 연구자료를 종합해 볼 때 판지공장 인쇄폐수처리에는 1차로 혐기조건에서 염료 분자구조의 변환을 유도하고 2차로 호기조건에서 유기물과 색도를 동시에 제거하는 방안이나 호기성 공동대사작용에 의한 유기물과 색도를 동시에 제거하는 방안이 적용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

3.2. 운전인자에 따른 유기물/색도 제거특성

생물학적 처리방법은 미생물을 이용하여 폐수중의 유기물을 산화분해 시키는 것으로 미생물이 충분히 잘 자랄 수 있는 환경조건이 유지되어야 한다. 이러한 환경조건은 pH, DO, 온도, TN, TP, F/M비, SRT, MLVSS 등의 운전인자에 의해 조절이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 운전인자에 따른 유기물과 색도 제거특성을 검토하여 보았다.

3.2.1. DO

Fig. 3과 Fig. 4에서는 운전조건에 따른 유기물 및 색도의 제거효율을 나타내었다. DO가 낮은 상태에서 표준활성오니법에 비해 호기성 공동대사시 유기물 및 색도의 제거효율이 상대적으로 매우 높게 나타났다. 이러한 현상은 미생물의 생태특성에 영향을 받는 것으로 판단되며 표준 활성오니법에서는 Vorticella속이 압도적으로 출현하였으나 호기성 공동대사작용에서는 Paramecium속과 Beggiaoa속이 동시에 출현하였다. Vorticella속이 출현하였을 때의 환경조건은 DO 1.2mg/l, 온도 24~27°C, pH 6.1~6.9였으며 처리수



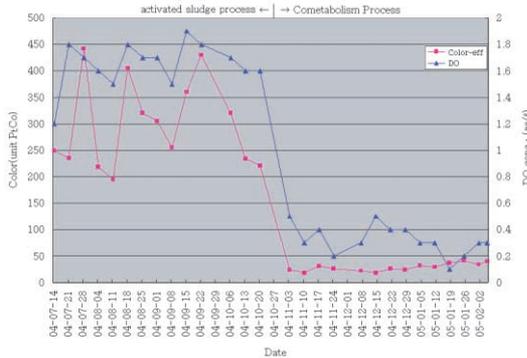


Fig. 4. Variation of color and DO in cometabolism/activated sludge process.

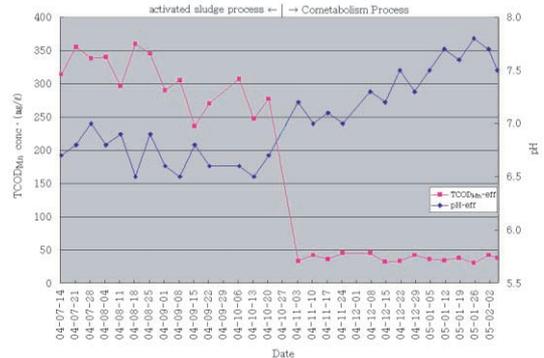


Fig. 5. Variation of TCODMn and pH in cometabolism/activated sludge process.

의 $TCOD_{Mn}$ 는 270~355mg/l로 유기물의 제거효율이 저조하였다. 그러나 *Paramecium*속과 *Beggiatoa*속이 공동으로 출현하였을 때의 제거효율은 $TCOD_{Mn}$ 50mg/l 이하로서 유기물의 제거효율이 매우 높았으며 환경조건은 DO 0.5mg/l 이하, 온도 23~25°C, pH 7.0~7.8로 나타났다. DO가 낮은 상태에서 유기물의 제거효율이 높은 것을 주목할 필요가 있는데 이것은 유입수중 난분해성 유기물질이 호기성 상태에서는 분해가 어려우나 DO 농도가 낮은 상태에서는 쉽게 분해할 수 있다는 것을 의미한다. 이것은 앞에서 논의한 바와 같이 호기조건에서는 염료 분자구조의 변환이 어렵지만 혐기조건에서는 염료 분자구조의 변환이 쉽게 일어나 유기물과 색도가 동시에 저하되어 미생물의 천이가 발생하는 것으로 사료된다.

3.3.2. pH와 TN, TP

미생물을 이용한 폐수처리에 있어서 최적 pH 영역을 벗어나게 되면 효소 활성이 급격히 저하되기 때문에 6~8 정도의 pH 범위가 적당한 것으로 알려져 있다. 또한 미생물은 세포생장에 필요한 영양물질이 요구되는데 전형적으로 미생물의 화학식은 환경공학에서 이 분야를 초기에 연구한 Hoover와 Porges(1952)에 의해 $C_5H_7NO_2$ 에 따른 BOD:N:P=100:5:1이 바람직한 영양물질 균형으로 많이 사용되고 있다(서명교 등, 1999). 본 연구에서는 유입수중 이미 pH와 영양물질의 균형이 유지되어 있었기 때문에 별도의 pH, TN, TP 조절은 생략하였다. Fig. 5에서는 미생물 반응조내 유입수의 pH는 약 6.0~6.5 이었으나 표준

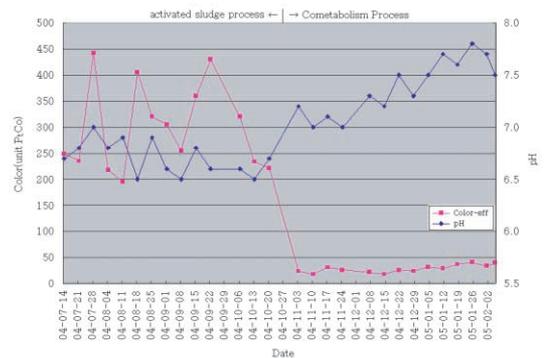


Fig. 6. Variation of color and pH in cometabolism/activated sludge process.

활성오니법(2004. 7.14~2004. 10. 20) 처리에서는 방류수의 pH가 6.5~7.0으로 약간 증가하는 현상이 나타났다. 그러나 공동대사작용(2004. 11. 3~2005. 2. 15)에서는 방류수의 pH는 7.0~7.8로 상당히 증가하는 현상을 볼 수 있었다(Fig. 5). 이러한 현상은 총 질소(T-N)가 NO_2^- , NO_3^- 등으로 산화되면 pH가 저하 되었으나 공동대사작용에서는 TN이 NH_4^+ 형태로 존재하기 때문에 pH가 증가하는 것으로 판단된다. 특히 공동대사 작용이 진행되고 $TCOD_{Mn}$ 의 제거효율이 증가할 때에는 DO의 감소로 NH_4^+ 형태의 질소는 더욱 더 촉진되어 pH가 상승하는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 6에 의하면 pH의 상승에 의해 Color의 제거효율이 $TCOD_{Mn}$ 과 유사한 경향을 나타내 주었다. 반면에 Fig. 7과 Fig. 8에 따르면 호기조건에서 질산성 질소와 같은 전자수용체가 존재하여 색

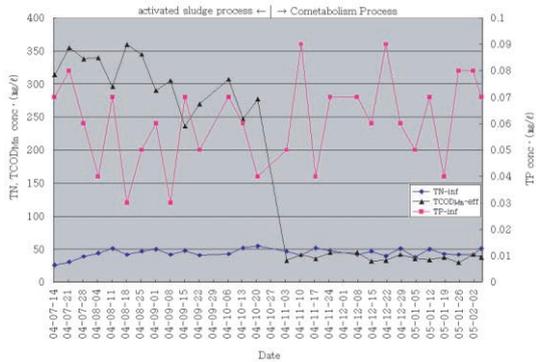


Fig. 7. Effect of TCODMn removal at different TN/TP concentrations.



Fig. 9. Effect of TCODMn removal at different F/M ratios.

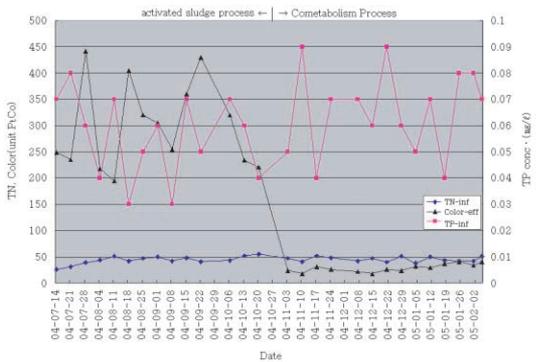


Fig. 8. Effect of Color removal at different TN/TP concentrations.

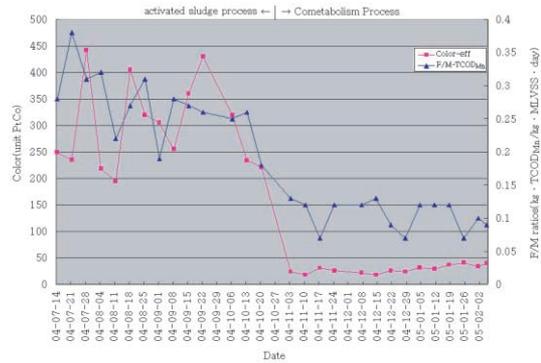


Fig. 10. Effect of Color removal at different F/M ratios.

도 제거효율이 감소하는 경향은 찾아보기 어려웠다. Carliell(1995)에 의하면 질산성 질소와 같은 전자수용체가 존재할 때 염료 제거기전에서 이의 제거를 위한 lag phase가 존재하며 이에 따라서 색도제거효율이 감소한다고 알려져 있다. Luangdilok와 Panswad(2000)에 의하면 nitrate의 농도의 증가는 denitrification로 인하여 COD 제거효율은 일정정도 향상시키지만 색도 제거는 저해한다고 하였다. 이는 nitrate와 azo 결합사이의 reductive competition 때문으로, 이 경우 nitrate가 azo 결합보다 electro negativity가 더 큰 전자수용체로 작용하기 때문이다. Zissi와 Lyberatos(1996)가 수행한 연구에서도 nitrate가 존재하는 무산소 조건에서 색도 제거와 함께 azo 결합의 파괴에 의한 aromatic amine의 현상을 관찰하였다. 상기 연구자료에서 분명한 것은 DO가 낮은 상태에서는 azo 결합이 파괴되어 색도제거효율이 증가한다는

것은 본 연구의 호기성 공동대사작용에 의한 색도 제거효율과 일치하였으나 TN, TP에 따른 유기물과 색도 제거 관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

3.2.3. F/M비와 BOD 용적부하

F/M비는 미생물에 대한 기질의 비로서 기질을 TBOD₅ 또는 TCOD_{Mn}으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 TBOD₅의 측면에서 F/M비와 TCOD_{Mn}의 측면에서 F/M비의 두 가지 측면에서 현장 조사를 실시하였다. F/M비와 TBOD₅, TCOD_{Mn} 관계를 볼 때 Table 2에서와 같이 표준 활성오니법(2004. 7. 14~2004. 10. 20)에서는 TBOD₅를 기준으로 할 때 F/M비는 0.08~0.22TBOD₅-kg/MLVSS-kg-day이며 TCOD_{Mn}를 기준으로 할 때 F/M비는 0.18~0.38TCOD_{Mn}-kg/MLVSS-kg-day이었다. 호기성 공동대사(2004. 11. 3~2005. 2. 15)작용에서는 TBOD₅를 기준으로 할 때 F/M비는 0.04~0.09TBOD₅-kg/



Fig. 11. Effect of TCODMn removal at different loading volume (Lv).

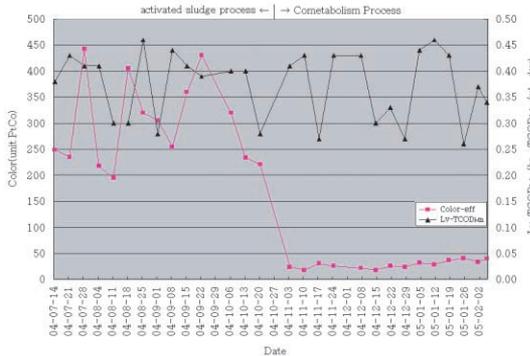


Fig. 12. Effect of Color removal at different loading volume(Lv).

MLVSS-kg-day이며 $TCOD_{Mn}$ 을 기준으로 할 때 F/M 비는 0.07~0.13 $TCOD_{Mn}$ -kg/MLVSS-kg-day이었다. 표준활성오니법에 의한 운전은 F/M비가 공동대사작용에 의한 운전보다 F/M비가 높았다. 따라서 Fig. 9와 Fig. 11에서와 같이 표준 활성오니법에서는 $TCOD_{Mn}$ 의 제거효율이 매우 저조하였으나 공동대사작용에서는 $TCOD_{Mn}$ 및 Color의 제거효율이 매우 높게 나타났다. 이러한 현상은 유기물의 부하가 MLVSS 농도에 의해 결정되므로 경험적 F/M 비를 도출할 필요가 있다. F/M비는 경험적 수치인 만큼 판지공장의 인쇄폐수처리의 경우 F/M비는 0.1 이하가 이상적인 수치로 판단되며 표준활성오니법과 비교해 볼 때 F/M비가 낮게 운전된다는 것은 폐수 내 무엇인가 난분해성 물질이 상당량 존재하고 있음을 간접적으로 나타내고 있다. 역으로 볼 때 처리시간을 최대한 길게 연장시키는 것도 하나의 방법이 될 것이

다. 일반적으로 전통 활성오니법에서는 BOD 용적부하를 0.3~0.6 $kg-BOD_5/m^3$ -day을 제안하고 있다(배우근 등, 2002). 본 연구의 표준활성오니법에 의한 BOD 용적부하는 0.11~0.32 $kg-TBOD_5/m^3$ -day이며 $TCOD_{Mn}$ 측면에서 볼 때 COD용적부하는 0.28~0.46 $kg-TCOD_{Mn}/m^3$ -day로서 $TBOD_5$ 에 의한 BOD용적부하 보다 $TCOD_{Mn}$ 에 의한 COD 용적부하가 높게 나타났다(Table 2). 전통 활성오니법에서 제안하는 수치는 $TCOD_{Mn}$ 에 의한 COD용적부하와 일치한다. 그러나 Fig. 11, Fig. 12에서 보듯이 표준활성오니법에서는 $TBOD_5$, $TCOD_{Mn}$, Color의 제거효율이 매우 저조하게 나타났다. 호기성 공동대사작용에 의한 BOD 용적부하는 0.16~0.44 $kg-TBOD_5/m^3$ -day이며 $TCOD_{Mn}$ 측면에서 볼 때 COD용적부하는 0.27~0.46 $kg-TCOD_{Mn}/m^3$ -day였으나 표준활성오니법과 똑같은 BOD용적부하에서도 $TBOD_5$, $TCOD_{Mn}$, Color의 제거효율이 매우 높게 나타났다. 이러한 현상을 볼 때 BOD 용적부하는 $TBOD_5$, $TCOD_{Mn}$, Color의 제거율과 관계가 없음을 의미하는 것 같다. 특히 난분해성 물질이 포함된 폐수에서는 BOD 용적부하에 의한 유기물, 색도 제거율을 결정하는 것은 매우 위험한 것이며 오히려 F/M비에 따른 해석이 용이한 것으로 판단된다. 환(2002) 설계 지침에서도 BOD 용적부하를 0.3~3.0 $kg-BOD_5/m^3$ -day의 범위를 설정하고 있으나 본 연구결과에 비추어 볼 때 다소 높은 제안 수치임에는 틀림이 없다. 어디까지나 이러한 제안 수치는 경험적 관찰 결과에 근거한 수치이며 폐수의 특성, 업종, 유기물의 종류, 영향인자 등에 따라 제안 수치는 변동될 수 있다고 본다.

4. 결론

본 연구에서는 경기도 시화공단에 위치한 판지공장 인쇄폐수를 대상으로 호기성 공동대사원리를 현장 적용하여 난분해성 인쇄폐수인 유기물과 색도 제거에 미치는 기초적인 운전인자의 영향을 고찰하였다. 결과적으로 본 연구의 호기성 공동대사작용에 의한 판지폐수처리 시스템은 유기물 및 색도 제거에 효과적인 처리시스템으로 현장 평가 되었다.

1) 표준활성오니법에 의한 $TBOD_5$ 및 $TCOD_{Mn}$ 의

제거효율은 각각 30~50%, 40~50%였으나 Color는 오히려 30~130% 증가하였다. 이러한 색도의 증가 현상은 호기조건에서는 염료분자구조의 변환을 수반하지 못하는 것으로 사료되었다.

2) 호기성 공동대사작용에 의한 $TBOD_5$ 및 $TCOD_{Mn}$, Color의 제거효율은 각각 92~97%, 90~94%, 65~85%의 제거효율을 얻을 수 있었다. 이는 1차 기질의 주입으로 $MLVSS$ 3000mg/l 이상, DO 0.5mg/l 이하가 유지되어 난분해성 물질이 쉽게 2차 기질로 전환된 결과로 판단되었다.

3) 유기물과 색도의 제거효율이 양호할 때의 환경 조건은 DO 0.5mg/l 이하, 온도 23~25°C, pH 7.0~7.8로서 유입수의 pH 6.0~6.5를 감안할 때 pH가 증가하는 현상이 발생되었는데 이것은 DO 부족에 의한 NH_4^+ 가 잔류하는 것으로 사료된다.

4) 표준활성오니법에서는 F/M비는 0.1~0.22 $TBOD_5$ -kg/MLVSS-k-g-day, 0.18~0.38 $TCOD_{Mn}$ -kg/MLVSS-k-g-day, BOD 용적부하는 0.11~0.32 $TBOD_5$ -kg/m³-day, 0.28~0.46 $TCOD_5$ -kg/m³-day였으며 호기성 공동대사작용에서의 F/M비는 0.04~0.09 $TBOD_5$ -kg/MLVSS-day, 0.07~0.13 $TCOD_{Mn}$ -kg/MLVSS-k-g-day, BOD 용적부하는 0.16~0.44 $TBOD_5$ -kg/m³-day, 0.27~0.46 $TCOD_5$ -kg/m³-day였다. 여기서 BOD 용적부하 측면에서 볼 때 표준활성오니법과 호기성 공동대사작용의 BOD 용적부하는 거의 같으나 표준활성오니법에서의 $TBOD_5$, $TCOD_{Mn}$, Color의 제거효율은 매우 낮다. 따라서 BOD 용적부하에 의한 폐수처리장의 설계·시공은 매우 위험한 것이며 F/M비에 의한 해석이 용이한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 구자공, 김경숙, 동종인, 박용하, 배우근, 양지원, 염익태, 윤석표, 이재영, 이주삼, 장윤영, 정재춘, 최상일, 황경엽, 황종식 (2003) 토양환경공학, 토양지하수 환경공학회, pp. 240-241.
2. 김성기, 강현삼 (1999) 환경 미생물학, 한국 방송대 출판부, pp. 251-252.
3. 배우근, 배재호, 양지원 (2002) 생물환경공학, 동화기술, p. 352.
4. 서명교, 서정범, 성낙창, 이기완, 조병락, 조영일, 김영석, 한기백 (1999) 상·하 폐수처리, 통일출판사, p. 584.
5. 환경부 (2002) 공동폐수처리장 설계지침, pp. 4-68.
6. Atlas, R.M (1993) Bioaugmentation to Enhance Microbial Bioremediation, In *Bioremediation of Industrial and Hazardous Waste*, McGraw-Holl Inc., New York.
7. Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., and Burcley, C.A. (1995) Microbial Decolorization of a Reactive Azo Dye under Anaerobic Conditions, *Water SA*, **21**(1), pp. 61-69.
8. Leadbetter, E.R., and Foster, J.W. (1959) Oxidation Products Formed from Gaseous Alkanes by the Bacterium *Pseudomonas methanica*, *Arch Biochem Biophys*, **82**, pp. 491-492.
9. Luangdilok, W., and Panswad, T. (2000) Effect of Chemical Structures of Reactive Dyes on Color Removal by an Anaerobic Process, *Wat. Sci. Tech*, **42**(3-4), pp. 377-382.
10. McCarty, P.L. (2000) Novel Biological Removal of Hazardous Chemicals at Trace Levels, *Wat. Sci. Tech.*, **42**(12), pp. 49-60.
11. Panswad, T., Techovanich, A, and Anotai, J. (2001) Comparison of Dye Wastewater Treatment by Normal and Anoxic+ Anaerobic/Aerobic SBR Activated Sludge Processes, *Wat. Sci. Tech.*, **43**(2), pp. 355-362.
12. Pansuwan, J., and Panswad, T. (1997) Color Removal of Disperse, Reactive and Sulfur Dye Wastewaters by an A/O-SBR Process, Proc. of the Asian Waterqual '97 (6th IAWQ: Asia-Pacific Regional Conference) Seoul, Korea, pp. 802-809.
13. Shaul, G.M., Dempsey, C.R., and Dostal, K.A. (1987) Fate of Water Soluble Azo Dyes in the Activated Sludge Process, U.S.EPA Water Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio.
14. Zissi, U. and Lyberatos, G. (1996) Azo-Dye Biodegradation under Anoxic Conditions, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(5-6), pp. 495-500.

1. 구자공, 김경숙, 동종인, 박용하, 배우근, 양지원, 염익태, 윤석표, 이재영, 이주삼, 장윤영, 정재춘, 최상일, 황