

하수와 소화슬러지의 CH₄가스 배출원단위 산정에 관한 연구

양형재* · 박정민

국립환경과학원 환경총량관리연구부

Estimate of CH₄ Emission Factors in Municipal Wastewater Treatment Plants

Hyung-Jae Yang*, Jung-Min Park

Environmental Cap System Research Department, National Institute of Environmental Research

Abstract

In order to study the estimate of CH₄ emission factors in the municipal wastewater treatment plants, the active sludge process, 5-stage process, Denipho process, and SBR process were investigated. When active sludge process, 5-stage process, and Denipho process were used in wastewater treatment plant, the CH₄ emission factors were 2.88, 1.61, and 0.57 g-CH₄/kg-BOD, respectively. On the other hand, in the case of SBR process, it was 4.14 g-CH₄/kg-BOD. These results indicate that SBR process was effective for CH₄ emission in municipal wastewater treatment plants. Using the above processes, the methane emission factor and amount of waste water sludge were 4.78m³/t and 12,204,506m³/yr, respectively. The remove of BOD was a range of 93.91 ~ 98.63%.

Key words : CH₄, emission factor, sludge, wastewater treatment

* Corresponding author E-mail : hyungyang@hanmail.net

I. 서론

우리나라는 1967년 서울에 중량위생사업소가 설치된 이후 분뇨, 산업폐수, 도시하수, 축산폐수처리시설, 마을하수처리시설 등을 차례로 도입하여 2008년 하수 처리율은 85%이상이다.

국가 경제력과 하수 처리율이 선진국 수준에 진입한 만큼 이제는 하수처리공정을 개선함으로써 처리효율을 제고할 뿐만 아니라 악취와 같은 처리장 주변의 2차 오염문제나 방류수 영양염류로 인한 하천의 부영양화를 방지하고, 런던협약에 의거 2012년 이후 해양투기가 금지되므로 근본적인 슬러지 처리기술도 확보하여야 한다.

또한 지구온난화와 기후변화를 위해 세계 모든 국가가 에너지를 절약하고 온난화 가스 발생을 억제하는 추세이므로, 국가에서도 “기후협약에 대비한 하수처리 시설관리 방안”과 같은 하수도종합계획을 수립하여 하수처리장 공정개선을 통한 온실가스 저감대책을 제시할 필요가 있다.

CH₄가스는 온난화가스의 하나로서 지구온난화 기여율이 CO₂의 21% 정도^{1,2)}로 알려져 있으므로, 배출량은 적지만 삭감대책이 수립되어야 한다.

CH₄가스는 산업적으로 생산하여 원료나 연료로 사용하기도 하지만, 대부분 자연계에서 혐기성 미생물에 의해 생성되고 있다.

CH₄가스의 배출원은 점오염원과 비점오염원으로 구분되며, 점오염원은 매탄가스 제조업체와 이를 사용하는 산업시설, 폐기물 매립장, 퇴비생산시설 및 보관시설, 축산시설, 광산, 하수처리시설, 농경지 등이고, 비점오염원은 부식질이 퇴적된 산림지역, 습지, 유기물이 함유된 하수와 하천수 등 매우 다양하다.

폐기물 매립가스를 이용한 전기생산, 고유가 시대를 맞이하여 대체연료로서 바이오가스의 생산 및 이용 등과 관련하여 CH₄가

스에 대한 관심이 대두되고, 다각적 연구가 진행되고 있다.

하수처리에 있어서도 혐기성분해, 혐기성 소화분야의 CH₄가스 관련 논문은 많으나 하수처리공정 및 슬러지 소화조의 CH₄가스 배출량 산정에 대한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 하수와 소화슬러지의 CH₄가스 배출원단위를 산정하고자 한다. 이를 위해서 하수처리 공정 4곳과 슬러지 소화조 1곳의 CH₄가스 배출원단위를 산정하고, 이를 이용하여, 전국 하수처리장의 연간 CH₄가스 배출량을 추정하였다.

II. 실험재료 및 방법

1 시료채취 대상시설

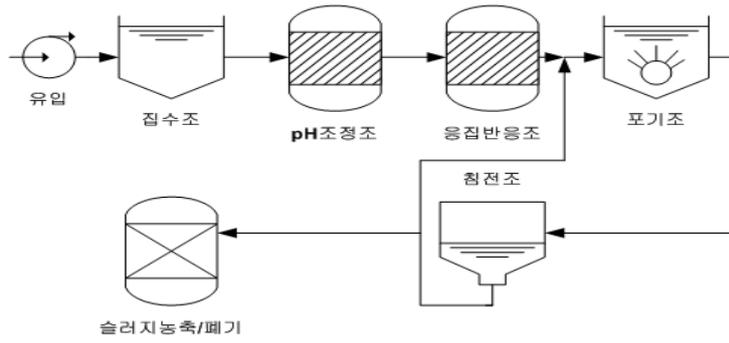
하수시료는 SBR공법은 D마을하수처리장, Denipho공법은 H하수종말처리장, 5-stage 공법은 Y환경사업소, 활성슬러지 공법은 K환경사업소에서 각각 채취하였으며, 소화슬러지는 서울시 중량 물체생센터에서 채취하였다.

1.1 활성슬러지 공법

활성슬러지 공법의 처리공정은 혐기성조, 1차 무산소조, 1차 호기성조, 2차 무산소조, 2차 호기성조로 구성된다. 유입수는 생활하수 및 분뇨혼합액 10,766 m³/day이고, 시료채취지점은 1차 침전지, 폭기조 및 2차 침전지이다.

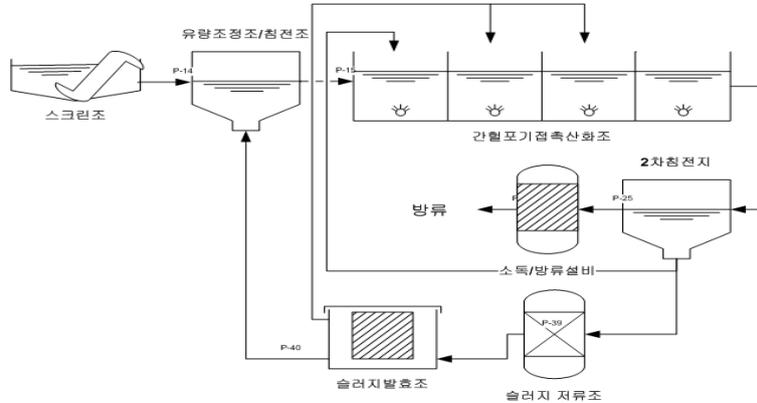
1.2 Denipho 공법

Denipho 공법의 처리공정은 유량조, 간헐폭기조, 발효조, 침전조, UV조, 저류조로 구성된다. 1일 유입하수량은 1,000m³이며, 호기성상태와 혐기성상태를 일정 시간 교대 운전함으로써 인 처리에 중점을 두고 있다.



물리화학처리/활성슬러지 공법

Fig. 1. The reacting system of activated sludge process.



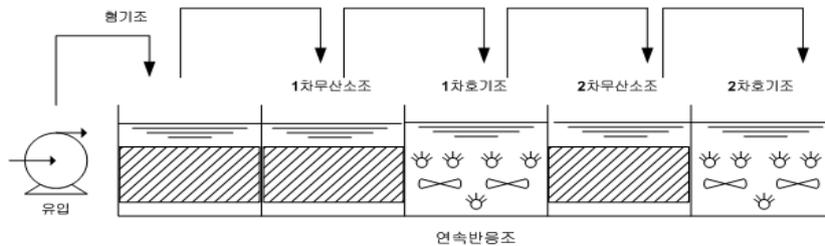
하자포 마을하수처리장
후탈질 간헐폭기(Denipho)공법

Fig 2. The reacting system of Denipho process.

1.3 5-stage 공법

5-stage 공법의 처리공정은 혐기성조, 1차 무산소조, 1차 호기성조, 2차 무산소조, 2차 호기성조로 구성되었다. 이 공법은

장방형으로 된 연속처리공법을 선택하여 총 5단계로 하수를 처리하고 있다. 유입하수는 생활하수와 분뇨혼합액이다.



양평환경사업소 5-Stage

Fig. 3. The reacting system of 5-stage process.

1.4 SBR 공법

SBR 공법의 처리공정은 집수조, 침전분

리조, 유량조정조, IC-SBR, 처리수조, 방류조, 슬러지 저류조로 구성되며, 유입수는 생

활하수, 분뇨 등 44 m³/day이다.

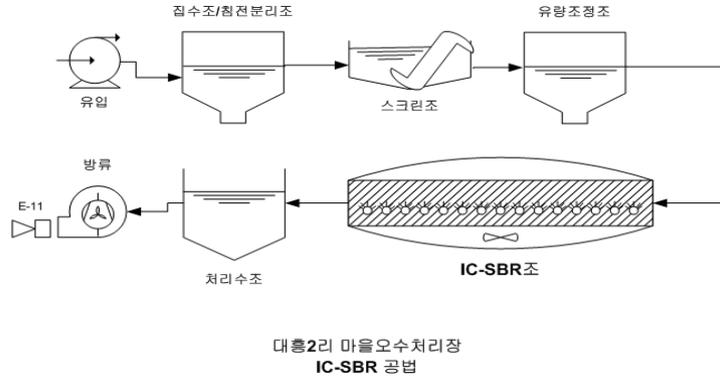


Fig. 4. The reacting system of SBR process.

1.5 중량 물재생센터

중량 물재생센터에서는 혐기성소화조에 서 하수슬러지를 소화하여 에너지를 회수한다. 2006년 11월부터 1년 동안 처리한 슬러지의 양은 2,761,933m³이고, 이때 발생한 가스는 20,550,234m³이며, CH₄가스 순도는 평균 64.6%이다.

2 시료 채취방법

시료채취기간은 2006년 11월부터 1년 동안이다.

챔버의 용량은 30ℓ이고, 하부원의 바닥 면적은 0.130m²이다. 가스 유입관은 챔버 내에서 가스가 원활하게 완전 혼합되도록 원통을 따라 등글게 설치하여 전체적으로 가스가 유입되도록 설치하였다.

시료채취에 사용한 flux chamber는 상부 dome과 하부 원통 모두를 stainless steel로 제작한 후 불활성 재질은 테플론으로 코팅하였다. 혐기성조에서는 챔버를 중심부에 설치하고 호기성조에서는 대표값을 나타 낼 수 있도록 폭기량이 평균치로 보이는 곳에 설치하였다.

Flux chamber의 측정순서는 측정지역을 선정한 후, 표면 위에 챔버를 띄워 챔버로 Ar가스를 흘려보내어 분석용 가스를 채취하였으며, 채취 후에는 챔버를 세척하고 다른 측정 지역으로 이동하였다.3)

챔버는 하수면 위에 띄우고 끈으로 고정시켰는데, 폭기조에서는 챔버가 움직여 포집된 챔버 내부가스가 수면으로 방출되거나 전복되기도 하여, 이를 방지하기 위해서 끈으로 단단하게 고정시켰다.

챔버의 원통하부가 수면에 잠기도록 설치하여 운전하였고 시료채취를 위한 가스포집은 수면에서 발산되는 가스와 유입하는 Ar이 혼합되어 유출되는 가스를 채취하였다. 유입가스는 carrier gas로써 발산가스와 반응하지 않는 불활성기체인 Ar가스를 사용하고, 유입속도는 1ℓ/min으로 조절하였다.

챔버설치 후 채취시기는, 발생가스와 유입 아르곤 가스가 내부에 충분히 차서 시료채취관으로 나오는 이후에 개시하였다. 그러나 폭기가 이루어지는 호기성 기간에는 발생공기가 많아서 Ar가스를 주입하지 않고 채취하였다.

반응조가 큰 경우에는 유입부, 중앙부 및 유출부 등 3개 지점에서 채취하였다. 호기/혐기 단계가 교대로 일어나는 간헐폭기조에서는 각 단계별 온실가스 성분별 발생량을 비교하기 위하여 초기, 중기, 말기로 구분하여 채취하였다.

3 분석방법

CO₂, N₂O, CH₄의 정량은 6 port gas sampling valve가 장착된 GC (Agilent Co.)로 분석하였으며, CO₂, CH₄분석 검출기는 FID를 사용하고 N₂O분석 검출기는 ECD를 사용하였다. GC 분석조건을 Table 1에 나타내었다. 정량을 위한 표준가스는 산업기술시험원의 인증을 받아 사용하였으며, 검량선의 R²값은 CO₂, N₂O, CH₄ 모두 0.999이상이었다.

Table 1. GC conditions to analyze GHC

Detector	FID	ECD
Column	Porapak Q(80/100) Stainless steel	HP-PLIOT molesieve 5A
Inj. Temp	50℃	50℃
Oven Temp.	50℃	50℃
Det. Temp	150℃	280℃
Carrier gas	N ₂	N ₂
Floe rate.	30 ml/min	30 ml/min
Loop	1 ml	1 ml

III. 결과 및 고찰

1 공법별 하수의 CH₄가스 발생원단위

하수처리공정의 처리효율은 처리공법, 유입수의 성상, 체류시간, 유입공기량, 폭기조 미생물의 종류·상태·농도, 순환율, 수온 등에 따라 달라진다.

Table 2. Removal efficiencies of BOD according to process

항목	활성슬러지 공법			SBR 공법			5-stage 공법			Denipho 공법		
	유입 (mg/l)	유출 (mg/l)	제거율 (%)	유입 (mg/l)	유출 (mg/l)	제거율 (%)	유입 (mg/l)	유출 (mg/l)	제거율 (%)	유입 (mg/l)	유출 (mg/l)	제거율 (%)
BOD	165.9	10.1	93.91	189.7	2.6	98.63	137.9	2.8	97.97	215.8	4	98.15

조사대상 공법별 BOD제거율은 연속회분식 공법이 98.63 %로서 가장 높고, Denipho 공법이 98.15 %, 5-stage 공법이 97.97 %이며, 활성슬러지 공법은 93.91 %로서 가장 저조하였고 4가지 공법의 평균 제거율은 97.17 %이다.

공법별 유출수의 BOD농도는 연속회분식 공법이 2.6 mg/l로서 가장 우수하고, 5-stage 공법이 2.8 mg/l, Denipho 공법이 4 mg/l이고, 활성슬러지 공법은 10.1 mg/l로서 가장 저조하였다.

공법별 처리용량기준 CH₄가스 발생원단위는 연속회분식 공법이 774.4 mg/m³으로 가장 높고, Denipho 공법이 611 mg/m³, 활성슬러지 공법이 250.1 mg/m³이고, 5-stage 공법은 77.5 mg/m³으로 가장 낮았

다. 5-stage 공법의 CH₄가스 발생원단위는 활성슬러지 공법의 30% 수준이고, SBR 공법의 10%에 불과하다.

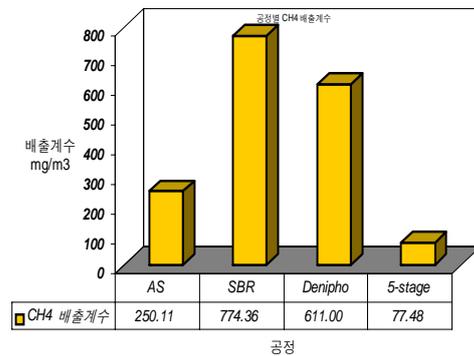
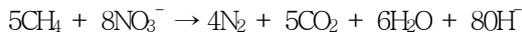


Fig 5. CH₄ emission factors in the various processes.

이와 같이 5-Stage 공정에서 CH₄가스 배출원단위가 작은 것은 최초침전지 유출수

가 혐기성조와 무산소조를 통과하는 과정에서 용존 CH₄가 방출되고, 무산소조에서 탈질반응의 수소공여체로 CH₄가 소비되기 때문이다.

일반적으로 혐기성조의 인 농도가 낮고, 처리수의 T-N농도가 낮으면 혐기성조에서 탈질반응이 진행된 것으로 생각할 수 있다. 그러나 처리수의 T-N농도가 낮은 것만으로 탈질반응이 진행되었다고 평가하기는 불분명하다.



水落元之 등5)은 하수처리장의 CH₄가스

배출량은 수온이 13℃에서 24℃로 증가하면 3.9배이고, 20℃에서 24℃로 증가하면 2배정도 증가하여 수온의 영향이 크다고 보고하였다.

또한 공법별로 배출원단위(BOD 부하량에 따른 CH₄가스 발생량)는 연속회분식이 4.14g g-CH₄/kg-BOD로서 가장 높고, Denipho 공정이 2.88 g-CH₄/kg-BOD, 활성슬러지 공법이 1.61 g-CH₄/kg-BOD이며, 5-stage 공법은 0.57 g-CH₄/kg-BOD으로 가장 낮았다.

4가지 공법의 평균 배출원단위는 2.3 g-CO₂/kg-BOD이고, 5-Stage 공정의 CH₄ 가스 배출원단위는 SBR 공정의 14%정도에 불과하다.

Table 3. Estimate of CH₄ emission factor by pollutants loading

공정별	CH ₄ 발생량(mg/m ³)	BOD제거율(%)	CH ₄ 가스 배출원단위
활성슬러지	250.11	93.91	1.61g CH ₄ / kg BOD
SBR	774.36	98.63	4.14g CH ₄ / kg BOD
Denipho	611.00	98.15	2.88g CH ₄ / kg BOD
5-stage	77.48	97.97	0.57g CH ₄ / kg BOD
평균	428.24	97.17	2.30g CH ₄ / kg BOD

2 하수처리 공법별 CH₄가스 배출량

한편 2005년 기준 전국의 공법별 하수처리장 점유율은 활성슬러지, Denipho 5-Stage 및 SBR공법이 각각 63.8, 18.1, 13.6 및 4.5%이므로, 공법별 점유율, 연간 처리량 및 위에서 산정한 CH₄가스 배출원

단위를 곱하여 구한 하수처리 공법별 CH₄ 가스 배출량은 활성슬러지, Denipho 5-Stage 및 SBR공법이 각각 980.3, 679.5, 214.1 및 64.8 t/yr로서 전국 하수처리장의 연간 CH₄가스 배출량은 1,938.7t/yr로 추정된다.

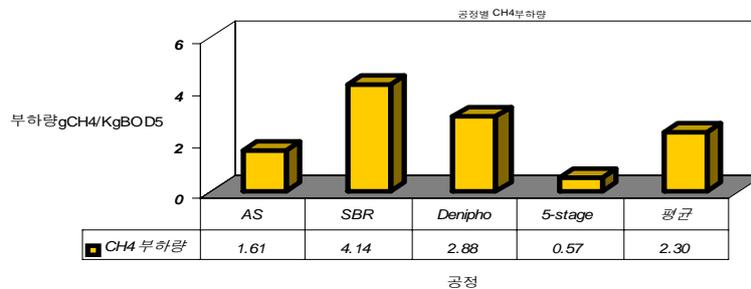


Fig. 6. Comparison of emission factors by the removed BOD.

Table 4. Comparison of emission factor and amount of methane in the various processes.

배출	공법	배출원단위 (mg/m ³)	적용 점유율(%)	전국하수처리장 배출량(t/yr)
CH ₄	5-stage	77.5	13.6	64.8
	활성슬러지	250.1	63.8	980.3
	Denipho	611.0	18.1	679.5
	SBR	774.4	4.5	214.1
	CH ₄ 가스발생량 합계		100	1,938.7

平出 등4)은 공법별 CH₄가스 배출량은 질화탈질법(순환법)이 다소 많고, 혐기-호기활성슬러지법과 표준활성슬러지법은 비슷하다고 보고하였다.

水落元之 등5)은 폭기조와 슬러지 농축조에서 CH₄가스가 배출되는데, 폭기조는 유입수와 슬러지 반송수에 포함된 것과 슬러지 침전부에서 생성된 것이고, A2O공법의 호기성조에서 CH₄가스 배출량이 많고, A2O공법 배출량은 표준 활성슬러지공정의 약 1/3정도이며, 1995년 일본 하수처리장의 CH₄ 배출량은 6.7x10⁹ g/yr라고 추정하였다.

3. 소화슬러지의 CH₄가스 배출원단위

전국 하수처리장 소화슬러지의 연간 CH₄가스 배출량을 산출하기 위해 서울시 중량물재생센터 소화조의 하수슬러지 CH₄가스 배출원단위를 조사하였다.

중량물재생센터 소화조의 슬러지 처리량은 평균 2,761,933 m³/mon이며, 가스 배출량은 8월과 9월에 10.8 m³/m³ 및 10.3m³/m³로서 크고, 11월에는 3.8m³/m³로 가장 작았으며, 월평균 배출량은 7.4m³이다.

Table 5. CH₄ emission factor of sludge

측정기간	슬러지처리량 (m ³ /월)	가스발생량 (m ³ /월)	가스배출계수 (m ³ /m ³)	가스의 CH ₄ 농도 (%)	CH ₄ 가스배출원단위 (m ³ /m ³)
2006.11~2007.10	2,761,933	20,550,234	7.4	64.6	4.78

배출가스의 CH₄가스 농도는 64.6%이므로 소화슬러지의 CH₄가스배출원단위는 4.78 m³/m³이다. 이 값을 월 하수처리량에 곱하면 CH₄가스 배출량은 20,550,234 m³/mon이다.

잉여슬러지 농축공정 등에서 배출되는 CH₄가스는 발생량이 적어서 무시해 왔으나, 탈질반응의 에너지원으로 사용하자는 의견이 대두되고 있다.4)

중량물재생센터 소화조 하수슬러지의 CH₄가스 배출원단위 4.78 m³/m³를 2005년

전국 하수슬러지 발생량 2,560,959 t/yr에 곱하면 전국 하수처리장 소화슬러지의 CH₄가스 배출량은 12,204,506 m³/yr (8,718 t/yr)로 추정된다.

A2O공법의 CH₄가스 배출량이 적은 것은 유입수가 최초침전지를 거쳐 반응조에 유입될 때, 혐기성조/무산소조를 통과하는 사이 용존되어 있던 CH₄가 방출되고, 무산소조에서 진행되는 탈질반응의 수소공여체로 소비되기 때문이고, 5-stage 공법에서 CH₄가스 배출량이 저조한 것은 A2O공법과 마찬가지로

가지로 혐기성조에서 용존 CH₄가스가 방출되고, 무산소조에서 탈질반응의 수소공여체로 소비되기 때문이라고 판단된다.

최근 국제적 석유파동으로 인한 에너지대체와 지구온난화 방지 차원에서 COD/NO₃-N 비, SRT, pH 등에 따른 CH₄가스 생성에 대한 연구가 활발하게 진행될 전망이다.

VI. 결 론

하수와 소화슬러지의 CH₄가스 배출원단위를 산정하기 위해서 하수처리 공정 4곳과 슬러지 소화조 1곳의 CH₄가스 배출원단위를 산정하고, 전국 하수처리장의 CH₄가스 배출량을 추정된 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 공법별 하수처리용량기준 CH₄가스 발생원단위는 연속회분식 공법이 774.4 mg/m³으로 가장 높고, 다음은 Denipho 공법, 활성슬러지 공법 순이며, 5-stage 공법 SBR 공법의 10%수준이었다.
2. 하수의 BOD 부하기준 CH₄가스 발생원단위는 연속회분식, Denipho, 활성슬러지 및 5-stage 공법이 각각 4.14, 2.88, 1.61 및 0.57 g-CH₄/kg-BOD이고, 평균 2.3 g-CO₂/kg-BOD이었다.
3. 2005년 기준 하수처리 공법별 CH₄가스 배출량은 활성슬러지, Denipho, 5-Stage 및 SBR공법이 각각 980.3, 679.5, 214.1

및 64.8 t/yr로서 전국 하수처리장의 연간 CH₄가스 배출량은 1,938.7t/yr로 추정된다.

4. 소화조 하수슬러지의 CH₄배출원단위는 4.78 m³/m³이며, 2005년 전국 하수슬러지의 CH₄ 배출량은 12,204,506 m³/yr로 추정된다.

참고문헌

1. US EPA, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emission and Sinks: 1990-2005, 2007.
2. IPCC Forth Assessment Report, IPCC, 2007.
3. 강경희, "플럭스 챔버를 이용한 하수처리장 HAPs 배출특성 연구,"서울시립대학교 대학원 공학박사학위논문, 2006.
4. 平出, 中島, "下水道施設から排出される地球温暖化物質(CH₄, N₂O)排出Inventory算定と排出制御技術," 日本下水道協會誌, Vol. 42, No. 508, 2005.
5. 水落元之, 佐藤和明 등, "GHG CH₄, N₂O의標準活性汚泥法および嫌氣·無酸素·好氣法から放出量の比較分析," 日本水處理生物學會誌, 35(2), 109-119, 1999.
6. 환경부, 환경기초시설에서의 온실가스 배출량조사에 대한 연구, 2000.