

후오존공정의 kCT(kinetic CT) 인자를 이용한 자동제어기술

글 오현제 _ 한국건설기술연구원 수석연구원

✦ 본 고는 지난 호(2004년 여름호)에 이어 G7 환경기술개발사업의 지원 아래 1998년부터 2001년까지 3년 동안 '오존, 활성탄 정수시스템의 자동화 및 관련설비의 개발' 사업에서 일부 수행된 결과 가운데, kCT(kinetic CT)를 이용한 오존공정 자동제어기술에 대하여 소개하고자 합니다.



1. 서론

국내에는 낙동강 수계를 중심으로 후오존공정을 운전 중이며, 다수의 정수장에서 도입을 추진하고 있다. 후오존공정은 고도정수처리의 핵심공정으로서 후오존 및 BAC 조합정수공정으로 정착되어 향후 전국적인 보급이 예상된다.

후오존공정은 미량유기오염물질 및 휘발성 유기물질의 제거, 난분해성유기물질의 생분해성물질로 전환, THM(FP) 제거 등을 주요 도입목적으로 하고 있다. 그러나 이러한 도입목적은 후오존 단독공정에서 그치는 것이 아니라 후속 BAC 공정과의 조합공정으로서 달성할 수 있는 목표라고 할 수 있다. 이에 따라, 후오존공정의 적정 운전조건은 과량의 오존을 주입하여 이러한 도입 목적을 초과하여 달성하는데 있는 것이 아니라, 후속 BAC공정과의 유기적 관계를 고려하여 결정돼야 한다. 즉, 후오존처리는 유기물질의 저분자화와 생분해성을 증대시킴으로써 후속 BAC공정의 생물학적 처리에 유리하도록 하는 작용과 동시에, 극성(Polarization)과 친수성을 증대시키고, 유기물질의 저분자화를 유도하여 흡착능 저하를 유발함으로써, 악영향을 유발한다. 따라서 후오존공정의 적정 주입농도는 후속 BAC공정에 미치는 순영향과 악영향을 동시에 고려해야 할 뿐만 아니라, 자체의 산화능을 충분히 발휘할 수 있는 농도로 결정되어야 한다.

기존의 오존제어기법으로는 유입수량에 따라 일정한 농도로 오존을 주입하는 주입오존농도 일정제어기법, 잔류오존농도를 일정하게 유지하는 잔류오존농도 일정제어기법과 기타 배오존농도 제어기법 및 처리목표치 제어기법 등이 있다. 이러한 기존 오존제어기법의 문제점은 대부분 Feed-back 제어를 하므로 물질전달과 체류 및 확산, 반응과정에서 응답이 늦어져 실시간 제어가 어렵고, 운전 및 제어가 간편하나 유입원수의 수질 및 수량 변화에 실시간으로 대응하는 것이 불가능하고, 과소하거나 과다한 양의 오존이 주입될 가능성이 커서 오존산화처리가 불충분하거나, 후속 활성탄 공정에서 과도한 잔류오존의 휘산 및 산화부산물물질의 과다 생성

등의 문제를 유발할 수 있다는 점을 지적할 수 있다.

본 kCT 제어기법은 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 유입원수의 수질변화에 따른 오존소비특성을 실시간으로 제어에 반영하고, 유입수량에 따른 접촉시간의 변동을 실시간으로 제어에 반영하여, 기존 후오존공정의 제어기법에서 발생하는 많은 문제점들을 해결할 수 있도록 하였다. 또한, 현장에 쉽게 적용할 수 있고, 자동제어시스템의 도입이 용이하도록 개발방향을 설정하였다. 이를 위하여 오존주입농도에 따른 kCT의 거동을 분석하여 kCT에 대한 충실한 이해를 도모하고, 후오존공정의 kCT를 산출하는 실험기법을 정립하고, kCT에 따른 후오존 및 후오존/BAC 조합공정의 처리효율을 분석함으로써, 후오존공정의 최적 kCT를 도출하고, 후오존공정에서 설정 kCT에 의한 kCT 자동제어시스템을 개발하고자 하였다.

2. 오존소비특성을 이용한 kCT의 의미 및 산출

본 연구는 오존접촉지로 유입되는 유입원수의 오존소비속도를 즉시 측정할 수 있는 장치를 개발하여 원수의 특성을 규명함과 동시에 이러한 오존소비속도 인자를 활용한 오존 산화공정의 제어기법을 개발하는데 그 목적이 있다. 이러한 방법을 통하여 실제 원수에서의 오존 이용효율의 향상 및 기대되는 처리효과에 부합되는 오존주입농도 등의 예측이 용이하게 이루어질 수 있도록 하였으며, 변화하는 수질특성에 대응하여 다르게 측정되는 오존소비속도를 고려한 순오존소비량(kCT값)의 산정으로 처리목표(유기물 제거 등에 합당한 오존 산화공정의 자동제어가 이루어질 수 있다. 대상수에 오존을 주입하고 오존이 분해 되는 과정을 측정하면, 잔류오존농도가 주입과 동시에 순간적으로 감소하는 현상이 나타난다. 이러한 현상은 오존을 주입하였을 때, 원수에 포함된 유기물이나 오존산화요구물질에 의해서 순간적으로 소모되면서 나타나는데, 이를 순간오존요구량(Instantaneous Ozone Demand, ID)이라고 한다. ID란 오존을 주입하였을 때, 원수에 포함된 유기물이나 오존산화요구물질에 의해서 순간적으로 소모되는 오존량이며

로 원수의 수질특성에 따라 수시로 변화한다. 대상수에 오존을 주입하면 ID에 해당하는 오존이 급격하게 감소하고 이렇게 일차적으로 감소된 오존은 시간이 지남에 따라 서서히 분해 된다. 유입원수의 특성에 따라 수중의 잔류오존농도의 감소속도에는 차이가 있으며, 이 속도를 측정하여 특성인자로 사용할 수 있는데, 이 소비속도상수가 오존소비속도(kc)인자이다. kc는 원수수질을 대변하는 특성인자로서 pH, 알칼리도 및 TOC 등의 유기물 오염 양상과 브롬이온(Br⁻), 철, 망간과 같은 무기물 존재량 등 여러 가지 요인에 의해서 변화된다. 이러한, 원수 중의 유·무기 인자들에 의해서 오존이 소모되는 속도가 달라지므로, kc는 오존산화 처리시 중요한 지표로 사용될 수 있다. 그러나 ID 및 kc를 오존공정에 직접 적용하기에는 용이하지 않으므로 오존소비량(kCT, kinetic CT)을 산출하여 오존의 분해속도를 측정함으로써, 오존처리 대상 원수에 존재하는 오존 소비물질들을 총괄적인 지표로 활용하고자 하여 오존공정에 적용하고자 하였다. 오존요구량(kCT)란 ID 및 kc를 바탕으로 도출된 오존소비식을 현장에 있는 오존공정의 실제체류 시간에 대하여 적분한 값이다.

$$\text{오존요구량(kCT)} = \int (\text{Residual Ozone Conc.})t dt$$

즉, 오존공정의 유입수가 오존을 소비하는 온도, pH, 알칼리도, 용존유기물질, 입자성물질, NO₂⁻-N, NH₃-N, Fe²⁺, Mn²⁺, Cl⁻, Br⁻ 등을 모두 포함한 오존소비특성에 대하여 실제체류시간을 고려한 값으로서 이 값을 만족시키는 오존주입량이 최적 오존주입농도가 된다. 따라서 오존요구량(kCT)을 연속적으로 측정하여 제어에 활용하는 오존공정의 자동제어시스템을 구축하면 수시로 변화되는 유입수의 수질변화에 실시간으로 대처하는 것이 가능하다. 또한, 수질 및 수량에 따라 요구되는 오존량을 정확히 측정하여 항상 적정한 오존농도를 주입할 수 있으므로, 안정적인 처리수질을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 오존발생을 위한 에너지 소비를 최적화할 수 있다. 그림 1)은 M정수장 고도정수 파일럿 플랜트의 처리공정별 kc 및 kCT의 거동을 분석한 결과이다. kc는 공정이 진행됨에 따라 지속적으로 낮아지는 양상을 보여주고 있다. 한편, kCT는 6mg/L·min에서 12mg/L·min까지 계속 상승하고 있음을 알 수 있다. ID, kc 및 kCT 모두 침전공정까지는 급속하게 변화하지만 모래여과공정 이후에는 안정화되는 특성을 보이고 있다.

3. kCT 자동측정장치 및 제어프로그램 개발

(1) kCT 자동측정장치

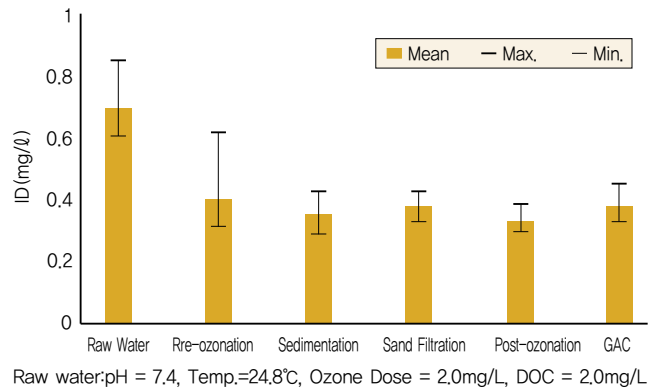


그림 1) Variation of the ID along the demonstration treatment line
kCT 자동측정장치를 이용하여 ID, kc 및 kCT를 분석하였다. 이

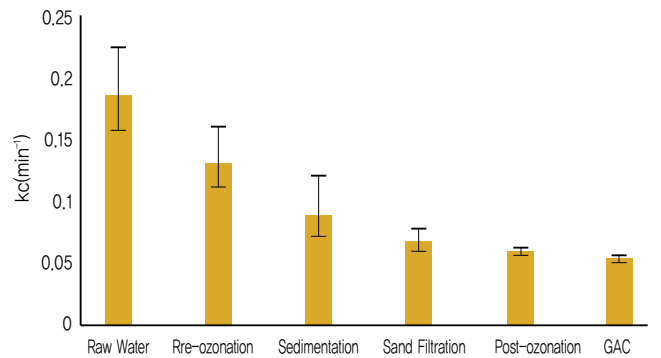


그림 2) Variation of the kc along the demonstration treatment line

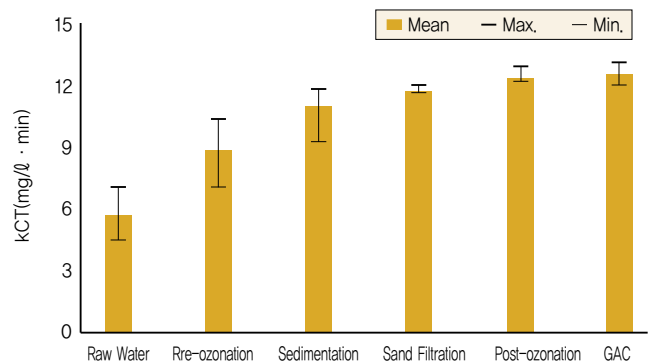


그림 3) Variation of the kCT along the demonstration treatment line

측정장치는 ID 자동측정장치와 원리 및 기능이 동일하지만, ID 및 kc와 체류시간으로부터 kCT를 도출할 수 있다는 점에서 차이가 있다.

kCT 측정장치의 개략적 구성은 오존발생기에서 발생하는 고농도의 오존으로 일정량의 오존과포화수를 제조하여 측정하고자 하는 원수에 직접 원하는 농도로 주입한 후 흐름주입분석법(Flow Injection Analysis : FIA)으로 Indigo Trisulfonate 시약과 반응

시킨 다음 600nm의 탈색반응을 유도하여 잔류오존농도를 연속 측정한다. 반응시간의 경과에 따른 잔류오존농도의 소비특성을 분석하여 ID 및 kc를 산출하고, 오존소비식을 오존점촉설비의 체류 시간에 대해서 적분하여 kCT를 산출한다.

오존/AOP공정의 자동제어시스템을 구축하기 위한 핵심설비인 오존소비특성 자동측정장치(ID, kc 및 kCT 자동측정장치)와 오존/AOP 자동제어장치인 ACU(Automatic Ozone/AOP Control Unit)를 개발하였다. ACU는 오존소비특성 측정장치 및 오존/AOP공정의 자동화설비를 제어한다.

kCT 자동측정장치는 아래의 그림 4)와 같이 구성하였다. 시료채취, 오존과포화수 주입 및 Indigo Trisulfonate 주입을 위한 유로는 전동식 솔레노이드 밸브를 사용하여 구성하였고, 시료와 Indigo 시약을 주입하는 펌프를 단일화하여 장치의 구성 및 제어 조작과정을 단순화하였다. 시료 및 오존과포화수는 제어프로그램에서 채취용량을 변화시켜 주입할 수 있도록 프로그래밍 하였다. 시료와 오존과포화수는 3번 Syringe로 순차적으로 흡입한 후, 오존소비반응을 개시하고, 즉시 1번 Syringe로 Indigo Trisulfonate 용액을 유로상에서 혼합하여 VIS Spectrophotometer에 주입하여 흡광도를 측정하였으며, Spectrophotometer에서 측정된 흡광도는 0~1V DC로 제어 Controller에서 초당 2회로 수집하여 저장하였다. 측정파장은 600nm를 사용하였다.

저장된 Raw Signal로부터 0.5초 간격으로 각 시간에 상응하는 Raw Signal 대비 잔류오존농도로 환산한 후, 그래프에서 순간적

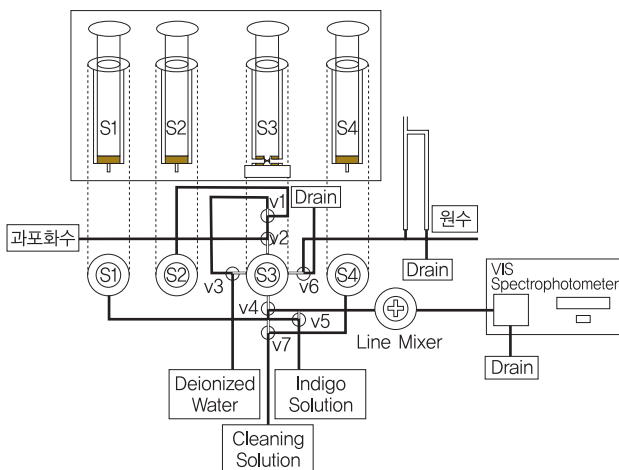
으로 감소하는 ID를 산출하였고, 시간에 따른 잔류오존농도 변화비 C_t/C_0 의 log값의 기울기로부터 오존소비속도상수, $kc(\text{min}^{-1})$ 를 산출하였다. 또한, ID, kc 및 체류시간으로부터 kCT를 자동산출하였다.

(2) kCT 자동제어 프로그램

오존공정의 실제적인 오존산화능을 나타내는 kCT 인자를 이용하여 자동제어하기 위해서는 유입수의 kCT를 실시간으로 자동분석하기 위한 kCT 자동측정장치 및 자동제어 프로그램의 개발이 필요하다.

kCT 자동측정장치 제어 프로그램에서는 kCT 자동측정장치에서 산출된 오존소비속도식을 오존점촉설비의 실제체류시간에 대해 적분하여 kCT를 산출하고, 이를 kCT 자동제어 프로그램으로 전송한다. kCT 자동제어 프로그램에서는 산출된 kCT가 항상 설정 kCT로 수렴하도록 다음 분석시 주입될 오존과포화수 농도를 PID 연산하여 kCT 자동측정장치 제어 프로그램으로 재전송하고, 산출 kCT 및 설정 kCT의 편차가 허용범위 이내로 수렴하면 현재의 오존과포화수 주입농도를 기준으로 하여 오존주입농도를 산출하고, 유입수량 및 오존주입용량을 반영하여 오존발생량을 결정하며, 오존발생시스템의 제어인자를 도출하여 ACU로 전송하도록 구성하였다. kCT 자동제어 프로그램은 운전현황, 운전조건 설정, 운전제어인자 설정, 운전주기 설정, Syringe Pump 설정 등 5개의 모드로 구성된다. 그림 5)는 kCT 자동제어 프로그램의 운전현황 모드로서, 구성내용은 ID 자동제어 프로그램의 운전현황 모드와 유사하다.

그림 6)은 운전제어인자 설정모드로서 ID 자동제어 프로그램의 구성과 유사하다. kc 변수설정 모드에서는 목표 kCT 및 허용편차



S1 : Syringe No.1 for Indigo Solution
 S2 : Syringe No.2 for Saturated Ozone Solution
 S3 : Syringe No.3 for Reaction
 S4 : Syringe No.4 for Cleaning Solution
 V1~V7 : Solenoid Valve No.

그림 4) Apparatus of Automatic Analyzer for Measuring ID

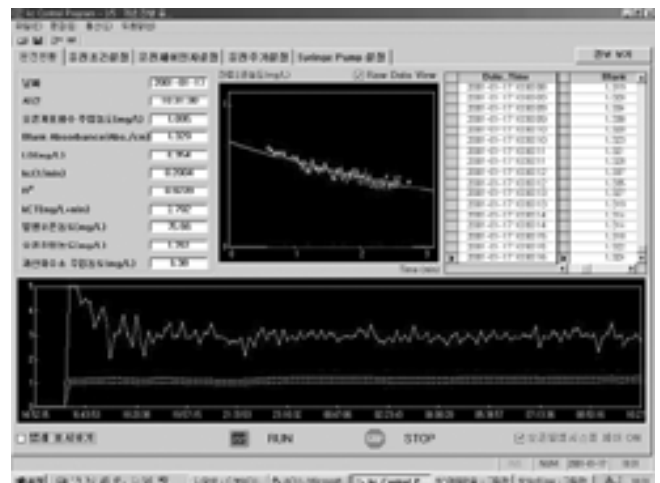


그림 5) Main Frame of kCT Auto-Control Program



그림 6) Input Mode of KCT Auto-Control Program

를 설정하고, 다음 분석시 주입될 오존과포화수의 용량을 산출할 때 사용하기 위한 PID 연산인자를 설정할 수 있도록 개발하였다. 운전주기 설정모드 및 Syringe Pump 설정모드는 ID 자동제어 프로그램과 동일하므로 생략하였다.

4. KCT 자동제어시스템 현장적용 평가

(1) KCT 자동제어기법 개요

현재 국내 대부분의 정수장에서 운영되고 있는 오존공정은 Jar Test법에 의한 실험에 의해 오존주입농도를 설정하여 주입오존일 정제어방식과 잔류오존일정제어방식으로 운전되고 있다. 그러나 우리나라와 같이 수질 및 수량의 변화가 심한 경우에는 적합하지 않은 것으로 조사되었다. 기존방식으로 적정오존주입농도를 결정하기 위해서는 그림 7-(a)와 같은 로직을 수행하여야 한다. 그러나 kCT 자동제어기술은 그림 7-(b)와 같이 실시간으로 변동되는 유입수량과 수질에 능동적으로 대응하여 Ozone Demand 연속 계측장치에 의해 최적의 오존주입량을 산출하고 그 값에 의하여 오존공정을 제어하는 기술이다. kCT에 의한 자동제어기술과 기존 방식의 오존주입농도 결정방법을 비교하면 그림 7)과 같다.

현재 도입된 오존공정의 경우 외국의 기술을 그대로 도입하여 수질 및 수량의 변화가 심한 우리나라의 실정에 대응하지 못하는 문제점이 있다. 따라서 본 신기술은 실시간으로 수질을 측정하고 접촉시간(수량)을 고려하여 최적의 오존 주입량을 결정한 후 오존발생설비를 제어하고자 하였다.

기존의 오존공정에서 오존주입량을 결정·제어하는 방식은 수작업에 의해 유입수를 채수하고, Jar Test를 수회 실시하여 오존주입농도를 결정한 후 오존발생설비에 입력하는 방식이다. 따라서

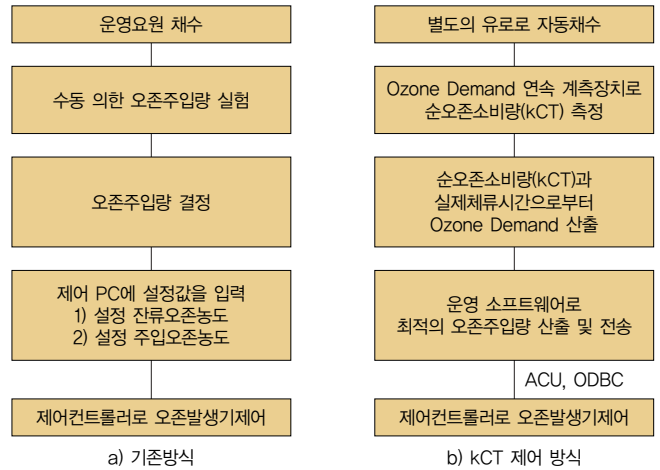


그림 7) Comparison of Ozone Control Method

많은 시간과 인력이 소모되며 실시간으로 변하는 유입수의 수질 및 수량변화에 대응이 곤란하다.

그러나 kCT 자동제어기술에서는 수작업으로 오존주입량을 결정하고 오존발생설비에 입력하여 제어하던 것을 Ozone Demand 연속 계측장치에서 Ozone Demand를 계측하여 실제체류시간과 보정계수들을 연산한 후 최적 오존주입농도를 산출하고 그 값에 의해 오존발생설비를 자동제어한다. 즉, kCT 자동제어기술은 실시간으로 변동하는 유입수의 수질 및 수량을 자동 측정하여 최적의 오존량을 주입함으로써, 수질의 안전성 및 안정성의 확보함과 동시에 인건비 및 전력비 절감효과를 가져오고, 오존·활성탄 조합공정의 경우 오존공정 유출수의 잔류오존이 거의 남지 않아 후

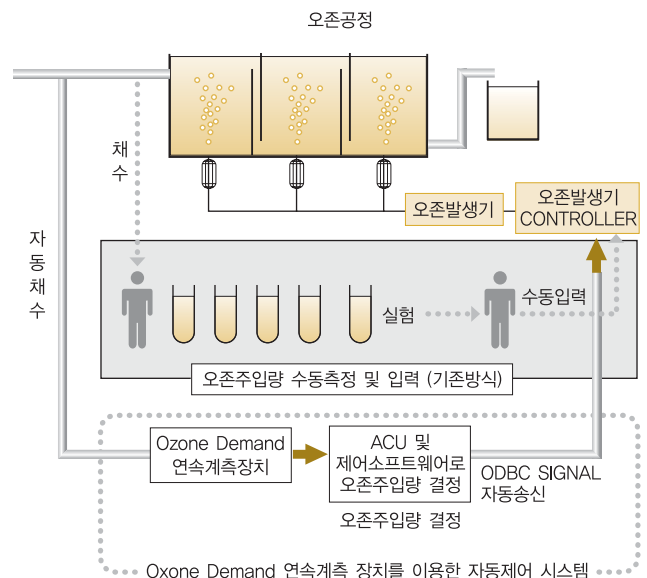


그림 8) Comparison between and Manual and Auto Control using Online Ozone Demand System

속공정인 활성탄 공정에 영향을 주어 재생주기를 연장하는 등 유지관리의 절감효과를 가져오게 된다.

(2) kCT 자동제어기법 제어로직

본 연구에서 개발한 kCT 제어기법의 kCT 산출과정은 그림 9)와 같다. kCT 제어기법은 오존의 소비특성 및 체류시간을 동시에 고려하여 접촉설비 내의 kCT를 기준으로 제어하는 새로운 개념의 제어기법이다. 잔류오존농도 일정제어기법이 잔류오존농도를 미리 설정하고 이 값을 유지하도록 제어하는 방식임에 비해, kCT 제어기법은 접촉설비 내의 최적 kCT를 설정한 후, 항상 이 kCT를 만족하도록 수질 및 유량의 변화에 대응하여 제어된다. kCT 제어기법은 잔류오존농도 일정제어기법과 비교할 때, 제어를 위한 수질 특성의 분석이 오존공정의 전단에서 도출된다는 점이 가장 큰 차이점이다. 즉, Feed-back 제어가 아니라, 오존접촉지에 처리대상 원수가 유입되기 이전에 수질특성을 분석하고 이를 바탕으로 kCT 제어를 수행하므로 실시간 제어가 가능하다는 장점이 있다. 즉, kCT는 오존접촉지 내의 실질적인 오존산화능을 나타내는 지표로서 kCT 자동측정장치에서 산출된 오존소비속도식을 오존접촉지 내의 실제 체류시간에 대하여 적분하여 산출한다. 산출된 kCT가 설정 kCT에 수렴하도록 오존과포화수의 주입농도를 PID Control

Logic을 이용하여 제어하며, 산출된 kCT와 설정 kCT의 편차가 허용범위 이내로 수렴하면 이때의 오존과포화수 주입농도를 기준으로 오존주입농도를 결정한다. 산출된 kCT는 제어의 안전성을 위하여 오존소비속도식의 결정계수(R2), EWMA Factor, 최소허용 오존주입농도, 최대허용 오존주입농도, 오존전달 효율을 보장하는 Factor 및 수리학적 체류시간과 실제체류시간의 차를 보정하는 Factor 등 여러 가지 설정·제한인자를 반영한 후, 제어에 활용되도록 Algorithm을 구성하였다. 산출된 kCT와 설정 kCT의 차이를 보정값으로 정하고 보정값에 PID 연산 Logic을 적용하여 다음 분석시 주입해야할 오존과포화수의 농도를 재산출한다.

(3) kCT 자동제어시스템 구성

kCT 자동제어시스템은 그림 10)에 도시한 같이 kCT 자동측정장치와 ACU(Automatic Ozone Control Unit)로 구성하였다. kCT 자동측정장치는 일정한 시간 주기마다 유입수를 채취하여 kCT를 자동측정하도록 하였다. 이 장치는 크게 오존과포화수 제조장치부, 반응장치부, 측정장치부 및 연산부로 구분된다. 오존과포화수 제조장치는 오존발생기에서 발생된 고농도의 오존을 증류수에 주입하여 포화농도 이상의 오존과포화수를 제조한다. 반응장치부는 이렇게 제조된 오존과포화수를 반응조 내에서 시료수와 접촉시키고,

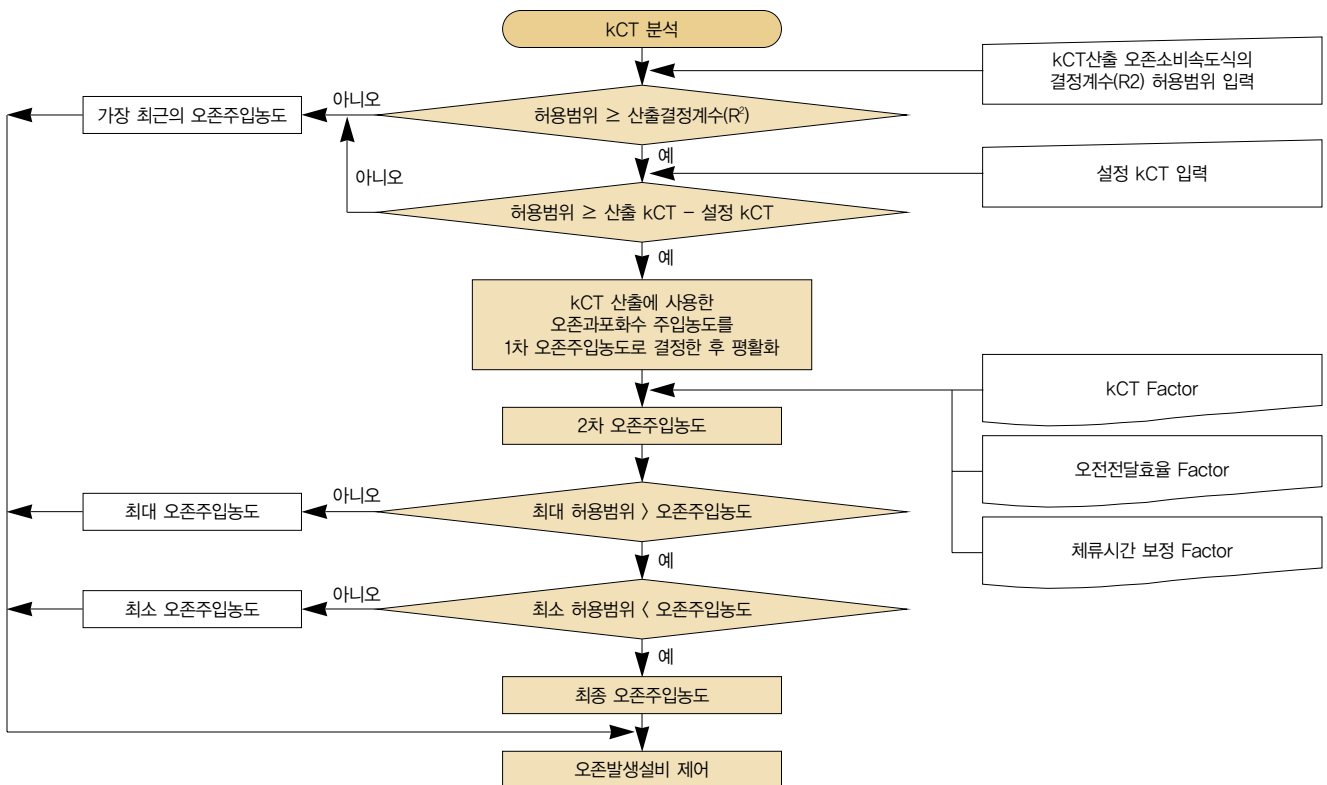


그림 9) Schematic Diagram of Ozone Auto-Control by kCT

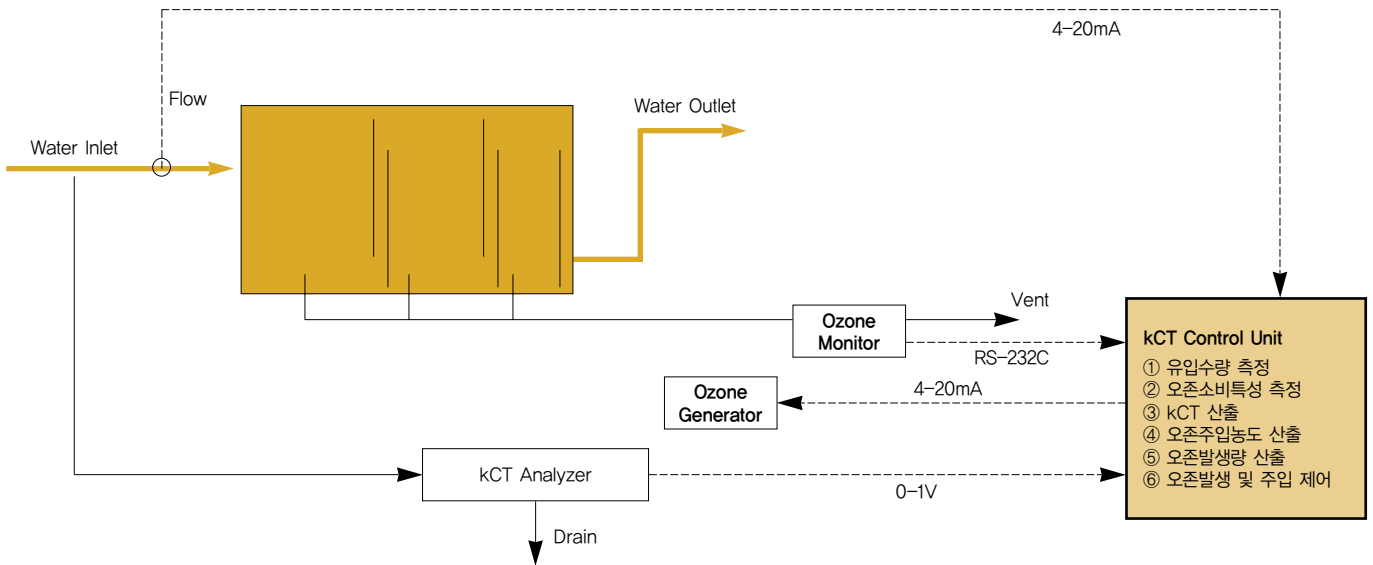


그림 10) Schematics of kCT Auto Control System

측정장치는 오존과포화수와 반응한 시료수에 인디고 시약을 주입하고 발색시킨 후, UV Spectrophotometer로 측정한다. 연산부에서는 측정된 유입수량 및 잔류오존농도의 변화로부터 kCT를 산출하고, 산출된 kCT가 설정된 kCT와 일치하는지 여부를 검증하여 편차가 있을 경우, 오존과포화수의 주입량을 변화시켜 설정된 kCT와 일치할 때까지 실험을 반복한다. 산출된 kCT 및 설정된 kCT의 편차로부터 비례·미분·적분(PID)연산을 수행하고, 오존과포화수의 주입농도로부터 오존주입농도를 산출한다.

ACU에서는 kCT 자동측정장치에서 산출된 오존주입농도로부터 오존발생량을 산출하고 오존발생기의 전압을 조정함으로써, 오존발생농도를 제어하도록 하였으며, 발생오존모니터를 통하여 이 농도를 확인하는 Feed-back 과정을 거침으로써 산출된 오존발생농도를 정확하게 주입할 수 있도록 구성하였다.

kCT 자동측정장치는 후오존공정의 제어에 적용될 수 있도록 접촉설비의 전단에 설치되어야 하며, 이러한 특징으로 인하여 후오존공정의 제어에 실시간으로 대응이 가능하다. 즉, 잔류오존농도 일정제어기법의 경우 접촉지의 후단에서 잔류오존농도를 측정하여 제어인자로 활용하는 반면에, kCT 자동측정장치는 접촉지의 전단에서 kCT를 도출하므로 더욱 실시간적인 제어가 가능하다.

(4) kCT 자동제어시스템 운전특성

모래여과수를 유입수로 하여 후오존공정에 유입되는 유입수량을 실시간으로 분석하여 자동제어에 반영하였다. 본 kCT 자동제어시스템에서는 유입수량의 과도한 변동으로 인한 제어시스템의 안정성 훼손을 방지하기 위하여 측정시간을 설정하여 측정시간동안의

평균값을 취할 수 있도록 하였으며, 여기에서는 1분 동안의 평균값을 활용하도록 설정하였다. 유입수량은 후오존공정 자동제어시스템에서 kCT를 도출하기 위한 후오존점측지의 체류시간 산정 및 발생오존농도 산출에 활용된다.

그림 11)은 오존과포화수 주입농도 및 측정된 kCT를 도시하고 있다. 운전시의 kCT 설정값은 3.0mg/L·min으로 하였다. kCT 자동제어시스템에서는 설정값에 수렴하기 위하여 자체적으로 PID 제어를 구현하여 오존과포화수의 주입농도를 제어하게 된다. 유입수질이 양호하면 낮은 농도의 오존과포화수를 주입하더라도 설정값을 만족할 수 있지만, 수질이 악화되면 고농도의 주입이 필요하다. 따라서 오존과포화수의 주입농도는 간접적으로 유입수질을 대변하게 된다.

kCT 자동제어시스템에서 얼마나 효율적으로 설정 kCT에 수렴하는지를 확인하기 위하여 초기 주입농도를 약 1.6mg/L로 과도하게 주입했기 때문에, 초기의 kCT는 5.0mg/L·min으로 높은 값을 나타내었다. 첫 시행 이후 설정 kCT인 3.0mg/L·min으로 수렴하기 위하여 PID연산을 통하여 오존과포화수 주입농도를 자동제어하고 있음을 확인할 수 있다. 약 1시간 가량의 초기 안정화시기를 거친 후에는 설정 kCT 전후의 안정된 값으로 측정되고 있다. 설정 kCT를 항상 만족하기 위해서는 실시간으로 변화하는 유입수질을 반영하여 오존과포화수의 주입농도를 매 시행마다 조절하게 되는데, 제어 시작시점으로부터 약 7시간 경과까지는 1.3mg/L 이하의 농도를 유지하다가 다소 수질이 악화됨에 따라 오존과포화수 주입농도가 1.4mg/L 이상으로 미소하게 상향 주입되고 있음을 확인할 수 있다.

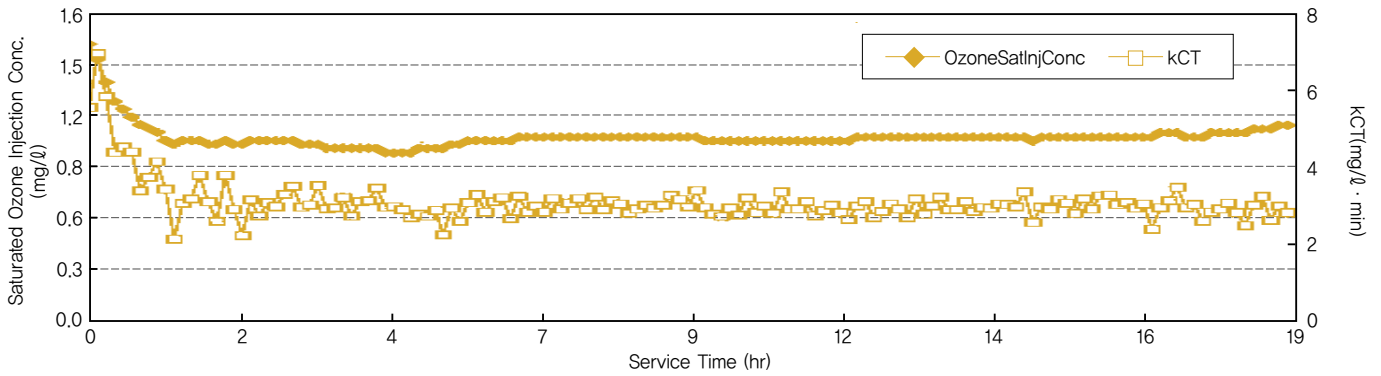


그림 11) Variation of kCT and Saturated Ozone Injection Concentration

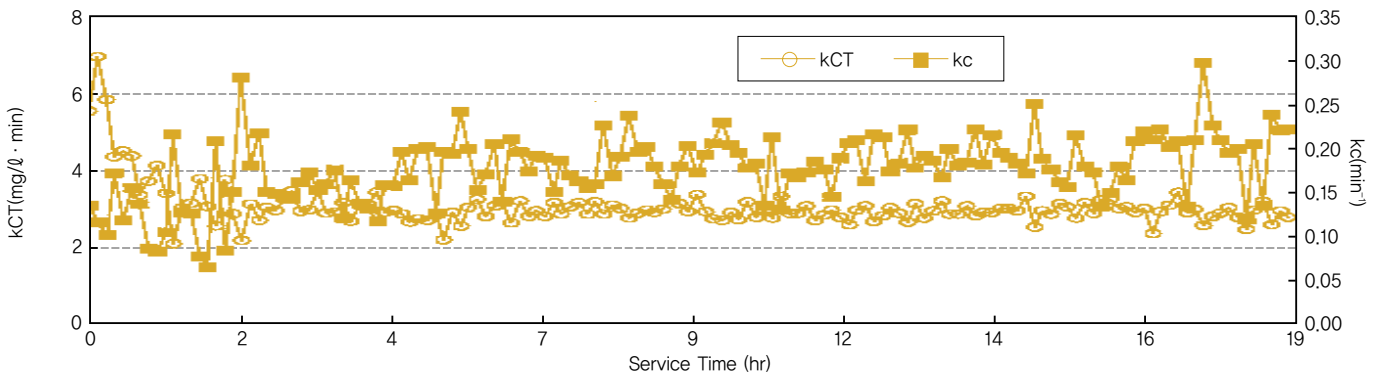


그림 12) Variation of kCT and kc

그림 12)는 실시간으로 측정된 kc 및 kCT의 거동을 도시하고 있다. kc에서는 다소의 변동이 나타나고 있으나, kCT는 매우 양호하게 설정 kCT 3.0mg/L를 만족하고 있음을 알 수 있다.

kCT는 오존소비속도 함수식을 실제체류시간(min)에 대해서 적분하여 산출되기 때문에 kc의 거동과 상반되는 결과를 보이고 있다. 즉, kc가 크면 오존의 소비속도가 커지기 때문에 전체적인 kCT는 줄어들게 되고, kc가 작으면 그 반대의 결과가 나타나게 된다. kc의 변동비율에 비해서 kCT의 변동비율이 안정화되어 있다는 점에서 kc를 직접 제어에 활용하지 않고, kCT를 활용하고 있는 본 제어기법이 안정성의 측면에서 더 우수한 것으로 판단된다.

전체적으로 kc가 시간의 경과에 따라 미소하게 상승하고 있는데 이는 유입수질의 지속적인 악화 경향을 반영하고 있는 것으로 판단된다.

그림 13)은 kCT 자동측정장치에서 분석된 ID, kc 및 결정계수 R2를 동시에 도시한 결과이다. 전체 운전기간동안 ID의 변화는 미미한 것으로 나타났으며, kc는 시간의 경과에 따라 다소 증가하고 있어서 유입수질의 미소한 저하를 반영하고 있다. 오존소비식의 결정계수 R2는 평균 0.87 이상으로 우수하게 나타났다.

본 kCT 자동측정장치는 초당 2회씩 잔류오존농도를 자동측정하

여 이로부터 ID, kc 및 오존소비식을 도출하게 된다. 결정계수가 크다는 사실은 수백개에 달하는 각 잔류오존농도의 측정값이 우수하게 일차반응식의 형태를 갖는 오존소비식을 만족하고 있다는 사실을 의미하기 때문에 kCT의 정확성 및 kCT 제어기법의 안정성이 우수하다는 의미로 이해할 수 있다. 따라서, 본 kCT 자동제어기법의 현장적용성 역시 매우 양호할 것으로 판단된다.

그림 14)는 오존과포화수 주입농도, kCT 및 오존주입농도를 도시한 결과이다. 설정되어 있는 kCT 3.0mg/L · min을 충족하도록 유입수질에 따라 오존과포화수 주입농도가 PID연산을 통하여 자동제어되기 때문에 오존과포화수 주입농도의 증감은 유입수질을 직접 반영하고 있다고 할 수 있다. 즉, kCT 자동측정장치의 오존과포화수 주입농도는 현재의 수질에 대하여 설정 kCT를 만족할 수 있는 최적의 오존주입농도라고 할 수 있다.

kCT 자동측정장치 및 kCT Control Unit에서 오존과포화수의 주입농도가 산출되면 현장에서 직접 적용가능하도록 안전제어를 구현하면서 오존과포화수 주입농도에 대응하는 오존주입농도가 결정된다. 결정된 오존주입농도에 따라 오존접촉지의 오존전달효율 및 오존주입 Factor, 유입유량 및 실제 체류시간을 고려하여 오존발생농도가 결정된다. 따라서, 오존과포화수 주입농도와 오

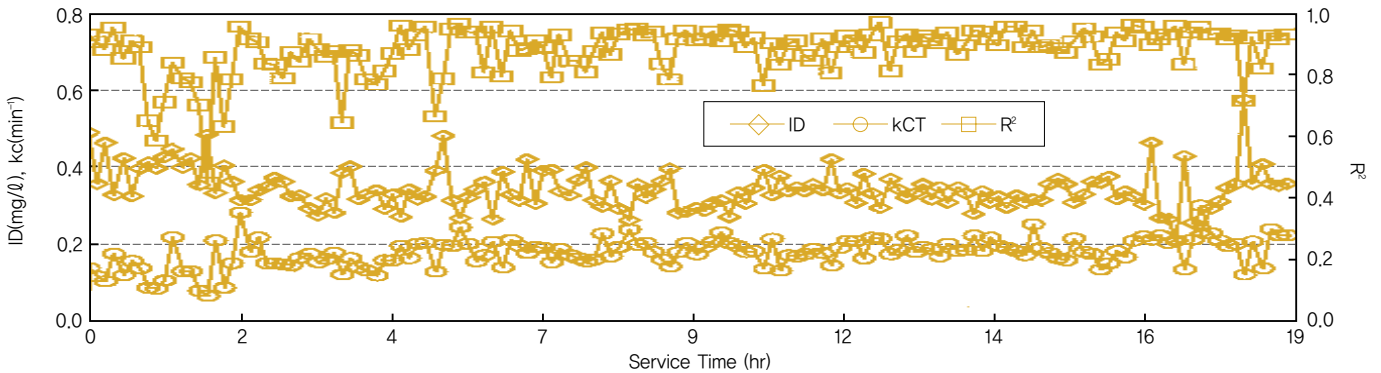


그림 13) Variation of ID, kc and R²

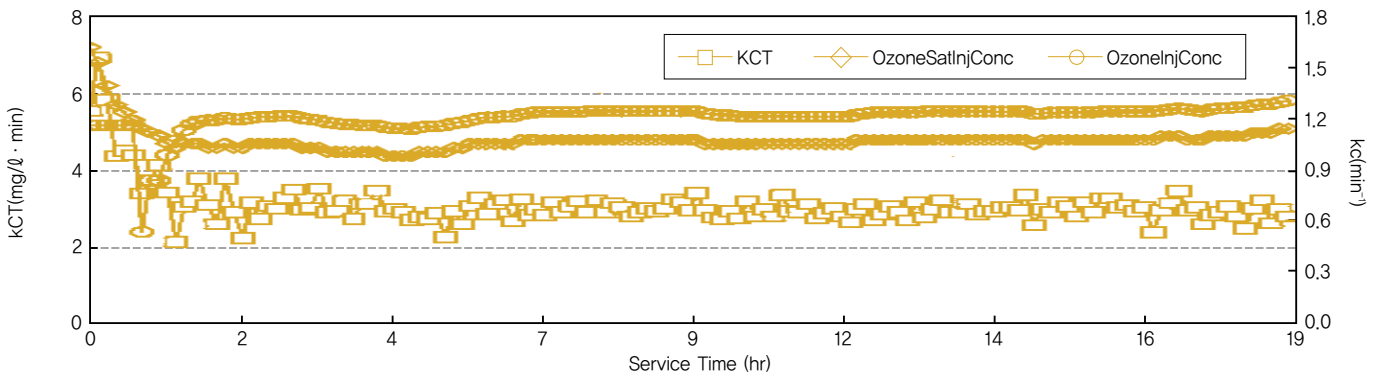


그림 14) Variation of KCT, Saturated Ozone Injection Concentration and Injection Ozone Concentration

존주입농도는 거의 일치하는 경향성을 보이면서 증감하고 있음을 알 수 있다. 운전 초기에 오존주입농도가 다소 낮게 제어되고 있는 것은 kCT 자동제어시스템의 안정성을 확보하기 위해서 안전 측으로부터 적정값을 향해서 수렴하도록 알고리즘을 구현하였기 때문이다.

5. 결론

(1) 물 속에 용해된 잔류오존농도를 실시간으로 연속분석할 수 있는 오존소비특성 자동측정장치를 개발하여 오존공정의 제어에 활용하였다. 오존소비특성을 나타내는 지표인자로는 오존이 대량수에 주입된 직후 순간적으로 소비되는 오존량인 ID와 ID의 소모 이후 (의사)1차반응의 형태로 서서히 소비되는 잔류오존농도의 소비 속도상수인 kc 및 오존소비식을 오존접촉설비의 체류시간에 대해서 적분한 kCT(kinetic CT) 등이 있다.

(2) kCT 자동제어시스템을 실시간 연속운전한 결과, kCT의 분석 신뢰도가 높고, 운전성도 우수한 것으로 나타났다. 특히, 수질 및 수량의 변화에 대응하여 신속하게 설정 kCT를 유지하면서 후오존

주입농도를 자동제어하고 있으며, 최종처리수질의 안전성 및 안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

(3) 본 실험결과로부터, 후오존 및 BAC 자동정수공정의 처리대상 물질을 DOC, UV254 흡수물질 및 KMnO₄ 소비물질 등으로 대표되는 유기오염물질로 선정하여 기존의 제어기법 및 kCT 자동제어시스템의 처리효율을 비교분석한 결과, kCT 자동제어시스템이 더욱 우수한 것으로 나타났다.

(4) 따라서 수질 및 수량변화에 대한 대응성, 시스템의 안정성 및 처리효율성 등을 기준으로 판단할 때, 기존의 후오존 제어기법의 문제점을 해결할 수 있어서 현장적용성이 높을 것으로 기대된다. 또한, 이상의 결과를 현재 운영중인 오존공정에 적용할 경우, 보다 효율적이면서, 운전비용을 낮출 수 있어서, 새롭게 요구되는 오존공정의 설계 및 유지관리기술로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. ☺