

# 정수장 내 염소가스 및 오존가스 누출시 피해반경에 관한 연구

권영기\*<sup>†</sup> · 조해진\* · 고성호\*\*

## A Study on the Simulation of Damage Distance in case of leakage of Chlorine and Ozone Gas in a Water Treatment Plant

Youngki Kwon\*<sup>†</sup>, Haejin Cho\*, Sungho Ko\*\*

*Key Words* : Alternative Scenario(대안 시나리오), Chlorine(염소), Damage Distance(피해반경), Influence Range(영향범위), Off-site Impact Assessment(장외영향평가서), Ozone(오존), Risk Management Plan(위해관리계획서), Toxic Substances(독성물질)

### ABSTRACT

Chemical substance Control Act was revised on Jan 2015 to prevent toxic substances leakage accidents such as hydrofluoric acid leakage accident in Gumi city in 2012. According to the revised laws, companies which treat toxic substances more than a certain quantity of chemical substances are obliged to submit off-site impact assessment and risk management plan.

In this study, we simulated damage distance, influence range in the case of leakage of chlorine and ozone gas in a water treatment plant taking into account characteristics of chlorine and ozone injection system. According to the study result, the damage distance and the number of inhabitants in the influence area were 299 m and 138 under the situation of alternative scenario of chlorine gas leakage, respectively. Also the damage distance and the number of inhabitants in the influence area were 1,224 m and 19,611 under the situation of alternative scenario of ozone gas leakage, respectively. This result shows that the risk of chlorine gas leakage in a water treatment plant was not higher than expected, but appropriate safety measures are required when treating ozone gas.

### 1. 서 론

정수장 등의 수처리 시설에서는 염소, 수산화나트륨 등 다양한 화학물질을 사용하고 있다. 특히 수돗물의 소독에 사용되는 염소는 산화성이 높고, 독성을 가지고 있어 화학물질관리법 및 고압가스 관리법에 모두 적용을 받는 유해한 화학물질이다. 개정된 화학물질관리법에 따라 염소를 포함한 수처리 화학물질에 대한 위험성 분석, 주변지역 영향평가, 안전성 확보방안이 포함된 장외영향평가 및 위해관리계획서를 작성하고 관리하여야 한다. 또한, 최근 수돗물의 맛·냄새 제거를 위해 정수장에 도입중인 고도정수처리시설에 사용되는 오존은 염소보다 산화성이 높은 독성 가스이나 관련법이 정비되지 않아 체계적으로 관리되지 않는 측면이 있다.

2012년 경북 구미 불산 가스 누출사고로 인해 사망사고

및 인근주민, 현장 경찰관 등 인명피해와 농작물 피해가 크게 발생하였다. 이 사고 이후, 유해화학물질 누출사고가 지속 발생하면서 그에 따른 관련법령 강화, 지도단속 및 과태료 부과가 강화되었지만, 안전 불감증, 안전관리방안 부재로 인해 유해화학물질 유출사고는 여전히 계속되고 있다.

화학물질 사고를 방지하고자 2015년 1월 화학물질관리법이 개정되면서 유해화학물질 취급 및 안전관리가 강화되었다. 법령에 고시된 유해화학물질을 취급하는 기업이나 업체는 2019년까지 장외영향평가, 위해관리계획서를 작성하고 관리하여야 한다. 또한 유해화학물질을 지정된 수량이상 취급하는 사업장의 경우 화학물질관리법 제42조(위해관리계획서의 지역사회 고지)에 따라 지역사회에 고지하여야 한다.<sup>(1)</sup>

염소가스 누출 선행연구에서 염소누출이 최대 상황인 경우를 가정하여, 계절별 염소누출 피해반경을 연구하였다. 염

\* K-water(Korea Water Resources Corporation)

\*\* 충남대학교 기계공학부(Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

† 교신저자, E-mail : kwonyk@kwater.or.kr

Table 1 Leakage hole used in Risk Based Inspection

Leakage hole size	Range	Reference value
Small size	0~1/4 inch	1/4 inch
Middle size	1/4~2 inch	1 inch
Large size	2~6 inch	4 inch
Burst type	> 6 inch	Diameter of pipe (max 16 inch)

소누출 시뮬레이션 결과, 계절에 따라 염소 누출반경 및 피해 주민수가 차이가 크며, 따라서 화학물질 유출시 화학물질별 특성을 고려한 Case Risk Assessment가 필요하다고 보고하였다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 정수처리시설에 사용되는 독성물질인 염소 가스 및 오존가스가 누출된 상황을 가정하여 누출 피해반경을 도출하였다. K-water 성남정수장 내 염소 및 오존투입시설 특성에 맞는 누출조건을 가정하여 현실적으로 발생가능성이 높은 누출상황에서의 피해반경 및 인근 거주민 피해인원을 도출하였다.

## 2. 누출 시나리오 선정 방법론

독성물질의 누출시, 누출상황을 고려하여 피해반경을 예측하고 대응책, 주민대피계획을 마련해야 한다. 피해반경을 예측하기 위해 누출조건을 선정하여야 한다.

한국화학물질안전원에서 발행한 ‘사고 시나리오 선정에 관한 기술지침’에 의하면 유해물질을 규정 이상 취급하는 사업장은 최악의 시나리오와 대안 시나리오를 작성하여 관리하여야 한다. 최악의 시나리오는 단일 용기 또는 단일 배관계에 저장되어 있는 위험물질 총량이 10분 내 모두 누출되는 상황을 말하며, 건물 내부일 경우 최대량의 55%가 10분 동안 누출된 것으로 가정한다. 대안시나리오는 최악 시나리오보다 현실적으로 발생가능성이 높은 상황을 말하며, 용기에 결속된 배관 단면적의 20%를 누출공 크기로 산정하거나, KOSHA GUIDE P-92-2012 (누출원 모델링에 관한 지침), KOSHA GUIDE P-110-2012 (화학공장의 피해최소화대책 수립에 관한 기술지침) 또는 미국 석유화학협회의 위험기반 검사 기준(API 581)에 따른 누출공 산출방법 중 하나를 택하여 누출조건을 가정한다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서 검토한 염소가스 및 오존가스 누출 시뮬레이션의 최악의 시나리오는 단일 배관계에 저장되어 있는 독성물질 총량이 10분 내 모두 누출되는 상황으로 하였으며 대안 시나리오는 누출공의 크기가 염소 및 오존투입설비별 배관 조건을 고려하여 피해반경을 예측하였다. 누출시간은 미국 석유화학협회의 위험기반검사 기준(API 581)에서 제시한 감지시스템, 차단시스템 수준별 누출시간을 고려하였다. 누출공의 정의, 검출시스템 등급 및 차단시스템 등급, 등급에 따

Table 2 Rating criteria standards of detection & blocking system

Detection system type	Grade
Specially designed System in order to obtain the loss of material in accordance with the change of working conditions.	A
Appropriately Installed detector in order to detect outside leakage of pressure equipment	B
Human visual detection or Camera,	C
Blocking system type	Grade
Automatic blocking system without interruption of human	A
Blocking system by human in control room or appropriate position far from leakage area	B
Blocking by manual valve	C

Table 3 Leakage duration time based on detection & blocking system

Detection system grade	Blocking system type	Duration of leakage
A	A	20 min (In case of 1/4 inch leakage)
		10 min (In case of 1 inch leakage)
		5 min (In case of 4 inch leakage)
A	B	30 min (In case of 1/4 inch leakage)
		20 min (In case of 1 inch leakage)
		10 min (In case of 4 inch leakage)
A	C	40 min (In case of 1/4 inch leakage)
		30 min (In case of 1 inch leakage)
		20 min (In case of 4 inch leakage)
B	A or B	40 min (In case of 1/4 inch leakage)
		30 min (In case of 1 inch leakage)
		20 min (In case of 4 inch leakage)
B	C	60 min (In case of 1/4 inch leakage)
		30 min (In case of 1 inch leakage)
		20 min (In case of 4 inch leakage)
C	A, B or C	60 min (In case of 1/4 inch leakage)
		40 min (In case of 1 inch leakage)
		20 min (In case of 4 inch leakage)

른 누출시간은 Table 1 과 Table 2 및 Table 3과 같다.<sup>(4)</sup> 누출 영향 범위 중요인자인 온도, 습도, 풍향 및 풍속 등 기

Table 4 Applied annual average weather data

Temperature	Humidity	Wind Direction	Wind Speed
13.6 °C	67 %	W	1.8 m/s

후는 성남지역 2016년 평균기후를 적용하였으며, Table 4와 같다. 누출지점 인근 지형지물에 의한 영향은 본 연구에서 고려하지 않았다.

피해반경 시뮬레이션은 한국화학물질안전원에서 개발한 유해화학물질 누출 시뮬레이션 범용 소프트웨어인 KORA 프로그램을 사용하였다. KORA 프로그램은 사고물질, 누출량, 기후 등을 고려하여 누출에 따른 피해반경, 주변 피해인구 등을 예측할 수 있도록 개발된 프로그램이다.

KORA 프로그램에서 공기보다 무거운 염소가스, 오존가스의 경우 누출확산의 경우 SLAB모델을 적용하였다. SLAB 모델은 물질, 에너지 및 모멘텀에 대한 보존식을 통하여 증기운의 확산을 예측하는 프로그램으로 물질의 연속누출 및 순간노출에 의한 증기운 부상 등을 시뮬레이션 할 수 있다.<sup>(5)</sup> 또한 중력과 확산간의 관계를 포함하여 기상변수와 풍속 등을 계산하여 위험지역 반경을 예측할 수 있다.<sup>(6)</sup>

시뮬레이션의 대상정수장은 시설용량(786천 m<sup>3</sup>/일)에 따른 염소·오존 취급량이 상대적으로 크고, 대도시에 위치하고 있어 주민피해가 클 것으로 예상되는 K-water 성남정수장(경기도 성남시 사송동 소재)에서 독성가스가 최악의 시나리오와 대안시나리오 조건으로 누출되는 것으로 가정하였다.

**2.1 염소가스 누출 시나리오 선정**

K-water 성남정수장의 염소투입시설은 지하에 있으며, 외부에서 액체 상태로 저장된 1 ton 개별용기에 저장되어 반입된다. 염소투입시설에 6개의 저장용기가 Fig. 1과 같이 한꺼번에 연결 후, 3개씩(3 ton) 교대로 사용하며, 사용하지 않는 염소용기는 배관 연결 후 밸브를 수동으로 잠가 누출되지 않도록 운영하고 있다. Fig. 2는 액체염소를 염소용기에서 기화기로 이송하는데 사용하는 액체염소배관 사진이며, 액체염소는 기화기에서 기체로 기화된 후 정수처리에 사용된다.

염소 누출 최악의 시나리오는 단일배관에 연결된 3 ton의 액체염소가 10분 내 전부 누출되는 것으로 가정하였다.

염소 누출 대안 시나리오에서 누출위치, 누출공의 크기 및 누출시간 설정이 필요하다. 누출위치는 Table 5의 염소이송에 사용하는 배관 중, 누출시 피해반경이 클 것으로 예상되는 액체염소이송배관(D25 mm)의 20% 크기인 5 mm 누출공에서

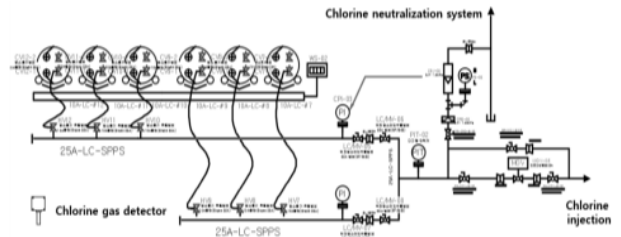


Fig. 1 P&ID of chlorine injection system

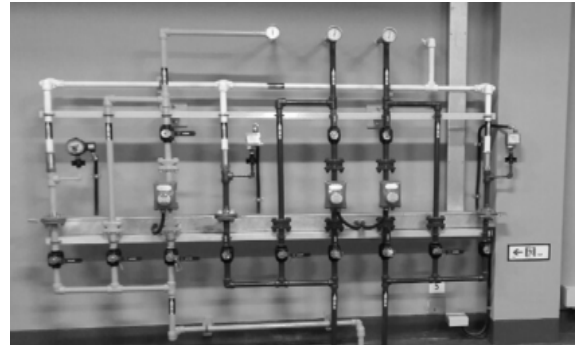


Fig. 2 Photograph of chlorine pipe

Table 5 Selection of leakage point

	Flexible pipe	Chlorine liquid pipe	Chlorine gas pipe	Dilution pipe
Pressure	0.5	0.5	0.3	0.3~0.5
Diameter	D10 mm	D25 mm	D25 mm	D70 mm
Material	Copper	SPPS	SPPS	PE
Selection		○		

누출되는 것으로 가정하였다. 누출시간은 Table 2 및 Table 3을 적용하여 계산하였다. 염소 누출시 공기 중의 염소가스 감지기에 의해 감지되는 점을 고려하여 Table 2에서 검출등급은 B등급으로, 누출시 현장에 투입하여 액체염소용기 밸브를 조작하여야하는 점을 고려하여 차단등급은 C로 가정하였다. Table 3의 검출 및 차단시스템에 따른 누출시간 적용하여 누출시간은 60분으로 가정하였다.

배관압력, 온도는 실제 시설에서 측정되는 값을 적용하였다. 피해반경의 끝점(End-Point)은 염소의 ERPG-2<sup>1)</sup>인 3ppm을 적용하였다. 염소가스 누출 시뮬레이션을 위한 세부 시나리오 조건은 Table 6와 같다.

**2.2 오존가스 누출 시나리오 선정**

K-water 성남정수장 내 오존투입시설의 시설용량의 60 만 m<sup>3</sup>/일 규모이며, 오존생산 후 Fig. 3과 같이 오존접촉조

1) ERPG (Emergency Response Planning Guideline)-2 : 거의 모든 사람이 1시간 동안 노출되어도 보호조치 불능의 증상을 유발하거나 회복 불가능 또는 심각한 건강상의 영향이 나타나지 않는 공기 중의 최대 농도

Table 6 Conditions of accident scenarios

Conditions	Worst scenario	Alternative scenario
Capacity	Chlorine, 3 TON	
Risk factor	Toxicity	
Weather data	13.6°C, 67%, 1.8 m/s W	
Pressure	0.5 MPa	
Temperature	25°C	
Leak hole size	A certain size that 55% of total Chlorine is leaked within 10 min	5 mm
Leak duration time	10 min	60 min
End-Point	ERPG-2 (3 ppm)	
Leakage location	Indoor(200 m <sup>2</sup> )	

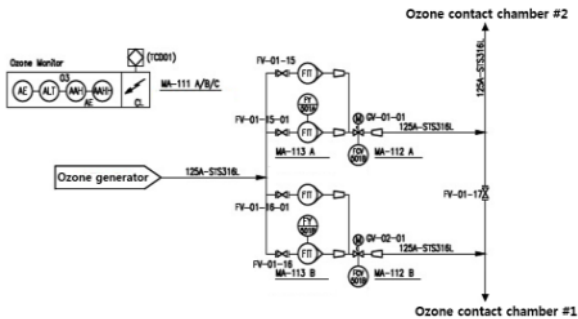


Fig. 3 P&ID of ozone injection system



Fig. 4 Photograph of ozone generator

에 공급된다. 오존발생기는 산소를 전기분해하여 오존을 생산하며, 오존을 이젝터를 통해 물에 희석시킨 후, 고압펌프를 이용하여 오존 접촉조에 분사하여 수돗물과 접촉시키는 구조이다. 오존 발생기는 Fig. 4의 구조로 3대 설치되어있다.

오존 누출 최악의 시나리오는 오존을 저장하지 않고 생산 즉시 투입하는 특성을 고려할 때, 10분 내 저장량이 전부 누출되는 상황은 발생하지 않아 고려하지 않았다.

오존 누출 대안 시나리오에서 누출위치는 Table 7의 오존이송에 사용하는 배관 중, 누출시 피해반경이 클 것으로 예상되는 오존가스이송배관으로 가정하였다. 누출공의 크기

Table 7 Selection of leakage point

	Ozone gas line	Dilution line	Ozone contact line
Pressure	0.1 MPa	0.3 MPa	0.1 MPa
Pipe size	D125 mm	D150 mm	D2000 mm
Material	STS316L	STS316L	STS316L
Selection	○		

Table 8 Conditions of accident scenario

Conditions	Alternative scenario
Risk factor	Toxicity
Weather data	13.6°C, 67%, 1.8 m/s W
Pressure	0.1 MPa
Temperature	25°C
Leak hole size	25 mm
Leak duration time	30 min
End-Point	STEL (0.2 ppm)
Leakage location	Indoor(200 m <sup>2</sup> )

는 오존가스 주입배관(D125 mm, STS 316 L)의 20% 크기인 25 mm 누출공에서 누출되는 것으로 가정하였다. 누출시간은 Table 2 및 Table 3을 적용하였다. 오존 누출시 공기 중의 오존가스 감지기에 의해 감지되는 점을 고려하여 Table 2에서 검출등급은 B등급으로, 누출시 자동으로 오존발생장치가 정지되는 점을 고려하여 차단등급은 A로 가정하였다. Table 3의 검출 및 차단시스템에 따른 누출시간 적용하여 누출시간은 30분으로 가정하였다.

배관압력, 온도는 실제 시설에서 측정되는 값을 적용하였다. 피해반경의 끝점(End-Point)는 오존의 ERPG 값이 존재하지않아 STEL<sup>2)</sup>인 0.2 ppm을 적용하였다. 오존가스 누출 시뮬레이션을 위한 세부 시나리오 조건은 Table 8와 같다.

### 3. 시뮬레이션 결과

#### 3.1 염소가스 누출 시뮬레이션 결과

KORA 프로그램을 활용하여 염소 누출 최악 및 대안 시나리오, 그리고 염소저장용기 이송 중의 누출사고를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과는 Table 9 및 Fig. 5와 같다.

염소 투입실 인근 야외에서 1 ton의 액체염소가 10분 내 모두 누출되었을 경우의 시뮬레이션 결과, 사고지점으로부터 피해반경은 8,199 m, 사업장 경계로부터의 피해반경은 8,017 m, 피해 주민 수는 980,735명으로 성남시민 대다수가 영향을 받는 것으로 예측되었다. 염소용기 내 저장된 1 ton의 염소가 야외에서 10분 내 모두 누출될 확률은 낮지만, 염

2) STEL(Short Term Exposure Limit) : 근로자가 1회 15분간 유해요인에 노출되는 경우의 허용농도

Table 9 Simulation results of chlorine gas leakage

Conditions	Leak during carrying*	Worst Scenario	Alternative scenario
damage distance from leakage spot (m)	8,199	2,908	299
damage distance from boundary of workplace (m)	8,017	2,725	117
Total number of people within influence range (people)	980,735	143,909	138

\* In case all chlorine (1ton) in a chlorine vessel was leaked within 10 min



Fig. 5 Chlorine influence range of worst and alternative scenario

소용기 이송 시 부주의한 취급에 의한 누출사고가 발생하지 않도록 안전조치를 강구할 필요가 있다.

염소 누출 최악 시나리오 시뮬레이션 결과, 사고지점으로부터 피해반경은 2,908 m, 사업장 경계로부터의 피해반경은 2,725 m이며, 인근 거주민 143,909명이 영향을 받는 것으로 예측되었다. 성남시청을 포함한 다수 대단지 아파트지역까지 포함된 범위이다. 하지만, 현실적으로 발생 가능한 염소 누출 대안 시나리오의 경우, 사고지점으로부터 피해반경은 299 m, 사업장 경계로부터 피해반경은 117 m, 영향범위 내 거주민 수는 138명으로 예측되었으며, 정수장내 직원 및 인근주민 일부만 영향을 받는 것으로 예측되었다. 염소투입실 및 저장실이 지하에 위치하고, 염소 누출시 염소 투입실 내 염소중화시설이 자동으로 가동되는 점을 고려하면, 대안 시나리오와 유사한 염소 유출사고발생시 피해거리 및 영향범위는 더 작아질 것으로 예상된다.

### 3.2 오존가스 누출 시뮬레이션 결과

KORA 프로그램을 활용하여 오존가스 누출 대안 시나리오에 대해 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 Table 10

Table 10 Simulation results of ozone gas leakage

Conditions	Alternative scenario
damage distance from leakage spot (m)	1,224
damage distance from boundary of workplace (m)	1,054
Total number of people within influence range (people)	19,611



Fig. 6 Ozone influence range of alternative scenario

및 Fig. 6과 같다.

오존 누출 대안 시나리오 시뮬레이션 결과, 오존투입배관(D125 mm) 직경의 20% 크기로 누출이 발생하였을 때의 피해반경은 1,224 m, 사업장 경계로부터의 피해반경은 1,054 m로 인근 거주 밀집지역까지 포함된 거리이며, 영향 받는 거주민 수는 19,611명으로 예측되었다. 대안 시나리오와 유사한 오존가스 누출사고 발생시, 인근 아파트 지역까지 영향을 받을 것으로 분석된다.

## 4. 결 론

본 연구에서 독성물질인 염소가스 및 오존가스 누출상황을 K-water 성남정수장의 각 시설 특성별 누출조건을 가정 후 KORA프로그램을 활용하여 최악 시나리오 및 대안시나리오에 대한 피해반경 및 영향범위를 예측하였다.

염소가스가 누출되었을 경우, 최악의 시나리오에서의 피해반경은 2,908 m이며, 영향을 받는 주변 피해 주민 수는 143,909명으로 예측되었다. 실제 사고발생 가능한 조건을 적용한 대안 시나리오의 경우 피해반경은 299 m이며, 피해 주민 수는 138명으로 예측되었다.

오존가스 누출의 경우, 오존가스를 별도의 저장시설 없이 생산하여 바로 투입하는 구조로 최악의 시나리오는 발생하지 않는 것으로 분석하였다. 대안 시나리오에서 피해반경은 1,224 m이며 피해 주민 수는 19,611명으로 예측되었다.

위의 결과로 볼 때, 염소누출에 따른 실제 피해반경은 정

수장 인근지역에 국한되며, 인명피해 또한 많지 않을 것으로 예상된다. K-water 성남정수장의 염소투입시설이 지하에 위치하고, 염소가스를 중화할 수 있는 중화시설이 염소가스 감지시 자동으로 가동되는 점을 고려하면 피해반경은 시뮬레이션 결과보다 더 작아질 것으로 판단된다. 추후 장외영향평가 및 위해관리계획서 작성 후 지역사회에 염소처리시설의 영향범위를 고지하여야하는 점을 감안하여 실제 피해반경을 현실적으로 설정할 필요가 있다.

오존가스 누출에 의한 피해반경은 염소보다 더 큰 것으로 나타났다. 오존을 저장하지 않고 생산 후 바로 수돗물에 접촉하는 구조로 최악의 시나리오는 발생하지 않으나, 오존가스 누출시 대안 시나리오의 경우 염소가스보다 적은 양이 누출되는 조건에서 염소가스 누출 대안 시나리오보다 피해반경 및 영향범위가 큰 것으로 나타났다. 오존이 장외영향평가, 유해관리계획서 대상에 포함되진 않지만, 오존의 독성 및 관련법이 강화되는 점을 고려하여, 피해반경, 영향범위에 따른 인명 피해 등에 대한 안전대책의 강구가 필요하다.

## References

- (1) 환경부, 2017, “화학물질관리법”.
- (2) Hyun-Sub Kim, Byeong-Han Jeon, 2017, “Development Plan of Accident Scenario Modeling Based on Seasonal Weather Conditions-Focus on Chlorine Leakage Accident -”, Journal of the Korea Academic-Industrial cooperation Society, pp. 773~738.
- (3) 한국화학물질안전원, 2014, “사고 시나리오 선정에 관한 기술지침”.
- (4) American Petroleum Institute(API), 2000, “Risk-Based Inspection-Base Resource Document”.
- (5) 한국화학물질안전원, 2015, “사고 영향범위 산정에 관한 기술지침”.
- (6) Jeong Seok Oh, Ji I Hyun, Hyo Jung Bang, 2012, “A Study on Smart Real-time Atmospheric Dispersion System”, Journal of the Korean Institute of Gas, pp. 44~51.