Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 3, pp. 235-240, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.235

Original article

연속식 흐름 가스상물질의 전자선 분해반응에서 전류 세기가 반응효율 및 kinetics에 미치는 영향

김탁현* · 김동우 · 조상희 · 손지은 · 유승호 · 김태훈 · 박종석

한국원자력연구원 첨단방사선연구소 방사선융합연구부

Effects of Current Intensity on the Reaction Efficiency and Kinetics of Gas Compound Decomposition by Electron Beam in a Continuous Flow System

Tak-Hyun Kim*, Dong-Woo Kim, Sang-Hee Jo, Jieun Son, Seungho Yu, Tae-Hun Kim, and Jong-Seok Park

Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea

ABSTRACT Electron beam technology has recently attracted attention as one of the powerful air pollution control methods. In this study, methyl mercaptan decomposition by electron beam in a continuous gas flow system was studied. To this, the effect of gas flowrate, which is one of important operating variables in the continuous gas flow electron beam process, on methyl mercaptan treatment efficiency was studied. In particular, the treatment efficiency and the reaction kinetics of methyl mercaptan decomposition were compared when calculated based on the absorbed dose and when calculated based on the current intensity of electron beam. When based on the electron beam absorbed dose, the treatment efficiency and 1st-order reaction constant increased as the gas flowrate was increased, contrary to the trends in general chemical reactions. However, when based on the current intensity, the treatment efficiency and 1st-order reaction constant increased as the gas flowrate was decreased, which can be theoretically explained. This is due to the fact that the current intensity increased as the gas flowrate was increased, resulting in improved the electron beam treatment efficiency. In conclusion, it is necessary to consider not only the absorbed dose but also the current intensity of electron beam in order to explain the results of reaction efficiencies and kinetics in the continuous flow electron beam gas treatment process.

Key words: Electron beam, Continuous gas flow, Flowrate, Current, Absorbed dose

1. 서 론

전자선 처리공정은 진공조건의 전자총에서 발생한 열전자를 빛의 속도에 가깝게 가속해주어 이때 발생되는 운동에너지와 공기와 타 화학물질과 반응하여 생성되는 다양한 라디칼들이 대상물질과 약 10^{-18}~10^{-12}초의 매우 짧은 시간 내에 반응하게 된다. 전자선에 의해 1차적으로 생성된 전자들이 N_2, O_2, 또는 H_2O와 반응하여 활성라디칼, 이온종, 2차 전자들을 생성시킨다. 주요 자유라디칼들로는 OH•, HO_2•, O•, N•, 및 H• 등이 있고[1], 이들 1차 및 2차 활성종들이 반응물질과 반응하게 된다. 이러한 전자선 처리공정은 흡착, 흡수, 습식세정 등과 같은 타 경쟁기술과 비교하여 2차적인 부산물 생성을 최소화할 수 있으며, 상온/상압에서 반응이 일어나기 때문에 처리비용도 효과적으로 낮출 수 있다. 특히, 서로 다른 종류 및 다른 농도의 처리대상물들이 혼합되어 존재하는 경우에도 고유량으로 처리가 가능하여 대용량 처리에 유리한 장점을 가지고 있다.

메틸메르캅탄(CH_3SH)은 메탄에티올이라고도 알려져 있으며, 메탄올 티올레이션 반응을 통해 산업적으로 생성되며, 농업, 석유화학산업, 고분자산업 등에서 원료물질로 사용된다. 이 물질은 독성을 가지는 유기황화합물의 일종이며, 대표적인 대기오염 유발 물질 중의 하나이다. 또한, 메틸메르캅탄은 공기 중에서 5-10 ppb 정도의 낮은 농도에서도 불쾌한 냄새를 유발하는 독성분자로서 무색이고 가연성 가스이다. 메틸메르캅탄의 환경 및 인간 건강에 대한 유해한 영향 때문에 이를 효과적으로 처리하

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Tak-Hyun Kim
Tel: +82-63-570-3343, E-mail: tkhk@kaeri.re.kr

Received 19 September 2024 Revised 24 September 2024 Accepted 25 September 2024

기 위한 과학적 혹은 산업적인 처리기술을 개발하고자 노력하고 있다[2]. 메틸메르캅탄의 제거를 위하여 많은 기술들이 개발되고 있는데, 주로 흡착, 응축, 생분해, 저온플라즈마, 촉매산화 등이 개발되고 있다. 최근 많이 활용되고 있는 메틸메르캅탄 제거방법은 생물학적 방법과 광촉매산화를 결합한 저감기술로 다른 기술들에 비해 화학약품 사용이 최소화되고 낮은 온도와 압력조건에서 운전되기 때문에 환경친화적인 장점이 있다. 각 기술들은 나름의 장단점을 가지고 있으며, 최근에는 혁신적인 기술개발의 필요로 인하여 플라즈마나 전자선 같은 고도산화기술(advanced oxidation process, AOPs)에 대한 관심이 높아지고 있다. Tsai 등은 저온플라즈마기술을 이용하여 산소가 존재하고 30 Torr 압력조건에서 메틸메르캅탄의 분해에 대하여 연구하였고[3], Yan 등은 펄스타입 코로나방전기술을 이용하여 70% 정도의 메틸메르캅탄 저감효율을 획득하였고, 활성탄섬유와 플라즈마기술을 결합하여 98%의 저감효율을 획득하기도 하였다[4]. Zeng 등은 마이크로파와 광분해를 결합한 공정으로 메틸메르캅탄 99% 이상의 저감효율을 획득하였다. 특히, 이 연구에서는 배경가스로서 O_2가 사용되었을 때 저감효율이 획기적으로 향상됨을 확인하였다[5].

전자선 대기정화기술은 1970년대 일본에서 배가스 중의 황화합물(SOx)을 처리하는 기술에 대하여 연구하기 시작한 이래로 황화합물과 질소화합물(NOx)을 동시에 처리하는 기술은 상용화까지 진행된 바가 있다[6,7]. 암모니아[8], 트라이메틸아민[1]과 같은 아민화합물 뿐만 아니라 황화수소, 메틸메르캅탄, 다이메틸설파이드, 다이메틸다이설파이드[9,10] 등의 황화합물의 분해반응 등에 관한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 정 등은 0.2 MeV 저에너지 전자가속기를 이용하여 회분식 조건에서 축산악취 원인물질인 메틸메르캅탄 뿐만 아니라 암모니아, 황화수소의 저감기술에 대하여 연구하였다[11].

기존의 전자선 이용 가스상물질 처리연구는 실험실 규모의 회분식 연구가 대부분이었다. 배가스 중의 질소산화물과 황산화물 제어연구를 위한 연속식 혹은 대용량의 파일롯 규모 혹은 현장 실증규모의 연구[6,7]가 이루어진 바가 있고, 온실가스의 일종으로서 매우 안정적이어서 처리가 어려운 SF_6 [12], NF_3 [13] 가스의 연속식 전자선처리에 관한 연구가 수행된 바가 있다. 그러나, 이외에는 연구된 사례가 매우 적은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 주요 대기오염 유발물질 중의 하나인 메틸메르캅탄을 대상으로 한 연속식 전자선처리 공정에 대하여 연구를 수행하였다. 이중, 연속식 전자선처리공정의 주요 운전변수인 가스유량이 처리효율에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 특히, 이 운전변수의 영향을 흡수선량과 전류 세기의 관점에서 어떻게 다르게 해석되는지에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 공기(air)를 배경가스로 사용하였는데 고순도 공기 가스실린더 47 L (한국특수가스, 한국), 메틸메르캅탄은 가스실린더 30 L 표준가스(100 ppm, N_2 balance, 리가스, 한국) 형태로 준비하였다. 전자선 조사 전후의 메틸메르캅탄 농도변화를 측정하기 위하여 HP-1 (60 m, 0.32 mm, 5 μm, Agilent, 미국) 컬럼을 장착한 gas chromatography (GC)/mass spectrometry (MS)(GCMS-QP2010Ultra, Shimadzu, 일본)를 사용하여 농도를 분석하였다. 메틸메르캅탄의 전자선 분해반응을 위하여 0.6 MeV 전자가속기(33 mA, 한국원자력연구원)를 사용하였고, 메틸메르캅탄의 초기농도와 유량을 조절하기 위하여 mass flow meter (MFM)와 mass flow controller (MFC)(MFCKOREA)를 사용하였다. 메틸메르캅탄 가스에 전자선이 조사되도록 하는 전자선반응기는 2.5 L 스테인레스스틸304 재질로 제작되었고, 이 반응기 상단에는 인코넬필름(두께 50.8 μm; Ni 50% 이상, Cr 15~30%, Fe 5~20%, Mo 3~10%, 기타 Al, Mn, Si 등의 합금)으로 덮여있어 전자선의 투과가 효과적으로 이루어지도록 하였다. 일반적으로는 티타늄 재질의 박막을 더 많이 사용하나, 인코넬이 티타늄에 비하여 내식성, 내열성 등이 강해 전자선 반응기에 더 적합하다. 전체적인 반응모식도는 Fig. 1과 같다. 전자선의 세기는 흡수선량(absorbed dose) 단위로 표시하는데, 흡수선량은 방사선과 물질간의 반응에 널리 사용되는 단위로서, 단위

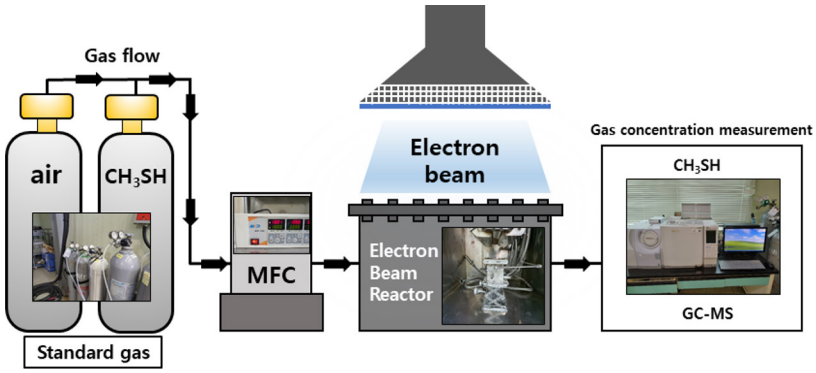


Fig. 1. Schematic of electron beam treatment process in the continuous gas flow.

질량당 물질에 흡수되는 에너지량을 의미하며, Gy (gray) 또는 SI단위로는 J/kg로 표현된다. 흡수선량의 측정을 위해서 본 연구에서는 고체 CTA필름(Cellulose Triacetate film, FTR-125, Fuji Photo Film Co., 일본)을 이용하여 검량선을 구하였다[8,14].

$$\text{흡수선량} = \frac{\text{흡수된 에너지}(J)}{\text{물질 질량}\ (kg)} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 가스유량 변화에 따른 전자선의 전류 세기 변화

전자선에 의한 산화반응은 먼저 전자가속기에서 나온 전자들이 산소(O_2)나 공기중 수분(H_2O)과 반응하여 라디칼 혹은 다른 활성종(예, OH•, O•)들이 생성된다. 이후 이들 라디칼 혹은 활성종들이 대상 화학물질 분자와 반응하여 분해를 일으킨다. 동시에, 이들 활성종들은 다른 화학종들과도 반응하여 원하지 않은 반응에도 관여하면서 소모되기도 한다. 메틸메르캅탄은 약한 결합에너지를 갖는 S-H결합(결합에너지 347 kJ/mol)이 쉽게 깨지면서 분해반응이 일어나기도 하며, 다른 라디칼이나 활성종이 존재하는 경우 수소 탈착반응에 의해 CH_3S•, CH_3• 형태로 분해반응이 일어나기도 한다[4].

$$CH_3SH + OH\bullet\ (O\bullet) \rightarrow CH_3OH,\ CH_3S\bullet,\ CH_3\bullet,\ \text{etc} \quad (2)$$

$$CH_3OH,\ CH_3S\bullet,\ CH_3\bullet + OH\bullet\ (O\bullet) \rightarrow SO_2,\ CO_2,\ H_2O,\ \text{etc} \quad (3)$$

가스상의 메틸메르캅탄의 전자선에 의한 분해반응에서 가스유량이 변함에 따라 일정한 전자선 흡수선량을 확보하기 위하여 동일한 전압임에도 불구하고 전류의 세기는 달라지게 된다. Fig. 2는 흡수선량 증가와 가스유량 변화에 따른 전류의 변화를 나타낸 것이다. 즉, 메틸메르캅탄 가스 초기농도 25 ppm, 전압 0.5 MeV로 고정하고, 가스유량을 각각 10, 15, 25 L/min으로 증가시키면서 이때의 전자선 흡수선량을 0. 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 kGy로 서서히 증가시킬 때의 전류 값의 변화를 조사한 것이다. 그 결과, 가스유량이 증가할수록 반응기내에서의 가스상 물질과 전자선의 반응시간이 반비례적으로 감소하므로 일정한 전자선 세기를 얻기 위해서 전류 값이 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 가스유량이 10, 15, 25 L/min일 때, 가스의 반응기 내 체류시간은 각각 15, 10, 6초이었다. 이때, 3 kGy의 흡수선량 조건에서 전자가속기에서 전자를 생성시키는 전류의 세기는 각각 0.93, 1.40, 2.33 mA이었다. 즉, 일정한 흡수선량 조건 하에서 가스유량이 증가할수록 전류의 세기가 높아진다는 것이다. 따라서, 전류 세기가 높아질수록 전자가속기에서 생성되는 전자의 수는 더 많아지고 이러한 전자들은 처리대상인 메틸메르캅탄 분자와의 충돌 확률이 높아지게 되어 처리효율이 증가하게 된다[14-16].

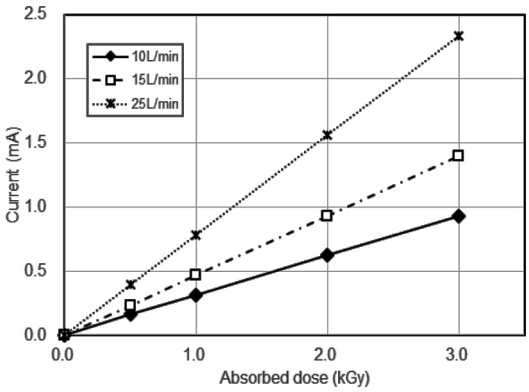


Fig. 2. Relationship between absorbed dose and current intensity according to various gas flowrate in the continuous gas flow electron beam process. (CH_3SH 25 ppm, voltage 0.5 MeV, absorbed dose 0.5~3.0 kGy).

3.2. 가스유량 변화에 따른 메틸메르캅탄 전자선 처리효율에의 영향

가스상의 메틸메르캅탄의 전자선에 의한 연속식 분해반응에서 중요한 운전변수 중의 하나인 가스유량 변화의 영향을 알아보았다. 이를 위하여, 가스유량을 각각 10, 15, 25 L/min으로 변화를 주었다. 이때 메틸메르캅탄 가스 초기농도는 25 ppm, 전압은 0.5 MeV로 고정하였고, 전자선의 흡수선량을 0. 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 kGy로 증가시키면서 이때의 메틸메르캅탄 농도 저감정도를 확인하였다. 그 결과, Fig. 3(a)와 3(b)에서 나타나듯이, 전자선의 흡수선량이 0 kGy에서 3.0 kGy로 증가할수록 메틸메르캅탄의 처리효율도 증가하였다. 또한, 가스유량이 10, 15, 25 L/min로 증가할수록 처리효율도 증가함을 알 수 있었다. 즉, 25 L/min일 때가 10 L/min일 때보다 흡수선량 변화에 따른 처리효율이 높게 나타났다. 그러나, 이러한 결과는 일반적인 화학반응에서 유량이 증가할수록 반응시간이 감소하고 이로 인하여 처리효율이 감소하게 되는 현상과는 반대의 경향이다. 일반적으로는 모든 조건이 동일하다면 가스유량이 증가하게 되면 가스의 반응기 내 체류시간이 감소하게 되어 처리효율이 감소하게 된다. 이전의 UV, 광촉매, H_2O_2, 오존산화에 의한 NO, NO_2, SO_2 및 스타이렌과 같은 가스상 물질 처리 연구사례에서도 가스유량의 영향을 받는 것으로 알려져 있다[17-19].

이번에는 이러한 가스유량 변화에 따른 전류 값의 변화를 반영하여 전류 값의 변화를 x축으로 하고, 메틸메르캅탄 농도와 처리효율 변화를 y축으로 한 경향을 Fig. 3(c)와 3(d)에 각각 나타내었다. 그 결과, Fig. 3(a)과 3(b)의 흡수선량을 기준으로 하였을 때와 달리 가스유량의 변화에 따른 처리효율 변화 차이를 확연하게 알 수 있었다. 즉, 가스유량이 증가할수록 전류 값이 증가하게 되고, 단위 전류당 처리되는 효율은 가스유량이 낮을수록 처리효율이 증가함을 알 수 있었다. 즉, 가스유량이 10 L/min

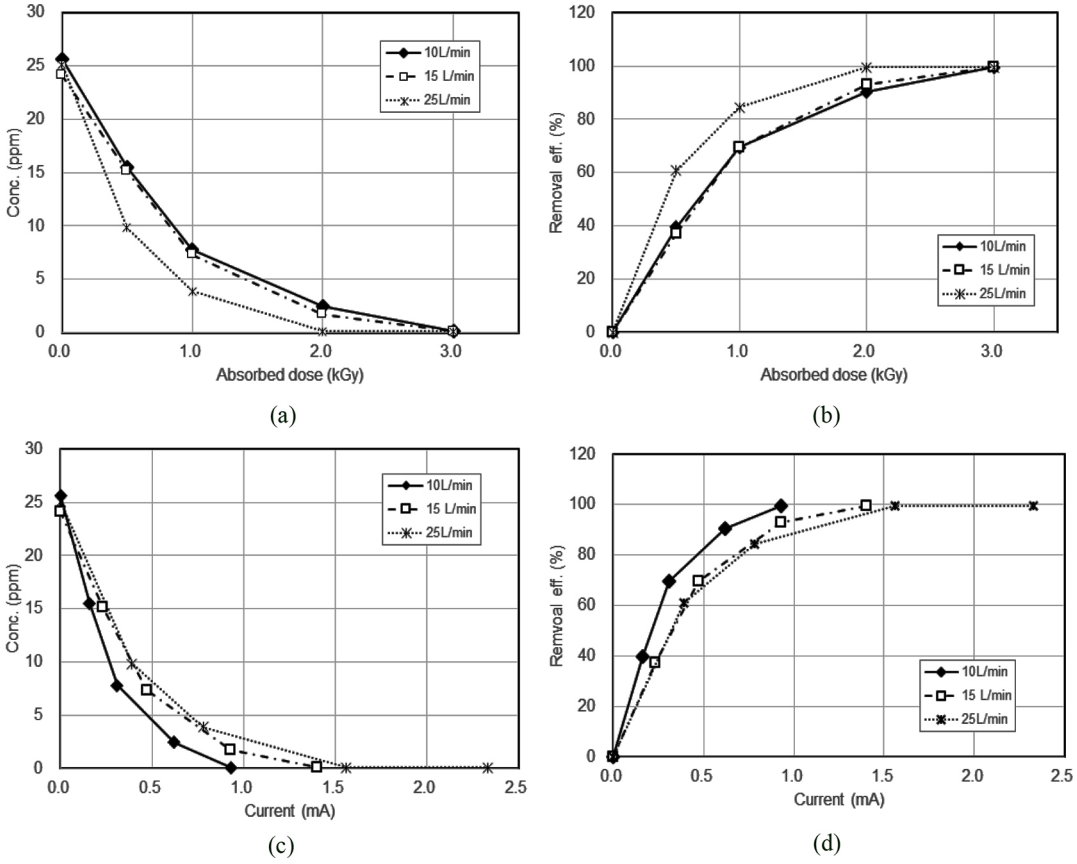


Fig. 3. Changes of methyl mercaptan concentration and removal efficiency based on absorbed dose (a,b) and based on current intensity (c,d) in the continuous gas flow electron beam process. (CH_3SH 25 ppm, voltage 0.5 MeV, absorbed dose 0.5~3.0 kGy).

일 때가 25 L/min일 때보다 전류 값 변화에 따른 처리효율이 높게 나타났다. 결론적으로, 가스유량 증가시 체류시간 감소 영향보다 전류 세기의 증가로 인한 처리효율 향상 효과가 더 큼을 알 수 있었다. 류 등[12,13]에 의하면 SF_6 및 NF_3 가스의 전자선처리 연구에서 흡수선량 뿐만 아니라 전류세기 변화에 따른 가스상물질의 처리효율을 조사하기도 하였다.

3.3. 가스유량 변화에 따른 메틸메르캅탄 전자선 분해반응 kinetics에의 영향

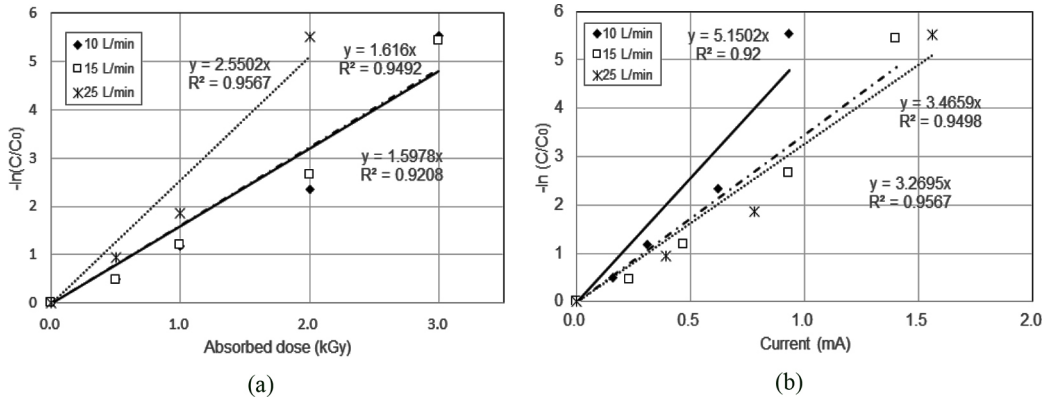
전자선에 의한 화학물질의 분해반응은 일반적으로 유사1차(pseudo 1st-order) 반응속도식의 형태를 나타낸다. 다른 연구자들의 연구에서도 전자선에 의한 화학물질의 분해반응은 대부분 1차반응식의 형태로 표현이 되었다[20,21]. 흡수선량 상수 k_d는 아래의 식 (4)에서와 같이 구해진다.

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -k_d D \quad (4)$$

여기서, C_0는 초기 반응물 농도(mg/L 또는 ppm), C는 반응 후 반응물 농도(mg/L 또는 ppm), k_d는 1차반응 흡수선량 상수(kGy^{-1}), D는 흡수선량(kGy)이다. 본 연구에서도 아래의 Fig. 4(a)와 4(b)에서와 같이 1차반응식의 형태로 표현이 가능하였다. Fig. 4(a)는 흡수선량을 기준으로 하였을 때의 반응 kinetics로서 가스유량이 10, 15, 25 L/min으로 증가할수록 1차반응 흡수선량 상수(kGy^{-1})가 1.597, 1.616, 2.550 kGy^{-1}과 같이 증가함을 알 수 있다. 즉, 가스유량이 증가할수록 흡수선량 변화에 따른 처리속도가 증가함을 의미한다. 그러나, Fig. 4(b)에서와 같이 전류세기를 기준으로 하여 반응 kinetics를 산출하면 가스유량이 10, 15, 25 L/min으로 증가할수록 1차반응 전류상수(mA^{-1})가 각각 5.150, 3.466, 3.270 mA^{-1}과 같이 감소함을 알 수 있다. 즉, 흡수선량을 기준으로 할 때보다 전류세기를 기준으로 하였을 때가 가스유량 증가에 따른 체류시간 감소에 관한 kinetics를 잘 반영함을 알 수 있다.

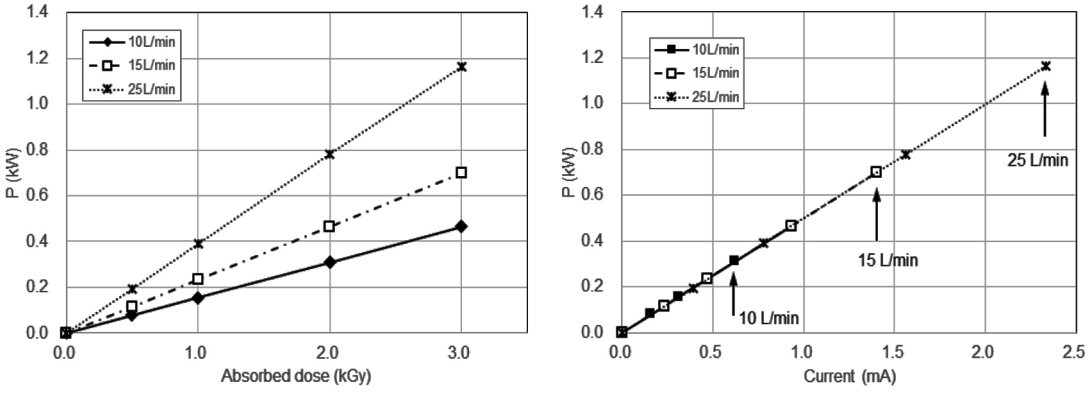
3.4. 가스유량 변화에 따른 전자선처리공정 전력소비에의 영향

다음의 Fig. 5는 가스상 메틸메르캅탄의 전자선 분해반응공정에서 가스유량 변화에 따른 전력소비량(P(kW)=V(MeV)×A(mA))을 전자선 흡수선량에 대해서(Fig. 5(a))와 전류세기 변화에 대해서(Fig. 5(b)) 각각 조사하여 보았다. Fig. 5(a)는 Fig. 2



(a) (b)

Fig. 4. First-order kinetics of methyl mercaptan decomposition based on absorbed dose (a) and based on current intensity (b) according to various gas flowrate in the continuous gas flow electron beam process. (CH_3SH 25 ppm, voltage 0.5 MeV, absorbed dose 0.5~3.0 kGy).



(a) (b)

Fig. 5. Power consumption of methyl mercaptan decomposition based on absorbed dose (a) and based on current intensity (b) according to various gas flowrate in the continuous gas flow electron beam process. (CH_3SH 25 ppm, voltage 0.5 MeV, absorbed dose 0.5~3.0 kGy).

와 같이 전자선 흡수선량이 증가함에 따라 가스유량이 증가할수록 체류시간이 짧아지고 이에 따라 전류의 세기가 증가하는 현상을 반영한 결과이다. 즉, 가스유량이 증가할수록 가스상 물질의 전자선 분해반응에 소비되는 전력량이 증가함을 나타내었다. 즉, 가스유량이 10, 15, 25 L/min으로 증가할수록 3 kGy 흡수선량을 조사하였을 때 총 전력소비량은 각각 0.47, 0.70, 1.17 kW로 증가하였다. 그리고, Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 전력소비량을 전자선의 전류세기에 대하여 그래프를 산출한 것으로서, 전류의 세기가 증가할수록 이에 비례하여 전력소비량이 증가하였다. 즉, 가스유량이 10, 15, 25 L/min으로 증가할수록 3 kGy 흡수선량을 조사하기 위하여 Fig. 5(a)에서와 동일하게 총 전력소비량은 각각 0.47, 0.70, 1.17 kW로 증가하는 형태로 나타났다. 그러나, 전류 세기를 기준으로 전력소비량을 계산하면 Fig. 5(a)와 동일하게 가스유량 증가에 따라 총 전력소비량이 증가하지만, 전류 세기에 대한 전력소비량의 비율은 0.5 kW/mA 수준으로 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 전자선 반응에서 전류와 달리 전압(voltage)은 전자선의 투과깊이와 관련이 있으며, 전압이 높아질수록 투과깊이가 길어져 처리효율 뿐만 아니라 전력소비량도 증가하게 된다.

4. 결 론

대기오염 문제가 심각한 환경문제로 대두됨에 따라 전자선기술과 같은 고도 대기정화기술이 활발하게 개발되고 있다. 본 연구에서는 주요 대기오염 유발물질 중의 하나인 메틸메르캅탄을 대상으로 하여 연속식흐름의 전자선 처리공정에 대하여 연구하였다. 연속식 전자선 가스처리공정에서는 가스유량이 주요한 운전변수인데, 본 연구에서는 이의 영향에 대하여 고찰하였다. 특히, 기존의 전자선의 흡수선량을 기준으로 하였을 때와 전자선의 전류 세기를 기준으로 하였을 때의 메틸메르캅탄의 처리효율, 분해반응 kinetics, 그리고 이때의 전력소비량 변화 경향을 비교하여 살펴보았다. 그 결과, 전자선의 흡수선량을 기준하였을 때는 가스유량이 증가할수록 메틸메르캅탄의 처리효율과 1차 반응상수가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 전자선의 전

류 세기를 기준으로 하였을 때는 가스유량이 감소할수록 메틸메르캅탄의 처리효율과 1차 반응상수가 증가하는 것으로 나타나 이의 논리적 설명이 가능하였다. 이러한 결과는 가스유량이 증가할수록 체류시간이 짧아져 정해진 흡수선량을 확보하기 위하여 전류 세기가 증가하여 결과적으로 메틸메르캅탄의 처리효율이 증가하였음을 알 수 있었다. 결론적으로, 연속식 가스처리를 위한 전자선공정에서는 처리효율과 kinetics를 이해하기 위해서는 흡수선량 뿐만 아니라 전류 세기도 함께 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국원자력연구원의 주요연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 523330-24).

참고문헌

1. Son YS, Kim P, Park JH, Kim J, Kim JC. 2013. Decomposition of trimethylamine by an electron beam. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **33**:1099-1109. https://doi.org/10.1007/s11090-013-9479-z.
2. Bayout A, Cammarano C, Costa IM, Veryasov G, Hulea V. 2024. Management of methyl mercaptan contained in waste gases-an overview. *Environmental Science and Pollution Research* **31**:44669-44690. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34112-0.
3. Tsai CH, Lee WJ, Chen CY, Liao WT. 2001. Decomposition of CH_3SH in a RF plasma reactor: reaction products and mechanisms. *Industrial Engineering and Chemical Research* **40**:2384-2395. https://doi.org/10.1021/ie0009637.
4. Yan NQ, Qu Z, Jia JP, Wang XP, Wu D. 2006. Removal characteristics of gaseous sulfur containing compounds by pulsed corona plasma. *Industrial Engineering and Chemical Research* **45**:6420-6427. https://doi.org/10.1021/ie060471f.
5. Zheng T, Liu B, Wang A, Li X, Wang P. 2019. Degradation of methyl mercaptan by a microwave-induced photoreaction process. *Chemical Engineering Journal* **368**:369-376. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.156.
6. Kawamura K, Aoki S. 1972. Application of ionizing radiation to desulfurization of flue gas. *Journal of the Atomic Energy Society of Japan* **14**:597-599. https://doi.org/10.3327/jaesj.14.597.
7. Chmielewski AG. 2007. Industrial applications of electron beam flue gas treatment—from laboratory to the practice. *Radiation Physics and Chemistry* **76**:1480-1484. https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSCHEM.2007.02.056.
8. Son YS, Kim KH, Kim KJ, Kim JC. 2013. Ammonia decomposition using electron beam, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **33**:617-629. https://doi.org/10.1007/s11090-013-9444-x.
9. Hakoda T, Chowdhury MAZ, Shimada A, Hirota K. 2009. Oxidation of dimethyl sulfide in air using electron-beam irradiation, and enhancement of its oxidation via an MnO_2 catalyst. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **29**:549-557. https://doi.org/10.1007/s11090-009-9194-y.
10. Son YS, Jung IH, Lee SJ, Kim JC. 2015. Decomposition of sulfur compounds by a radiolysis: III. A hybrid system and field application. *Chemical Engineering Journal* **274**:9-16. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2015.03.122.
11. Jeong HB, Jo SH, Son J, Oh YH, Kim TH, Kim TH, Yu S, Kim DW, Jo YM. 2023. Removal of ammonia, hydrogen sulfide, and methyl mercaptan as livestock odor using a low-energy (0.2MeV) electron beam accelerator. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **39**(5):751-762. https://doi.org/10.5572/ KOSAE.2023.39.5.751.
12. Ryu JY, Kim JB, Choi CY, Jang SH, Lee SJ. 2012. A study on increase of sulfur hexafluoride (SF_6) destruction and removal efficiency by conditioning agent (H_2). *Journal of the Environmental Sciences* **21**(9):1163-1169. https://dx.doi.org/10.5322/JES.2012.21.9.1163.
13. Ryu JY, Choi CY, Kim JB, Lee SJ, Kim SG, Kwak HS, Yun YM. 2012. Destruction of NF_3 emitted from semiconductor process by electron beam technology. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **34**(6):391-396. https://dx.doi.org/10.4491/ksee.2012.34.6.391.
14. Shin JK, Jo SH, Kim TH, Oh YH, Yu S, Son YS, Kim TH. 2022. Removal of NOx using electron beam process with NaOH spraying. *Nuclear Engineering and Technology* **54**:486-492. https://doi.org/10.1016/J.NET.2021.06.033.
15. Fuchs P, Roth B, Schwing U, Angele H, Gottstein J. 1988. Removal of NOx and SO_2 by the electron beam process, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry* **31**:45-56. https://doi.org/10.1016/1359-0197(88)90108-7.
16. Mätzing H. 1991. Chemical kinetics of flue gas cleaning by irradiation with electrons, *Advances in Chemical Physics* 315-402. https://doi.org/10.1002/ 9780470141298.ch4.
17. Prostějovský T, Kulišťáková A, Reli M, Žebrák R, Kočí K. 2023. Innovative technology for ammonia abatement from livestock buildings using advanced oxidation processes. *Photochemical & Photobiological Sciences* **22**:1603-1610. https://doi.org/10.1007/s43630-023-00400-w.
18. Shahrestani MM, Rahimi A. 2018. Evaluation of electrical energy consumption in UV/H_2O_2 advanced oxidation process for simultaneous removal of NO and SO_2. *Environmental Engineering Research* **24**:389-396. https://doi.org/10.4491/eer.2018.276.
19. Kočí K, Reli M, Troppová I, Prostějovský T, Žebrák R. 2020. Degradation of ammonia from gas stream by advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* **55**:433-437. https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1705105.
20. Shao H, Ren Y, Lei C, Xu G. 2023. Electron beam degradation of the cardiovascular drug salbutamol: Mechanisms and degradation pathways. *Chemosphere* **318**:137939. https://doi.org/10.106/j.chemosphere.2023.137939.
21. Duan Y, Shao H, Zhang Z, Shi W, Xu G. 2022. Electron beam induced degradation of indomethacin in aqueous solution: kinetics, degradation mechanisms, and toxicity assessment. *Environmental Science and Pollution Research* **29**:19283-19294. https://doi.org/10.1007/s1356-021-16348-2.