

면섬유염색폐수의 공정별 폐수성상과 이온화가스에 의한 처리특성

임경은* · 정팔진 · 권지영 · 이은주*

전북대학교 환경공학과

*공주대학교 건설환경공학부 방재연구센터

Composition of Cotton Textile Dyeing Process Wastewater and its Treatment Characteristics by Ionized Gas

Gyeong-Eun Lim[†] · Paul-gene Chung · Ji-Young Kwon · Eun-Ju Lee^{*}

Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

^{*}Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

(Received 22 August 2006, Accepted 1 May 2007)

Abstract

Three types dyeing wastewater (dark, medium, light color) discharged from cotton textile dyeing with reactive dye was collected at each step of process. Each process dyeing wastewater was analyzed and treated by ionized gas. The analysis focused on COD_{Cr}, SS and color. Bleaching & scouring process wastewater has the highest COD_{Cr} value in the three type dyeing wastewater. SS shows the highest value at dyeing process wastewater in dark and medium color but light color has at finishing process wastewater. The result of process wastewater treatment by ionized gas was that the ionized gas was effective in COD_{Cr} removing of bleaching & scouring process and finishing process wastewater but was not good at dyeing process wastewater. From that result it is estimated that the ionized gas could not work in opening the aromatic ring and react only in aliphatic component of the molecule. Because the surfactants contained in bleaching & scouring process and finishing process wastewater have only one aromatic ring in its molecular structure, in contrast with the reactive dye compounds consist of aromatic rings great part of its molecular structure. The color almost removed in 1.5 hrs reaction time but COD_{Cr} removal efficiency was only 30.7% through 3hrs in 1500 mL of total dyeing wastewater treated by 10 L/min ionized gas.

keywords : Dyeing process wastewater, Ionized gas, Reactive dye

1. 서론

염색폐수는 사용된 원단과 염료의 종류, 염색방법, 가공공정에 따라 상당히 다양하다. 염색은 전처리공정으로 표백정련공정이 있고 본 공정인 염색공정, 후처리공정인 마무리공정으로 이루어지고 각 공정 사이에 염색농도에 따라 횟수를 달리하여 수세가 행해진다. 염색 전체 공정은 최소 7 단계 이상으로 이루어지고 염색 각 단계에서 사용되는 용수량은 염색공정에서는 섬유량의 10~20배 그 외의 공정에서는 10배의 용수가 소비되는 용수다소비 업종에 해당된다(이, 2005a). 염색가공 공정에서 발생하는 폐수의 성상은 원단, 사용 염료, 염색방법, 가공공정에 따라 상당히 다양하다. 염색가공공장의 폐수를 연구할 전형적인 섬유폐수라는 것은 존재하지 않고, 이점이 염색폐수처리를 표준화시키기에 어려움을 주고 있다. 따라서 염색폐수의 처리방법도 국제적으로 다양해지고 고도화되고 있지만 어떠한 처리가 적합한지는 한마디로 단정지을 수 없는 실정이다. 그리고

각 공정마다 사용되는 화학약품의 종류가 다르고 오염정도도 다른데 현재의 염색폐수 처리는 이 공정의 폐수가 분리되지 않고 한데 섞임으로써 배출부하가 크고 적절한 처리도 어렵게 하는 것으로 판단된다. 화학적 응집처리 후 생물학적 처리를 하는 기존의 염색폐수 처리방법은 다량의 슬러지 발생, 낮은 탈색율, 폐수에 함유된 염료를 비롯한 대부분의 고분자 화합물의 생물난분해성 등의 문제점을 갖고 있어 오늘날 비효율적인 방법으로 판정되고 있다(Pagga et al., 1986). 이를 뒷받침하는 연구로 염료 중 가장 많이 사용되는 아조염료에 대한 생물분해 가능성을 실험한 Shaul 등(1991)의 연구에서는 총 18종의 아조 염료 중 단지 3종의 아조염료만이 생분해됨을 보여 주고 있다. 염색폐수가 갖는 독성문제의 심각성으로 인해 기존의 처리를 대체할 고효율의 처리방법을 찾기 위한 연구로 국내외에서 UV/H₂O₂, 광촉매, 광-펜톤, UV/TiO₂, 초음파, 전기응집, 오존 등의 AOP공법에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 이온화가스를 이용한 수처리에 관한 연구로는 축산폐수를 활성탄과 연계해서 처리한 연구(이, 2005b)와 펜톤을 병행하여 염색폐수를 처리한 연구(조, 2002) 등이 있다. 이온화가스의 처리효율을 다른 AOP공법과 비교한 연구로는 한국

[†]To whom correspondence should be addressed.
limge@hanmail.net

수자원공사(2003)에서 처리대상 물질 동일량을 처리하는데 소요되는 전력량으로 비교한 연구가 있다. 세 종류의 농약 pirimicarb, imidaclopid, aldicarb를 이온화가스와 광촉매, UV/H₂O₂, UV/ozone, UV, Photo-Fenton의 6가지 방법으로 처리했을 때 이온화가스의 소비전력이 가장 낮아 UV 병용 처리 중 효율이 가장 높은 UV/H₂O₂에 비해 5분의 1의 전력으로 동일한 양의 농약을 처리할 수 있는 것으로 나타났다(한국수자원공사, 2003). AOP공법에 의한 염색폐수 처리 효율을 비교한 연구 결과에서 UV/H₂O₂와 TiO₂광촉매를 이용한 처리에서 색도는 각각 87.2%와 99.4%의 높은 제거효율을 보이지만 유기물 제거율은 각각 35%, 75.6%의 낮은 제거효율을 나타내는 연구결과(하 등, 2003)가 있고 전기응집을 이용한 연구에서 70%(김 등, 2000), 오존에 의한 처리에서 60%(권 등, 2005)의 유기물 제거효율을 나타내 AOP 공법에 의한 염색폐수의 유기물 제거효율은 그다지 높지 않은 것으로 나타나는데 본 연구에 사용한 이온화가스도 다른 AOP 공법에 의한 처리에서와 같이 탈색은 쉽게 이루어지지만 유기물 제거효율은 높지 않았다.

본 연구에서는 사용량이 가장 많고 고착율이 낮은 반응성 염료를 사용하여 면섬유를 염색한 공장에서 발생한 염색폐수를 농색, 중간색, 담색의 3가지 성상으로 분류하여 각 공정별로 유기물을 중심으로 수질 특성을 조사하고, 생물난분해성 폐수로 분류되는 염색폐수 처리법으로 제안되고 있는 AOP 공법의 하나인 이온화가스를 사용하여 각 공정폐수를 처리하여 이온화가스로 산화 가능한 물질을 추적해 보았다. 염색폐수 중의 어떤 성분이 이온화가스에 의해 산화가 어려운지 알아보기 위한 방법으로 염색폐수를 공정별로 채수하여 이온화가스로 처리한 후 유기물 제거효율을 비교해 추정해 보았다. 이온화가스의 염색종합폐수 처리 적용 가능성을 평가해보기 위해 염색종합폐수를 이온화가스로 처리하여 색도와 COD_{Cr} 제거효율을 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 이온화가스발생장치

이온화가스를 발생시키는 플라즈마 발생장치는 교류 220 V를 15,000 V까지 승압시켜서 플라즈마를 유도하고 여기에 필터링한 공기를 통과시켜 이온화된 활성종을 이용하여 수처리를 하는 장치이다. 본 플라즈마 발생장치로 유입되는 공기 구성 분자와 충돌해서 활성종을 생성시키는 전자가 갖는 에너지는 2.4×10^{-15} J이고 음이온 생성량은 15,000 V에서 1.98×10^5 anions/cm³이다. 본 연구에 사용된 실험 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타냈다.

공기가 유입되어 플라즈마 발생장치에서 일어날 것으로 예상되는 반응을 Table 1에 나타냈다.

2.2. 대상시료

실험에 사용한 시료는 전주시 소재 H염색공장에서 발생한 폐수로 H공장은 주로 대기업에 속옷 원단을 염색하여 납품하는 업체로 이 공장에서 발생하는 폐수는 100% 반응

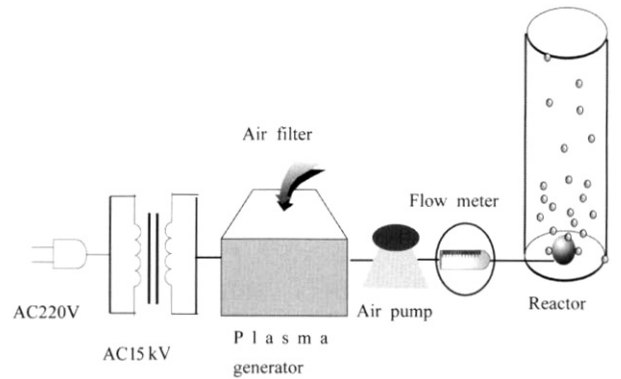


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus using plasma generator.

Table 1. Reaction of air discharge in the plasma generator (Michael et al., 1994)

Reactions in plasma generator
$e + N_2 \rightarrow e + N \cdot + N \cdot$
$e + N_2 \rightarrow N_2^- \cdot$
$e + O_2 \rightarrow e + O \cdot + O \cdot$
$e + O_2 \rightarrow O_2^- \cdot$
$O \cdot + O_2 \rightarrow O_3$
$e + H_2O \rightarrow e + H \cdot + OH \cdot$
$e + O \cdot \rightarrow O^- \cdot$
$H \cdot + O_2 \rightarrow HO_2 \cdot$

성 염료를 사용하여 면섬유를 염색하면서 발생하는 폐수이다.

2.3. 분석항목 및 실험방법

염색농도별로 농색, 중색, 담색 염색을 하면서 발생한 폐수를 염색단계별로 분류하여 COD_{Cr}, pH, SS를 측정하였다. 염색전처리공정인 표백정련폐수와 본공정인 염색공정폐수, 염색후처리공정인 마무리공정폐수를 1500 mL씩 취하여 이온화가스 유량을 10 L/min으로 하여 처리시간에 따른 유기물 제거능을 COD_{Cr}을 측정하여 평가해 보았다. 농색 염색폐수에 대해서는 염색종합폐수를 동일한 조건으로 처리하여 COD_{Cr}변화를 측정하였다. 이온화가스에 의한 염료의 탈색능은 중색 염색종합폐수를 취하여 측정해 보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 염색 공정 별 폐수의 성상

Table 2는 공정별로 분류하여 분석한 시료의 명칭을 나타낸다. Table 3에 시료의 분석 데이터를 나타내었다.

공정별 COD_{Cr}분포를 보면 표백정련공정에서 담색 시료의 값이 3000 mg/L으로 농색(2000 mg/L) 중간색(1540 mg/L)에 비해 높은 값을 보이는데 이것은 담색 염색을 하기 위해서는 더 높은 백도가 요구되므로 표백제인 과산화수소를 많이 사용하게 되고 이것이 COD_{Cr}로 잡힌 것으로 사료된다.

마무리공정에서 사용되는 유연제의 양도 염색하는 염료의 색도와는 무관하고 섬유가 요구하는 성질에 따라 사용량이 결정되고 있다.

Table 2. Abbreviated names of samples

Samples	Processes discharging wastewater
S1	Bleaching & scouring
S2	Rinsing after bleaching & scouring
S3	Neutralizing
S4	Rinsing after neutralizing
S5	Dyeing
S6	Rinsing after dyeing
S7	Soaping
S8	Rinsing after soaping
S9	Second soaping
S10	Rinsing after second soaping
S11	Finishing
S12	Total wastewater

Table 3. Characteristics of wastewater depending upon dyeing color

Dark color dyeing			
Samples	COD _{Cr} (mg/L)	pH	SS (mg/L)
S1	2000	12.15	35.0
S2	680	11.83	11.5
S3	378	5.73	3.5
S5	517	12.60	232
S6	53	11.71	37.5
S7	256	7.10	13.0
S8	84	7.60	0.5
S9	55	7.80	1.0
S10	11	7.95	0.0
S11	496	6.80	108.0
S12	450	11.7	43.5
Medium color dyeing			
Samples	COD _{Cr} (mg/L)	pH	SS (mg/L)
S1	1540	12.5	102.0
S2	475	10.3	12.5
S3	265	5.0	8.5
S4	194	7.5	12.1
S5	280	10.6	231.5
S6	50	10.6	71.0
S7	285	8.7	13.0
S8	62	8.2	19.0
S9	67	8.8	2.0
S10	18	8.3	2.7
S11	577	4.3	34.0
S12	373	11.9	42.0
Light color dyeing			
Samples	COD _{Cr} (mg/L)	pH	SS (mg/L)
S1	3000	13.0	91.6
S3	200	7.7	5.6
S5	528	11.4	135.0
S6	60	11.5	15.0
S7	180	11.3	29.5
S8	52	8.7	4.0
S11	1200	7.2	191.0
S12	726	12.4	64.0

중화 단계의 pH를 분석해 보면 농색, 중간색, 담색염색공정에서 각각 5.7, 5.0, 7.7으로 알칼리 표백 정련 후 염색에 들어가기 전에 행해지는 중화 공정에서 투입되는 산의 양도 정량이 이루어지고 있지 않음을 알 수 있다.

농색 염색을 할 때는 표백제가 소량으로 투입되고 표백 후 수세 과정이 생략되는 대신 염색 후에는 다량으로 남아 있는 미고착 염료의 제거를 위해서 소핑(soaping)과 수세 횟수가 증가하는 것을 알 수 있다.

SS값은 농색과 중간색에서는 염색공정에서 높은 값을 나타내지만 담색염색에서는 마무리공정폐수에서 높은 값으로 나타났는데 이것은 담색염색에서 마무리공정폐수의 COD_{Cr} 값이 농색, 중간색 염색 마무리공정폐수보다 높은 값을 갖는 것으로 미루어 볼 때 마무리 공정에서 유연제로 계면활성제의 사용량이 많아지면서 이것이 SS로 나타난 것으로 판단된다.

이상의 모든 결과가 염색종합폐수의 표준화의 어려움을 보여 준다고 하겠다.

3.2. 공정별 폐수의 이온화 가스 처리 결과

3.2.1. 농색 염색공정 시료

염색 공정 시료만 1500 mL를 취하여 이온화 가스 유량을 10 L/min으로 하여 처리한 시간대별 결과를 Fig. 2에 나타냈다.

염색공정폐수에 포함되어 있는 유기물은 미고착 염료와 섬유조각 등인 것으로 여겨지는데 처리 시간이 길어져도 거의 변화가 없었다. 펜톤 산화 공법에서 OH라디칼에 의한 산화반응으로 탈색이 이루어지고 응집으로 COD가 제거되는 결과(조, 2002)나 OH라디칼이 작용하는 것으로 알려진 UV/H₂O₂에서는 COD제거가 미미하지만 TiO₂가 광촉매로 첨가될 때 COD제거효율이 높아지는 결과(하 등, 2003)나 전기분해에서 탈색은 되지만 COD 제거율은 낮은 결과(Kim et al., 2005)를 보여주는 연구 결과들과 같이 염료는 이온화가스에 의해 탈색은 이루어지지만 무기물로까지 분해는 되지 않는다는 것을 보여주는 결과라고 하겠다. 즉 염료분자내의 발색단에 존재하는 불포화결합부위에 이온화가스가 반응하여 이중결합을 제거하거나 단일결합으로 만

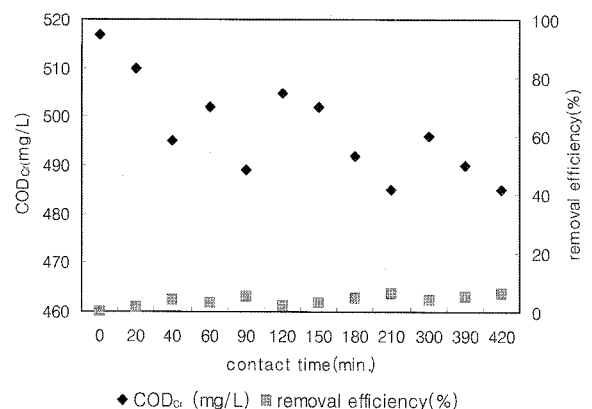


Fig. 2. COD_{Cr} variation of dyeing process wastewater in terms of contact time.

들어 탈색은 시키지만 염료분자내의 방향족 환을 개환시키지는 못하는 것으로 판단된다.

3.2.2. 농색 마무리 공정 시료

마무리 공정 시료 1500 mL를 이산화 가스 유량 10 L/min으로 하여 처리한 결과를 시간대별로 Fig. 3에 나타냈다.

염색 마무리 단계에서 섬유에 일종의 코팅을 하는 공정에서 발생하는 폐수인데 원단의 촉감을 부드럽게 하여 제품의 질을 높이기도 하고 다음에 이어지는 봉제공정의 작업효율을 높여주기 위해 제품 표면에 양이온 또는 비이온계 계면활성제가 사용되는 공정이다.

반응 60분 이내에 70% 이상의 처리효율을 보였다. 이산화 가스에 의해 유연제로 쓰인 계면활성제가 잘 분해되는 것으로 판단된다.

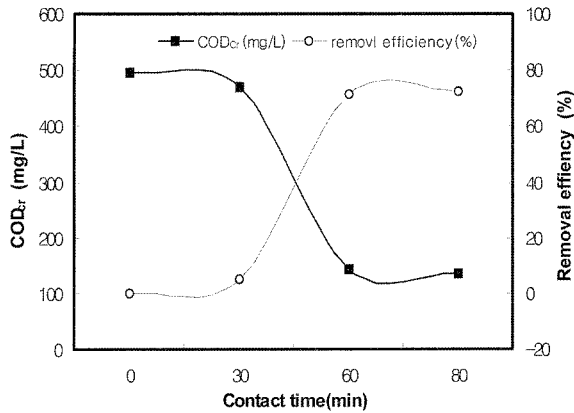


Fig. 3. COD_{Cr} variation of finishing process wastewater in terms of contact time.

3.2.3. 농색 표백 정련 공정 시료

표백 정련 공정 시료 1500 mL를 이산화 가스 유량 10 L/min으로 하여 처리한 결과를 시간대별로 Fig. 4에 나타냈다. 면섬유의 정련에는 무기 정련제로 수산화나트륨과 유기 정련제인 계면 활성제가 사용되고 표백을 위해서 섬유 무게의 5% 정도의 과산화수소가 사용된다(조 등, 2000). 시료에 함유된 과산화수소의 농도는 1400 mg/L였다. 시료에 포함된 과산화수소는 $Cr_2O_7^{2-} + 3H_2O_2 + 8H^+ \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O + 3O_2$ 반응에 의해 COD_{Cr}로 측정되고 Kang 등

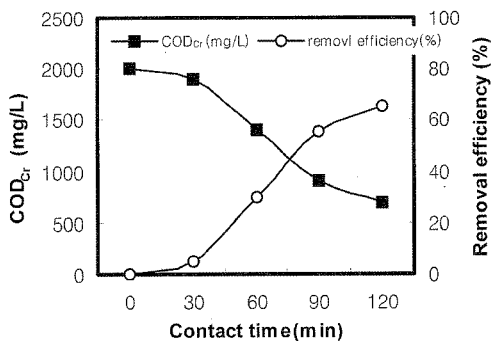


Fig. 4. COD_{Cr} variation of bleaching & scouring process wastewater in terms of contact time.

(1999)이 제안하는 보정치에 따르면 이 값은 COD_{Cr}값으로 299 mg/L에 해당하고 Talinli 등(1992)이 제안하는 보정치에 의하면 159 mg/L에 해당된다.

농색염색폐수를 이산화가스로 처리한 결과 120분 이내에서 65%의 제거효율을 보였다. 표백정련 공정폐수도 이산화 가스에 의해 분해 가능함을 확인할 수 있었다.

3.2.4. 농색 염색 종합폐수

농색 염색 종합폐수 1500 mL를 10 L/min으로 처리한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 반응 시작 후 60분까지는 COD_{Cr}이 27.4% 제거되지만 이후부터는 접촉시간이 길어져도 제거가 거의 이루어지지 않았다. 180분 동안 접촉했을 때 30.7%가 제거되는 정도로 제거속도가 줄어들었는데 이것은 반응초기에 표백정련공정폐수에 포함된 잔류 과산화수소가 제거되면서 COD_{Cr}이 감소하고 이 후부터는 이산화 가스의 활성종이 염료의 탈색에 우선적으로 반응하기 때문인 것으로 사료된다.

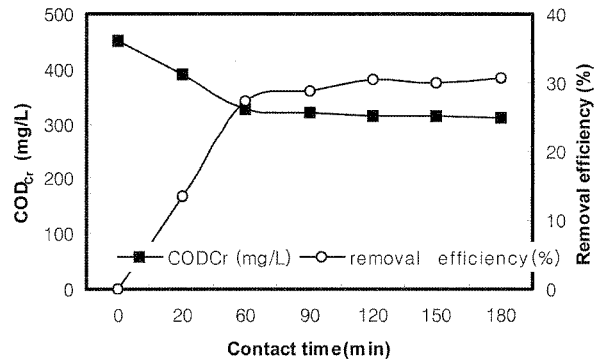


Fig. 5. COD_{Cr} variation of total dyeing process wastewater in terms of contact time.

3.3. 중색 염색 종합폐수의 이산화 가스에 의한 탈색

Fig. 6은 중색 염색 종합폐수 1500 mL를 이산화 가스 10 L/min으로 처리하였을 때 처리시간에 따른 탈색을 보여 준다. 반응시간 90분 이내에서 무색에 가깝게 탈색이 이루어졌다.

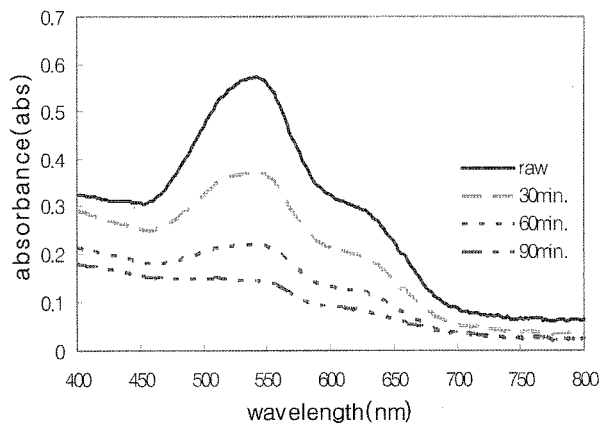
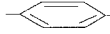
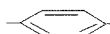


Fig. 6. Abs variation of total dyeing process wastewater in terms of contact time.

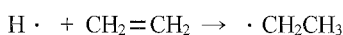
염색공정폐수와 표백정련공정, 마무리공정 폐수를 이온화 가스로 처리한 결과 분자구조에 다수의 방향족 고리를 갖고 있는 화합물인 염료를 포함하고 있는 염색공정폐수는 반응시간 420 min에서도 COD_{Cr} 제거율이 6% 이하였고 정련제로 쓰인 Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether(C₉H₁₉--O(C₂H₄O)₈H)와 유연제로 쓰인 Stearic acid (C₁₇H₃₅COOH)와 Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether(C₉H₁₉--O(C₂H₄O)₄₀H)을 함유하고 있는 표백정련폐수와 마무리공정폐수의 COD_{Cr} 제거율은 각각 120 min에서 65%, 60 min에서 72%로 나타나는 결과로 미루어 볼 때 분자구조가 대부분 방향족 고리로 구성된 염료는 이온화가스내의 활성종에 의해 개환되어 무기물까지 산화되지 않지만 정련제와 유연제로 쓰인 계면활성제의 경우는 분자구조가 하나의 방향족 고리에 지방족 사슬이 결합된 형태로 이루어졌는데 이온화 가스에 의해 COD_{Cr} 제거가 이루어지는 것으로 볼 때 이온화가스의 활성종이 분자 내의 지방족 사슬 성분을 분해시키는 것이 가능한 것으로 사료된다.

Hoigné 등(1985)이 제안한 메카니즘에 의하면 오존 분자는 수산화기(OH⁻)에 의해 분해가 시작되어 반응성이 더 큰 OH 라디칼을 생성한다. 모델용액에서 측정된 결과에 의하면 분해된 오존 3몰당 OH radical 2몰이 형성된다. 또한 과산화수소의 짝염기(conjugate base)인 HO₂⁻가 수산화이온(OH⁻)보다 훨씬 빠르게 오존을 분해시키는 initiator로 작용하여 OH radical을 생성시킬 수 있다는 연구 결과가 있다 (Fornl et al., 1982; Shested et al., 1982).

Stahelin 등(1982)에 의하면 오존과 과산화수소와의 반응에서 오존의 분해율은 오존에 대해 일차반응이고 HO₂⁻ 농도에 의존한다고 한다. 과산화수소에 의한 오존분해 반응 속도 상수는 2.8±1.0×10⁶ m⁻¹s⁻¹로서 OH에 의해 개시되는 오존분해반응 속도상수 70±20 m⁻¹s⁻¹보다 약 40,000배 빠르다. 과산화수소와 오존 반응의 net equation은 H₂O₂ + 2O₃ → 2OH· + 3O₂로 오존 1몰당 1몰의 OH radical이 생성된다.

염색폐수의 경우 염색 전처리로 섬유 표백을 위해서 사용된 과산화수소가 잔류하기 때문에 플라즈마 발생장치를 이용해서 염색폐수를 처리하는 데 긍정적인 역할을 할 것으로 기대된다.

이온화가스 발생장치에서 생성되는 활성종인 O·는 표준환원전위가 1.7 V인 강한 산화제로 유기화합물과의 반응에서 친핵성(nucleophile)으로 반응한다. 따라서 불포화 결합에 쉽게 붙지 못한다. 방향족 화합물과는 결사슬의 H를 떼어내고 그 자리에 붙는다. 또 다른 활성종인 H·는 표준환원전위가 -2.3 V인 강한 환원제로 불포화 유기화합물과의 반응에서 포화 분자들로부터 추출된 수소원자가 유기화합물과 반응하거나 불포화의 증상에 수소원자가 첨가됨으로서 유기물과 반응한다.



4. 결론

염색농도에 따라 농색, 중색, 담색의 3가지 색상으로 반응성염료를 사용하여 면섬유를 염색한 공장에서 발생한 염색폐수를 각 공정 별로 유기물을 중심으로 수질특성을 조사하고, 이온화가스로 처리 가능한 공정폐수를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 염색에서 발생하는 폐수 중 가장 높은 COD_{Cr} 부하를 나타내는 공정은 염색 전처리 공정인 표백정련 공정으로 나타났다.
- 2) SS값은 농색과 중색 염색폐수에서는 염색공정폐수에서 가장 높게 나타났고 담색염색폐수에서는 염색 후처리 공정인 마무리공정폐수에서 가장 높게 나타났다.
- 3) 이온화가스에 의해 마무리공정 폐수와 표백공정폐수는 COD_{Cr} 제거효율이 높았고 염색공정 폐수는 낮게 나타났는데 이것은 이온화가스가 지방족 성분의 산화는 가능하지만 방향족고리 성분의 무기화는 어려운 것을 보여주는 결과로 판단된다.
- 4) 10 L/min의 이온화가스로 1500 mL의 염색종합폐수를 처리한 결과 중색 종합폐수의 색도는 반응 90분 이내에 서 무색에 가깝게 탈색이 이루어졌지만 농색 염색종합폐수의 COD_{Cr}는 180분 반응에 30.7% 제거되는데 그쳤다. 이온화가스에 의한 염색폐수 처리는 다른 AOP공법과 마찬가지로 탈색에는 효과적이지만 유기물 제거를 위해서는 연계처리가 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 전북대학교 도시 및 환경연구소의 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다

참고문헌

권혁재, 배우근, 고평범, 오존산화를 이용한 염색폐수의 COD 및 색도제거, *한국물환경학회·대한상수도학회 공동 춘계 학술발표논문집*, pp. 306-309 (2005).

김영관, 오미영, 전기응집을 이용한 염색폐수의 처리, *대한 환경공학회지*, 22(8), pp. 1429-1436 (2000).

이승용, *염색 가공의 기초 지식*, 한국 염색 기술 연구소, 대구, p. 196 (2005a).

이은주, 이온화가스에 의한 축산폐수 중 난분해성 물질 분해특성, 전북대학교 대학원 환경공학과 박사학위 논문, pp. 181-187 (2005b).

조인술, 장두상, 서보영, 박상주, 조귀민, 심유봉, *실용 염색학*, 형설 출판사, 서울, p. 282 (2000).

조창우, 이온화가스와 펜톤산화를 연계한 염색폐수 처리, 전북대학교 대학원 환경공학과 석사학위 논문, pp. 48-56 (2002).

하동윤, 조순행, UV/H₂O₂와 TiO₂ 광촉매 산화에 의한 염색폐수의 처리효율 비교, *대한환경공학회지*, 25(9), pp. 1123-1131 (2003).

- 한국수자원공사, *이온화공기의 수처리 공정 적용 타당성 연구*, pp. 104-106 (2003).
- Forml, L., Bahnemann, D. and Haart, E. J., Mechanism of the hydroxyl ion initiated decomposition of ozone in aqueous solution, *J. Phys. Chem.*, **88**, pp. 255-259 (1982).
- Hoigné, J. and Barder, H., Rate constants of reductions of ozone with organic and inorganic compounds in water III (inorganic compound and radical), *Water Res.*, **19**(8), pp. 993-1004 (1985).
- Kang, Y. W., Cho, M. J. and Hwang, K. Y., Correction of hydrogen peroxide interference on standard COD test, *Water Research*, **33**(5), pp. 1247-1251 (1999).
- Kim, J. G., Song, B. J. and Rajkumar, D., Electrochemical degradation of Reactive Blue 19 in chloride medium for the treatment of textile dyeing wastewater with identification of intermediate compounds, *Dyes and Pigments*, **72**(1), pp. 1-7 (2005).
- Michael, A. Lieberman and Allan, J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*, John Wiley & Sons, New York (1994).
- Pagga, U. and Brown, D., The degradation of dyestuffs part II: behavior of dyestuffs in aerobic biodegradation tests, *Chemosphere*, **15**(4), pp. 479-491 (1986).
- Shaul, G. M., Holdsworth, T. J., Dempsey, C. R. and Dostal, K. A., Fate of water soluble azo dyes in the activated sludge process, *Chemosphere*, **22**, pp. 107-119 (1991).
- Shested, K. H. and Hart, E. J., Ultraviolet spectrum and decay of ozonide ion radical, O_3^- in strong alkaline solutions, *J. Phys. Chem.*, **86**, pp. 2066-2070 (1982).
- Stachelin, J. and Hoigné, J., Decomposition of ozone in water : rate of initiation by hydroxide ions and hydrogen peroxide, *Environ. Sci. Technol.*, **16**(10), pp. 676-681 (1982).
- Talinli, I. and Anderson, G. K., Interference of hydrogen peroxide on the standard COD test, *Water Research*, **26**(26), pp. 107-110 (1992).