J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 20, No. 1, February 2009, 34-39

응집조건이 염색폐수의 색도제거에 미치는 영향

홍영호

혜전대학 의료재료과
(2008년 8월 27일 접수, 2008년 11월 5일 채택)

Decolorization of Real Textile Wastewater by Coagulation Conditions

Young-Ho Hong

Department of Bio-Materials, Hyejeon College, Hongsung 350-702, Korea
(Received August 27, 2008; accepted November 5, 2008)

본 연구는 염색폐수 처리공정에서 발생하는 슬러지 및 색도제거에 관한 연구로 응집제가 색도제거에 미치는 영향에 대한 상관성을 규명하는데 목적이 있다. 이를 위해 실제공정에서 배출되는 염색폐수를 대상으로 응집조건에 따른 특성을 분석하였다. 응집제로 $FeCl_3$, $FeSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$를 사용하였으며, 실험에 사용된 염색폐수의 BOD, COD, pH, 그리고 색도의 평균값은 각각 800 mg/L, 600 mg/L, 9.7, 182 이었다. 실험결과에 의하면 응집제의 농도가 335～2000 mg/L 이고 NaOH의 농도가 500 mg/L인 조건에서 응집제로 $FeCl_3$를 사용하였을 때 색도제거효과가 가장 우수하였다. 색도제거효과는 폐수의 pH와 응집제의 농도에 따라 결정된다고 할 수 있다.

This study was carried out in order to investigate the decolorization and reduced sludge of real textile wastewater by coagulation process. The aim of the study was to verify the relation between decolorization and coagulants of real textile wastewater treatment processes. Coagulation processes were performed using $FeCl_3$, $FeSO_4$, and $Al_2(SO_4)_3$. Real textile wastewater has a mean concentration for BOD, COD, pH, color to be 800 mg/L, 600 mg/L, 9.7, and 102, respectively. From the experimental results, it was shown that the $FeCl_3$ exhibited higher decolorization at the operating conditions 335～2000 mg/L of coagulants and 500 mg/L NaOH dosage. The efficiency of color removal depended on the wastewater pH and concentration of coagulants.

***Keywords**: decolorization, textile wastewater, coagulation*

1. 서　　론

염색공업에서 배출되는 폐수에는 염료, 염료보조제, 계면활성제를 비롯한 여러 가지 형태의 난분해성물질이 함유되어 있어서 일반적인 형태의 폐수처리공정으로 처리하기에는 많은 문제점을 포함하고 있다. 현재 염색폐수처리에 사용되고 있는 처리기술은 난분해성물질의 제거효율이 미흡하고, 처리수의 수질이 불안정하여 배출기준을 초과하는 등 처리과정에서 여러 가지 어려움에 직면하고 있으며 유가자원의 미회수로 자원이 낭비되고 있어, 처리수질의 고도화 및 색도제거가 필요하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 염색폐수만의 특성을 고려한 새로운 공정들이 개발되어 처리효율이 우수하여 재이용이 가능하며, 운전관리가 용이하고, 경제적인 방법으로 처리하기 위한 새로운 폐수처리기술에 관한 연구개발이 계속되고 있다[1-6]. 염색폐수의 색도제거에 응용되는 기술로는 응집침전법, Fenton 산화법, 오존처리법, 전자빔에 의한 처리법, 활성탄 흡착법, 막분리법, 미생물처리법 등이 있으나 이들 처리공정으로 염색폐수에 함유되어 있는 여러 가지 오염물질들을 완벽하게 제거하는 것은 매우 어렵다고 할 수 있다. 최근에 진행된 염색폐수의 색도제거와 관련된 연구로는 H_2O_2/UV 광산화공정에서 색도제거[7]와 호기성과 혐기성 복합형태의 반응공정에서 가용성과 불용성염료가 함유된 염색폐수에서 유독성물질과 색도제거에 관한 연구가 진행되었으며[8], 산업폐수의 색도제거에 대한 simulation model에 관한 연구가 진행되기도 하였다[9]. 염색폐수의 색도제거에 대한 여러 가지 처리공정에 대한 비교를 통하여 membrane system을 이용한 처리공정에 대한 상대적인 처리효율의 향상성에 대한 연구결과가 보고 되었다[10]. 그러나 염색폐수 처리공정은 단일처리공정보다는 복합형태의 처리공정을 이용하여 처리하는 것이 경제적인 측면에서 많이 검토되고 있다[11,12]. 염색폐수 중의 색도를 알루미늄전극을 이용한 전기응집방법으로 처리하면 중성조건에서 처리하는 것이 경제적이라는 실험결과가 발표되었다[13]. 플라즈마 발생장치를 이용하여 면섬유를 반응성염료로 염색하는 공정에서 발생한 염색폐수의 색도를 제거한 결과 염기성조

저자 (e-mail: yhhong@hj.ac.kr)

Table 1. The Characteristics of Real Wastewater

pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	Color
7.3～9.7	820～870	570～630	97～105	175～187

건에서 우수하다는 결과가 발표되기도 하였다[14]. 최근에는 효소를 이용한 염색폐수 중의 색도제거에 관한 연구가 진행되기도 하였다[15]. 또한 TiO_2와 같은 무기계산화물을 이용하여 염색폐수 중의 색도제거를 위한 연구가 진행되기도 하였다[16].

이와 같이 염색폐수는 처리공정에 따라 최적처리조건이 변화하는 등 처리에 많은 어려움을 가지고 있다고 할 수 있다. 본 연구는 여러 가지 처리공정 중에서 가장 경제적으로 활용할 수 있는 응집공정을 이용하여 염색폐수 처리공정에서 발생되는 폐수를 처리할 때 부수적으로 발생되는 슬러지의 양을 감량하며, 응집제가 색도제거에 미치는 영향에 대한 상관성을 규명하는데 그 목적을 두었다. 슬러지의 양을 감소시키기 위해서는 염색폐수의 색도제거가 필수적인 사항이므로, 염색폐수의 색도제거 및 슬러지 감량화라는 2가지 목적에 부합 할 수 있는 처리조건의 선정이 가장 중요한 사항이라고 할 수 있다. 이를 고려하여 본 연구에서는 염색폐수의 처리공정에서 사용되는 응집제가 색도제거 및 슬러지 발생량에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다.

2. 실험 방법

폐수처리공정에서 발생되는 슬러지는 폐수성분 및 응집제종류 그리고 응집조건에 따라서 발생량이 변화하므로 현재 사용하고 있는 응집제 및 대체가능한 응집제에 대한 기초적인 응집특성에 관한 물성분석이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 현재 폐수처리에 사용되는 $FeCl_3$를 포함하여 다수의 물질에 대한 응집특성자료를 바탕으로 슬러지 발생량 및 색도제거에 적합한 응집제선택을 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다.

2.1. 실험에 사용된 폐수

염색공정에서 발생하는 폐수의 처리를 위하여 본 연구에서는 대전에 위치하고 있는 H 섬유의 처리공정에서 발생하는 폐수를 대상으로 실험을 실시하였다. H 섬유는 사염공법을 이용하여 염색을 하는 업체로 폐수의 기본적인 물성치는 Table 1과 같다.

2.2. 실험 조건

폐수처리에 사용하는 응집제종류 및 응집보조제로 사용되는 알칼리의 물성에 따른 응집특성 및 색도제거 특성분석을 위하여 응집제의 농도는 폐수의 양을 기준으로 하여 250～1250 mg/L로 조정하였으며 알칼리물질로 NaOH와 KOH를 300～500 mg/L 정도를 사용하여 색도제거 및 응집특성을 분석하였다. 이를 위해 응집제로 사용되고 있는 $FeCl_3$를 비롯한 $FeSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$ 등의 자체응집에 따른 침강성 물질 발생량에 대한 분석을 실시하였다. 또한 알칼리성물질 첨가량이 응집특성 및 색도제거에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하였다.

2.3. 색도 측정

색도는 UV/Vis (JASCO V-550)를 사용하여 파장 200 nm에서 900 nm까지 scanning 하여 흡광광도의 변화를 측정하였다.

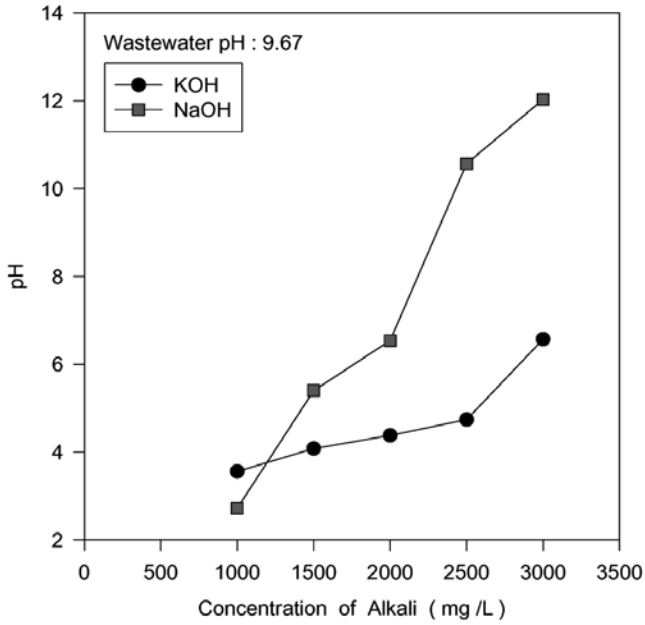

Figure 1. Effect of alkali concentration on wastewater pH.

3. 결과 및 고찰

응집현상은 폐수에 존재하는 침강성 물질을 거대화시켜 침강시키는 것으로 응집제와 폐수의 pH가 중요한 역할을 한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 응집특성에 대한 분석을 위하여 응집에 사용되는 알칼리성물질 농도변화가 응집에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하여 폐수의 알칼리도가 응집특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 더불어 응집제종류에 따른 응집특성을 분석하여 염색폐수처리에서 응집조건이 슬러지 발생 및 색도제거에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하였다.

3.1. 알칼리 농도가 응집특성에 미치는 영향

알칼리물질인 NaOH와 KOH가 응집특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 pH가 9.67인 폐수에 응집제로 pH가 3.84인 염화철 4375 mg/L와 알칼리로 NaOH와 KOH를 각각 1000 mg/L, 1500 mg/L, 2000 mg/L, 2500 mg/L, 3000 mg/L을 가한 후 사용된 알칼리의 특성에 따라 생성되는 침전물의 부피를 측정하여 응집특성을 분석하였다. Figure 1은 알칼리의 종류에 따른 폐수의 pH 변화를 나타낸 결과이다.

그림에서 살펴보면 초기 pH가 9.67인 염색폐수에 응집제로 염화철을 가하면 폐수의 pH가 강산성으로 급격히 변화한다. 여기에 알칼리로 KOH와 NaOH를 첨가하면 동일한 알칼리 첨가량을 기준으로 NaOH의 경우에는 강알칼리성인 pH 10.6을 나타내는 조건에서 KOH의 경우에는 pH가 4.7로 산성영역의 특성을 보이고 있다. 알칼리의 첨가량이 더욱 증가하여 NaOH의 경우에는 12 정도의 값을 나타내는 영역에서도 KOH의 경우에는 6.6 정도로 약산성특성을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 염색폐수처리를 위한 응집제로 $FeCl_3$를 사용하는 경우 알칼리로 NaOH를 사용하면 폐수의 pH가 알칼리성영역에 쉽게 도달한다고 할 수 있다. 이론적으로 동일한 양의 $FeCl_3$와 반응하는데 필요한 KOH가 NaOH에 비하여 질량비로 1.4배 정도 더 요구된다. 따라서 KOH와 같은 양의 NaOH를 사용하

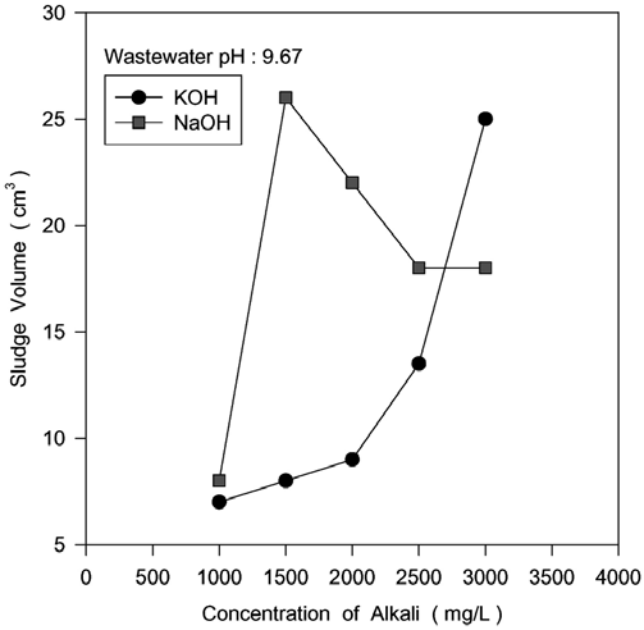

Figure 2. Effect of alkali concentration on sludge volume.

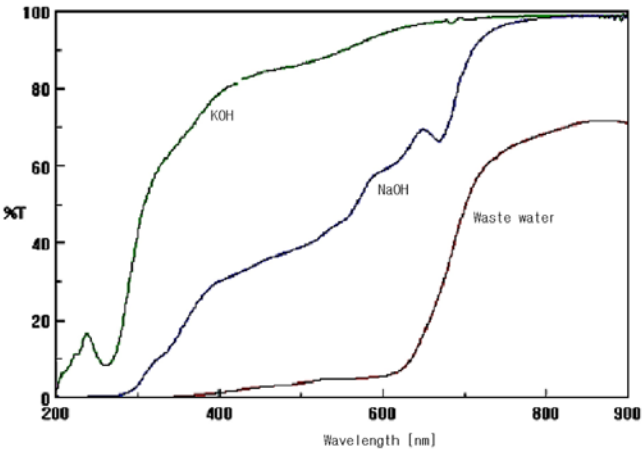

Figure 3. Effect on alkali materials on removal color.

면 $FeCl_3$와 반응하지 않고 존재하는 양이 증가하기 때문에 pH가 증가하는 경향을 보인다고 할 수 있다.

Figure 2는 염색폐수처리공정에서 응집제로 $FeCl_3$를 사용하는 경우 알칼리의 특성변화에 따른 슬러지 발생량 변화를 나타낸 결과이다.

그림에서 나타난 결과에 의하면 알칼리로 KOH를 사용한 경우 사용한 알칼리의 양이 증가할수록 슬러지 발생량이 증가하는 경향을 보이고 있으나, NaOH의 경우에는 폐수에 대한 알칼리 사용량이 1500 mg/L인 경우 슬러지 발생량이 가장 큰 값을 보이나 그 이후부터는 서서히 감소하는 결과를 보이고 있음을 확인 하였다. 폐수의 슬러지 발생량은 본 연구의 실험조건에서는 NaOH를 1000 mg/L 첨가하였을 때 가장 낮게 나타나고 있다. 이때 pH는 약 5.6 정도로 폐수와 NaOH의 알칼리도에 비하여 약산성을 나타내는 것은 응집제인 $FeCl_3$가 비교적 강산성을 나타내기 때문에 이러한 결과를 보이는 것으로 판단된다.

Table 2. Sludge Amount with Coagulants

Coagulants	$Al_2(SO_4)_3$	$FeCl_3$	$FeSO_4$
Sludge Amount (g/L)	1.11	1.315	1.12

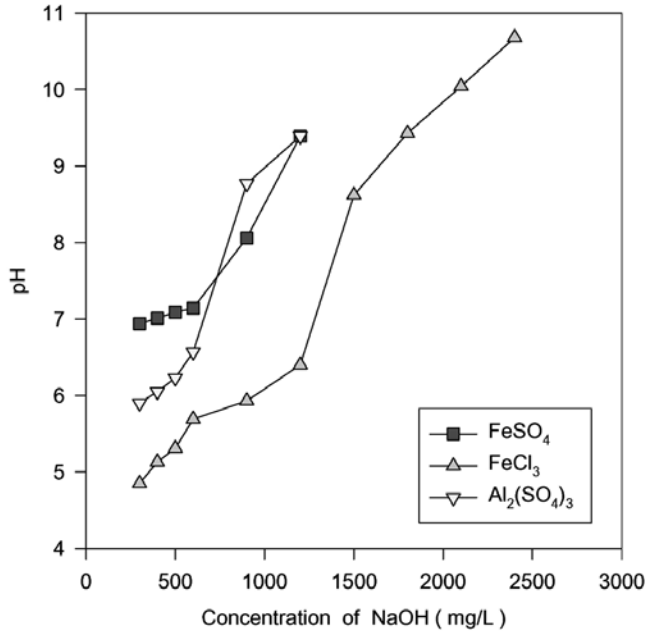

Figure 4. Effect of coagulants on wastewater pH.

Figure 1과 Figure 2의 결과로부터 응집제로 염화철을 사용하고, 알칼리로 NaOH를 사용하면 알칼리도가 증가함에 따라 응집되는 침강성물질의 양이 서서히 증가하다가 어느 임계점에 도달한 이후부터 슬러지 발생량이 다시 감소하는 특성을 보이고 있다. 반대로 KOH의 경우에는 알칼리도에 반비례하여 침강성물질의 양이 감소하는 특성을 보이고 있다. 이러한 특성을 pH값과 비교한 결과 특정 pH 범위에서 알칼리성 물질의 종류에 관계없이 균일한 경향을 보이고 있다. 따라서 알칼리를 이용한 응집에서 발생하는 슬러지 양은 알칼리성물질에 대한 영향 보다는 폐수의 자체 pH에 대한 영향으로 간주될 수 있다.

응집공정에서 알칼리도변화가 색도제거에 미치는 영향에 대하여 분석한 결과에 의하면 첨가된 알칼리성물질의 농도가 증가할수록 색도제거효과가 우수한 결과를 보이고 있다. 이는 UV-Vis에 의한 결과뿐만 아니라 육안으로 관찰한 결과에서도 확인 할 수 있었다.

알칼리성물질의 변화가 색도제거에 미치는 영향을 분석한 Figure 3에 의하면 동일한 조건에서 응집제로 염화철을 사용하였을 경우 NaOH에 비하여 KOH의 경우가 모든 파장영역에서 색도제거효과가 아주 우수하다고 할 수 있다. 특히 300 nm에서 400 nm 범위에서 존재하는 색도제거효과는 상대적으로 매우 우수하다고 할 수 있다. 350 nm 파장에서는 NaOH의 경우 투과도가 약 15%인데 비하여 KOH를 사용한 경우에는 투과도가 70% 정도의 값을 보여 이 파장영역에서 우수한 색도제거특성을 나타낸다고 할 수 있다.

3.2. 응집제별 응집 특성

염색폐수처리를 위해서 사용하는 무기응집제로는 염화철, 황산

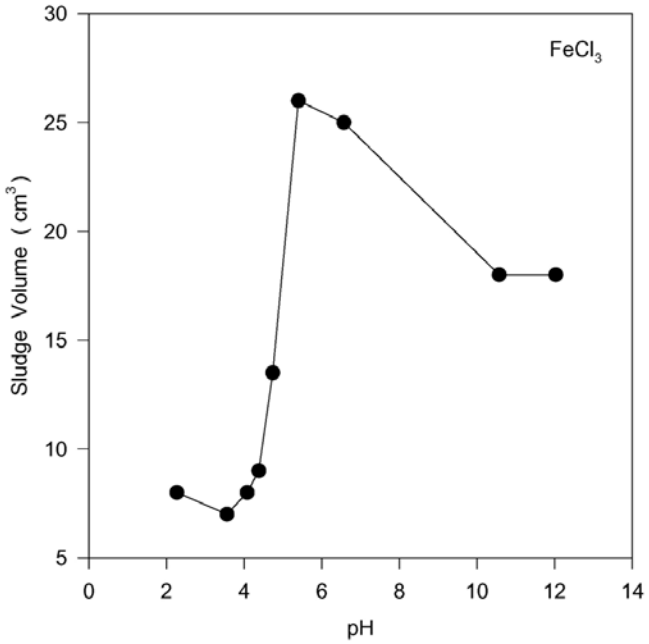

Figure 5. Effect of pH change on sludge volume.

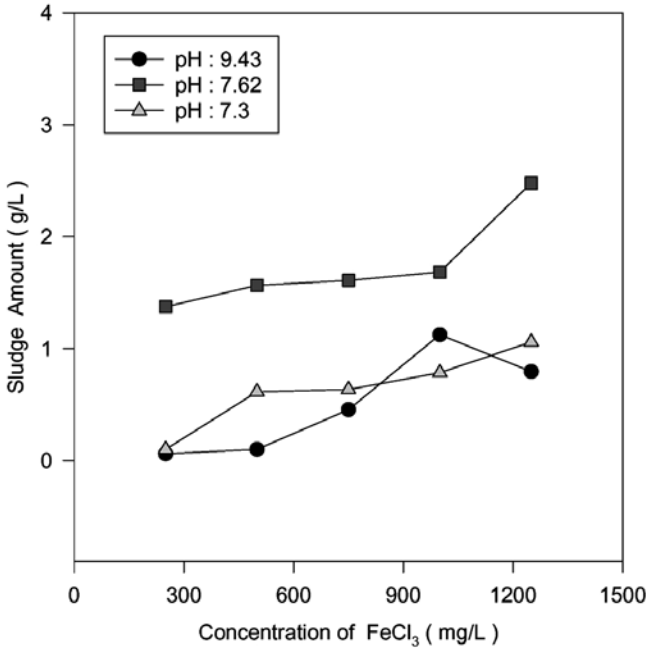

Figure 6. Effect of $FeCl_3$ concentration on sludge amount.

철과 같은 철 화합물 그리고 황산알루미늄과 같은 알루미늄화합물이 사용되고 있다. 응집특성분석을 위하여 응집제를 폐수 기준으로 7000 mg/L를 가하고 여기에 알칼리로 NaOH를 500 mg/L를 가하여 발생되는 슬러지량을 비교하여 응집제종류에 따른 슬러지 발생량을 측정하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

그 결과에 의하면 $FeCl_3$이 다른 응집제와 비교하여 약 17.4%에서 18.5% 정도 슬러지 발생량이 증가하는 결과를 보여주고 있다.

응집제종류별 알칼리사용량 변화에 따른 상등액의 pH 변화 및

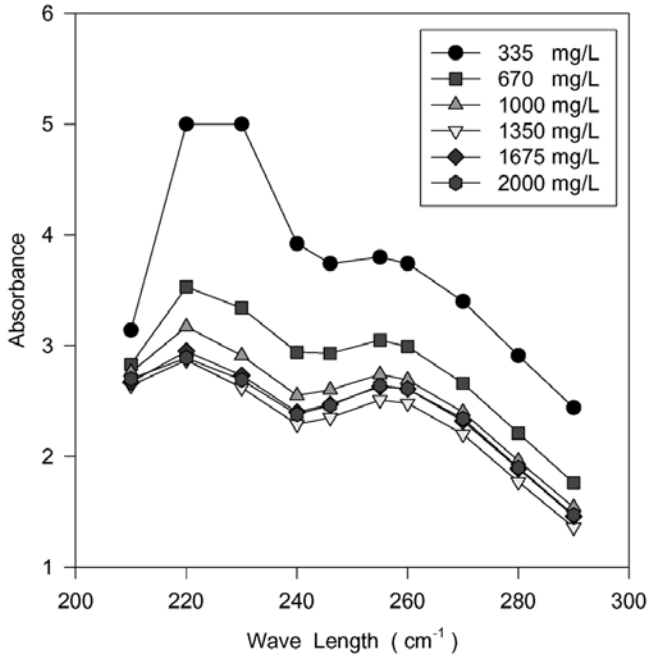

Figure 7. Effect of coagulants concentration on removal color.

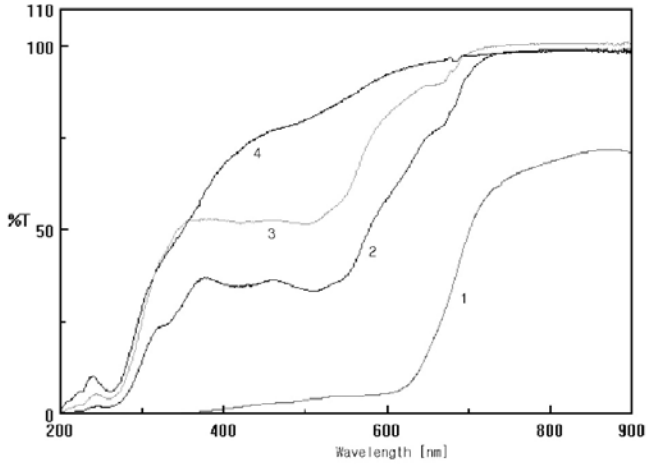

Figure 8. Effect of coagulants on real wastewater transmittance (1 : Real wastewater, 2 : $Al_2(SO_4)_3$, 3 : 1+1 blending, 4 : $FeCl_3$).

슬러지 발생량 변화를 살펴보기 위하여 응집제를 2000 mg/L를 가하고 여기에 알칼리로 NaOH를 500～2500 mg/L를 가하여 알칼리 사용량에 따른 pH 변화를 Figure 4에 나타내었다.

그림에서 살펴본 바에 의하면 $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$의 경우에는 응집제종류별 알칼리사용량에 따른 응집생성물의 생성량변화의 경우 $FeCl_3$를 제외하고는 알칼리도가 증가할수록 응집생성물의 양이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 동일한 농도에서 자체 pH가 3과 3.32로 비슷한 $Al_2(SO_4)_3$와 $FeSO_4$ 경우에는 알칼리첨가량에 따른 pH 변화 및 슬러지 생성비율도 거의 유사하게 나타난다. 염색폐수처리에 사용되는 알칼리성물질인 NaOH 농도가 700 mg/L 이상이 되어야 pH가 중성에 접근하며 특히 $FeCl_3$의 경우에는 NaOH 사용량이 1300 mg/L 정도 되어야 중성에 접근하는 값을 나타내고

있다. 이러한 특성은 응집제 자체 pH 값과도 밀접한 영향을 가진다고 할 수 있다.

Figure 5는 Figure 1과 Figure 2의 실험조건과 동일한 조건에서 염색폐수처리공정에서 응집제로 $FeCl_3$를 사용하는 경우 알칼리사용량 변화에 따른 pH 변화가 슬러지 발생량에 미치는 영향을 나타낸 결과이다.

그림에서 보는바와 같이 염색폐수처리공정에 $FeCl_3$를 응집제로 사용하는 경우 pH가 5.5～6.5 부근에서 슬러지 발생량이 가장 많다는 것을 확인할 수 있었다. pH 변화에 따른 슬러지 발생량은 pH가 산성부근에서 중성으로 변화할수록 발생량이 증가하는 결과를 보이고 있다.

응집제의 농도에 따른 슬러지 발생량을 측정한 결과에 의하면 응집제인 $FeCl_3$를 폐수를 기준으로 250 mg/L부터 1250 mg/L까지 투여하고 알칼리로 NaOH를 300 mg/L를 투여하여 4시간 후 슬러지 발생량을 측정하여 그 결과를 Figure 6에 나타내었다. 결과에 의하면 슬러지 발생량은 처리에 사용된 응집제농도에 비례하여 약간씩 증가하는 결과를 보이고 있으나 그 편차는 그리 크지 않다고 할 수 있다. 즉, 응집제투여농도에 따라 최소 11.5%에서 최대 13.5%의 슬러지 발생량 변화를 보이고 있으나 그 차이가 꼭 응집제농도가 증가한다고 하여 슬러지 발생량이 증가하는 것은 아니라고 할 수 있다. 본 연구 실험조건에서는 염색폐수 자체 pH값에 따라 슬러지 발생량에 차이를 보여, 염색폐수의 pH가 9.43으로 알칼리성을 나타낼 때 상대적으로 슬러지 발생량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 응집에 사용되는 알칼리성물질의 첨가량을 감소시켜 응집제와의 반응에 의한 침전성물질의 양을 감소시키기 때문에 나타나는 현상이라고 할 수 있다.

염색폐수처리공정에서 응집제를 사용하는 주된 목적이 색도제거에 있다고 할 수 있다. 효율적인 색도제거만 이루어진다면 응집제의 투입량을 최소화하여 발생되는 슬러지의 양을 감소시킬 수 있게 되므로 슬러지의 감소를 위해서는 색도제거특성에 대한 분석이 가장 중요한 문제라고 할 수 있다.

응집제사용량이 폐수의 색도제거에 미치는 영향을 분석하기 위하여 $FeCl_3$를 각각 335 mg/L에서 2000 mg/L 까지 주입하고 NaOH를 500 mg/L 가한 다음에 일정시간 경과 후 상등액의 색도변화를 UV를 이용하여 분석하여 그 결과를 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 살펴보면 응집제의 농도에 따라 발생된 처리액의 색도변화는 200 nm에서 900 nm 까지의 파장범위에서 335 mg/L로 처리한 경우를 제외하고는 다른 농도범위에서는 색도분포가 큰 차이를 보이지 않는다는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 폐수와 비교한 결과에 의하면 220 nm에서 240 nm 부근의 파장에서는 응집으로 처리된 후 폐수중의 색도가 급격히 감소하는 결과를 보여주고 있다. 이러한 사실은 응집제의 농도가 2000 mg/L보다 낮은 농도범위에서도 유사한 처리효율을 나타내므로 응집제의 양을 1/3 정도로 줄여서 사용하면, 발생되는 슬러지를 감소시키고 처리에 사용되는 응집제의 비용절감에 따른 경제적인 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

$FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$ 그리고 $FeCl_3$과 $Al_2(SO_4)_3$의 1:1 혼합 응집제를 각각 250 mg/L에서 1250 mg/L까지 주입하고 여기에 알칼리로 NaOH를 300 mg/L를 가한 조건에서 응집제종류에 따른 발생폐수의 투과성을 비교한 결과를 Figure 8에 나타내었다. 응집제별 색도제거특성은 염화철이 가장 우수하였으며, 염화철과 황산알루미늄을 1 : 1로 혼합한 경우가 황산알루미늄보다 우수한 결과를 보이고 있다. 응집제로 황산알루미늄을 사용한 경우에는 700 nm에서 900 nm사이에서는 가장 우수한 투과성을 나타내어 이 파장범위에 존재하는 색도제거에 가장 우수한 효과를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 이 파장보다 낮은 파장범위에서는 상대적으로 투과성이 저하되는 결과를 보여주고 있다. 특히 염화철을 사용하였을 때 700 nm에서 350 nm사이에서 투과성은 상대적으로 높은 값을 보여 이 파장범위에 존재하는 색도유발물질의 제거에 효과가 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

염색폐수처리공정에서 사용되는 응집제의 자체응집특성에 대한 분석을 통하여 응집 및 슬러지 발생량간의 상관성에 대한 연구를 위하여 응집제종류 및 응집보조제로 사용되는 알칼리 물성에 따른 응집특성 및 색도제거특성을 분석하였다. 본 연구에서는 응집제의 농도는 폐수의 양을 기준으로 하여 250～1250 mg/L로 조정하였으며, 알칼리물질로 NaOH와 KOH의 농도가 300～500 mg/L인 실험조건에서 색도제거 및 응집특성을 분석하여 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

1) 응집제로 염화철을 이용하였을 경우 알칼리로 KOH를 사용한 경우가 모든 파장영역에서 색도제거효과가 아주 우수하다고 할 수 있다. 특히 300 nm에서 400 nm 범위에서 존재하는 색도제거효과는 상대적으로 매우 우수하다고 할 수 있다. 염화철을 사용하였을 때 700 nm에서 350 nm사이에서 투과성은 상대적으로 높은 값을 보여 이 파장범위에 존재하는 색도유발물질의 제거에 효과가 있다고 할 수 있다.

2) 응집제종류에 따른 발생폐수의 투과성을 비교한 결과 응집제별 색도제거특성은 염화철이 가장 우수하였으며, 그 다음으로 염화철과 황산알루미늄을 1 : 1로 혼합한 경우가 황산알루미늄보다 우수한 결과를 보이고 있다.

3) 염색폐수처리공정에 $FeCl_3$를 응집제로 사용하는 경우 pH가 5.5～6.5 부근에서 슬러지 발생량이 가장 많다는 것을 확인할 수 있었다. pH의 변화에 따른 슬러지 발생량은 pH가 산성부근에서 중성으로 변화할수록 발생량이 증가하는 결과를 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. P. N. Cheremisinoff, Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology, 74, Marcel Dekker, NewYork (1995).
2. I. A. Oke, C. A. Okuofu, and J. A. Otun, *J. Apple. Sci. Res.*, **2**, 209 (2006).
3. L. Kos and J. Perkowski, *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, **11**, 3 (2003).
4. B. R. Babu, A. K. Parande, S. Raghu, and T. P. Kumar, *The Journal of Cotton Science*, **11**, 141 (2007).
5. J. B. Parsa and M. Abbasi, *Acta Chim. Slov.*, **54**, 792 (2007).
6. H. J. Jo, S. M. Lee, H. J. Kim, E. J. Park, J. G. Kim, H. H. Chung, and J. H. Jung, *J. Ind. Eng. Chem.*, **12**, 615 (2006).
7. A. S. Mahmoud, M. S. Brooks, and A. E. Ghaly, *American Journal of Applied Sciences*, **4**, 1054 (2007).
8. C. T. M. J. Frijters, R. H. Vos, G. Scheffer, and R. Mulder, *Water Research*, **40**, 1249 (2006).
9. M. A. Abdou, A. H. Konsowa, and M. E. Ossman, *J. Apple. Sci. Res.*, **4**, 178 (2008).
10. M. Marcucci, G. Nosenzo, G. Garannelli, I. Ciabatti, D. Corrieri,

and G. Ciardelli, *Desalination*, **138**, 75 (2001).
11. S. Kim, S. H. Kong, H. J. Shim, and B. H. Hwang, *J. Korea Ind. Eng. Chem.*, **14**, 733 (2003).
12. S. I. Kim, S. H. Roh, J. W. Nah, S. D. Cho, and J. H. Kim, *J. Korea Ind. Eng. Chem.*, **12**, 688 (2001).
13. Y. K. Kim and M. Y. Oh, *Journal of Korea Society of Environmental Engineers*, **22**, 1429 (2000).
14. G. E. Lim and P. G. Chung, *Journal of Korea Society of Environmental Engineers*, **22**, 1389 (2000).
15. G. M. B. Soares, M. T. P. Amorim, M. Lageiro, and M. C. Ferreira, *Textile Research Journal*, **76**, 4 (2008).
16. S. S. Reddy and B. Kotaiah, *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, **2**, 245 (2005).