

Shadow Mask GRS 공정에서의 반응수율 향상을 위한 기술개발

윤문규, 구기갑[†], 이문용*

영남대학교 공과대학 디스플레이화학공학부
712-749 경북 경산시 대동 214-1

[†]서강대학교 화공생명공학과 및 바이오융합 협동과정
121-742 서울특별시 마포구 신수동 1

(2007년 8월 31일 접수; 2007년 9월 10일 채택)

Improvement of Reaction Yield in the Shadow Mask Green Recycling Process

Munhyu Yoon, Kee-Kahb Koo[†], Moonyong Lee*

School of Display and Chemical Engineering, Yeungnam University
214-1 Dae-dong, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do 712-749, Korea

[†]Department of Chemical and Biomolecular Engineering and Interdisciplinary Program of Integrated
Biotechnology, Sogang University,
1 Shinsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-742, Korea

(Received for review August 31, 2007; Revision accepted September 10, 2007)

요 약

급속한 성장에 따른 디스플레이 산업에서의 생산량 증가는 원료 사용의 증가와 배출액의 증가를 야기하고 있으며 이에 따른 폐액 처리량이 증가되어 환경적, 경제적 문제점을 안고 있다. 본 연구에서는 브라운관 소재인 shadow mask의 식각공정 시 사용한 식각용액의 피로도를 감소시키기 위하여 산화반응을 이용하여 신액 사용량과 구액 배출량을 최소화해주는 GRS(Green Recycling System)공정의 수율을 향상시키기 위해 실험실 및 현장적용 실험을 통하여 공정의 최적화를 하기위한 방법을 연구하였다. 공정변수들과 GRS 공정의 수율과의 관계를 규명하였으며 GRS 반응기의 내부구조 개선으로 인해 약 10%의 수율증가를 확인하였으며 공정의 수율 향상과 최적화에 큰 도움이 되었다.

주제어 : 청정기술, 재순환공정, 식각공정, 새도우마스크, 피로도

Abstract – In the present study, we developed a methodology to minimize a waste solution produced in the etching process. The condition for the optimization of the GRS process was studied on the basis of laboratory experiment and field test as well as pilot test. Through the study, we analyse the relation of the main process variables and the yield of the GRS process. The application of the new operation condition and the reactor internal modification results in 10% yield improvement in the GRS process and accordingly decreases a wasted solution.

Key words : Clean technology, GRS, Etching process, Shadow mask, Fatigue ratio

1. 서 론

디스플레이 산업은 다양한 정보를 인간이 볼 수 있도록 화

면으로 구현해 주는 영상표시 장치로 정보통신시대의 핵심 산업이며 우리나라의 차세대 성장동력산업 중의 하나인 중요한 산업이다. 이 디스플레이의 종류에는 전자총을 사용하는 저가

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mynlee@yu.ac.kr

격의 브라운관(CRT)방식과 경박, 고화질의 평판디스플레이(FPD)로 구분된다. 우리나라의 디스플레이 산업은 정부의 전략적 산업으로써 많은 지원과 기술개발에 의해서 지금은 세계 시장 점유율이 정상에 도달하였다. 그리고 디지털 기술의 발전과 함께 디지털콘텐츠산업에서의 소비가 증가되면서 디스플레이의 소비 또한 증가되었다. 디스플레이 산업에서의 이런 급진적인 성장으로 인해 생산량이 증가하면서 공급물의 높은 사용량과 공정 후 폐기물에 대한 처리등과 같은 여러 가지 기술적, 경제적, 환경적인 문제가 발생하게 되었다. 따라서 기업들은 미래의 경쟁력을 확보하기 위해서는 새로운 방법을 모색하는 것이 절실한 상황이다.

그 중 CRT 디스플레이의 shadow mask 제조공정은 철판 표면을 탈지 세정하고 photoresist를 코팅한 후 건조하는 전처리공정과 자외선을 조사하여 감광막에 형상을 인쇄하는 노광 공정, 미 노광된 부분의 감광막을 제거하는 현상공정, 현상된 AK철 또는 Invar 합금 표면을 부식시켜 공정을 형성하는 식각공정으로 구성되며 이 중에서 핵심공정인 식각공정에서는 강한 산화력을 가지고 다양한 금속 및 합금의 식각에 사용되는 FeCl₃용액을 사용하여 균일한 분사로 부식시켜 공정을 형성하는데 이때 반응을 거친 FeCl₂용액은 폐액 처리되고 식각용액인 FeCl₃ 용액을 계속적으로 보충해주고 있다[1-2]. 하지만 디스플레이 소비의 증가로 인해 shadow mask의 생산량이 증대되었고 이에 따라서 보다 많은 식각용액의 사용과 신액 소요량의 증가에 따른 비용요소 상승과 배출액의 증가에 따른 폐액 처리량의 증가라는 환경적, 비유적 문제를 발생시키고 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 국내의 L사에서는 산화반응을 이용하여 신액 사용량과 구액 배출량을 최소화해주는 GRS(Green Recycling System)공정을 개발하게 되었다. Figure 1에 GRS 공정의 전체 개략도를 나타내었다.

GRS 공정은 반응을 거친 FeCl₂ 용액을 산화반응을 거쳐 다시 FeCl₃ 용액으로 환원시키는 공정이다. 이 GRS 공정을 보면 식각조(Etching Chamber)에서 반응 후의 용액인 FeCl₂, 새로이 투입되는 신액, 그리고 식각용액 내의 슬러지 형성방지

를 위해 투입되는 HCl, 제품의 품질에 영향을 주는 지표인 baume 지수의 관리를 위해 투입되는 비중수, GRS 반응을 거친 FeCl₂ 용액이 PIT조에 모인다[3]. 그리고 계속적으로 PIT조의 수위를 맞추기 위해서 구액을 배출하게 되어있다.

GRS 공정은 설계 당시 여러 제약조건으로 인하여 최적 상용설계를 위한 충분한 실험 및 검증단계가 반영되지 못하였고 당시 약 40% 정도를 보이고 있는 GRS 공정의 운전수율을 보여주고 있었다. 이러한 낮은 수율을 GRS 설계 및 운전조건 개선의 통화를 통하여 65% 수준까지 향상시킬 수 있다면 이로 인하여 얻을 수 있는 경제적, 환경적 효과는 매우 큰 것으로 분석된 바 있다.

본 논문에서는 공정의 기초분석과 실험실 실험, 현장 및 파일럿 실험을 수행하여 GRS 공정의 주요 운전변수 및 설계변수들과 GRS 수율 간의 관계를 규명하고 이를 기반으로 GRS 공정의 수율 향상 타당성을 확인하며 실제공정의 개선 및 현장 적용을 통하여 수율 극대화를 이루어 수율을 65% 수준까지 향상시킬 수 있는 최적의 공정조건과 운전조건을 제시하고 적용하는 것을 목적으로 연구하였다.

2. Shadow Mask GRS 공정에서의 반응 메커니즘

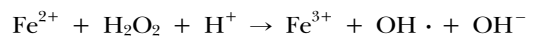
Shadow Mask의 품질을 좌우하는 식각공정의 GRS 반응은 산화제인 H₂O₂와 FeCl₂의 반응에 의한 FeCl₃의 생성반응, 식각용액 내의 수분 감소에 의한 FeCl₃ 생성반응의 촉진, 식각액 내의 슬러지 형성 방지를 위해 투입되는 HCl 에 의한 피로도 강화효과 등으로 해석될 수 있다. GRS 공정에서의 운전조건들은 식각온도, 피로도, baume 지수, 유리산도 등이 있으나 제품의 품질에 민감한 영향을 미치는 운전 조건들은 점도와 관련이 있는 baume 지수와 FeCl₃의 양을 알 수 있는 피로도의 유지이다[3-6].

이 중에서 특히 일정 피로도의 유지는 매우 중요한 공정조건 중의 하나이다. 이 피로도는 FeCl₃ 용액 내의 FeCl₂ 농도의 관리와 취급이 용이하도록 FeCl₂와 FeCl₃의 질량비를 환산한 값으로 나타낸다[7].

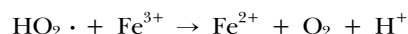
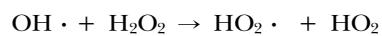
$$\text{Fatigue ratio}(F) = \frac{\text{FeCl}_2}{\text{FeCl}_2 + \text{FeCl}_3} \times 100\%$$

GRS 반응조에서 일어나는 염화철 산화반응은 다음과 같은 Fenton 산화반응 메커니즘을 따르는 것으로 알려져 있다.

1) Initiation Step



2) Propagation Step



3) Termination Step

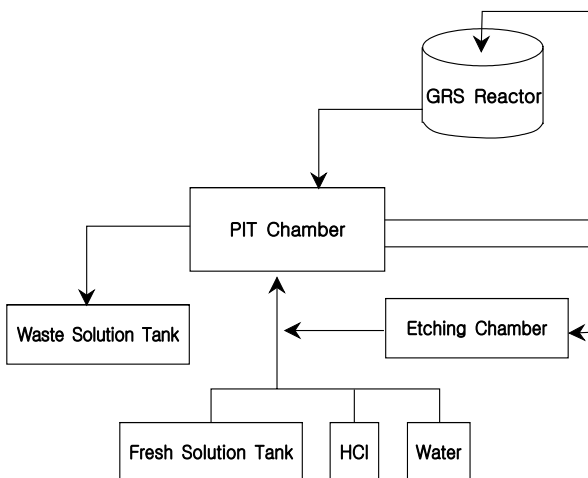
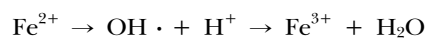


Figure 1. Outlines of GRS process.

개시단계에서 과산화수소는 Fe^{2+} 와 산화반응하여 OH 라디칼을 생성한다. 생성된 OH 라디칼이 다른 Fe^{2+} 와 산화반응하게 되면 물을 생성하게 되면서 반응이 종료된다. 그러나 생성된 OH 라디칼이 과산화수소와 반응하게 되면 HO_2 라디칼을 생성하게 되고 이 HO_2 라디칼은 Fe^{3+} 와 환원반응을 일으키면서 산소를 발생하게 된다. 따라서 전이단계와 종료단계는 경쟁적으로 일어나게 되며 전이단계가 우세할수록 GRS 반응의 산화효율은 향상된다. 이 때 이 두 단계의 우세강도는 각 단계에서의 경쟁적 반응속도에 의존하게 되며 이것은 어느 시점에서의 각 반응물의 상대적 농도의 복잡한 함수가 된다.

주어진 조건에서의 과산화수소의 산화반응을 최대화 하는 것은 아래의 정의된 선택적 전환율 X를 최대화 한다는 것을 의미한다. 한편 GRS 공정의 수율 Y는 다음과 같이 정의된다.

$$X = \frac{\text{산화반응에 사용된 과산화수소의 양}}{\text{투입된 과산화수소의 총량}} \times 100$$

$$X = \frac{\text{GRS 가동 전의 신액 평균 투입량} - \text{GRS 가동 후의 신액 평균 투입량}}{\text{GRS 가동 전의 신액 평균 투입량}} \times 100$$

본 연구의 목적은 GRS 공정의 전체 수율을 향상시키고자 하는 것이다. 이를 위한 방안 중의 하나는 주어진 양의 과산화수소에 대하여 주반응인 산화반응의 양을 최대화하고 부반응인 과산화수소 분해반응의 발생을 최소화 하는 즉, 과산화수소의 선택적 전환율을 최대화 하는 것이다. GRS 공정의 수율에 영향을 미치는 것은 선택적 전환율 뿐만 아니라 소요 반응물의 총량이나 판 모델등 기타 다른 공정변수들도 영향을 주기 때문에 공정변수의 변화에 따른 산화반응 자체의 영향을 살펴 보기 위해서는 수율 기준만으로 살펴보는 것은 안 되며 앞서 정의한 선택적 전환율을 기준으로 분석되어야 한다. GRS 공정의 반응효율과 운전변수 간의 정성적 관계는 위의 산화반응 메커니즘을 활용하여 분석할 수 있다.

이 산화반응의 메커니즘을 분석하면, Fe^{2+} 의 농도가 클수록 즉, GRS 반응기로 투입되는 초기 피로도의 값이 클수록 종료 단계가 우세해 지는 것을 알 수 있다. 이것은 GRS 전환율의 증가를 의미하는 것이고 혼합정도가 증가할수록 과산화수소와

OH 라디칼이 Fe^{2+} 와 많이 접촉할 수 있게 되어 선택적 전환율이 증가하게 된다. 그리고 H_2O_2 의 양이나 농도가 증가하면 개시단계와 전이단계가 동시에 상호 경쟁적으로 증가하기 때문에 최적점이 존재할 수 있다는 것을 예상할 수 있다. 또한 개시단계에서의 H^+ 의 역할은 pH가 낮은 산성을 만들면서 개시단계를 촉진시킴을 알 수 있다.

3. Shadow Mask GRS 공정 실험

본 연구는 반응식에서의 과산화수소의 농도와 양에 대한 최적점의 존재 유무를 확인하기 위한 실험, 초기 피로도 영향에 대한 실험, 라디칼반응으로써 순간반응인 Fenton 산화반응에 대해 과산화수소와 염화 제2철과의 반응에서 과산화수소의 분사패턴에 따른 영향을 보기 위한 실험, 그리고 혼합효과를 알아보기 위한 혼합기 RPM 변화 실험, pH가 낮은 산성에서의 반응특성을 분석하기 위한 HCl의 양과 농도 변화 실험을 포함한다. 실험실 규모 실험에서는 현장에서 적용중인 반응기의 200:1의 크기로 축소된 회분식 공정으로 운영되는 반응기를 Figure 2와 같이 제작하여 사용하였다.

이 실험에서 피로도 측정을 위한 과산화수소의 투입은 5 ml의 피펫으로 하였으며 적정은 25 ml 자동 뷰렛을 사용하였다. 시료 샘플링은 반응기의 스트링을 멈춘 상태에서 8-10군데를 조금씩 담아 양을 맞추었다. 그리고 항온조는 항상 55℃를 유지한 상태에서 실험을 진행하였다. 염화철 용액의 피로도를 측정하기 위하여 식각액의 $FeCl_3$ 의 양을 얻어 이를 A라고 하고 과량 투입하여 잔존하는 모든 $FeCl_2$ 를 $FeCl_3$ 로 변환 시킨 후 총 $FeCl_3$ 의 양을 B라고 하면 이때 피로도는 EDTA Factor를 고려하여 다음과 같다[8].

$$\text{Fatigue ratio}(F) = \frac{(B-A)}{1.25A + (B-A)} \times 100\%$$

적정값에 대한 전환율과 수율의 정확한 계산을 위해 MATLAB Program을 이용하여 계산을 수행하였다.

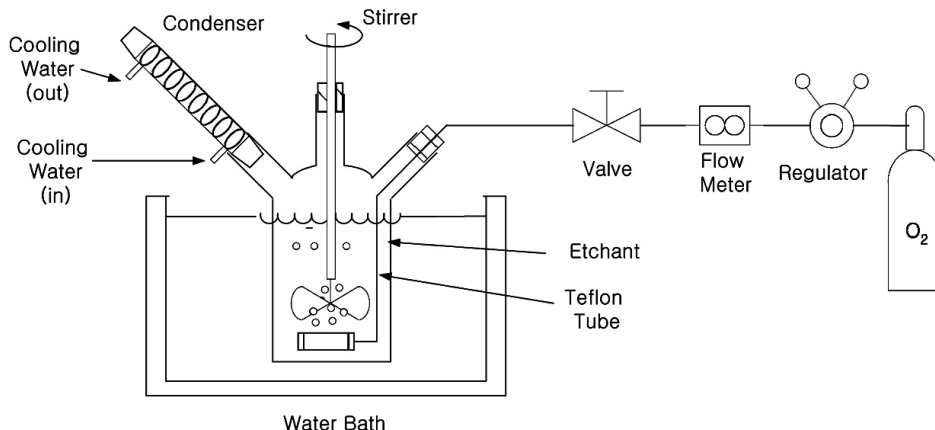
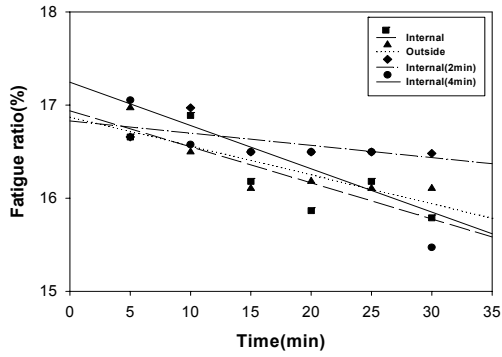
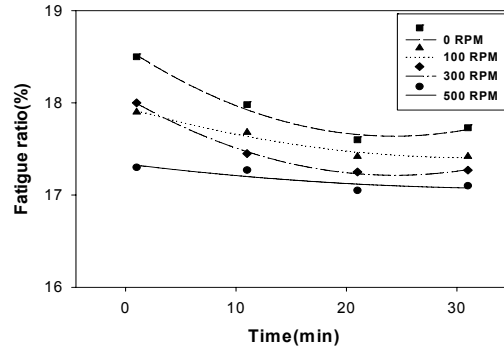


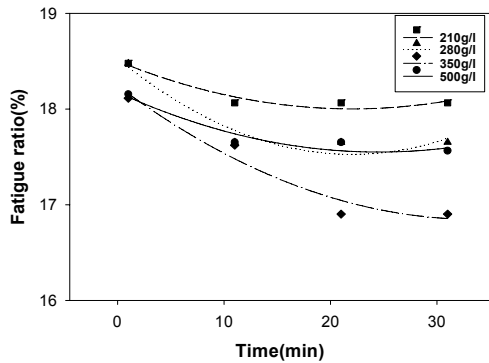
Figure 2. Schematic of the experimental apparatus for Bench Test.



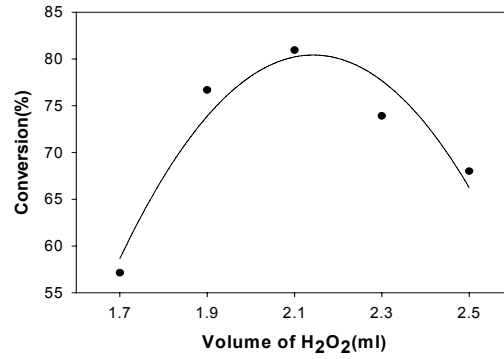
(a) Effect of Injection Pattern



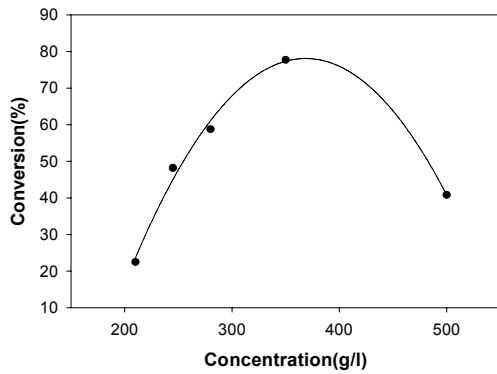
(b) Effect of RPM



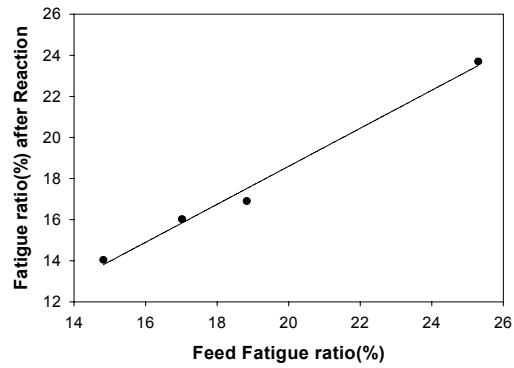
(c) Effect of H₂O₂ Concentration



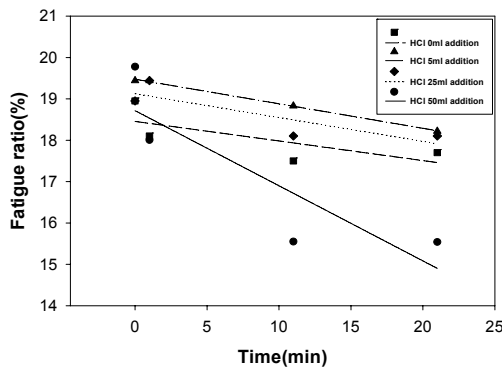
(d) Effect of H₂O₂ Quantity



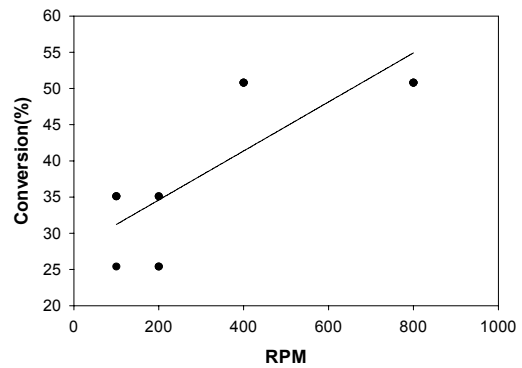
(e) Effect of H₂O₂ Concentration



(f) Effect of Feed Fatigue ratio



(g) Effect of HCl



(h) Pilot Test of RPM

Figure 3. Result of bench- and pilot-scale test.

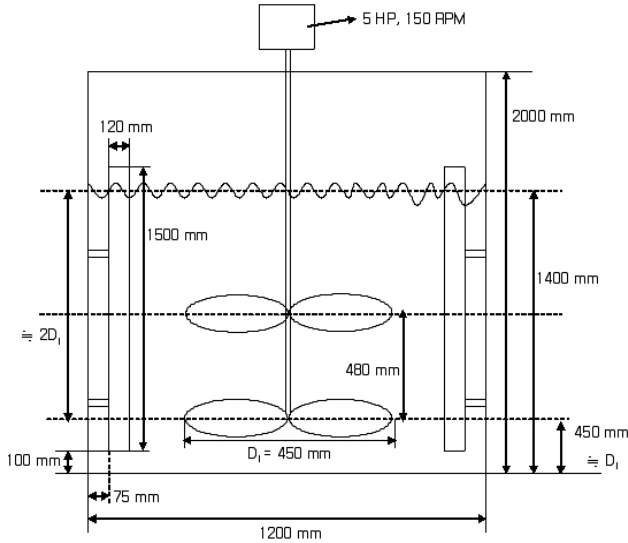


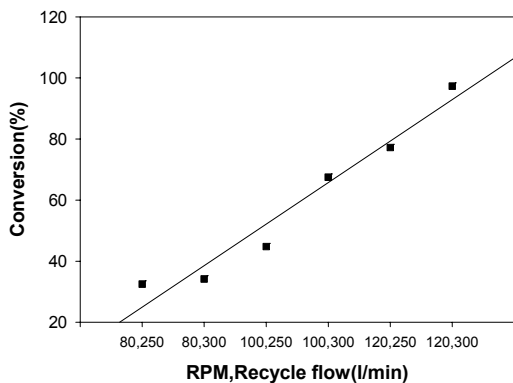
Figure 5. Remodeled drawing of the inner structures of GRS Reactor.

4. Shadow Mask GRS 공정 실험결과

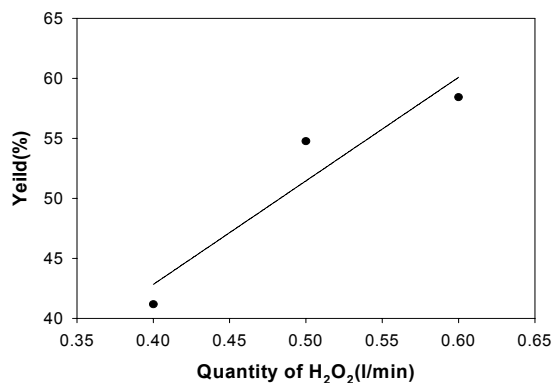
실험실 규모 실험의 결과를 Figure 3에서 나타내었다. 분사 패턴 실험(a)은 순간 반응인 Fenton 산화반응에서 과산화수소가 FeCl₃과 신속히 접촉하지 못하면 부반응 발생 가능성이 커져 선택적 전환율을 저하시킬 것으로 예상되었으나, 결과에서 보듯이 실험 구간에서는 큰 영향이 없는 것으로 확인되었다. 이후의 실험에서는 실험의 일관성을 맞추기 위해서 현장에서 사용하고 있는 액중 분사 방식을 채택하여 실험조건을 맞추었다. 혼합효과 파악을 위한 RPM 변화 실험(b)에서는 예상한 바와 같이 RPM이 증가 할수록 피로도가 감소함을 알 수 있었다. 이것은 반응조 내의 혼합 효과를 증대시킬 수 있는 다른 어떤 방법을 추가할 경우 같은 RPM에서도 전환율의 증가를 기대할 수 있다는 것을 의미한다. 최적 운전점을 찾기 위한 과산화수소의 농도변화 실험(c)에서는 농도 자체의 변화가 전환율이나 피로도 강하에 미치는 영향을 알아보기 위해 농도의

변화는 있지만 투입되는 총 과산화수소의 몰수는 같은 양으로 실험하였다. 실험결과는 우연히도 기존의 현장에서 사용되고 있는 운전조건인 대략 350g/l에서 최적점을 보이고 있는 것으로 나타났다. 과산화수소의 투입량 변화 실험(d,e)은 과산화수소의 농도 실험에서와 같이 최적점이 존재한다는 것을 알 수 있었다. 정확한 수치는 실험도구의 정밀도 문제로 알 수 없었지만 대략 2.1 ml에서 최적적인 것을 볼 수 있었다. 투입되는 구액의 피로도 변화 실험(f)은 구액의 피로도를 적정량의 철을 녹여서 조절하여 실험을 하였으며 Figure. 3에서 보듯이 실험 범위(피로도 15~25)에서는 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로서 GRS공정에서의 관리 피로도를 가급적 높게 유지하는 것이 유리할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만 과산화수소의 공급이 원활하지 못하는 경우에는 제품의 품질에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 공정의 제어를 확실히 해야 할 것이다. 슬러지 방지를 위해 투입되는 HCl의 투입량 변화실험(f)에서는 Fenton 산화반응식에서 개시단계를 촉진시키는 것이 유리산도임을 예상하였고 현장에서의 염산의 투입 유무에 따른 과산화 수소의 전환율에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 하였다. 실험에서 염산을 투입하면 초기의 Fe³⁺양 즉, A의 값이 변화를 일으켜 실험후에 같은 피로도를 가지더라도 초기의 Fe³⁺나 Fe²⁺의 양을 알아내기는 힘들었다. 하지만 총 Fe³⁺ 및 Fe²⁺의 양이나 B-A값은 일정한 것으로 보아 피로도 값에는 큰 차이가 없을 것으로 보고 실험하였다. 피로도를 기준으로 전환율을 계산할 때 오차범위 내의 비교적 허용 가능한 결과가 도출됨을 알 수 있었다. Figure 3(g)에서 보듯이 HCl의 추가 투입은 전환율이나 피로도 감소에 바람직하지 않음을 알 수 있다.

현장실험에서는 GRS 반응조에서 나오는 구액을 얻어 실험실 실험 때와 같은 방법으로 적정실험을 하였다. 현장에서의 PIT조 피로도는 18~19로 관리되고 있으며 Baume와 유리산도는 현장에 따라 품질에 맞게 계속적으로 변화시키고 있었다. PIT조의 액위는 70% 정도로 유지되고 있고 과산화수소의 투입은 3개 생산 라인을 모두 가동 했을 때는 1.25 L/min가 투입되며 한 개 라인 당 0.4 L/min가 투입된다. 현장 실험에서는 반응기의 RPM과 순환량의 변화에 대한 실험과 과산화수소의



(a) Effect of RPM and recycle flow



(b) Effect of H₂O₂ amount

Figure 4. Result of field test.

투입량의 변화에 대한 실험을 수행하였다. Figure 4(a)에서 보듯이 RPM과 순환량을 증가시키에 따라 전환율이 증가함을 확인할 수 있었다. 이것은 염화철 순환량이 커질수록 FeCl₂의 국지적 농도가 증가하므로 정반응이 증가하기 때문이며 순환량이 증가될수록 GRS 반응조 내에서의 Mixing 효과가 향상됨으로써 전환율이 증가되기 때문이다. 순환량의 증가에 따른 역작용으로서 반응물의 체류시간의 감소와 이에 따른 전환율 감소를 예상할 수 있으나 Fenton 산화반응은 라디칼반응으로써 매우 빠른 반응속도를 가지는 것으로 알려져 있기 때문에 체류시간 감소에 의한 효과는 상대적으로 무시할 수 있을 것으로 판단되며 현장 실험 결과도 이러한 가정과 일치함을 보이고 있다. 그리고 H₂O₂의 투입량 변화실험은 Figure 4(b)에 보인 바와 같이 시험 구간에서는 투입량이 증가할수록 전환율이 증가하는 것을 볼 수 있었다.

Fenton 산화반응의 이론과 실험실 및 현장 실험에서 알 수 있듯이 GRS 공정에서 산소를 발생시키는 부반응을 줄이기 위해서는 혼합 효율이 매우 중요한 인자이며 이를 증진시킬 필요가 있다는 것을 확인하였다. 따라서, GRS 반응조의 혼합효과를 높이기 위한 방법으로 GRS 반응조의 내부구조를 임펠러 2개와 Baffle 4개를 검증된 표준설계 지침에 의거하여 추가 설치하였다. Figure 5에 개선된 GRS 반응조의 설계도를 나타내었다.

GRS 반응조의 개선에 따른 성능의 비교를 위해서 현장에서 중요한 공정변수인 부식량이 비슷한 모델 판이 운전될 때의 공정데이터를 Table 1에 비교하였다.

관리 피로도의 변화로 인해 정확한 비교가 되지 않아서 관리 피로도를 맞추기 위해 당일의 실제 전환율과 모델에 의해 계산된 전환율과의 관계를 이용하여 같은 조건에서의 모델 수율을 구하였다. GRS 반응조에서의 개선에 따른 모델 수율이 약 10%증가의 효과가 있는 것으로 나타났다.

현장에서 실시된 RPM 변화 및 순환량 변화에 대한 실험에서 현장의 중요한 변수인 판 모델이 판이하게 변하면서 운전

되었던 관계로 공정 변수 조건을 일정하게 유지시키면서 실험을 수행하기 위하여 파일럿 규모의 실험장비에서 파일럿 실험을 추가 실행하였다. 파일럿 실험장비는 실제 공정을 3:1의 비율로 축소한 GRS 반응조를 설계, 제작하여 실험하였다. 파일럿 GRS 반응조의 내부 구조는 현장의 GRS 반응조의 구조와 거의 동일하였으며 여기서 나온 데이터는 현장 데이터와 거의 차이가 없었다. 실험 결과 현장에서 기존에 100 RPM으로 운전되고 있는 혼합기는 최소 400 RPM 이상이 되어야 만족할 만한 혼합효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

실험한 결과들을 종합해 볼 때, GRS 반응조의 전환율 증가를 위해서는 RPM과 순환량의 증가와 내부구조 개선 등에 의한 혼합 효과를 극대화 시키는 것과 현재 유지하고 있는 GRS 반응조로 투입되는 구액의 관리 피로도를 높여서 관리하는 것이 매우 중요함을 확인하였다. 궁극적으로는 투입되는 과산화수소의 양을 좀 더 증가시키으로써 전환율의 증가를 얻을 수 있다. 하지만 공정 운전상의 제약점으로 인하여 이들 인자 중 어느 하나만으로 원하는 전환율을 얻기에는 어려움이 크고, 따라서 여러 가지 방안을 적절히 조합하여 전환율을 높이는 것이 제일 안정적이라 할 수 있다.

본 연구를 통하여 현재 가동 중인 GRS 공정에서의 공정변수들에 대하여 시험실, 현장 및 파일럿 실험들을 수행하여 중요 운전 및 설계 변수들에 대한 영향들을 확인하였다. 수율 증대를 위해서는 제품의 생산규격에 이상이 없는 한 과산화수소의 투입량, 관리 피로도, GRS 공정에서의 순환량을 최대 수준으로 유지하며 RPM은 400 RPM 정도가 구현되는 것이 필요한 것으로 나타났다. 신액을 재순환하면서 Ni과 미확인 이물질의 축적이 커지면서 제품의 품질에 영향을 미칠 가능성이 있으며 Ni과 이물질의 제거를 위한 Ni 제거 순환공정의 적용이 추가로 이루어진다면 shadow mask 공정에서 투입 신액과

Table 3. Comparison of the process before and after renovation

Before renovation				After renovation			
	Before reaction	After reaction			Before reaction	After reaction	
A	16.4	16.5		A	16.4	16.6	
B	21.4	21.4		B	21.3	21.3	
Fatigue ratio	19.24	18.83		Fatigue ratio	18.93	18.11	
Plate model	17-29A	Actual conversion	24.5	Plate model	17-29A	Actual conversion	48.8
Recycle rate	100			Recycle rate	100		
Baume	46.3			Baume	46.1		
Acidity	1			acidity	1.19		
Input H ₂ O ₂	0.4			Input H ₂ O ₂	0.4		
Target fatigue ratio	19	Model yield	30.4	Target fatigue ratio	18	Model yield	42

배출 폐액의 최소화를 완전히 이룰 수 있을 것으로 생각된다.

감 사

본 연구는 2006 에너지자원기술개발사업과 영남대학교에서 지원하였음.

참고문헌

1. Ueda, R., "Chemical Machining by Ferric Chloride Etchant" *Corros Eng*, **38**(4), 231-237 (1989).
2. Richard, J., and Lewis, Sr., *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*, 7th ed., Van Nostrand Reinhold, 1992.
3. Moscony, J. J., Maynard, R. B., Wetzell, C. M., Eshleman, C. C., and Saunders, M. H., "Optimization of the Ferric Chloride Etching of Shadow Masks," *J. of SID*, **4**(4), pp. 231-240 (1996).
4. Visser, A., Weissinger, D., and Ullmann, E., "Werkstoffbearbeitung Durch Spruehaetzen. Teil I: Wirkweise des Abtragprozesses, Abtraggeschwindigkeit und Oberflaechenstruktur beim Spruehaetzen von Edelstahl mit Eisen(III)-chlorid," *Galvanotechnik*, **75**(1), 14-19 (1984).
5. Visser, A., and Weissinger, D., "Werkstoffbearbeitung Durch Spruehaetzen. Teil V: Untersuchung der Arbeitsgenauigkeit," *Galvanotechnik*, **76**(4), 453-456 (1985).
6. Allen, D. M., and Hegarty, A. J., "Surface Textures of Annealed AISI 304 Stainless Steel Etched by Aqueous Ferric Chloride-hydrochloric Acid Solutions," *T. I. Met. Finish.*, **59**(1), 25-29 (1981).
7. Robert, H. P., and Green, D., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill, 1997.
8. Daniel C. Harris, *Quantitative Chemical Analysis*, 7th ed., W. H. Freeman & Co. Ltd., 2006.