

원전 2차 계통에서 아민의 pH 제어 특성 연구

이인형^{1*}, 안현경¹, 박병기¹, 권혁준¹, 송찬호¹
¹순천향대학교 에너지환경공학과

A Study on Characteristics of pH Control with Amines in the Secondary Side of Nuclear Power Plants

In H. Rhee^{1*}, Hyun Kyoung Ahn¹, Byung Gi Park¹, Gwon Hyuk Jun¹
and Song Chan Ho¹

¹Department of Environmental Engineering, Soonchunhyang University

요약 최근 경수로형 원전 2차 계통의 건전성 유지를 위해 수처리제를 암모니아에서 에탄올아민으로 전환하였으나, 적용 후 복수 및 저압급수가열기 영역에서의 pH가 감소하므로 본 연구에서는 최적의 pH 제어제로 사용할 수 있는 아민을 조사하였다. 대체아민 조사 결과 최적 조건을 만족시키는 단일 아민은 존재하지 않았다. 암모니아는 상대휘발도가 높아 증기에 많이 분포되어 증기 응축수인 복수에서 pH가 높으며, 상대휘발도가 낮은 에탄올아민은 습증기 영역의 pH를 높여 유체가속부식을 억제하므로 증기발생기 철 슬러지 유입을 감소하는데 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 복수 및 저압급수계통에서 pH가 높은 암모니아와 습증기영역의 유체가속부식 측면에서 특성이 우수한 에탄올아민(ETA)을 혼합 주입하는 복합아민을 선택하면 2차 계통 재질의 손실을 최소화하여 증기발생기 건전성을 확보할 수 있을 것이다.

Abstract The pH control agent in PWRs, to insure the integrity of steam generator, was changed from ammonia to ethanolamine(ETA) which decreased pH at condensate system and low pressure feedwater heater drain system, so that several amines were investigated for the selection of the optimum amine. There was no single alternative amine to meet the optimum condition. The more volatile ammonia provides the higher pH in condensate, while the less volatile ETA increases the pH in wet steam area. Thus, the combined amine of ammonia and ETA is able to equally raise the pH in both region so that the flow accelerated corrosion be reduced in the every system of the secondary side and the integrity of steam generator be also improved in pressurized water reactors (PWRs).

Key Words : Amine, Ammonia, Ethanolamine, Buffer Intensity, Steam Generator, Secondary System, pH control

1. 서론

원전 2차 계통 수질관리의 목적은 계통 재질의 건전성을 유지하기 위하여 증기발생기로 유입되는 철 등 불순물의 발생을 최소화하고, 증기발생기에서 불순물의 축적을 억제하여 전열관 부식을 억제하는 것이다. 최적의 열기성 및 환원성 수화학 조건은 재질 및 운전환경에 적합한 pH 제어법과 산화환원전위 제어법에 의해 이루어진

다. 2차 계통 pH 제어법의 경우 70년대 인산염 처리에서 암모니아를 사용하는 전취발 처리법으로 전환된 후, 80년 후반부터 다양한 아민 처리법이 적용되고 있다.

국내 원자력 발전소의 경우도 울진 1,2호기를 제외한 국내 경수로 원전은 1999년 고리 1호기를 시작으로 2차 계통의 수처리제를 암모니아에서 증기발생기 건전성 유지 측면에서 우수한 에탄올아민(Ethanolamine, ETA)으로 변경하여 사용하고 있다. 그러나 에탄올아민 적용 후 복

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

*교신저자 : 이인형(ihrhee@sch.ac.kr)

접수일 10년 07월 06일

수정일 10년 08월 02일

게재확정일 10년 08월 10일

수 및 저압급수가열기 영역에서의 pH가 감소하고 발전소 기동 시 pH가 원활하게 상승하지 않으며 양이온전도도가 오히려 증가하는 문제점이 나타나고 있다.

따라서 본 논문의 목적은 pH 제어제로 사용되는 아민들을 조사하여 최적의 pH 제어제로 사용할 수 있는 대체아민을 조사하는데 있다.

2. 연구내용

2.1 대체 아민의 종류(원전 2차 계통 pH 제어제 종류)

원전 2차 계통 pH 제어제로는 morpholine (MPH), ethanolamine(ETA), 2-amino-2-methoxy-1-propanol (AMP), 3-methoxypropylamine (MPA), DMA(dimethylamine), methylamine, 5-aminopentanol 1,2-diaminoethane, 1,3-diaminopropane, piperazine, pyrrolidine, quinuclidine, 3-hydroxyquinuclidine 등이 있다[4-6].

본 논문에서는 국내외 원전에서 후보아민으로 간주되었거나, pH 제어제로 사용 중인 Ammonia, MPH, ETA, AMP, MPA, DMA를 중심으로 아민 특성을 비교 하였다.

2.2 대체아민의 물리화학적 특성

2.2.1 상대휘발도(Relative Volatility)

상대휘발도는 증기발생기, 습분분리 및 재열기(MSR), 급수가열기 배수탱크, 복수기에서 물증기상 상(Phase) 전환이 발생될 때 아민이 온도에 따라 증기 및 물에 분배되는 비율이다. 분배비(Kd) 또는 상대휘발도(RV)로 나타낸다.

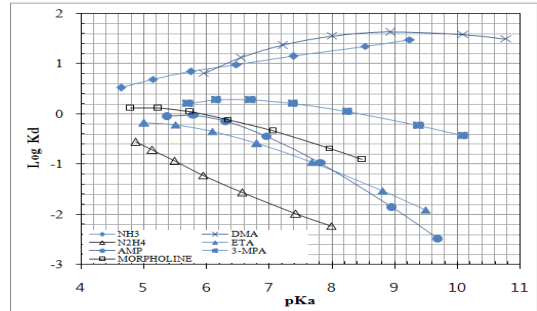
원전 2차 계통은 50~300℃의 온도 범위를 순환하므로 온도와 무관하게 액상 및 기상의 최적 분배비는 1이 된다.

아민 종류별 상대휘발도를 비교해 보면 -OH 작용기를 가진 아민 또는 아민 작용기 둘 이상 가진 아민인 ETA, AMP의 분배비는 1보다 작고, -OCH₃ 작용기를 가진 아민 또는 고리형 아민인 MPH, MPA의 RV는 1과 같다. 암모니아 및 알킬아민인 NH₃, DMA의 분배비는 1보다 크다.

2.2.2 염기도

염기성 세기는 수용액에서 pH를 증가시키는 아민의 능력이다. 온도에 따라 변화하는 산 또는 염기의 이온화상수(pKa, pKb)로 나타낸다. pKa가 클수록 작은 몰농도로 pH를 높게 유지할 수 있으나, 부식 제어 측면에선 최

적 pH와 같은 범위의 pKa를 가진 아민이 충분한 완충용량을 제공하므로 가장 바람직하다. ETA, AMP, MPA, DMA 순으로 pKa가 크다.



[그림 1] 온도 25~300℃에서 아민의 산해리상수와 기액 분배비

2.2.3 완충강도(Buffer Intensity)

완충강도는 용액의 pH 유지능력, 용액의 pH를 1.0 변화시키기 위해 첨가한 강산 또는 강염기의 몰 농도로 정의된다. 온도에 따라 산해리상수가 변화하므로 온도에 따라 다르며, 용액의 산-중화능력(ANC, acid-neutralizing capacity)을 pH에 대해 미분한 값으로 나타낸다. 용액의 pH 완충능력은 물의 성분인 H⁺ 및 OH⁻, 아민 성분인 RNH₃⁺ 및 RNH₂의 산 및 염기 작용에 의해 결정된다. 알칼리도는 산-중화능력의 총합으로 정의되며, 온도가 변화해도 일정하다.

$$\beta = 2.3 \left([H^+] + [OH^-] + \frac{[RNH_3^+][RNH_2]}{[RNH_3^+] + [RNH_2]} \right)$$

$$\beta = 2.3 \left([H^+] + [OH^-] + \frac{[H^+]K_a}{([H^+] + K_a)^2} C_{T,RH_2} \right)$$

$$= \beta_{H_2O} + \beta_{RNH_2}$$

완충용량은 pH(T)=pKa(T)일 때 최대이며, pKa(T)-pH(T)=-0.5 ~ +0.5일 때 큰 값을 가지며, 부식반응이 진행되는 경우에도 완충용량을 확보하기 위하여 아민의 산해리상수와 용액의 pH 차이가 -1.0 ~ +0.5인 범위가 바람직하다. (pKa(T) - pH(T) = -1.0 ~ 0.5 또는 pH(T)-1.0 ≤ pKa(T) ≤ pH(T)+0.5)

pKa(T)-pH(T) 값은 아민 및 물의 해리상수가 온도에 따라 변화하므로, 암모니아는 복수계통, ETA 및 AMP는 복수 및 저온 급수계통, MPA는 복수 및 급수 계통, DMA는 급수계통에 해당하는 온도에서 완충용량이 확보

된다.

[표 1] 온도에 따른 pKa(T)-pH(T) 값

온도(°C)		NH ₃	MPH	ETA	AMP	MPA	DMA
25	복수	-0.26	-1.01	-0.01	0.19	0.64	1.15
50		-0.47	-1.06	-0.20	-0.05	0.38	1.08
100		-0.94	-1.26	-0.65	-0.50	-0.07	0.62
150	MSR 급수	-1.42	-1.56	-1.09	-0.94	-0.51	0.11
200		-1.89	-1.90	-1.55	-1.33	-0.93	-0.42
250		-2.46	-2.38	-2.10	-1.81	-1.44	-1.05
300	SG	-3.03	-2.88	-2.66	-2.30	-1.96	-1.71

MSR : moisture separator and reheater

SG : steam generator

2.2.4 분자량 및 성분

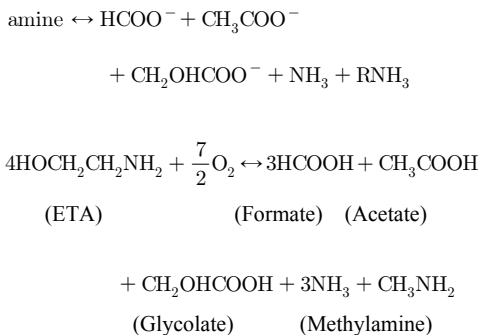
아민의 분자량은 탄소, 질소, 산소, 수소 등 구성원소의 질량 합이며, 물에 대한 용해도 및 유기 용매 용해능, 산소 또는 촉매 존재 유무에 따른 분해산물인 유기산, COD 및 T-N, 구입 비용 등에 영향을 미친다.

분자량이 증가할수록 분해물질이 증가해 pH가 감소하고, 양이온전도도가 증가하며, 방출될 경우 COD 및 T-N의 증가를 유발하고, 구입비용이 증가한다. 즉 분자량은 작고, 탄소/질소 성분비도 작을수록 좋다.

분자량은 NH₃, DMA, ETA, MPH, AMP, MPA 순으로 증가하고, 탄소 수는 DMA 및 ETA의 경우 2, MPH, AMP 및 MPA의 경우 4이다.

2.2.5 분해율

아민은 온도, 산소, 및 촉매에 의해 분해되며, 복합적인 분해반응은 짧은 시간에 이루어진다. 분해 시 Formate, Acetate, Glycolate, Ammonia, Methylamine 과 같은 짧은 사슬의 아민이 생성된다.



분자량이 낮을수록, 탄소 및 질소의 수가 적을수록 분

해산물이 적으므로 저 분자량 아민이 pH 제어제로 바람직하다.

아민 분해 시 C는 유기산을, N는 아민 또는 암모니아를 형성하므로, 아민을 구성하고 있는 C/N 비율이 증가할수록 아민이 분해되어 유기산이 형성되므로 pH는 저하되고, 양이온전도도가 증가해 부식 환경이 형성된다. 아민의 완전분해에 의한 유기산과 아민의 생성 비율은 ETA의 경우 5:4이며, MPA 경우 7:4이다.

2.2.6 수지 선택도

수지 선택도는 수지가 아민과 결합하는 세기를 말하며, 온도, 성분 등 조건에 따라 변화하는 선택도 계수로 나타낸다.

수지에 대한 선택도는 Gel형 수지의 경우 동일한 전하의 아민 이온에 대해 분자량이 작은 아민의 선택도가 크며, MR형 수지의 경우 분자가 커질수록 세공을 통한 확산이 제한되므로 선택도가 저하되는 경향을 보인다.

아민에 대한 선택도가 증가할수록 Na 등 이온에 대한 선택도가 감소하므로 탈염기 관류 시점에 Na 등 이온의 용출이 발생된다.

2.2.7 착화 및 흡착성과 표면전하

아민의 착화 및 흡착성은 리간드인 아민의 질소 원자 전자쌍이 이온상태 또는 입자상태의 금속과 배위결합을 형성하는 정도로, 안정도 상수로 나타낸다.

아민이 금속과 배위결합을 형성하면 이온 또는 입자의 표면 전하를 변화시켜 더 크게 입자를 성장 또는 작은 입자로 파괴시킬 수 있어 SG 슬러지 퇴적에 영향을 미친다.

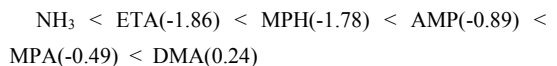
철 금속에 대한 아민의 안정도 상수는 비교적 작기 때문에 측정하기 어려워 보고되어 있지 않을 뿐만 아니라 측정하기도 어렵다.

여러 아민 수용액에서 표면전하가 0인 영전하점 pH_{pzc}는 NH₃<ETA<AMP<MPA<DMA 순으로 증가한다.

2.2.8 옥탄-물 분배비와 유기물 용해능

옥탄-물 분배계수는 비극성 용매화를 나타내는 지수이며, 분자 골격과 분자 내부 상호작용을 이용해 계산 또는 측정한다.

저 분자량의 아민이 바람직하며, 옥탄-물 분배계수는 다음과 같다.



아민은 2차 계통에 잔류하는 유기 오염물질(터빈 도포 오일 등) 용해시키는 용매 역할을 하며, 옥탄-물 분배계

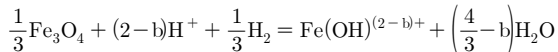
수로 나타낸다.

2.3 대체아민 선택 시 고려 측면

휘발도, 염기도, 분자량 및 성분, 분해 비율 및 물질, 선택계수, 옥탄-물 분배비, 착화 및 흡착능 등 아민의 물리화학적 특성은 계통수의 pH 및 완충용량, 기름 분해능, 입자 표면전하, 수지 성능에 영향을 미치므로 pH 제어제로서 아민을 선택할 경우 2차 계통 부식 및 증기발생기 오염, 탈염기 운전 및 유지 등과 같은 원전 운영 측면뿐만 아니라 구입비용 및 오염관리 등에 수반되는 사회, 환경, 경제적 측면의 고려가 필요하다.

2.3.1 FAC 및 증기발생기 파울링 측면

FAC(flow-accelerated corrosion)는 정상적으로 형성된 보호산화막이 탈기된 알칼리성 분위기에서 빠르게 흐르는 유체(물 또는 물-증기 혼합물)에 용해되는 현상으로 ‘corrosion and dissolution process’ 또는 ‘reductive dissolution of magnetite’이라 하며 magnetite의 용해도에 의해 결정된다. (b : 용액의 pH에 따라 결정된다.)



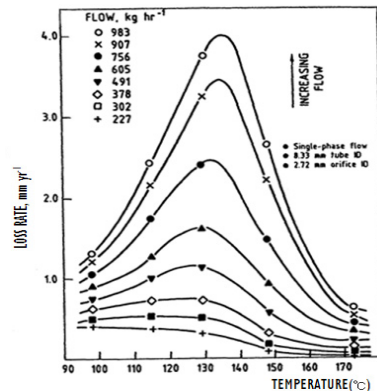
FAC는 온도, 유속, pH, 산화환원전위, 크롬 함량 등의 영향을 받으며 특히 급수 조건에서 pH 10 가까이 증가할수록 감소되며 사용하는 아민의 종류에 상관없이 운전온도 조건에서의 pH와 관련된다[1, 2].

수력 및 금속학적 측면(유속, 재질)에서 보면 탄소강 및 저합금강은 탈기된 알칼리 및 환원성 분위기에서 다공성 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite) 산화막을 형성한다. Ti alloys, Mo/Cr/Ni alloys, Ni base alloys, Stainless steel 등은 세공이 없는 단단한 보호피막(Fe₃O₄ 보다 용해도가 낮은 FeCr₂O₄, MoFe₂O₄)을 형성하므로 FAC가 현저히 감소한다. 용해성 철이온 농도가 포화 상태에 도달할 정도로 흐르는 물의 유속이 충분히 낮으면 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite) 용해에 의한 용출현상이 감소해 FAC가 현저히 저하된다.

환경인자 측면(온도, 산화환원전위, pH)에서 보면 산소 농도가 높을수록 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite) 보다 용해도가 낮은 철산화물(Fe₂O₃, Hematite)이 형성되므로 FAC는 감소하며, 하이드라진(N₂H₄) 농도가 높을수록 산소가 제거되고 환원성이 강해지므로 환원성 용해반응(reductive dissolution of magnetite)으로 FAC는 증가한다 [2, 3]. 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite)은 저온에서 용해속도가 느리고, 고온에서 용해도가 감소하며, 탈기된 환원 및

알칼리성 분위기에서 온도가 200 ~ 250 °C 범위일 때 다공성 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite)이 형성되므로 FAC는 최대가 된다. 환원 및 알칼리성 분위기에서 형성된 Fe(OH)₂(s)는 온도가 증가함에 따라 용해도가 증가하며 200 ~ 250 °C 범위에서 용해도가 낮은 원하지 않는 다공성 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite)이 형성되므로, Fe(OH)₂(s)의 용해도가 급수 조건(250 °C)에서 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite)이 형성되는 과포화상태에 도달하지 않기 위해 pH를 최소한 9.6 이상 유지해야 한다. FAC는 환원 및 알칼리성 분위기에서 형성된 다공성 철산화물(Fe₃O₄, Magnetite)이 용해되는 현상으로 pH가 저하되면 용해현상은 가속되므로 pH를 높게 유지해야 할 뿐만 아니라 완충용량이 충분히 확보되어 pH 저하를 억제할 수 있는 아민을 pH 제어제로 채택해야 한다.

증기발생기 파울링(fouling)은 입자가 증기발생기로 유입되어 전열관/전열관 지지판 또는 축척된 슬러지 층에 화학적으로 부착되는 현상으로, 급수에 존재하는 현탁 입자 농도(Suspended Solid)와 오염속도상수에 비례한다. 특히 pH 제어제인 아민과 철산화물의 착화합물 형성에 의해 용해반응이 영향을 받으므로 아민 종류별로 파울링 영향에 차이가 존재한다[7].



[그림 2] 아민의 종류가 증기발생기 파울링에 미치는 영향 [8]

2.3.2 탈염기 운전 및 유지 측면

복수탈염기 및 증기발생기 취출수 탈염기는 양음이온 수지를 충전하여 이온성 고형물과 일부 현탁성 고형물을 제거하며, 복수탈염기 수지는 재생하여 다시 사용하며, 증기발생기 취출수 수지는 저준위 방사성폐기물로 처분한다.

암모니아와 같이 휘발성이 강한 아민의 경우 복수로 전달되는 양이 많으므로 복수탈염기의 부하를 증가시켜

운전 일수를 단축시키다.

ETA와 같이 휘발성이 낮은 아민은 MSR 배수를 통해 급수로 회수되므로 복수탈염기의 운전일수를 연장시키거나, 증기발생기 취출수에 잔류하는 양이 많으므로 증기발생기 취출수 탈염기의 부하를 증가시켜 운전일수를 단축시킨다.

따라서 염기성이 강한 아민을 사용하면 적은 약품으로도 적정 pH를 유지할 수 있으므로 탈염기의 부하가 경감되고, 복수탈염기 수지 재생 횟수가 줄어들어, 재생제 및 순수 사용량, 재생폐액 발생량이 감소할 뿐만 아니라 증기발생기취출수 수지 폐기물 처리량이 감소해 원전 운영 비용이 절감된다.

부분유량 운전을 채택하면 부식생성물 여과 및 이온성 불순물 제거량 감소 가능성이 있으나, 복수기 누설 시 탈염기 확보, 아민 구입 및 수지 재생 관련 비용 측면에서 바람직할뿐만 아니라 아민이 수지에 의해 제거되고 다시 주입되는 영역에서 아민 농도를 높게 유지할 수 있다.

2.3.3 구입 용이성 및 비용 측면

암모니아, ETA 등은 여러 산업분야에서 널리 사용하고 있으므로 구입하기 용이할 뿐만 아니라 비용이 저렴하나, MPA나 DMA에 비해 염기성이 약해 다량 필요하다. AMP, MPA, DMA 는 산업용 용도가 암모니아 및 ETA 보다 제한적이다.

2.3.4 사회적, 환경적 측면

휘발성이 강한 암모니아, DMA, MPA는 대기로 방출되므로 호흡에 주의가 필요하고, 휘발성이 약한 AMP, ETA는 방류되면 COD와 T-N의 증가를 유발한다. 고순도 ETA는 폭발성이 있다.

3. 결론

국내 경수로 원전은 2차 계통의 수처리제를 암모니아에서 증기발생기 건전성 유지 측면에서 우수한 에탄올아민(Ethanolamine, ETA)으로 변경하여 사용하고 있다. 그러나 에탄올아민 적용 후 복수 및 저압급수가열기 영역에서의 pH가 감소하고 발전소 기동 시 pH가 원활하게 상승하지 않으며 양이온전도도가 오히려 증가하는 문제점이 나타나고 있다. 따라서 pH 제어제로 사용되는 아민들을 조사하여 최적의 pH 제어제로 사용할 수 있는 대체아민을 조사하였다.

대체아민은 pH 제어제로 사용 중인 Ammonia, MPH,

ETA, AMP, MPA, DMA를 중심으로 조사하였다.

아민의 물리화학적 특성인 휘발도, 염기도, 분자량 및 성분, 분해 비율 및 물질, 선택계수, 옥탄-물 분배비, 착화 및 흡착능 등은 계통수의 pH 및 완충용량, 기름 분해능, 입자 표면전하, 수지 성능에 영향을 미치므로 pH 제어제로서 아민을 선정할 경우 2차 계통 부식 및 증기발생기 오염, 탈염기 운전 및 유지 등과 같은 원전 운영 측면뿐만 아니라 구입비용 및 오염관리 등에 수반되는 사회, 환경, 경제적 측면을 고려하여야 한다.

대체아민 조사 결과 최적 조건을 만족시키는 단일 아민은 존재하지 않았으나, 아래와 같은 결론으로 암모니아 및 에탄올아민의 복합아민 수처리법 채택하였다.

- 상변화시 기상 및 액상에 균등 배분되어 적정 pH 유지 : 저 휘발성 ETA 및 고 휘발성 암모니아는 MSR 등 습증기 영역 및 복수기 응축수의 pH를 동시에 높게 유지할 수 있다.
- 복수 및 저온 급수 계통에서 FAC를 억제할 수 있는 완충용량 확보 : 증기발생기로 유입되는 MSR 배수계통, 급수가열기 배수 탱크 및 저온 급수계통, 및 복수계통에서 최대 완충용량을 유지할 수 있다.
- 부식 반응에 의한 산성분위기 형성 시 완충용량 확보 : 암모니아 및 ETA가 pH(25℃) 9.25 ~ 9.5에서 최대 완충용량을 유지하므로 부식 환경이 조성되더라도 pH 저하를 최대로 억제할 수 있다.
- 부식 분위기를 조성하는 아민 분해물질 발생 최소화 : 다른 아민에 비교해 탄소 성분이 적으므로 분해 시 유기산 생성율이 낮다.
- 복수 탈염기 및 증기발생기취출수 탈염기 부하 균형 : 암모니아는 복수, ETA는 증기발생기 취출수에 더 많이 분배되므로 하나의 탈염기만 부하가 가중되지 않는다.
- 방류수 중 COD 및 T-N 최소화 : 복수탈염설비 수지 재생폐액 중 탄소 및 질소 성분이 적다.

참고문헌

- [1] King, P., "Flow-Accelerated Corrosion of Carbon and Low Alloy Steels at Nuclear Steam Generator Temperature", Proceedings: 11th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, 2003.
- [2] Pavageau, E-M., et al., "Update of the Water Chemistry Effect of the Flow-Accelerated Corrosion

Rate of Carbon Steel : Influence of Hydrazine, Boric Acid, Ammonia, Morpholine and ETA”, Proceedings: 13th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Canada, 2007.

[3] Fukumura, T. and Arioka, K., “Influence of ETA Injection on Flow Accelerated Corrosion of PWR Secondary System”, Proceedings: NACE Corrosion 2009 international Conference & Expo, 2009.

[4] Turner, C., “Identification and Testing of Amines for Steam Generator Chemistry and Deposit Control”, EPRI, TR-1002773, December, 2002.

[5] Turner, C., et al., “New Insights into Controlling Tube-Bundle Fouling Using Alternative Amines”, 4th CNS International Steam Generator Conference, Canada, 2002.

[6] Cobble, J. and Turner, P., “PWR Advanced All-Volatile Treatment Additives, By-products, and Boric Acid”, EPRI, TR-100755, 1992.

[7] Marks, C., “Amine Effect on Corrosion Product Transports and Steam Generator Fouling”, Proceedings: SGMP 2010 Steam Generator Secondary Side Management Conference, EPRI, March, 2010.

[8] Bignold, G.J., Garbrtt, K., Garnsey, R., and Woolsey, I.S., "Proceedings of the 8th International Congress on Metallic Corrosion", Mainz, 1981.

이 인 형(In Hyoung Rhee) [정회원]



- 1990년 8월 : Cornell University 토목환경공학(공학석사)
- 1996년 11월 : Carnegie Mellon University 토목환경공학(공학석사)

<관심분야>
수질관리, 수처리, 계면화학

안 현 경(Hyun Kyoung Ahn) [정회원]



- 2001년 2월 : 순천향대학교 일반대학원 화학공학과(공학석사)

<관심분야>
수질관리, 수처리

박 병 기(Byung Gi Park) [정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 (공학박사)

<관심분야>
수질관리, 수처리

권 혁 준(Gwon Hyuk Jun) [준회원]



- 2009년 2월 : 순천향대학교 에너지환경공학과 (공학사)

<관심분야>
수질관리, 수처리

송 찬 호(Song Chan Ho)

[준회원]



- 2010년 2월 : 순천향대학교 에너지환경공학과 (공학사)

<관심분야>
수질관리, 수처리