

여과 공정, 그 차별화된 역사와 약속된 미래

Gary S. Logsdon, Michael B. Horsley, Scott D.N. Freeman,
Jeff J. Neemann, George C. Budd

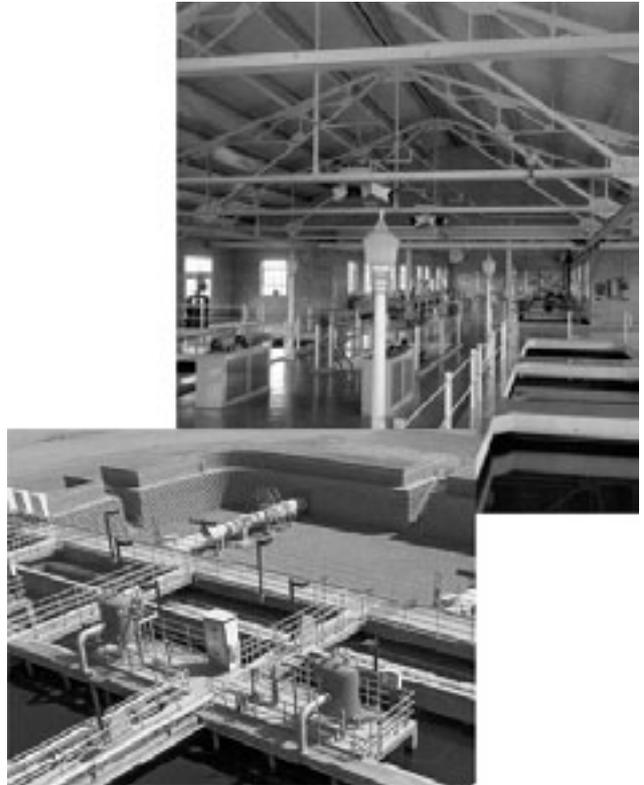
※ 본 원고는 미국수도협회(AWWA)誌 2006년 3월호에서 발췌·번역한 글입니다.

시간의 변화에 따른 입상 매체의 발전

처음 나온 것은 완속사 여과(Slow Sand Filtration)였습니다. 미국에서 공공식수를 성공적으로 여과하기 시작한 것은 1872년 뉴욕주 퍼킵프시(Poughkeepsie)에서 영국 및 유럽식의 완속사 여과(SSF)를 실행한 때부터입니다. 일리온과 허드슨(뉴욕 주), 세인트 존스베리(버몬트 주), 로렌스(매사추세츠 주) 등의 뉴욕 주와 뉴잉글랜드 소재의 여러 지역 공동체에서도 1900년 전에 SSF를 채택했습니다. SSF는 미생물을 효과적으로 제거했지만, 일반적인 여과율은 3 mgad(Million Gallons per Acre per Day) 또는 0.12 m/h였습니다. 따라서 대도시에서 사용한 초기의 여과 작업에서는 말단 수두 손실(Terminal Head Loss)이 일어난 후에 여과층의 맨 윗부분에서 얇은 모래층을 벗겨내기 위해 상당한 양의 토지 및 노동력이 소요되었습니다. 완속사 필터는 국내 여러 지역에 공급되는 물을 구성하는 탁한 지표수를 여과하는 데에는 비효율적인 것으로 밝혀졌습니다. 따라서 효과적인 정화 및 빠른 모래 여과 기술의 발달과 함께 완속사 필터는 점차 사용이 줄어들어서 20세기 초중반에는 별로 사용되지 않았습니다.

완속사 여과에 다시 관심을 갖게 된 계기는 짐작하건대 낮은 탁도의 원수를 소독 처리 외에는 아무것도 하지 않고 사용하고 있었던 지역 공동체에서 수인성 편모충증이 발생하였기 때문입니다. 이러한 물은 완속사 여과를 적용할 수 있는 좋은 대상인 것처럼 보였고, 편모충증은 중소 규모의 지역 공동체에서 발생하고 있었기 때문에 USEPA는 1980년대 초에 완속사 여과에 대한 조사를 개시했습니다. 그 후 완속사 여과는 미국 북동부의 여러 주, 로키 산맥에 위치한 지역, 그리고 태평양 북서쪽에 위치한 여러

지역에서 실행되었습니다. 이미 알고 있는 단점, 즉 필터 청소를 위해서 많은 토지 면적이 필요하고 그와 동일한 수준의 노동력이



1930년대 무렵에 여과 공정은 이 문타나 주 그레이트 폴스에 위치한 정수장의 2-mgd 용량의 필터 장치(위)에서 알 수 있듯이 대부분의 처리 공정에 있어서 표준 구성요소가 되었습니다.(캘리포니아 주) 사우쓰 샌워킨 관개 사업소의 사우쓰 카운티 상수도 프로그램 상수처리장(South County Water Supply Program Water Treatment Plant)에는 새로운 방식이 반영되어 있는데, 여기에는 좁은 면적에서 효과적인 정화 및 여과 공정을 제공하고 고수질의 음용수를 생산하기 위해 두 가지 혁신적이면서도 공간 효율적인 기술(고속 용존 공기 부양 및 침수식 막)이 적용되어 있습니다(아래).

필요하다는 점은 지방에 있는 소규모 지역 공동체에게는 문제가 되지 않는 것으로 밝혀졌습니다. 왜냐하면 지방 지역 공동체는 필터의 운영 및 유지 보수에 유희 토지와 노동력을 쉽게 사용할 수 있기 때문입니다.

급속사 여과는 일찍 시작되었습니다. 1881년에 AWWA가 형성 되었을 무렵에, 미국에서는 지표수의 응집 처리 및 여과가 최초로 시도되었습니다. 이 과정은 우리가 오늘날 인라인 여과(Inline Filtration)라고 부르는 것과 비슷했습니다. 즉, 응집만을 허용하고 응결(Flocculation)이나 침강(Sedimentation)은 허용하지 않는 짧은 시간 동안 모래 필터 앞에 응집제를 첨가하는 것입니다. 이러한 시도는 루이지애나 주 뉴올리언스 근처의 미시시피 강과 같은 진흙이 섞인 지표수를 처리하는 데는 실패했습니다. 1890년대에 (켄터키 주) 루이스빌 수도 회사(Louisville Water Company)는 응집 및 침강 처리를 먼저 한 후에 여과 하는 것을 후원했습니다. George Fuller는 125 mgad(2 gpm/sq ft 또는 5 m/h)의 속도로 응집, 침전 및 여과 처리를 하여 오하이오 강의 물을 성공적으로 처리했다고 보고했습니다. 이 여과 속도는 미국에서 Fuller의 시대를 지나 오랫동안 표준이 되었으며, 화학적 응집, 혼합, 응결, 그리고 침강 후에 여과를 하는 처리 순서는 '전통적인 처리'로 알려지게 되었습니다.

Fuller가 루이스빌에서 활약하던 것과 비슷한 시기에 Alan Hazen은 펜실베이니아 주 피츠버그에서 여과 공정 평가를 수행했습니다. 탁도 측정은 여전히 미숙했지만 세균학은 평판 계수 박



AWWA가 창설될 무렵에 미시시피 강의 물과 같은 진흙이 섞인 수원에서 나온 지표수를 응집하고 여과하려는 초기의 시도는 실패했습니다.

테리아를 측정할 수 있는 단계까지 발전했습니다. Hazen은 응집과 급속사 여과로 박테리아 농도를 97.99% 감소시킬 수 있다는 자료를 제시했습니다(Hazen, 1913).

전통적인 처리 방법이 널리 채택되면서 상수도 업체 및 엔지니어들은 프로세스 개선의 필요성을 깨달았고, 시간이 지나면서 많은 개선이 이루어졌습니다.

1920년대에 보조 세척(Auxiliary Scour)의 사용을 평가한 John Baylis는 고정 파이프 격자에서 비스듬히 물을 뿌리면 역세 (Backwashing) 처리 중 세척 작용이 향상된다는 것을 밝혀냈습니다. 1930년대 말에 표면 세척에 사용하기 위한 로터리 스위프 (Rotary Sweep)가 개발되었습니다. 유럽의 보조 세척 방법은 공기 세척을 사용하는 경향이 있었는데, 1980년대에 미국의 정수장 설계자들도 공기 세척 방식을 사용하기 시작했습니다. 1970년대에 에임즈에 위치한 아이오와 주립 대학의 John Cleasby와 E.R. Baumann(1977)이 수행하고 USEPA에서 후원한 하수 여과 연구가 이 변화에 영향을 주었을 수도 있습니다. 이 연구는 낮은 속도에서 공기 세척과 물 세척 후 물 세척만 하는 것이 공기 세척만 한 후에 물 세척만 하거나 표면 세척 및 역세 처리를 하는 것보다 효과적으로 필터 매체를 청소할 수 있다는 것을 보여주었습니다. 자국에서 수행한 연구는 효과가 있었습니다. 규제자 및 디자인 엔지니어는 다른 대륙에서보다 자국에서 가까운 곳에서 증명된 새로운 발견을 더 선호해서 받아들이는 경향이 있습니다.

처리 방법의 개척자는 매체를 최대한 활용하는 데 중점을 두었습니다. Fuller가 개발한 급속사 여과의 주요 한계점 중의 하나는 내부 길이가 24~30 in.(61~76 cm)이고 약 0.5 mm의 유효경(es)을 가진 일반적인 모래 필터를 사용해서 2 gpm/sq ft(5 m/h)보다 훨씬 높은 속도에서는 성공적으로 운영할 수 없는 경우가 많았다는 것입니다. 동일한 중량의 필터 재료를 역세 처리한 다음에 다시 계층화하면 고운 알갱이는 필터층의 맨 윗부분이나 윗부분에 가까운 곳에 침전하고 큰 알갱이는 여과층 깊은 곳에 침전합니다. 이 결과 필터 윗부분의 플룩은 제거되고, 필터층 깊은 곳의 저장 용량은 거의 이용하지 못하게 되며 필터 실행 길이가 줄어듭니다. 이러한 경향을 상쇄시키기 위하여 엔지니어들은 고운 모래 층 위에 굵은 무연탄 층으로 구성된 이중여재 여과지를 개발했습니다. 최초의 대규모 이중여재 시설물 중 일부는 제2차 세계대전 중에 맨하탄 프로젝트의 일환으로 워싱턴 주 헨

퍼드와 테네시 주 오크리지에 설치되었습니다. 이 작업은 처음에 Roberts Filter Company와 General Electric의 Walter Conley가 수행했으며 나중에는 Neptune Microfloc이 수행했습니다. 이중여재 여과는 4~5 gpm/sq ft(10과 12 m/h)사이에서 좋은 성능을 보였으며 간헐적으로는 더 높은 속도에서도 잘 동작했습니다.

Conley는 이중 여재 여과에 대한 후속 작품으로서 모래와 무연탄이 위에 깔린 고운 석류석 층으로 구성된 혼합 여재를 개발했습니다. 고운 석류석을 사용하면 탁한 물질에 대한 방어는 높아지지만 그와 함께 수도 손실은 증가하는 부담이 있었습니다.

1980년대에 이중 여재 또는 혼합 여재보다 더 높은 속도에서 작동할 수 있는 필터에 대한 요구로 인해 심층 단일 여재 여과를 조사하게 되었습니다. 알갱이가 더 굵은 필터링 재료를 사용하면 비교적 전통적으로 사용되는 0.5-mm-es의 모래와 1.0-mm-es의 무연탄을 사용할 때보다 더 높은 속도에서 수도 손실이 더 낮아지지만, 주어진 층상 깊이에 대한 필터링 효과도 그만큼 좋은 것은 아닙니다. 후자의 경우 더 깊은 층을 사용하여 보상합니다. 수도 전기국이 1980년대 말 가동시킨 캘리포니아 주 로스앤젤레스 수도 정수장(Aqueduct Filtration Plant)에서는 직접 여과(급속 혼합, 응결 및 여과)를 사용하며, 이 정수장은 파일럿 테스트의 결과를 바탕으로 최대 13 gpm/sq ft(32 m/h)의 속도를 낼 수 있도록 설계되었습니다. 이 여재는 6 ft(1.8 m)의 1.5-mm-es 무연탄으로 구성되어 있습니다. 그때부터 다른 정수장도 심층 단일 여재 여과를 사용하여 건설하게 되었습니다.

더 굵은 필터링 재료로 만들어진 더 깊은 여과층을 사용하면 모래 필터 및 일부 이중 여재 여과보다 더 높은 속도에서 효과적인 여과 처리를 할 수 있기 때문에 기존의 정수장 일부에서는 더 깊은 필터층을 사용하여 개장하고 있습니다. 일부 기존 시설에서는 여재에 의한 침투를 막기 위해 설계된 다공성 물질의 층을 여과지 타일 위에 통합시키는 새로운 암거 구성을 사용하여 더 깊은 여과층을 설치할 수 있습니다.

원수에 포함된 유기 화학물질 때문에 냄새 및 맛이 불쾌하게 되는 문제에 직면한 일부 상수도 업체들은 이중 여재의 무연탄 층을 입상 활성탄(GAC)으로 교체하거나 급속사 필터에 있는 모래의 전부 또는 일부 대신에 GAC를 대용하기도 했으며, 1960년대에 버지니아 주와 웨스트버지니아 주의 업체들은 GAC 필터 흡착기를 처음 사용한 업체에 포함되었습니다. 맛과 냄새를 일으키는 어떤 화합물을 제거하기 위해 GAC 필터 흡착기를 사용하는 경우 GAC 교체 간격은 일반적으로 이보다 더 넓은 범위의 유기

화합물을 제거할 때 필요한 간격보다 훨씬 깁니다.

(오하이오 주) 신시내티 수도 사업소(Cincinnati Water Works)는 산업화된 오하이오 강 유역에서 발생할 수 있는 유기 화학 오염 물질을 막는 수단으로 1992년에 오하이오강에 위치한 정수장에 GAC 후여과처리(postfiltration) 흡착기를 설치했습니다. 이 설비는 유기물을 제거하는 GAC의 흡착 기능을 극대화하기 위한 것입니다. 이 흡착기는 현장 재생 능력을 갖추었고, 설계 용량은 15분의 공탐 체류 시간(EBCT)에서 175 mgd(660 ML/d)이며, 미국 내의 동일 기종에서 가장 큰 것입니다.

새 필터에는 바이오매스(Biomass)가 포함됩니다. '생물학적 여과(BAF)'라는 용어는 여재 입자에 활성화된 바이오매스를 가진 입상 여재 여과를 사용하는 여과 공정에 적용됩니다. 생물학적으로 활성화된 GAC 필터를 때때로 '생물 활성탄'이라고 부르기도 합니다. BAF는 1970년대와 1980년대에 유럽에서 널리 사용되었으며, 이때 입자 제거와 생물학적 제거 과정은 일반적으로 별도의 여과 단계에서 수행되었습니다. 미국에서는 일반적으로 BAF와 입자 제거 과정은 동일한 필터에서 수행됩니다. 오존은 용존 유기 탄소(DOC)에서 생분해 할 수 있는 부분을 측정하는 수단이 되는 동화 유기 탄소(AOC)를 증가시킬 수 있기 때문에 BAF를 계획적으로 사용할 때는 오존 처리를 함께 사용하는 경우가 많습니다. 유입수에 잔류 소독제가 없는 입상 여재 여과에 어떤 형태의 생물학적 활동이 발생할 수도 있으므로, 필터를 지나 1차 염소 처리 시점을 설정한 정수장에는 BAF가 (아마도 의도한 것은 아니겠지만) 발생할 수 있습니다. BAF가 가지는 이점으로는 DOC, AOC, 소독 부산물(DBP) 전구물질 화합물, 맛과 냄새를 일으키는 화합물 등을 제거하고, 배급수 시스템에서 처리수의 생물학적 안정성은 향상시키고 미생물 채성장 가능성은 감소시키며, 처리수의 염소 요구량을 낮추는 것 등이 있습니다. BAF로 인해 발생할 수 있는 손해로는 유출수에서의 일반 세균수 증가, 수도 손실 증가 가능성, 그리고 염소 처리를 하지 않은 역세수 필요량 증가 가능성 등이 있습니다.

전통적인 입상 여과가 망간의 통제에 할 수 있는 역할은 알려져 있지 않은 경우가 많습니다. 1980년대 후반, 블랙스버그(Blacksburg)에 위치한 버지니아 공대의 연구원들은 자유 염소가 존재하는 상황에서 여재 표면에 이산화망간 코팅 처리를 하면, 그렇게 하지 않았을 경우 정수장을 통과하여 처리수로 흘러들어갈 수도 있는 용해성 망간을 제거할 수 있는 반응이 어떤 식

으로 만들어지는 지를 보여주었습니다. 이 망간 제거 메커니즘은 많은 정수장에서 고객의 불만을 줄이는 데 도움이 되었습니다. 하지만 산화 처리 방법을 변경하거나 여재를 교체할 때까지는 이 과정을 인식하지 못하는 정수장도 있을 것입니다. BAC 또는 GAC 필터 흡착기를 사용하기 위해 공정을 변경한 입상 여재 여과 방식 사용 정수장에서 망간을 제거하거나, 입상 여재여과 방식을 정밀 여과(MF) 또는 환외 여과(UF)로 교체한 경우에는 다른 방법을 사용하여 망간을 통제해야 할 것입니다. 이런 식으로, 1차 국가 음용수 규제(National Primary Drinking Water Regulations)에 포함되어 있지 않은 오염 물질이 존재하면 규제 오염 물질을 통제하기 위한 과정을 선택하는 데 영향이 생길 수도 있습니다.

기술 발전으로 인해 여과 처리된 물의 수질을 연속적으로 모니터링하는 것이 가능해졌습니다. 필터 성능을 모니터링하기 위해서는 입상 여재 여과의 여과 속도 및 수두 손실에 대한 지식이 있어야 합니다. 수십 년에 걸쳐 이러한 측정 기법은 이제 유속과 수두 손실 데이터를 센서로 감지한 후에 운영자에게 전자적으로 전송하는 수준으로 발전하였습니다. 여과된 물의 수질을 측정하는 방법은 조금 다른 방향으로 발전하였습니다. 잭슨 캔들 탁도계(Jackson Candle Turbidimeter)를 사용하여 여과된 물의 탁도를 측정하는 초기의 방법으로는 매우 맑게 여과된 물의 탁도를 정확하게 측정하지 못했습니다. 가장 가까이로는 1971년에 간행된 AWWA의 'Water Quality & Treatment' 제3판에서는 물속에 잠긴 전등이나 연속 흐름 광산란 탁도계가 달려 있는, 조명을 밝힌 사이트웰(Sightwell)을 사용하여 정수장에서 탁도를 빠르게 측정할 수 있다고 설명했습니다(AWWA, 1971). 현대식 탁도계가 나온 때는 Hach Chemical Company에서 실험실용 탁도계와 물의 탁도를 연속적으로 읽을 수 있는 통과식 기구를 생산한 1960년대로 거슬러 올라갑니다. 여과된 물의 탁도를 연속적으로 측정하는 것은 최소한 20년 동안 권장되어 왔으며 현재는 규제 요구사항입니다.

연속적인 탁도 모니터링에 사용하는 유형의 탁도계는 탁도 값이 0.1 ntu 이하일 경우 정밀도가 떨어지는 경향이 있기 때문에, 여과된 물의 탁도가 0.1 ntu에 가까운 경우에는 전처리 또는 필터 동작의 미묘한 변화에 의한 효과를 운영자가 평가하는 것이 어렵습니다. 이러한 단점은 매우 낮은 수준의 탁도 측정이 가능한 것으로 보이는 레이저 탁도계가 최근에 개발되면서 수정되었습니다.

일부 상수도 업체에서 여과액의 탁도가 0.1 ntu 이하인 경우에는 온라인 입자 계수기를 사용하는 것이 여과된 물의 수질 변화를 감지하는 데 효과적이라는 것을 알게 되었습니다. 1981년 탁도 1 ntu의 미드 호수(Lake Mead)의 물을 여과하여 탁도가 매우 낮은 물을 생산하기 위해 보울더 시(Boulder City) 근처에 있는 남부 네바다 수도 사업소(Southern Nevada Water Authority) 알프레드 메리트 스미스 수 처리 설비(Alfred Merritt Smith Water Treatment Facility)에서는 온라인 입자 계수기를 사용하였습니다. 최근 입자 계수 방법을 널리 사용하게 되었지만 이 방법을 사용할 때의 결점은 표준화된 기구 설계가 없다는 것입니다. 이 문제는 아직 해결되지 않고 있습니다.

1970년대 초에 한 필터 매체 공급업체(The Taulman Company)가 여과층 내에서 물의 탁도를 모니터링하는 방식을 주장했습니다. 이 개념은 여과층 내에서 적절한 양의 물을 연속해서 추출한 후에 이 물의 탁도를 지속적으로 측정하는 것입니다. 원래 개념은 이중 여재 여과에 적용되었는데, 샘플링 장치(가려진 오리피스)를 무연탄과 모래의 경계층에 위치시킵니다. 유입수, 경계면 샘플, 유출수를 비교하면 여과층 안의 어느 부분에서 미립자 물질이 제거되는지에 관한 정보를 얻을 수 있고, 탁도가 한계점을 돌파하는 순간을 알 수 있는데, 이것은 필터 역세 처리 일정을 수립하는 데 도움이 됩니다. 경계면의 탁도를 모니터링한다는 개념은 (캘리포니아 주) 모데스토 관개 사업소(Modesto Irrigation District)의 상수 처리장에서 더 확장되었



버지니아 주 세일럼에 있는 이 통제실은 1940년대의 최신 여과 통제 시설을 대표합니다.

는데, 이 처리장에서는 6-ft(1.8-m) 깊이의 단일 여재 무연탄 여과층 중의 하나에 1-ft(0.3-m) 간격으로 여과층 내 샘플링 장치를 설치하였습니다. 이 모니터링 테이터는 운영자들이 깊은 곳에 위치한 단일 여재 여과층의 동작을 해석하고 이해하는 데 도움이 됩니다.

전처리 는 응집, 혼합, 침전 과정으로 구성됩니다.

응집은 효율을 증가시킵니다. 탁도가 낮은 원수에는 전처리 과정 없이 완속사 필터를 사용할 수 있지만, 엔지니어들은 급속사 필터를 사용하는 경우 효과를 내기 위해 응집제를 사용해야 된다는 것을 깨달아 알게 되었습니다. 고속 여과를 사용하기 전에도 침강 과정을 보조하기 위해 응집제를 사용하였습니다. 가장 많이 사용되는 응집제는 명반이었지만, 철 응집제를 사용하는 상수도 업체도 있었습니다.

응집과 여과를 사용하는 수처리장에서 최고의 성과를 내기 위해서는 응집제를 적절하게 적용하는 과정이 반드시 필요한 것으로 밝혀졌습니다. 비효과적인 응집 과정과 고속 여과를 작동시킬 때 응집제를 첨가시키지 못한 것이 합쳐져서 1970년대와 1980년대에 편모충증 발생 사건이 일어나게 되었습니다. 실제로 Cleasby와 동료들이 1980년대 말에 미국 전역의 여과 시설을 조사한 결과(Cleasby et al, 1989)는 입자 제거를 위한 여과 목적을 만족시키기 위해서는 설비의 물리적 특성보다 응집 과정이 더 중요하다는 것을 나타냈습니다.

제2차 세계대전 이후에는 4.5 gpm/sq ft(10.12 m/h) 이상에서 작동하도록 설계된 필터에서 플록 강도가 문제였습니다. 1950년대 말에 응집 보조제로서 합성 유기 고분자 전해질의 사용이 도입되었습니다. 고분자 전해질의 일부는 플록을 강화하여 여과층에서 발생하는 전단력에 저항할 수 있도록 하기 위해 필터 보조제로 사용하였습니다. 양이온성 중합체를 응집제 또는 응집 보조제로 사용하여 무기 응집제의 일부를 교체하게 되었습니다. 현재 많은 정수장에서 여과된 물의 탁도를 매우 낮게 하기 위해서 중합체의 사용에 의존하고 있습니다. 효과적인 응집제를 찾으려는 노력으로 인해 금속 염(metal salt) 및 유기 중합체와 함께 폴리염화알루미늄과 같은 새로운 중합 알루미늄 응집제를 개발하게 되었습니다.

혼합과 침전은 응집제 성능에 도움을 줍니다. 전통적인 정수장을

설계한 초기 설계자들은 효과적인 혼합을 오늘날만큼 강조하지는 않았습니다. 제1차 세계대전이 일어나기 전의 펜실베이니아의 한 정수장에서 응집제는 기계적인 혼합 과정 없이 대형 혼합 탱크에서 솟아오르는 원수 위로 단순히 흘려보냈습니다. 이 정수장은 응결 과정(baffled flocculation)도 채택했습니다. 'The Quest for Pure Water' 2권을 보면 탁도를 제거하도록 설계된 정수장은 대개 30~45 분의 응결 과정과 4시간의 침강 과정을 수행했다고 합니다(Taras, 1981).

1950년대에 빠르게 응집제를 혼합하는 과정의 중요성이 충분히 인식되어, 이 과정을 수 처리 교재에 포함하게 되었습니다. '상수도 권장 표준(Recommended Standards for Water Works)'에는 빠른 혼합을 위한 체류 시간이 30초를 넘어서는 안 된다고 규정되어 있습니다(Great Lakes—Upper Mississippi Board of State & Provincial Public Health & Environmental Managers, 1982). 더욱 최근에는 정적 인라인 혼합기, 동력 인라인 혼합기 및 펄프 제트 혼합기를 사용하여 응집제를 빠르게 분산하며, 마지막으로 분산되는 응집제를 수도관에 흐르는 원수 상류로 빠르게 보냅니다. 빠른 혼합 접촉 시간과는 대조적으로 분산에 강조를 두는 것은 최근 응집제를 효과적으로 사용하기 위한 가장 중요한 고려 사항으로 인식되었습니다.

향상된 여러 가지 종류의 응결 장비의 개발은 이 과정에 대한 이해 증대와 더불어 응결을 발전시켰습니다. 고속 침강 과정의 도래와 더불어 플록 크기가 균일해야 한다는 것이 명백해졌습니다. 플록의 침전 속도가 균일할수록 관 침전기와 같은 장비를 사용하여 더욱 효과적으로 제거할 수 있습니다. 이런 식으로 응결에서 플러그 흐름(plug flow)에 더 가까워지는 차단이 잘 된, 여러 개의 공실을 지닌 플럭 형성지의 개념이 더욱 받아들여지게 되었습니다. 오늘날 응결 시간은 사용 과정에 따라 크게 다릅니다. 직접 여과 및 용존 공기 부상법(DAF) 정화기에는 심층 여과를 쉽게 수용하거나 쉽게 부유할 수 있는 더 작은 크기의 플록을 제공하는 것이 목적입니다. 양쪽 모두 지나치게 큰 플록은 불리합니다. 응결 시간은 최소 10분이 되거나 이러한 과정에 대해서는 보다 작을 수도 있으며, 35~45분의 플록 체류 시간을 사용하면 역효과가 초래되기도 합니다.

응결 장비는 초기에서 20세기 중반까지 사용된 외륜 응결장치에서(샤프트와 날개바퀴만 물에 잠기고) 수면 위에 걸쳐 놓은 수직 터빈 응결장치로 발전했으며, 그 후 현재는 플록의 파손 위험 없이 부드러운 응결을 제공하는(항공기의 프로펠러와 어느 정

도 닳은) 수중 날개까지 발전했습니다. 외륜 응결장치의 경우, 이제 제조업체는 나일론과 같은 비부식성 재료로 만들어진 베어링과 유리 섬유 강화 플라스틱으로 만들어진 구동 체인을 생산하고 있습니다. 1960년대 이후 수십 년에 걸쳐 이루어진 침전 과정 개선의 목표는 훨씬 더 빠른 속도로 공정을 운영하는 것이었습니다.

발전이 이루어짐에 따라 침전지 규모와 체류 시간이 줄어듭니다. 월류 속도(overflow rate)가 대략 0.5 gpm/sq ft(1.2 m/h) 이고 체류 시간이 약 4시간인 전통적인 침전지가 1940년대에 대형 처리 시설에서 흔히 사용되었습니다. 하지만 이러한 침전지는 상당한 건축 면적을 차지하여 그에 상응하는 자본 비용이 필요했으므로 20세기의 대부분은 침전의 속도를 높이는 공정을 추구했습니다.

대형 침전지와 긴 체류 시간을 해결하기 위해 사용한 초기의 방법은 고형물 집축 침전조를 사용하는 것이었습니다. 이 장비는 하나의 침전지에서 가운데에는 혼합 구역을 두고 외부에는 침전 구역을 두어 그 경계를 차단벽으로 분리하는 것이었습니다. 유입



2005년 12월에 가동을 시작한 미네아폴리스 상수도사업소 정수장에 있는 막 공급 펌프는 40개의 한외 여과 막 장치로 구성되어 있으며, 다시 각 장치는 28개의 유리 섬유 압력 용기로 구성되어 있습니다.

되는 물과 침전지의 바닥에서 올라오는 플록이 혼합되는 혼합 구역에서 물이 대량으로 재순환되면 화학 반응과 플록 형성이 촉진됩니다. 장치는 혼합 구역에서 많은 고형물을 얻을 수 있고 침전 구역에서는 슬러지 블랭킷(sludge blanket)을 이용하여 작동됩니다. 이 시스템들은 연수화에는 최대 1.8 gpm/sq ft(4.4m/h)의 월류 속도로, 화학적 응집을 적용할 경우에는 최대 1.0 gpm/sq ft(2.4m/h)의 월류 속도로 작동해 왔습니다. 펄스형 슬러지-블랭킷 침전지도 개발되었는데 나중에 나온 디자인에서는 성능 향상을 위해 경사판 침전지를 사용했습니다. 이러한 장치들은 2.5 gpm/sq ft(6.1 m/h) 이상의 부하 속도로 작동했습니다.

침강에 걸리는 체류 시간을 단축시키기 위하여 Neptune Microfloc은 1960년대에 관 침전기(Tube Settler)를 개발했습니다. 관 침전기의 개념은 한 다발의 관을 침전지에 경사지게 배치하여 응결을 거친 물이 이 관을 통하여 위쪽으로 통과하도록 하는 것이었습니다. 경사지게 배치한 관의 '천장(Ceiling)'에서 '바닥(Floor)'까지의 수직 거리는 피트(Feet) 대신에 인치(Inch)로 측정하였습니다. 한 다발의 관은 플록 입자가 관의 바닥으로 침전하고 덩어리져서 늘어날 수 있는 '가짜 바닥(False Floor)'을 형성하는데, 이렇게 모인 플록 입자는 침전지의 바닥으로 배출되어 침전될 것입니다. 처음에 관 침전기는 작은 양으로 처리 용량을 극대화시키려는 목적을 가진 소규모의 조립식 '패키지 시설(Package Plant)'에서 채택하였습니다. 또한 관 침전기는 전형적인 총 월류 속도가 2 gpm/sq ft(5m/h)인 전통적인 침강지의 속도를 높이는 데도 사용되었습니다.

경사판 관 침전기와 다소 비슷한 것으로 유립식 개념의 경사판 침전지가 있는데, 이 침전지의 총 월류 속도는 최대 3 gpm/sq ft(7 m/h)입니다. 동일한 크기의 플록을 형성하여 처리를 향상 시킵니다. 경사판 침전지는 대형 시설과 일부 패키지 시설에서 사용되었습니다.

집축 흡착 침전지(CAC) 또는 초벌 필터(Roughing Filter)는 일부 패키지 시설에서 사용되었으며, CAC 이후 다중여과여과를 연속적으로 배치하여 사용했습니다. 이 시스템은 응집 처리된 물이 통과되는 거친 매체로 이루어진 층으로 구성되며, 물은 이곳에서 응결 및 플록 제거에 도움이 되는 많은 굴곡을 거치는데 이것은 이중 여과 또는 혼합 여과 층에서 여과할 수 있도록 준비하는 과정입니다. 대형 CAC는 전통적인 방식으로 구축한 필터에 앞서 독립형 전처리 시설로 작동할 수 있습니다. CAC 및 초벌 필터에 대한 월류(또는 여과) 속도는 최대 10 gpm/sq ft(24

m/h)이며, 일반적으로 응집제 요구량이 적은 낮은 탁도의 원수에만 적용하고 있습니다. CAC 시스템은 원래 미국의 기술입니다.

유럽에서 가져온 기술은 Ballasted Flocculation Clarifier인데, 이 방식에서는 원수를 응집 처리한 후에 매우 고운 모래를 첨가하고, 응집된 입자가 모래에 부착되도록 하기 위해 중합체를 첨가합니다. 일정 시간 동안 저어서 플록을 형성한 다음 상대적으로 뽀뽀한 플록을 효과적으로 침강시키기 위해 짧은 체류 시간을 가집니다. 이 과정을 사용하면 16 gpm/sq ft(39 m/h) 이상의 월류 속도를 얻을 수 있습니다.

다른 국가의 처리 방법은 다릅니다. 색이 있거나 탁도가 낮은 물 및 조류가 포함된 물을 처리하는 경우에 대하여 미국의 응집, 응결 및 침강 방식은 유럽의 그것과 달랐습니다. 스칸디나비아의 여러 국가와 영국에서는 이런 종류의 물을 처리할 때 DAF를 사용합니다. 탁도 제거와 관련된 DAF의 효과는 입자의 성격에 따라 다소 변합니다. 더 무거운 입자가 존재하면 DAF의 효력이 줄어드는 경향이 있습니다.

이 과정에서 응집 처리되고 응결을 거친 물이 들어오는 시점에 과포화된 물이 DAF 정화기로 되돌아 갈 수 있도록 정화된 물의 일부에 높은 압력을 가합니다. DAF 정화기는 4 gpm/sq ft(10 m/h) 이상의 월류 속도에서 작동할 수 있습니다. 최근에 유출 조건과 관련된 단락을 더욱 잘 제어하기 위하여 플레넘(plenum)을 적용하는 고속 접근법이 개발되었습니다. 이 접근법을 사용하면 부하 속도가 높아질 수 있습니다. 또 다른 접근법은 DAF와 여과가 단일 장치로 결합되는 스택형 DAF 개념입니다. 미국이 DAF 정화의 활용 면에서 유럽의 국가에 뒤처지기는 하지만 미국의 많은 시설이 DAF를 사용하여 현재 운영하고 있습니다. 현재까지 가장 큰 시설은 사우스 캐롤라이나에 위치한 75-mgd(280-ML/d) 용량의 시설입니다.

이제 상수도 업체는 여러 가지 필터 및 막 중에서 선택을 하고 있습니다

규조토 필터(Diatomaceous Earth Filter), 카트리리지 필터(Cartridge Filter), 백 필터(Bag Filter)가 개발되었습니다. 규조토 필터는 제2차 세계대전 중에 태평양 전선에 배치된 미국 군

대를 위해 물을 처리하기 위한 목적으로 개발되었습니다. 전쟁이 끝난 후에 E.R. Baumann 등의 대학 연구원들이 규조토 여과를 연구했고, 몇몇 제조업체에서 도시에서 사용할 장비를 생산하기 시작했습니다. 규조토 여과는 응집제가 필요하지 않고, 여과 처리를 위해 원수에 투입하는 유일한 제품은 규조토이기 때문에 응집 및 여과보다 운영하기가 더 쉽습니다. 규조토 여과의 한계는 규조토 여과로 원생동물 포낭 및 난포낭 등의 입자성 오염 물질을 효과적으로 제거할 수 있다고 하더라도 전처리를 하지 않을 경우에는 용존 성분이 필터를 통과한다는 것입니다.

일부 소규모 시스템에서 사용한 백 필터와 카트리리지 필터는 여과 메커니즘을 이용하여 병원균 및 기타 입자를 제거하지만 색상과 같은 용존 성분은 통과시킵니다. 백 필터와 카트리리지 필터는 최근에 공표된 장기 2차 강화 지표수 처리 규칙(LT2ESWTR: Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule)에 원생동물을 제거하기 위한 기법으로 등록되었습니다(USEPA, 2006).



저압 막 여과 방식은 1990년대 식수산업을 급격하게 변화시켰습니다. 이러한 시설에서는 탁도가 낮은 물을 생산하고, 전통적인 응집/여과 시설에 비해 현장의 유지 보수 노력을 적게 들일 수 있으며, 사용 면적이 적고, 추가 용량이 필요할 때까지 자본 비용을 거치시키는 데 도움을 줄 수 있는 모듈식 장비를 사용합니다.

막 여과는 처음에 탈염에 사용되었습니다. 지하채 수처리를 위해 막을 처음으로 사용한 것은 고압 역삼투 막을 사용하여 소금기가 있는 물 또는 해수에서 소금을 제거하기 위한 것이었습니다. 8,000-mg/L의 소금기가 있는 우물물을 처리하기 위해 1973년도에 플로리다 주 로튼다 웨스트에 설립한 미국 최초의 탈염 시설의 처리 용량은 0.5 mgd(1.9 ML/d)이었습니다(DuPont de Nemours & Co., 1982). 1980년대에 역삼투의 하위분류 중 하나인 나노 여과(NF)가 개발된 것을 포함하여, 공정 개선과 함께 역삼투 시설의 수가 증가했습니다. 1990년경에 플로리다 주에 위치한 더 큰 규모의 시설의 처리 용량은 12-14 mgd(45-53 MD/d)이었습니다. RO/NF 막은 단 하나의 단계로 여러 가지 용존 오염 물질을 제거하는 데 효과적이기 때문에 상수도 업체는 이 기술을 사용하여 이전에는 부적합하다고 판단했던 수원을 사용할 수 있게 되었습니다. RO/NF 기술을 사용하면 탈염 외에도 색상, 살충제 및 DBP 전구물질과 같은 유기 물질과 질산염, 불화물, 비소, 경도(hardness) 등의 무기 물질을 통제할 수 있습니다. 미국에서 해수를 처리하기 위한 가장 큰 규모의 역삼투 시설은 플로리다 주에 있는 탐과 베이 정수장으로 현재 처리 용량을 25 mgd(95 ML/d)로 확장하기 위한 공사를 하고 있는 중입니다.

전통적인 입상 여과 여과가 망간의 통제에 할 수 있는 역할은 알려져 있지 않은 경우가 많습니다.

MF 또는 UF를 사용하는 저압 막 여과 방식은 1990년대에 식수 산업을 급격하게 변화시켰습니다. San Jose Water Company가 1994년에 캘리포니아 주 사라토가에 설립한 15-mgd(57-ML/d) 용량의 정수장은 최초의 대규모 도시 시설인데, 이 시설이 성공을 거두었고 전국의 규제자들이 승낙함에 따라 상수도 업체들은 점차 MF/UF를 적용하고 있습니다. 현재 많은 신규 또는 개조된 지표수 정수장에서 MF/UF를 사용하고 있습니다. 1996년에 북미 전역에 위치한 12 개의 MF/UF 식수 시설의 처리 용량은 1 mgd(3.8 ML/d) 이상이었습니다. 시설 수는 2000년경 60개 이상으로 늘었고 2003년 무렵에는 100개를 넘었습니다. 현재는 (MF/UF를 사용하는) 200개 이상의 도시 시설이 전 세계에서 운영되고 있습니다.

MF/UF 시설의 수가 빠르게 증가한 주요 원인 중 하나는 미생물 오염 물질, 편모충 포낭, 그리고 소독제를 견디어 내는 와포자충 난포낭에 대한 우려 때문입니다. 미국의 전체 규모 MF/UF 시설

의 4-로그 미생물 제거 무결성은 자동화된 간단한 테스트를 통해 매일 검증할 수 있습니다. 원생동물과 박테리아를 이용한 유발 검사(Challenge Test) 결과 6-로그 이상의 제거가 가능한 것으로 나타났습니다. 그 외에도 MF/UF 시설에서 여과된 물의 탁도는 매우 낮아서 반복적으로 0.05 ntu 미만의 탁도가 나왔습니다. 전처리가 필요하지 않은 경우 이러한 시설을 사용하면 응집 및 여과 시설보다 현장 노동력을 줄일 수 있고, 건축 면적을 적게 차지하고, 추가 용량이 필요할 때까지 자본 비용의 거치를 용이하게 할 수 있는 모듈식 장비를 사용할 수 있습니다.

막 필터는 용기에 넣어 사용하거나 침수시켜 사용할 수 있습니다. 용기식 MF 장치는 압력 용기에 설치된 중공사 막으로 구성되고, 양압을 공급 측에 작용시켜 여과된 물을 막의 벽으로 밀어내는 방식으로 동작합니다. 침수식 MF 장치의 경우, 대기압에서 막을 탱크에 설치하고, 여과액에 대한 흡입력이 막을 통과하여 물을 끌어들이니다.

적절한 수준의 수두 손실을 유지하기 위하여 주기적인 역세 처리, 화학적으로 강화시킨 역세 처리, 화학적 세척 작업을 수행하여 막에 축적된 물질을 제거합니다. 대부분의 시설에는 막 횡단 압력을 제공하기 위한 펌프 설비가 갖추어져 있지만 좀 더 새로운 시설은 비용을 절약하기 위한 기능으로써 사이펀의 동작에 의존합니다. 이에 대한 예는 싱가포르의 체스트넛 애버뉴 정수장(Chestnut Avenue Waterworks)과 오레건 주 펜들턴에 위치한 정수장이 하나 있습니다.

1990년대 중반에 MF/UF 막은 셀룰로오스 또는 폴리프로필렌 재질로 만들었지만 최근에는 내오염성 및 염소 내성이 더 뛰어난 폴리 불화 비닐리덴, 폴리설피론, 또는 폴리에테르설피론 등으로 교체하고 있습니다.

MF/UF를 사용하면 입자성 물질을 훌륭하게 제거할 수 있지만(심지어는 서브미크론 크기의 입자까지 제거 가능) 용존 오염 물질은 거의 제거하지 못합니다. 전처리 또는 후처리를 이용하여 MF/UF로 처리할 수 있는 수질의 범위를 확장시킬 수 있었습니다. 애리조나 주 스카츠데일에 위치한 새퍼렐 상수처리장에서는 비소를 제어하기 위해서 철 응집제를 사용하여 인라인 응집 처리를 하고, 맛과 냄새를 일으키는 화합물을 제거하기 위해 GAC를 이용하여 후처리합니다.

캘리포니아 주 베이커스필드에서는 DBP 전구물질과 망간을 통제하고 막에 부착되는 물질을 제거하기 위하여 전 산화처리, 응결 및 경사판 침강 등을 사용합니다. 캘리포니아 주 소재의 사우

스 샌워킨 관개 사무소에서는 조류에 의한 부착물 형성을 막기 위해 DAF를 이용하여 전처리를 하고, 캘리포니아 주 클로비스에서는 용존 유기 물질을 제거하기 위해 Ballasted Flocculation을 이용합니다.

북미에서 가장 큰 규모의 UF 시설에서는 석회 연수화 공정과 막 여과 공정을 함께 사용하여 위해 70 mgd(265 ML/d)의 미시시피 강 상류의 물을 처리하여 미네소타 주 미네아폴리스에 공급합니다.

여과의 미래는 더 많은 발전을 약속합니다

맑은 물을 공급하고 수인성 질병을 예방하기 위하여 1800년대 말에서 1900년대 초부터 공공 상수도를 여과하기 시작하였습니다. 원생 미생물이 박테리아보다 화학 소독제(특히 염소)에 대한 저항력이 훨씬 강하다는 것을 세균학자들이 밝혀내면서 여과의 중요성이 증가했습니다.

공공 상수도를 보호하기 위하여 법이 갈수록 강화되고 있습니다. 공공 식수 시스템으로 병원균이 유입되는 것을 효과적으로 방지할 수 있는 수단을 제공해야 했기 때문에 여과에 대한 규제 요구가 매우 엄격해졌으며, 이 추세는 앞으로도 계속될 것 같습니다. 1942년에 미국 공중 위생국은 탁도가 10 jtu(Jackson Turbidity Unit)를 넘지 않을 것을 권고했고, 1962년에 5탁도 단위(Turbidity Unit)로 낮아졌습니다. 1975년 USEPA는 1탁도 단위의 최대 허용농도(MCL)를 정립했으며, 그 다음에는 매월 합산한 여과지 유출수 샘플의 95%에 해당하는 탁도가 0.5 ntu가 될 것을 규정한 1989 지표수 처리 규칙(1989 Surface Water Treatment Rule)이 나왔고, 다시 이 뒤를 이어 응집 및 입상 여재 여과를 사용하는 시설에 대하여 매월 합계한 여과지 유출수 샘플의 95%에 해당하는 탁도가 0.3 ntu가 될 것을 규정한 1998 강화된 임시 지표수 처리 규칙(1998 Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule)이 나왔습니다(Hess, 2005). 이러한 규제 추세 외에 '안전한 물을 위한 협력(Partnership for Safe Water)' 프로그램에서는 0.1 ntu의 목표값을 권장했는데, 이것은 성능을 훨씬 더 높은 수준으로 높일 것을 의미하는 것입니다. 여과된 물의 탁도를 계속해서 낮추고 병원성 원생동물을 통제하려는 추세에서, MF/UF의 전과 후에 상당한 처리 노력을 기울여 원수에서 여러 종류의 오염 물질을 제거할 필요가 없는 경우에는 막 여과가 많이 쓰일 것 같습니다.

응집과 여과를 사용하는 수 처리장에서 최고의 성과를 내기 위해서는 응집제를 적절하게 적용하는 과정이 반드시 필요한 것으로 밝혀졌습니다.

공공 식수 시스템의 규제에서 생긴 또 다른 중요 추세는 처리 기법 또는 MCL이 적용되는 규제 오염물질의 수가 점차 증가한다는 것입니다. 규제 요구 사항이 확산되는 상황에 처한 상수도 업체 중에는 기존의 처리 시설을 계속해서 사용하는 것이 가장 비용 효과적인 방법이 되는 경우도 있을 것입니다(경우에 따라 운영 절차 또는 인프라를 변경할 수도 있습니다). 예를 들어 총 유기 탄소(TOC)에 대한 MCL을 만족시키기 위해 조치를 취해야 하는 업체가 응집 방식을 변경할 수도 있는 것입니다.

규제 오염 물질이 증가해야 필터 기술이 의미가 있습니다. 신설 정수장의 경우, 단일 여재 여과 또는 입자가 굵은 이중 여재 여과에서 높은 여과율로 인하여 얻어지는 비용 절감을 응집 및 여과를 사용하는 시설에서 TOC, DBP 전구물질, 또는 동화 유기 탄소의 농도를 낮출 필요성과 비교해야 할 필요가 발생할 수 있습니다. 여과지 접촉조는 깊이가 32 in.(0.81 m)인 필터층과 4 gpm/sq ft(10 m/h)의 여과율에서 5 분의 EBCT로 작동하지만, 8 gpm/sq ft(20 m/h)에서 5 분의 EBCT를 얻기 위해서는 64 in.(1.6 m)의 깊이가 필요합니다.

BAF는 유기물(DBP 전구물질)을 제거하고 생물학적으로 안정된 유출수를 생산하여 배급수 시스템에서 유지해야 할 잔류 염소량이 줄어들어 DBP 감소에 기여하므로 장래에 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있습니다. 또한 BAF는 맛과 냄새를 일으키는 화합물을 제거할 수 있는데 특히 오존 처리 후에 BAF 과정을 수행하면 맛과 냄새 제거에 뛰어나므로 장래에 더 자주 검토될 수 있습니다.

최근 내분비 교란 물질(EDC)이 관심을 받고 있습니다. 이러한 물질 중 일부가 인간의 건강에 악영향을 주는 걸로 밝혀진다면 하수를 받아들이는 지표수 처리장은 EDC를 통제하기 위한 추가 공정을 갖추어야 할 것입니다. 궁극적으로 소독 이외의 전처리 또는 후처리 없이 걸러내는 공정만 사용하여 여과 처리를 하는 것은 규제 대상이 될 높은 농도의 TOC, 색상, 또는 기타 용존 오염 물질이 없는 신선한 원수에만 적용할 수 있는 것으로 밝혀질 수도 있습니다.

현재와 앞으로 예상되는 규제 환경에서 해당 사이트에서의 포괄적인 수 처리 목적은 여과 공정을 선택했을 때 검토해야 합니다.

복수의 때때로 명백히 상충하는 규제 요구 사항을 만족하는 처리 수를 생산해야 될 필요성 때문에 많은 상수도 업체의 수 처리가 더욱 복잡해지고 있습니다. 규제 오염 물질의 수가 늘어나면서 추가 처리 공정 또는 다기능 공정(예: 생물학적 여과)에 대한 필요성이 점차 증가할 것입니다. 막 여과의 인기는 빠르게 증가하고 있으며, 전처리 및 후처리 공정과 MF/UF를 합쳤을 때 입상 여재 여과와 비교하여 적절한 자본 및 운영비용에서 복수의 수 처리 목적을 달성하는 데 경쟁력을 갖춘다면 이러한 동향은 계속 될 것입니다.

감사의 말

저자 일동은 탁도 규제의 역사에 대한 정보를 제공해 준 Alan Hess에게 감사를 드립니다.

Gary S. Logsdon은 독립 수석 프로세스 컨설턴트입니다(문의 사항은 다음을 참고 바랍니다).

연락처 : 20 Springbok Dr., Fairfield, OH 45014-6616; e-mail garylogsdonpe@earthlink.net). 물의 여과에 30년 이상의 경력을 갖추고 있으며, 수인성 질병 발생 조사에 참여했습니다. Logsdon은 컬럼비아에 있는 미주리 대학에서 토목공학 학사 학위와 위생공학 석사 학위를 받았으며, 미주리 주 세인트루이스 소재의 워싱턴 대학에서 환경 공학 박사 학위를 받았습니다. Michael B. Horsley는 미주리 주 캔자스시티 소재 Black & Veatch의 프로젝트 관리자, Scott D.N. Freeman은 수석 막 프

로세스 엔지니어, Jeff J. Neemann은 프로세스 엔지니어입니다. George C. Budd는 버지니아 주 소재 Black & Veatch의 수석 프로세스 전문가입니다. 

참고문헌

AWWA, 1971 (3rd ed.). Water Quality and Treatment (M.E. Flentje and R. J. Faust, editors). John Wiley & Sons, New York.

Baker, M.N., 1948. The Quest for Pure Water, vol. 1. AWWA, Denver. Cleasby, J.L. & Baumann, E.R., 1977. Backwash of Granular Filters Used in Wastewater Filtration.

EPA-600/2-77-016, Cincinnati.

Cleasby, J.L. et al, 1989. Design and Operation Guidelines for Optimization of the High-Rate Filtration Process: Plant Survey Results. AwwaRF, Denver.

DuPont de Nemours & Co., 1982. Permasep Products Engineering Manual. E.I. du Pont de Nemours & Co., Wilmington, Del.

Great Lakes-Upper Mississippi Board of State & Provincial Public Health & Environmental Managers, 1982. Recommended Standards for Water Works. Health Research Inc., Albany, NY.

Hazen, A., 1913. The Filtration of Public Water Supplies. John Wiley & Sons, New York.

Hess, A., 2005. Regulatory Background on Filtration. Techniques for Improving Filtration Workshop, Penn State/Harrisburg Environmental Training Center, Harrisburg, Pa.

Taras, M.J., 1981. The Quest for Pure Water, vol. 2. AWWA, Denver.

USEPA (US Environmental Protection Agency), 2006. Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule. National Primary Drinking Water Regulations. Fed. Reg., 71:3:654 (Jan. 5).