

규조토와 그 응용

유재영

강원대학교 지질학과

규조토는 평균 크기 50 내지 100 마이크로미터 크기의 규조류(diatome)라고 불리는 부유성 조류(藻類; algae) 껍데기로 이루어진 퇴적물의 집합체이다. 이들 규조는 살아 생전에 물에서 실리카를 흡수해 세포벽을 만든다. 이러한 규조들의 퇴적물이 숙성 작용을 받아 굳어져 퇴적암을 만들면 규조암(diatomite)이라고도 하는데, 통상적으로 이 것도 광석의 의미로 사용되면 규조토로 일컬어진다.

규조토는 대부분이 비정질 실리카로 구성되며, 여기에 약간의 결정질 실리카가 존재한다. 규조 자체의 복잡한 구조와 그 껍데기의 일차 및 이차 공극 때문에 규조토는 매우 낮은 밀도를 갖으며, 이 때문에 규조토는 매우 훌륭한 여과보조재, 흡착제, 첨가제, 운반제, 그리고 연마제로 사용된다.

규조토는 다른 이름으로 키젤거(kieselguhr)라고도 부르는데, 이런 이름들은 대개 점토나 다른 광물들을 꽤 포함한 불순한 규조토를 지칭할 때 사용된다. 규조토는 기술적으로 규조 퇴적물이 다짐 작용을 받아 만들어진다. 몰러(moler)는 덴마크에서 발견되는 20-25% 소성 점토를 가진 규조토를 지칭하는 용어이다.

이 글은 이러한 규조토의 등급, 각국의 생산 현황 그리고, 각 산업 분야에서의 응용현황 및 앞으로의 전망에 대해 정리한 것이다.

처리 및 등급

규조토는 대개 노천 채굴된다. 드물기는 하지만, 중국 장베이와 같은 곳에서는 지하에서 채굴되기도 한다. 규조토는 수분 함량이 60% 정도 될 때도 있는데, 보통 아주 썩 에너지원이 있지 않는 한, 이를 젖은 채로 운송하는 것은 비용 부담이 너무 크기 때문에 현장에서 말려야만 한다. 아주 드물게 규조토가 상당히 건조한 상태로 채취되는 경우도 있다.

규조토 등급은 다음 세 단계로 나뉜다: 자연(natural) 규조토, 소결(calcined) 규조토, 용결(fluxed) 규조토. 이들 등급의 규조토의 처리법을 표 1에 화학 조성을 표 2에 정리하였다.

규조토의 생산 및 산업적 응용

지금까지 그랬던 것처럼, 규조토가 가장 크게 산업적으로 활용되는 것은 여과분야일 것이다. 그러나 여과 산업의 관점이 바뀌고 있다. 여과막 기술이 좀 더 사용 가능해지면서, 몇몇 전통적 여과 분야에서는 규조토의 사용이 감소하고 있다. 그럼에도 불구하고 많은 여과 산업 분야에서 아직 어떠한 합성물도 규조토의 그 뛰어난 성질과 경제성을 능가하지 못하고 있다. 요즘은 제약 및 살충제 산업 분야에서 규조토의 여과 능력을

새롭게 인식함에 따라, 규조토의 산업적 응용 방법은 계속 새롭게 발견될 것이다.

표 1. 여러 등급의 규조토 및 그 제조 방법

규조토 등급	제조방법/특징
자 연	* 건조, 분쇄후 선풍기나 공기 싸 이클론등을 이용하여 분류
	* 구조 구조 파손 최소화를 위해 돌기 있는 롤러나 햄머 사용
소 결	* 섭씨 760-1090도로 가열
	* 구조의 용융 및 응집 덩어리 생성
	* 소결로 공극 크기 증가, 표면적 감소, 입자 크기 증가; 여과 보조제로 사용
	* 일부 비정질 실리카가 결정질화
응 결	* 소다회, 염화나트륨, 수산화나 트륨과 같은 요결제 2-8% 첨가
	* 섭씨 1200도로 가열
	* 용결제와 철의 반응으로 백색 화; 충전제로 사용
	* 상당한 응집 초래

비록 규조토 내 흔히 발견되는 결정질 실리카가 인간에 대한 발암성 물질 제 1군(Class 1)으로 공식 분류되었지만, 세계의 규조토 생산은 계속 꾸준하게 증가할 것이다. 최근에는 중국과 일본이 주 생산국으로 떠오르고 있으며, 호주에서는 새로운 채광 가능성이 인식되고 있다.

규조토는 이미 1500년 전부터 사람이 이용해 왔다는 증거가 있다. 가벼운 규조토 벽돌은 AD 532년에 세워진 이스탄불의 성당을 짓는데 사용되었으며, 19세기에는 알프레드 노벨에 의해 규조토가 니트로글리세린으로부터 다이나마이트를

만드는 과정 중 흡수제로 이용되었다. 그러나 20세기 초엽에 들어서야, 규조토의 놀라운 여과능력이 알려지면서 그 가치를 인정 받게 되었다.

표 2. 여러 등급의 규조토의 화학 조성.

	(단위:wt%)		
	자연	소결	용결
수용성	0.2	0.1	0.2
SiO ₂	85.8	92.0	89.5
Al ₂ O ₃	3.8	3.3	4.0
Fe ₂ O ₃	1.2	1.3	1.4
Na ₂ O+K ₂ O	1.1	1.2	3.3
CaO	0.5	0.4	0.6
MgO	0.6	0.4	0.6
PO ₂ O ₅	0.2	0.1	0.2
TiO ₂	0.2	0.1	0.2
작열감량	4.0	-	-

그 이후, 여과, 흡수, 운반재, 첨가제, 연마제, 및 단열재(insulator) 등의 여러 산업 분야에서 규조토의 수요는 증가되어 왔으며 또한 계속 증가하고 있다. 그러나 규조토의 생산은 몇몇 나라에서나 하고 있는 실정이다. 현재 규조토의 생산량은 대략 연간 2백만톤 정도인데, 이중 중국, 덴마크 그리고 일본이 연간 15만톤을 생산하고 그 나머지의 대부분은 미국이 생산하는 것이다.

규조토에서 가장 중요하게 보는 성질은 낮은 밀도와 높은 공극률인데, 이것이 규조토의 유통을 제한하는 요인이 된다. 규조토의 처리는 운반될 상품의 부피를 줄이기 위해 광산 주변에서 행해진다.

세계적 생산 현황

과거 수년 동안 그리고 현재에도 가장 많은 생산을 하는 나라는 미국이다. 북유럽에서는, 영국

과 독일에서 소규모로 생산되던 것이 중단되었고, 이제는 스페인, 덴마크 그리고 프랑스 만이 생산할 뿐이다. 아시아에서는 최근 중국과 일본이 주요 생산국으로 부상하였다.

세계 총 생산량은 1992년 160만 톤이던 것이 지금 대략 200만 톤에 이를 것으로 추산된다. 추정 세계 총 매장량은 약 800만 톤이다. 세계적으로 경제적으로 개발 가능한 광산들은 대부분 마이오세에서 플라이오세에 퇴적된 호성 규조토이다. 여기에 예외인 것이 미국의 대단히 큰 해성 Lompoc 광상이다. 주요 국가별 생산량은 표 3에 정리하였다. 세계 총생산량은 1997년에는 148 내지 217만 톤 1998년에는 180 내지 215만 톤으로 변화하였다.

아래에 주요 생산자에 대해 정리하였으며, 이들의 주 관심 산업 응용분야도 곁들여 설명하였다.

표 3. 주요 국가별 생산량

국가명	생산량
미국	767
중국	350
일본	190
스페인	180
덴마크	165
구 소련	80
프랑스	80
멕시코	60
대한민국	50
호주	20
세계 총 생산량	2,000

*자료출처 : 미국 지질조사소 1998년 광물 연감 의 2종

미국

미국은 가장 큰 생산자임과 동시에 소비자이다. 미국은 세계 총 생산량의 1/3 이상을 생산한다. 미국은 또한 최대 수출국이기도 하며, 세계

70여 개국에 가공 상품을 팔고 있다. 가장 보편적으로 생산되는 규조토 등급(grade)은 여과를 위한 소결 규조토(calcined diatomite)이다. 그림 1과 그림 2는 각각 이용 분야별 시장 점유율과 생산액을 나타낸 것이다.

규조토는 4개 주에서 채광되는데, 이중 캘리포니아주와 네바다주가 주 채광지이고 오레곤주와 워싱턴주는 제한된 채광을 한다. 세계 최대인 캘리포니아 롬폭(Lompoc)광상에 대한 매장량 평가를 보면, 이 곳만으로도 앞으로 수세기 동안 세계 총 수요를 감당할 수 있다고 한다. 미국 내 총 매장량은 2억 5천만 톤 정도 된다. 1998년의 미국 생산자들의 판매 및 사용 실적은 72만 5천톤, 금액으로는 1억 8천만불에 이른다. 미국 내 규조토의 주요 생산자들로는 World Minerals, Eagle-Picher, Grefco, Oil-Dri, CR Minerals 등이 있다.

중국

오랫동안 공식적인 생산량 통계가 알려지지 않았지만, 중국은 아마도 세계 2위의 생산국일 것이다. 국내 생산 능력은 40만 톤 이상일 것으로 짐작되고, 1988년에는 35만 톤 정도 생산한 것으로 추정된다. 1990년대에 들어 생산량은 매우 빠르게 증가하였다.

중국에는 14개성에 50개 이상의 광상이 있다. 매장량 중 54%는 질린성에 있다. 성유난성과 제치양성 역시 많은 매장량을 갖고 있다. 중국 내 알려진 모든 규조토 광상은 호성 기원이며, 마이오세 내지 제 4기에 형성되었다. 중국에서 가장 큰 회사로는 질린성의 Linjiang Celite Diatomite Co. Ltd,인 듯하다.

중국은 1965년부터 규조토를 수출하기 시작하였다. 주요 수출 대상국은 대만, 홍콩, 일본 그리고 이태리였다. 중국이 수입하는 규조토의 대부분은 미국으로부터 온 것이다. 1990년대 말까지는, 중국 규조토의 궁극적인 이용 목적이 단열재

였다. 1988년에서 1992년 사이에는, 단열재 부분의 시장 점유율이 84%에서 41%로 떨어졌으며, 첨가제, 여과재 및 기타 응용 분야의 점유율이 상승했다.

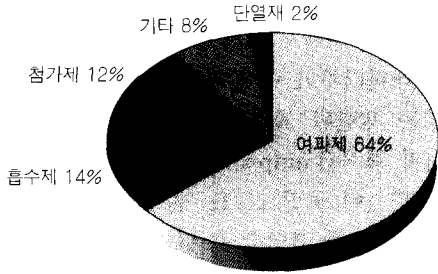


그림 1. 1998년도 미국에서 생산된 규조암(수출 물량 포함)의 산업별 용도

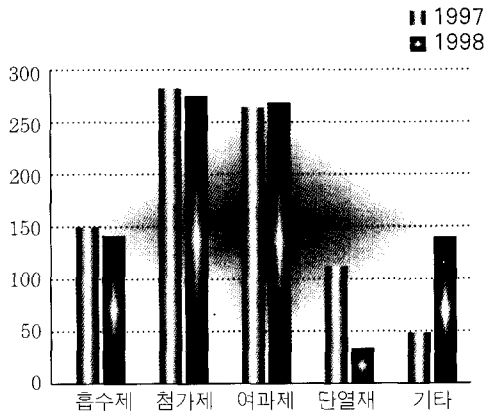


그림 2. 미국산 규조암의 주요 용도별 톤당 가격 (단위 US\$).

표 4. 쉹조우 광산건재 관리국에 의한 규조토 생산 통계치.

품 명	연간 생산량(톤)	가격(\$/톤)
규조토(SiO ₂ 65-67%)	50,000	30
규조토(SiO ₂ 82%)	1,200	220
여과 보조제	3,000	390
촉매제	1,200	292
단열재	10,000	112

표 4는 쉹조우 광산건재 관리국 (Shengjiou Administrative Bureau of Mineral Products and Building Materials)이 내놓은 규조토 생산 통계치 일부이다. 이 관리국 관할 규조토 자원은 전체의 약 30%를 차지한다. 쉹조우의 규조토(diatomaceous earth) 매장량은 약 6억톤으로 전체의 약 65%를 차지한다.

표 5. 쉹조우 규조토의 물리화학적 성질

SiO ₂ (%)	63-73
Al ₂ O ₃ (%)	13-17
Fe ₂ O ₃ (%)	2.8-5.8
CaO (%)	0.5
MgO (%)	1.1
K ₂ O (%)	2
Na ₂ O (%)	0.44
TiO ₂ (%)	0.7
집적 밀도(g/cm ³)	0.48-0.92
공극 부피(cm ³ /g)	0.6
비면적(m ² /g)	31-60
소성지수	20-33
열 전도율 계수(W/mk)	0.24-0.26
공극 지름(10~8cm)	500-6000

지방 정부는 발전 계획에 규조토의 개발과 이용 항목을 추가하였다. 이렇게 한 목적의 하나는 제지양성에서 수행되는 과학적 연구 사업에 규조토 생산물을 공급하기 위한 것이다. 여기서 규조토는 여과기 보조제와 탈색제로서 정제 기술 개발에 이용되기도 하고, 그 밖에 에너지 절약형 세라믹, 다공질 유리, 바나디움 촉매제 등의 개발에 이용되기도 한다. 상업적으로 쉹조우 규조토는 여과보조제, 플라스틱 첨가제, 고무와 화장품 첨가제, 살충제와 촉매제 등에 이용된다. 표 5는 쉹조우 규조토의 물리화학적 성질을

정리한 것이다.

일본

일본은 1979년 이후부터 규조토의 주요 생산국이었으며, 현재는 세계 3위의 생산국이다. 그러나 1997년 이전의 생산 실적에 대한 자료는 빈약하다. 일본의 규조토 생산은 1980년대 초에 급격히 증가하였으며, 1992년에 최고치에 달했다가, 그 후 일정한 양상을 보이고 있다. 1998년 생산량은 1억 9천만 톤 정도일 것으로 추정된다. 그림 3은 일본 내 규조토의 주요 이용 분야를 보여주는 것이다.

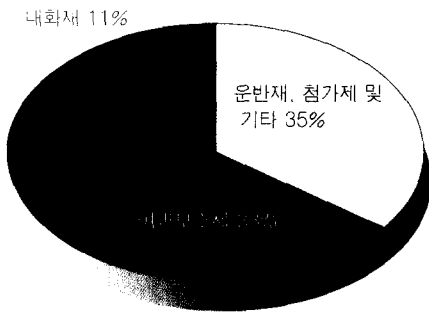


그림 3. 일본산 규조토의 용도별 소비량(1997년)

일본 내 규조토는 아키다, 이시가와, 오카야마, 오이타, 그리고 가고시마 현 등의 현생 내지 제 4기 퇴적물에서 발견된다. 1997년에는 17개의 가행광산이 있었다. 주요 생산자로는 Isoraito Mining Co. Ltd. (연 5만톤), Sakamoo Mining Co. Ltd. (연 3만톤), Hakusan Industry Co. Ltd (연 2만 5천톤), Showakagaku Co. Ltd (연 2만 5천톤), 그리고 Nittetsu Mining Co. Ltd (연 1만 3천톤) 등이 있다.

스페인

스페인 연간 18만 톤의 규조토를 생산하는 제 4위의 생산국이다. 유리카에 있는 Minas

Volcan SA는 에스파나르도와 로르카에 있는 두 공장에서 연간 6만 9천 톤의 규조토를 생산한다. 이 회사는 유리카, 알바체데, 알메리아, 마드리드, 톨레도 등의 광업권을 갖고 있다. 실리카 함량 45-80%의 세 품위의 규조토가 생산된다.

Minas Volcan 제품은 여과, 요업, 시멘트, 단열 및 방음, 그리고 사료 첨가제 등에 이용된다. 이 제품은 국내에서도 이용되고 유럽, 특히 영국과 프랑스에 수출되기도 한다. 규조토는 알리칸테의 Celite Corps에서도 생산된다.

덴마크

덴마크 규조토는 "몰러(moler)"라 부르는 것으로, 20 내지 25%의 소성 점토를 포함한다. 이 점토 중, 60%는 몬모릴로나이트 40%는 일라이트이다. 이러한 조성은 이 나라에서만 있는 것이다. 덴마크 몰러는 약 6천 4백 만년 정도 된 것으로 이 곳이 아열대 바다에 의해 덮였을 때 만들어진 것이다. 몰러는 소결되더라도 실리카가 거의 없기 때문에 다른 규조토와는 달리 건강에 해롭지 않다. 주요 몰러 생산자로는 Damolin과 Skamol이 있다.

프랑스

1998년 프랑스의 연간 생산량은 약 8만 톤으로 추산된다. Elf Atochem의 자회사인 Ceca사가 1982년 이후 연간 7만 5천 톤의 생산 능력을 갖추고 두 공장을 가동하고 있다. 이 두 공장 가행 대상은 따뜻해서 규조가 변성하기 좋은 고대 화구이다. Ceca 제품의 대부분은 Clarcel이라 불리며 여과를 위해 팔린다. 일부 제품은 페인트 첨가제로서 팔리기도 한다.

기타

이 밖에 알제리, 호주, 캐나다, 멕시코, 뉴질랜드, 루마니아도 주요 규조토 생산국이다.

건강 문제

자연산 규조토는 대개 비정질 실리카를 포함하나, 크리스토팔라이트와 같은 결정질 실리카도 최대 3%까지 함유하는 경우도 있다. 소결 작용을 통해 크리스토팔라이트의 함량이 60%까지 증가할 수도 있다.

결정질 실리카를 포함한 먼지는 규폐증을 일으킬 수도 있다. 규폐증은 폐에 생기는 섬유증으로 실리카 입자를 핵으로 폐에 상처 난 조직의 알갱이가 산포되는 질병이다. 이 알갱이는 폐가 산소를 추출하는 능력을 감소시켜 무력감을 일으키고 중국에는 사망에 이르게 하는 질병이다. 미국에서는 매년 250명 정도가 규폐증으로 죽어간다.

결정질 실리카의 보건 문제에 대해 연구하는 사람들 사이에서는 다음과 같은 두 가지 의문이 오랜 동안 논쟁되었다: 첫 번째는 모든 종류의 결정질 실리카는 똑같이 건강에 해로운가 하는 점이고, 두 번째는 결정질 실리카가 직접 폐암을 유발하는가 아니면 규폐증을 일으킨 후 폐암으로 발전하는가이다. 1987년과 1996년간에는 결정질 실리카가 잠재적 발암물질 2A군 (Group 2A)에 속해 있었다.

1996년 국제암연구조합 (IARC: International Agency for Research on Cancer)은 이 위험성에 대해 논의하기 위해 회의를 소집하였다. 1997년에 출판된 이 회의의 결론은 결정질 실리카가 발암물질 제 1군 (Group 1)에 속한다는 것이었다. IARC는 직업상 석영 및 크리스토팔라이트와 같은 결정질 실리카를 흡입한 사람으로부터 발암성이라는 충분한 증거를 확보했다고 하였다.

그러나 결정질 실리카가 발암성이라는 결정은 오직 한 표를 얻으며 통과하는데 그쳤다. 많은 사람들은 동물 실험을 통해 하는 이런 주장을 뒷받침할 만한 충분한 증거가 없다고 믿는다. 인간에 대한 연구 중 일부는 흡연 효과를 전혀 고려

하지 않았다.

이 회의 결과에 반대하는 사람들은 이 것이 시장을 불안하게 한다고 느끼고 있다. 전에 언급한 두 가지 의문에 대해서는 충분히 심도있게 다루어진 못한 듯 하다.

규폐증 없이 결정질 실리카가 폐암을 일으킨다는 증거는 없는 상태이다. 이는 다시 말해서, 규폐증의 위험도를 평가하고 직업적 노출에 대한 세금을 부과함으로써 이를 줄일 수 있다면, 폐암의 발병 위험도 또한 줄일 수 있다는 뜻이다.

1997년의 IARC 회의 결과에 이어, 미국 직업안전보건국 (OSHA: Occupational Safety and Health Administration)은 결정질 실리카를 0.1% 이상 함유한 물질은 제 1군 발암위험성이 있다고 표시하라 규정하였다. 많은 국가에서 결정질 실리카 노출 정도의 규제 기준을 정하였다(표 6).

표 6. 세계각국의 결정질 실리카 노출 정도 규제 기준.

국가	담당관서	일일 8시간 노동당	
		노출 제한 기준 (mg/m^3)	먼지 유형
미국	ACGIH	0.10	흡입 먼지량
캐나다	NIOSH	0.50	
영국	ACGIH	0.10	흡입먼지량
	HSE	0.10	흡입먼지량
독일		0.30	총 흡입 가능 먼지량
		0.15	미세 먼지량
		4.00	석영 1% 이상인 미세 먼지량
호주	중앙정부	0.10	흡입 먼지량
서호주	주정부	0.20	흡입 먼지량
스웨덴		0.10	흡입 먼지량

미국의 경우, 석영은 정부산업위생연합회 (American Conference of Governmental

Industrial Hygienists)가 TLV(Threshold Limit Value)=0.05mg/m³로 낮추도록 지정하였다. 이렇게 낮추는 방법으로는 습식 시추를 한다든지, 광석을 다루기 전에 물을 뿌린다든지, 배기 시설을 개선한다든지 여러 방법이 있다. 결정질 실리카를 다루는 사람들에게 가장 위험한 것은 쓰고 난 자루에 남아있는 찌꺼기이다. 이 남은 먼지의 양은 자루의 크기에 상관없이 거의 일정하기 때문에, 규조토를 가능한 한 큰 자루에 담는 것이 이 위험성을 줄이는 길이다. 이러한 위험성 때문에 규조토의 산업적 응용이 중단될 것이라고 생각하지는 않는다.

가 격

1995년 미국 여과 보조제 수요 팽창으로 규조토의 가격이 한 차례 크게 올랐다. 그 이전에는 비교적 안정된 가격을 유지했고 1996년 말부터는 대개 인플레이션 정도 수준에서 가격이 오르락내리락 했다 (표 7).

표 7. 규조토의 가격동향 (단위 : 영국 파운드/톤).

등급(영국산)	1994년 12월	1995년 평균	1995년 평균
소결 여과 보조제(미국)	325-350	340-368	370-410
용결 여과 보조제(미국)	340-380	355-395	380-420

산업적 응용과 시장

규조토 시장은 응용 분야에 따라 많이 다르며, 각 분야에서 요구하는 사양도 차이가 많다. 표 8은 규조토의 주요 이용 분야를 정리한 것이고, 그림 1은 미국 내에서의 각 분야 수요량을 나타낸 것이다.

현재 약 규조토 생산량의 60%가 여과 보조제로 쓰인다. 최근에 여과용 규조토의 소비가 분야 및 지역에 따라 줄었다. 그러나, 개발중인 여과 응용 분야가 워낙 다양해서 규조토의 장래는 전체적으로 밝다. 일반적으로 규조토는 아직 다른 경쟁 상품에 비해 가격 경쟁력이 높다.

다른 주요 이용 분야 - 첨가물과 흡수물같은 -의 시장은 상당히 안정되었고 성숙되었다.

표 8. 규조토의 주요 산업적 이용 분야

분 야	산 업	분 야	산 업
〈여과〉		산업누출물	
음료	맥주, 포도주, 양주 주스	석유 시추	
기름	지방, 석유	트랙션	
물	수영장, 음료수	〈단열재〉	
화학	드라이클리닝, TiO ₂ , 첨가제	열	벽돌, 골재, 형상재
제약	항생제	소리	
금속	냉각수	〈연마재〉	
식품	아미노산, 젤라틴, 이스트	광택제	은, 자동차
설탕		세제	
〈첨가제〉		〈운반재〉	
코팅	페인트 성냥	축매	Ni, V, 인산
플라스틱	폴리에틸렌	농업화학	살충제, 비료
고무	타이어	〈기타〉	
종이	클러치페이퍼, 담배	화학추출	제약, 수혈
건설	콘크리트, 몰타르, 아스팔트	영김방지제	플라스틱 필름
치과	의치본	안정제	액/건상 분말
〈흡수제〉		콘디셔너	음식, 토양
애완동물	분말, 과립	반응성 실리카	아세틸렌 개스 실린더(폭발방지용)
위생제		농업	비료, 살충제, 보조제 등
독성 폐기물	선광 찌꺼기		

새로운 응용의 개발로 흡수제 시장은 약간 성장하는 편이다. 전통적인 규조토 시장인 단열재 시장은 산업과 경제의 일반적 상황에 상당히 영향받는 곳이다. 화학적 추출과 살충제는 요즈음 떠오르는 시장이지만, 아직은 비교적 소비량이 적다.

여과

규조토는 높은 공극률과 투수율을 갖고 있다. 이것이 이 광산물이 뛰어난 능력으로 액체로부터 0.5 μ m 보다도 적은 입자를 걸러내도록 하는 것이다. 규조토는 1920년대부터 많은 양의 액체, 특히 맥주에서 불순물을 걸러내는데 사용되어 왔다.

여과 과정

규조토 여과 보조제는 일반적으로 기계적 여과 과정에서 두 가지 다른 방식으로 이용된다. 즉, 사전 피복 과정(precoating)과 여과액 주입 과정(bodyfeeding) 단계에서의 이용이다. 여과 보조제는 건조한 분말 형태로 팔며, 사용 전에 균질한 죽처럼 만든다. 부유물로서 여과 보조제를 첨가하는 분량은 제품에 따라 다르다. 예로 Ceca SA의 Clarcel 여과 보조제는 보통 전체 부피의 2-10% 정도 넣는다.

사전 피복 단계에서는, 규조토 죽을 여과체 주위로 몇 차례 쏟아 넣어 0.5 내지 2 cm의 다공질체 또는 막이 생기도록 한다. 이렇게 하면, 여과기 표면에 불순물에 의해 단단하고 물이 통하지 못하게 하는 층이 생기면서 구멍을 막아버리는 일이 너무 일찍 생기는 것을 막아준다. 사전 피복은 여과기의 투수성을 유지시키고 또한 작은 부스러기들을 붙잡아 두기 위한 것이다. 이래서 여과 직후부터 바로 깨끗하게 되는 것이다. 여과가 끝나면 사전 피복물은 여과기로부터 쉽게 떼어 내어 제거할 수 있다.

사전 피복이 형성되면, 그 나머지 죽들은 액체

와 함께 여과된다. 액체를 여과 시스템에 주입시키면, 같이 주입되는 규조토 입자들은 사전 피복층에 더해지면서 위와 비슷한 이유로 투수성을 유지시킨다. 이는 새로운 여과기 표면이 생기는 효과를 낸다. 여과가 진행되면서 여과물이 공극을 막는 것을 피할 수는 없으며, 이 결과 여과액은 더욱 맑게 걸러진다. 적정 수준의 유속이 더 이상 유지되지 않거나 여과기 양쪽의 압력차가 너무 심하면 여과를 멈춰야 한다.

여과 보조제의 필요 양은 다시 사용되는 규조토의 상품과 등급에 따라 다르다. 첨가하는 여과 보조제의 부피는 보통 여과되어야 하는 불순물 총량의 50-100% 정도 된다. 표 9는 여과 보조제로서의 규조토의 주요 성질을 정리한 것이다. 입자 크기뿐만 아니라, 등급 또한 여과 보조제로서의 활용에 영향을 미친다 (표 10). 일반적으로, 자연산 규조토가 가장 맑게 거르나, 속도는 가장 느리다. 소결 규조토는 가장 빠르나, 맑은 정도는 떨어질 수도 있다.

표 9. 여과 보조제로서의 규조토의 주요 성질

성질	여과 보조제로써의 역할에 있어 중요한 이유
복잡한 구조	액체는 쉽게 통과시키고 고체는 걸러내기 위한 높은 투수성과 공극률을 만듦
화학적 안정성	여과액과 반응하지 않음
낮은 밀도	적절한 두께 및 적은 양으로도 여과 가능
입자 크기 범위	이용 목적에 따라 선택 가능, 여러 종류의 여과기 및 여과액에 사용 가능
낮은 압축율	잘 뭉그러지지 않는 다공질 여과물 형성하여 최대 유속과 여과 능력을 유지함

여과 보조제 선택시 고려하여야 하는 사항은 원하는 정제 정도, 여과될 액체의 종류, 여과 속도, 그리고 불순물의 종류 등이다. 그러므로 자연산 규조토는 여과액이 매우 맑아야 하는 포도

주 같은 것의 여과에 사용하는 것이 적당하고, 소결 규조토는 맑은 정도가 덜 중요한 과일즙과 같은 것의 여과에 적당할 것이다.

상업적으로 판매되는 규조토의 투수율은 대개 0.03 내지 3 다아시 (darcy) 정도 된다. 입자 크기는 1 내지 100 마이크로미터 정도 되지만, 대개 14 내지 55 마이크로미터 사이의 값을 갖는다.

표 10. 등급에 따른 규조토의 특성.

	자연산 규조토	소결 규조토	용결 규조토
pH	7.0-8.0	7.0	10.0
비중	2.0	2.1-2.2	2.3
밀도(건조) (kg/m ³)	112-120	128	144-312
밀도(수화) (kg/m ³)	256-272	304-368	288-320
150 mesh크기 이하(%)	1-2	2-7	6-40
수분(%)	1-3	0.5-1	0.1
입자크기(mm)	0.01-0.05	0.01-0.10	0.01-0.50
통과 유속 (m ³ /m ² h)	0.16-2.0	0.04-2.0	0.04-49
표면적(m ² /g)	10-30	3-7	0.5-5
투수율(darcies)	0.057-0.062	0.068-0.53	1.2-30
중간 공극 크기 (μm)	1.5-2.5	2.5-5.0	7-22
굴절률	1.46	1.46	1.46
색	담황색/회색	분홍색	흰색

자료출처 : Industrial Mineral Handybook (IM Publications).

주조 산업의 경우, 여과를 위해 필요한 규조토의 양은 평균 1 리터 맥주당 1 그램 정도다. 따라서 이 산업으로부터 많은 양의 폐기 규조토가 발생된다. 규조토가 잠재적 유해물이라는 점은 이 것의 폐기에 비용이 많이 들며 또한 매우 조심스러워야 함을 의미한다. 규조토의 폐기에 대

한 법령은 나라마다 다르며, 중앙 유럽이 가장 엄격한 편이다. 산업체들 사이에서는 EU와 같은 곳에서 규조토의 사용을 전면적으로 금지하지 않을까 우려하고 있다.

여과막 기술 - 쓸만한 대안인가?

규조토의 폐기와 관련된 문제점과 여과하기에는 많은 부피가 필요하다는 점 때문에 다른 여과 기술, 특히 여과막에 대한 연구가 시작되었다. 여과막 시스템은 알갱이들에 의해 손상되기 쉬우며 수리하는데도 비싸다. 규조토 여과 시스템은 이미 많은 장치에 설치되어 있으며, 따라서 음료 업체들은 많은 돈을 들여 여과막 장치 설치하는 것을 꺼린다. 특히 맥주업체에서는 비용 문제에 대해 민감한데, 이는 맥주 산업이 매우 큰 규모로 하는 중저가 산업이기 때문이다.

그림 4는 규조토와 여과막 장치의 비용 측면을 비교한 것이다. 규조토 장치가 설치하기에는 반, 운영하기에는 1/3 정도의 비용밖에 들지 않음을 알 수 있다. 여과막 기술의 하나인 교차류 미세여과 (crossflow microfiltration: CFMF)에서는 액체가 고분자, 세라믹, 또는 섬유상 피막의 막을 빠른 속도로 통과한다. 여과액 방향은 주입액의 방향과 직각이다. CFMF 기술은 이스트 및 기타 여러 불순물들로 인해 맥주 여과와 같은 곳에는 적용하기에 난점이 많으나, 불순물이 적은 포도주 및 사이다 업계에는 보다 쉽게 응용될 수 있을 것이다. 많은 규제와 법령의 위협 때문에, 몇몇 큰 맥주회사들은 CFMF 여과로 선회할 움직임을 보이고 있으며, 여기에 다른 회사들도 따라갈 움직임이 있다.

규조토 여과 보조제의 미래

일견하기에는 규조토와 여과막은 각각 응용 분야의 특성에 따라 그 쓰임새가 있을 것으로 보인다. 주조 산업의 경우 이스트 죽의 여과 같은 적은 규모의 것에 대한 여과막 여과 기술이 이미

훌륭히 자리잡았다. 규조토 여과기는 여과막을 뚫고 나갈 수 있는 젤라틴이나 기름떡 같은 액체를 여과하기에 적당할 것이다. 규조토 여과는 또한 큰 용량의 여과와 같은 것에 있어서는 아직 타의 추종을 불허한다.

규조토 산업에 한 가지 고무적인 것은 많은 여과 산업체에서 수혈 이전에 피를 여과하는 것과 같은 새로운 응용 분야의 연구 개발을 수행하고 있다는 것이다. 규조토와 합성 여과막을 함께 사용하는 일도 증가하고 있다. 여과막 기술의 발달은 규조토의 이용을 막는 것이 아니라 오히려 그 응용 가능성을 높이는 것처럼 보인다.

첨가제

규조토는 낮은 밀도, 높은 흡수성, 화학적 안정성, 그리고 색 때문에 매우 다양한 곳에 첨가제로 사용된다. 첨가제로 사용되는 규조토의 입자 크기는 1 내지 50m 정도 된다.

좀 더 흰 색을 띄는 시약 첨가 소결 등급(flux calcined grade)이 주로 첨가제로 이용된다. 이 분야에서 가장 중요한 것은 페인트 산업이며, 그 다음이 플라스틱, 특히 폴리에틸렌 산업이다. 규조토는 화학적으로 안정하기 때문에 색소들의 역할을 방해하지 않는다. 페인트 분야에서, 규조토는 또한 광택과 번쩍거림을 죽여주는 억제제로도 사용된다. 규조토의 공극률과 입자들의 큰 표면적은 페인트가 좀 더 빨리 마르도록 하며, 벗겨짐을 방지한다. 규조토의 미묘한 구조가 (페인트) 층간 접착력을 높이는 역할도 한다.

흡수제

규조토는 입자들의 높은 공극 부피 때문에 자신의 무게의 2-3 배나 되는 액체를 흡수한다. 덴마크는 규조토로 만든 고양이 분노 치우개(cat litter)의 최대 생산국이다. 그러나, 세계 시장 규모로 볼 때 이 분야에서 규조토가 차지하는 비중은 매우 적다.

규조토는 가정에서 냄새 제거 및 흘린 것들의

제거에, 농업에서는 지력보강제 (bedding supplement)와 암모니아 조절제로, 식품 산업에서는 누출된 기름기 제거에 이용된다. 또한 규조토는 빙판 길 미끄럼 방지와 녹 제거를 위해 사용되기도 한다. 기본적으로 규조토는 액체를 고화하여 제거를 용이하게 하고, 이들이 다시 누출되는 것을 방지한다. 이러한 성질 때문에 규조토는 또한 화학적 추출에 이용되기도 한다 (뒤의 화학적 추출 참조).

규조토를 석유 시추용 점토나 시멘트에 첨가하면 물이 가능한 유체에 머무르도록 함으로써 쉽게 마르는 것을 막아준다. 점토 내 이와 같은 흡수제가 없다면, 물은 시추 유체로부터 시추공 벽의 깨진 틈으로 새어나갈 것이고, 결국 더 이상 시추를 하지 못하게 될 것이다.

단열

규조토는 낮은 열 전도율, 높은 용융점, 낮은 열 팽창율, 고온에서의 낮은 수축률, 훌륭한 열 충격 저항성, 그리고 온도 증가에 따른 강도 향상의 성질을 갖는다. 규조토는 이와 같은 여러 가지 성질로 인해서 매우 뛰어난 단열재 역할을 한다. 단열은 규조토를 벽돌 또는 그보다 적은 암석 덩어리로 만든 것을 이용하여 한다.

모든 규조토 상품 중, 덴마크의 몰러가 단열재로서는 최고이다. 이것은 또한 단열뿐만 아니라 방음 효과도 있다. 단열의 최대 온도는 보통 950 내지 1000℃이다.

신흥 시장

살충제

규조토가 살충 효과가 있음은 이미 수세기 전에 알려진 사실이지만, 메틸 브로마이드와 같은 효과적 화학 살충제의 등장으로 그 사용량이 현격히 줄어들어 왔다. 규조토는 저장 곡물의 해충의 곁에 달라붙은 다음, 이 해충의 습기를 빨아

들여 말려 죽인다.

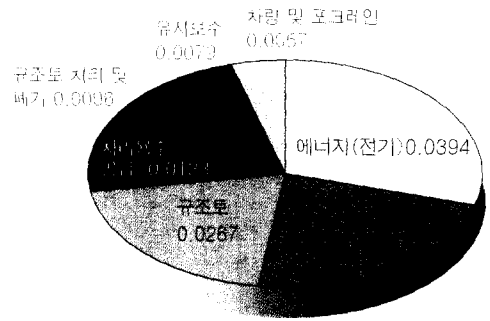
살충제로서 메틸 브로마이드의 수명은 얼마 남지 않았다. "오존층 파괴 물질에 관한 몬트리얼 규약"은 이 물질을 심각한 환경 파괴물질로 규정하였다. 미국과 캐나다는 이미 선적된 것과 검역용 훈증제를 제외하고는 이 물질을 2001년까지는 사용 금지를 완수하기로 동의하였다. 토양, 일용품 및 건축용 훈증제로서 메틸 브로마이드의 효과적인 대안의 필요성이 점차 절실해지고 있으며, 이러한 대안으로 열처리와 병행되는 활성 규조토 (enhanced diatomite earth: EDE)의 사용이 주목받고 있다. 여러 나라에서 일용품 및 건축용 살충제용 메틸 브로마이드가 차지하는 비중이 15%인데 반해, 캐나다에서는 이 비중이 50%에 이른다. 그래서 캐나다에서는 메틸 브로마이드의 대용품을 개발하기 위한 연구가 많이 수행되었으며, 이러한 연구 중 캐나다 농업식품국, 미국 농업부, 케이커 오토밀사, 그리고 헤드리 테크놀로지사 등이 연합한 것도 있다.

이 연구 결과, EDE와 열처리의 병행이 실험실에서뿐만 아니라 상업적인 규모의 테스트에서도 웬만한 해충들의 제거에 효과가 있음을 발견하였다. 여기에 사용된 EDE는 밴쿠버에 있는 헤드리 테크놀로지사가 개발한 "Protect-It"라는 제품이다. 이 EDE는 규조토를 건조시키고 빵아 규조 입자를 골라 만든 것으로 입자 크기가 직경 1 내지 100µm 정도 된다.

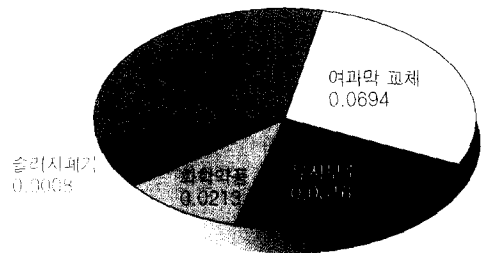
"붉은 밀가루 벌레" (Red Flour Beetle: *Tribolium castaneum*)에 행한 실험 결과를 보면, 섭씨 50도로 가열하고 EDE를 평방미터 당 30 그램 뿌렸을 경우 일주일 후 이 벌레들이 모두 죽었지만, 열만 가하였을 경우는 25%가 살아남았다. "헛갈려 밀가루 벌레" (Confused Flour Beetle: *Tribolium confusium*)에 대한 실험 결과, EDE에 노출되었을 때 13 내지 22시간이 경과되었거나 온도가 섭씨 41도에 이른 경우 모든 벌레가 죽었다. 그러나 가열만 하였을 경우, 32-38 시간이 경과되었거나 온도가 46도에 이르러서야 벌레가 죽었다. 따라서 이 실험 결과들은

열처리를 EDE 살포와 함께 하면 비용도 절약될 뿐만 아니라 효율도 높일 수 있음을 보여준다.

이 실험 결과들이 실제 규모의 것에 대해서도 또 같이 적용되라는 법은 없으나, 규조토가 살충제로서의 역할을 함은 분명하다고 볼 수 있다. 과거에는 화학적 살충제가 광범위하게 사용되어 이 분야에서 규조토의 필요가 거의 없었다. 지금은 환경 보호 문제로 인해 규조토 사용을 모색할 만한 길이 열리고 있다.



[규조토 시스템 (총비용: \$0.1861/1000갤론)]



[여과막 시스템 (총비용: \$0.3090/1000갤론)]

그림 4. 정수장에서의 여과 시스템 비용 비교

화학적 추출

규조토는 화학, 약학 및 생체 공학 분야의 산업에서 액체-액체 추출에 이용되는 성분으로서의 새로운 활용 가능성이 발견되었다.

고전적인 액체-액체 추출은 상대적으로 대용량의 시료에 대해서만 적용할 수 있는 매우 느린 작업이었다. 지금은, 화학 공업에서 신약 개발

및 선구적 기술 개발의 경쟁이 치열해짐에 따라, 많은 작은 규모의 실험에서 정확한 화학 반응을 수행할 수 있는 필요성이 대두되었다.

액체-액체 추출의 목적은 섞여 있는 두 개의 액체 화합물을 분리하는 것이다. 이 혼합물을 용매에 녹여 그 중 하나 또는 두 개의 pH를 적절히 변화시킨다. 그러면 화합물들은 알아서 물과 용매로 나뉘어 녹게 되고, 물과 용매는 적절히 분리되어 두 층을 이루게 된다. 이 두 층을 주의 깊게 나누어 따르면 비로소 액체-액체 추출이 이루어지는 것이다.

웨일즈에 있는 'International Sorbent Technology (IST)' 같은 회사는 액체에 변형된 구조토를 첨가하는 새로운 추출 기술을 개발하였다. 이 회사는 미국과 유럽의 구조토를 이용하는데, 이 기술의 핵심은 구조토의 흡수 능력을 이용하는 것이다.

구조토 과립을 대롱이나 주사기에 넣고 액체가 빠져나갈 수 있도록 그 밑에 구멍을 뚫는다. 묽은 산을 구조토에 더하면, 과립은 매우 얇은 막으로 덮히고 이때부터 표면 전하 때문에 물과 같은 액체로 끌려가게 된다. 두 화합물 혼합 액체를 용매와 함께 더하면, 각 구조토 입자에 화합물의 분배가 일어난다. 물과 하나의 화합물은 구조토 입자에 붙게되며, 다른 화합물과 용매는 따라 낼 수 있게 된다. 그 다음 구조토 입자를 비교적 쉽게 액체로부터 제거하는데, 이러면 분리가 모두 끝난 것이다. 이때 묽은 구조토에 흡착되면서 마치 고화 된 것과 같은 효과를 낸다.

고상 추출(solid phase extraction: SPE)이라 불리는 이 방법은 약간의 결점도 있지만 여러 가지 장점도 있다. 이 방법은 대규모의 시료에 적용시키기에는 너무 비싸 작은 규모의 추출에 적당하다. 이용되는 구조토는 매우 순수하고 균질해야 하지만, 과학적인 실험에 쓰이는 것치고는 매우 싼 편이다. 몇몇 불리한 점에도 불구하고,

SPE가 매우 빠르고 효율적인 방법이라는 점은 상당히 매력적이다. 이 방법은 작은 규모로 수천 개의 반응을 동시에 진행시킬 수 있다. 이전의 방법들은 굉장히 비싼 크로마토그래프 장비를 요구했으며 이런 경우 보통 실험실에서 하루 20개 정도의 추출이 가능했을 뿐이다.

추출 보조제로 구조토를 사용하면 필요한 화합물과 용매의 양을 줄일 수 있다. 보통 액체-액체 추출은 표면 장력 효과 때문에 5ml보다 적은 시료에 대해서는 수행할 수 없다.

구조토는 매우 치밀하게 섞여 분리하게 힘든 에멀전(emulsion)의 형성을 막아준다. 이 때문에 이 방법에서는 매우 다양한 화합물을 추출할 수 있다.

전통적으로 액체-액체 추출법은 서로 섞이지 않는 매우 제한된 수의 용제 조합들만 사용할 수 있다. 물과 에테르 또는 물과 에틸 아세테이트가 가장 흔히 사용되는 것이다. 이에 반해 SPE 방법은 서로 섞이는 용매를 사용할 수 있으며, 따라서 훨씬 활용성이 높은 방법이다.

구조토 기술은 고액의 상품을 출현시켰다. 주사기와 1그램의 변형 구조토의 가격이 1 파운드(우리돈 약 2,300원) 정도 한다. SPE 방법은 생물학 연구 시료들을 빨리 정제하는 기술과 핵자기 공명 응용기술로부터 유래되었다. 생물학적 및 의학적 활용 분야는 정말로 큰 시장이기도 하다. SPE는 정확한 분석을 하기 전에 액체를 1차 정제하는데도 사용할 수 있다. 예를 들면, 구조토는 오줌으로부터 단백질을 추출하는데 사용될 수도 있다. 단백질이 있으면 질병을 알아내는데 더 많은 시간이 소요된다. 비록 지금 이 분야의 시장 규모는 작지만, 연구 분야에서 SPE의 수요는 증가하고 있으며, 이와 같은 형태의 대규모 제조 분야가 개발될 가능성은 충분히 있다.

(*이 해설문은 'Industrial Minerals' 2000년 3월호 기사를 토대로 작성되었음.)