

현장 풍력정화장치를 이용한 석면 오염토 처리에 관한 연구

A Study on Treatment of Asbestos Contaminated Soil with a Field Wind Power Purification Device

최 광 보[†] · 이 승 호¹⁾

Kwang-Bo Choi · Seung-Ho Lee

Received: August 5th, 2016; Revised: August 9th, 2016; Accepted: September 6th, 2016

ABSTRACT : Soil filling or replacement are routinely applied for soil restoration of domestic asbestos waste contaminated areas. However, since these soil recovery methods could not fundamentally solve the asbestos contamination, number of research on new alternative technologies have been carried. In this study, comprehensive laboratory test results utilizing wind power apparatus are used to design wind power purification device that can be applied in practice. Preliminary tests were carried out with wollastonite or actual asbestos waste contamination soils to study purification efficiency. Asbestos content measured immediately after in-situ test on asbestos-contaminated soil satisfying for purification standard showing less than 0.25% asbestos content from all tests, hence, analyzed to ensure over 90% of clean soil recovery rate and considered to be excellent applicability of future asbestos-contaminated soil purification.

Keywords : Asbestos waste, Contaminated soil, Wind power purification device, Asbestos content, Clean soil recovery rate

요 지 : 국내 폐석면 오염지역의 복원공사는 대부분이 토양개량 공법인 복토와 환토 공법을 일률적으로 적용하고 있으나 토양개량 방법만으로는 석면오염을 근원적으로 해결할 수가 없어 새로운 대체기술에 대한 연구가 수행되어오고 있다. 본 연구에서는 풍력장치를 이용한 실내시험 결과를 종합하여 실제 현장에 적용할 수 있는 풍력정화장치를 설계·제작하였으며, 규회석을 이용한 예비시험 및 실제 석면오염토를 이용하여 농경지토양에 대한 정화효율에 대한 연구를 수행하였다. 석면오염토에 대한 현장시험결과 토출직후 석면함유량은 모두 0.25% 미만으로 정화기준을 만족하였으며, 청토회수율 90% 이상을 확보한 것으로 분석되어 향후 석면오염토양 정화분야의 적용성이 뛰어난 것으로 판단된다.

주요어 : 폐석면, 오염토, 풍력정화장치, 석면 함유량, 청토회수율

1. 서 론

산업 활동에 의한 석면의 토양 오염은 작업장 주변 혹은 광산 인근 주민들에게 건강 피해를 주고 있어 석면 사용에 대한 문제점이 대두되고 있다. 석면의 비산 특성상 광범위한 지역이 오염되고 있는 상황이지만 아직까지 국내에 마땅한 복원 기준이 정립되지 않아 중금속 오염토양의 복원 기준을 적용하고 있는 실정이다. 현재 일률적으로 적용하는 복토 및 환토 공법은 특성상 토공량이 많이 발생하고, 비오염토를 채취할 토취장과 오염토를 매립할 매립장이 필요하다. 이는 공사비 상승의 요인이 되고, 토취장 및 매립장 확보가 어려워 복원사업 진행에 어려움이 있다. 특히 복토공법은 공사 후 농경지의 지반고 상승으로 농업용수의 용·배수가 곤란해 질 가능성이 있어 적용에 제한이 있다. 복토 및 환토공법은 석면 오염토양 복원의 대안이 될 수도 있으나 위와 같

은 경제성 및 시공성, 사후관리의 문제점을 내포하고 있다. 이러한 처리공법은 오염된 토양의 석면제거를 통해 향후 오염 개연성을 원천으로 방지할 수 있는 기술이 아니라 일시적으로 석면의 비산을 방지하는 미봉책에 불과하다. 또한 지정폐기물인 석면이 별도의 처리 없이 매립장으로 옮겨지고 있어 석면 이동 중 추가적인 오염의 위험이 있으며 폐기물 매립장 인근 주민의 민원 또한 끊이지 않고 있다. 더구나 석면 매립을 위한 지정폐기물 매립장이 조만간에 포화상태에 이를 것으로 예상되어 근본적인 석면 오염토양 처리를 위한 원천기술개발이 절실한 실정이다. 토양 내 석면 처리 기능에 대한 기존의 연구는 국내의 경우 풍력장치를 이용한 석면오염 토양의 비산특성 평가 연구가 Lee et al.(2014)에 의해 수행되었으며, 기계적 분산/교반(mechanical dispersion/agitation) 메커니즘에 기초하여 토양 또는 퇴적물과 같은 고형 환경시료에 대한 토양 분진 발생장치 개발을 통한 연구

[†] Naekyoung Engineering (Corresponding Author : ckblje@hanmail.net)

1) Department of Civil Engineering, Sangji University

등이 Lee & Lee(2010)에 의해 이루어졌고, 폐석면 광산 주변 토양 지하수 석면함유 정밀조사에서 토양 중 석면 비산에 대한 연구를 환경공단(MOE, 2010a; 2010b)에서 실시하였다. 또한, 석면 비산장비를 이용한 토양 중 석면 비산 특성 및 위해성 평가에 대한 연구(Kim et al., 2012; Kim et al., 2014; Ryu, 2013; Kim, 2013; Bae, 2014; Kwon, 2014)가 국내에서 이루어지고 있다. 국외의 경우는 주로 실내시험기구에 의한 석면을 강제적으로 방출시켜 흡입 장치를 이용한 석면 농도를 측정하는 연구(Kominsky, 2010)가 이루어지고 있으나, 선진국의 정화 사례는 대부분 석면의 비산을 최소화하고 복토와 녹지화 등의 처리 기준이 이용되고 있는 것으로 조사되었다.

상기 내용과 같이 석면 오염 토양 처리를 위한 기존 연구는 국내 및 국외의 경우 모두 실내시험 기구를 이용한 기술 개발을 위한 연구는 지속적으로 수행되고 있으나, 복토 및 환토 방법 외에 별도 장치를 이용한 Pilot 장치인 토양 내 현장 풍력 정화 장치 개발은 거의 없는 실정으로써, 본 연구는 종래의 기술에 비해 상당히 개량된 연구 개발이 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Lee et al.(2014)에 의해 수행된 실내시험 결과인 풍력장치를 이용한 석면 오염 토양의 비산 특성 연구 결과를 종합하여 실제 현장에 적용할 수 있는 Pilot 장치인 현장 풍력 정화 장치를 설계하고 이를 제작하였으며, 규회석을 이용한 예비시험 및 실제 석면 오염토를 이용하여 농경지 토양에 대한 정화 효율을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 현장 풍력정화장치 설계

본 연구에서 개발된 현장시험용 풍력 정화장치는 크게 송풍장치, 운송장치 및 집진장치로 구분되어 있으며, 송풍장치에서는 투입된 오염토가 분쇄기에서 분쇄된 후 벨트 컨베이어를 통하여 스크린 그리드로 이동하여 입자가 커 비산되지 않는 크기의 입자가 분리되고 #1 송풍기를 통하여 운송덕트로 토출되도록 하였다. 운송장치로 토출된 오염토는 순환덕트와 #2 송풍기에 의해 운송덕트 내에서 순환되면서 흡과 석면의 분리작업이 진행되도록 하고 순환과정에서 비산된 석면 입자는 #3 송풍기에 의해 집진장치로 포집되며 집진장치에 설치된 필터를 통과하여 신선한 공기만 배출되도록 하였다. 오염토를 충분히 순환하여 완전히 정화시킨 후 순환덕트 내 설치된 벨브를 개방함으로써 청토 배출구를 통하여 정화된 흙이 배출되도록 하였으며, 제작된 석면 비산 장치의 배치도는 Fig. 1과 같다.

분쇄기는 Ball Mill 형태로 제작되었으며 회전수 및 지속시간을 제어하여 분쇄 정도를 조절할 수 있도록 제작하였으며, 분쇄된 오염토는 스크류 컨베이어를 통하여 벨트 컨베이어로 이동되고 벨트컨베이어를 통하여 스크린 그리드로 이동하게 설계하였다. 스크류 컨베이어는 회전속도 조절이 가능하며 회전속도를 조절하여 오염토의 투입 속도를 조절하도록 제

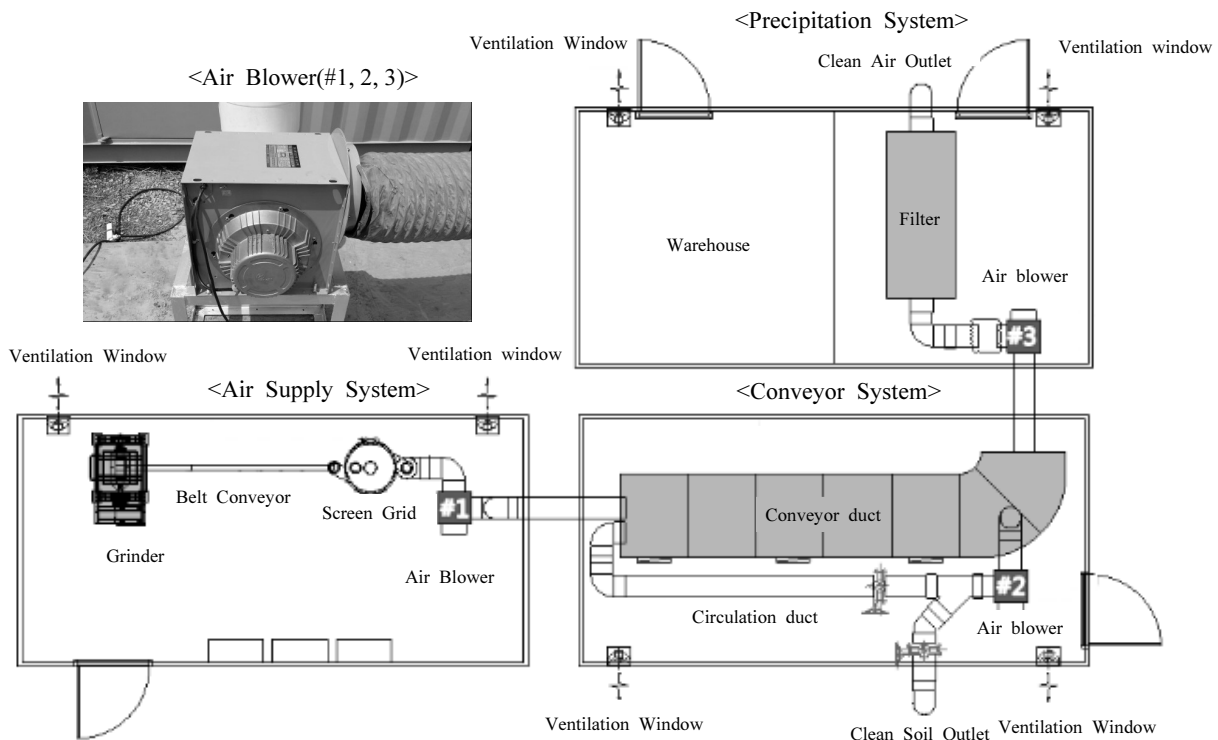


Fig. 1. Asbestos scattering device layout

확하였으며 분쇄 및 투입 장치는 Fig. 2와 같다. 벨트 컨베이어를 통하여 이동된 오염토는 진동선별기가 장착된 스크린 그리드에 의하여 1차 선별이 이루어지며, 스크린 그리드에 의한 1차 선별을 통하여 풍력에 의해 비산되지 않는 굵은 입자들을 사전에 분리하여 풍도 내 잔류되는 오염토의 양을 최소화하도록 계획하였다. 또한 스크린 그리드는 진동선별기와 분리가 가능하도록 계획하여 오염토의 입도분포에 따라 다양한 그리드를 적용할 수 있도록 하였으며, 스크린 그리드는 Fig. 3과 같다.

석면 포집용 필터는 Fig. 4와 같이 석면과 함께 비산되는 흙 입자에 의한 필터의 클로킹 현상을 방지하기 위하여 3중 필터구조로 계획하였으며, 해파필터 앞에 1차 및 2차 필터를 설치하여 흙 입자의 해파필터 유입을 사전에 차단하였고, 클로킹 발생 시 비교적 저렴하고 제작이 쉬운 1차 필터만을 교체하여 시험을 지속할 수 있도록 하였다.

2.2 현장 풍력정화장치 제작

완성된 풍력정화장치에 대하여 시운전을 수행하고 본 시



(a) Grinder (b) Screw conveyor

Fig. 2. Grinding and inserting system



(a) Vibration device (b) Screen grid

Fig. 3. Screen grid

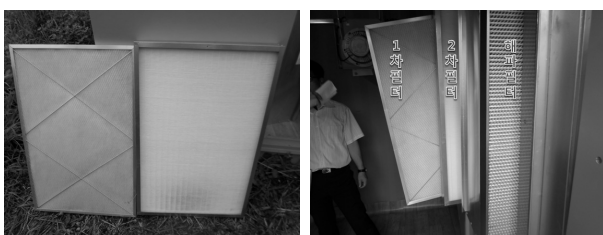


Fig. 4. Asbestos collecting filter

험 시 발생할 수 있는 문제점에 대한 사전 점검을 수행하였다. 시운전은 작업자의 안전을 위하여 오염되지 않은 흙 시료를 이용하여 수행되었으며 순환 및 배출을 반복적으로 수행하여 풍력정화장치 가동 시 발생할 수 있는 세부적인 문제점들에 대한 확인 작업을 수행하였다. 시운전 결과 송풍기 및 덕트 연결부가 완벽히 밀폐되지 않아 송풍기 작동 시 흙 시료가 덕트 밖으로 분출되는 현상이 발생되었다. 또한, 운송덕트 내에서 석면과 분리되어 바닥에 떨어진 흙 시료들이 순환덕트로 흘러내리지 않고 바닥에 그대로 남아있어 순환시스템이 정상적으로 작동하지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 현장시험 중 작업자의 안전 및 풍력정화장치 주변지역에 대한 추가오염을 방지하기 위하여 송풍장치 및 덕트 접합부에 대한 봉합 처리와 운송덕트 내에서 청토를 순환덕트로 이동시킬 수 있는 별도의 시스템이 필요한 것으로 평가되었다. 시운전 시 흙 시료의 유출이 발생하였던 부분에 대하여 Fig. 5과 같이 봉합을 실시하여 본 시험 시 비산된 석면의 외부 유출을 차단하도록 하였다. 또한, 풍력정화장치 외부에 공기압축기를 설치하고 운송덕트에 고압의 압축공기를 분출할 수 있는 공기배관을 Fig. 6과 같이 설치하여 운송덕트 바닥에 쌓여있는 흙 시료를 순환덕트로 이동시킬 수 있는 별도의 공기 분사 시스템을 설치하였다.

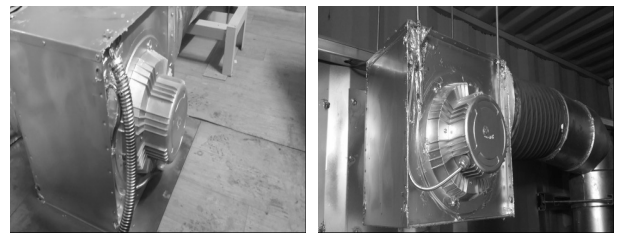


Fig. 5. Pilot sealing



(a) Before install air line (b) After install air line



(c) Air line detail (d) Air compressor



Fig. 6. Air line for collecting soil sample

3. 규회석을 이용한 예비시험 결과

3.1 시험 개요

석면은 인체에 유해하므로 실험실 내 모의실험을 진행하는데 어려움이 있어 인체에 유해성이 없는 석면 대체 물질인 규회석(Wollastonite)을 선정하여 실험에 적용하였다. 규

Table 1. Properties of soil sample

Case	Farmland sample		Paddy soil sample	
Sampling				
Density	2.580 g/cm ³		2.624 g/cm ³	
Particle size distribution	Msh size (mm)	Passing rate (%)	Msh size (mm)	Passing rate (%)
	53.000	100.0	53.000	100.0
	37.500	100.0	37.500	100.0
	26.500	100.0	26.500	100.0
	19.000	98.3	19.000	100.0
	9.500	96.2	9.500	97.3
	4.750	91.2	4.750	89.6
	2.000	68.5	2.000	68.9
	0.840	53.2	0.840	47.3
	0.420	40.8	0.420	36.4
	0.250	29.8	0.250	24.9
0.105	18.2	0.105	13.7	
0.075	10.3	0.075	8.6	

회석(CaSiO₃)은 흰색, 무색, 회색을 띠는 섬유 모양의 삼사정계 결정체로 불 평탄하게 잘게 부서지는 깨짐 특성을 가지며, 51.7%의 유리규산(SiO₂)으로 구성되어 있다. 이는 각 섬석 계열의 청석면과 비교하여 규산 함유량, 섬유상의 결정 모양, 깨짐, 굴절률 등 매우 유사한 물리·화학적 특성을 가지고 있다. 또한, 규회석은 실험동물(랫드)을 이용한 생체 실험결과 폐포까지 침투하기는 어려운 형태를 가지고 있으며, 호흡기에 노출된 규회석은 폐 기능에 영향을 주고 염증 반응을 일으키지만, 시간이 경과함에 따라 염증은 소실되고, 생체 내 반감기는 1주일 이내로 보고되고 있다(Lee et al., 2014). 석면 오염토를 이용한 풍력정화장치의 정화성능 평가에 앞서 완성된 장치에서 분쇄시간, 투입속도, 풍속을 각각 변화시켜가며 정화효율 극대화를 위한 예비시험을 수행하였다. 시험에 사용된 흙 시료는 1급 발암물질인 석면의 위해성을 감안하여 현장 주변에서 오염되지 않은 논·밭 시료를 채취한 후 규회석과 혼합하여 시험을 수행하였으며, 시험에 사용된 흙 시료의 특성은 Table 1과 같다.

3.2 시험 방법

예비시험에서는 풍속 및 분쇄시간, 투입속도 등을 변화시켜가며 정화 효율 및 청토 회수율을 측정하였으며 결과를 종합하여 석면 오염토 정화를 위한 최적 조건을 선정하였으나, 실내시험 시 송풍장치 및 풍도의 문제로 8.0m/sec였던 최대 토출풍속을 14.0m/sec까지 증가시켜 풍속에 따른 정화 효율 및 청토의 회수율을 측정하였다. 최적풍속 선정 후

Table 2. Wollastonite test case

Case	Sample	Weight (kg)	Wollastonite content (%)	Wind velocity (m/sec)	Grinding time (min)	Injection velocity (kg/min)	Note
1	Paddy	20	8	10	-	10	Decision optimum wind velocity
2				12			
3				14			
4	Farmland	20	8	10	-	10	
5				12			
6				14			
7	Paddy	20	8	Optimum wind velocity	10	10	Decision optimum grinding time
8					20		
9					30		
10	Farmland	20	8	Optimum wind velocity	10	10	
11					20		
12					30		
13	Paddy	20	8	Optimum wind velocity	Optimum time	10	Decision optimum insert velocity
14						20	
15						30	
16	Farmland	20	8	Optimum wind velocity	Optimum time	10	
17						20	
18						30	

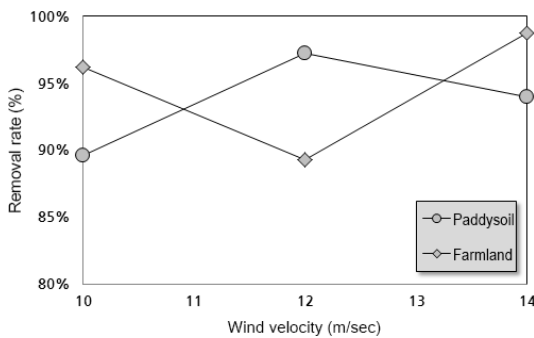
분쇄시간을 10min~30min까지 변화시켜 가며 분쇄시간에 따른 정화 효율 및 회수율을 측정하였으며 투입속도 또한 10kg/min~30kg/min까지 변화시켜 가며 시험을 반복 수행하였다. 예비시험은 논흙과 밭흙에 대하여 각각 같은 조건으로 수행되었으며 토성에 따른 정화효율의 차이를 분석하였고 예비시험 조건은 Table 2와 같다.

규회석 함량분석을 위한 시료는 시험 전 오염토 투입구와 운송덕트 내 점검구 위치, 스크린 그리드에서 분리된 체가름 배출구 및 청토 배출구의 총 7개소에서 채취하였으며, 운송덕트 내에서는 토출 직후와 순환 후의 규회석 함량을 분석하기 위하여 순환 시마다 한 번씩 총 4회의 시료를 채취하였다.

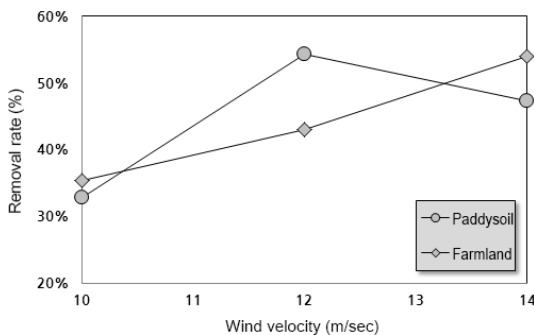
3.3 시험 결과

3.3.1 풍속별 시험결과(Case 1~6)

거리별 규회석 함유량 분석결과 토출구에서의 거리가 증가할수록 규회석 함유량은 증가하는 것으로 나타났으며, 풍속이 증가할수록 거리별 함유량 차이가 줄어드는 것으로 나타나고 순환이 반복될수록 거리별 편차는 감소하는 것으로 분석되었다. 풍속에 대한 정화장치의 효율 분석결과 최종 제거율은 Fig. 7과 같이 89.58%~98.75%로 풍속에 따라 증가하거나 감소하는 경향은 나타나지 않았으며 논토양과 밭토양 모두 평균 93%가량의 제거율을 나타내는 것으로 평가되



(a) Total removal rate



(b) Removal rate per a cycle

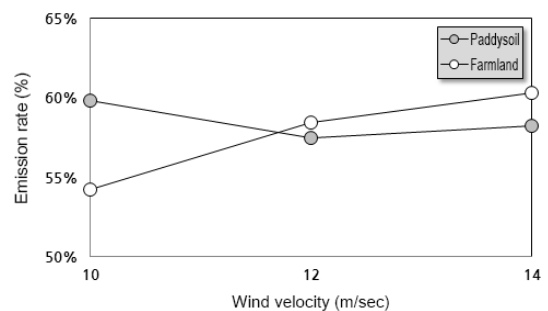
Fig. 7. Wollastonite removal rate by wind velocity

었다. 또한, 풍속이 증가할수록 1순환 당 제거율이 32.76%~54.27%로 증가하는 것으로 평가되었으며 이는 풍속의 증가가 정화장치의 순환 횟수를 단축시킬 수 있음을 나타내는 것으로 판단된다.

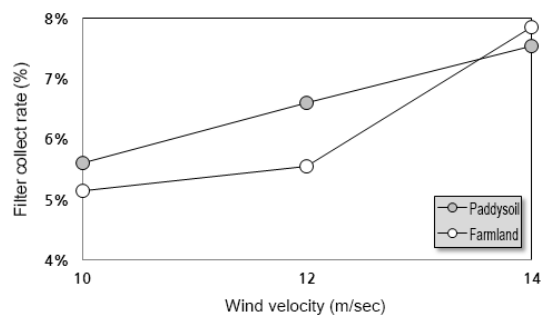
풍속에 따른 시료 배출량에 대한 분석결과 청토의 회수율은 Fig. 8(a)와 같이 논토양의 경우 57.45%~59.85%, 밭토양의 경우 54.20%~60.30%로 평균 58.08%이며 토양의 종류 및 풍속에 따른 변화는 크지 않은 것으로 평가되었다. 그러나 필터 포집률의 경우 Fig. 8(b)와 같이 풍속이 증가할수록 5.60%~7.55%로 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타내었으며 장비 내부 손실률은 5.10%~21.5%로 감소하는 경향을 나타내는 것으로 평가되었다. 풍속에 따라 청토 배출량은 변화가 없으나 필터 포집률의 증가 및 장비 내부 손실률의 감소 경향으로 미루어 볼 때 풍속의 증가는 덕트 내 굴곡부 및 접속부에서 정체되어 배출되지 않는 흙을 비산시켜 포집 효율을 증가시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

3.3.2 분쇄시간별 시험결과(Case 7~12)

분쇄시간에 대한 풍력정화장치의 효율 분석결과 최종 제거율은 Fig. 9와 같이 87.50%~97.69%로 분쇄시간에 따라 증가하거나 감소하는 경향은 나타나지 않았으며 논토양과 밭토양 모두 평균 96%가량의 제거율을 나타내는 것으로 평가되었다. 또한, 분쇄시간이 증가할수록 1순환 당 제거율이 45.73%~61.43%로 평가되었으며 분쇄시간의 증가가 풍력정화장치의 순환 횟수에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가



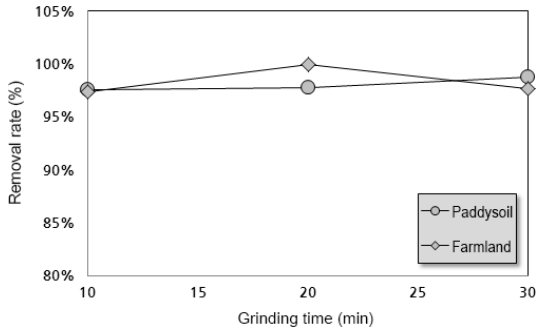
(a) Clean soil emission rate



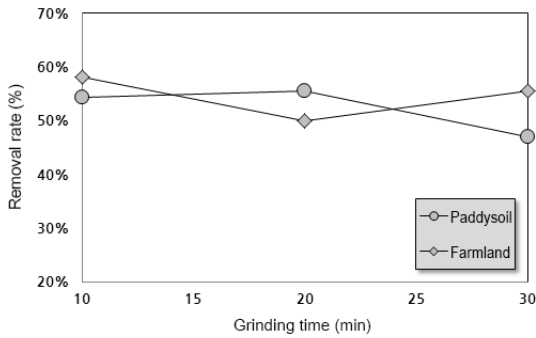
(b) Filter collect rate

Fig. 8. Recovery of specimens by wind velocity

되었다. 분쇄시간에 따른 시료 배출량에 대한 분석결과 청토의 회수율은 Fig. 10과 같이 논토양의 경우 67.75%~81.00%, 밭토양의 경우 65.15%~81.65%로 평균 73.44%이며 분쇄시간에 따라 청토의 배출량이 증가하는 것으로 평가되었다. 이는 체가름량의 변화에서 그 원인을 찾을 수 있으며 분쇄

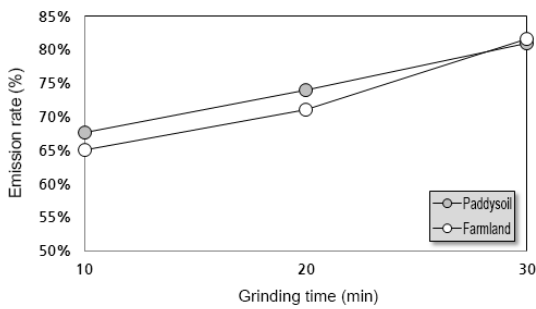


(a) Total removal rate

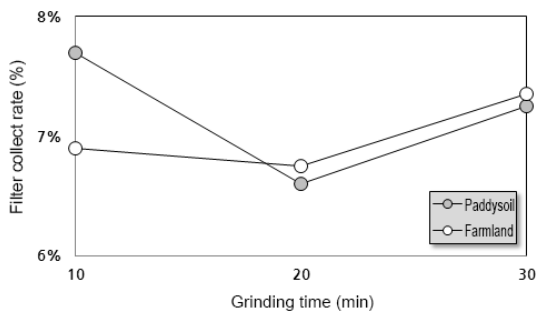


(b) Removal rate per a cycle

Fig. 9. Wollastonite removal rate by grinding time



(a) Clean soil emission rate



(b) Filter collect rate

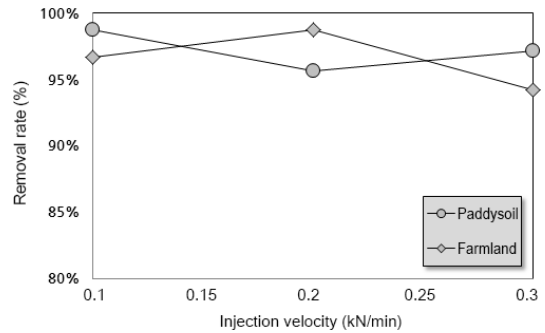
Fig. 10. Recovery of specimens by grinding time

시간이 길어짐에 따라 체가름량이 24.75%에서 9.05%로 50% 이상 감소하였다. 분쇄시간이 길어짐에 따라 스크린 그리드에서 걸러지는 굵은 입자의 양이 줄어들어 포집되는 청토량이 증가하고 이에 따라 풍력정화장치의 정화효율이 증가하는 것으로 판단된다. 분쇄시간에 따른 필터의 포집률 및 장비 손실률은 뚜렷한 경향을 나타내지 않았으며 분쇄시간이 길어져도 흙 입자가 비산되어 필터까지 도달할 정도로 작게 분쇄되지는 않는 것으로 판단된다.

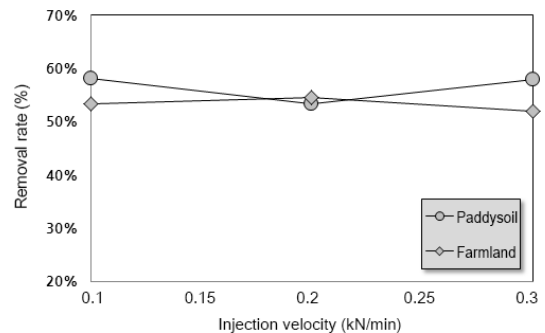
3.3.3 투입속도별 시험결과(Case 13~18)

시료 투입속도에 대한 풍력정화장치의 효율 분석결과 최종 제거율은 Fig. 11과 같이 95.65%~98.80%로 투입 속도에 따라 증가하거나 감소하는 경향은 나타내지 않았으며 논토양과 밭토양 모두 평균 96%가량의 제거율을 나타내는 것으로 평가되었다. 또한, 시료 투입속도가 증가할수록 1순환당 제거율은 53.30%~58.10%로 평가되었으며 시료 투입속도의 증가가 정화장치의 순환 횟수에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다.

투입속도에 따른 시료 배출량에 대한 분석결과 청토의 회수율은 Fig. 12와 같이 논토양의 경우 72.30%~81.20%, 밭토양의 경우 74.95%~82.95%로 평균 77.82%이며 투입속도가 증가함에 따라 청토의 배출량이 감소하는 것으로 평가되었다. 이는 손실물의 변화에서 그 원인을 찾을 수 있

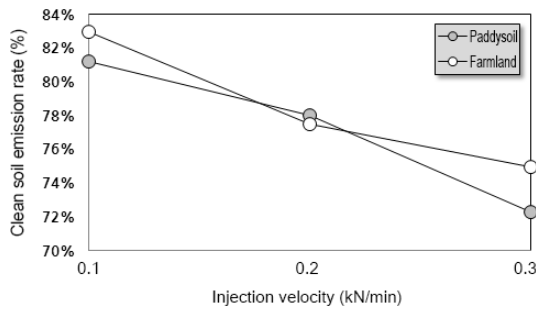


(a) Total removal rate

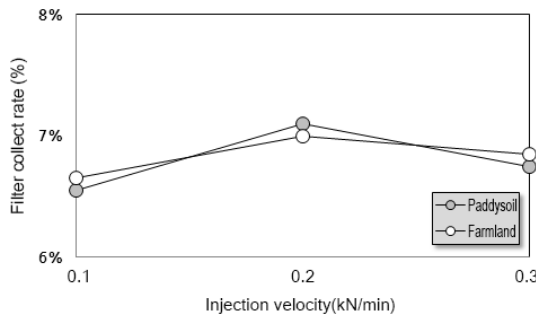


(b) Removal rate per a cycle

Fig. 11. Wollastonite removal rate by injection velocity



(a) Clean soil emission rate



(b) Filter collect rate

Fig. 12. Recovery of specimens by injection velocity

며 투입속도가 빨라짐에 따라 손실률이 2.35%에서 10.20%로 5배가량 증가하였다. 투입속도가 빨라짐에 따라 제한된 풍량으로 운송해야 할 흙 시료의 양이 많아지면서 덕트 굴곡부와 접속부에서 정체되어 쌓이는 흙 시료의 양이 늘어난 것으로 판단된다. 또한, 투입속도는 체가름률과 필터 포집률에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

4. 석면 오염토를 이용한 현장시험결과

4.1 시험 개요

규회석을 이용한 예비시험을 통하여 도출된 결과를 토대로 실제 석면 오염토에 대한 풍력정화장치의 정화성능 평가를 위한 현장시험을 수행하였으며, 오염토를 이용한 현장시험 Case는 Table 3과 같다.

Table 3. Asbestos contaminated soil test

Case	Sample	Weight (kg)	Asbestos content (%)	Wind velocity (m/sec)	Grinding time (min)	Injection velocity (kg/min)	Note
19	Paddy	20	1% Under	14	30	10	-
20		20	1% Under	14	30	10	
21		20	1% Over	14	30	10	
22	Farmland	20	1% Under	14	30	10	
23		20	1% Under	14	30	10	
24		20	1% Over	14	30	10	

시험절차는 각각 밭토양 및 논토양에서 채취한 시료중량 20kg으로 석면함유량은 1% 미만 및 1% 이상의 경우에 대하여 적용풍속은 14m/sec, 분쇄시간은 30min, 투입속도는 10 kg/min으로 변화시켜 총 6회의 실험을 실시하였다. 또한 시험에 의한 정화 전·후의 석면 함량 분석, 위해도 평가, 시비량 분석 등의 오염토 분석을 실시하여 정화 효율을 평가하였다.

4.2 오염토 특성

현장시험을 위한 석면 오염토는 정화장치가 설치된 “OO 석면광산 광해복원사업”의 복원 대상필지 중 복원되지 않은 필지에 대한 석면 오염도 및 현장과의 접근성 등을 고려하여 선정하였다. 필지의 오염도는 2010년 한국 환경공단에서 수행한 “폐석면광산 주변 토양, 지하수 석면함유 실태조사(정밀조사)” 보고서와 “OO석면광산 2구역 토양복원사업” 실시설계 보고서를 토대로 논과 밭에 대하여 각각 오염도가 0.25% 이상 1.00% 미만인 필지 2개소 오염도가 1.00% 이상인 필지 각 1개소를 선정하였다. 본 연구에서는 대상 필지를 10개의 구역으로 구분하고 각 구역마다 1개씩 총 10개의 석면 함량분석용 시료를 채취하여 사전분석을 수행하였으며 사전분석 결과를 토대로 현장시험에 적합한 오염도를 가진 구역을 선정하고 해당 구역에서 현장시험용 시료를 채취하였다. 시료의 채취는 현장시험에 사용될 양보다 1.5배 많은 30kg을 채취하였으며 채취된 시료는 완전히 밀봉하여 현장시험 장소까지 이동하였다. 또한, 현장시험 대상으로 선정된 필지를 대상으로 활동근거 시료채취(ABS)를 통한 위해성 평가를 수행하였는데 활동 근거 시료 채취는 비산된 석면을 측정하여 인체에 미치는 영향을 파악하는 측정 방법이며(MOE, 2010a), 미국 등 선진국에서도 이를 이용하여 인체 위해성 평가를 수행하고 있다(US EPA, 2005; 2008). 평가 결과 초과생애발암위해도(Excess Lifetime Cancer Risk) 값이 가장 높았던 것은 도보시나리오 3.15×10^{-4} (95% UCL) 였고, 가장 낮은 것은 농업활동(김매기) 시나리오로 8.3×10^{-5} (95% UCL)인 것으로 평가되었다. 결론적으로 본 조사를 통

하여 대상 필지의 어른 초과생애발암위해도(ELCR)를 평가한 결과 95% UCL이 10^{-4} 이상인 시나리오는 도보(어른) (3.1×10^{-4}), 흙 파기(1.4×10^{-4})로 총 2개 시나리오였으며, 마당 쓸기도 95% UCL이 1.0×10^{-4} 으로 10^{-4} 에 근접하였다. 또한

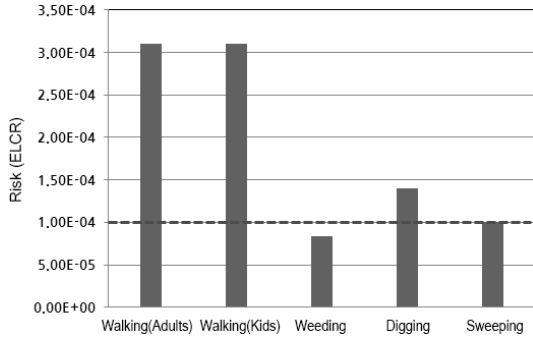
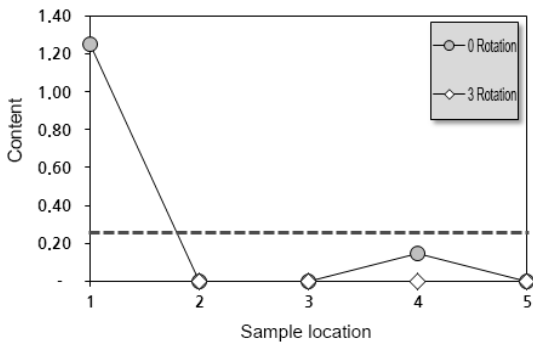
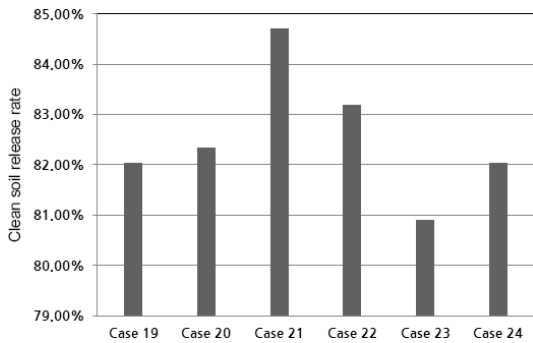


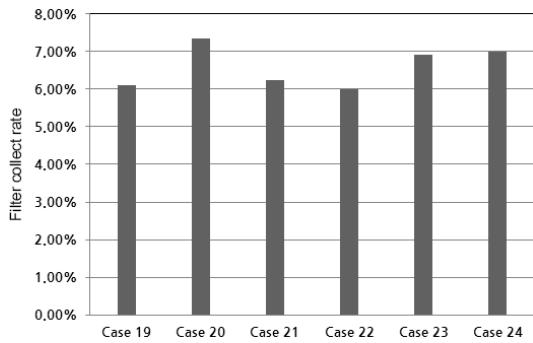
Fig. 13. Risk analysis result



(a) Asbestos content



(b) Clean soil release rate



(c) Filter collect rate

Fig. 14. Purification efficiency analysis

어린이 초과생애발암위해도(ELCR)를 평가한 결과 95% UCL이 10^{-4} 이상인 시나리오는 보도(3.1×10^{-4})인 것으로 평가되었으며, 사전 위해도 분석결과를 정리하면 Fig. 13과 같다.

4.3 오염토를 이용한 Pilot 현장시험결과

정화장치를 이용하여 현장에서 채취된 오염토에 대한 정화시험을 수행한 결과 거리별 석면 함유량 분석결과는 Fig. 14(a)와 같이 토출구에서의 거리가 증가할수록 석면 함유량은 증가하는 것으로 평가되었고 토출 직후 석면 함유량은 모두 0.25% 미만으로 정화 기준을 만족하였으며, 3번 순환 후에는 모든 위치에서 석면이 검출되지 않은 것으로 평가되었다. 또한, 석면 정화장치의 청토 회수율 분석결과는 Fig. 14(b)와 같이 80.90%~84.70%의 범위에 분포하는 것으로 나타났으며 평균 82.54%의 청토가 회수되는 것으로 평가되었다. 필터 포집률 및 장비 내 손실률은 Fig. 14(c)와 같이 모두 10% 미만으로 평가되었으며 특히 장비 내 손실률의 경우 평균 5% 미만으로 평가되어 분쇄장치의 개선을 통하여 체가름률을 줄일 수 있다면 청토 회수율 90% 이상을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 풍력장치를 이용한 실내시험 결과를 종합하여 실제 현장에 적용할 수 있는 풍력정화장치를 설계, 제작하였으며, 규회석을 이용한 예비시험 및 실제 석면 오염토를 이용하여 농경지 토양에 대한 정화효율을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 풍속에 따른 오염토 정화율 및 청토 배출량에 대한 분석결과 10m/sec 이상의 풍속에서는 풍속의 증가가 오염물질의 제거와 청토의 배출량에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 평가되었다.
- (2) 그러나 풍속이 강할수록 덕트 내에서 손실되는 흙의 양이 줄어들고 필터의 포집량이 증가하여 정화장치 전체의 효율을 증가시킬 수 있는 것으로 평가되었다.
- (3) 분쇄시간에 따른 규회석 제거율에 대한 분석결과 분쇄시간이 길어짐에 따라 스크린 그리드에 의해 정화되기 전에 배출되던 체가름량의 10% 미만으로 줄어드는 것을 알 수 있었으며 이에 따라 청토의 배출량 또한 증가하는 것으로 평가되었다.
- (4) 투입속도에 따른 규회석 제거율에 대한 분석결과 투입속도가 빨라질 경우 제한된 풍량으로 많은 양의 흙 시

료를 운반함에 따라 덕트 내 굴곡부 및 접속부에서 손실률이 증가하는 것으로 평가되었으며 손실률이 증가함에 따라 청토 회수율이 감소하여 정화장치의 효율을 저하시키는 것으로 평가되었다.

- (5) 실제 석면 오염토에 대한 시험결과 토출 직후 석면 함량은 모두 0.25% 미만으로 정화 기준을 만족하였으며 3번 순환 후에는 모든 위치에서 석면이 검출되지 않은 것으로 평가되었다.
- (6) 석면 정화장치의 청토 회수율 분석결과 80.90%~84.70%의 범위에 분포하는 것으로 나타났으며 평균 82.54%의 청토가 회수되는 것으로 평가되었다.
- (7) 또한 필터 포집률 및 장비 내 손실률은 모두 10% 미만으로 평가되었으며 특히 장비 내 손실률의 경우 평균 5% 미만으로 평가되어 분쇄장치의 개선을 통하여 체가름률을 줄일 수 있다면 청토 회수율 90% 이상을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

석면오염 토양을 정화하기 위해 증가하는 수요에 비해 정화효율을 높이기 위한 새로운 개발기술의 적용사례는 전무한 실정이다. 본 연구는 이러한 석면정화시장의 요구에 부응할 수 있는 기술로 보이며, 종래 토양개량 방법이라는 획일적인 정화방식으로부터 탈피하고, 석면입자의 비산성을 이용하여 토양 내 석면오염물질의 제거효율을 증가시킨 기술을 제시함으로써 향후 석면 오염 토양정화기술의 개발방향을 설정해줄 지표가 될 것으로 보인다.

따라서, 석면 오염 토양 정화기술은 현재 복토 및 환토 방식의 단순한 정화방식을 극복하여 저비용, 고효율의 석면입자 포집기술에 접근하기 위해 더욱 이상적인 분산 및 흡입방식이 요구될 것이며, 이에 따라 석면입자들의 정밀한 제어 등을 위한 연구개발이 필요할 것으로 보인다.

References

1. Bae, N. Y. (2014), Study of evaluation method of asbestos risk assessment in soil contaminated with asbestos, Master thesis, Donga University, pp. 1~63.
2. Kim, I. J., Kim, J. W., Ryu, H. S. and Jung, M. C. (2012), Friable test and risk assessment for asbestos in soils using the releasable asbestos sampler, J. Soil & Ground Water Env. Vol. 17(5), pp. 68~74 (in Korean).
3. Kim, J. W., Park, C. K., Kwon, Y. S. and Jung, M. C. (2014), Assessment of releasable asbestos from soil to air by the releasable asbestos sampler (RAS) around abandoned asbestos mine in Korea, J of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 51, No. 1, pp. 1~8 (in Korean).
4. Kim, K. D. (2013), Risk assessment of asbestos in soil and ambient air for residents of abandoned asbestos mines, Masters thesis, Yonsei University, pp. 1~65.
5. Kominsky, J. R. (2010), Development of the releasable asbestos field sampler, J of Air & Waste Management Association, Vol. 60, No. 3, pp. 294~301.
6. Kwon, Y. S. (2014), Evaluation on asbestos removal efficiency in soil using friability, Masters thesis, Sejong University, pp. 12~96.
7. Lee, J. Y. and Lee, K. Y. (2010), Development and evaluation of a dust generator using soil samples, Journal of Korean Society of Environmental Health, Vol. 36, No. 5, pp. 383~390 (in Korean).
8. Lee, Y. H., Min, K. N. and Oa, S. W. (2014), Assessment of releasable characteristics of asbestos contaminated soil using wind power device, J of Korea Society of Waste Management, Vol. 31, No. 5, pp. 505~513 (in Korean).
9. MOE (2010a), Guidance of soil environment on asbestos mines and occurring asbestos areas, Ministry of Environment, pp. 60 (in Korean).
10. MOE (2010b), Investigation of asbestos contained soil and groundwater near at the abandoned asbestos mines, Ministry of Environment (in Korean).
11. Ryu, H. S. (2013), Evaluation on friable asbestos in soil using the releasable asbestos sampler, Masters thesis, Sejong University, pp. 13~78.
12. US EPA (2005), El dorado hills naturally occurring asbestos multimedia exposure assessment el dorado hills, California. Preliminary Assessment and Site Inspection Report Interim Final, US EPA Region 9, pp. 163.
13. US EPA (2008), Clear creek management area asbestos exposure and human health risk assessment, US EPA Region 9, pp. 160.