



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

석고폐기물의 보관구역 토양내 불소오염에 관한 연구

Fluorine contamination of soils at a phosphate-gypsum
waste landfill in South Korea

울산대학교 대학원
친환경산업·에너지자원융합전공
김 형 석

석고폐기물의 보관구역 토양내 불소오염에 관한 연구

지도교수 오 석 영

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함


2022년 7월


울산대학교 대학원


친환경산업·에너지자원융합전공

김 형 석

김형석의 석사학위 논문을 인준함

심사위원 이 병 규 

심사위원 오 석 영 

심사위원 경 대 승 

울 산 대 학 교 대 학 원

2022년 7월

<목 차>

1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
2.이론적 배경	2
2.1 불소(Fluorine)	2
2.2 국내 폐석고 및 불소함유 토양 현황 및 토양오염기준	2
2.3 토양불소오염 공정시험법	4
2.3.1 자외선/가시선 분광광도법	4
2.3.2 이온전극법	4
2.4 X선 형광분석법	4
3. 실험재료 및 방법	5
3.1 실험재료	5
3.1.1 불소오염 토양 샘플	5
3.1.2 토양 내 불소 오염 정도 측정(이온전극법, 자외선/가시선 분광법)	5
3.1.3 토양 내 불소 오염 정도 측정(X선 형광분석법)	6
3.2 실험방법	6
3.2.1 알칼리 용융 추출을 이용한 이온전극법	6
3.2.2 왕수 추출을 이용한 이온전극법 및 자외선/가시선 분광광도법	6
3.2.3 수증기 추출법을 이용한 자외선/가시선 분광광도법	7
3.2.4 X선 형광분석법	8
4. 결과 및 고찰	9
4.1 공정시험분석법을 통한 토양 내 불소 농도	9
4.1.1 BH(2020년 시추)지역 총 농도	9
4.1.2 GBH(2019년 시추)지역 총 농도	13
4.1.3 GH(2021년 시추)지역 총 농도	23
4.2 XRF 분석법을 통한 토양 내 불소 농도	44

4.2.1 BH(2020년 시추)지역 XRF 분석으로 측정한 불소 농도	44
4.2.2 GBH(2019년 시추)지역 XRF 분석으로 측정한 불소 농도	46
4.2.3 GH(2021년 시추)지역 XRF 분석으로 측정한 불소 농도	49
4.3 공정시험 분석법 과 XRF 분석법 결과 비교분석	52
4.3.1 인산석고 보관구역(BH 지역, 2020년 시추) 토양 샘플 불소 함량 공정시험법과 XRF 분석법 결과 비교분석	52
4.3.2 인산석고 보관구역(GBH 지역, 2019년 시추) 토양 샘플 불소 함량 공정시험법과 XRF 분석법 결과 비교분석	53
4.3.3 인산석고 보관구역(GH 지역, 2021년 시추) 토양 샘플 불소 함량 공정시험법과 XRF 분석법 결과 비교분석	58
5. 결론	61
6. 참고문헌	62

〈표 목차〉

표 1 국내 불소 토양오염기준	3
표 2 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-1)	9
표 3 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-2)	9
표 4 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-3)	10
표 5 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-4)	10
표 6 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-5)	10
표 7 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-6)	11
표 8 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-7)	11
표 9 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-8)	11
표 10 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-9)	12
표 11 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-10)	12
표 12 인산석고 보관구역 내 GBH-19 지역 분석방법별 불소 측정 농도	13
표 13 인산석고 보관구역 내 GBH-20 지역 분석방법별 불소 측정 농도	14
표 14 인산석고 보관구역 내 GBH-24 지역 분석방법별 불소 측정 농도	15
표 15 인산석고 보관구역 내 GBH-26 지역 분석방법별 불소 측정 농도	16
표 16 인산석고 보관구역 내 GBH-27 지역 분석방법별 불소 측정 농도	17
표 17 인산석고 보관구역 내 GBH-31 지역 분석방법별 불소 측정 농도	18
표 18 인산석고 보관구역 내 GBH-35 지역 분석방법별 불소 측정 농도	19
표 19 인산석고 보관구역 내 GBH-37 지역 분석방법별 불소 측정 농도	20
표 20 인산석고 보관구역 내 GBH-39 지역 분석방법별 불소 측정 농도	21
표 21 인산석고 보관구역 내 GBH-40 지역 분석방법별 불소 측정 농도	22
표 22 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-1)	23
표 23 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 2-3)	24
표 24 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 3-3)	25
표 25 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 4-2)	26

표 26	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 5-3)	27
표 27	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 6-1)	28
표 28	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 6-3)	29
표 29	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 7-2)	30
표 30	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 8-1)	31
표 31	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 8-2)	32
표 32	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 14-1)	33
표 33	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 14-2)	34
표 34	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 14-3)	35
표 35	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 15-2)	36
표 36	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 15-3)	37
표 37	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 16-2)	38
표 38	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 17-1)	39
표 39	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 18-1)	40
표 40	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 19-1)	41
표 41	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 20-1)	42
표 42	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 20-2)	43
표 43	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-1)	44
표 44	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-2)	44
표 45	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-3)	44
표 46	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-4)	44
표 47	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-5)	44
표 48	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-6)	45
표 49	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-7)	45
표 50	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-8)	45
표 51	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-9)	45
표 52	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-10)	46

표 53	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-19)	46
표 54	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-20)	46
표 55	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-24)	46
표 56	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-26)	47
표 57	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-27)	47
표 58	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-31)	47
표 59	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-35)	47
표 60	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-37)	48
표 61	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-39)	48
표 62	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-40)	48
표 63	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-1)	49
표 64	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-2-3)	49
표 65	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-3-3)	49
표 66	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-4-2)	49
표 67	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-5-3)	49
표 68	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-6-1)	49
표 69	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-6-3)	50
표 70	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-7-2)	50
표 71	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-8-1)	50
표 72	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-8-2)	50
표 73	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-14-1)	50
표 74	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-14-2)	50
표 75	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-14-3)	50
표 76	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-15-2)	50
표 77	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-15-3)	51
표 78	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-16-2)	51
표 79	인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-17-1)	51

표 80 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-18-1)	51
표 81 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-19-1)	51
표 82 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-20-1)	51
표 83 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-20-2)	52

〈그림 목차〉

그림 1 XRF 도식도	4
그림 2 불소오염토양	5
그림 3 불소오염토양	5
그림 4 처음 분말 상태의 시료	8
그림 5 분말형태 시료와 바인더 용액 혼합시	8
그림 6 성형틀에 수평하게 담긴 시료	8
그림 7 가압을 위한 최종형태의 성형틀	8
그림 8 GBH-19 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	13
그림 9 GBH-20 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	14
그림 10 GBH-24 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	15
그림 11 GBH-26 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	16
그림 12 GBH-27 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	17
그림 13 GBH-31 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	18
그림 14 GBH-35 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	19
그림 15 GBH-37 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도	20
그림 16 GBH-39 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 정리	21
그림 17 GBH-40 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 정리	22
그림 18 GH-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	23
그림 19 GH 2-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	24
그림 20 GH 3-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	25
그림 21 GH 4-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	26
그림 22 GH 5-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	27
그림 23 GH 6-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	28
그림 24 GH 6-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	29
그림 25 GH 7-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	30

그림 26 GH 8-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	31
그림 27 GH 8-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	32
그림 28 GH 14-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도를 심도별 그래프	33
그림 29 GH 14-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	34
그림 30 GH 14-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	35
그림 31 GH 15-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	36
그림 32 GH 15-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	37
그림 33 GH 16-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	38
그림 34 GH 17-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	39
그림 35 GH 18-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	40
그림 36 GH 19-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	41
그림 37 GH 20-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	42
그림 38 GH-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프	43
그림 39 총 불소 농도 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성 그래프	52
그림 40 우송대학교 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성	53
그림 41 울산과학대 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성	54
그림 42 경희대학교 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성 정리	55
그림 43 총불소함량 (알칼리용융법) 및 XRF분석결과 간의 연관성	56
그림 44 총불소함량(왕수추출법) 및 XRF분석결과 간의 연관성	56
그림 45 왕수추출을 이용한 이온전극법 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성	58
그림 46 왕수추출을 이용한 자외선/가시선 분광법 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성	58
그림 47 Total 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성 정리	60

국문 요약

석고폐기물의 보관구역 토양내 불소오염에관한 연구

울산대학교 대학원
친환경산업·에너지자원융합전공
김 형 석

본 연구에서는 석고 폐기물 야적/매립 처분지역에 대한 불소오염 정도를 다양한 분석법을 통해 실험을 진행하였다. 실험을 위해 울산광역시 인산석고 보관구역 내 야적되어 있는 폐기물과 하부 토양의 샘플을 이용하였고 폐기물 관리법 및 토양환경보전법 등을 조사하여 국내외 문헌과 공정시험법에 따라 샘플내 불소 농도 측정을 진행하였다. 또한 새롭게 제시된 X선 형광분석(X-ray Fluorescence, XRF) 분석법을 이용해 농도 측정을 진행하였는데 이는 공정시험 분석법이 가지고 있던 긴 전처리 시간과 낮은 재현성 등 여러가지 단점들을 보완할 것이라는 가정 하에 실험을 진행하였다. 또한 공정시험 분석법과 XRF 분석법 결과값의 비교분석을 통해 재현도(reproducibility)와 정확도(accuracy)를 판단하여 XRF 분석법의 이용 가능성에 대해 알아보았다. 이용가능성은 인산석고 보관구역 지역에서 채취한 토양 및 석고폐기물 샘플 112 개에 대하여 공정시험법인 알칼리용융법, 왕수추출법, 수증기추출법을 통한 이온전극법, 자외선분광법으로 분석한 결과와 XRF 분석법을 이용해 측정한 결과를 분산형 그래프를 통해 판단하였다. 112개의 샘플 중 GBH 지역 43개 샘플에 대하여 알칼리 용융 추출법을 통한 이온전극법 측정 결과와 XRF 측정법을 통한 측정 결과의 비교 분석결과 상관계수가 0.897로 매우 높은 상관성을 보이고 있으며 이러한 비교결과는 공정시험법인 알칼리용융법과 XRF분석의 결과가 상관성이 있으며 신뢰도가 있을 것으로 직간접적으로 보여준다. 따라서 XRF 분석법이 기존의 공정시험법의 단점을 보완하는 동시에 결과값이 서로 높은 상관성을 보이므로 새로운 측정방법을 이용하여 토양 내 불소 측정에 사용하는 것이 충분한 타당성이 있다고 판단된다.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

산업화와 도시화로 인하여 환경오염 문제가 서구 선진국가로부터 시작된 이후 20세기 들어 전 세계적으로 환경오염에 대한 관심과 경계, 환경보전에 중요성은 큰 이슈가 되었다. 수질오염, 대기오염 등의 인간생활에 직접적으로 영향을 미치는 환경오염에 비하여 비교적 관심이 적었던 토양 오염에 대한 심각성과 정확의 필요성은 20세기 후반부터 지속적으로 증가하고 있다. 우리나라는 중금속 6종 (카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가 크롬)과 유류성분 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene), 총 석유계탄화수소인 TPH (total petroleum hydrocarbons), PCB (polychlorinated biphenyls), 유기인 화합물, 페놀류, 시안화합물의 11개 항목이 1995년 최초로 토양 오염 물질로서 지정되었고 그 후 공청회와 의견수렴을 통한 개정을 거쳐 현재는 니켈, 아연, 불소, TCE (trichloroethylene), PCE (tetrachloroethylene), benzo(a)pyrene 등을 포함하여 16종이 지정되어 관리되고 있다. 그 중에서 불소로 인한 토양 오염은 석탄연소 및 철강 부산물의 야적 (open storage), 각종 슬러지 및 인산비료 (phosphate fertilizer)의 토지 이용 등 다양한 인위적 경로를 통해 발생되거나 형석 (fluorite, CaF_2), 인회석 (fluorapatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) 및 빙정석 (cryolite, Na_3AlF_6)과 같은 무기염의 풍화나 용해를 통해 자연적으로 발생한다. 이러한 불소 토양오염에 대하여 오염 정도를 측정하는 방법에는 여러가지 방법들이 있는데 현재 공정시험에 따라 자외선/가시선 흡광광도법과 이온전극법을 사용하고 있다. 하지만 이러한 분석방법은 전처리 공정에서의 시간 및 유지의 어려움에 의해 분석의 재현성이 떨어지고 있었으며, 이러한 공정시험법을 이용한 불소 측정 결과는 실험자에 따라 결과가 크게 차이가 나 결과의 신뢰성을 갖추기가 힘들다. 본 연구의 목적은 공정시험법의 단점을 X선 형광분석법(X-ray Fluorescence, XRF)이 보완해주는지를 확인하고 공정시험 분석법으로 얻은 결과와 XRF 분석법으로 얻은 결과의 상관관계 비교를 통해 XRF 분석방법의 앞으로 있을 불소오염토양 연구에 이용가능성의 여부를 판단하여 앞으로 불소오염토양의 연구에 새로운 방향을 제공하고자 한다.

2.이론적 배경

2.1 불소(Fluorine)

불소 (fluorine, F)로 인한 토양 오염은 석탄연소 및 철강 부산물의 야적 (open storage), 각종 슬러지 및 인산비료 (phosphate fertilizer)의 토지 이용 등 다양한 인위적 경로를 통해 발생되거나 형석 (fluorite, CaF_2), 인회석 (fluorapatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) 및 빙정석 (cryolite, Na_3AlF_6)과 같은 무기염의 풍화나 용해를 통해 자연적으로 발생하기도 한다. 불소는 충치 예방을 위해 먹는 물에 1 mg/L 이하로 주입되기도 하지만 과다하게 노출될 경우 치아 및 뼈에 불소 침착증을 유발하거나 노출량이 20 ~ 80 mg/day에 이를 경우 골다공증을 일으키는 것으로 알려져 있다. 식물이 오랜 기간 노출될 경우 황백화, 괴사 및 성장저해를 일으키며 양이나 소와 같은 포유류의 경우에는 사료, 토양 및 물 등의 섭취를 통해 축적된 불소로 인해 쇠약, 관절강성 및 뼈와 이의 비정상적 발현 등의 증상을 일으키기도 한다⁷⁾ 불소는 원자번호 9번의 원소 (원자량 18.998 g/mol, 밀도 1.696 g/L)로 큰 전기음성도 (3.98)와 반응성을 갖고 있어 원소형태로는 거의 관찰되지 않으며, 자연 상태에서 무기 및 유기불소화합물로 존재한다. -1 가로 7개의 원자와 전자가 핵에 가깝게 있기 때문에 ($1s^2 2s^2 2p^5$), 주기율표상의 모든 원소 중 헬륨 (He)과 네온 (Ne) 다음으로 1차 이온화 에너지 (1681 kJ/mol)가 크다. 지각 구성물질의 0.065 %를 차지하며, 이는 13번째로 풍부한 양이다. 토양 내 불소는 일반적으로 pH 6 이하의 환경에서 Al 및 Fe 이온과 착화합물을 형성하고, pH가 증가함에 따라 착화합물 형성이 줄어든다. 이는 pH가 증가하면서 OH^- 의 농도가 높아짐에 따라 경쟁효과 (competition effect)에 의해 착화합물 형성이 감소하고, Al 및 Fe가 약염기 상태에서 불용성의 수산화염 (insoluble hydroxide)을 형성하기 때문이다. Ca의 함량이 높은 토양 (e.g., calcareous soil)에서는 불용성의 CaF_2 (i.e., $K_{sp} = 3.9 \times 10^{-11}$)를 형성한다.

2.2 국내 폐석고 및 불소함유 토양 현황 및 토양오염기준

폐석고는 사업장 일반폐기물 중 하나로 연간 400만톤 이상이 발생하고 있고, 시멘트 응결지연제, 석고보드용, 농업용 등으로 재활용 되고 있다. 재활용 되지 못한 잉여분은 관리형 매립시설에 매립되는데 현재 2,200만톤 이상이 매립되어 있어 주변경관 및 환경에 큰 영향을 끼치고 있다. 환경부에서 나온 2017년도 전국 폐기물 발생 및 처리 현황에 의하면 폐석회와 폐석고는 2017년 폐석고 및 폐석회의 일일 발생량은 2471톤이었으며 지역별 발생량은 울산 약 57%, 경남 31% 로 대부분의 폐석고 및 폐석회가 경남-울산지역 일대에서 발생하고 있었다. 발생한 폐석고와 폐석회는 매립과 재활용을 통해 대부분 제거되고 있으며 전체 폐기물중 매립은 4%, 재활용은 96%이다. 환경부 통계자료는 폐석고와 폐석회를 합산하여 조사되고 있어 폐석고의 정확한 발생량은

확인 할 수 없으나 문헌조사에 의하면 대략적으로 인산석고가 48%, 탈황석고가 49%로 대부분을 차지하고 있다. 대부분 시멘트 첨가제, 석고보드원료, 농업용 등으로 재활용 되고 극히 일부가 현재 매립되고 있다. 이중 인산석고의 경우 비료회사인 남해 화학과 동부한농 (현 팜한농)에서 전량 발생되었다. 발생한 인산석고의 경우 매립/적치장을 운영하는데 있어 넓은 부지의 필요와, 운영비용, 매립/적치장으로 부터의 침출수 발생 등의 환경오염유발 가능성이 존재한다. 특히 석고 내 함유되어 있는 불소의 경우 용출에 의한 수질 및 토양오염을 일으킬 수 있다. 토양환경보전법에서는 아래의 표 2.2와 같이 1-3지역 별 우려기준과 대책기준을 설정하여 불소 오염을 규정하고 있다. 우려기준이란 사람의 건강, 재산이나 동, 식물의 생육에 지장을 줄 우려가 있는 토양오염 기준이며 대책 기준은 우려기준을 초과하여 사람의 건강, 재산이나 동 식물의 생육에 지장을 주어 토양오염에 대한 적극적인 대책이 필요할 기준으로 정의된다. 불소는 먹는 물과 토양매체에서만 관리하고 있었으며, 먹는 물의 경우 1.5 mg/L 토양은 1, 2, 3 지역의 우려기준은 400, 400, 800 mg/kg, 대책기준은 800, 800, 2000 mg/kg으로 관리하고 있다.

표 1 국내 불소 토양오염기준

불소 오염 우려기준			
물질	1지역 ^{*)}	2지역 ^{*)}	3지역 ^{*)}
불소 (F)	400	400	800
불소 오염 대책기준			
물질	1지역	2지역	3지역
불소 (F)	800	800	2000

*) 1지역: 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률」에 따른 지목이 전·답·과수원·목장용지·광천지·대(「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령」 제58조 제8호가목 중 주거의 용도로 사용되는 부지만 해당한다)·학교용지·구거(溝渠)·양어장·공원·사적지·묘지인 지역과 「어린이놀이시설 안전관리법」 제2조 제2호에 따른 어린이 놀이시설(실외에 설치된 경우에만 적용한다) 부지

2지역: 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률」에 따른 지목이 임야·염전·대(1지역에 해당하는 부지 외의 모든 대를 말한다)·창고용지·하천·유지·수도용지·체육용지·유원지·종교용지 및 잡종지(「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령」 제58조 제28호 가목 또는 다목에 해당하는 부지만 해당한다)인 지역

3지역: 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률」에 따른 지목이 공장용지·주차장·주유소용지·도로·철도용지·제방·잡종지(2지역에 해당하는 부지 외의 모든 잡종지를 말한다)인 지역과 「국방·군사시설 사업에 관한 법률」 제2조 제1호 가목부터 마목까지에서 규정한 국방·군사시설 부지

2.3 토양불소오염 공정시험법

2.3.1 자외선/가시선 분광광도법

토양불소오염 정도를 분석하는 방법에는 공정시험법 기준으로 자외선/가시선 분광광도법과 이온전극법 크게 두가지가 있다. 자외선/가시선 분광광도법의 측정원리는 토양내에 있는 불소 물질이 빛 에너지를 흡수하게 되는데 이때 전자 전이 및 진동,회전과 같은 운동을 하게 되고 파장의 자외 및 가시선을 흡수하며 흡수 스펙트럼을 나타낸다. 흡수하는 빛의 세기 즉 흡광도를 통하여 원자나 분자의 농도를 결정한다. 측정을 진행하기에 앞서 토양에서 불소를 추출해내는 전처리를 진행하여야 하는데 수증기 추출법, 알칼리 용융법, 왕수 추출법을 이용하여 불소를 추출해낸 다음 측정을 진행한다.

2.3.2 이온전극법

이온선택성전극은 다른 이온에 덜 감응하고 특정 이온이나 이온 화학종에 선택적으로 낮은 농도까지 정확히 전위차를 나타내 농도를 측정할 수 있는 전극이라고 정의한다. 일정 전극이 어느 특정 이온에 감응하고 그 이외의 다른 이온에 얼마나 덜 감응하느냐가 이 전극이 나타내는 감응 기울기나 감응 범위의 결과로 나타난다. 앞선 자외선/가시선 분광광도법과 마찬가지로 측정을 하기전 토양에서 불소를 추출해내는 전처리를 진행하는데 수증기 추출법, 알칼리 용융법, 왕수 추출법을 이용하여 불소를 추출해낸 다음 측정을 진행한다.

2.4 X선 형광분석법

파장분석형 X선 형광분석법(Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence, WDXRF)은 시료에 X선을 조사한 후 시료가 방출하는 2차 형광 X선을 결정(diffraction crystal)을 이용하여 분광함으로써 시료내 원소의 종류를 구분하고 검출기에서 계수되는 전자펄스의 강도를 이용하여 농도를 결정하는 방법이다. XRF 분석은 X선 튜브에서 발생하는 고 에너지 X선을 에너지원으로 이용하여 고체 시료의 비파괴 분석이 가능하며, 넓은 농도 범위에서 (수 ppm ~ 수십 %) 정량 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다.(그림 1)

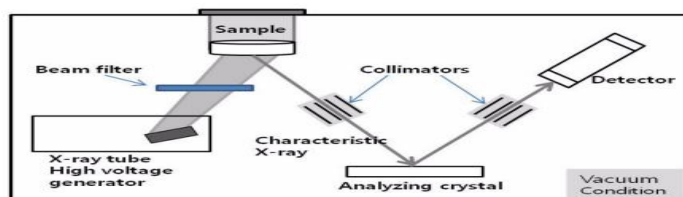


그림 1 XRF 도식도

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료

3.1.1 불소오염 토양 샘플

실험에 사용된 불소오염 토양 샘플은 (주) 팜한농 내의 약 12만평 (약 400,000 m²)의 석고폐기물 야적/매립 처분된 구역에서 2019년, 2020년, 2021년에 각각 43개, 36개, 25개를 3개년도에 걸쳐 채취해 총 112 개에 대하여 실험을 진행하였다.



그림 2 불소오염토양



그림 3 불소오염토양

3.1.2 토양 내 불소 오염 정도 측정(이온전극법, 자외선/가시선 분광법)

불소를 토양샘플에서 추출하기 위한 알칼리 용융 추출과 왕수 추출에서 사용된 시약은 hydrochloric acid (35 %), sodium hydroxide (98 %)는 OCI (Seoul, Korea)에서 구매하였으며 nitric acid (1 N)는 대정화금 (Siheung, Korea)에서 구매하였고 TISAB III 는 Thermo Fisher Scientific (Delaware, USA)에서 구매하였다. 수증기 추출법에서 사용된 시약은 산화칼슘, 과염소산, 과염소산은, 니트로페놀, 수산화나트륨, 지르코닐산 및 SPANDS를 구매하여 사용하였다. 모든 용액은 nex power 1000 (Human, Seoul, Korea)을 이용하여 제조된 초 순수수 (deionzed water)를 사용하였다.

3.1.3 토양 내 불소 오염 정도 측정(X선 형광분석법)

X선 형광분석법(X-ray Fluorescence, XRF) 분석을 위한 전처리에 사용된 Liquid-Binder Aqueous additive는 Chemplex (Florida, USA)에서 구매하여 사용하였다. boric acid는 SIGMA-ALDRICH (Missouri, USA)를 통해 구매하여 사용하였다. 시료성형에 필요한 가압성형틀과 디스크는 실험 환경에 맞게 주문제작을 하여 사용하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 알칼리 용융 추출을 이용한 이온전극법

알칼리 용융법을 활용한 이온전극법은 200 mesh 채를 통과하도록 샘플을 분쇄한 뒤 그것의 0.5 g을 니켈 도가니에 담은 뒤 16 M NaOH 6 mL를 넣는다 이후 150 °C에서 1 시간 건조 후 300 °C까지 온도를 올린 뒤 이후 300 °C에서 600 °C까지 30분 동안 증가시킨 뒤 시료를 데시케이터에서 냉각시킨다. 이후 시료에 증류수 10 mL를 넣은 뒤 알칼리 케이크의 용해를 촉진시키기 위해 약간 가열을 진행한 뒤 진한 염산 7~8 mL를 넣어 pH를 8에서 9 사이로 맞춘다. 이후 pH를 조절한 샘플을 여과하여 100 mL 부피플라스크에 담은 뒤 정제수를 넣어 100 mL 표선에 맞춰 용액을 제조한다. 이후 제조된 용액을 25 mL를 50 mL 부피 플라스크 및 비커에 담은 뒤 TISAB (Total Ionic Strength Adjustment Buffer) III용액을 25 mL를 넣어 1:1로 혼합하여 pH를 5.2내외로 유지한 뒤 pH 미터의 불소 전극을 사용하여 농도 (mg/L)를 측정한다.

3.2.2 왕수 추출을 이용한 이온전극법 및 자외선/가시선 분광광도법

왕수추출을 활용한 이온전극법과 자외선/가시선 분광법은 200 mesh 채를 통과하도록 샘플을 분쇄한 뒤 그것의 1 g과 왕수(진한 염산 3 : 진한 질산1) 10 mL를 2시간 동안 상온에서 정치시킨 후 70°C에서 2시간 동안 가열시킨다. 이후 샘플을 여과하여 100 mL 부피플라스크에 담은 뒤 정제수를 넣어 100 mL 표선에 맞춰 용액을 제조한다. 이후 제조된 용액 10 mL를 부피 플라스크 및 비커에 담은 뒤 TISAB (Total Ionic Strength Adjustment Buffer) III용액을 10 mL를 넣어 1:1로 혼합하여 시료를 이온전극법 또는 자외선/가시선 분광법광도법을 이용하여 측정한다.

3.2.3 수증기 추출법을 이용한 자외선/가시선 분광광도법

토양오염공정시험기준에서 규정한 토양시료의 전처리 공정은 두 개의 과정을 거치는데 회화과정과 증류과정이다. 회화과정의 경우 토양시료를 분쇄하여 0.075 mm (200 mesh)의 표준체로 체질하고 큰 입자를 제거하고 105 °C에서 건조 후 토양시료 (1 g)을 취해 니켈 도가니에 넣고 산화칼슘 (CaO) 분말 5 g을 가한 뒤 완전 혼합한다. 이후 500 °C의 전기로에서 5시간 회화한 다음 2시간 동안 800 °C까지 온도를 높이면서 가열 후 식힌다. 이후 회화과정을 거친 시료를 정제수 25 mL와 70% 과염소산 50 mL로 씻어 삼구 플라스크에 옮기고 17% 과염소산은 용액 10 방울을 가해 용액이 우윳빛으로 변하는 경우 이 용액을 10 방울 더 가하고 비등석 (8~10) 개를 첨가한다. 이러한 다량의 염소이온이 함유 되었을 때 다량의 Ag⁺ 이온을 첨가하여 제거하는 공정을 거친 후 증류플라스크에 정제수 약 600 mL를 넣은 뒤 증류장치를 사용하여 가열한다. 미리 준비해둔 500 mL 부피 플라스크에는 니트로페놀 지시약 1방울과 50% 수산화나트륨 용액 1방울 넣어 유출액을 받는다.

삼구플라스크내의 온도가 135±2 °C가 되도록 유지해야 하며 유출속도를 매분 5~6 mL로 증류하여 액량이 480 mL가 되었을 때 증류를 마치고 냉각관 안쪽을 소량의 정제수로 씻어 표선까지 채운다. 주의할 요소는 증류수 온도 조작이며 135±2 °C가 반드시 유지하도록 한다. 이는 삼구플라스크의 내부용액 온도가 (135±2) °C 이하가 되면 불화수소산의 증발이 억제되고 (135±2) °C 이상이 되면 과염소산이 기화되어 검액에 포함되는 현상이 발생해 측정오차를 유발하기 때문이다. 따라서 3~4 시간동안은 온도계를 예의 주시하면서 히팅 맨틀의 온도밸브를 수시로 조절해 주어야 한다. 이후 전처리한 시료 50 mL를 취하여 100 mL 부피 플라스크에 넣고 지르코닐산-SPADNS 혼합액 10 mL를 가하여 잘 혼합한 다음 570 nm에서 흡광도를 측정한다. 바탕시험액을 대조 액으로 하여 표준용액을 통해 작성한 검정 곡선으로부터 불소이온의 양을 구하고 최종적으로 불소의 함량(mg/kg)을 산출한다.

$$\text{토양 중 불소의 농도 (mg/kg)} = \frac{C_s - C_b}{W_d} \times f \times V$$

Cs: 검정곡선에서 얻은 토양 중 불소의 농도(mg/L)

Cb: 검정곡선에서 얻은 시약바탕시료 중 불소의 농도(mg/L)

f: 희석배수(검정곡선의 범위를 벗어날 경우)

V: 용액의 최종 부피(여기서는 0.5 L)

Wd: 토양시료의 건조중량(여기서는 0.001 kg)

3.2.4 X선 형광분석법

X선 형광분석법을 이용한 실험은 리퀴드 바인더와 보릭산을 1:2 v% 비율로 혼합한 접착제 3mL와 200 mesh 채로 거른 분말형태의 시료 4 g을 마노플라스크에 넣어서 혼합한다. 혼합 즉시 슬러지 형태로 변하게 되지만(그림 3) 계속 저어주다보면 혼합하기 전 처음 분말형태의 시료로 변하게 되는데(그림 4) 그 상태가 될 때까지 계속 저어준다. 혼합된 샘플은 앞서 실험재료에서 나온 성형틀에 디스크를 놓고 그 위에 시료가 수평을 유지하도록 담아주고(그림 5) 그 위에 또 다른 디스크를 놓아준다. 고정막대로 시료를 고정시켜 성형틀의 최종형태(그림 6)를 잡아준다. 그리고 시료압축기를 통하여 200 kN의 힘을 성형틀에 10 초 정도 가해 가압성형판 (pressed pellet)을 제조하여 WDXRF를 이용하여 토양 내 불소 분석을 수행하였다.

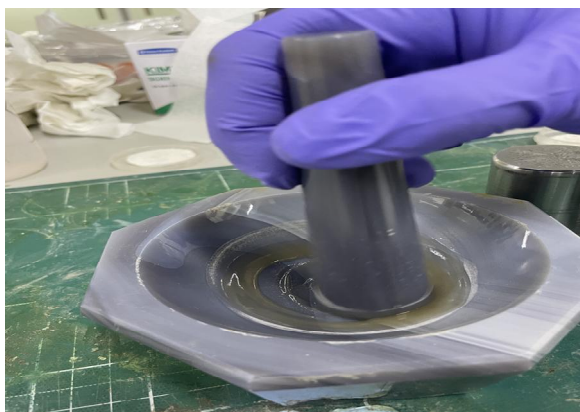


그림 4 분말형태 시료와 바인더 용액 혼합시
슬러지 형태



그림 5 처음 분말 상태의 시료



그림 6 성형틀에 수평하게 담긴 시료



그림 7 가압을 위한 최종형태의 성형틀

4. 결과 및 고찰

4.1 공정시험분석법을 통한 토양 내 불소 농도

4.1.1 BH(2020년 시추)지역 총 농도

인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-1)

표 2 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-1)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 1.3 m)	토양층 (1.3 ~ 2 m)	암반층 (2 ~ 5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	3237.4	556.1	597.1

표 4.1은 인산석고 보관구역 내 BH-1 지점의 불소 평균함량 결과이다. 앞서 기술된 알칼리용융-이온전극법, 회화-수증기추출 자외선/가시선 분광광도법을 이용하여 평균값을 도출하였다. 석고층에서의 불소 함량은 3237.4 mg/kg 이며 토양층과 암반층에서 불소농도가 각각 446.1 597.1 mg/kg으로서 토양환경보전법 내 3지역(공장용지·주차장·주유소용지·도로·철도용지·제방·잡종지인 지역) 불소오염 우려기준인 800 mg/kg 보다 낮은 불소함량을 보였다.

표 3 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-2)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 1.5 m)	암반층 (1.5 ~ 5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	1840.6	486.6

표 4.2는 인산석고 보관구역 내 BH-2 지점의 불소 평균함량 결과이다. BH-1 지점에 비하여 석고층에서의 불소농도는 다소 낮아 1840.6 mg/kg 의 함량을 보였다. 이 시료채취지점은 토양층이 존재하지 않고 석고층 바로 아래 암반층이 존재하였으며 암반층에서 불소농도가 486.6 mg/kg을 보이고 있었다. 본 함량은 토양환경보전법 내 3 지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg 보다 낮은 불소함량을 보이고 있다.

표 4 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-3)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 3 m)	토양층 (4 m)	토양층 (5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	3536.6	627.8	595.5

표 4.3은 인산석고 보관구역 내 BH-3 지점의 불소 평균함량 결과이다. 분석결과 석고층의 두께는 약 3m 이며 5m 까지는 토양층으로 이루어져 있고 암반층은 더 깊은 심도에 존재하고 있는 것으로 보인다. 석고층의 불소농도는 3536.6 mg/kg으로 다른 시료채취지역에서의 불소농도와 유사한 값을 보인다. 토양층 4m 지점과 5m 지점에서의 불소농도는 각각 627.8, 595.5 mg/kg이었으며 토양환경보전법 내 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg 보다 낮은 불소함량을 보였다.

표 5 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-4)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 1.5 m)	토양층 (1.5 ~ 2.3 m)	암반층 (2.3 ~ 5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	3426.1	332.7	375.6

표 4.4는 인산석고 보관구역 내 BH-4 지점의 불소 평균 함량 결과이다. 석고층의 불소함량은 타 시료채취지점과 흡사하며 (3426.1 mg/kg), 토양층과 암반층은 각각 332.7, 375.6 mg/kg의 함량을 보였다. 토양환경보전법 내 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg 보다 낮았으며 1,2지역의 우려기준인 400 mg/kg 보다도 낮은 함량을 보였다.

표 6 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-5)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	4205.9

표 4.5는 인산석고 보관구역 내 BH-5 지점의 불소 평균함량 결과이다. 이 시료채취 지점은 토양층과 암반층이 심도 5 m 까지 존재하지 않았으며 석고층만으로 구성되어 있었다. 석고층의 경우 불소 함량이 4205.9 mg/kg 으로 다른 시료채취지역에 비교하여 높게 나타났다.

표 7 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-6)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 3 m)	토양층 (3 m)	토양층 (4 m)	토양층 (5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	4495.7	546.3	478.5	568.1

표 4.6은 인산석고 보관구역 내 BH-6 지점의 불소 평균함량 결과이다. 석고층은 3 m 내외로 형성되었으며 이후 5 m 까지는 토양층으로 이루어져 있다. 토양층 3, 4, 5 m 지점의 불소의 함량은 각각 546.3 478.5, 568.1 mg/kg으로 모두 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg보다 농도가 낮았다.

표 8 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-7)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 2 m)	토양층 (3 m)	토양층 (4 m)	토양층 (5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	1912.3	510.0	386.9	442.0

표 4.7은 인산석고 보관구역 내 BH-7 지점의 불소 평균함량 결과이다. 석고층의 두께는 지표로부터 2 m 내외로 형성되었으며 이후 5 m 까지는 토양층으로 이루어져 있다. 석고층에서의 불소의 농도는 1912.3 mg/kg으로 다소 낮은 편이다. 토양층 3, 4, 5 m 지점의 불소의 함량은 각각 510.0, 386.9, 442.0 mg/kg으로 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg보다 농도가 낮았다.

표 9 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-8)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 3 m)	토양층 (3 m)	토양층 (4 m)	토양층 (5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	2054.2	378.5	460.7	632.7

표 4.8은 인산석고 보관구역 내 BH-8 지점의 불소 평균함량 결과이다. 석고층은 3 m 내외로 형성되었으며 이후 5 m 까지는 토양층으로 이루어져 있다. 석고층 내의 불소함량은 2054.2 mg/kg이며 이는 BH-7 지점의 불소함량과 유사한 값이다. 토양층 3, 4, 5 m 지점의 불소의 함량은 각각 378.5, 460.7, 632.7 mg/kg으로 모두 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg보다 농도가 낮았다.

표 10 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-9)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 3 m)	토양층 (3 m)	토양층 (4 m)	토양층 (5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	2000.0	455.6	429.0	610.0

표 4.9는 인산석고 보관구역 내 BH-9 지점의 불소 평균함량 결과이다. BH-8 시료와 마찬가지로 석고층은 3 m 내외로 형성되었으며 이후 5 m까지는 토양층으로 이루어져 있다. 석고층에서의 불소함량도 2000 mg/kg으로 BH-7 및 BH-8 지점의 석고층과 유사한 함량을 보이고 있다. 토양층 3, 4, 5 m 지점의 불소의 함량은 각각 455.6, 429.0, 610.0 mg/kg으로 제 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg보다 농도가 낮았다.

표 11 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-10)

시료 명	석고 층 (표층 ~ 2.1 m)	토양층 (3 m)	토양층 (4 m)	토양층 (5 m)
평균 불소 농도 (total F, mg/kg)	1787.3	752.4	776.0	626.7

표 4.10은 인산석고 보관구역 내 BH-10 지점의 불소 평균함량 결과이다. 석고층은 2.1 m 내외로 형성되었으며 이후 5 m 까지는 토양층으로 이루어져 있다. 토양층 3, 4, 5 m 지점의 불소의 함량은 각각 752.4, 776.0, 626.7 mg/kg으로 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg보다 농도가 낮았다. 그러나 다른 샘플링 지점과 비교하였을 때 약 0.5배 이상 불소 함량이 높게 나타나며 우려기준치에 근접한 값이 측정되었다. 따라서 BH-10 지점이 가장 불소의 하부 이동이 많이 진행된 것으로 판단된다.

4.1.2 GBH(2019년 시추)지역 총 농도

표 12 인산석고 보관구역 내 GBH-19 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-19	8.5	452	212	0	1052	196
	9.5	357	453	1383	714	219
	10.5	359	222	1105	808	184

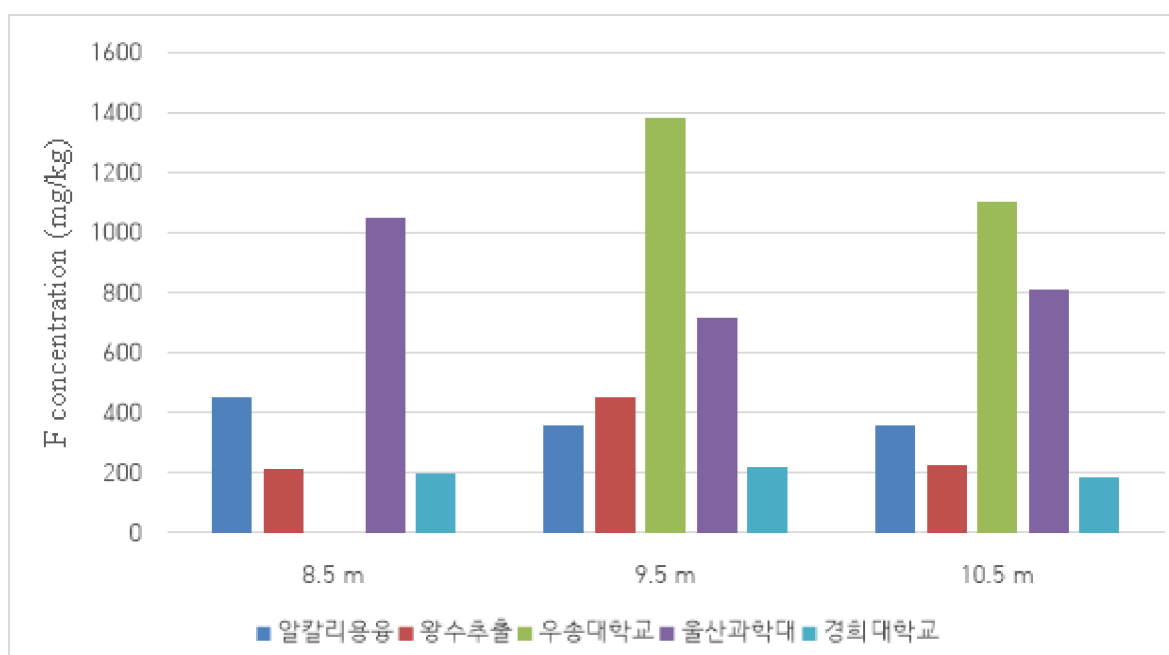


그림 8 GBH-19 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 12와 그림 8은 인산석고 보관구역 내 GBH-19 지역의 각 분석방법별로 샘플 내 불소농도를 나타낸 결과이다. 본 실험에서는 알칼리용융추출법과 왕수추출법을 통한 이온전극법으로 농도를 측정을 하였고 각 동일시료에 대하여 우송대학교, 울산과학대, 경희대학교 각 3개의 학교에서 수증기 추출법을 통한 이온전극법으로 불소 농도를 측정한 기존 실험값 까지 포함해 총 5개의 실험 데이터를 가지고 비교분석을 진행하였다. GBH-19 지역에서는 심도별로 8.5 m, 9.5 m, 10.5 m 3개의 시료를 이용해 실험을 진행하였다. 기존실험에서 세학교의 데이터를 비교해보면 8.5 m 심도에서 각각 0 mg/kg, 1052 mg/kg, 196 mg/kg으로 일정한 값을 가지지 못하는 반면 본 실험에서 얻은 2개의 실험 데이터는 452 mg/kg, 212 mg/kg로 적은 차이를 보이며 9.5 m 지역과 10.5 m 지역에서도 비슷한 추이를 보인다. 3지역 불소오염 우려기준인

800 mg/kg을 넘는 데이터는 울산과학대 1개 데이터 (8.5 m, 10.5 m), 우송대학교 2개 데이터 (9.5m, 10.5 m)를 제외하면 존재하지 않는다.

표 13 인산석고 보관구역 내 GBH-20 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-20	23.5	705	351	1601	10997	118
	24.5	535	830	1334	939	262
	25.5	394	196	1539	822	260
	26.5	547	355	0	1128	279
	27.5	195	121	0	492	272
	28.5	225	425	0	627	253

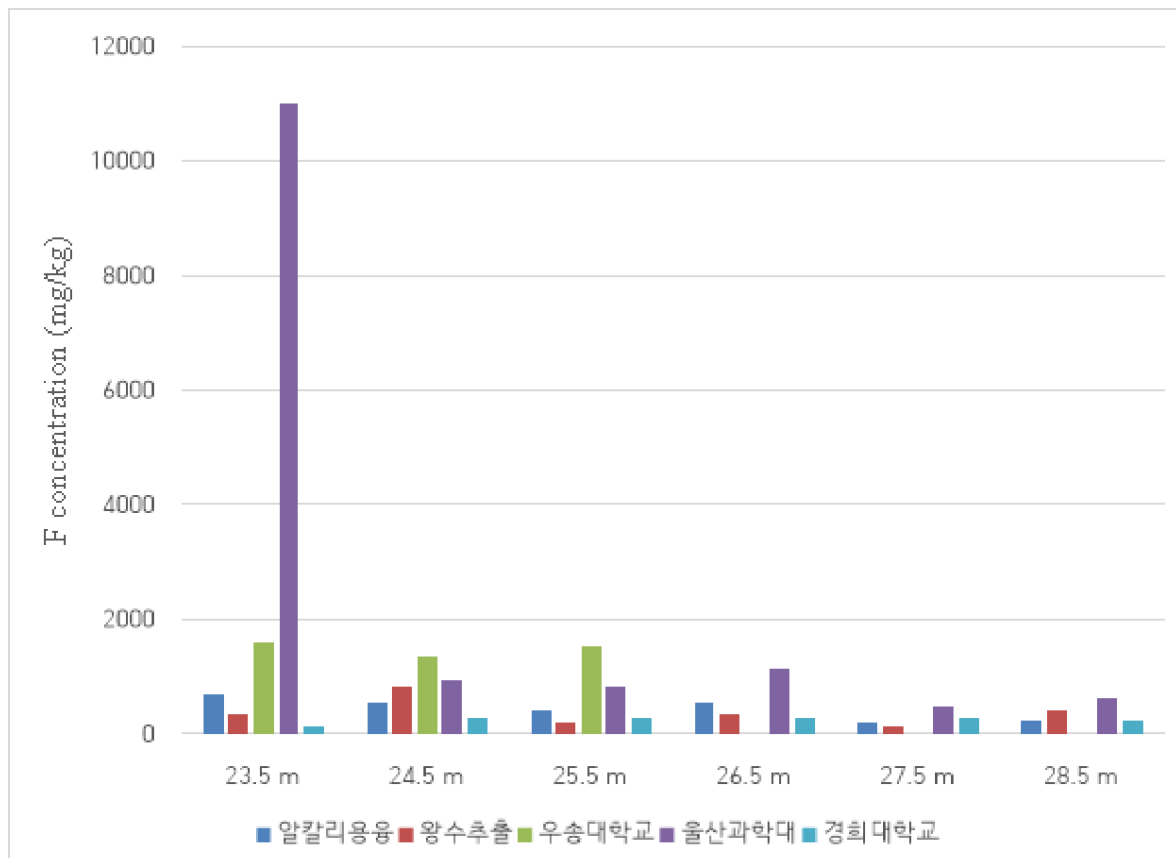


그림 9 GBH-20 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 13과 그림 9은 GBH-20 지역의 분석방법별 샘플 내 불소 농도를 나타낸 결과이다. 본 실험에서 얻은 데이터에서 알칼리용융추출법과 왕수추출을 이용한 측정법을 비교해보면 값들이 비슷한 추이를 보이고 있으며 심도 24.5 m 샘플에 대하여 왕수추

출법을 이용해 측정한 값 830 mg/kg을 제외하고 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 넘는 데이터는 존재하지 않는다. 반면에 기존 실험에서는 우송대학교 (23.5 m, 24.5 m, 25.5 m), 울산과학대 (23.5 m, 24.5 m, 25.5 m, 26.5 m) 데이터에서 800 mg/kg을 초과한다.

표 14 인산석고 보관구역 내 GBH-24 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-24	22.5	316	132	1292	527	570
	23.5	546	721	1546	3633	181
	24.5	236	456	446	538	183
	25.5	212	376	995	483	125

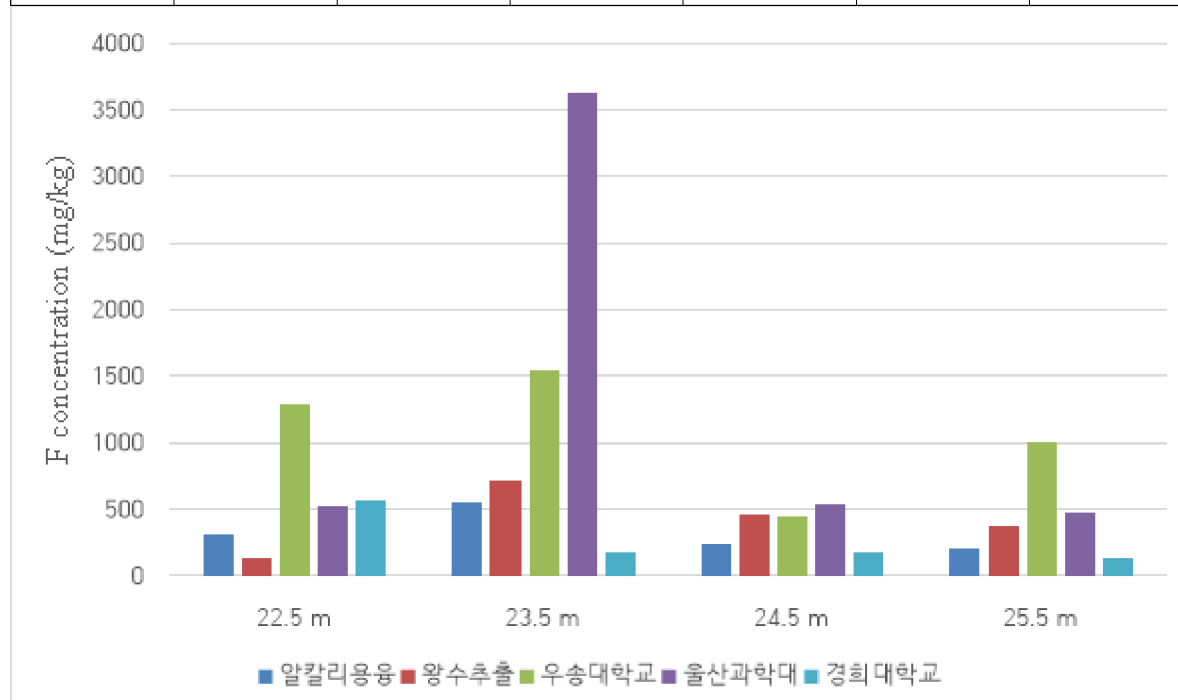


그림 10 GBH-24 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 14와 그림 10은 GBH-24지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 본 실험에서 알칼리용융추출을 이용한 측정법과 왕수추출을 이용한 측정법에서 얻은 데이터는 비슷한 추이를 보였다. 기존 실험에서 얻은 데이터에서 심도 23.5 m의 데이터를 보면 우송대학교와 울산과학대의 값이 각각 1546 mg/kg, 3633 mg/kg인데 반해 경희대학교의 값 181 mg/kg은 매우 낮은 수치이다. 이 값들은 서

로 큰 오차를 가지기 때문에 신뢰도가 떨어질뿐더러 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 모두 초과한다.

표 15 인산석고 보관구역 내 GBH-26 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-26	19.5	636	567	3784	1408	3053
	20.5	436	543	0	727	973
	21.5	293	172	0	717	441

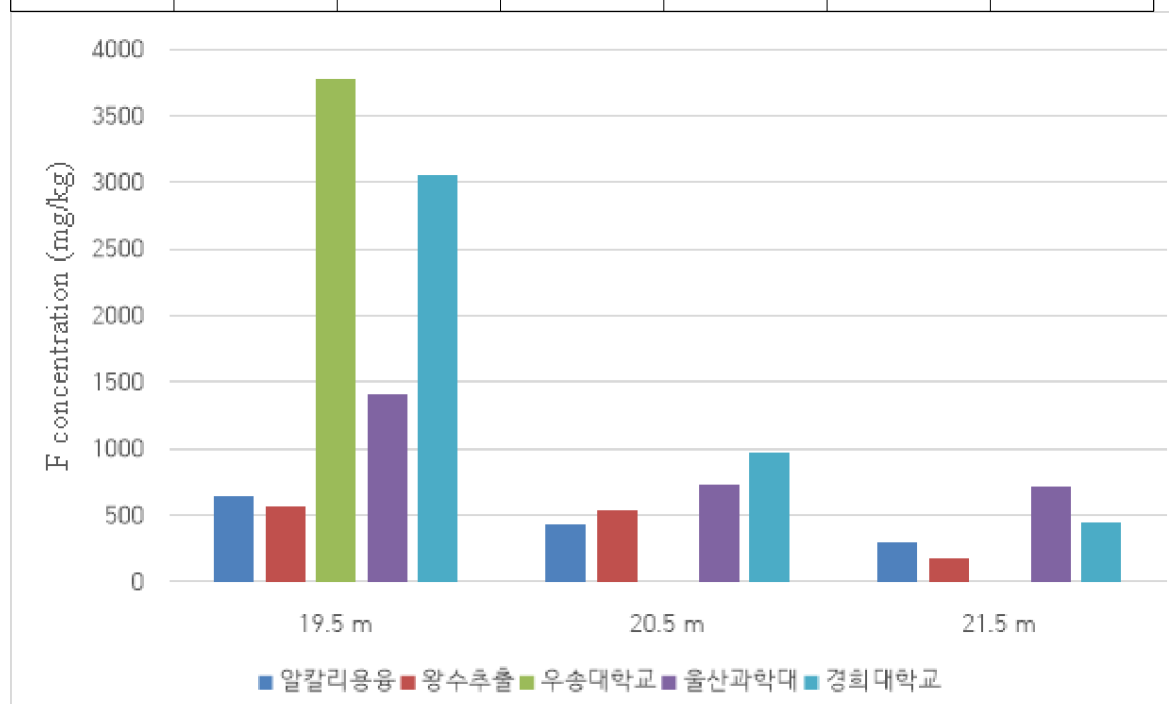


그림 11 GBH-26 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 15와 그림 11은 GBH-26지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 본 실험에서 얻은 데이터를 보면 알칼리용융 추출법을 이용한 측정법에서 심도가 내려갈수록 불소 농도가 감소하는 추이를 보이고 왕수추출을 이용한 측정법에서도 같은 추이를 보인다. 기존 실험에서도 심도가 내려갈수록 농도가 감소하는 추세를 보이지만 우송대학교 실험값을 보면 19.5 m에서 3784 mg/kg 검출되었지만 20.5 m, 21.5 m에서는 미검출이 된 것으로 볼 때 다른 기존 실험 (울산과학대, 경희대학교)과 다른 추세를 보여 정확한 실험결과를 도출해내지 못했다고 볼 수 있다.

표 16 인산석고 보관구역 내 GBH-27 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-27	18.4	486	301	0	854	536
	19.5	936	531	1412	2393	281
	20.5	563	320	2172	971	324
	21.5	686	786	1340	1738	274
	22.3	403	197	3521	733	1826
	22.5	722	454	829	2121	483
	23.8	301	189	0	529	283

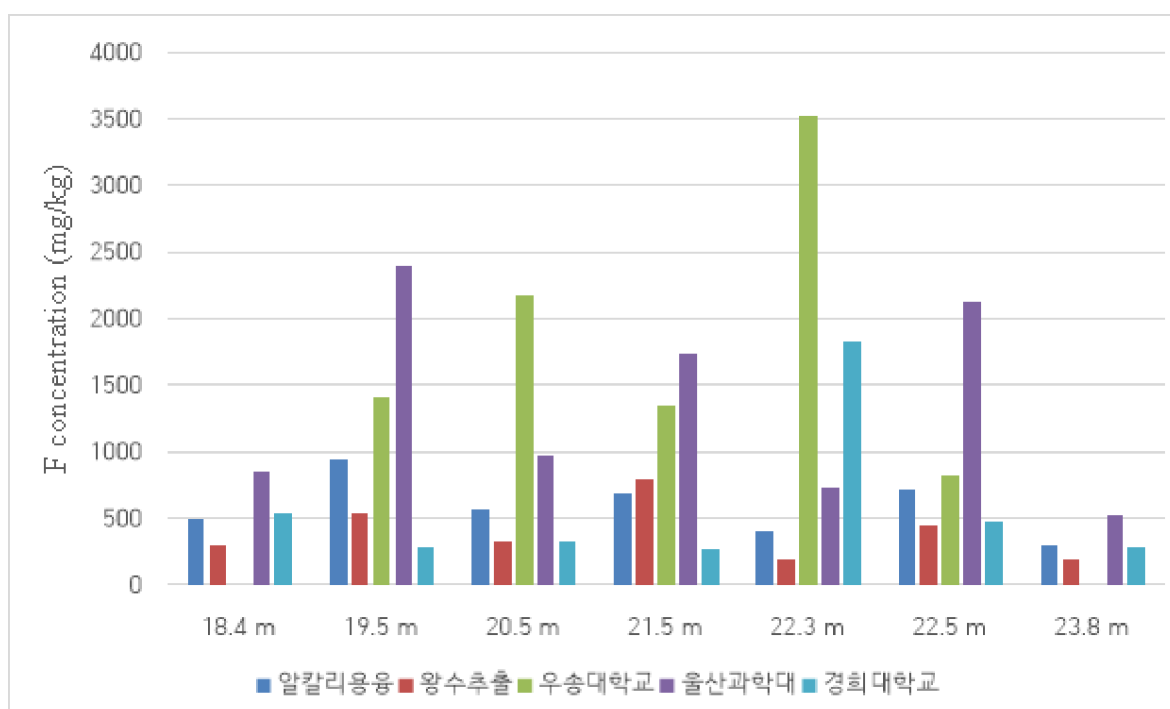


그림 12 GBH-27 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 16과 그림 12는 GBH-27지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 기존 실험인 우송대학교와 울산과학대에서 측정한 데이터들을 보면 우송대학교 (18.4 m, 23.8 m), 울산과학대 (22.3 m, 23.8m) 각각 2개 심도를 제외하면 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과한다. 기준농도를 초과하지 않는 심도가 두 실험이 같으면 이 데이터 값들을 신뢰할 수 있겠지만 심도가 다른 것을 고려하면 신뢰도가 떨어진다고 판단된다. 따라서 본 실험에서 진행한 알칼리용융 추출법과 왕수추출을 이용해 측정한 데이터가 값들이 서로 추세가 비슷함으로 기존실험에서 얻은

데이터보다 본 실험을 통한 데이터가 보다 신뢰성이 있을 것으로 보인다.

표 17 인산석고 보관구역 내 GBH-31 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-31	19.2	574	275	1406	990	280
	20.2	902	423	1503	2836	217
	20.5	410	186	1055	1172	378

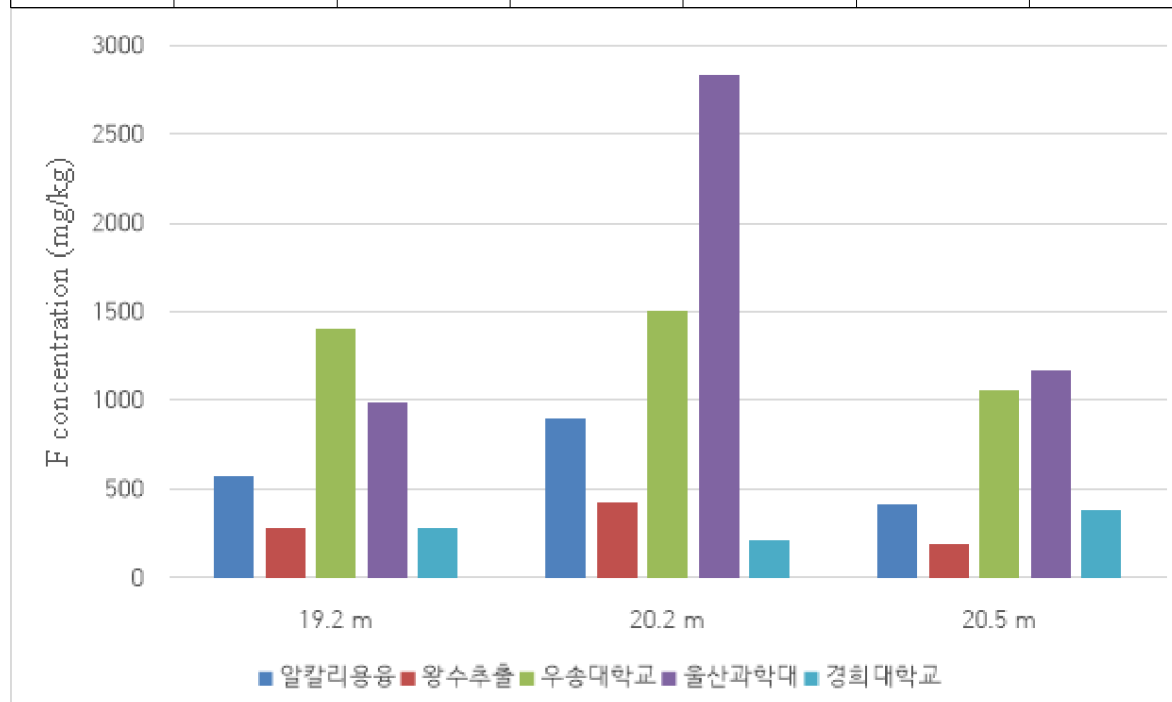


그림 13 GBH-31 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 17과 그림 13은 GBH-31지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 본 실험에서 얻은 데이터를 보면 알칼리용융 추출법을 이용한 측정을 통해 심도 19.2m, 20.2 m, 20.5 m에서 각각 574 mg/kg, 902 mg/kg, 410 mg/kg이며 왕수추출을 이용한 측정에서 얻은 데이터는 심도별로 각각 275 mg/kg, 423 mg/kg, 186 mg/kg이다. 20.2 m에서 가장 높은 수치를 나타내고 이 추이는 기존 실험 (우송대학교, 울산과학대)에서도 나타내기에 비교적 정확한 수치라고 판단할 수 있다. 우송대학교, 울산과학대에서 진행한 실험에서 모든 샘플에서 3지역 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과한다. 다만 이번 분석과 경희대 분석에서는 800 mg/kg을 초과하는 값이 하나밖에 (알칼리용융추출을 이용해 측정한 심도 20.2 m 샘플) 없기 때문에 이 시추지역이 토양오염 우려기준을 초과하는지는 정확하게 판단할 수가 없다.

표 18 인산석고 보관구역 내 GBH-35 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-35	17.7	1484	623	1426	3421	331
	18.5	645	980	866	3221	308
	19.5	354	172	0	824	222
	20.5	400	208	0	756	163

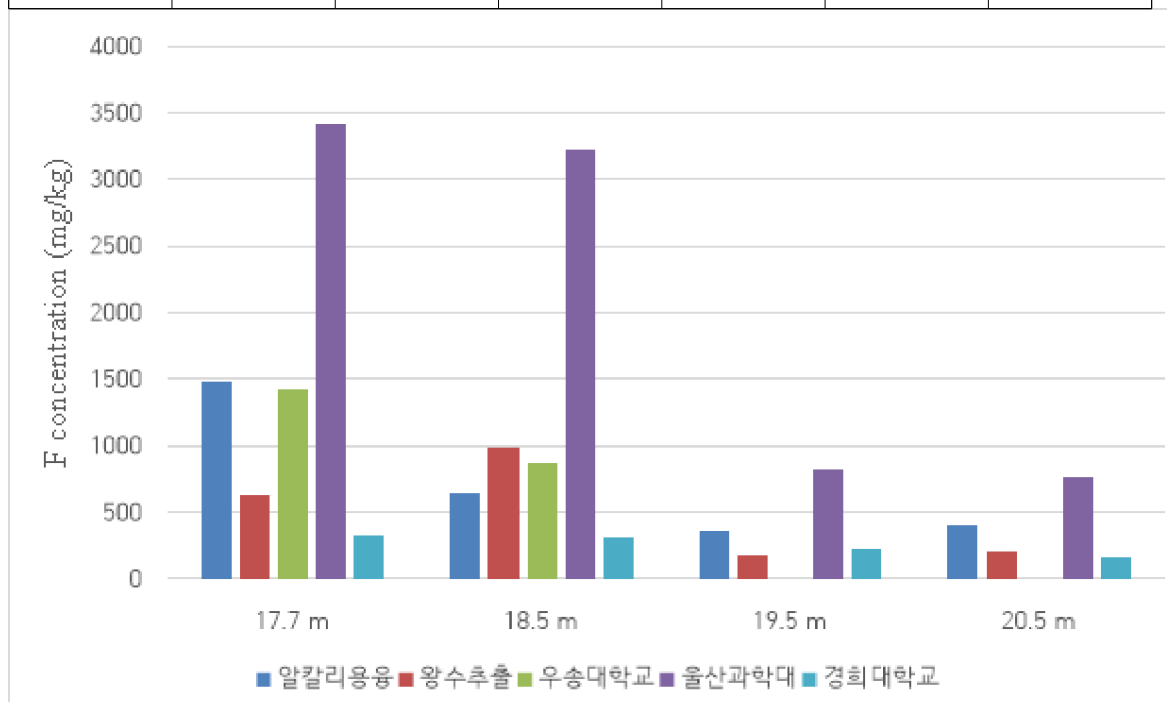


그림 14 GBH-35 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 18과 그림 14는 GBH-35지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 전반적으로 17.7 m의 샘플이 다른 심도에 비해 비교적 값이 높게 나온다. 또한 본 실험에서 얻은 데이터 중 알칼리용융 추출법과 왕수추출을 이용해 측정한 값 중 각각 17.7 m, 18.5 m에서 얻은 값이 우려기준농도를 초과하는데 기존실험에서 같은 심도의 데이터를 비교해보면 우송대학교와 울산과학대에서 우려기준농도를 초과하는 값이 나왔으므로 GBH-35 지역은 불소오염 우려기준을 초과하고 있다.

표 19 인산석고 보관구역 내 GBH-37 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-37	11.5	179	81	0	474	200
	13.2	529	275	0	8541	5094
	16.5	576	657	0	11441	899
	17.5	336	137	1103	6771	154
	18.5	1612	725	1681	13591	320
	19.5	273	234	1640	1301	19618

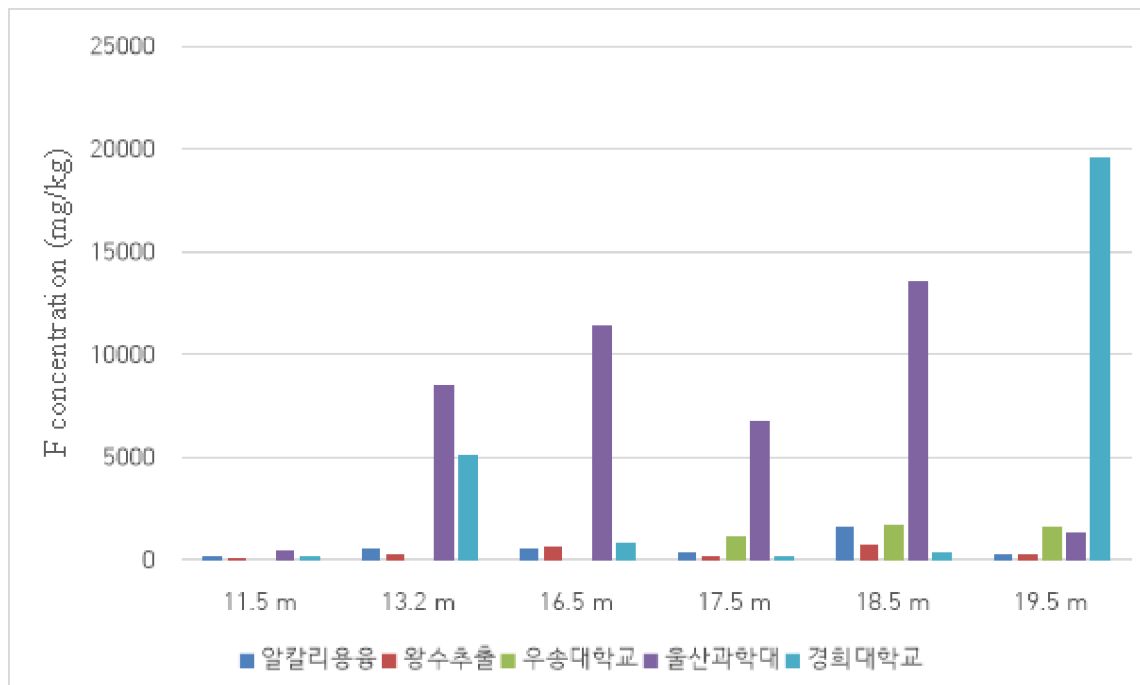


그림 15 GBH-37 지역 분석방법별 및 심도별 불소 측정 농도

표 19와 그림 15는 GBH-37지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 기존실험에서 울산과학대 데이터를 보면 11.5 m의 값을 제외하면 모든 심도에서 우려기준농도를 초과한다. 우송대학교와 경희대학교 데이터와 비교해보면 우송대학교 11.5 m, 13.2 m, 16.5 m에서는 불소가 미검출 되었고 경희대학교 11.5 m, 17.5 m, 18.5 m에서도 우려기준농도에 훨씬 못미치기 때문에 울산과학대에서 우려기준농도를 초과하는 값들은 신뢰하기 어려워 보인다. 본 실험값을 살펴보면 알칼리용융 추출법을 이용한 측정법과 왕수추출을 이용한 측정법의 결과값이 추세가 같으므로 본 실험의 실험값이 기존실험값에 비해 신뢰하기 더 좋은 데이터라고 보인다. 심도 18.5m에서의 불소농도는 우송대 및 울산과학대 분석결과와 절대값은 다르나 상대

적인 차이가 흡사하고 모두 우려기준인 800 mg/kg을 초과하고 있으므로 심부지역에 오염이 존재하고 있는 것으로 보인다.

표 20 인산석고 보관구역 내 GBH-39 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-39	14.5	368	172	1714	672	829
	15.5	330	185	0	3985	365
	16.5	266	130	0	13660	257

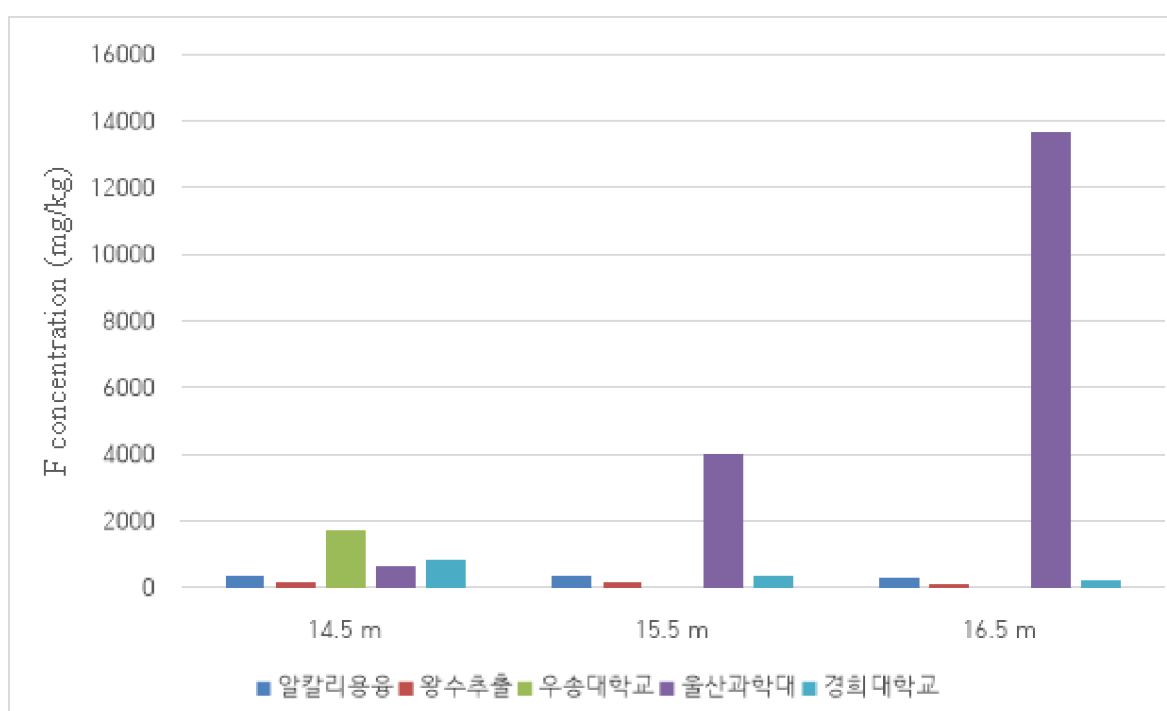


그림 16 GBH-39 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 정리

표 20과 그림 16는 GBH-39지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 본 실험에서 얻은 데이터값과 기존 실험에서 얻은 데이터 값을 비교해보면 울산과학대 실험에서 15.5 m, 16.5 m에서 각각 3985 mg/kg, 13660 mg/kg이라는 우려기준 농도에 비해 높은 수치를 보이는데 다른 실험과 비교해 현저히 높은 수치인 것을 보면 신뢰할 수 없는 실험값이라고 보여진다. 또한 우송대학교 실험에서 14.5 m의 결과값만 현저히 높고 다른 두 심도에서는 미검출 되었다고 나왔기 때문에 신뢰도가 떨어진다고 보여지고 비교적 추세가 비슷한 본 실험과 경희대학교에서 실시한 기존 실험값이 신뢰가 상대적으로 높은 실험값이라고 할 수 있다.

표 21 인산석고 보관구역 내 GBH-40 지역 분석방법별 불소 측정 농도

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)				
		알칼리용융	왕수추출	우송대학교	울산과학대	경희대학교
GBH-40	9.8	467	317	0	5360	229
	10.5	368	250	0	7400	201
	11.5	312	168	192	6070	2126
	14.5	390	206	1576	825	900
	15.5	-	-	1021	2453	414
	16.5	-	-	1716	1380	1380

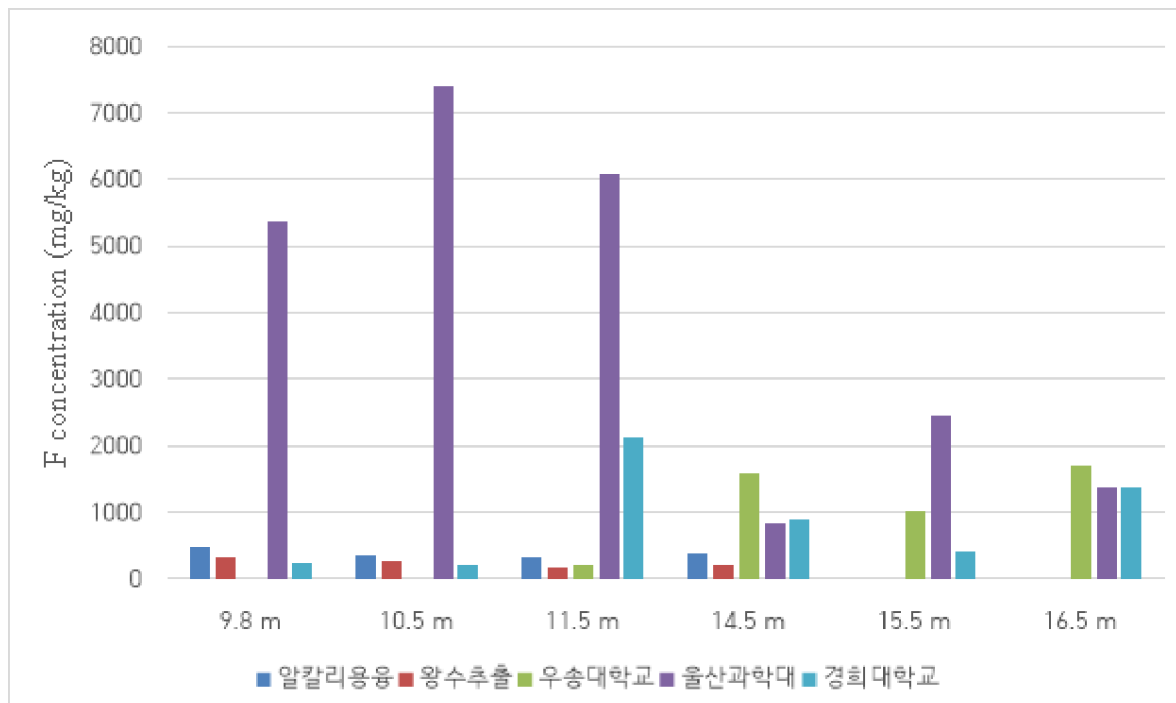


그림 17 GBH-40 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 정리

표 21과 그림 17은 GBH-39지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 울산과학대 분석의 모든 심도에서 우려기준 농도에 비해 높은 수치를 보이는데 본 실험이나 다른 기존 실험과 비교해보았을 때 현저히 높은 수치이므로 신뢰도가 떨어진다고 보인다. 본 실험에서는 모든 샘플이 우려기준 농도보다 낮은 수치를 보여 준다. 기존실험에서는 15.5 m, 16.5 m 샘플의 실험값이 존재하지만 본 실험에서는 시료가 존재하지 않는 관계로 실험을 진행하지 못하였다.

4.1.3 GH(2021년 시추)지역 총 농도

표 22 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 1	3.5	276	350	375

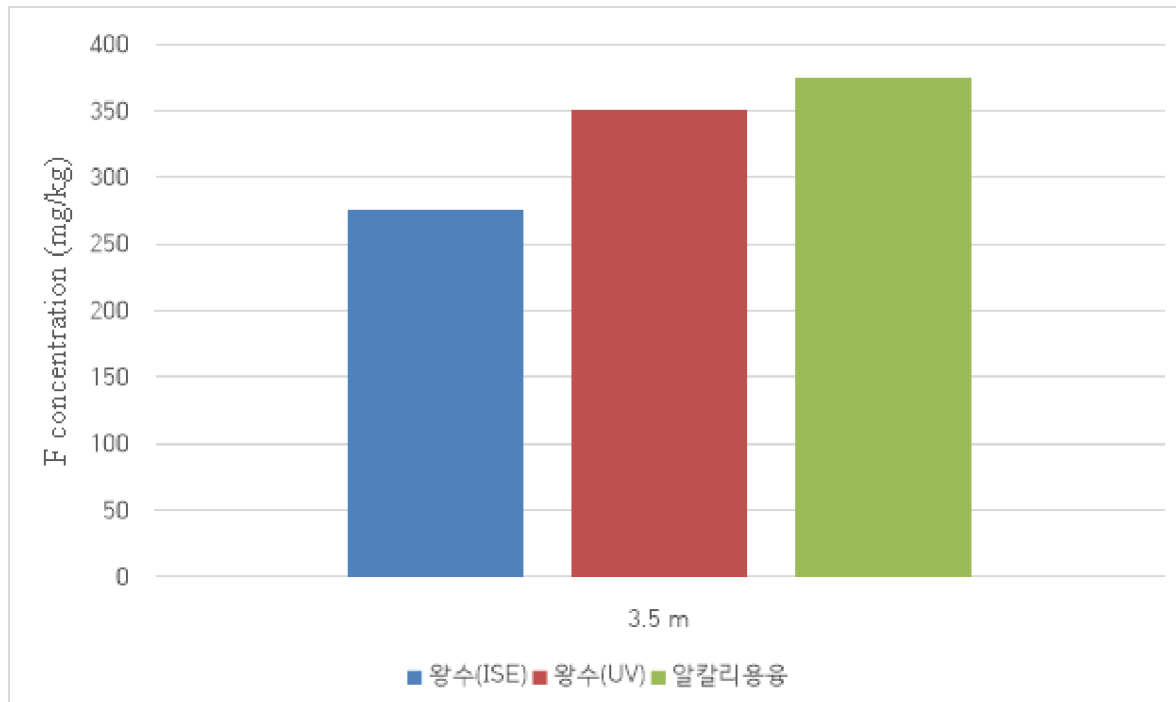


그림 18 GH-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 22와 그림 18은 GH-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. 본 실험에서는 심도별로 왕수추출을 통한 ISE측정법, 왕수추출을 통한 UV분광법, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정 총 3개의 방법으로 실험을 진행하였다. GH-1 지역에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 276 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 350 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 375 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 23 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 2-3)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 2-3	13.5	243	316	396
	14.5	241	325	380

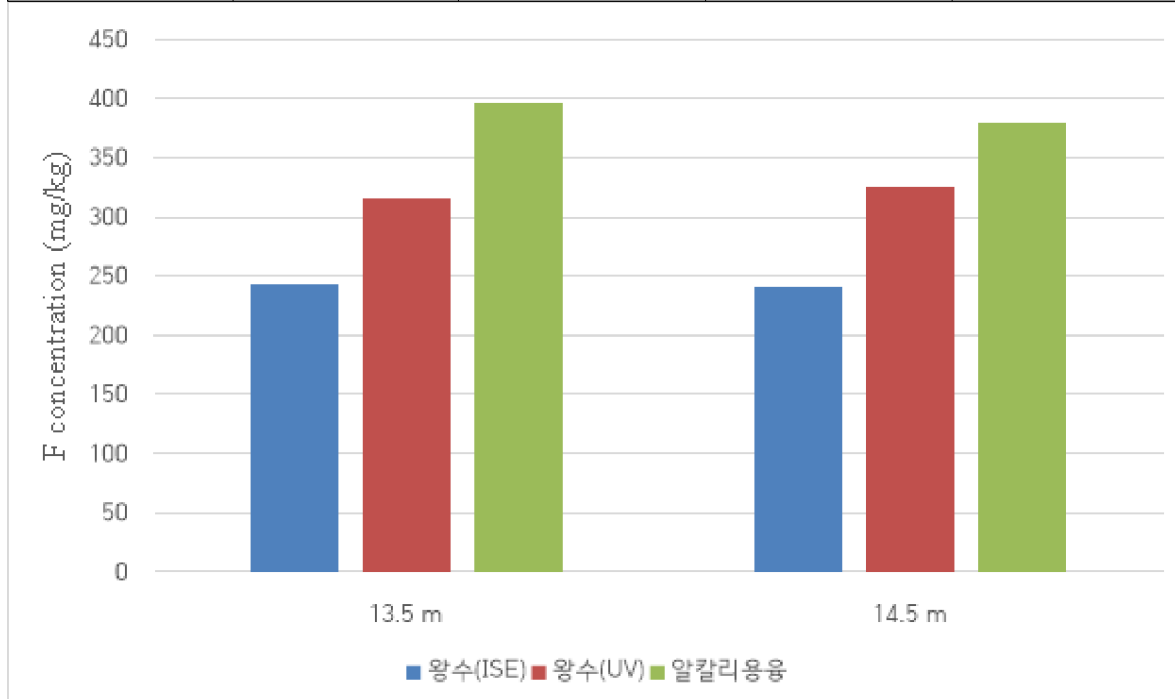


그림 19 GH 2-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 23과 그림 19는 GH 2-3 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 2-3 지역에서 심도별로 13.5 m 에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 243 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 316 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 396 mg/kg 14.5 m에서 ISE측정법을 통해 241 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 325 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 380 mg/kg 의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 24 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 3-3)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 3-3	13.5	358	454	619

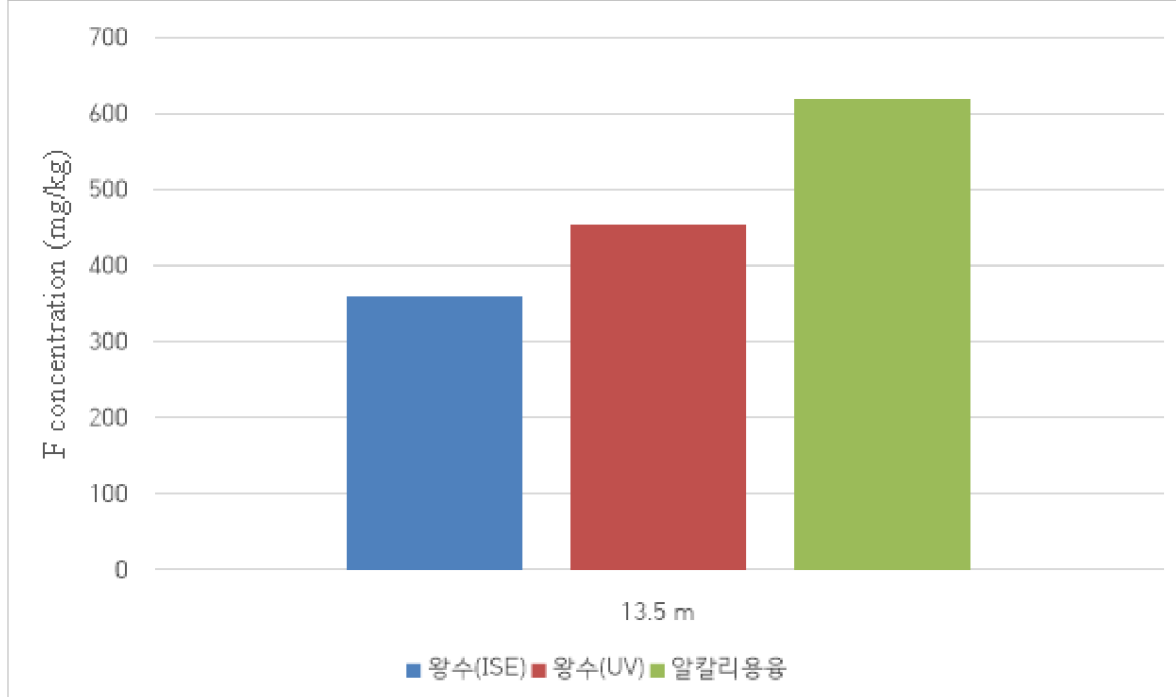


그림 20 GH 3-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 24와 그림 20은 GH 3-3 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 3-3 지역에서 심도별로 13.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 358 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 454 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 619 mg/kg의 결과를 획득하였다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 25 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 4-2)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 4-2	11.5	191	259	360
	12.5	319	414	465

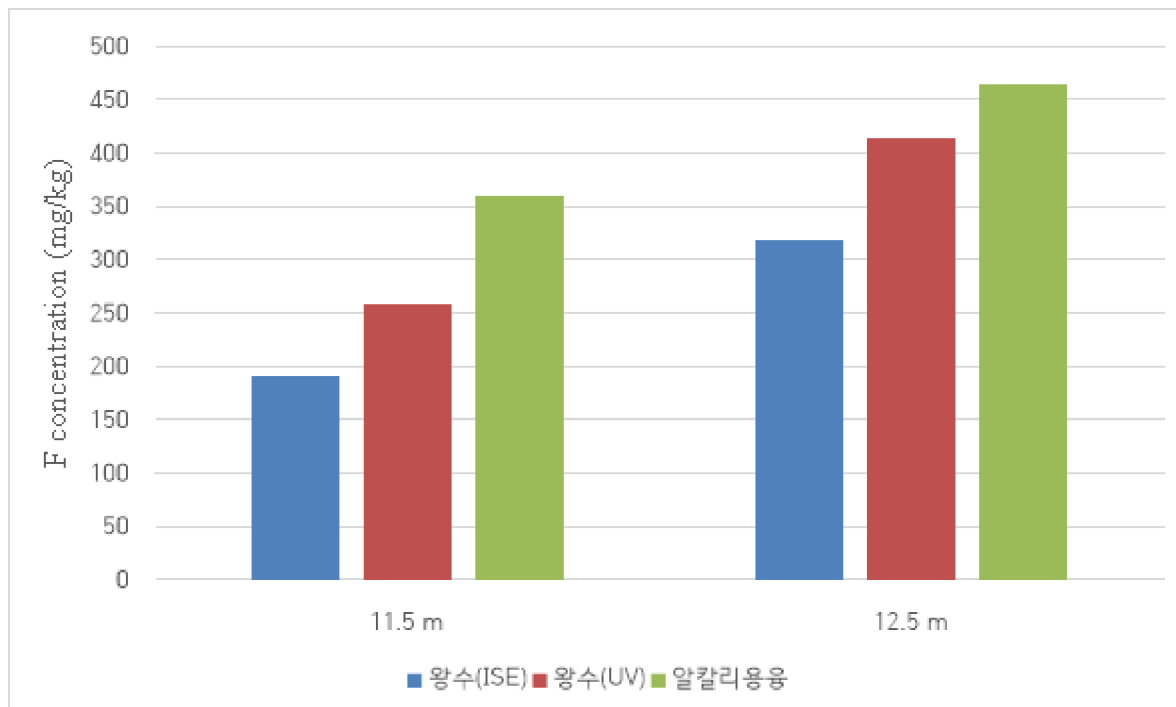


그림 21 GH 4-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 25와 그림 21은 GH 4-2 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 2-3 지역에서 심도별로 11.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 191 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 259 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 396 mg/kg 12.5 m에서 ISE측정법을 통해 319 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 414 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 465 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 26 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 5-3)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 5-3	13.5	365	277	365

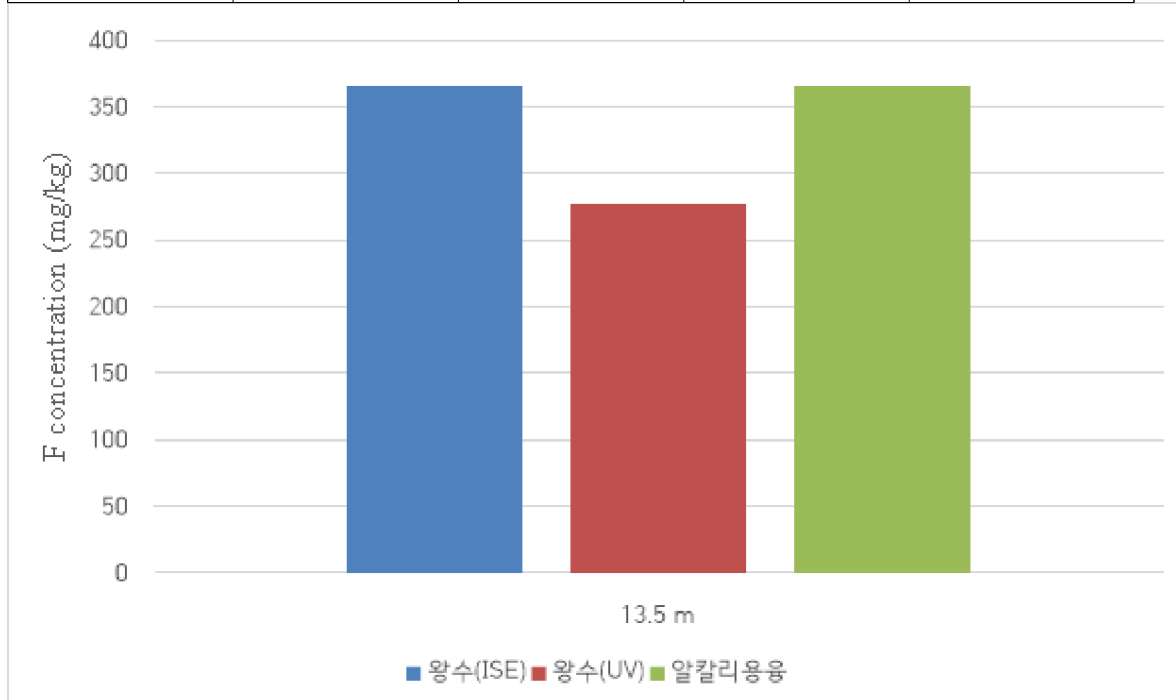


그림 22 GH 5-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 26과 그림 22는 GH 5-3 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 5-3 지역에서 심도별로 13.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 365 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 277 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 365 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 27 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 6-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 6-1	5.5	173	149	173

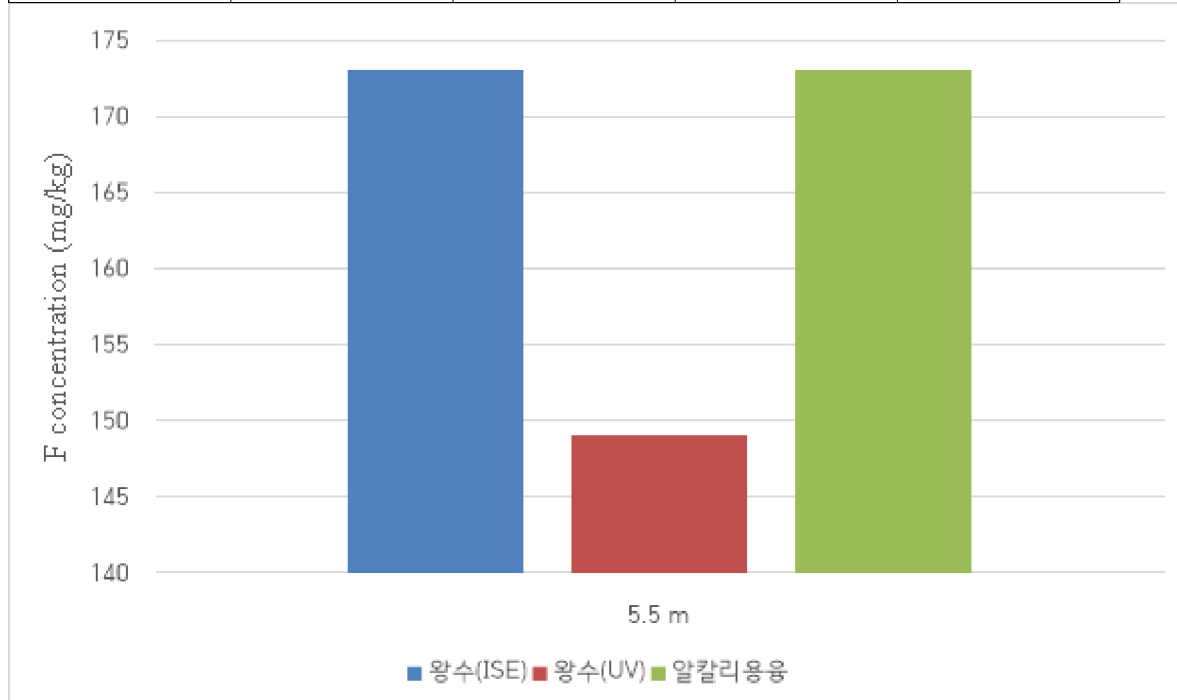


그림 23 GH 6-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 27과 그림 23은 GH 6-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 6-1 지역에서 심도별로 5.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 173 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 149 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 173 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 28 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 6-3)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 6-3	13.5	346	458	346
	14.5	318	433	318

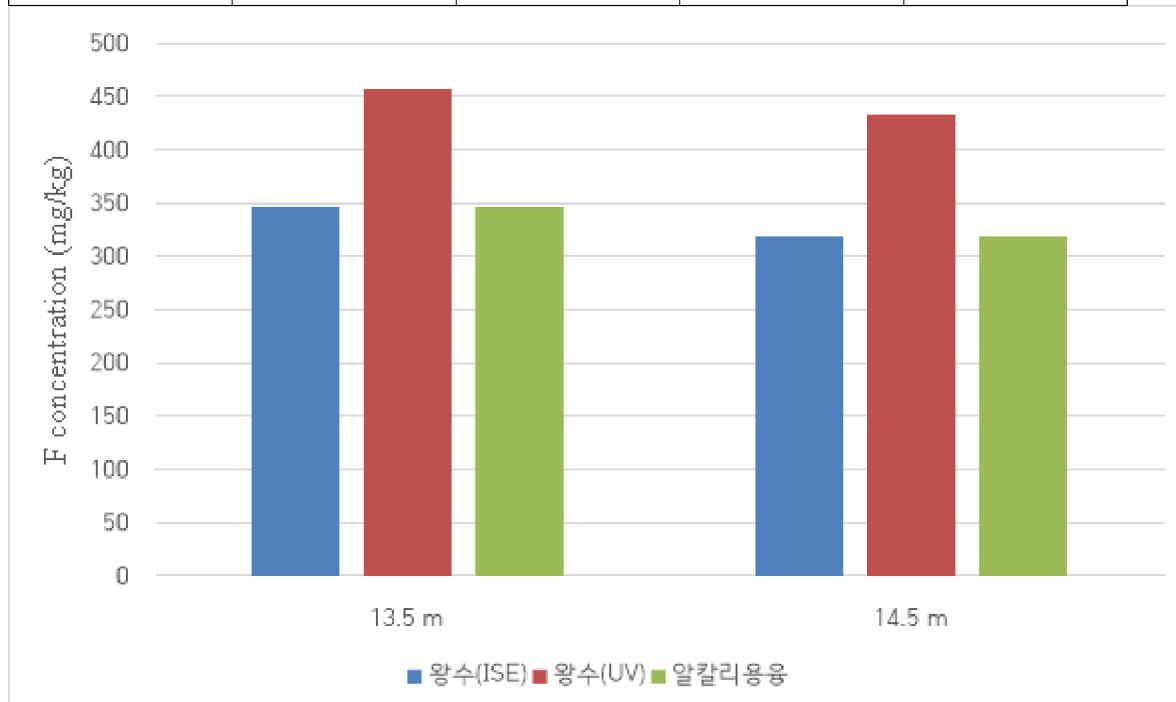


그림 24 GH 6-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 28과 그림 24는 GH 6-3 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 6-3 지역에서 심도별로 13.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 346 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 458 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 346 mg/kg 14.5 m에서 ISE측정법을 통해 318 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 433 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 318 mg/kg 의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 29 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 7-2)

시추지역	심도	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 7-2	8.5	237	305	237

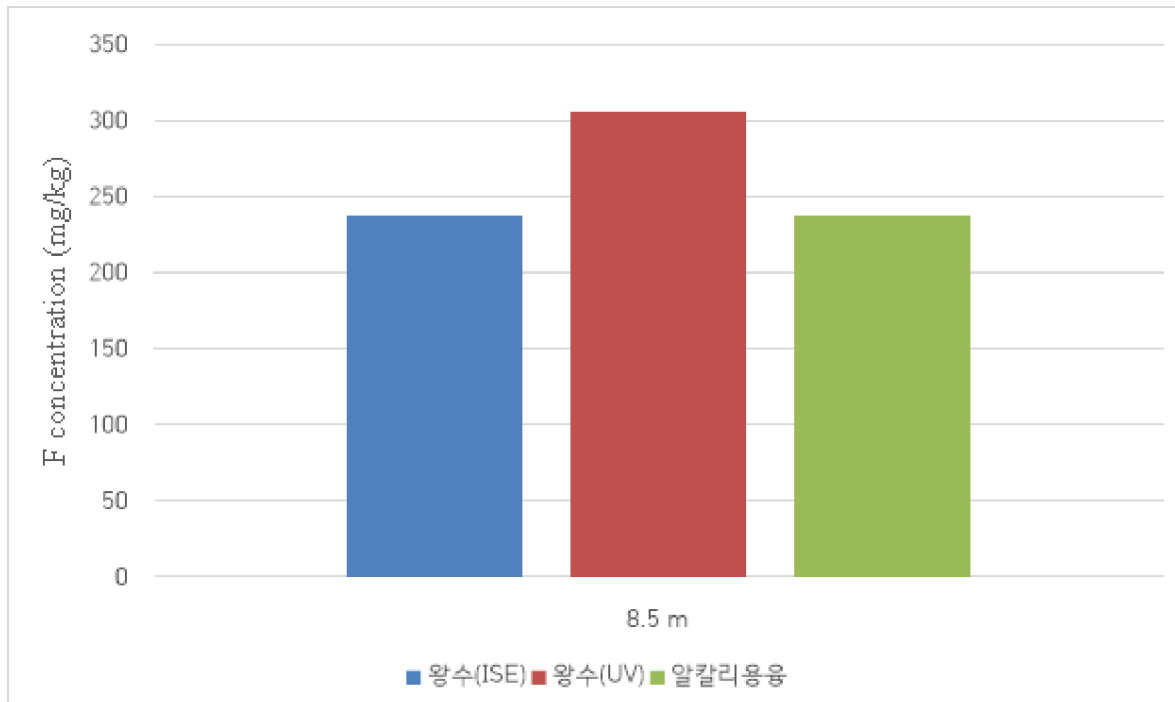


그림 25 GH 7-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 29와 그림 25는 GH 7-2 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 7-2 지역에서 심도별로 8.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 237 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 305 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 237 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 30 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 8-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 8-1	5.8	366	512	559

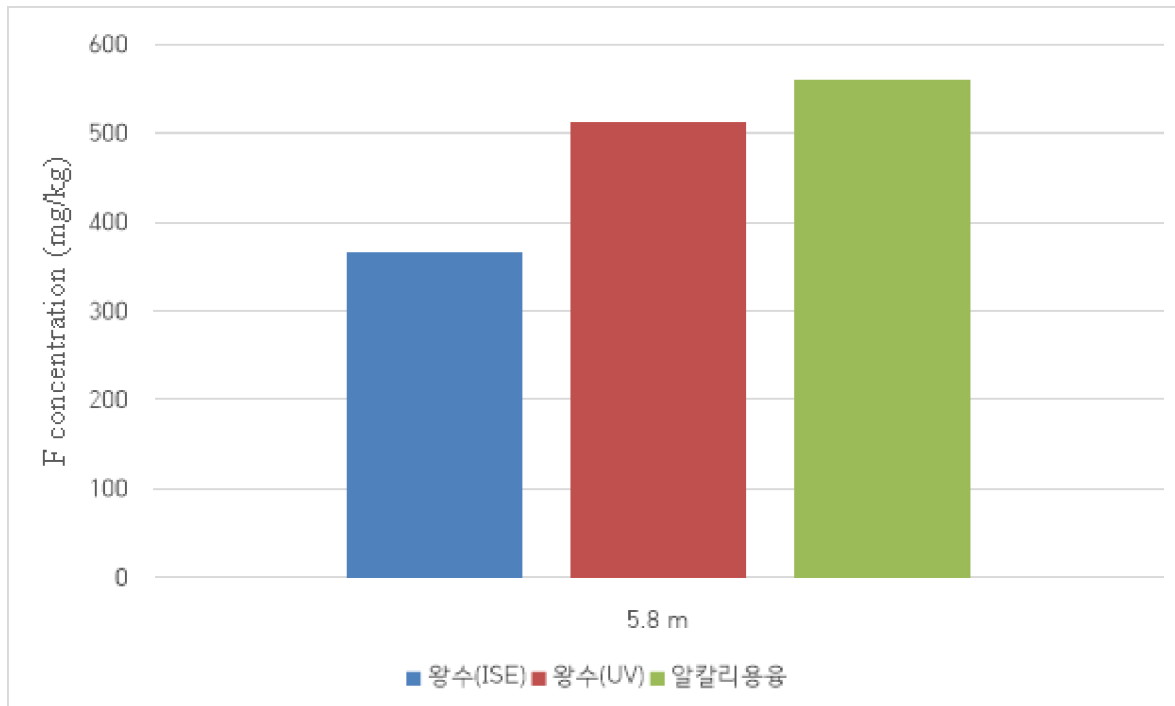


그림 26 GH 8-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 30과 그림 26은 GH 8-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 8-1 지역에서 심도별로 5.8 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 366 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 512 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 559 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 31 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 8-2)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 8-2	7.5	267	343	379

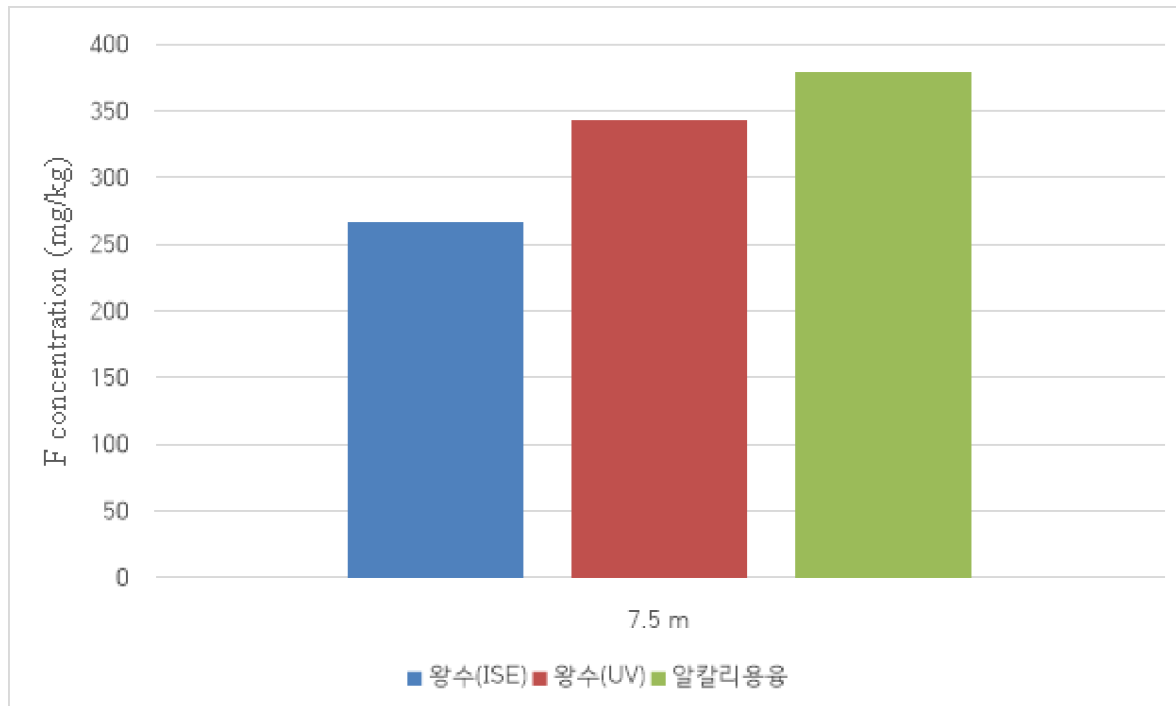


그림 27 GH 8-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 31과 그림 27은 GH 8-2 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 8-2 지역에서 심도별로 7.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 267 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 343 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 379 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 32 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 14-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 14-1	5.5	266	371	433
	6.5	189	236	308

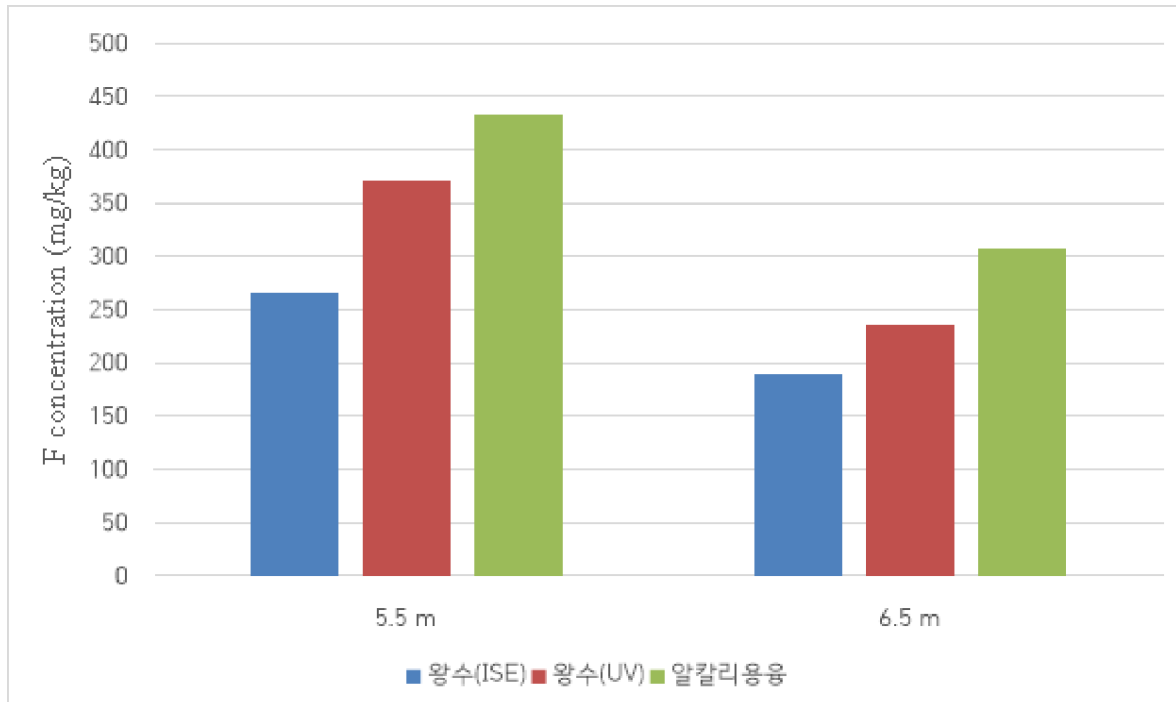


그림 28 GH 14-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도를 심도별 그래프

표 32와 그림 28은 GH 14-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 14-1 지역에서 심도별로 5.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 266 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 371 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 433 mg/kg 6.5 m에서 ISE측정법을 통해 189 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 236 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 308 mg/kg 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 33 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 14-2)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 14-2	11.5	325	434	513

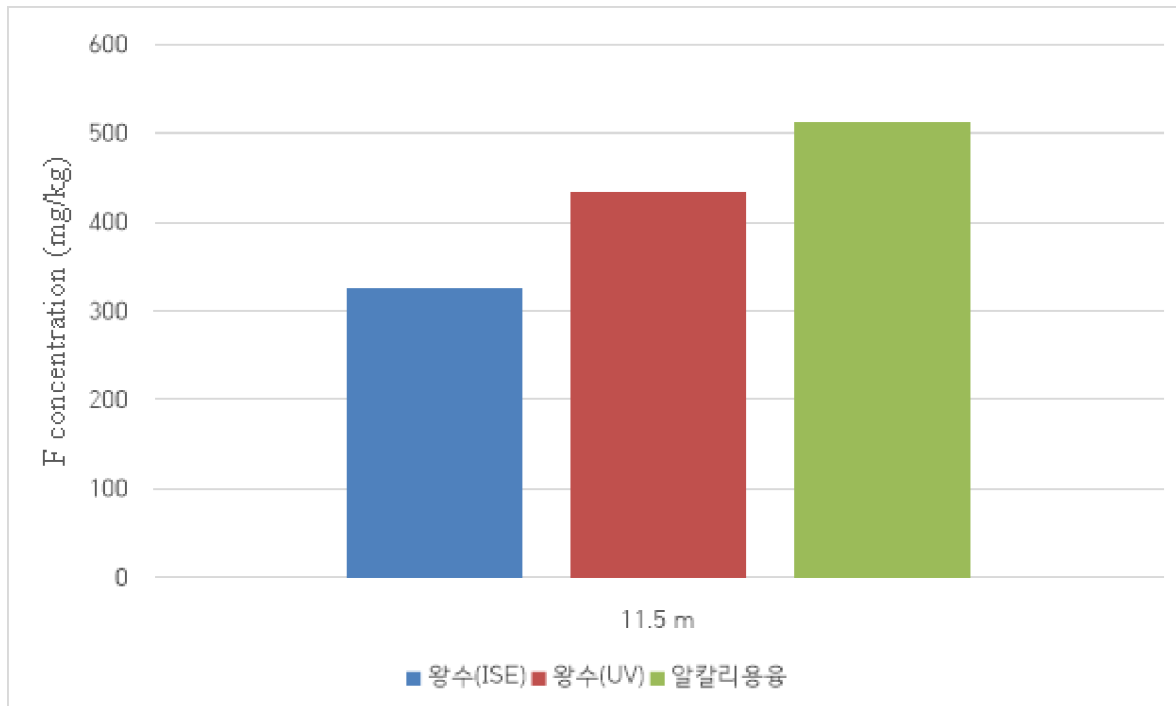


그림 29 GH 14-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 33과 그림 29는 GH 14-2 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 14-2 지역에서 심도별로 11.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 325 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 434 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 513 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 34 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 14-3)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 14-3	12.5	282	351	468

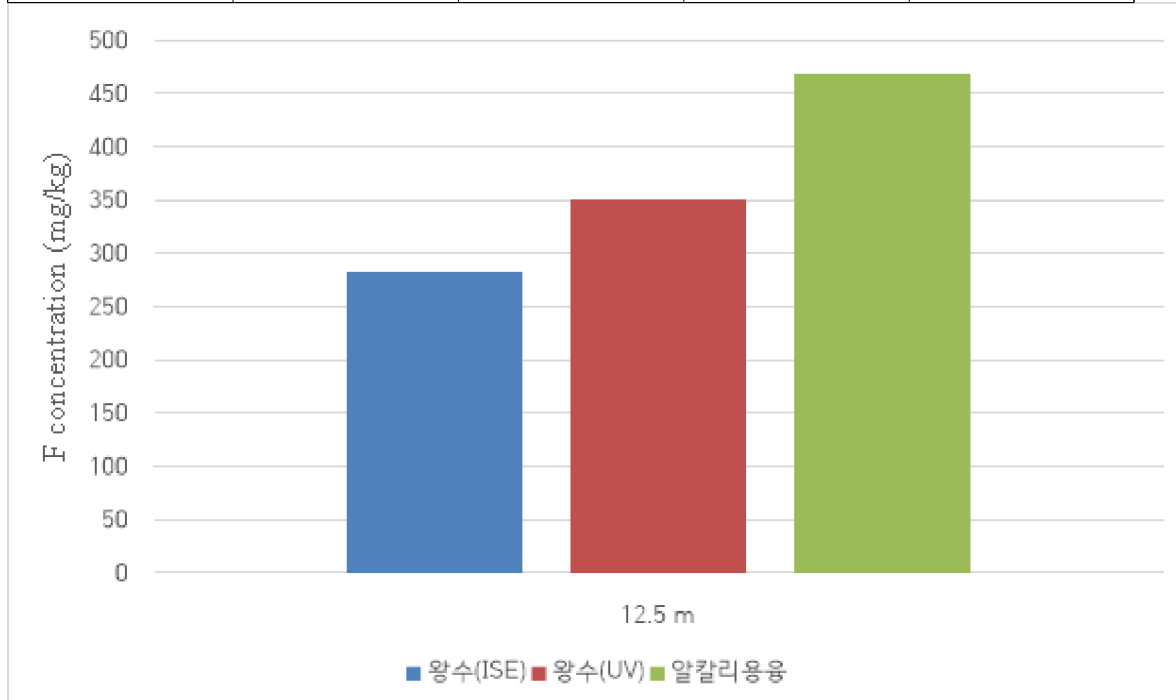


그림 30 GH 14-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 34와 그림 30은 GH 14-3 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 14-3 지역에서 심도별로 12.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 282 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 351 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 468 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 35 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 15-2)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 15-2	11.9	241	326	375

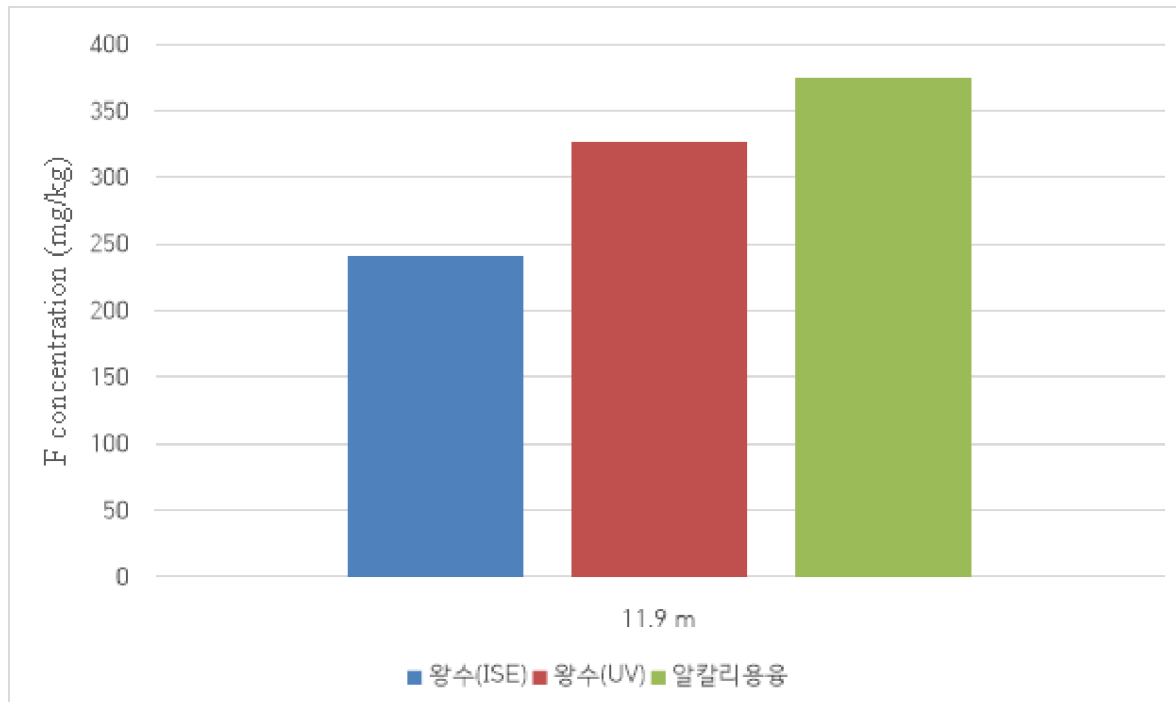


그림 31 GH 15-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 35와 그림 31은 GH 15-2 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 15-2 지역에서 심도별로 11.9 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 241 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 326 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 375 mg/kg의 결과를 도출하였다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 36 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 15-3)

시추지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 15-3	13.5	372	512	561

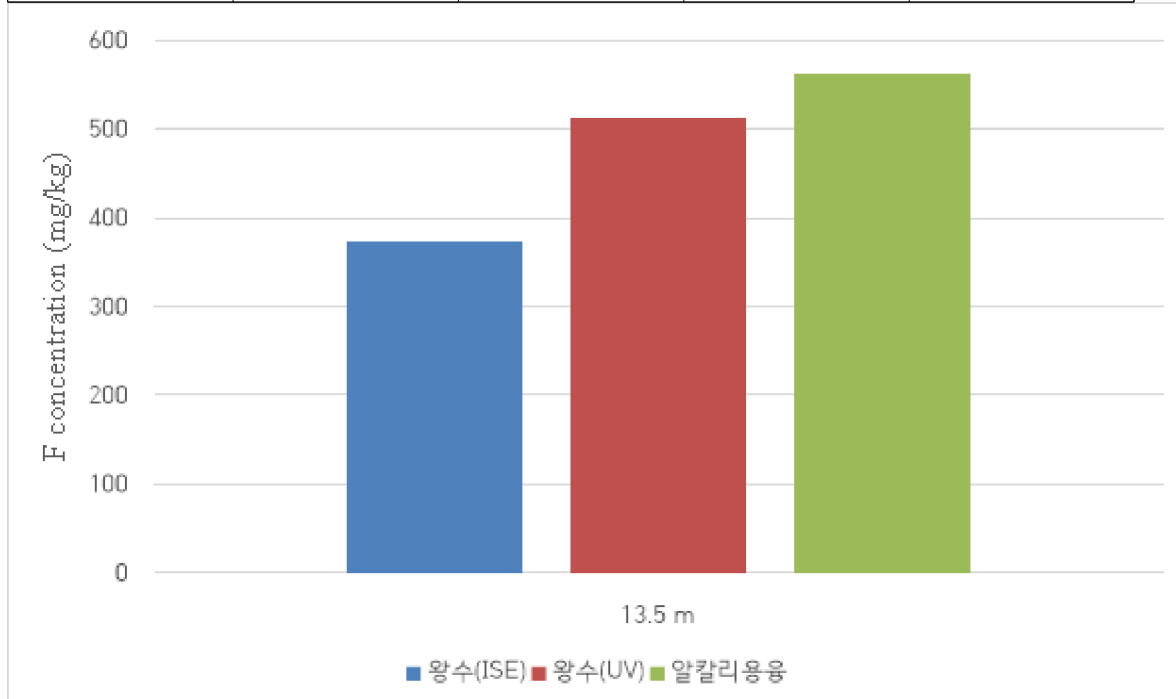


그림 32 GH 15-3 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 36과 그림 32는 GH 15-3 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 15-3 지역에서 심도별로 13.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 372 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 512 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 561 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 37 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 16-2)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 16-2	7.5	267	311	376

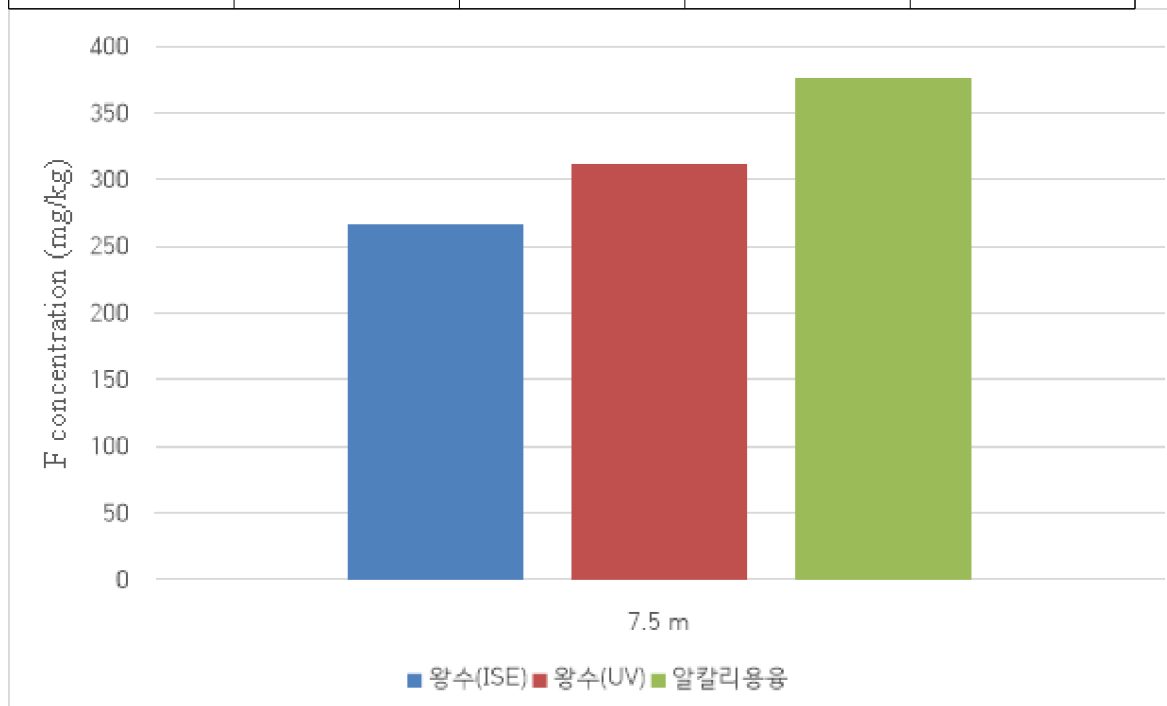


그림 33 GH 16-2 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 37과 그림 33는 GH 16-2 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 16-2 지역에서 심도별로 7.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 267 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 311 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 376 mg/kg의 결과를 획득하였다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 38 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 17-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 17-1	5.5	401	480	589

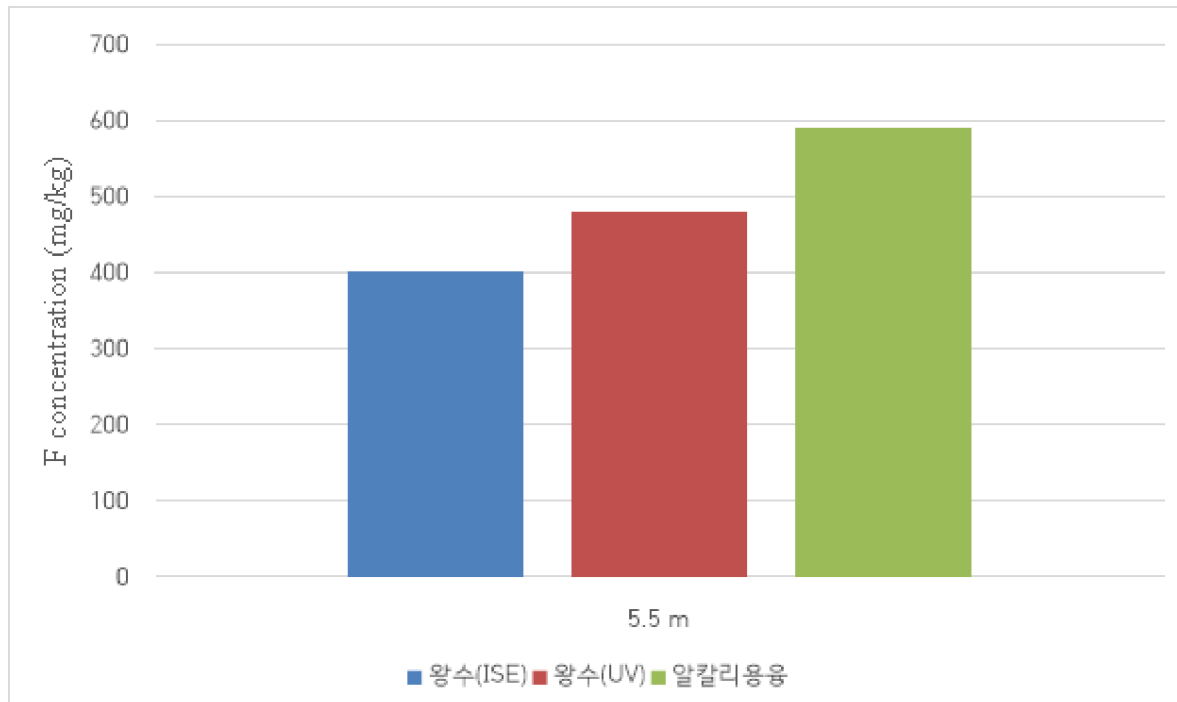


그림 34 GH 17-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 38과 그림 34는 GH 17-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 17-1 지역에서 심도별로 5.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 401 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 480 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 589 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 39 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 18-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 18-1	4.5	280	241	476

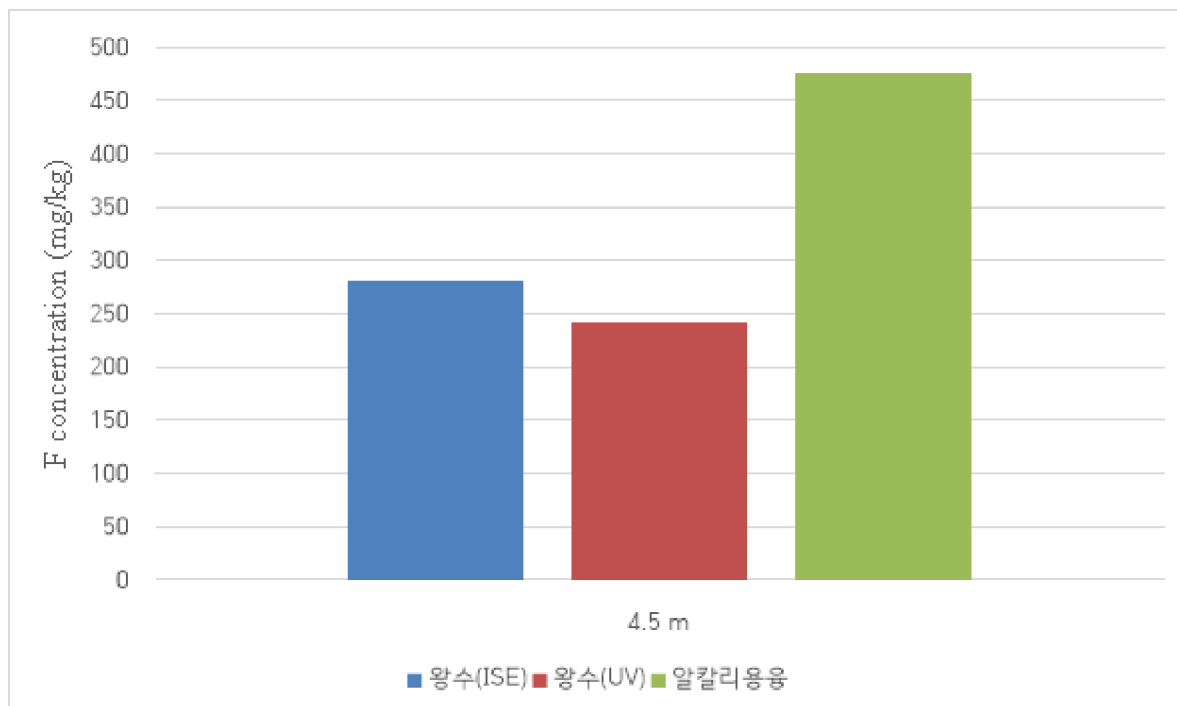


그림 35 GH 18-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 39와 그림 35는 GH 18-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 18-1 지역에서 심도별로 4.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 280 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 241 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 476 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 40 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 19-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 19-1	5.5	656	501	800

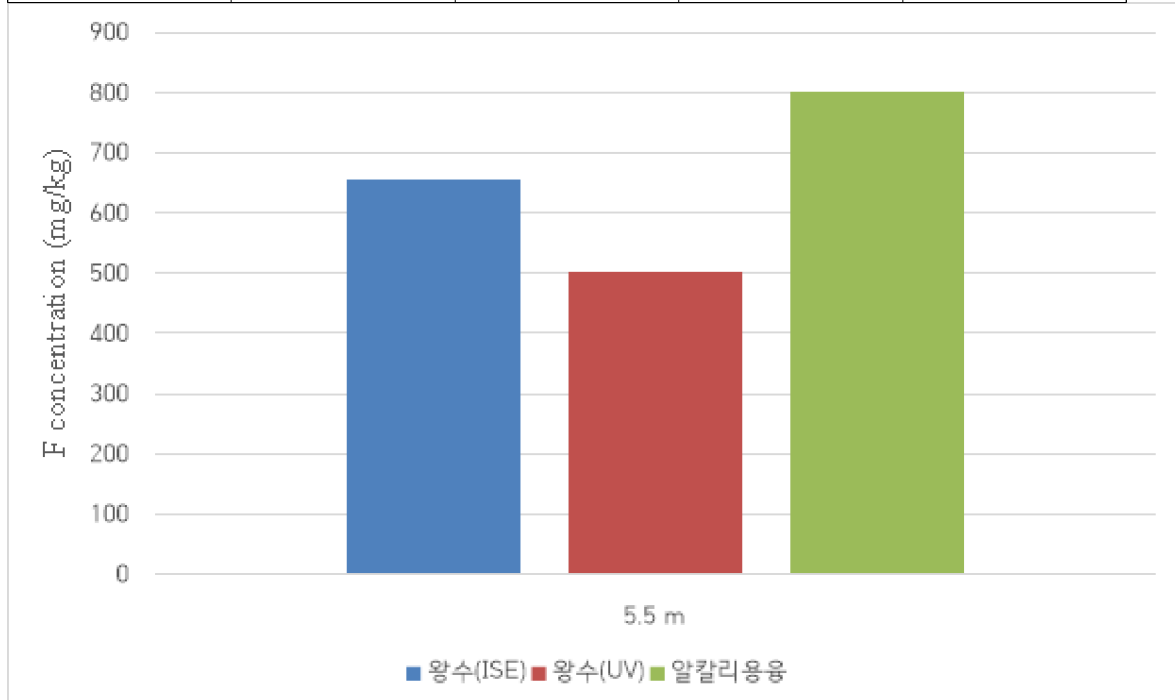


그림 36 GH 19-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

그림 35

표 40과 그림 36은 GH 19-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 19-1 지역에서 심도별로 5.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 656 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 501 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 800 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소 오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 41 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 20-1)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 20-1	4.5	364	447	524

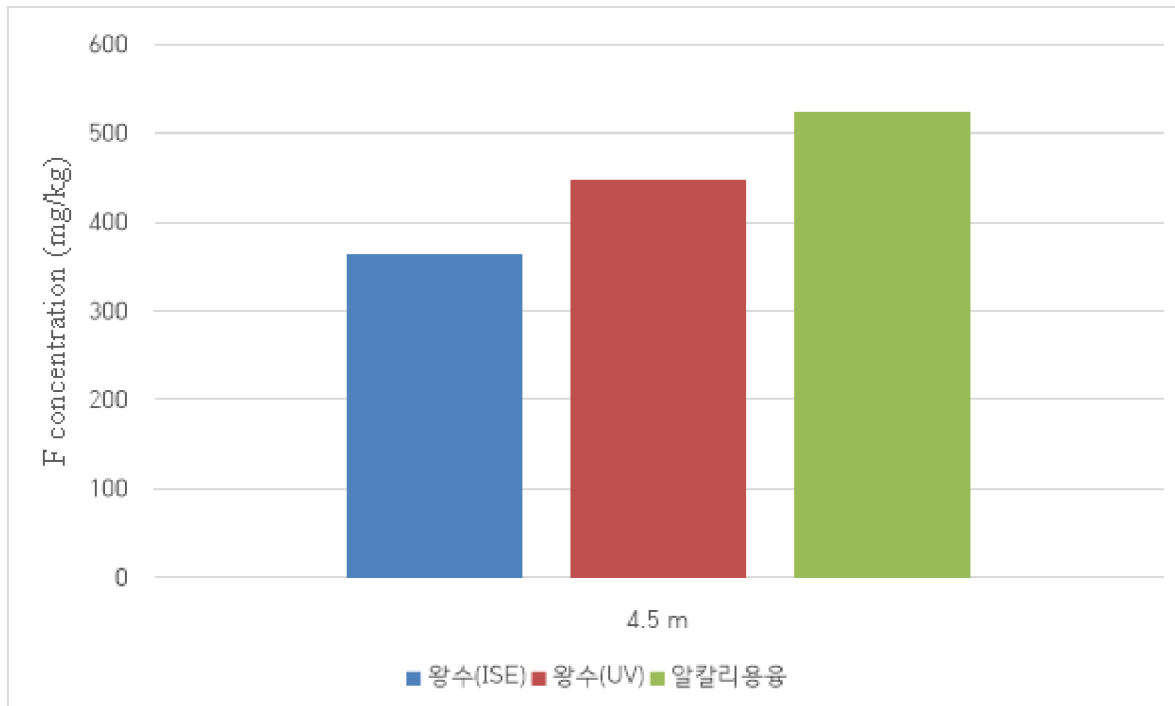


그림 37 GH 20-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 41과 그림 37은 GH 20-1 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH 20-1 지역에서 심도별로 4.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 364 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 447 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 524 mg/kg의 결과를 도출하였다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

표 42 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH 20-2)

시추 지역	심도 (m)	분석방법별 불소 측정 농도(total F, mg/kg)		
		왕수(ISE)	왕수(UV)	알칼리용융
GH 20-2	6.5	250	190	340

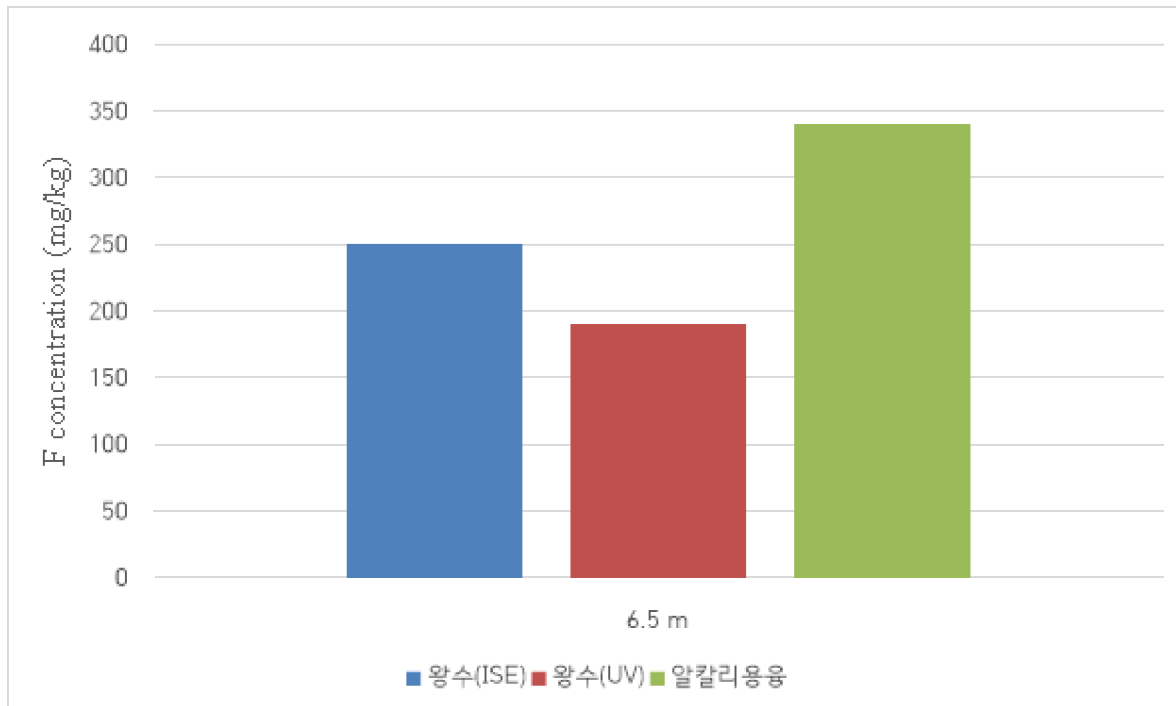


그림 38 GH-1 지역 분석방법별 불소 측정 농도 심도별 그래프

표 42과 그림 38은 GH 20-2 지역 분석방법별 샘플의 불소 농도를 측정하여 나타낸 결과이다. GH20-2 지역에서 심도별로 6.5 m에서 왕수추출을 통한 ISE측정법을 통해 250 mg/kg, 왕수추출을 통한 UV분광법을 통해 190 mg/kg, 알칼리용융추출을 통한 ISE 측정법을 통해 340 mg/kg의 결과를 얻었다. 모든 측정법에서 3지역 불소오염 우려기준인 800 mg/kg을 초과하지 않았다.

4.2 XRF 분석법을 통한 토양 내 불소 농도

4.2.1 BH(2020년 시추)지역 XRF 분석으로 측정한 불소 농도

표 43 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-1)

			분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명		심도	XRF
BH-1	석고층	(표층~ 1.3 m)	4380
	토양층	(1.3 ~ 2 m)	750
	암석층	(2 ~ 5 m)	750

표 44 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-2)

			분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명		심도	XRF
BH-2	석고층	(표층~ 1.5 m)	2570
	암반층	(1.5 ~ 5 m)	650

표 45 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-3)

			분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명		심도	XRF
BH-3	석고층	(표층~ 3 m)	4820
	토양층	4 m	790
		5 m	750

표 46 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-4)

			분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명		심도	XRF
BH-4	석고층	(표층~ 1.5 m)	4070
	토양층	(1.5 ~ 2.3 m)	300
	암석층	(2.3 ~ 5 m)	500

표 47 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-5)

			분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명		심도	XRF
BH-5	석고층	(표층~ 5 m)	5820

표 48 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-6)

시료명		심도	분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
			XRF
BH-6	석고층	(표층~ 3 m)	5740
	토양층	3 m	650
		4 m	530
		5 m	850

표 49 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-7)

시료명		심도	분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
			XRF
BH-7	석고층	(표층~ 2 m)	2810
	토양층	3 m	680
		4 m	340
		5 m	680

표 50 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-8)

시료명		심도	분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
			XRF
BH-8	석고층	(표층~ 3 m)	4510
	토양층	3 m	610
		4 m	580
		5 m	710

표 51 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-9)

시료명		심도	분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
			XRF
BH-9	석고층	(표층~ 3 m)	2640
	토양층	3 m	620
		4 m	550
		5 m	860

표 52 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (BH-10)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)	
시료명		심도	XRF
BH-10	석고층	(표층~ 2.1 m)	2460
	토양층	3 m	950
		4 m	660
		5 m	490

4.2.2 GBH(2019년 시추)지역 XRF 분석으로 측정한 불소 농도

표 53 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-19)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)	
시료명	심도(m)	XRF	
GBH-19	8.5	610	
	9.5	510	
	10.5	580	

표 54 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-20)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)	
시료명	심도(m)	XRF	
GBH-20	23.5	1160	
	24.5	720	
	25.5	580	
	26.5	740	
	27.5	260	
	28.5	320	

표 55 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-24)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)	
시료명	심도(m)	XRF	
GBH-24	22.5	480	
	23.5	740	
	24.5	-*	
	25.5	290	

*=전처리 오류

표 56 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-26)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GBH-26	19.5	1140
	20.5	730
	21.5	430

표 57 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-27)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GBH-27	18.4	760
	19.5	1210
	20.5	1120
	21.5	1160
	22.3	750
	22.5	660
	23.8	550

표 58 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-31)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GBH-31	19.2	1030
	20.2	1680
	20.5	710

표 59 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-35)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GBH-35	17.7	2410
	18.5	950
	19.5	580
	20.5	650

표 60 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-37)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GBH-37	11.5	470
	13.2	990
	16.5	1000
	17.5	620
	18.5	2310
	19.5	680

표 61 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-39)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GBH-39	14.5	730
	15.5	—*
	16.5	490

*=전처리오류

표 62 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-40)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GBH-40	9.8	—*
	10.5	990
	11.5	520
	14.5	640

*=전처리오류

4.2.3 GH(2021년 시추)지역 XRF 분석으로 측정한 불소 농도

표 63 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 1	3.5	570

표 64 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-2-3)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 2-3	13.5	560
	14.5	710

표 65 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-3-3)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 3-3	13.5	1130

표 66 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-4-2)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 4-2	11.5	590
	12.5	620

표 67 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-5-3)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 5-3	13.5	780

표 68 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-6-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 6-1	5.5	340

표 69 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-6-3)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 6-3	13.5	550
	14.5	560

표 70 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-7-2)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 7-2	8.5	380

표 71 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-8-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 8-1	5.8	870

표 72 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-8-2)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 8-2	7.5	500

표 73 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-14-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 14-1	5.5	860
	6.5	420

표 74 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-14-2)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 14-2	11.5	1010

표 75 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-14-3)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 14-3	12.5	720

표 76 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-15-2)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 15-2	11.9	510

표 77 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-15-3)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 15-3	13.5	770

표 78 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-16-2)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 16-2	7.5	860

표 79 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-17-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 17-1	5.5	910

표 80 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-18-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 18-1	4.5	770

표 81 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-19-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 19-1	5.5	980

표 82 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GH-20-1)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 20-1	4.5	690

표 83 인산석고 보관구역 내 불소 평균 함량 (GBH-20-2)

		분석방법 별 불소 농도(mg/kg)
시료명	심도(m)	XRF
GH 20-2	6.5	420

4.3 공정시험 분석법 과 XRF 분석법 결과 비교분석

4.3.1 인산석고 보관구역(BH 지역, 2020년 시추) 토양 샘플 불소 함량 공정시험법과 XRF 분석법 결과 비교분석

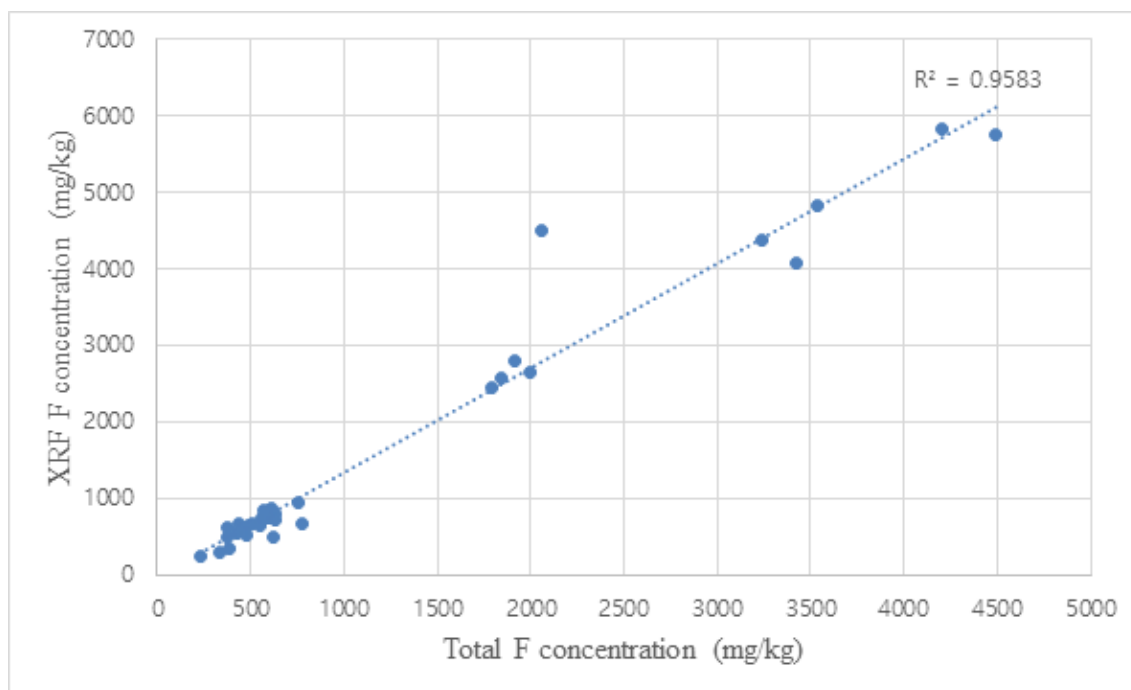


그림 39 총 불소 농도 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성 그래프

그림 38

그림 39은 왕수추출을 통한 이온전극법으로 측정한 총 불소 농도 분석결과 값과 XRF분석결과 값의 연관성을 알아보기 위하여 분산형 그래프를 이용해 나타낸 것이다. 모든 값들이 같은 추세를 보이는 것을 볼 수 있다. 앞서 불소의 총함량 분석결과

와 정비례관계를 보이며 상관계수는 0.958을 보인다. 이런 결과는 분석결과와 XRF 분석결과와의 연관성이 매우 높으며 신뢰도가 있다는 것을 직접적으로 보여준다.

4.3.2 인산석고 보관구역(GBH 지역, 2019년 시추) 토양 샘플 불소 함량 공정시험법과 XRF 분석법 결과 비교분석

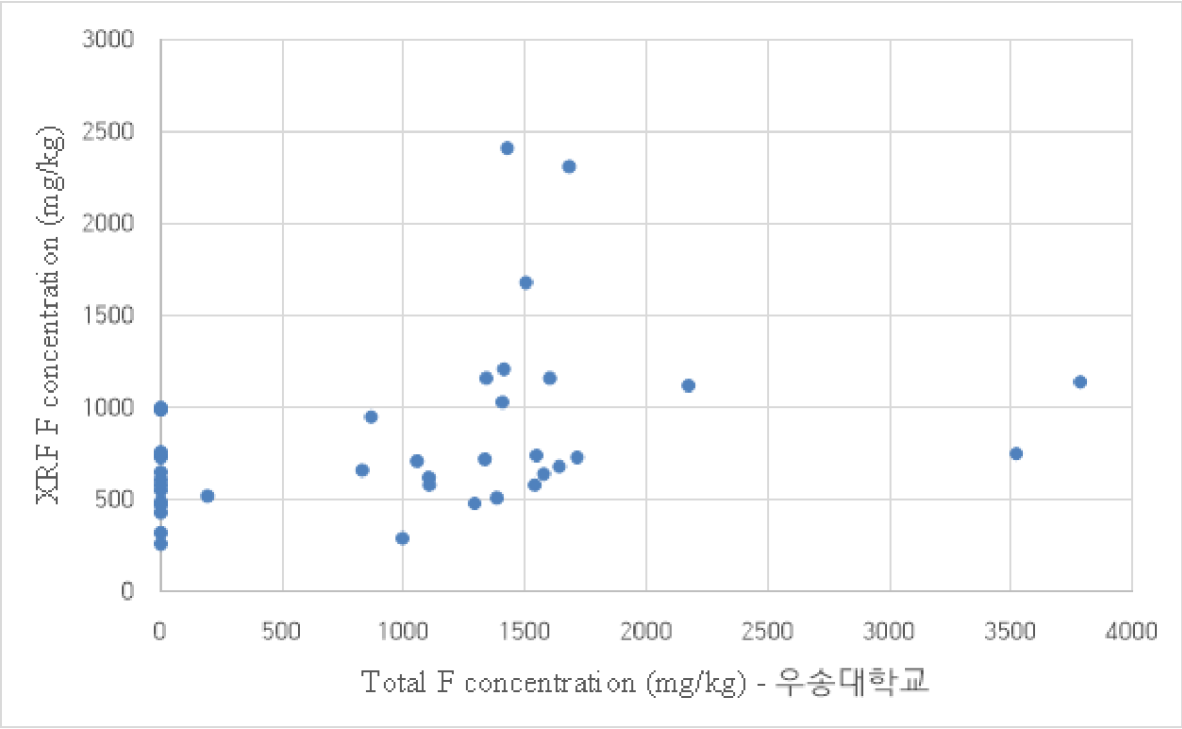


그림 40 우송대학교 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성

그림 39

그림 40는 기존실험인 우송대학교 분석결과 값과 XRF 분석결과 값의 연관성을 알아보기 위하여 분산형으로 나타낸 그래프이다. 우송대학교 분석결과에서는 미검출된 데이터가 많았고 또한 연관성을 뚜렷이 보이지 않아 본 연구의 결과와는 매우 상이한 것으로 보인다.

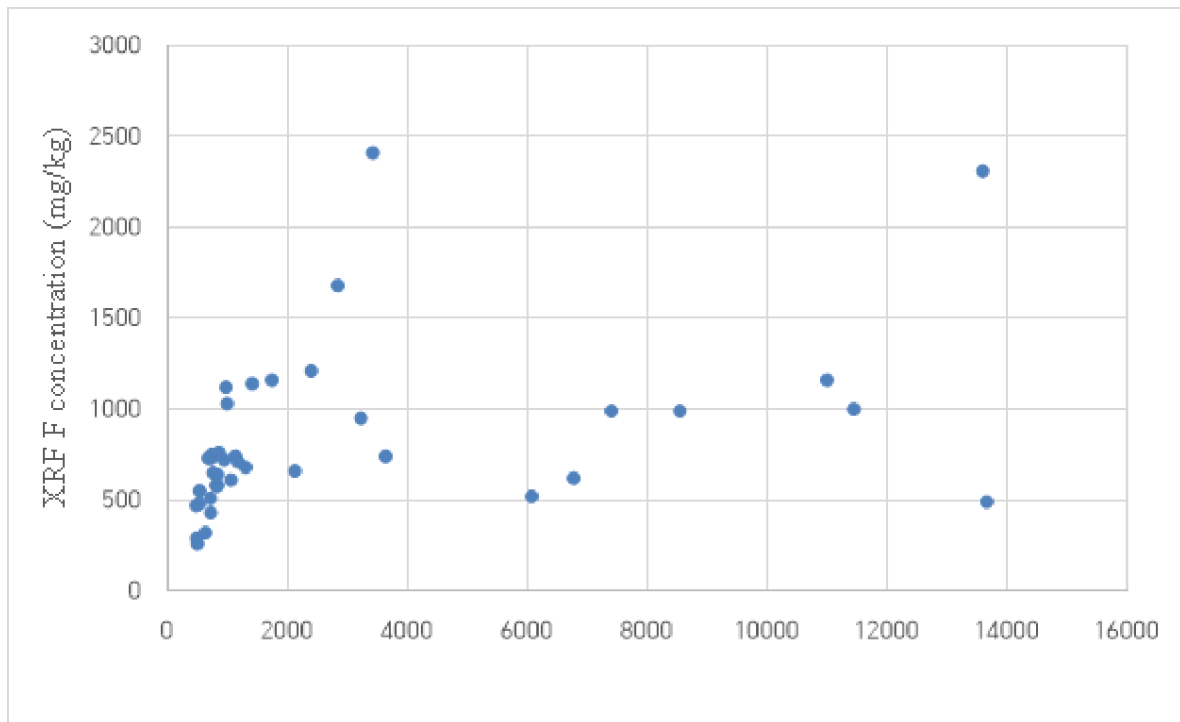


그림 41 울산과학대 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성
그림 40

그림 41은 기존실험 중 울산과학대의 분석결과와 XRF분석결과와의 연관성을 알아보기 위하여 분산형으로 나타낸 그래프이다. 본 연구의 총함량과는 상이하게 XRF 결과와의 연관성이 매우 떨어진다는 것을 확인할 수 있다.

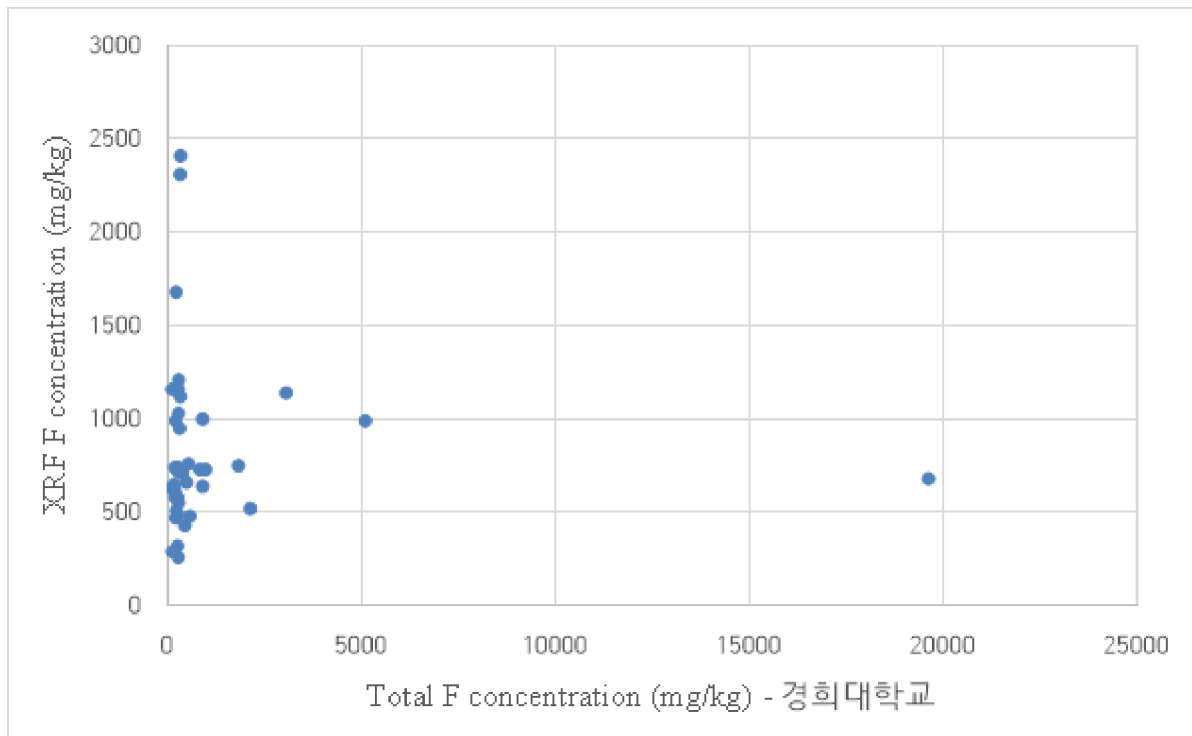


그림 42 경희대학교 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성 정리

그림 41

그림 42는 기존실험 결과 중 경희대학교 분석결과 값과 XRF분석결과 값의 연관성을 알아보기 위하여 분산형으로 나타낸 그래프이다. 두 분석값의 연관성은 유의미하지 않다고 보인다.

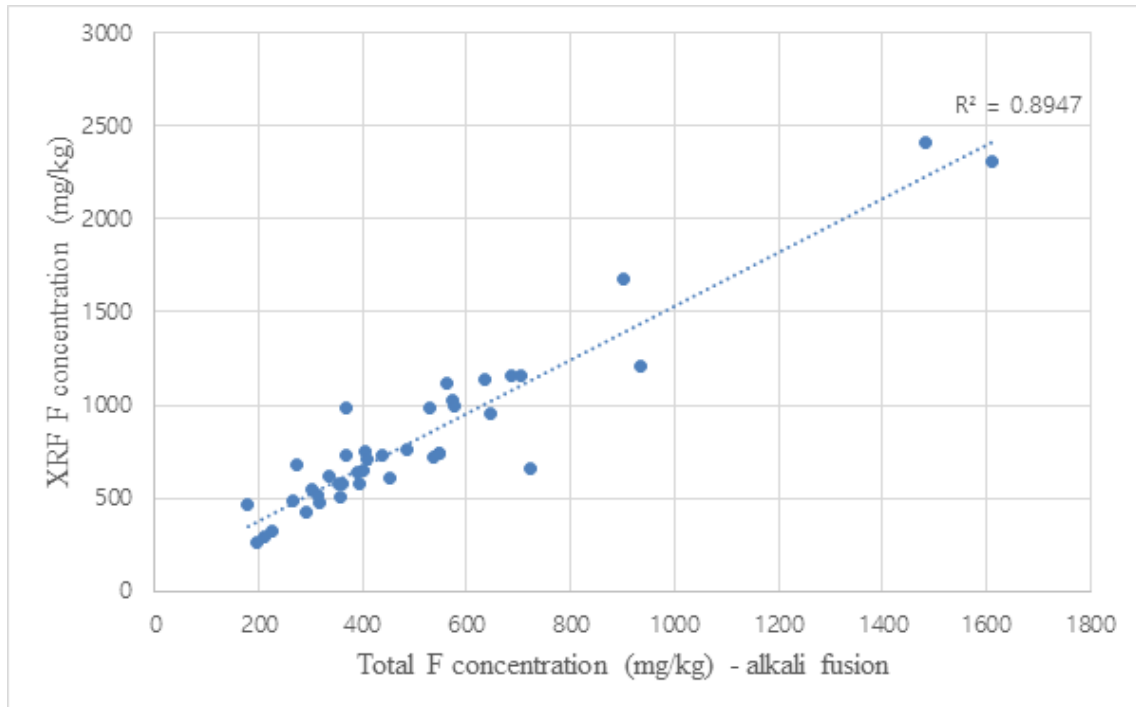


그림 43 총불소함량 (알칼리용융법) 및 XRF분석결과 간의 연관성

그림 42

그림 43는 알칼리용융법을 이용해 총불소 농도를 측정한 결과값과 XRF분석을 이용하여 얻은 결과값의 연관성을 비교해보기 위하여 분산형으로 나타낸 그래프이다. 0.897의 매우 높은 상관성을 보이고 있으며 이러한 분석결과는 알칼리용융법과 XRF분석의 결과가 재현성이 있으며 신뢰도가 있을 것으로 직간접적으로 보여준다.

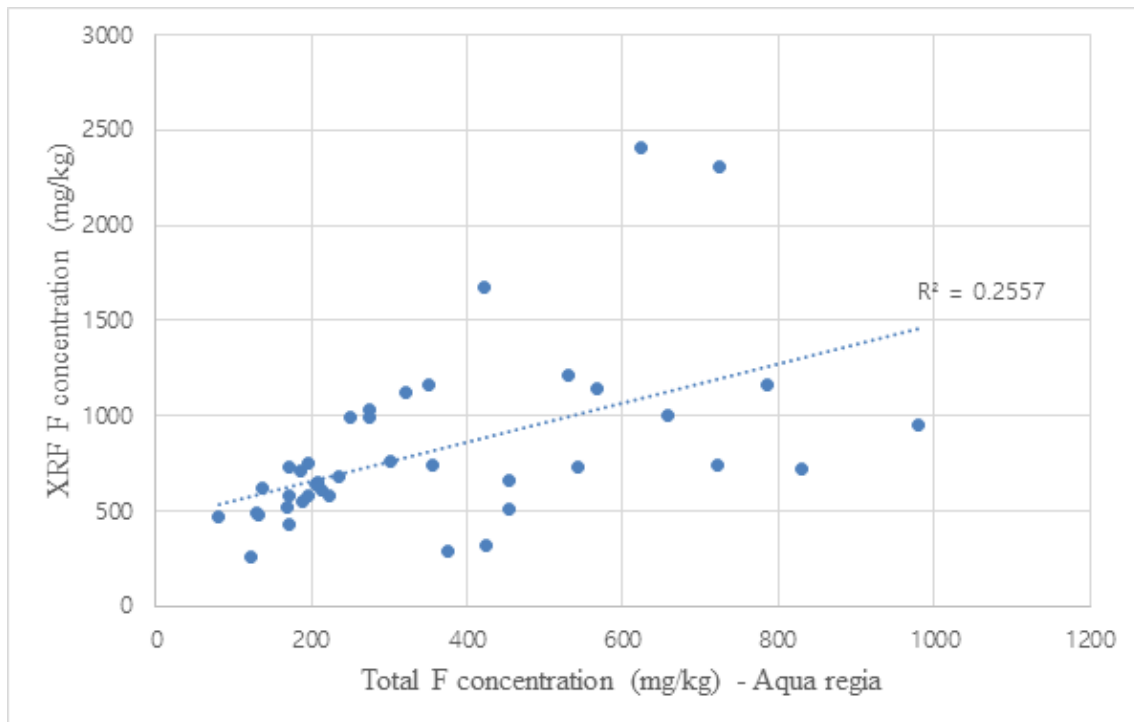


그림 44 총불소함량(왕수추출법) 및 XRF분석결과 간의 연관성

그림 43

그림 44는 왕수추출을 이용하여 측정한 결과값과 XRF 분석결과값의 연관성을 알아보기 위하여 분산형으로 나타낸 그래프이다. 알칼리용융법과는 대조적으로 상관성이 상대적으로 낮은 결과를 보인다. 이러한 결과는 왕수추출법보다는 알칼리용융법이 보다 재현성이 높은 정밀한 분석이라는 점을 시사한다.

4.3.3 인산석고 보관구역(GH 지역, 2021년 시추) 토양 샘플 불소 함량 공정시험법과 XRF 분석법 결과 비교분석

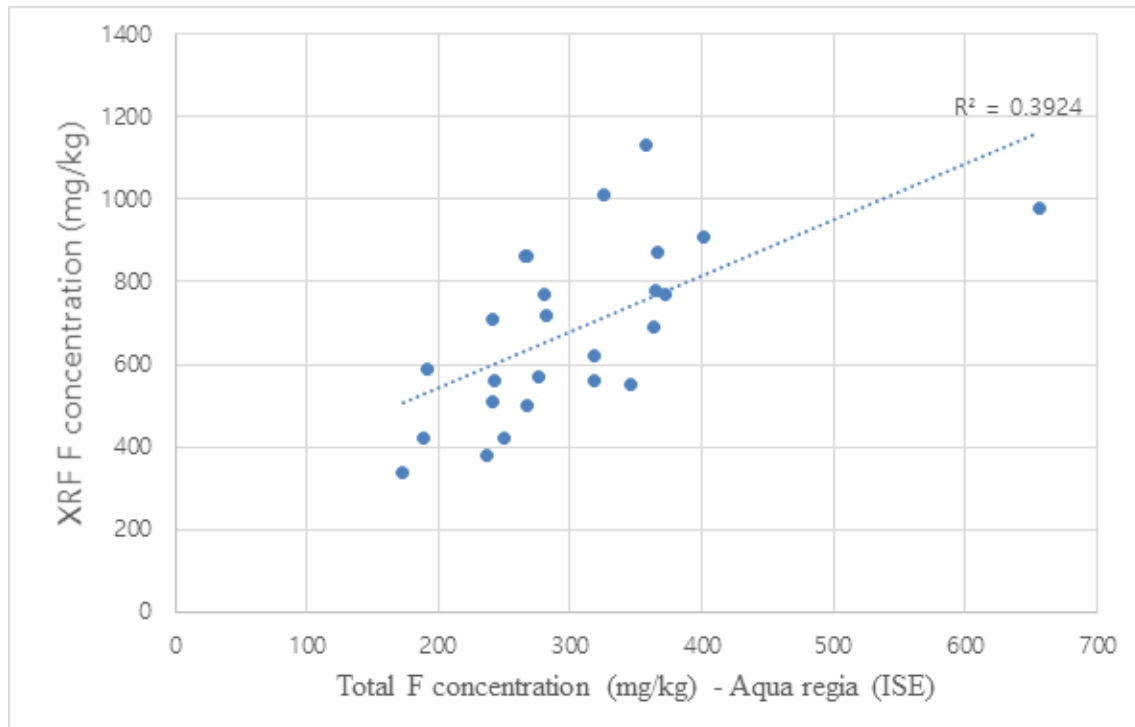


그림 45 왕수추출을 이용한 이온전극법 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성

그림 45는 왕수추출을 이용한 이온전극법 을 통한 결과값과 XRF 분석결과 값의 연관성을 알아보기 위해 분산형으로 나타낸 그래프이다. GH 19-1 5.5 m의 샘플을 제외하면 연관성이 있는 것으로 보인다.

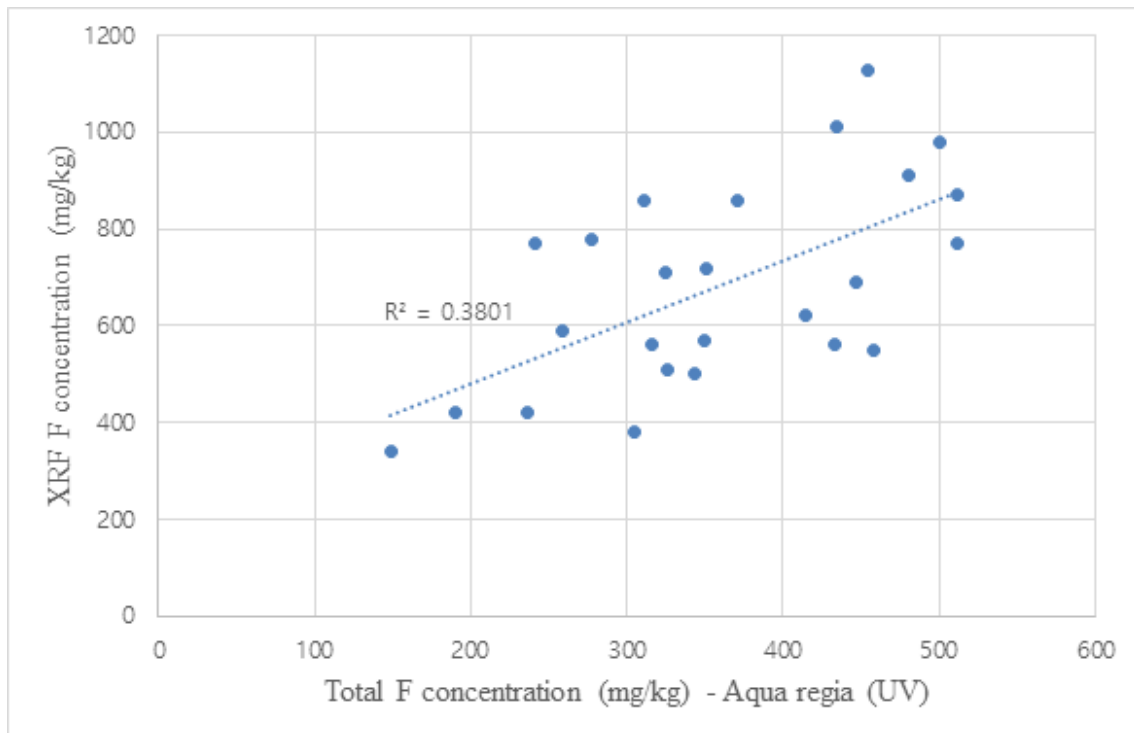


그림 46 왕수추출을 이용한 자외선/가시선 분광법 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성

그림 46는 왕수추출을 이용한 자외선/가시선 분광법을 통한 결과값과 XRF 분석결과 값의 연관성을 알아보기 위해 분산형으로 나타낸 그래프이다. 대부분의 값들이 비슷한 추세의 경향을 보이지만 이온전극법과 XRF 분석법의 연관성보다는 연관성이 떨어지는 추세를 확인하였다.

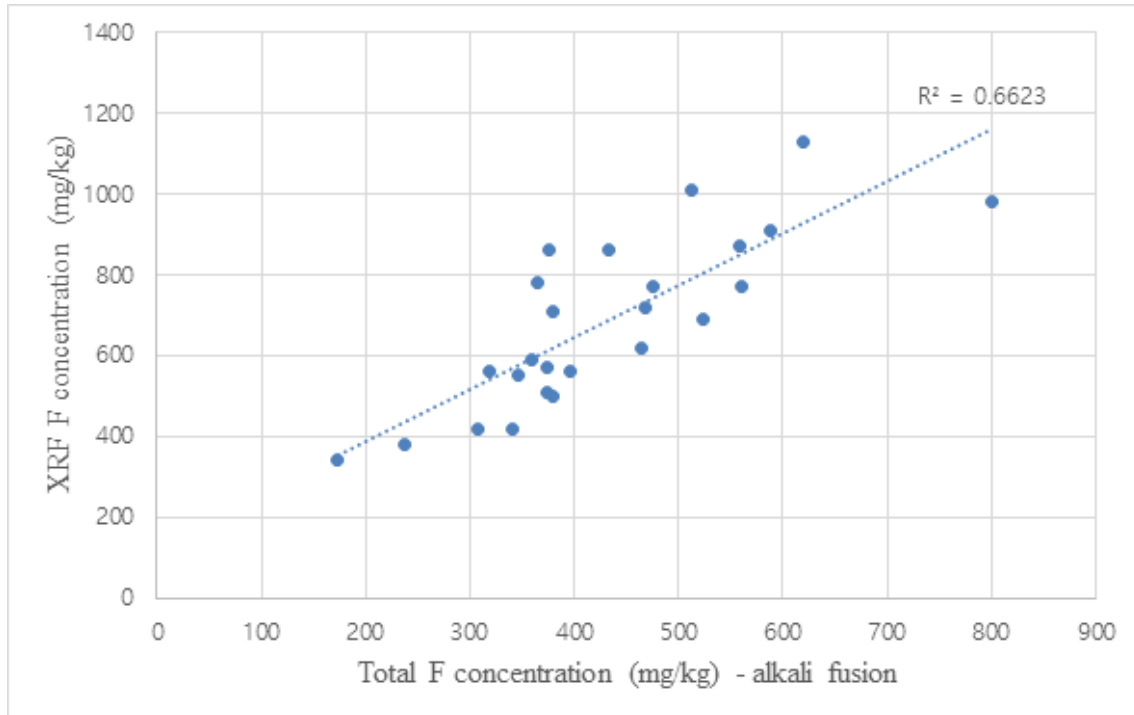


그림 47 Total 분석결과 및 XRF분석결과 간의 연관성 정리

그림 47은 Total 분석결과와 XRF분석결과와의 연관성을 확인하기 위하여 분산형으로 나타낸 그래프이다. 알칼리 용융 추출을 통한 이온전극법 분석결과와 XRF 분석결과와의 비교그래프에서의 연관성과 비교해보았을 때 연관성이 높은 추세를 보이고 있다.

5. 결론

1. 기존 분석결과인 수증기추출법을 통한 이온전극법(경희대, 우송대, 울산과학대학교의 분석결과)을 이용한 분석결과의 일관성이 결여되어 있으며 동일 시료일지라도 분석기관별 분석 값이 매우 상이한 시료가 매우 많이 존재한다. 이는 전처리가 어렵고 분석자의 숙달도에 따른 에러가 매우 크게 존재하는 부분에서 기인하는 것으로 보인다.

2. 본 연구에서 진행한 알칼리용융법을 통한 이온전극법, UV분광법, 왕수추출을 통한 이온전극법, UV분광법 측정결과는 대체적으로 고른 분석결과를 나타내지만 이 또한 앞서 측정되어진 수증기추출법을 통한 이온전극법과 동일하게 전처리 과정이 복잡하고 시간이 길어진다는 단점을 가지고 있다.

3. XRF 분석법을 이용하여 진행한 실험에서는 공정시험법을 이용한 실험에 비해 전처리과정이 간단하고 실험시간이 단축되는 이점을 확인하였다.

4. XRF 분석 결과값은 공정시험법으로 분석한 결과값과 비교하여 약 150-200 mg/kg 정도 높은 함량을 보인다. 그럼에도 불구하고 2021년 시료 (GH)의 분석결과는 불소오염기준인 800 ppm보다 낮거나 이와 비슷한 수준의 농도를 보인다

5. XRF 분석 결과는 본 연구에서 분석한 전함량분석과 매우 높은 양의 상관관계 ($R^2=0.89-0.95$)를 보임으로써 분석의 재현성과 신뢰도가 매우 높은 것으로 판단됨. 그에 비하여 2019년 3개 분석기관에서 기존 분석한 결과와 XRF 분석 결과는 상관관계가 매우 낮아 ($R^2<0.1-0.2$) 수증기추출법을 통한 이온전극법(공정시험법) 분석 결과의 신뢰도는 매우 떨어진다고 보인다.

6. 참고문헌

환경부, “토양오염공정시험기준”, 2009.

나경호, 윤인철, 이정복, “왕수분해와 결합한 자동분석법의 토양중 불소시험 유효성 연구”, J. Soil Groundwater Environ., Vol. 15(5), 8-15, 2010.

환경부, “수질오염공정시험기준”, 2008.

McQuaker, N.R. and Gurney, M., “Determination of Total Fluoride in Soil and Vegetation Using an Alkali Fusion-Selective Ion Electrode Technique”, Environmental Laboratory, Water Resources Service, Department of Environment, 3650 Westbrook Crescent, Vancouver, B.C. V6S 2L2, Canada, 1977.

Xu, L., Luo, K., Feng, F., and Tan, J., Studies on the chemical mobility of fluorine in rocks, Fluoride, 39(2), 145-151, 2006.

Snoeyink, V.D. and Jenkins, D. Water Chemistry, Wiley, 1980.

Bowen, H.J.M, Environmental Chemistry of the Element, Academic Press, 1979.

나경호, “토양 중 불소 분석기술”, Konetic Report, 40, 1-7, 2015

An, J., Kim, K.-H., Yoon, H.-O. and Seo, J., “Application of wavelength dispersive X-ray Fluorescence technique to determine soil fluorine with consideration of iron content in the matrix, 69, 38-43, 2012.

안진성, 김주애, 윤혜운, “토양 및 고체시료 중 불소함량 측정기법”, 지하수토양환경, 18(1), 112-122, 2013.

임가희, 이흥길, 김형섭, 뇌희정, 고희욱, 김지인, 조훈제, 김현구, “토양 중 불소 분포 및 거동 특성 평가”, J. soil Groundwater Environ, 23(6), 90-103, 2018.

EPA. Method 3050: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils Chapter 3. Part I, Test Methods for Evaluating Solid Waste. EPA., 1986.

Ministry of Environment Korean official method on the waste, 2015.

ABSTRACT

Fluorine contamination of soils at a phosphate-gypsum waste landfill
in South Korea

Hyeong-Seok Kim

Department of Civil & Environmental Engineering
Graduate School, University of Ulsan

In this study, the level of fluorine(F) contamination in the gypsum waste storage/landfill disposal area was determined through various analysis methods. One hundred twelve samples of wastes and soils in the phosphate gypsum storage area in the Ulsan Metropolitan City were collected, and the fluorine concentration of the samples was determined according to alkali fusion extraction, vapor extraction and aqua regia extraction of fluorine analysis. The concentration was also determined via the newly proposed X-ray fluorescence (XRF). The reproducibility and accuracy were determined and the applicability of the XRF method was investigated.

Among the 112 samples, 43 samples from the GBH area were compared and analyzed using the alkali fusion-ion electrode method, and the XRF analysis. The correlation coefficient between total F concentration from alkali fusion-ion electrode method and XRF analysis was 0.897. It is expected that the XRF analysis method be an alternative analytical method to determine total F concentration in soils and wastes.