응용 자료

에너지 및 화학

Agilent

Trusted Answers

ICP-OES를 이용한 리튬 이온 배터리용 실리콘-탄소 음극소재의 원소 불순물 측정

Agilent 5800 ICP-OES를 이용한 25종 원소에 대한 정확하고 견고한 측정

저자

Ying Qi

Agilent Technologies, Inc.

서론

리튬 이온 배터리(LIB)의 글로벌 시장은 2022년 445억 USD의 규모에서 2031년 1351억 USD의 규모로 성장할 것으로 보입니다(*1*). 전기자동차(EV) 분야와 재생 에너지원으로부터 전기를 생산하는 대형 전기 에너지 저장 시스템에서 주로 LIB를 필요로 하고 있습니다. 음극은 LIB의 핵심적인 구성 요소로, 충전/방전 사이클에서 리튬 이온을 저장하고 방출합니다. 따라서 음극의 품질은 배터리의 성능을 크게 좌우합니다. 흑연의 우수한 가용성, 뛰어난 전기 전도성, 저렴한 비용 등의 이유로 대부분의 LIB는 현재 흑연 기반의 음극을 사용합니다. 그러나 흑연 기반 음극의 여러 단점, 특히 낮은 비용량(specific capacity)으로 인해 대체 음극소재의 개발을 위한 대규모 연구가 지속되어 왔습니다(*2, 3*). 실리콘-탄소 복합체는 흑연을 대체할 음극소재로 각광받아 왔습니다(*4*). 이 새로운 음극소재에서 실리콘은 높은 체적과 비용량을 제공하고, 탄소 매트릭스는 소재의 구조적 무결성과 전기적 안정성을 유지합니다(*2*). 실리콘-탄소 음극소재는 현재 흑연 음극소재를 대체할 수 있는 주된 상용화 음극소재 중 하나입니다(*5, 6*).

LIB의 전기화학적 특성이 음극 도펀트 및 코팅 원료뿐만 아니라 오염물질에 의해서도 영향을 받기 때문에, 음극소재의 개발자, 제조자, 사용자는 확실한 품질 관리(QC) 테스트 방법을 필요로 합니다. 이러한 분석법은 다양한 시료의 다양한 순도를 분석할 수 있어야 합니다. 음극소재 생산의 선두에 선 중국은 흑연 음극소재와 실리콘-탄소 음극소재 각각에 대해 GB/T 24533-2019(*7*)와 GB/T 38823-2020(*8*) 국가 표준을 발표하였습니다. 권장되는 두 표준 분석법 모두 시료의 마이크로웨이브 분해 후 유도 결합 플라즈마 광방출 분광기(ICP-OES)를 사용하여 철, 나트륨, 크롬, 구리, 니켈, 알루미늄, 몰리브덴, 코발트, 아연과 같은 미량 원소를 분석할 것을 요구합니다. 이 연구에서도 동일한 분석법을 적용하였습니다. 이 연구에서는 Agilent 5800 Vertical Dual View (VDV) ICP-OES를 사용해 고순도의 흑연(99.99%) 및 실리콘-탄소 시료 분해물 내 25종의 원소를 측정했습니다. 이 분석법은 시료 전처리 전후 시료 첨가 및 장기 안정성 테스트를 통해 평가되었습니다.

실험

재료 및 표준 용액

고순도 농축 질산(HNO_3)(69%)과 염산(HCl)(30%)은 오스트레일리아 Merck Pty. Ltd에서 구입했습니다. 흑연 기반 및 실리콘-탄소 LIB 음극소재를 대표하기 위해 각각 시판 중인 고순도 흑연(99.99%), 흑연과 99% 실리콘 분말의 혼합물(9:1 중량)을 사용하였습니다. 검량 표준물질은 애질런트의 10mg/L 다원소 표준물질 2A(Al, As, Ba, Be Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, V, Zn)와 애질런트 1,000mg/L 단일 원소 표준물질 용액 Mo, Sb, Ti, Zr을 사용해 준비했습니다. 내부 표준물질(IS) 용액은 10,000mg/L의 애질런트 단일 원소 표준물질 용액 Rb와 Y를 사용해 준비했습니다.

시료 전처리

시료 전처리에는 GB/T 24533-2019(*7*)와 GB/T 38823-2020(*8*)에서 명시한 마이크로웨이브 분해법이 사용되었습니다. 99% 실리콘, 99.99% 흑연, 실리콘-탄소(흑연:실리콘= 9:1의 중량비) 시료를 각각 약 0.2g, 1g, 1g(정확성 ± 0.0001g) 측정하였습니다. 이러한 시료를 건조하고 깨끗한 마이크로웨이브 분해 튜브에 넣습니다. 각 시료는 14.4mL 왕수(AR)(11.4mL HCl과 3mL HNO_3를 3:1 몰 비율로 혼합)와 완전히 섞습니다. 동일한 절차를 사용하여 바탕 시료 및 시료 첨가 용액을 준비하고 모든 용액은 3회 반복해서 처리했습니다. 흑연 시료는 마이크로웨이브 분해 전에 0.025, 0.05, 0.1mg/L로 첨가되었습니다. 실리콘-탄소 시료 분해물은 10배 희석하여 마이크로웨이브 분해 후에 첨가되었습니다.

시료는 Mars 6 Microwave Digestion System(CEM Corporation)을 사용하여 200°C에서 30분 동안 유지하면서 분해했습니다. 분해 후 초순수(Milli-Q)를 사용하여 각 용액을 최대 50mL로 만들어 28.8%(v/v) AR 시료 매트릭스 용액을 만들었습니다. 흑연, 실리콘, 실리콘-탄소 시료를 0.45µm PTFE 디스크 필터로 여과하여 용해되지 않은 탄소 입자를 제거했습니다. ICP-OES 분석 전에 분해된 실리콘-탄소 시료의 각 복제물을 28.8% AR로 10배 희석하고 25종의 전체 원소를 0.025mg/L로 첨가했습니다. Ca, K, Mg, Na 또한 0.05와 0.1mg/L에서 첨가되었습니다. 일관성을 위해 실리콘과 실리콘-탄소의 스파이크하지 않은 시료 용액도 분석 전에 10배 희석하였습니다.

검량 표준물질 및 내부 표준물질

1,000mg/L의 Mo, Sb, Ti, Zr 각 단일 원소 표준물질을 5% HNO_3으로 희석하여 이러한 원소를 포함한 10mg/L 원액을 준비했습니다. 10mg/L의 4종 원소 원액과 10mg/L의 표준물질 2A를 28.8% AR 매트릭스 용액을 사용하여 원하는 농도로 희석하여, 분석 작업 범위의 표준 검량 표준물질 용액을 준비했습니다. 대부분의 표적 분석물질은 0, 0.005, 0.020, 0.050, 0.100, 0.200mg/L의 표준물질을 사용하여 보정되었으며, Al 및 Fe에 대해 2.00mg/L 농도 표준물질을 추가하여 시료의 농도 범위를 포함시켰습니다. Ca, K, Na는 표준물질 용액을 사용해 0, 0.010, 0.050, 0.100, 0.200, 0.500mg/L로 보정되었습니다.

품질 관리에는 연속 검량 바탕 용액(CCB)으로 바탕물질 28.8% AR 용액을 사용했습니다. 검량 표준물질로부터 별도 준비한 2개의 표준물질 용액(0.05와 0.1mg/L)을 연속 검량 검증 용액(CCV 및 CCV1)으로 사용하였습니다. CCB와 CCV는 매 10~12개 시료당 1회 분석되었습니다. 10mg/L Y 및 100mg/L Rb를 포함한 IS 용액은 28.8% AR에서 전처리했습니다.

기기

모든 시료의 원소 분석은 SeaSpray glass concentric nebulizer, 더블 패스 사이클론 스프레이 챔버, 1.8mm 석영 인젝터가 있는 Easy-fit 완전 분리형 토치가 장착된 5800 VDV ICP-OES를 사용하여 수행되었습니다. 시료 주입은 Agilent SPS 4 자동 시료 주입기로 진행했습니다. 기기와 분석법은 Agilent ICP Expert 소프트웨어로 제어 및 최적화하였으며, 분석 데이터 처리에도 이 소프트웨어를 사용했습니다.

복잡한 LIB 시료의 긴 분석 과정에서 플라즈마의 견고성과 안정성을 위해, 5800 ICP-OES의 수직 플라즈마, 27MHz에서 작동하는 고체상 무선 주파수(SSRF) 발생기, 냉각 콘 인터페이스(CCI)를 사용했습니다. CCI는 냉각 플라즈마 테일을 제거하여 냉각 영역에서 형성되는 간섭을 방지합니다. 따라서 axial 관측 모드에서 수직 플라즈마를 판독할 때 최소한의 간섭 효과로 극미량의 원소를 측정할 수 있습니다.

표 1에 표시된 기기 작동 조건은 Ca, K, Na와 같이 쉽게 이온화할 수 있는 원소(EIE)를 고려하여 최적화되었습니다. 이러한 원소는 이온화 에너지가 적으며, 플라즈마에서 쉽게 이온화됩니다. 만약 시료 내에 EIE가 충분한 농도로 존재하면, 플라즈마 전자 밀도와 전자화-이온화 평형도 영향을 받습니다. 이러한 효과는 방출 신호의 강화 또는 억제를 유발하여, 원소 농도를 높거나 낮게 잘못 보고하게 합니다. 내부 표준물질을 사용하면 플라즈마에서 이러한 영향을 보정할 수 있습니다. 이 연구에서는 기기 작동 조건을 검량 직선성과 검출 한계에 기반하여 평가하고 최적화했습니다. 시료에서 EIE가 낮은 농도로 존재하므로, 25종의 전체 원소에 대해 axial 관측 모드를 사용했습니다.

표 1. Agilent 5800 VDV ICP-OES 작동 조건.

파라미터	설정
관측 모드	Axial
RF 파워(kW)	1.2
Nebulizer 유속(L/분)	0.70
플라즈마 유속(L/분)	12.0
Aux 유속(L/분)	1.0
판독 시간(초)	15
헹굼 시간(초)	30
반복 횟수	3
안정화 시간(초)	15
펌프 속도(rpm)	12
시료 흡입 지연(초)	25
시료 펌프 튜브	흰색/흰색
내부 표준 펌프 튜빙	주황색/녹색
폐기물 펌프 튜브	파란색/파란색

결과 및 토의

검량 직선성

선택된 파장에서의 25종 원소 검량 상관계수가 표 2에 정리되어 있습니다. 모든 원소에 대해 각각의 작업 범위에서 우수한 직선성이 나타났으며, 이는 1에 가까운 R 값으로 알 수 있습니다. Al 396.152nm와 Fe 238.204nm의 대표 검량선이 그림 1에 나타나 있습니다.

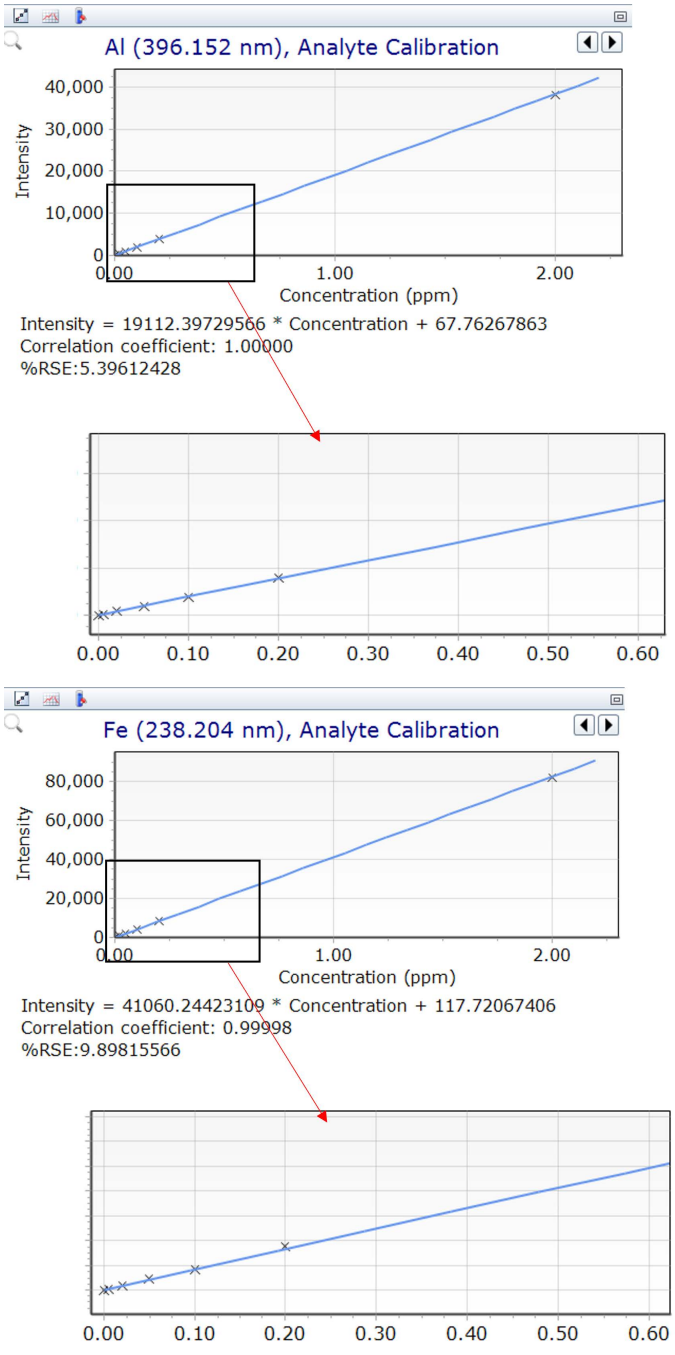

그림 1. Al 396.152nm와 Fe 238.204nm의 검량선.

표 2. 선택된 파장에서의 검량 범위, 상관계수(R), 백그라운드 보정 모드, 흑연 시료의 LOD 및 LOQ(50mL 용액 내 1g 시료로 계산).

원소 및 파장(nm)	작업 범위 mg/L	상관계수	백그라운드 보정 모드	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)
Al 396.152	0.005~2.00	1.0000	피팅	0.056	0.19
As 188.980	0.005~0.200	0.9999	피팅	0.095	0.32
Ba 455.403	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.0024	0.0080
Be 234.861	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.0020	0.0067
Ca 396.847	0.010~0.500	1.0000	피팅	0.062	0.21
Cd 214.439	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.0061	0.020
Co 238.892	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.026	0.087
Cr 267.716	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.018	0.059
Cu 327.395	0.005~0.200	0.9993	피팅	0.042	0.14
Fe 238.204	0.005~2.00	1.0000	피팅	0.097	0.32
Ga 294.363	0.005~0.200	0.9999	FACT	0.12	0.39
K 766.491	0.010~0.500	0.9999	FACT	0.22	0.72
Li 670.783	0.005~0.200	0.9999	피팅	0.026	0.085
Mg 279.553	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.0051	0.017
Mn 259.372	0.005– 0.200	1.0000	피팅	0.0043	0.014
Mo 202.032	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.026	0.088
Na 589.592	0.010~0.500	1.0000	FACT	0.037	0.12
Ni 231.604	0.005~0.200	0.9998	피팅	0.038	0.13
Pb 220.353	0.005~0.200	0.9999	피팅	0.15	0.49
Sb 206.834	0.005~0.200	0.9998	피팅	0.22	0.74
Sr 407.771	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.00079	0.0026
Ti 334.941	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.0031	0.010
V 309.310	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.011	0.036
Zn 213.857	0.005~0.200	0.9999	피팅	0.012	0.038
Zr 343.823	0.005~0.200	1.0000	피팅	0.024	0.079

백그라운드 보정

대부분의 원소에 대해 ICP Expert 소프트웨어에서 Fitted background correction(FBC) 모드를 사용하였습니다. FBC는 분석물질 피크와 직접 겹치지 않는 백그라운드 및 간섭 피크의 기여도를 자동으로 보정합니다. FBC를 사용할 때에는 수동으로 배경 마커를 선택할 필요가 없습니다.

5800의 Agilent Vista Chip III 전하 결합 장치(CCD) 검출기는 167~785nm의 고속 연속 파장 범위를 제공합니다. 광범위한 파장 범위는 대부분의 분석물질에 적합하며, 간섭 없는 라인을 찾을 수 있도록 합니다. 그러나 복잡한 시료는 종종 많은 방출 라인을 생성하고 일부 라인은 선택한 분석 라인에 너무 가깝습니다. 간섭 피크가 분석물질의 스펙트럼 피크와 중첩되는 경우, FACT(Fast Automated Curve-fitting Technique)를 사용하여 간섭을 효과적으로 제거할 수 있습니다. FACT는 원본 스펙트럼에서 분석물질 신호를 수학적으로 분리하는 고급 스펙트럼 모델링 기술을 사용하여 실시간 스펙트럼 보정을 제공함으로써, 간섭 분석물질의 검출 한계를 크게 개선합니다.

그림 2는 Ba 589,612nm(빨간색 점선)의 간섭 피크와 분석물질 신호가 합쳐진 Na 589,592nm(파란색 실선)의 보정되지 않은 스펙트럼을 보여줍니다. 검량 표준물질에서 Na와 Ba의 농도가 동일하기 때문에 Ba의 간섭에도 불구하고 FBC를 사용하는 Na 589,592nm에 대한 검량 결과는 우수한 직선성을 나타냅니다. FACT를 사용하여 Ba 589,612nm의 간섭 피크를 모델링하고 분석물질 신호를 분리하여 Na 589,592nm에 대한 정확한 결과를 제공했습니다(그림 2의 녹색 실선).

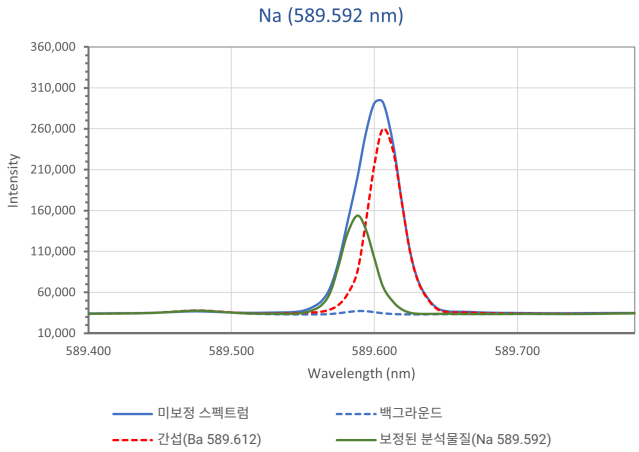

그림 2. Na 589,592nm에서 Ba 589,612nm의 스펙트럼 간섭을 제거하는 데 사용된 FACT 백그라운드 보정.

검출 한계(LOD) 및 정량 한계(LOQ)

분석 과정에서 LOD와 LOQ를 얻기 위해 10개의 바탕 시료 매트릭스 용액(28.8% AR)을 분석했습니다. LOD와 LOQ는 각각 10회 측정 표준 편차의 3배와 10배로 계산되었습니다. 표 2에 나온 값은 연속적이지 않은 3일에 따로 따로 진행된 개별 테스트에서 나온 3회의 LOD 및 LOQ 결과를 평균낸 것으로, 50mL 용액 내 1g의 흑연으로 계산되었습니다. 실리콘-탄소 시료의 LOD와 LOQ는 희석률을 고려할 때 이 값의 10배입니다. (실리콘-탄소 시료 분해물은 분석 전에 10배 희석되었습니다).

원소 불순물 및 스파이크 회수율

5800 VDV ICP-OES를 사용해 실리콘, 흑연, 실리콘-탄소 시료 분해물, 흑연 및 실리콘-흑연 시료 첨가물을 분석했습니다. 측정된 결과 평균과 각 25종 원소에 대한 첨가물 회수율은 표 3에 나와 있습니다. 결과는 희석률(Dilution Factor)에 대해 보정되었으며, 원본 고체 재료 내 mg/kg 단위로 보고되었습니다. 99.99%의 흑연 시료에서 Na는 유일하게 1mg/kg을 넘는 원소로 나타났습니다. Ca, K, Fe, Al의 농도는 0.4~1mg/kg이었습니다. 극미량 원소인 As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Ga, Li, Mo, Pb, Sb, Zr은 LOD 미만의 농도로 나타났습니다. 99% 실리콘 시료는 높은 농도의 Fe와 Al(>3000mg/kg) 및 Ca(867mg/kg)를 포함합니다. 실리콘-탄소 시료(10% 실리콘과 90% 흑연)의 원소 농도는 일반적으로 실리콘 시료에서 측정된 농도의 1/10이었습니다.

스파이크 회수율 테스트는 적합한 인증 표준물질(CRM)을 사용할 수 없는 경우에 특히 시료 전처리 방법 및/또는 분석법의 신뢰성을 평가하는 효과적인 방법입니다. 표 3에서 볼 수 있듯이, 마이크로웨이브 분해 전에 첨가된 흑연 시료의 회수율은 예측치의 ±10%였습니다. 이 결과는 음극소재의 마이크로웨이브 분해 시료 전처리법이 효과적임을 보여줍니다. 실리콘-탄소 시료에 대해 예측치의 ±10% 내에서 우수한 첨가물 회수율이 달성되었습니다. 이들 시료는 10배 희석된 후, 마이크로웨이브 분해 후에 3가지 농도로 첨가되었습니다. 결과는 복합 시료 분석에서 5800 ICP-OES의 정확성을 입증해 줍니다.

표 3. 실리콘, 흑연, 실리콘-탄소 샘플의 원소 불순물 농도, 흑연 및 실리콘-탄소의 스파이크 회수율 데이터. 농도 단위: mg/kg, n=3.

원소, 파장 (nm)	규소	흑연				실리콘-탄소			
	측정된 농도	측정된 농도	스파이크 농도*	스파이크 시료의 측정된 농도	스파이크 회수율 %	측정된 농도	첨가물 농도**	스파이크 시료의 측정된 농도	스파이크 회수율 %
Al 396.152	3229	0.451	1.25	1.65	96	321	12.5	333	96
As 188.980	< LOD	< LOD	1.25	1.24	101	< LOD	12.5	12.4	101
Ba 455.403	19.0	< LOD	1.25	1.28	104	1.80	12.5	14.8	104
Be 234.861	0.114	< LOD	1.25	1.31	104	0.0114	12.5	12.8	103
Ca 396.847	867	0.932	1.25	2.16	98	89.1	12.5	103	100
			2.50	3.43	100		25	114	100
			5.00	5.92	100		50	139	100
Cd 214.439	< LOD	< LOD	1.25	1.30	104	< LOD	12.5	12.9	103
Co 238.892	2.74	< LOD	1.25	1.30	102	0.292	12.5	13.2	103
Cr 267.716	99.7	< LOD	1.25	1.32	106	10.3	12.5	23.4	105
Cu 327.395	38.5	0.0569	1.25	1.35	103	3.83	12.5	16.4	101
Fe 238.204	3358	0.680	1.25	1.91	98	337	12.5	349	96
Ga 294.363	< LOD	< LOD	1.25	1.24	100	< LOD	12.5	12.7	102
K 766.491	97.9	0.896	1.25	2.11	97	10.1	12.5	22.7	101
			2.50	3.42	101		25	35.9	103
			5.00	5.96	101		50	62.6	105
Li 670.783	4.77	< LOD	1.25	1.24	99	0.472	12.5	13.5	104
Mg 279.553	71.9	0.146	1.25	1.42	102	7.42	12.5	20.6	106
			2.50	2.74	104		12.5	33.6	105
			5.00	5.31	103		12.5	59.6	104
Mn 259.372	71.8	0.0131	1.25	1.31	103	7.25	12.5	20.4	105
Mo 202.032	< LOD	< LOD	1.25	1.32	106	< LOD	12.5	12.9	104
Na 589.592	32.0	1.27	1.25	2.51	99	3.89	12.5	16.4	100
			2.50	3.77	100		25	30.8	108
			5.00	6.37	102		50	107	107
Ni 231.604	90.5	0.0755	1.25	1.23	92	8.94	12.5	22.2	106
Pb 220.353	3.88	< LOD	1.25	1.32	100	0.378	12.5	12.8	100
Sb 206.834	< LOD	< LOD	1.25	1.18	100	< LOD	12.5	12.0	104
Sr 407.771	14.5	0.00370	1.25	1.30	103	1.44	12.5	14.4	103
Ti 334.941	80.9	0.0281	1.25	1.34	105	7.76	12.5	20.8	104
V 309.310	5.49	0.0390	1.25	1.26	98	0.569	12.5	13.0	100
Zn 213.857	0.612	0.0662	1.25	1.36	103	0.136	12.5	12.5	99
Zr 343.823	59.3	< LOD	1.25	1.24	99	5.53	12.5	18.3	102

** 1.25, 2.5, 5mg/kg의 스파이크 농도는 50mL의 1g 흑연에서 각각 0.025, 0.05, 0.1mg/L에 해당합니다. ** 스파이크 농도는 희석률로 인해 흑연보다 실리콘-탄소에서 10배 더 높습니다.*

장기 안정성(LTS)

기기의 안정성과 검량의 장기 유효성을 확인하기 위해 재검량할 필요 없이 7.5시간 동안 216회 측정을 완료했습니다. 첨가된 흑연 시료(0.025mg/L) 및 미첨가 흑연 시료의 매 10회 측정 후에 CCB 및 CCV 시료(0.05mg/L)를 측정하였습니다. 19회 CCV 측정의 농도를 시간에 따라 플롯팅한 결과가 그림 3에 나와 있습니다. 예측치(점선으로 표시)의 ±10%인 정확한 측정 결과를 얻을 수 있었으며, 모든 파장의 %RSD는 K 766.491(3.31%)과 Na 589.592(3.55%)를 제외하고는 2% 미만이었습니다.

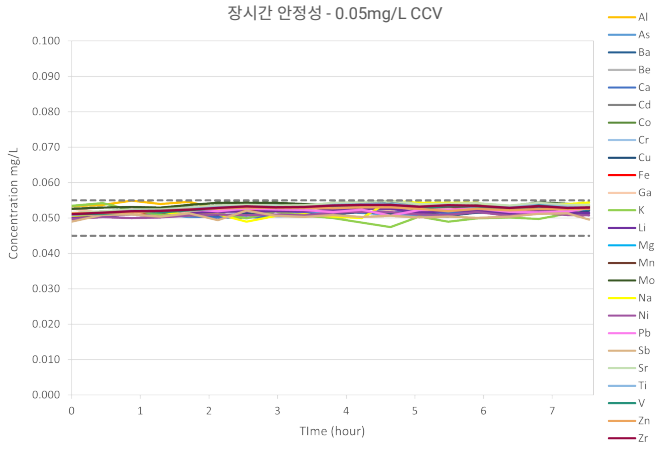

그림 3. 7.5시간 이상 측정된 0.05mg/L CCV 용액의 회수율을 통해 장기적 안정성을 보여줍니다.

첨가된 흑연 시료의 138회 측정은 7.5시간에 걸쳐 %RSD가 5% 미만으로 정밀성이 매우 우수합니다(표 4).

표 4. 7.5시간에 걸쳐 입증된 Agilent 5800 ICP-OES의 장기 안정성. 0.025mg/L에서 첨가된 흑연 시료 측정값의 %RSD.

원소 및 파장(nm)	RSD %	원소 및 파장(nm)	RSD %
Al 396.152	1.66	Mg 279.553	1.13
As 188.980	2.10	Mn 259.372	1.68
Ba 455.403	1.84	Mo 202.032	1.74
Be 234.861	1.35	Na 589.592	1.67
Ca 396.847	1.72	Ni 231.604	1.69
Cd 214.439	1.21	Pb 220.353	2.07
Co 238.892	1.60	Sb 206.834	4.51
Cr 267.716	1.67	Sr 407.771	1.79
Cu 327.395	2.29	Ti 334.941	1.58
Fe 238.204	4.43	V 309.310	1.65
Ga 294.363	2.34	Zn 213.857	1.49
K 766.491	3.69	Zr 343.823	1.58
Li 670.783	1.14		

결론

실리콘-탄소 음극소재는 일반적으로 리튬 이온 배터리(LIB)에 사용되는 흑연 음극소재에 대한 새로운 대안입니다. 배터리 등급 음극 매트릭스의 원소 순도를 테스트하기 위해, 실리콘-탄소 시료를 나타내는 흑연과 실리콘의 혼합물 및 고순도 흑연 시료를 마이크로웨이브로 분해하여 분석을 위한 전처리를 했습니다.

시료 분해물 내 25종의 원소 불순물에 대한 정량 분석에는 Agilent 5800 VDV ICP-OES를 사용했습니다. 넓은 검량 범위에 걸쳐 주요 원소와 미량 원소에 대해 우수한 검량 직선성이 얻어졌으며, 모든 원소의 검출 한계는 1mg/kg를 훨씬 밑돌았습니다. 흑연 시료와 실리콘-탄소 시료에서 3가지 농도로 첨가된 25종의 원소 회수율은 모두 90~110%였으며, 이를 통해 시료 전처리 절차와 ICP-OES 분석법의 정확성을 확인했습니다. 기기는 첨가 흑연 시료와 CCV 용액에서 측정된 바와 같이 모든 원소에 대해 <5%의 %RSD를 보임으로써, 7.5시간에 걸쳐 안정성을 유지했습니다.

5800 VDV ICP-OES는 이미 LIB 업계에서 구성 요소 재료의 품질 관리 용도로 널리 사용되고 있습니다. 업계에서는 일반적으로 China GB/T 제품 품질 표준에 따라 개발된 분석법을 사용하며, 이 분석법 대부분은 분석에 ICP-OES를 사용할 것을 권장합니다. 따라서 이 연구에서 사용된 분석법은 흑연 음극소재와 실리콘-탄소를 위한 GB/T 표준에 기초하였습니다. 결과는 5800 ICP-OES가 새 음극소재의 극미량 원소 분석에 필요한 정확성, 정밀성, 안정성을 갖추고 있음을 보여주었습니다.

참고 문헌

1. Markets and Markets. 2022. Lithium-ion battery market – Global Forecast to 2031. Report SE 4967
2. Nzereogu P.U. *et al.* Anode materials for lithium-ion batteries: A review. *Appl Surface Sci Adv*, 9, **2022**, 100233
3. Cheng H. *et al.* Recent progress of advanced anode materials of lithium-ion batteries, *J Energy Chem*, 57, **2021**, 451–468
4. Li X. *et al.* Research progress of silicon/carbon anode materials for lithium-ion batteries: structure design and synthesis method. *Chem Electro Chem*, 7, **200**, 4289–4302
5. Group 14 Technologies. 2020. Group14 & REC Silicon Plan U.S. Factory to Meet Demand for the 'Electrification of Everything'. Accessed November 2022, https://group14.technology/en/news/group14-rec-silicon-plan-us-factory-to-meet-demand-for-the-electrification-of-everything
6. Group 14 Technologies. 백서: Lithium-silicon batteries at global scale. Accessed November 2022, https://group14.technology/en/whitepapers/whitepaper-lithium-silicon-batteries-at-global-scale
7. GB/T 24533-2019. 2019. Graphite negative electrode materials for lithium ion battery. National Standard, China
8. GB/T 38823-2020. 2020. Silicon-carbon. National Standard, China

애질런트 제품 번호

G8020-68005	Agilent 5000 시리즈 ICP-OES용 1.8mm 석영 인젝터가 장착된 Easy-fit 완전 분리형 토치
G8010-60256	더블 패스 스프레이 챔버, Agilent 5000 시리즈 ICP-OES용 볼 조인트 소켓 및 UniFit 배수구가 있는 유리 사이클론 설계
G8010-60255	Agilent 5000 시리즈 ICP-OES용 SeaSpray concentric glass nebulizer
3710034400	연동 펌프 튜브, 흰색/흰색, 12/pk
3710068200	연동 펌프 튜브, 오렌지/녹색, 12/pk
3710034600	연동 펌프 튜브, 파란색/파란색, 12/pk.
8500-6940	Agilent 다원소 검량 표준물질-2A
5190-8487	Agilent 1000 ppm 단일 원소 원액, Mo
5190-8244	Agilent 1000 ppm 단일 원소 원액, Sb
5190-8546	Agilent 1000 ppm 단일 원소 원액, Ti
5190-8559	Agilent 1000 ppm 단일 원소 원액, Zr
5190-8441	Agilent 10,000 ppm 단일 원소 원액, Rb
5190-8451	Agilent 10,000 ppm 단일 원소 원액, Si
5190-8233	Agilent 10,000 ppm 단일 원소 원액, Y

www.agilent.com/chem/5800icp-oes

DE72446813

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2023

2023년 1월 13일, 한국에서 발행
5994-5590KO

한국애질런트테크놀로지스㈜
대한민국 서울특별시 서초구 강남대로 369,
A+ 에셋타워 9층, 06621
전화: 82-80-004-5090 (고객지원센터)
팩스: 82-2-3452-2451
이메일: korea-inquiry_lsca@agilent.com

Agilent