

ICP-MS용 EAM 4.7 분석법에 따른 대체 육류 내 중금속 및 극미량 원소 측정

ICP-MS를 이용한 식물성 단백질 식품 및 세포 배양의
식품 안전성 분석



저자

Jenny Nelson - Agilent
Technologies, Inc.

Edward O'Neill, Dave Block,
University of California, Davis,
USA

Sam Heckle, CEM Corporation,
USA

서론

사람은 신체의 에너지 요구를 충족하기 위해 충분한 양의 필수 다량 영양소(탄수화물, 지방 및 단백질)를 섭취해야 합니다. 단백질은 신체 조직의 성장, 발달 및 회복에 필요하며, 특히 근육을 만들거나 유지하고 뼈 건강에 중요합니다. 육류, 가금류, 생선, 유제품 및 계란은 단백질의 주요 공급원이며 식물성 공급원에는 대두, 콩류, 견과류, 렌틸콩, 곡물, 시리얼, 과일 및 채소가 포함됩니다. 윤리, 식이요법, 건강 또는 사회적 이유 등에 관계없이 전 세계적으로 비건 채식 또는 채식을 따르거나 동물성 식품 섭취를 줄이는 사람들의 수가 늘어나고 있습니다. 집단으로 사육되는 동물이 기후와 천연자원에 미치는 영향에 대한 우려는 더 많은 사람들이 식단에서 육류의 양을 제한하려는 동기를 부여할 수 있습니다(1).

식품 산업은 비육류 식품에 대한 관심이 커지고 있음을 잘 알고 있고, 이러한 요구를 충족하는 데 효과적인 프로세스와 제품을 적극적으로 찾고 있습니다. 비육류 식품에 대한 추세는 슈퍼마켓 진열대, 패스트푸드 매장 및 레스토랑 메뉴에서 대체 단백질 제품의 선택이 계속 증가하는 것으로도 잘 드러납니다. 일부 식품 회사는 이미 생물반응기에서 동물성 세포를 성장시키고, 이로부터 고기 조직을 배양하여 만든 제품을 판매하고 있습니다.

비육류 기반 단백질 또는 배양 단백질 제품의 인체 안전성을 보장하기 위해 제조업체는 우수 식품 제조 및 품질 관리기준(GMP)을 준수해야 합니다. 일반적으로 GMP 가이드라인은 식품의 제조, 테스트 및 품질 보증에 대한 지침을 제공합니다. 식품 안전 분석에는 화학물질(예: 농약 잔류물질과 같은 유기 오염물질 및 식품에서 규제되는 중금속과 같은 무기 오염물질)에 대한 테스트가 포함됩니다. 미국 식품의약국(FDA)에서는 다양한 종류의 식품에 대해 규제하며, 실험실에서 식품 안전을 보장하기 위해 따라야 하는 분석법을 명시합니다. 예를 들어, FDA 원소 분석 매뉴얼(EAM) 4.7은 ICP-MS로 식품 분해물(마이크로웨이브 보조 산 분해를 사용하여 준비)에서 12종 원소를 검출하는 분석법을 설명하는 포괄적인 분석법입니다. EAM 4.7은 또한 분석가가 기기 성능과 데이터 정확성을 입증할 수 있도록 일련의 품질 관리(QC) 테스트를 간략하게 요약합니다(2). 세포 기반 대체 육류를 생산, 수입 또는 수출하려는 회사는 각 타겟 시장에서 규제 승인을 얻어야 할 수 있습니다. 그러나, EAM 4.7과 같은 기존 식품 분석 테스트를 새로 개발된 모든 세포 배양 식품에 적용할 수 있을 가능성이 높습니다.

이 연구에서는 Agilent 7850 ICP-MS 및 Agilent SPS 4 자동 시료 주입기를 사용하여 다양한 식물성 대체 육류 시료의 30종 원소와 세포 배양 용액의 29종 원소를 분석하는 방법을 설명합니다. Be는 식물 기반 단백질 분석 그룹에 포함되었지만 세포 배양 배지 연구에서는 중요한 분석 대상이 아닙니다. 이 분석법은 7850 ICP-MS를 사용한 이전 식품 분석 연구에서 채택되었습니다(3). 원소 목록에는 EAM 4.7에 지정된 12종 중금속과 극미량 원소, 즉 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 납, 망간, 수은, 몰리브덴, 니켈, 셀레늄, 탈륨 및 아연이 포함되었습니다. 또한 알루미늄, 안티몬, 바륨, 베릴륨, 붕소, 칼슘, 코발트, 철, 마그네슘, 인, 칼륨, 은, 나트륨, 스트론튬, 황, 주석, 티타늄 및 바나듐과 같은 극미량 및 주요 원소가 분석되었습니다.

분석된 원소에 대해 얻은 데이터의 품질은 식물성 육류 대체 식품의 4가지 식품 인증 표준물질(CRM), 첨가 분석법 블랭크(FMB) 및 4가지 첨가분석시료(FAP)를 측정하여 평가되었습니다. FAP는 시료 전처리 전에 스파이킹한 시료를 의미합니다. 액상 세포 배지의 FMB 및 세포 배지의 FAP, 소비 세포 배지 및 전처리된 세포 배지도 이 연구에서 준비하고 분석했습니다.

실험

검량 표준물질

검량 표준물질은 2% 질산(HNO_3)과 0.5% 염산(HCl)에서 제조했습니다. HCl은 Hg와 같이 화학적으로 불안정한 원소가 용액에 안정적으로 유지되게 하므로 Agilent ICP-MS 시스템을 사용하는 분석에서는 주기적으로 시료에 HCl을 추가합니다. 분석 과정에서 형성된 모든 Cl 기반 동위원소 중첩은 표준 헬륨(He) 충돌 셀 모드를 사용하여 쉽게 제어됩니다(4). 검량 표준물질은 환경 검량 표준물질(품번 5183-4688)을 포함한 애질런트 표준 용액을 이용해 준비했습니다. 애질런트 단일 검량 표준물질은 Hg(품번 5190-8485), S(품번 5190-8210), P(품번 5190-8428), B(품번 5190-8254), Ti(품번 5190-8545), Sr(품번 5190-8527) 및 Sn(품번 5190-8543)에 사용되었습니다. 대부분 극미량 원소는 0.1~25ppb에서 검량되었습니다. Cu, Zn 및 Mn은 250ppb까지 검량되었습니다. Hg는 0.01~2.5ppb에서 검량되었습니다. 미네랄 원소는 5 ~ 25,000ppb에서 검량되었습니다.

2ppm ^6Li , Sc, Ge, Rh, Tb 및 Bi(애질런트 품번 8188-6525)를 포함하는 내부 표준(ISTD) 용액은 1% HNO_3 , 0.5% HCl 및 10% 이소프로판올(IPA)에서 제조되었습니다. 4.7 분석법에 따라 ISTD에 IPA를 첨가하여 분석된 용액에서 탄소 농도가 일정하게 유지되도록 했습니다. 이러한 방법은 마이크로웨이브 분해 후 시료에 다양한 수준의 잔류 탄소가 존재할 때 As 및 Se 감도에 영향을 줄 수 있는 이온화 강화를 방지하는 데 도움이 됩니다. ISTD 용액은 시료보다 약 16배 낮은 유속으로 온라인에서 자동 추가되었습니다.

표준물질 및 시료

이 분석법을 검증하기 위해 National Institute of Standards and Technology(NIST, Gaithersburg, US)의 4가지 식품 매트릭스 SRM을 사용했습니다. SRM에는 NIST 1577c 소간, NIST 1947 미시간호 어류 조직, NIST 1549a 전분유 및 NIST 1568b 쌀가루가 포함되었습니다. 식물성 대체 육류 시료(후라이드 치킨, 소고기 버거, 다진 소고기와 같은 비육류 등가물)는 미국 노스캐롤라이나의 한 슈퍼마켓에서 구입했습니다. UC Davis에서 수행된 연구 프로젝트로부터 다양한 배양 배지 액체 시료를 얻었습니다(5). 세포 배양 배지의 제형은 40% DMEM(Dulbecco's Modified Eagle Medium), 40% Ham's F-10 Nutrient Mixture, 20% 소태아혈청(FBS)으로 구성되었습니다.

표준물질 및 시료 전처리

모든 SRM 및 식물성 대체 육류 식품 시료는 EAM 4.7 분석법에 설명된 분해 절차에 따라 받은 그대로(균질화 또는 수분 제거 없이) 준비했습니다. 미국 CEM Corporation의 MARS 6 밀폐형 마이크로웨이브 산 분해(closed-vessel microwave digestion) 시스템이 사용되었습니다. 시료(약 0.5g의 식품 또는 SRM)를 75mL PFA Xpress 용기에 정확히 칭량하여 넣은 후, 8mL의 HNO_3 및 1mL의 H_2O_2 를 용기에 첨가했습니다. 시료, SRM 및 스파이킹 시료(FAP)의 복제 용액들을 표 1에 나와 있는 가열 프로그램을 사용하여 단일 배치로 분해했습니다. 각 분해물 배치는 다양한 식품 시료 매트릭스를 최대 40개 수용할 수 있으며 모든 시료 타입에 단일 프로그램을 적용할 수 있습니다. 분해 후에는 0.5mL의 농축 HCl을 분해물에 추가하고 탈이온수로 최종 무게가 100g이 되도록 만들었습니다.

표 1. 마이크로웨이브 산 분해 파라미터.

파라미터	설정
전력(W)	1800
램핑 시간(분)	25
유지 시간(분)	15
온도(°C)	200

UC Davis에서 대체 육류 시료의 배양을 위해 제조된 액상 세포 배양 배지 8개 시료도 이 연구에서 분석했습니다.

시료 1 및 2는 상이한 시간 동안 배양된 동일한 미사용 세포 배지 제형 배치로부터 준비되었습니다. 그 결과 화학 조성에서 약간의 차이가 예상되었습니다. 시료 1은 병에 들어있던 그대로의 배치이고 시료 2는 배양기에서 21일 동안 보관한 후 분석했습니다.

시료 3, 4 및 5는 동일한 배치에서 사용된 세포 배양 배지로, 배지를 사용하여 21일 동안 1차 배아 닭 근육 전구체 세포를 성장시킨 후 채취했습니다. 소모 배지는 세포가 채취된 후 남아 있는 세포 배양 배지이므로 미사용 영양분과 축적된 대사 산물 및 폐기물이 포함되어 있습니다. 시료 3 ~ 5는 “생물학적 복제물”, 즉 동일한 유형의 세포로 준비된 3개의 개별 배양물을 배양하는 데 사용되는 배치이기 때문에 조성에서 유사할 것으로 예상되었습니다. 결과적으로, 3개 시료 사이의 화학적 조성 차이는 복제 배양물 사이의 대사 변화에 기인하게 됩니다.

시료 6, 7 및 8은 시료 3, 4 및 5에 사용된 동일한 배치의 배치 시료이지만, 세포를 배지에서 21일이 아닌 14일 동안 성장시킨 후에 샘플링했습니다. 시료 6, 7 및 8은 또한 시료 3 ~ 5에 사용된 것과 동일한 유형의 닭 배아 세포로 준비된 3개의 개별 배양물을 성장시키는 데 사용된 생물학적 복제물입니다.

각 액상 세포 배양 배지 시료를 15mg 분취하고 ICP-MS로 직접 분석하기 전에 15mL의 2% HNO_3 및 0.5% HCl로 희석(분해하는 대신)했습니다. 세포 배양 배지는 고가이므로 시료 크기는 15mg으로 제한했습니다.

검량 표준물질, 시료 및 QC 용액의 분석 시퀀스는 그림 1에서 확인할 수 있습니다. 시료 블록은 10개 시료마다 주기적인 QC 블록을 자동으로 삽입하여 시료를 반복 분석하였습니다.

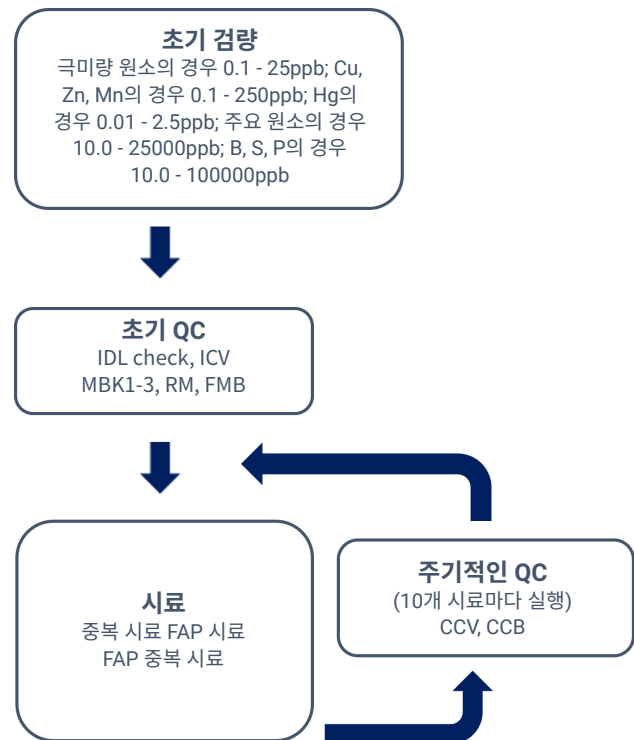


그림 1. 분석 시퀀스.

키워드: 기기 검출 한계(IDL, Instrument detection limit), 초기 검량 검증(ICV, initial calibration verification), 분석법 블랭크(MBK, method blank), 참조 물질(RM, reference material), 첨가 분석법 블랭크(FMB, fortified method blanks), 첨가 분석 시료(FAP, fortified analytical portion), 연속 검량 검증(CCV, continuing calibration verification), 연속 검량 블랭크(CCB, continuing calibration blank).

기기

분석에는 ORS⁴ 충돌 셀 및 UHMI 에어로졸 희석 시스템을 포함한 Agilent 7850 ICP-MS를 사용하였습니다. MicroMist glass concentric nebulizer, 온도 제어가 가능한 석영 스프레이 챔버 및 2.5mm 내경 주입기가 있는 석영 토치로 구성된 표준 ICP-MS 시료 도입 시스템을 사용했습니다. 니켈 스키머 콘과 함께 니켈 도금 구리 샘플링 콘을 사용했습니다.

이전의 식품 분해 테스트 경험(3)을 기반으로 미리 설정된 플라스마 모드 HMI-4를 선택했는데, 이 모드에서는 시료에 4배의 에어로졸 희석 계수를 적용합니다(6). UHMI를 선택하면 플라스마 설정이 표 2에 어떻게 표시한 대로 대상 시료 유형의 매트릭스 수준에 맞게 자동 조정됩니다. 다른 기기 작동 조건은 ICP-MS MassHunter AutoTune 기능을 사용하여 자동으로 최적화했습니다. 모든 분석물질은 헬륨(He) 모드(P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 He 모드)에서 수집했습니다. EAM 4.7은 FDA 규제 식품 분석에 사용되는 ICP-MS가 운동 에너지 판별(KED) 기능이 있는 헬륨 모드에서 작동할 수 있어야 한다고 규정합니다. 반응 셀 가스는 반응 생성 이온의 형성으로 새로운 스펙트럼 중첩을 일으킬 위험이 있기 때문에 SQ ICP-MS에서 허용되는 대안이 아닙니다. He 모드에서 ORS⁴를 사용하는 방식은 Agilent ICP-MS 시스템에서 표준인데, 모든 일반적인 분석물질에서 일반적인 동중원소 이온 간섭을 확실하게 제거할 수 있기 때문입니다(4, 7). 기기 작동 조건은 표 2에 나타냈습니다.

표 2. Agilent 7850 ICP-MS 작동 조건*.

ICP-MS 파라미터	설정
RF 전력(W)	1600
샘플링 깊이(mm)	10
운반 가스 유량(L/min)	0.80
희석(UHMI) 가스 유량(L/min)	0.15
렌즈 조정	자동 조정
He 셀 가스 유속(mL/분)	4.3(10**)
에너지 판별 전압(V)	5(7**)

* 음영 표시된 파라미터는 분석법 및 HMI-4 플라스마 사전 설정에서 정의. 모든 파라미터는 시작 및 자동 튜닝 중에 자동으로 최적화. ** P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 강화된 He 모드 설정.

결과 및 토의

대표적인 검량 곡선을 그림 2에 나타내었습니다. Na, Mg, Mn, Cu, As 및 Hg에 대한 플롯은 전체 검량 범위에 걸쳐 우수한 선형성을 보여주며, 상관 계수는 0.9999 이상입니다.

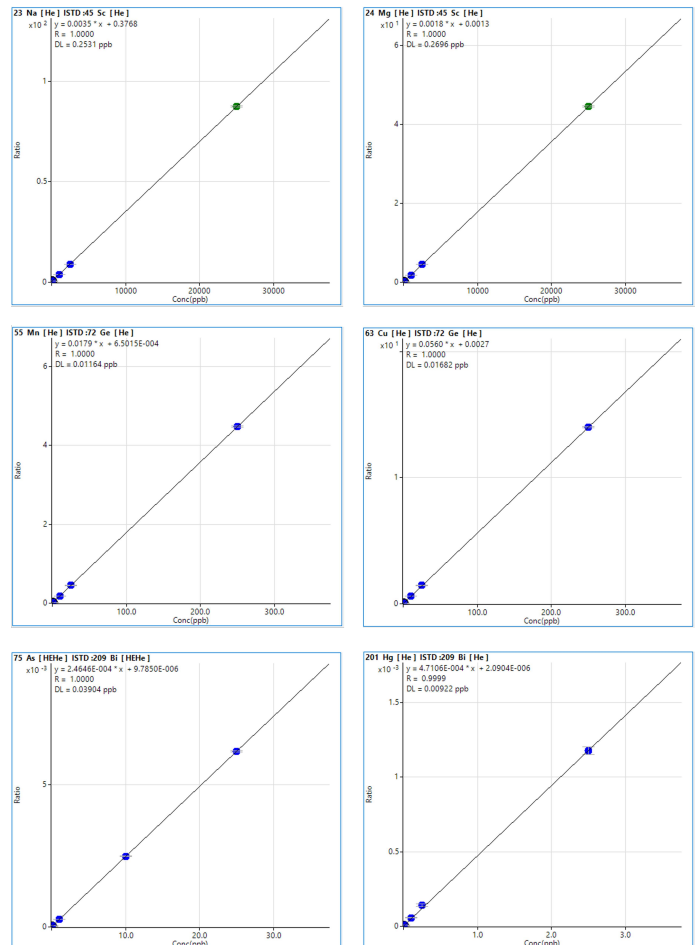


그림 2. 주요 및 극미량 원소에 대한 대표적인 검량선.

ICP-MS MassHunter 검량에서 계산된 일반적인 7850 ICP-MS 기기 검출 한계(DL)는 표 3에 나와 있습니다. EAM 분석법 검출 한계(LOD) 및 정량 한계(LOQ)(표 3에도 표시)는 분석 종료 시 측정된 분석법 블랭크를 기준으로 계산했습니다(n = 10)(8). EAM 4.7에서 요구하는 12종 원소를 포함하여 30종 원소에 대한 데이터를 수집했으며, 모든 분석물질에 He 셀 가스를 사용했습니다.

표 3. Agilent 7850 ICP-MS 검출 한계 및 EAM 4.7 명목 분석 한계(제공된 경우).

원소	ICP-MS MassHunter		EAM 4.7 분석 한계를 기준으로 계산		EAM 4.7 명목 분석 한계	
	DL (µg/kg)	BEC (µg/kg)	LOD (µg/kg)	LOQ (µg/kg)	LOD (µg/kg)	LOQ (µg/kg)
9 Be	0.000	0.000	0.011	0.037	-	-
11 B	4.290	8.808	1.501	5.002	-	-
23 Na	7.410	275.1	7.505	25.02	-	-
24 Mg	0.140	0.384	0.141	0.471	-	-
27 Al	0.100	0.423	0.204	0.680	-	-
31 P	1.650	3.475	2.372	7.908	-	-
34 S	242.0	911.3	212.9	709.8	-	-
39 K	13.58	152.0	4.311	14.37	-	-
43 Ca	6.450	8.585	5.955	19.85	-	-
47 Ti	0.219	0.110	0.289	0.962	-	-
51 V	0.012	0.060	0.015	0.049	-	-
52 Cr	0.035	0.433	0.032	0.107	5.390	48.90
55 Mn	0.021	0.032	0.010	0.033	2.330	21.20
56 Fe	0.005	0.787	0.053	0.175	-	-
59 Co	0.001	0.002	0.001	0.003	-	-
60 Ni	0.024	0.024	0.006	0.020	6.380	58.00
63 Cu	0.006	0.055	0.018	0.060	6.020	54.70
66 Zn	0.159	1.003	0.116	0.387	37.40	340.0
75 As	0.029	0.043	0.004	0.014	1.270	11.60
78 Se	0.166	0.412	0.088	0.292	7.280	66.10
88 Sr	0.004	0.008	0.002	0.006	-	-
95 Mo	0.005	0.002	0.003	0.012	5.180	47.10
107 Ag	0.001	0.002	0.002	0.005	-	-
111 Cd	0.003	0.003	0.003	0.010	0.408	3.710
118 Sn	0.011	0.129	0.008	0.025	-	-
121 Sb	0.013	0.033	0.007	0.024	-	-
137 Ba	0.017	0.008	0.017	0.058	-	-
201 Hg	0.006	0.006	0.012	0.039	0.861	7.820
205 Tl	0.001	0.004	0.013	0.044	*0.281	*2.100
Pb**	0.002	0.024	0.001	0.005	1.200	10.90

모든 원소는 He 모드(P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 강화된 He)에서 수집했습니다. 명목 분석 한계는 EAM 4.7에 나와 있으며 1년 이상 단일 실험실에서 검증(n = 143)하는 동안 측정된 분석법 블랭크를 기반으로 함.
* 단일 실험실 검증을 기반으로 함(n = 27). **Pb는 가장 양이 많은 세가지 동위원소 206, 207, 208의 총합으로 측정했습니다.

기기 캘리브레이션 및 시료 분해 과정 검증

EAM 4.7에 명시된 분석법 품질 관리 절차의 일환이자 연속 검량 유효성을 보장하기 위해 CCV 표준 물질은 분석 시퀀스 동안 다섯 번 분석하였습니다. 테스트한 대부분의 원소는 CCV 실제 농도의 ±10%인 EAM 허용 기준 내에서 회수율을 보고했습니다(결과는 표시하지 않음).

시료 분해 프로세스와 분석법의 정확성을 확인하기 위해 7850 ICP-MS를 사용하여 4개의 NIST SRM 중 두세트를 이중으로 분석했습니다. 표 4에 나타난 바와 같이 평균 농도는 FDA EAM 분석법의 QC 기준 요구 사항(80–120%)을 충족하는 인증 농도와 잘 일치하였습니다. 모든 SRM이 모든 분석물질에 대해 인증된 것이 아니므로 빈 셀은 인증 값 또는 참조 값이 없음을 나타냅니다.

표 4. Agilent 7850 ICP-MS를 사용하여 측정된 4가지 NIST 식품 기반 SRM의 평균 농도. 3중 시료 분해로부터 계산된 평균, 각각 3회 실험(n=9).

원소	NIST 1577c 소간					NIST 1947 미시간호 어류 조직				
	농도 단위	인증 농도	평균 측정 농도	회수율(*)	QC 기준 (80–120%)**	농도 단위	인증 농도	평균 측정 농도	회수율(*)	QC 기준 (80–120%)**
²³ Na	mg/kg	2033	2039	100	통과	-	-	-	-	-
²⁴ Mg	mg/kg	620	614	99	통과	-	-	-	-	-
³¹ P	mg/kg	11,750 R	12,189	104	통과	-	-	-	-	-
³⁴ S	mg/kg	7490	7541	101	통과	-	-	-	-	-
³⁹ K	mg/kg	10,230	10,195	100	통과	-	-	-	-	-
⁴³ Ca	mg/kg	131	115	88	통과	-	-	-	-	-
⁵¹ V	µg/kg	8.17	8.52	104	통과	-	-	-	-	-
⁵² Cr	µg/kg	53	57	107	통과	-	-	-	-	-
⁵⁵ Mn	mg/kg	10.46	10.18	97	통과	mg/kg	0.076	0.071	93	통과
⁵⁶ Fe	mg/kg	197.94	199.86	101	통과	mg/kg	3.79	3.38	89	통과
⁵⁹ Co	mg/kg	0.300	0.307	102	통과	-	-	-	-	-
⁶⁰ Ni	µg/kg	44.5	49.3	111	통과	-	-	-	-	-
⁶³ Cu	mg/kg	275.2	256.8	93	통과	mg/kg	0.411	0.356	87	통과
⁶⁶ Zn	mg/kg	181.1	181.7	100	통과	mg/kg	2.66	2.44	92	통과
⁷⁵ As	µg/kg	19.6	22.7	116	통과	mg/kg	0.732	0.672	92	통과
⁷⁸ Se	mg/kg	2.031	2.182	107	통과	mg/kg	0.475	0.426	90	통과
⁸⁸ Sr	µg/kg	95.3	96.8	102	통과	-	-	-	-	-
⁹⁵ Mo	mg/kg	3.30	3.49	106	통과	-	-	-	-	-
¹⁰⁷ Ag	µg/kg	5.9	6.1	104	통과	-	-	-	-	-
¹¹¹ Cd	µg/kg	97.0	98.4	101	통과	-	-	-	-	-
¹²¹ Sb	µg/kg	3.13 R	3.74	120	통과	-	-	-	-	-
²⁰¹ Hg	µg/kg	5.36 R	5.93	111	통과	mg/kg	0.254	0.274	108	통과
Pb	µg/kg	62.8	63.6	101	통과	-	-	-	-	-

Pb는 가장 양이 많은 세가지 동위원소 206, 207, 208의 총합으로 측정했습니다.

표 4는 다음 페이지에서 계속

표 4 계속...

원소	NIST 전분유 SRM 1549a					NIST 쌀가루 SRM 1568b				
	농도 단위	인증 농도	평균 측정 농도	회수율(%)*	QC 기준 (80-120%)**	농도 단위	인증 농도	평균 측정 농도	회수율(%)*	QC 기준 (80-120%)**
²³ Na	mg/kg	3176	3648	115	통과	-	-	-	-	-
²⁴ Mg	mg/kg	892	1018	114	통과	mg/kg	559	525	94	통과
³¹ P	mg/kg	7600	8792	116	통과	mg/kg	1530	1711	112	통과
³⁹ K	mg/kg	11920	13673	115	통과	mg/kg	1282	1307	102	통과
⁴³ Ca	mg/kg	8810	10195	115	통과	mg/kg	118.4	125.0	105	통과
⁵² Cr	-	-	-	-	-	mg/kg	118.4	124.5	105	통과
⁵⁵ Mn	mg/kg	0.184	0.189	103	통과	-	19.2	19.2	100	통과
⁵⁶ Fe	mg/kg	1.85 R	2.12	115	통과	-	7.42	7.68	104	통과
⁶³ Cu	-	-	-	-	-	mg/kg	2.35	2.39	102	통과
⁶⁶ Zn	mg/kg	33.8	34.7	103	통과	mg/kg	19.42	18.55	96	통과
⁷⁵ As	-	-	-	-	-	mg/kg	0.285	0.335	118	통과
⁷⁸ Se	mg/kg	0.242	0.288	119	통과	mg/kg	0.365	0.425	116	통과
¹¹¹ Cd	-	-	-	-	-	mg/kg	0.0224	0.0201	90	통과
²⁰¹ Hg	-	-	-	-	-	μg/kg	5.91	6.00	107	통과

R - 기준 질량 분획 값. *FDA 원소 분석 매뉴얼(섹션 3.4 '특수 계산') 3.4 Equation 20. ** NIST 인증 값에 대한 FDA EAM 4.7 QC 기준(80-120%).

매트릭스 효과 및 스파이크 회수율

비스펙트럼 간섭(매트릭스 효과)을 테스트하기 위해 대부분의 극미량 원소에 대해 1μg/kg, Al, Fe, Cu, Zn에 대해 50μg/kg, K, P 및 S를 포함한 주요 원소에 대해 4000μg/kg으로 블랭크를 스파이킹하여 FMB를 준비했습니다. 분석을 실행하는 전체 기간 동안 FMB를 주기적으로 분석했습니다. 모든 회수율은 표 5에 나타난 바와 같이 90-110%로 EAM 4.7 분석법의 허용 가능한 % 범위 내에 있었습니다.

식물성(육류 대체) 식품 분석을 위한 7850 ICP-MS 분석법의 정확성을 확인하기 위해 스파이크 회수율(FAP) 테스트를 수행했습니다. 각 시료에 모든 원소를 1 또는 50μg/kg으로 스파이킹하고 7850 ICP-MS를 사용하여 측정했습니다. 자연적으로 존재하는 원소 농도가 1μg/kg 미만인 시료의 경우 1μg/kg 스파이크로 보고됩니다. 자연적으로 존재하는 농도가 높은 시료의 경우 50 또는 4000μg/kg 스파이크 결과로 보고됩니다. 식물성 소고기 대체 첨가 식품 시료에서 모든 원소의 회수율은 표 5에 나와 있는 바와 같이 EAM 4.7 분석법 QC 기준 ±20% 이내였습니다.

표 5. 평균 회수율 결과는 각각 Agilent 7850 ICP-MS(n=2)에서 이중으로 실행되는 중복 시료 분해의 분석에 기초합니다. 낮은 스파이크 농도는 1µg/kg이었고 높은 스파이크 농도는 50 또는 4000µg/kg이었습니다.

	농도 단위	분석법 블랭크			식물성 “다진 소고기”		
		분석법 블랭크 농도	낮은 농도 스파이크 회수율(%)	높은 농도 스파이크 회수율(%)	고유 농도	낮은 농도 스파이크 회수율(%)	높은 농도 스파이크 회수율(%)
11 B	µg/kg	7.472	-	93	<LOD	-	111
23 Na	mg/kg	15.98	-	108	3650	-	*
24 Mg	mg/kg	<LOD	-	105	210.5	-	*
27 Al	µg/kg	0.448	106	101	2659	-	103
31 P	mg/kg	<LOD	-	96	2116	-	*
34 S	mg/kg	<LOD	-	**	1371	-	*
39 K	mg/kg	<LOD	-	105	2655	-	*
43 Ca	mg/kg	<LOD	-	102	1565	-	*
47 Ti	µg/kg	<LOD	102	91	152	-	103
51 V	µg/kg	<LOD	106	-	15.3	-	104
52 Cr	µg/kg	<LOD	106	-	89.2	-	103
55 Mn	µg/kg	<LOD	-	98	4085	-	104
56 Fe	mg/kg	0.859	-	106	33.16	-	*
59 Co	µg/kg	<LOD	105	-	35.2	-	104
60 Ni	µg/kg	<LOD	106	-	188	-	103
63 Cu	µg/kg	0.053	-	107	1615	-	105
66 Zn	mg/kg	<LOD	-	103	44.54	-	*
75 As	µg/kg	<LOD	104	-	16.3	-	109
78 Se	µg/kg	<LOD	104	-	78.0	101	98
88 Sr	µg/kg	<LOD	95	-	1686	-	92
95 Mo	µg/kg	<LOD	105	-	275	-	105
107 Ag	µg/kg	<LOD	-	102	1.481	-	92
111 Cd	µg/kg	<LOD	106	-	9.470	-	104
118 Sn	µg/kg	3.580	91	-	634	NA	
121 Sb	µg/kg	<LOD	104	-	<LOD	96	-
137 Ba	µg/kg	<LOD	103	-	391	-	100
201 Hg	µg/kg	<LOD	101	-	<LOD	111	-
205 Tl	µg/kg	<LOD	98	-	9.341	110	-
Pb***	µg/kg	<LOD	104	-	6.697	114	-

모든 원소는 He 모드(P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 강화된 He)에서 수집했습니다. *고유 농도에 비해 스파이크 수준이 너무 낮음, ** 검량 범위 미만, NA = 해당 없음, 측정되지 않음. ***Pb는 가장 양이 많은 세가지 동위원소 206, 207, 208의 총합으로 측정했습니다.

식물성 단백질 식품 시료의 정량 결과

세 가지 식물성 대체 육류 식품 시료에 대한 정량 결과가 표 6에 나와 있습니다. EAM 4.7에 지정된 12종 원소 외에도 Be, B, Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Ti, V, Fe, Co, Sr, Ag, Sn, Sb 및 Ba에 대한 데이터가 제공됩니다.

표 6. Agilent 7850 ICP-MS를 사용하여 세 가지 식물성 육류 대체 식품 시료에 대해 측정된 정량 결과(n=9).

	농도 단위	식물성 튀김 “후라이드 치킨”	식물성 “소고기 버거”	식물성 “다진 소고기”
9 Be	µg/kg	3.29 ± 2.64	3.51 ± 2.75	<LOD
11 B	µg/kg	2952 ± 204.6	2753 ± 153.5	<LOD
23 Na	mg/kg	10293 ± 350	2537 ± 48	3650 ± 231
24 Mg	mg/kg	281 ± 26360	627 ± 24679	210 ± 34
27 Al	µg/kg	65704 ± 28678	1291 ± 124.9	2659 ± 520.7
31 P	mg/kg	3291 ± 242784	1874 ± 76	2116 ± 312
34 S	mg/kg	24576 ± 434	1756 ± 68	1371 ± 237
39 K	mg/kg	1920 ± 91	4416 ± 86	2655 ± 161
43 Ca	mg/kg	169 ± 9	1025 ± 38	156 ± 22
47 Ti	µg/kg	63362 ± 17691	81.80 ± 11.98	152.4 ± 44.53
51 V	µg/kg	42.92 ± 11.86	8.21 ± 2.92	15.35 ± 1.43
52 Cr	µg/kg	190.7 ± 58.17	178.9 ± 8.71	89.19 ± 13.72
55 Mn	µg/kg	5610 ± 592.5	11450 ± 561.5	4085 ± 856.3
56 Fe	µg/kg	43416 ± 5195	33040 ± 410.0	33159 ± 6752
59 Co	µg/kg	583.5 ± 142.3	1085 ± 75.93	35.17 ± 4.59
60 Ni	µg/kg	581.8 ± 25.01	147.2 ± 19.20	188.5 ± 12.62
63 Cu	µg/kg	4201 ± 861.6	2295 ± 42.85	1615 ± 286.5
66 Zn	µg/kg	13990 ± 989.2	46159 ± 405.1	44540 ± 3098
75 As	µg/kg	30.39 ± 4.48	12.97 ± 3.21	16.35 ± 2.40
78 Se	µg/kg	82.22 ± 28.25	67.56 ± 11.85	78.04 ± 11.96
88 Sr	µg/kg	1272 ± 160.2	2467 ± 157.0	1686 ± 165.5
95 Mo	µg/kg	902.2 ± 121.9	856.1 ± 22.26	274.8 ± 45.87
107 Ag	µg/kg	14.10 ± 18.89	2.41 ± 0.76	1.48 ± 0.41
111 Cd	µg/kg	14.07 ± 1.34	9.91 ± 1.54	9.47 ± 1.28
118 Sn	µg/kg	684.7 ± 24.55	697.8 ± 26.94	634.2 ± 13.62
121 Sb	µg/kg	<LOD	<LOD	<LOD
137 Ba	µg/kg	861.2 ± 44.50	2691 ± 177.15	390.6 ± 80.28
201 Hg	µg/kg	<LOD	<LOD	<LOD
205 Tl	µg/kg	34.15 ± 29.97	7.15 ± 1.61	9.34 ± 0.80
Pb*	µg/kg	19.53 ± 0.89	21.48 ± 5.91	6.70 ± 1.10

모든 원소는 He 모드(P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 강화된 He)에서 수집했습니다. *Pb는 가장 많이 많은 세 가지 동위원소 206, 207, 208의 총합으로 측정했습니다.

세포 기반 시료에 대한 정량 결과와 스파이크 회수율

분석법 블랭크, 액상 세포 배양 배지, 소모 배지 및 컨디셔닝된 소모 배지 시료의 정량 결과, 그리고 스파이크 회수율 데이터(FMB 및 FAP)가 표 7, 8 및 9에 나와 있습니다. 동일한 시료 유형(표 8 및 9)에서 측정된 일부 원소의 농도 차이는 서로 다른 배치의 세포 배양 배지에서 시료를 가져온 것이기 때문에 관찰되었습니다. 배지의 FBS는 세포 배양에 효과적인 복잡하고 대부분 정의되지 않은 가변적 제품이기 때문에 변동의 원인일 가능성이 높습니다(예: 시료 3의 고농도 Pb). 배양육 세포 배양을 위해 FBS를 식물성 성분으로 대체하는 비용 효율적인 방법을 찾기 위한 연구가 진행 중입니다.

비스펙트럼 간섭(매트릭스 효과)을 테스트하기 위해 블랭크를 10, 1000 또는 4000ppb로 스파이킹하여 두 개의 FMB를 제조했습니다. 1000ppb 수준의 스파이크는 Na, Mg, Ca 및 Fe에 사용되었고 4000ppb 수준의 스파이크는 P, S 및 K에 사용되었습니다. 낮은 수준의 스파이크는 나머지 극미량 원소에 사용되었습니다. FMB는 시료를 분석하는 전 과정에서 정기적으로 분석했습니다. 모든 회수율은 표 7에 나타난 바와 같이 90-110%로 EAM 4.7 분석법의 허용 가능한 % 범위 내에 있었습니다.

액상 세포 배양 배지 분석을 위한 7850 ICP-MS 분석법의 정확성을 확인하기 위해 스파이크 회수율(FAP) 테스트를 수행했습니다. 8개의 배양 배지 시료에 10ppb의 극미량 원소와 1000ppb의 주요 원소를 스파이킹했습니다. 세포 배양 배지 시료에 포함된 모든 원소의 회수율은 표 7~9에 나와 있는 바와 같이 EAM 4.7 분석법 QC 기준 ± 20% 이내였습니다.

표 7. 배지 액체 시료에 대한 분석법 블랭크, 정량 결과(n=9) 및 스파이크 회수율.

		분석법 블랭크			액상 세포 배양 배지			
					시료 1		시료 2	
		농도 단위	분석법 블랭크 농도	낮은 농도 스파이크 회수율(%)	높은 농도 스파이크 회수율(%)	배양 배지 액체 (세포 없음)	회수율(%)	배양 배지 액체 (세포 없음)
11 B	µg/kg	7.472	-	93	<LOD	103	<LOD	96
23 Na	mg/kg	15.98	-	108	2152	*	9913	*
24 Mg	mg/kg	<LOD	-	105	11.63	104	36.34	104
27 Al	µg/kg	0.448	106	101	<LOD	113	<LOD	109
31 P	mg/kg	<LOD	-	96	32.77	104	137.42	106
34 S	mg/kg	<LOD	-	**	<LOD	101	<LOD	98
39 K	mg/kg	<LOD	-	105	166.8	99	691.5	80
43 Ca	mg/kg	<LOD	-	102	30.92	102	125.1	99
47 Ti	µg/kg	<LOD	102	-	<LOD	98	<LOD	102
51 V	µg/kg	<LOD	106	-	<LOD	102	<LOD	101
52 Cr	µg/kg	<LOD	106	-	<LOD	101	<LOD	100
55 Mn	µg/kg	<LOD	-	98	<LOD	103	<LOD	101
56 Fe	mg/kg	0.859	-	106	0.380	107	2.044	107
59 Co	mg/kg	<LOD	105	-	<LOD	101	0.065	101
60 Ni	µg/kg	<LOD	106	-	<LOD	102	<LOD	104
63 Cu	µg/kg	0.053	-	107	<LOD	105	0.104	105
66 Zn	µg/kg	<LOD	-	103	<LOD	104	1.265	112
75 As	µg/kg	<LOD	104	-	<LOD	101	<LOD	102
78 Se	µg/kg	<LOD	104	-	<LOD	99	<LOD	96
88 Sr	µg/kg	<LOD	95	-	<LOD	105	<LOD	106
95 Mo	mg/kg	<LOD	105	-	<LOD	102	0.011	103
107 Ag	µg/kg	<LOD	-	102	<LOD	81	<LOD	82
111 Cd	µg/kg	<LOD	106	-	<LOD	105	<LOD	106
118 Sn	µg/kg	3.580	91	-	<LOD	100	<LOD	103
121 Sb	µg/kg	<LOD	104	-	<LOD	106	<LOD	106
137 Ba	µg/kg	<LOD	103	-	<LOD	104	<LOD	104
201 Hg	µg/kg	<LOD	101	-	<LOD	115	<LOD	101
205 Tl	µg/kg	<LOD	98	-	<LOD	104	<LOD	105
Pb***	µg/kg	<LOD	104	-	<LOD	104	<LOD	105

모든 원소는 He 모드(P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 강화된 He)에서 수집했습니다. *고유 농도에 비해 스파이크 수준이 너무 낮음, **보정 범위 미만, ***Pb는 가장 양이 많은 세가지 동위원소 206, 207, 208의 총합으로 측정했습니다.

표 8. 21일 동안 배양된 소모 배지 액체 시료에 대한 정량 결과(n=9) 및 스파이크 회수율.

	농도 단위	21일 동안 1차 배아 닭 근육 전구체 세포를 배양한 후의 소모 배지					
		시료 6	회수율(%)	시료 7	회수율(%)	시료 8	회수율(%)
11 B	µg/kg	<LOD	96	<LOD	103	<LOD	102
23 Na	mg/kg	1221	*	2228	*	6541	*
24 Mg	mg/kg	8.333	106	11.88	106	27.93	106
27 Al	µg/kg	<LOD	94	<LOD	111	<LOD	108
31 P	mg/kg	24.35	105	31.08	106	89.59	107
34 S	mg/kg	<LOD	100	<LOD	102	<LOD	104
39 K	mg/kg	102.5	82	154.1	104	446.7	108
43 Ca	mg/kg	48.99	108	25.09	105	79.14	108
47 Ti	µg/kg	<LOD	104	0.062	102	0.081	103
51 V	µg/kg	<LOD	102	<LOD	101	<LOD	102
52 Cr	µg/kg	<LOD	102	<LOD	103	<LOD	102
55 Mn	µg/kg	<LOD	104	0.014	103	<LOD	103
56 Fe	mg/kg	14.03	107	0.371	107	0.837	107
59 Co	mg/kg	<LOD	102	<LOD	101	<LOD	102
60 Ni	µg/kg	0.030	102	<LOD	102	<LOD	102
63 Cu	µg/kg	1.145	109	<LOD	106	<LOD	105
66 Zn	µg/kg	5.212	98	<LOD	105	0.423	105
75 As	µg/kg	3.724	100	6.749	100	6.463	100
78 Se	µg/kg	<LOD	98	<LOD	98	<LOD	99
88 Sr	µg/kg	<LOD	105	<LOD	104	<LOD	104
95 Mo	mg/kg	<LOD	102	<LOD	102	<LOD	103
107 Ag	µg/kg	<LOD	80	<LOD	80	<LOD	80
111 Cd	µg/kg	<LOD	104	<LOD	104	<LOD	104
118 Sn	µg/kg	<LOD	100	<LOD	99	<LOD	99
121 Sb	µg/kg	<LOD	104	<LOD	105	<LOD	105
137 Ba	µg/kg	<LOD	105	<LOD	104	<LOD	103
201 Hg	µg/kg	<LOD	117	<LOD	114	<LOD	119
205 Tl	µg/kg	3.813	104	4.235	104	6.944	104
Pb	µg/kg	228.7	100	0.058	104	<LOD	105

모든 원소는 He 모드(P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 강화된 He)에서 수집했습니다. *고유 농도에 비해 스파이크 수준이 너무 낮음. **Pb는 가장 양이 많은 세가지 동위원소 206, 207, 208의 총합으로 측정했습니다.

표 9. 14일 동안 배양된 전처리 배지 액체 시료에 대한 정량 결과(n=9) 및 스파이크 회수율.

	농도 단위	14일 동안 1차 배아 닭 근육 전구체 세포를 배양한 후의 소모 배지					
		시료 6	회수율(%)	시료 7	회수율(%)	시료 8	회수율(%)
11 B	µg/kg	<LOD	103	<LOD	103	<LOD	104
23 Na	mg/kg	3457	*	1774	*	2378	*
24 Mg	mg/kg	18.08	107	9.834	106	14.39	106
27 Al	µg/kg	<LOD	114	<LOD	105	<LOD	109
31 P	mg/kg	46.33	109	23.92	106	39.31	107
34 S	mg/kg	<LOD	105	<LOD	103	<LOD	106
39 K	mg/kg	232.3	106	126.9	105	159.7	104
43 Ca	mg/kg	42.79	110	20.72	104	32.27	104
47 Ti	µg/kg	<LOD	103	<LOD	104	<LOD	105
51 V	µg/kg	<LOD	103	<LOD	102	<LOD	102
52 Cr	µg/kg	<LOD	102	<LOD	103	<LOD	101
55 Mn	µg/kg	<LOD	104	<LOD	103	<LOD	102
56 Fe	mg/kg	0.683	108	0.280	107	0.794	106
59 Co	mg/kg	<LOD	103	0.013	102	0.015	101
60 Ni	µg/kg	<LOD	104	<LOD	104	<LOD	104
63 Cu	µg/kg	0.046	107	0.039	107	0.033	106
66 Zn	µg/kg	0.404	110	<LOD	106	<LOD	107
75 As	µg/kg	<LOD	103	<LOD	101	<LOD	100
78 Se	µg/kg	<LOD	101	<LOD	98	<LOD	99
88 Sr	µg/kg	<LOD	107	<LOD	106	<LOD	105
95 Mo	mg/kg	<LOD	104	<LOD	104	<LOD	103
107 Ag	µg/kg	<LOD	82	<LOD	82	<LOD	81
111 Cd	µg/kg	<LOD	106	<LOD	105	<LOD	106
118 Sn	µg/kg	<LOD	103	<LOD	102	<LOD	99
121 Sb	µg/kg	<LOD	106	<LOD	106	<LOD	104
137 Ba	µg/kg	0.407	106	<LOD	104	<LOD	104
201 Hg	µg/kg	<LOD	110	<LOD	108	<LOD	111
205 Tl	µg/kg	3.117	106	2.220	105	2.659	105
Pb**	µg/kg	0.381	106	<LOD	105	<LOD	105

모든 원소는 He 모드(P, S, As 및 Se 분석에 사용하는 감화된 He)에서 수집했습니다. *고유 농도에 비해 스파이크 수준이 너무 낮음. **Pb는 가장 양이 많은 세가지 동위원소 206, 207, 208의 총합으로 측정했습니다.

ISTD 회수율(%)

그림 1에 요약된 분석 시퀀스는 48시간 이상 반복 분석하였습니다. 모든 ISTD 회수율 플롯은 $\pm 20\%$ 이내였으며 실행 중 내부 표준물질 실패가 없었으며 EAM 4.7에 지정된 기준을 충족했습니다(그림 3). 결과는 7850 ICP-MS 플라즈마의 견고성과 장기적으로 UHMI를 사용하는 시스템의 높은 매트릭스 내성을 보여줍니다.

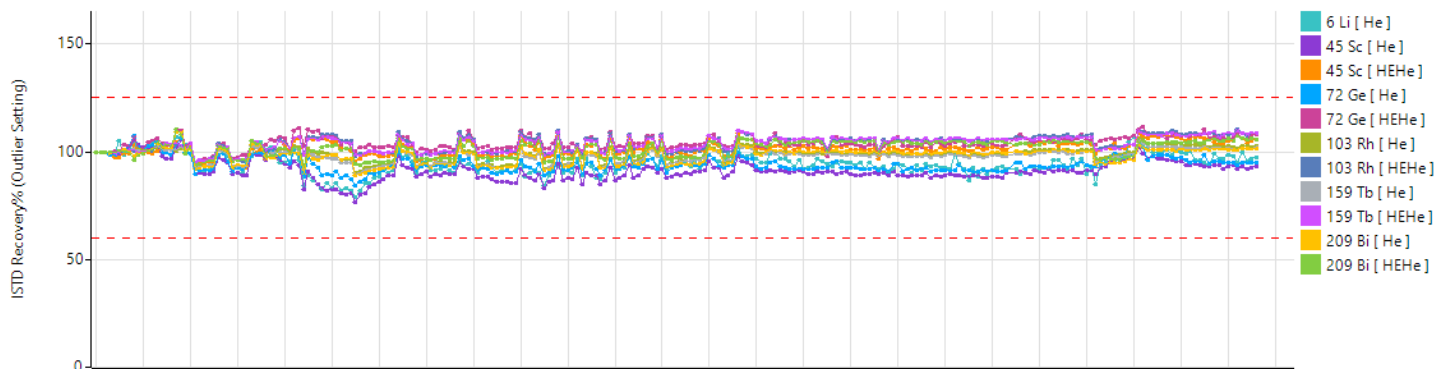


그림 3. 48시간 이상 진행된 ISTD 측정의 안정성. ISTD 회수율은 모든 시료에 대해 검량 블랭크로 정규화.

IntelliQuant 데이터

분석자가 ICP-MS MassHunter 기존 설정 분석법을 사용하여 정량 분석법을 개발하는 경우 He 모드 튜닝 단계에서 IntelliQuant Quick Scan 수집이 사전 정의됩니다. IntelliQuant에는 특별한 설정이나 별도의 검량이 필요하지 않으므로 분석이 간소화됩니다. IntelliQuant는 단 2초의 추가 측정 시간만으로 모든 시료에서 전체 질량 스펙트럼 데이터를 자동으로 수집하므로 분석 작업자는 시료에 어떤 원소가 있는지 빠르게 확인할 수 있습니다.

IntelliQuant 데이터는 He 충돌 셀 모드에서 수집되기 때문에 분석물에 일반적인 동위원소 이온 중첩이 없어 데이터 품질이 보장됩니다.

이 연구에서는 7850 ICP-MS의 He 모드에서 각 식물성 식품 시료와 SRM에 대한 IntelliQuant 데이터를 수집했습니다. 데이터는 그림 4의 식물성 “다진 소고기” 시료에 대해 표시된 것처럼 주기율표 히트 맵 보기에 표시할 수 있습니다. 색상 강도 히트맵은 각 시료에서 최대 78종 원소의 대략적인 농도를 표시하며, 색이 어두울수록 농도가 더 높습니다. IntelliQuant 데이터는 시료의 원소 함량을 개괄적으로 알아보고 예상치 못한 원소의 존재를 식별하는 빠르고 간단한 방법입니다.

그림 4는 식물성 “다진 소고기” 시료가 상대적으로 높은 농도의 Rb를 함유하고 있음을 보여줍니다. Rb는 정량 연구의 일부로 검량되지 않았으므로 IntelliQuant의 자연 동위원소 템플릿 기능을 사용하여 Quick Scan 스펙트럼을 확인하는 식으로 확인했습니다. 그림 5에 나타난 바와 같이 Rb에 대한 천연 동위원소 템플릿이 잘 맞는 것으로부터 시료 내 Rb 존재를 확인합니다.

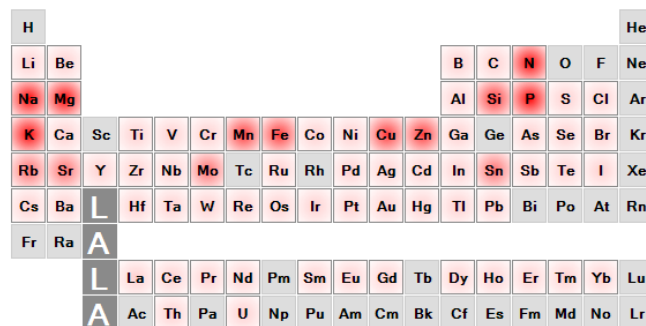


그림 4. 식물성 “다진 소고기” 시료에 대해 수집된 ICP-MS IntelliQuant 데이터의 주기율표 히트 맵 보기.

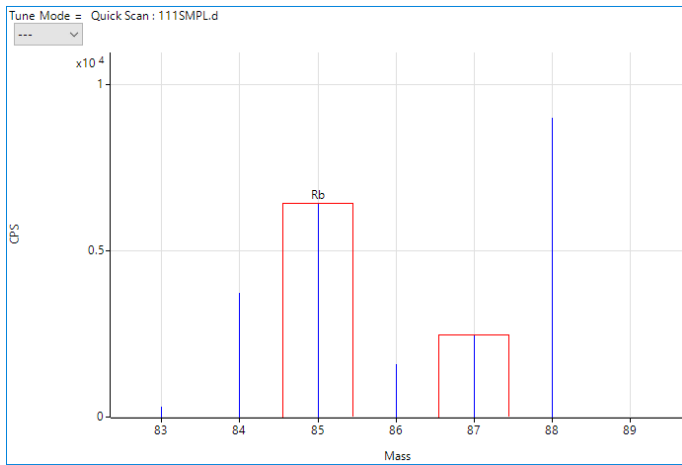


그림 5. IntelliQuant Quick Scan 질량 스펙트럼의 동위원소 템플릿 피팅 기능을 사용하여 식물성 다진 소고기 시료에서 예상치 못한 높은 농도의 Rb를 확인했습니다.

결론

다양한 식물성 단백질 식품의 30종 원소와 다양한 세포 배양 배지의 29종 원소를 분석하는 데 Agilent 7850 ICP-MS를 사용했습니다. 식품 및 관련 제품에 대한 미국 FDA EAM 분석법 4.7에 따라 분석을 수행했으며 4.7 분석법에 지정된 12종 원소를 포함했습니다. 모든 식품 시료는 단일 마이크로웨이브 분해 분석법을 사용하여 동일한 배치로 준비되었으며 세포 배지 시료는 분석 전에 간단히 희석되었습니다.

7850 ICP-MS 분석법은 이전 EAM 4.7 식품 분석 배치를 기반으로 사전 정의되었으며 기기를 자동 조정하여 개발 시간을 단축했습니다. 단일 데이터 수집 모드를 사용하여 모든 요소를 측정했으며, He-KED 모드에서 ORS⁴ 충돌 셀을 작동시켜 동중원소 간섭을 효과적으로 제거했습니다. 또한 He-KED 모드를 이용한 정량적 분석법의 일부로, 각 시료에 대한 IntelliQuant 데이터를 획득했습니다. 식물성 “다진 소고기” 시료에 대한 IntelliQuant 데이터는 주기율표의 히트 맵으로 표시하여 측정된 각 원소에 대한 대략적인 농도 범위를 나타냈습니다. IntelliQuant의 동위원소 템플릿을 사용하여 식물성 “다진 소고기” 시료 내 루비듐과 같이 검량되지 않은 원소가 있는지 확인했습니다.

정량 분석법의 정확성은 4가지 식품 기반 SRM을 분석하고 식물성 “소고기” 시료의 스파이크 회수율 테스트를 수행하여 평가했습니다. 각각 $\pm 10\%$ 및 $\pm 20\%$ 의 EAM 4.7 분석법 QC 기준 내에서 두 테스트 모두 뛰어난 회수율을 보였습니다. 7850 ICP-MS는 EAM 분석법에 지정된 공칭 검출 한계 요구 사항보다 우수한 결과를 보였습니다. 또한 UHMI 에어로졸 희석 기술을 사용한 조건에서 7850은 48시간 ISTD 회수율 실행에서 탁월한 안정성을 보여 이 분석법의 견고성을 입증했습니다.

동일한 7850 ICP-MS 분석법을 사용하여 다양한 액상 세포 배양 배지 시료와 스파이킹된 시료를 분석했습니다. 8개 시료에 대해 우수한 스파이크 회수율 데이터가 얻어져 식품 산업의 성장 시장인 배양육 제품의 개발을 뒷받침하기에 분석법이 적합함을 확인했습니다.

참고 문헌

1. Keren Dopelt, Pnina Radon, Nadav Davidovitch, Environmental Effects of the Livestock Industry: The Relationship between Knowledge, Attitudes, and Behavior among Students in Israel, *Int J Environ Res Public Health*, **2019**, 16(8): 1359
2. Patrick J. Gray, William R. Mindak, John Cheng, US FDA Elemental Analysis Manual, 4.7 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometric Determination of Arsenic, Cadmium, Chromium, Lead, Mercury, and Other Elements in Food Using Microwave Assisted Digestion, Version 1.2 (February 2020), accessed July 2022, <https://www.fda.gov/media/87509/download>
3. Jenny Nelson, Elaine Hasty, Leanne Anderson, Macy Harris, 미국 FDA EAM 4.7 ICP-MS 분석법에 큰 식품 내 주요 원소 검출, 애질런트 발행물, [5994-2839KO](#)
4. Octopole 충돌/반응 셀 및 헬륨 모드, 애질런트 발행물, [5994-1172KO](#)
5. Edward O'Neill, Joshua Ansel, Grace Kwong, Michael Plastino, Jenny Nelson, Keith Baar, David Block. Spent media analysis suggests cultivated meat media will require species and cell type optimization. *NPJ Sci. Food*. Accepted August 2022
6. Ultra High Matrix Introduction, Agilent ICP-MS 기술 개요, [5994-1170KO](#)
7. Enhanced Helium Mode Cell Performance for Improved Interference Removal in ICP-MS, Agilent publication, [5990-7573EN](#)
8. William C. Cunningham, William R. Mindak, Stephen G. Capar, US FDA Elemental Analysis Manual For Food and Related Products, 3.2 Terminology, 2014, accessed July 2022, <https://www.fda.gov/media/89337/download>

www.agilent.com/chem/7850icp-ms

DE65046313

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2022
2022년 9월 8일, 한국에서 발행
5994-5181KO

한국애질런트테크놀로지스(주)
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

