

펄스 Laser Ablation (LA-) ICP-MS를 이용한 순수 금속 및 합금의 원소 분석

100% 정규화 기능으로 매트릭스 일치 표준물질 없이
정확한 정량 성취



저자

Naoki Sugiyama
Agilent Technologies, Inc.

서론

대부분의 ICP-MS 응용은 액체 시료 분석을 다루지만, 고체와 가스도 적절한 액세서리를 이용하면 ICP-MS로 직접 분석할 수 있습니다. Laser ablation(LA)은 ICP-MS 초기 시절부터 고체 샘플링 액세서리로 이용되어 왔습니다. LA-ICP-MS는 펄스 레이저 빔을 이용해 챔버나 셀 내에 밀폐된 시료 표면에서 입자 및 증기를 제거합니다. 각 레이저 펄스 또는 “샷”을 통해 제거 처리를 마친 물질은 운반 가스 흐름을 사용해 ICP-MS의 플라즈마로 옮겨집니다. 시료 물질은 플라즈마 내에서 액체 시료 방울과 같은 방식으로 분해되고, 원자화되고, 이온화되며, 그 후 이온은 분석을 위해 질량 분석기에서 추출됩니다. LA-ICP-MS는 이제 다양한 고체 시료의 원소 조성을 직접 분석하는 방법으로 정립되었습니다^{1~4}.

LA-ICP-MS는 전도성 및 비전도성 물질에 모두 적용 가능하며, 내산성 세라믹 및 합금과 같이 용해 또는 분해하기 어려운 시료에 실용적으로 사용할 수 있는 옵션입니다. 시료 분해 단계를 없애면 시간과 시약이 절약되고, 오염으로 인한 오류 가능성이 감소하며, 휘발성 및 화학적 불안정성을 띠는 원소의 손실을 방지할 수 있습니다. LA는 시료의 작은 면적 또는 부분을 샘플링할 수 있으므로, 맵핑 및 이미징 응용을 위한 원소 분포 정보를 얻을 수 있습니다. 그러나 LA는 또한 시료의 보다 넓은 영역으로 어블레이션 면적을 옮기며 데이터를 분석함으로써 대량 분석에도 사용될 수 있습니다.

일반 정량 분석에 LA-ICP-MS의 광범위한 적용을 제한하는 주요 요인 중 하나는, 관심있는 시료 유형에 대한 신뢰할 수 있고 추적 가능한 다원소 고체 검량 표준물질을 만드는 것이 어렵다는 것이었습니다. 많은 응용에 대해 시료와 일치도가 높은 매트릭스 내 알려진 농도의 표적 원소를 모두 포함한, 특성 규명이 잘 된 표준물질 또는 참조물질이 존재하지 않습니다. 결과적으로 LA-ICP-MS 분석가는 종종 매트릭스와 일치하지 않은 검량 표준물질을 사용해야 하며, 이는 표준물질과 비교하여 다른 어블레이션 특성을 지닌 시료 분석에서 오류를 일으킬 수 있습니다.

레이저 샘플링 과정에서 어블레이션을 거치는 시료 물질의 양, 크기 분포, 입자 조성 등은 시료 표면과 레이저 빔의 상호작용에 의해 제어됩니다. 이 상호작용은 시료 조성, 표면 형태(예를 들어 반사율), 어블레이션 챔버 내 가스 존재 여부에 큰 영향을 받습니다. 또한 어블레이션 절차는 레이저 파장, 빔 프로파일, 펄스 폭 등에 따라 달라지기 때문에, 사용자는 종종 시료 유형에 따라 다른 레이저 유형을 선택해야 합니다. 예를 들어 치아, 뼈, 껍데기, 산호, 플라스틱, 세라믹 등의 불투명 재료를 분석할 때는 266 또는 213nm에서 작동하는 고체상 Nd:YAG 레이저가 자주 사용됩니다. 그에 반해 투명한 유리 및 석영과 같은 미네랄을 분석할 때는 193nm에서 작동하는 Excimer 레이저처럼 보다 짧은 UV 파장의 레이저를 사용하는 것이 더 좋습니다.

일부 응용에서는 보다 짧은 펨토초(fs) 펄스 간격의 레이저가 나노초(ns) 펄스 폭 레이저에 비해 이점을 가지는 것으로 나타났습니다(5). 펨토초 펄스는 시료를 녹이거나 가열하지 않고 레이저 에너지를 전달하므로, 보다 긴 ns 펄스에서 발생하는 원소 및 동위원소 분별을 방지할 수 있습니다. 따라서 펨토초 어블레이션은 특히 금속 및 합금과 같이 낮은 녹는점의 전도성 물질에 대해 벌크 재료를 더 잘 대표할 수 있는 입자를 제공합니다. 펨토초 어블레이션은 다양한 물질에서 보다 일관된 어블레이션 수율을 보여, 매트릭스와 일치하지 않는 검량 물질 사용을 가능케 합니다.

LA-ICP-MS의 보다 폭넓은 활용을 위해서는 표준물질과 시료 간 어블레이션 비율 차이를 보정하는 간단하고 자동화된 데이터 분석 방법이 있는 것이 좋습니다. 애질런트 ICP-MassHunter 소프트웨어(버전 5.2 이상)에는 LA-ICP-MS 검량의 이러한 부분을 해결하도록 설계된 데이터 보정 기능이 포함되어 있습니다. 직접 고체 샘플링을 사용하는 응용(LA-ICP-MS 포함)은 종종 매트릭스 원소를 포함한 시료 내 모든 원소를 측정합니다. 모든 원소를 포괄하는 기능은 모든 원소 농도의 합을 100%로 보정할 수 있는 기회를 제공하여 어블레이션 비율의 변이를 보상하는 간단하고 확실한 방법을 제공합니다. ICP-MS MassHunter 소프트웨어의 정규화 기능은 자동으로 측정된 농도를 보정하여 모든 측정된 원소 합에 대한 상대적인 값을 제공합니다. 따라서 새로운 기능은 자동으로 표준물질과 시료 간 어블레이션 비율 차이를 보정하며, 다양한 조성의 재료에 대한 일반 분석을 간소화합니다.

펨토초 LA 시스템과 애질런트 ICP-MS를 함께 사용해 ICP-MS MassHunter 100% 정규화 접근 방법의 분석 성능을 다양한 금속 참조물질 분석을 통해 평가했습니다. 금속 합금과 순수 금속 시료는 특성 규명이 잘 된 유리 표준물질(SRM), 유리 내 NIST 612 극미량 원소(NIST, Gaithersburg, US)와 비교해 검량했습니다. 100% 정규화 기능은 여러 시료 매트릭스 간 어블레이션 비율 차이를 보정하는 데 사용되었습니다(예: 이 경우에는 유리 검량 표준물질 및 금속 시료). 100% 정규화 기능은 검량 전략에 우수한 유연성을 부여하며, 주원소가 내부 표준물질로 사용되는 기존의 방법에 비해 정확성을 눈에 띄게 향상시킵니다.

실험

기기

분석에는 Agilent 8900 QQQ ICP-MS(ICP-QQQ) 고급 응용 표준 구성(#100) 및 펄토초 LA 시스템(RAIJINa, Seishin Trading Co., Ltd., Kobe, Japan)을 사용했습니다.

LA-ICP-MS를 위한 펄토초 레이저 어블레이션

펄토초 레이저 어블레이션은 기존의 나노초 펄스 폭을 적용한 LA 시스템에 비해 여러 이점이 있습니다. 펄토초 레이저는 290fs 미만의 펄스 폭을 사용해 작동 가능하며, 이는 레이저 빔에서 시료로의 열 전도 시간 단위보다 작습니다. 어블레이션 과정에서 열 효과를 제거하기 때문에 시료 가열 및 용융을 막을 수 있으며, 원소와 동위원소 분별이 줄어들거나 발생하지 않습니다^{6~8}.

또한 펄토초 펄스를 사용한 어블레이션은 입자 크기 분포를 더 작고 일관되게 제공하며, 이는 입자가 ICP로 보다 효율적으로 전송됨을 의미합니다. 플라즈마로 더 많은 입자가 전달되기 때문에 재증착률이 낮고 감도는 높습니다. 입자가 작고 균일할수록 플라즈마가 완전히 분해되기 쉬워지기 때문에 ICP 내 분별 효과도 감소하고 신호 안정성도 향상됩니다. 보다 일관된 어블레이션과 보다 완전한 입자 전송 및 분해는 분석의 정확성을 향상시키며, 이는 특히 이번 연구에서처럼 매트릭스와 일치하지 않는 검량 표준물질을 사용 시 더욱 두드러집니다.

펄토초 레이저는 또한 시료 표면에서 일관된 에너지 밀도 또는 플루언스를 유지하면서 매우 높은(kHz) 펄스 반복률로 사용할 수 있습니다. 높은 펄스 반복률은 원활한 신호를 제공하며 어블레이션 처리된 물질의 수율을 증가시켜 보다 높은 감도를 성취합니다.

LA 분석법

많은 LA-ICP-MS 응용, 이를테면 이미징 응용 등은 시료의 작은 부분 또는 내포 물질 연구, 또는 다양한 시료의 원소 조성 차이에 대한 연구를 포함합니다. 이러한 기능 및 이미징 응용은 빔이 수 마이크로미터 수준의 작은 부분에 집중될 수 있도록 하는 레이저 광학 장치로 인해 가능합니다. 또한 LA-ICP-MS는 레이저 어블레이션을 선형 또는 래스터(주사선) 패턴으로 움직여 시료 영역의 보다 넓은 부분으로 이동시킴으로써 “벌크” 분석에도 사용될 수 있습니다. 작은 레이저 영역 크기로 벌크 분석을 수행할 때 시료 불균일성으로 인한 오류를 방지하기 위해 일반적으로 수 mm²의 면적을 샘플링합니다. 이 연구에서는 LA 시스템에서 라인 간격이 8μm인 래스터 패턴을 사용하여 1.5 x 1.5mm의 어블레이션 면적을 작업하였습니다.

데이터가 수집되는 동안 레이저 래스터 패턴으로 지속적으로 어블레이션을 수행하였으며, 각 3회 반복 시료 측정 때마다 데이터 수집 시 약 10회의 래스터 통과가 완료되었습니다. 모든 표적 분석물질은 0.6초(Be는 1초)의 적분 시간을 사용해 측정되었습니다. 각 시료에 대해 동일한 영역에서 분석을 4회 반복하여 3번의 별개 데이터 수집 측정(각각 n=3)을 하였으며, “어블레이션 전” 측정은 데이터 분석에 포함되지 않았으며, “가스 블랭크” 또한 시료 수집과 동일한 방법으로 측정되었으나, LA 에너지는 0%로 설정되어 시료 어블레이션은 일어나지 않았습니다.

LA 셀에서 어블레이션된 물질을 포함한 스왑 가스는 Y-piece 커넥터를 사용해 8900 ICP-QQQ의 메이크업 가스와 혼합된 후, ICP 토치로 유입되었습니다. LA 운반 가스로는 보통 헬륨(He)이 사용되는데, 이는 비록 펄토초 LA에서 이점이 덜할 수 있어도 He가 어블레이션된 물질을 운반하고 배출하는 데 가장 뛰어나기 때문입니다. 이 연구에서는 He LA 운반 가스 사용이 가능하지 않으므로 아르곤을 사용하였으며, 아르곤은 He에 비해 2배 정도의 감도 감소를 가져옵니다.

모든 원소에 대해 8900 ICP-QQQ를 He로 압력이 가해진 ORS⁴ 충돌/반응 셀과 함께 사용하였으며, 따라서 이 수집 방법은 애질런트 SQ ICP-MS에도 적용 가능합니다. He 충돌 모드는 운동 에너지 판별(KED)로 다중원소 이온의 전송을 선택적으로 줄임으로써 간섭을 감소시킵니다. LA와 ICP-QQQ 작동 조건은 표 1과 2에 각각 나와 있습니다.

표 1. 레이저 어블레이션 작동 조건.

파라미터	설정
펄스 폭(fs)	290
파장(nm)	257
스팟 크기(μm)	10
반복률(kHz)	20
스캔 속도(mm/s)	30*
플루언스(J/cm ²)	5(급속) 또는 7(NIST Glass)
스캔 패턴/라인 간격(μm)	래스터/8
레이저 운반 가스 유속(L/min)	1.0

* 빠른 스캔 속도는 Seishin 레이저의 갈바노미터(glavo) 거울 반-스캔 기능을 통해 이용 가능했습니다.

표 2. Agilent 8900 ICP-QQQ 작동 파라미터.

파라미터	설정
RF 전력(W)	1550
샘플링 깊이(mm)	8.0
보충 가스(L/분)	0.25
추출 1 렌즈(V)	-10
추출 2 렌즈(V)	-180
오메가 바이어스 렌즈(V)	-80
오메가 렌즈(V)*	8.0
헬륨 셀 가스 유속(mL/min)	3.0
KED(V)	3.0

* EB385의 Cu는 정상 튜닝 조건에서 초과 범위였습니다. 따라서 오메가 렌즈 전압 디튜닝을 통해 확장된 측정 범위(EDR) 튜닝 조건에서 multi-tune 분석법을 사용하여, Cu 신호를 1/100로 감소시켰습니다.

표준물질 및 시료

Glass SRM 내의 NIST 612 극미량 원소를 관심 원소의 신호 감응 검량을 위한 표준물질로 사용했습니다. NIST 612 Glass는 약 40ppm의 인증된 농도로 여러 극미량 원소를 포함하고 있습니다. 그러나 Glass SRM의 NIST 600 시리즈는 광범위하게 연구되어 극미량 원소에 대해 많은 업데이트된 합의 값이 발표되었습니다. 이 연구에서 NIST 612 검량 표준물질에 사용된 농도는 Jochum 등이 발표한 값을 기반으로 하였습니다.

매트릭스 일치 검량 표준물질 없이도 정확한 정량 결과를 제공하는 100% 정규화 접근법의 성능을 시연하기 위해, 3개의 금속 합금 및 순수 금속 인증 RM(CRM)을 측정했습니다. 다양한 금속 매트릭스는 NIST Glass 표준물질에서 얻은 검량에 대해 미지 시료로 측정하였습니다. 3개의 금속 CRM을 분석: BAM 310 Al/Mg 합금(Berlin, Germany), NIST 1249 니켈 합금, ERM-EB385 순수 구리(Sigma Aldrich, Merck). 필요한 경우, 시료는 LA 셀에 맞는 크기로 절단하였습니다. 시료는 1% 질산으로 세척하여 표면 오염물을 제거한 후, 펄토초 LA-ICP-MS로 분석하였습니다.

모든 원소(탄소 제외)의 인증된 지표 농도는 3개 CRM 각각에 대해 인용된 값과 함께 표 3에 정리되어 있습니다.

표 3. 모든 원소의 인증된 농도 및 지표 농도(괄호 안) 및 3개의 금속 CRM(NIST 1249의 탄소 제외) 각각에 대한 인증 값과 함께 표 3에 정리되어 있습니다. 단위 mg/kg. 바탕 셀은 CRM에 대해 참조값이 제공되지 않았음을 나타냅니다.

원소	BAM 310 Al/Mg 합금	NIST 1249 니켈 합금	ERM-EB385 순수 구리
Li	3.66		
Be	1.28		
B		23	
Na	3		
Mg	9940	12	29.1
Al	988,000	5682	28.6
Si	797	1200	(7.2)
P		134	12.9
S		6.4	31.3
Ca	7.3		
Ti	30.1	9590	3.83
V	44.4	338	
Cr	9	184,720	9.81
Mn	30.7	1080	10.1
Fe	705	176,930	45.4
Co		3371	6.93
Ni	24.4	532,900	11.9
Cu	16.9	1402	999,000
Zn	86		57.9
Ga	115.2	19	
As		13	11.4
Se			7.2
Zr	13.5	29	(<7)
Nb		51,960	
Mo		31,120	
Ag			28.6
Cd	23.7		5.8
Sn	23.8	24	18.0
Sb		3.0	19.1
Te			10.0
Ta		27	
W		846	
Pb	34.7		11.3
Bi			5.81

검량 및 데이터 분석

금속 CRM 시료 내 극미량 원소에 대한 정확한 정량 분석에 유리 매트릭스 표준물질 사용을 가능하게 하기 위해, 100% 정규화 검량 기능(ICP-MS MassHunter 버전 5.2 이상에 포함)을 사용했습니다. 100% 정규화 기능은 검량 표준물질과 시료 간 어블레이션된 물질의 질량 차이 및 시료 간 어블레이션 수율 차이를 보정합니다. 정규화 기능은 먼저 표준물질 NIST 612 Glass에 대해 보정된 각 시료의 모든 측정된 원소의 원래 농도를 결정함으로써 작동합니다. 그 후 측정된 농도를 정규화하여 모든 측정된 원소의 합이 100%가 되도록 함으로써, 시료 및 검량 표준물질 매트릭스 간 어블레이션 비율 차이를 보정합니다. 정규화를 통해 정확한 결과를 얻으려면 시료 내 모든 주원소가 분석물질 목록에 포함되어야 합니다.

많은 종류의 시료에서 원소는 그 원소 형태로 존재하므로, 기본적으로 초기에 측정된 농도는 각 원소의 정규화 농도 계산에 사용됩니다. 그러나 만약 원소가 산화물, 불화물 등의 특정 화합물 형태로 존재하는 경우, ICP-MS MassHunter 내에서는 자동으로 화합물별 보정 계수를 적용하여 계산을 수행할 수 있습니다. 예를 들어 Ca이 CaO의 형태로 존재한다는 것이 알려져 있다면, Ca 원소의 측정된 농도는 실제 존재하는 CaO의 농도로 변환될 수 있습니다. 그 후 화합물 농도가 100% 정규화에 사용되어, 분석된 모든 원소의 총량을 보다 정확하게 계산할 수 있습니다. 일단 농도가 100%로 정규화되고 나면, 보정된 농도는 ICP-MS 결과 보고를 위해 다시 원소 함량으로 변환됩니다. 화합물 보정 계수의 설정은 사용자가 실제 화합물을 ICP-MS MassHunter의 100% 정규화 검량 테이블에 입력하기만 하면 되므로 정규화 중 전환을 적용할 수 있습니다.

결과 및 토의

이 연구에서는 LA-ICP-MS에 대한 100% 정규화 기능을 사용해 3가지 금속 합금 및 순수 금속 CRM 내의 극미량 원소를 분석했습니다. 검량에는 NIST 612 Glass를 사용하였습니다. 가스 바탕(백그라운드) 신호는 모든 시료 데이터에서 차감되었습니다. 그림 1은 각 CRM에서 검출된 측정 농도의 회수율을 100% 정규화 후 인증된 값과 비교하여 보여줍니다. 각 CRM에 대해서는 다양한 원소들이 인증되었음을 알 수 있습니다.

거의 모든 회수율이 인증값의 80~120%로 나타났으며, 이는 100% 정규화 기능을 적용한 LA-ICP-MS가 매트릭스 일치 검량 표준물질 없이도 뛰어난 정확성을 달성할 수 있음을 보여줍니다. 각 그래프의 오류 바는 각 시료의 단일 영역에서 차례대로 측정된 3회 반복 분석의 ±표준 편차(SD)를 보여줍니다. 정밀성은 거의 모든 분석물질에 대해 우수했으며, BAM 310 Al/Mg 합금 내 대부분 분석물질에 대해 SD가 2% 미만이었으며, NIST 1249 니켈 합금 내 대부분 분석물질에 대해 SD가 1% 미만이었습니다. 순수 Cu 내에 많은 원소가 한자릿수의 ppm 수준으로 존재하는 ERM-EB385 Cu CRM 내 극미량 분석물질에 대해서는 약 5%로 보다 높은 SD가 나타났습니다.

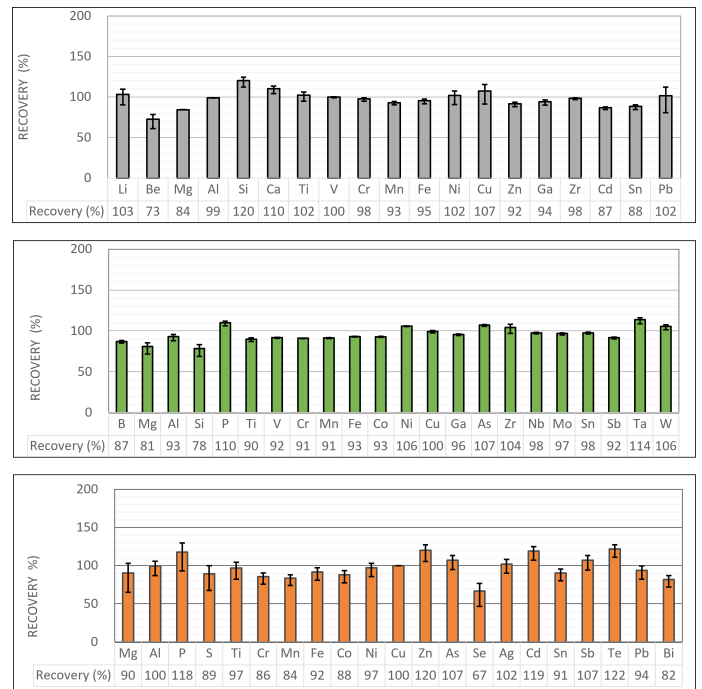


그림 1. 검량 표준물질로 NIST 612 을 사용한 100% 정규화 기능을 사용하여 금속 CRM 내 인증된 원소에 대한 정량 분석 회수율: BAM 310 Al/Mg 합금(상단), NIST 1249 니켈 합금(중간), ERM-EB385 순수 구리(하단). NIST 1249 내의 S 또는 ERM-EB385 내의 Si는 낮은 신호 대 잡음비로 인해 데이터가 없습니다.

NIST 1249 Ni 합금 SRM은 거의 1%의 Ti 와 12ppm의 Mg만을 포함하고 있습니다. Ti는 13.557eV의 상대적으로 낮은 2차 이온화 전위를 가지므로, 적은 비율의 2가 전하 이온(M^{++})을 형성합니다. 사중극자 질량 필터가 이온을 질량 대 전하비로 분리하기 때문에 2가 전하 이온은 사중극자 질량 분석기에서 본 질량의 절반으로 나타납니다(m/z). 이는 주요 Ti 동위원소의 2가 전하 이온인 $^{48}Ti^{++}$ 가 m/z 24에서 나타난다는 뜻이며, 이는 마그네슘 주요 동위원소인 $^{24}Mg^+$ 와 겹칩니다. He KED 모드는 M^{++} 간섭을 효과적으로 해결할 수 없으나 Agilent ICP-MS 시스템은 고분해능 설정(피크 폭 <0.5u)에서 높은 이온 투과율을 유지하는 고성능 쌍극산 프로파일 사중극자를 사용합니다. 이 사중극자의 성능은 자동화된 좁은 피크 모드를 적용할 수 있도록 하여, ICP-MS MassHunter의 절반 질량 보정 기능이 M^{++} 겹침 현상에 적용될 수 있도록 합니다. M^{++} 보정은 일반적으로 희토류 원소 및/또는 Zn, As, Se¹⁰의 비율로부터의 2가 전하 이온 간섭 현상 보정에 사용됩니다. 그러나 이 보정 알고리즘은 공식 1에 나타나 있는 보정을 사용해 $^{48}Ti^{++}$ 와 $^{24}Mg^+$ 등을 포함한 기타 M^{++} 겹침 현상에도 적용할 수 있습니다.

$$Mc(24) = M(24) - M(24.5) \times 13.6 \quad \text{공식 1}$$

여기에서 Mc는 보정된 Mg 신호(카운트), M은 측정된 신호, 괄호 안의 숫자는 질량 수, 13.6은 동위원소 ^{48}Ti 대 ^{49}Ti 의 비율입니다. $^{49}Ti^{++}$ 를 절반 질량 위치(m/z 24.5)에서 측정함으로써, m/z 24에서의 $^{48}Ti^{++}$ 비중은 알려진 동위원소 존재비를 통해 계산할 수 있습니다.

수학적 보정을 계산해 적용하고 $^{24}Mg^+$ 에 겹치는 $^{48}Ti^{++}$ 의 비중을 차감하여 그림 1에 나타난 바와 같이(중간 플롯) NIST 1249 Ni 합금 내 Mg에 대한 우수한 회수율 결과를 얻을 수 있었습니다.

결론

대표적인 다원소 검량을 수행하는 것은 LA-ICP-MS를 사용한 정확한 고체 정량 분석에서 가장 어려운 과제입니다. 이 연구에서는 100% 정규화를 사용한 새로운 계산 접근법(ICP-MS MassHunter 5.2 이상에 포함된 기능)으로 금속 합금 및 순수 금속 CRM 내 인증 원소를 정확하게 분석하였습니다. 금속 CRM은 잘 특성 규명된(그러나 매트릭스가 일치하지는 않는) 표준물질, 유리 내의 NIST 612 극미량 원소에 대비해 검량을 진행하였습니다. 모든 원소를 Agilent 8900 ICP-QQQ의 헬륨 충돌 모드를 사용해 분석했으므로, 이 수집 방법은 Agilent SQ ICP-MS에도 적용할 수 있습니다. ICP-QQQ는 펨토초 레이저 어블레이션 시스템과 함께 사용했습니다. 펨토초 레이저 어블레이션 역시 시료간 어블레이션 차이를 줄이는 데 기여했습니다.

100% 정규화를 적용한 LA-ICP-MS는 3개의 서로 다른 금속 CRM에서 성공적으로 모든 인증 원소(탄소 제외)를 측정했습니다. 거의 모든 원소에서 넓은 농도 범위에 걸쳐(한자릿수 ppm의 극미량부터 % 수준의 주원소 농도에 이르기까지) 80~120%의 회수율로 높은 정확성이 나타났습니다. 새로운 100% 정규화 기능은 매트릭스 일치 고체 검량 표준물질을 얻기 힘든 일반적 문제를 해결함으로써 LA-ICP-MS 응용을 위한 검량 전략을 크게 간소화합니다.

이 연구에서 설명한 방법은 금속 및 기타 고체 시료에 대한 직접 원소 분석을 위한 새롭고 간단하며 효과적인 절차입니다. 정규화 검량 방법은 LA-ICP-MS의 표준 절차가 될 가능성이 높습니다.

참고 문헌

- Gonzalez, J. J., Laser Ablation-Based Chemical Analysis Techniques: A Short Review, *Spectroscopy*, **2017**, 32, 28-34
- Liu, Y., Hu, Z., Li, M. *et al.*, Applications of LA-ICP-MS in the elemental analyses of geological samples, *Chin. Sci. Bull.*, **2013**, 58, 3863-3878
- Pozebon, D. *et al*, Recent applications of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for biological sample analysis: a follow-up review, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2017**, 32, 890-919
- Harte, P. *et al*, Adaptation and improvement of an elemental mapping method for lithium ion battery electrodes and separators by means of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, *Anal Bioanal Chem*, **2019**, 411, 581-589
- Pisonero, J., Günther, D., *Mass Spectrometry Reviews*, **2008**, 27, 609-623
- Koch, J. *et al*, Particle size distributions and compositions of aerosols produced by near-IR femto- and nanosecond laser ablation of brass, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2004**, 19, 267-272
- Gonzalez, J. J. *et al*, Assessment of the precision and accuracy of thorium (^{232}Th) and uranium (^{238}U) measured by quadrupole based inductively coupled plasma-mass spectrometry using liquid nebulization, nanosecond and femtosecond laser ablation, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2008**, 23, 229-234
- Možná, V. *et al*, Quantitative analysis of Fe-based samples using ultraviolet nanosecond and femtosecond laser ablation-ICP-MS, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2006**, 21, 1194-1201

9. Jochum, K. P. *et al*, Determination of reference values for NIST SRM 610–617 glasses following ISO Guidelines, *Geostand Geoanal Res*, **2011**, 35, 397–429
10. Kubota, T., Agilent ICP-MS MassHunter를 사용한 2가 전하 이온 간섭의 보정 단순화, 애질런트 발행물 [5994-1435KO](#)

www.agilent.com/chem/8900icp-qqq

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

DE41847678

© Agilent Technologies, Inc. 2022
2022년 12월 8일, 한국에서 발행
5994-5540KO

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

