

Low flow-low power 유도결합 플라즈마 원자방출 분광법에서의 분석적 특성에 관한 연구

양혜순 · 김영만* · 김선태* · 최범석†

경희대학교 자연과학대학 화학과

*한국과학기술연구원 특성분석센터

(1994. 6. 16. 접수)

A Study on the Analytical Characterizations of the Low Flow-Low Power ICP-AES

Hae Soon Yang, Young Man Kim*, Sun Tae Kim*, Beom Suk Choi†

Advanced Analysis Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

Department of Chemistry, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

(Received Jun. 16, 1994)

요약 : Low power-low flow 유도결합 플라즈마 원자방출 분광법(ICP-AES)에서 분석적 특성에 대해 연구하였다. Low power ICP에서는 moderate power ICP보다 알짜세기는 감소하지만 바탕세기도 감소하여 알짜세기에 대한 바탕세기의 비는 오히려 증가하였다. Low power ICP에서도 작동조건에 따라 moderate power와 비슷한 검출한계를 얻을 수 있으며, 검량곡선도 $10^4 \sim 10^5$ 정도의 직선성을 가질 수 있었다. 알칼리 금속에 의한 이온화 방해영향은 시료운반기체의 사용량을 증가시킬수록 증가하지만, RF power의 변화에 대해서는 큰 차이가 없었다.

Abstract : Analytical characteristics of low power-low flow inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry(ICP-AES) has been studied. Although the net intensity of the low power ICP is lower than the moderate power ICP, the signal to background ratio becomes higher since the background intensity decreases with decreasing the RF power. The detection limit of the low power ICP is comparable with that of the moderate power ICP. The dynamic range of the calibration curve of the low power ICP is $10^4 \sim 10^5$. The ionization interferences by alkali metals increase with increasing the carrier gas flow rate, but the effects are not varied significantly with the RF power.

Key words : Low power-low flow ICP, detection limit, signal to background ratio, matrix effect.

1. 서론

유도결합 플라즈마 원자방출 분광법(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry,

ICP-AES)에서 검출한계와 방해영향은 분석원소의 들뜸에너지와 이온화에너지에도 일부 영향을 받지만 주로 기기의 제원과 작동조건에 영향을 받는다. 따라서 초기의 ICP-AES에 대한 연구는 주로 유도코일에

호르는 라디오파 주파수(1.6~56MHz)¹⁻³, 코일의 회전수(2~5회), 토오치의 구조와 같은 기기의 제원과, RF power⁴, 냉각기체와 운반기체의 종류와 사용량^{5,6}, 관측위치 등의 작동조건에 따른 분석 결과의 영향에 대해 조사되었다.

이와 같은 연구결과 현재 분석에 이용되는 ICP 분광기의 제원과 작동조건은 RF 주파수가 주로 27MHz와 40MHz로 RF power는 중간 세기인 1.0~1.5kW를 채택하였으며, 냉각기체와 시료운반기체의 사용량은 각각 12~18l/min, 0.5~1l/min을 주로 사용하였다. 이와 같은 조건에서 스펙트럼선의 관측위치는 스펙트럼선의 세기가 비교적 크고 방해영향이 가장 작은 위치, 즉 유도코일로부터 약 15mm가 되는 높이를 이용하고 있다.

현재 사용하고 있는 ICP 분광기는 1.2~1.5kW RF power를 사용하기 때문에 안정된 플라즈마를 유지하기 위해서는 12~18l/min 정도의 많은 아르곤 기체를 냉각기체로 사용해야 한다. 이를 보완하기 위하여 Genna⁷와 그의 동료들은 기존의 ICP보다 30~40% 적은 냉각기체를 사용해도 안정된 플라즈마를 얻을 수 있는 토오치를 소개하였다. 이외에도 냉각기체의 사용량을 더 낮추기 위한 water-cooled 플라즈마가 개발되었으며^{8,9}, Hiefje 등은¹⁰ 125W의 RF power를 사용할 수 있는 토오치에 대해 발표하였다.

R. Rezaalyaan 등은¹¹ 250W의 RF power를 사용하여 Ca의 원자선과 이온선의 스펙트럼을 관찰하였는데, 이들은 보통의 RF power를 사용할 때보다 큰 매트릭스 영향이 있다고 발표하였다. 위와 같은 현상은 ICP-AES법의 장점인 매트릭스의 방해영향이 없다는 장점을 상실해 버리는 것이다. 또한 P. W. J. M. Boumans 등은¹² RF power를 0.8~2.0kW까지 변화시키면서 5개의 원자선과 4개의 이온선의 세기를 측정하였다. 이들은 RF power를 증가시킬수록 스펙트럼선의 알짜세기는 증가하지만 바탕세기도 동시에 증가하기 때문에 바탕세기에 대한 스펙트럼선의 세기의 비, SBR(Signal to Background Ratio)은 감소한다고 발표하였다. 그리고 RF power가 증가할수록 바탕세기의 잡음(noise)도 감소하여 검출한계는 낮아진다고 보고하였다. 이때 잡음값은 플라즈마의 안정도와 비례하게 된다. 따라서 Boumans 등은 최소한의 RF power로서 1.1kW 이상을 추천하였다.

반면에 R. Rezaalyaan 등은¹³ low power의 ICP라

하더라도 최적의 작동조건을 선정함으로써 SBR값을 높이고 매트릭스 방해영향을 줄일 수 있다고 발표하였다. 그들이 사용한 low power-low flow ICP는 600W의 RF power이며, 냉각기체는 6l/min, 보조기체와 시료 운반기체는 각각 0.7l/min와 0.64l/min, 측정위치는 유도코일로부터 12mm이다. 이들은 14개의 스펙트럼선을 선정하여 1.5kW와 0.6kW에서 SBR과 검출한계를 측정하였는데, 0.6kW를 사용할 때 14개의 스펙트럼선 중 6개의 스펙트럼선에서 SBR이 크고 7개의 스펙트럼선에서 검출한계가 낮아 low power ICP의 분석 이용 가능성을 예측하였다.

이상에서 본 바와 같이 low-power ICP에서의 분석적 특징은 발표자에 따라 차이를 보이고 있는데, 이는 검출한계와 SBR이 측정위치와 시료운반기체의 사용량에 따라 차이가 있으며 또한 분석에 이용하는 스펙트럼선의 들뜸에너지와 이온화에너지에 크게 영향을 받기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 RF power를 0.6~1.2kW까지 변화시키면서 최적의 분석조건을 선정하고 low power ICP의 분석적 특성에 대해 조사하였다.

2. 실험

2.1. 기기

본 연구에서 사용한 ICP 분광기는 Baird Model 2070(40MHz)이다. 플라즈마 토오치는 Fassel형으로서 외각관, 중간관, 중심관의 내부 직경은 각각 18, 14, 2.0mm이다. 스펙트럼선의 관측위치는 유도코일들의 상단으로부터 측정하였다.

안정된 플라즈마를 유지하기 위하여 RF power가 600W인 경우 보조기체와 냉각기체 사용량을 각각 1.0, 7.5l/min로 사용하였으며, RF power를 증가시킬 때 냉각기체의 사용량도 상대적으로 증가시켰다. 그밖에 기기의 제원과 작동조건은 Table 1과 같다.

2.2. 스펙트럼선의 선정

실험에 이용한 원소는 calcium, magnesium, barium, manganese, zinc, cadmium의 6개 원소로서 각각의 원자선과 이온선을 하나씩 선택하였다. 각 스펙트럼선의 파장과 들뜸에너지, 그리고 이온화에너지는 Table 2와 같다.

Table 1. Specification and operation conditions for ICP-AES

Spectrometer	Baird ICP-2070 (Czerny-Turner Type) 750mm Focal Length 1800 Grooves / mm
R. F. Generator	2.5kW, 40.68MHz (Water-cooled 3-turn load coil)
R. F. power	600~1200 W
Coolant Gas Flow Rate	7.5~10 l/min
Carrier Gas Flow Rate	0.5~1 l/min
Auxiliary Gas Flow Rate	0.75~1 l/min
Nebulizer	Concentric Nebulizer
Spray Chamber	Scott-Type double-pass
Plasma Torch	3-Concentric one-piece quartz
Integration time	20/100 sec
Dispersion	0.2nm/mm(second order)
PMT Voltage	1 kV

Table 2. Selected wavelengths(nm) and their excitation and ionization energies(eV).

Element	Wavelength (nm)	Excitation Energy	Ionization Energy	Total Energy
Ba I	553.5	2.24	5.212	7.93
Ba II	455.4	2.72		
Ca I	422.7	2.396	6.111	9.27
Ca II	393.6	3.152		
Mg I	285.2	4.436	7.646	12.08
Mg II	279.5	4.43		
Mn I	279.5	3.072	7.435	12.25
Mn II	257.6	4.81		
Cd I	228.8	5.42	8.991	14.46
Cd II	226.5	5.47		
Zn I	213.9	5.80	9.394	15.40
Zn II	202.5	6.13		

2.3. SBR, 검출한계의 측정

스펙트럼의 측정시 Table 1에서의 작동조건에서 RF power, 운반기체의 flow rate, 측정높이 중 2개를 고정

하고 하나씩 변화시키면서 스펙트럼선의 세기를 측정하였다. 바탕세기는 1차 증류 후 이온교환수지와 활성탄을 반복 통과한 16M ohm 이상의 탈이온수를 분무하여 측정하고 스펙트럼선과 바탕세기의 비(SBR)를 계산하였다. 검출한계는 각 원소의 0.1ppm 농도와 탈이온수를 분무하고 SBR과 바탕세기의 표준편차로부터 계산하였다.

2.4. Matrix Effect 측정

이온화 방해영향을 보기 위하여 이온화에너지가 낮은 potassium을 매트릭스로 선정하였다. 본 실험에서는 power와 시료운반기체의 유속을 변화시킬 때 100ppm의 K가 1ppm Ca의 스펙트럼선에 미치는 영향을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. power 변화와 시료운반기체의 유속변화에 따른 알짜세기와 SBR의 변화

스펙트럼선의 관측위치와 운반기체의 유량을 고정시키고 power를 600W~1200W로 증가시킬 때 Ca 원자선의 세기는 크게 증가하였다. 그리고 관측 위치와 power를 고정시키고 시료운반기체의 사용량을 0.5에서 1.0 l/min으로 증가시킬 때 알짜세기는 2~6배까지 증가하였다. 따라서 원자선의 알짜세기는 low power-low flow ICP에서는 감소하는 것을 알 수 있다.¹⁴

시료운반기체의 유속을 변화시키면 알짜세기는 크게 두 가지 원인에 의해 영향을 받는다. 첫째는 시료운반기체의 유속을 증가시킬 때 에어로졸의 크기가 작아지기 때문에 시료와 플라즈마 내에 주입되는 양이 증가하여 알짜세기가 증가하는 현상이다. 둘째는 시료운반기체의 유속증가로 분석원소의 들뜸조건과 관측위치가 달라지게 되므로 알짜세기가 변하는 현상이다. 본 연구에서는 두 가지 영향을 모두 고려하였기 때문에 두 현상을 분리하여 보기 위한 실험을 수행하지 않았다.

관측위치 9mm에서 시료운반기체의 사용량을 변화시킬 때 5ppm Ca 원자선의 스펙트럼선과 바탕세기의 비(SBR) 변화를 보면 Fig. 1과 같다. Power에 관계없이 시료운반기체의 사용량을 증가시키면 SBR값은 증가하게 된다. 반면에 일정한 시료운반기체를 사용할 때 power에 따른 SBR값은 600W에서 가장 큰 SBR값을

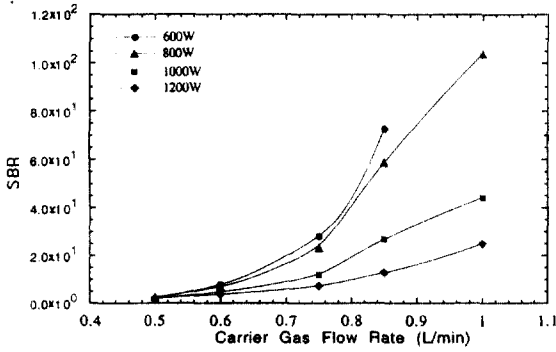


Fig. 1. SBR as a Function of Carrier Gas Flow Rates at Several Powers.

(Observation Height : 9mm, Ca I 422.673nm)

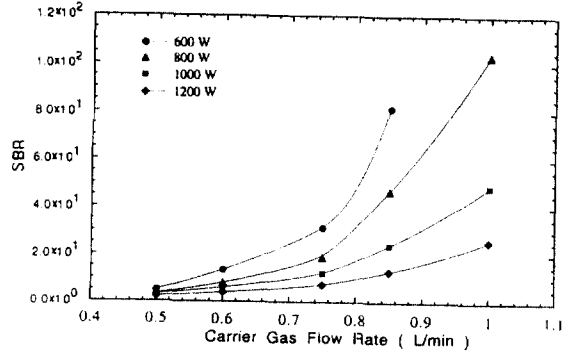


Fig. 3. SBR as a Function of Carrier Gas Flow Rates at Several Powers.

(Observation Height : 13mm, Ca I 422.673nm)

갖는다. Ca 원자선의 알짜세기는 power가 증가할수록 증가하는데 반하여 SBR값은 power에 따라 감소하는데, 이는 바탕세기가 power에 따라 증가하기 때문이며, 이와 같은 현상은 Boumans의 결과¹²와 일치하였다. 본 실험에서 600W의 RF power를 사용할 때 시료운반기체의 사용량이 1.0l/min에서는 플라즈마가 불안정하여 0.85l/min까지만 SBR을 측정하였다.

관측위치 11mm와 13mm에서의 SBR값을 Fig. 2~Fig. 3에 도시하였다. 이들 높이에서의 SBR값은 관측위치 6mm에서 power가 감소할수록 커지는 것을 볼 수 있었으며, 관측위치에 따라 SBR값도 크게 변화하지 않았다. 위와 같은 실험조건에서 Ca 이온선의 알짜세기를 보면 Ca 원자선에 비해 스펙트럼선의 세기가 약 10배 정도 크다. 이는 ICP의 보통의 분석(normal

analytical zone) 온도에서는 Ca 원자들은 이온상태로 더 많이 존재하는 것을 말해 준다. 또한 운반기체의 사용량을 증가시키면 Ca 원자선에서와 같이 power에 관계없이 알짜세기가 증가하고 운반기체의 사용량을 고정시켰을 때 power에 따른 변화를 보면 power를 증가시키기에 따라 알짜세기도 크게 증가한다.

5ppm Ca 이온선의 SBR값은 Fig. 4~Fig. 6에 도시하였다. 먼저 Ca 원자선과 Ca 이온선의 SBR값을 비교해 보면 이온선의 SBR값이 원자선에 비해 약 20배 정도 크다. 관측위치가 9mm인 Fig. 4를 보면 SBR값은 시료운반기체의 사용량을 증가시킬수록 증가한다. 반면에 일정한 시료운반기체를 사용할 때 power에 따른 변화는 Ca 원자선과 달리 power 증가에 따라 일정하게 변화하지 않는다. 시료운반기체의 사용량이 적은 경

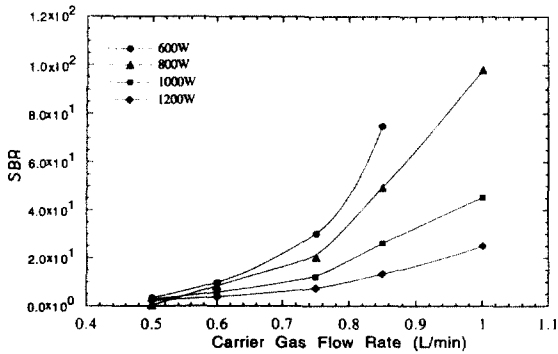


Fig. 2. SBR as a Function of Carrier Gas Flow Rates at Several Powers.

(Observation Height : 11mm, Ca I 422.673nm)

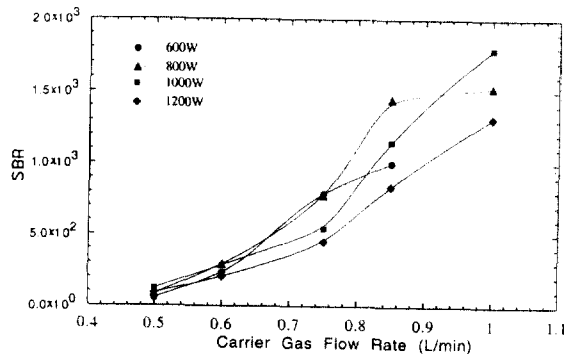


Fig. 4. SBR as a Function of Carrier Gas Flow Rates at Several Powers.

(Observation Height : 9mm, Ca II 393.366nm)

우인 0.5~0.6l/min에서는 power의 변화에 큰 영향이 없었으며, 0.85l/min에서는 800W에서, 1.0l/min에서는 1000W에서 SBR값이 큰 것을 볼 수 있었다.

관측위치 11mm(Fig. 5)와 13mm(Fig. 6)에서 측정된 Ca 이온선의 SBR값을 보면 SBR값이 9mm보다는 조금 증가하였으나 power와 시료운반기체의 사용량에 따른 변화는 거의 유사하였다. 시료운반기체의 사용량이 증가할수록 SBR값은 증가하고 운반기체의 사용량이 0.85l/min일 때는 800W에서와 1.0l/min에서는 1000W에서 SBR값이 가장 컸다. Ca 이온선의 경우에서도 알짜세기는 power가 증가할수록 증가하는데 반하여 SBR값이 오히려 감소하는 이유는 바탕세기가 power에 따라 증가하기 때문이다.

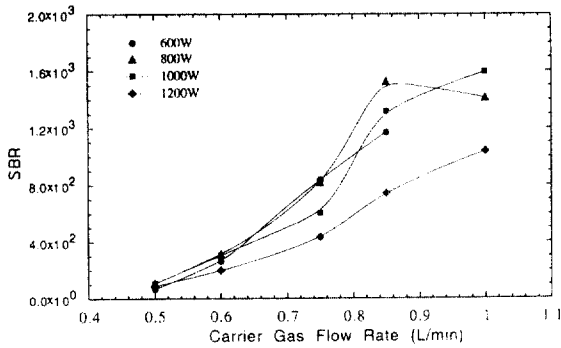


Fig. 5. SBR as a Function of Carrier Gas Flow Rates at Several Powers.

(Observation Height : 11mm, Ca II 393.366nm)

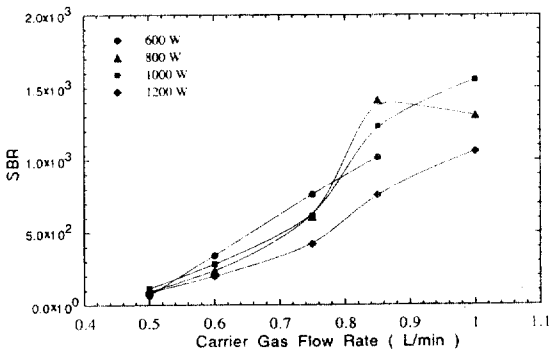


Fig. 6. SBR as a Function of Carrier Gas Flow Rates at Several Powers.

(Observation Height : 13mm, Ca II 393.366nm)

3.2. Matrix Effect

본 연구에서는 RF power, 시료운반기체의 유출량, 그리고 측정높이의 변화에 따른 Ca 원자선과 이온선의 이온화 방해영향을 고찰하였다. 따라서 본 실험에서는 매트릭스 영향을 크게 보기 위하여 이온화에너지가 낮은 알칼리 금속 중 potassium을 매트릭스의 원소로 선정하였으며, 매트릭스의 농도는 100ppm으로서 분석 원소 1ppm의 100배를 사용하였다.

3.1의 실험 결과를 보면 알짜세기와 SBR값은 Ca 원자선과 이온선에 관계없이 RF power와 시료운반기체의 사용량에 큰 영향을 받으며 관측위치에는 영향을 적게 받는다. 따라서 본 실험에서는 관측위치를 원자선의 경우는 11mm로, 이온선의 경우는 13mm로 고정시키고 각각의 power에서 시료운반기체의 사용량에 따른 이온화 방해영향을 관찰하였다. Fig. 7의 Ca 원자선을 보면 600W의 RF power의 경우에 시료운반기체의 사용량이 증가할수록 방해영향이 증가하는 것을 볼 수 있다. 시료운반기체의 사용량이 0.5l/min일 때의 방해영향을 보면 방해원소가 존재할 때 스펙트럼선의 세기가 약 12% 정도 감소하였는데, 0.75l/min일 때는 약 50%까지 감소하였다. 또한 power가 600W일 때 매트릭스가 존재하면 시료운반기체의 사용량을 증가시킬 때 플라즈마가 매우 불안정해졌다. 따라서 600W에서는 시료운반기체의 사용량을 0.75l/min까지로 제한하였다.

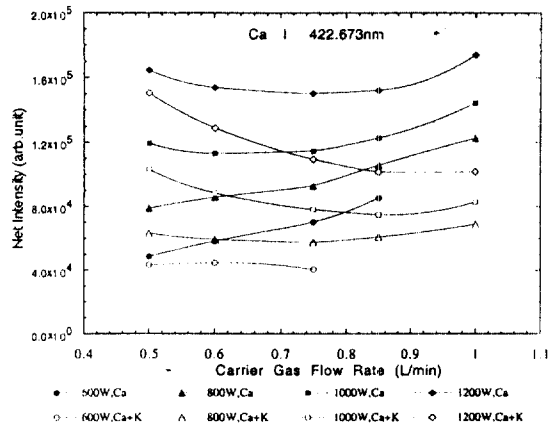


Fig. 7. Matrix Effects as a Function of Carrier Gas at Several Powers.

Ca 원자선의 이온화 방해영향은 power가 증가하여도 같은 현상을 보여 준다. 즉 시료운반기체의 사용량이 증가할수록 방해영향이 증가한다.¹⁵ 또한 일정한 시료운반기체를 사용할 때 power에 따른 방해영향은 크게 변하지 않았다. 시료운반기체의 사용량을 0.5 l/min로 고정하고 power를 1000W까지 증가시킬 때 매트릭스에 의한 방해영향은 20% 이내로 비교적 작았으며 1 l/min인 경우는 약 50% 정도로 증가하였다. 본 실험에서 600W의 RF power에서 매트릭스용액을 분무할 때는 플라즈마가 불안정하여 시료운반기체의 사용량을 0.75 l/min까지만 측정하였다.

Ca 이온선의 이온화 방해영향은 Fig. 8과 같다. Ca 이온선의 경우도 원자선과 마찬가지로 이온화 방해영향은 시료운반기체의 유출량이 증가하여도 절대적인 세기는 크게 증가하나 상대세기의 비는 큰 변화가 없다. 특히, Ca 원자선의 경우 낮은 RF power에서 매트릭스에 의한 방해영향이 10~20%인 것에 비해 Ca 이온선의 경우는 이온화 방해영향의 비가 이보다 훨씬 컸으며 오히려 1000W의 경우는 1 l/min의 시료운반기체를 사용할 때 이온화 방해영향의 비가 가장 작았다.

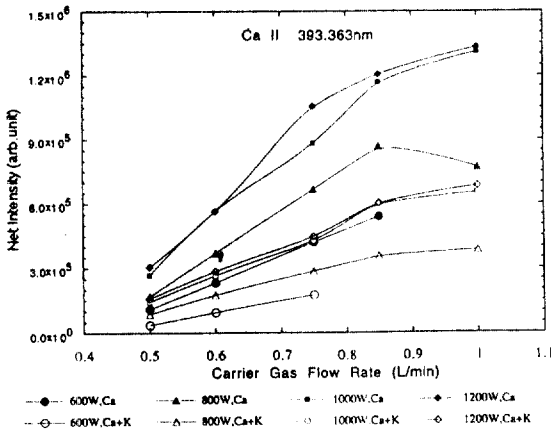


Fig. 8. Matrix Effects as a Function of Carrier Gas at Several Powers.

3.3. 검출한계

ICP에서의 검출한계는 시료용액의 분무량에 크게 좌우되지만 일정한 실험조건에서는 바탕세기의 표준 편차와 알짜세기 또는 SBR에 큰 영향을 받는다. 스펙

트럼선의 알짜세기는 원자선의 경우에 시료운반기체의 사용량에 가장 큰 영향을 받으며 시료운반기체의 사용량이 증가할수록 알짜세기도 크게 증가하였다. 또한 앞에서 관찰한 이온화 방해영향도 시료운반기체의 사용량이 증가하면 상대적으로 증가한다. 따라서 본 연구에서는 알짜세기의 증가와 방해영향을 고려하여 다음과 같은 절충조건에서 검출한계를 측정하였다.

RF power	시료운반기체유량	측정높이	냉각기체유량
600W	0.6 l/min	11mm	7.5 l/min
800W	0.85 l/min	11mm	8.0 l/min
1000W	0.85 l/min	13mm	9.5 l/min
1200W	0.85 l/min	13mm	12.0 l/min

600W에서 1200W까지 power 변화에 따라 측정된 검출한계는 Table 3과 같다. Table 3에서 보는 바와 같이 스펙트럼선이 원자선인 경우는 주로 낮은 power (600~800W)에서 낮은 검출한계를 갖는다. 들뜸 에너지가 가장 낮은 Ba의 원자선(2.24eV)에서는 600W에서 검출한계가 7.3ppb로 가장 낮으며, Ca(2.40eV), Mg(4.44eV), Mn(3.07eV), Cd(5.42eV)의 원자선에서는 800W에서 가장 검출한계가 낮다.

Table 3. Detection limits(ppb) observed at various powers

Element	600 W	800 W	1000 W	1200 W
Ba I	7.2	31	15.6	10.79
Ba II	0.15	0.13	0.13	0.11
Ca I	8.2	0.99	1.90	2.77
Ca II	0.23	0.055	0.057	0.074
Mg I	2.5	0.46	0.76	0.71
Mg II	0.23	0.10	0.06	0.07
Mn I	13.7	1.8	2.56	6.55
Mn II	0.87	0.43	0.27	0.22
Cd I	34	1.6	1.63	1.89
Cd II	55	0.48	0.52	0.55
Zn I	14.3	4.8	2.82	3.82
Zn II	19.2	4.1	1.13	1.88

이온선의 검출한계는 원자선들에 비해 높은 power에서 가장 낮은 검출한계를 갖는다. Mg, Zn의 이온선

은 1000W에서 가장 검출한계가 낮으며, Ca, Cd, Ba, Mn 등은 800W 또는 1200W에서 가장 검출한계가 낮았으나 1000W에서의 검출한계와 크게 차이가 나지 않았다.

또한 원자선과 이온선들의 검출한계를 비교하면 Ba와 Ca 등과 같이 원자선의 이온화에너지가 작은 원소들은 이온선의 검출한계가 상대적으로 크게 낮은 것을 볼 수 있다. Ba의 원자선과 이온선의 검출한계를 비교하면 600W의 경우에 각각 7.2ppm과 0.15ppm으로서 약 48배까지 차이가 났다. 이는 높은 온도의 플라즈마에는 이온화에너지가 낮은 원소들은 대부분 이온으로 존재한다는 것을 알 수 있다. 반면에 Zn과 같이 이온화에너지가 높은(7.65eV) 원자의 경우에는 원자선과 이온선의 검출한계에 큰 차이가 없었다.

실제로 ICP 분광분석법에서 사용되는 스펙트럼을 보면 대부분 이온선이나 또는 들뜸 에너지가 높은 원자선을 선택한다. 따라서 이와 같은 선을 선택할 때 검출한계를 고려하면 낮은 power보다는 높은 power를 선택하는 것이 좋다고 할 수 있다. 그러나 중간세기의 power를 사용하면 15l/min의 냉각기체를 사용해야 하고, 본 연구에서 보면 0.8~1.2kW 사이에서 검출한계가 크게 낮아지지 않은 것을 고려하면 low power의 사용도 신중히 고려될 수 있다고 판단된다.

3.4. 검량선의 비교

Ca의 농도를 0.001ppm에서 1000ppm까지 변화시킬 때 검량선을 비교하였다. Ca 원자선(422.7nm)에서 power에 따른 직선성을 보면 600W에서 $10^3 \sim 10^4$ 의 직선성을 가지며, 800W, 1000W, 1200W로 power를 증가시켜도 약 10^4 의 직선성을 가져 크게 변하지 않았다. 또한 Ca 이온선에서는 600W의 경우는 $10^4 \sim 10^5$ 의 직선성을 가지며 power를 증가시켜도 직선성은 거의 변화하지 않았다. 따라서 ICP에서의 검량선은 원자선이나 이온선의 검량곡선이 모두 직선성이 우수하지만 이온선의 직선성이 더 우수한 것을 볼 수 있다. 일반적으로 사용되는 1.2kW 이상의 ICP에서 10^4 의 직선성을 갖는다고 보고되어 있으나, 본 연구에서는 600W~1200W까지 검량선의 직선성이 큰 변화가 없는 것으로 보아 low power ICP에서도 검량선의 직선성이 좋다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 RF power를 0.6~1.2kW까지 변화시키면서 각 power에서의 최적의 분석조건을 선정하고 low power ICP의 분석적 특성에 대해 연구하였다.

SBR과 알짜세기는 시료운반기체의 양이 클수록 증가하고 power가 증가하면 알짜세기는 증가하지만 SBR은 감소하였다. 또한 매트릭스 영향은 시료운반기체의 사용량이 증가할수록 커지므로 본 실험에서는 최적 조건을 선정하였다. 이 조건에서 각 power별 검출한계를 측정된 결과 대부분의 원소에서 원자선의 경우는 800W에서, 이온선은 800~1200W에서 검출한계가 가장 작다. 600W에서 1200W까지의 검량선의 직선성을 본 결과 power에 관계없이 원자선은 10^4 , 이온선의 경우에는 $10^4 \sim 10^5$ 의 직선성을 갖는다.

참고문헌

1. R. H. Wendt and V. A. Fassel, *Anal. Chem.*, **37**, 920(1965).
2. T. B. Reed, *J. Appl. Physics*, **32**, 821(1961).
3. B. Capelle, J. E. Meret and J. Robin, *Appl. Spectrosc.*, **36**, 2(1982).
4. M. W. Blades and G. Horlick, *Spectrochim. Acta.*, **37B**, 861(1981).
5. A. Montaser, V. A. Fassel and J. Zalewski, *Appl. Spectrosc.*, **35**, 292(1981).
6. G. A. Meyer and M. D. Thompson, *Spectrochim. Acta.*, **37B**, 369(1982).
7. J. L. Genna, R. M. Barnes and L. D. Allemand, *Anal. Chem.*, **49**, 1450(1977).
8. G. R. Kornblum, W. Van der waa and L. de Galan, *Anal. Chem.*, **51**, 2378(1979).
9. H. Kawaguchi, T. Ito, S. Rubi and A. Mizuike, *Anal. Chem.*, **52**, 2440(1980).
10. R. Rezaalyaan, G. M. Hiefje, H. Anderson, H. Kaiser and B. Meddings, *Appl. Spectrosc.*, **36**, 627(1982).
11. R. Rezaalyaan and G. M. Hiefje, paper presented at 9th FACSS meeting, Philadelphia, PA. Sept, 1982, Abstract 182.
12. P. W. J. M. Boumans and F. J. de Boer, *Spectrochim. Acta.*, **32B**, 365(1977).

13. R. Rezaalyaan and G. M. Hiefje, *Anal. Chem.*, **57**, 412(1985).
14. M. W. Blades and G. Horlick, *Spectrochim. Acta.*, **36B**, 861(1981).
15. M. W. Blades and G. Horlick *Spectrochim. Acta.*, **36B**, 881(1981).