

## 음료용 이산화탄소 순도 분석

Thermo Scientific™ MAX-Bev™ 이산화탄소 순도 모니터링 시스템은 이산화탄소 가스에 녹아 있는 미량의 불순물을 한 자릿수 ppb 단위로 측정하고 절대 순도까지 측정할 수 있는 통합형 솔루션입니다.

이 시스템은 산소를 제외한 모든 관련 성분 분석을 수행할 수 있는 Thermo Scientific™ MAX-iR™ FTIR 가스 분석기가 사용되며, 분석기에는 스펙트럼 범위가 600~5,000cm<sup>-1</sup>인 중수소화 트리글리신 황산염(DTGS) 열 디텍터가 설치되어 있습니다.

MAX-Bev™ 시스템은 넓은 가용 범위 덕분에 모든 적외선 활성 불순물을 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 번거로운 습식 방법(Zahn-Nagel식 순도 검사 등)을 사용하지 않고도 이산화탄소의 절대 순도를 직접 측정할 수 있게 도와 줍니다.

또한, MAX-Bev™ 이산화탄소 순도 모니터링 시스템은 놀라울 만큼 정밀한 압력과 온도 제어 기능을 활용하여 미량 불순물과 함께 100 ±0.02% 수준의 이산화탄소를 동시에 측정할 수 있습니다.

### 황 불순물 측정

MAX-Bev™ 이산화탄소 순도 모니터링 시스템의 산화 모듈은 모든 환원된 황화합물을 이산화황(SO<sub>2</sub>)으로 변환한 후, MAX-iR 가스 분석기로 측정하여 이산화탄소의 총 황 불순물 수준을 확인하는데, 이 방식은 유지 관리 문제가 있으며 다운타임이 길어지기 쉬운 업계 표준 자외선 형광 분석기에 비해 신뢰도가 더 높습니다.

### MAX-Acquisition 소프트웨어

MAX-Bev 이산화탄소 순도 모니터링 시스템은 데이터 수집 및 분석의 모든 부분을 완벽히 제어하고, 시스템 진단 및 경보를 보고하거나, 분석 인증서(CoA), 기록 보고서 등을 작성/인쇄할 수 있는 Thermo Scientific™ MAX-Acquisition™ 소프트웨어를 통해 제어됩니다.

MAX-Bev 이산화탄소 순도 모니터링 시스템의 성능이 관련 국제음료기술자협회(ISBT) 및 유럽산업가스협회(EIGA) 표준(이산화탄소의 주요 불순물 측정에 대한 표준)을 충족하는 지는 아래 분석 내용을 통해 확인하시기 바랍니다.

가스	단위	경보 하한 임계값	경보 상한 임계값	검출 한계
이산화탄소	%	99.9	100.02	해당 없음
산소	ppm	해당 없음	30	1
수분	ppm	해당 없음	20	1
암모니아	ppm	해당 없음	2.5	0.01
산화질소	ppm	해당 없음	2.5	0.075
이산화질소	ppm	해당 없음	2.5	0.025
총 탄화수소	ppm	해당 없음	50	0.100
총 비메탄 탄화수소	ppm	해당 없음	20	0.100
아세트알데히드	ppb	해당 없음	200	5
일산화탄소	ppm	해당 없음	10	0.12
총 방향족 탄화수소(벤젠)	ppb	해당 없음	20	5
총 황	ppb	해당 없음	100	10

표 1. 음료용 이산화탄소 성분을 대상으로 하는 일반적인 MAX-Bev 측정 표준

### 사용 원료/소재

아래 표에는 본 연구에 사용된 인증 표준(표준 가스)이 정리되어 있습니다. 필요한 가스는 미국 국립표준기술연구소 (NIST)가 마련한 '추적 가능한 교정 표준' 및/또는 NIST '가스 혼합물 참조 자료'와의 직접 비교를 통해 가스 제조사에서 검증됩니다.

이산화탄소의 절대 순도를 측정하는 데에는 표준 가스에 연구용 이산화탄소를 희석한 혼합물이 사용되었습니다. MAX-iR FTIR 가스 분석기의 경우, 사용하기에 앞서 이산화탄소 농도를 측정할 때, 결과값의 정확도 및 선형성을 개선하기 위해 초고순도(UHP) 질소를 이용한 제로 교정이 선행되었습니다.

실린더 ID	유효 기간	가스	인증 농도 (ppm)	분석 편차
433	10 October 2024	메탄	497	±2%
CC491546	3 August 2021	벤젠	0.99	±10%
CC503203	18 June 2021	아세트알데히드	1018	±2%
CC49300	2 July 2021	수분	103.4	±2%
CC436690	12 June 2021	암모니아	494.5	±2%
CC74236	5 June 2028	산화질소	505.0	±2%
CC178342	16 June 2023	이산화질소	535.4	±2%
CC434562	22 December 2024	일산화탄소	511.1	±2%
D526338	21 October 2022	프로판	299.7	±2%
		벤젠	9.991	±5%
		황화 카보닐	5.46	±5%
초순수 에어	해당 없음	산소	21.5%	±2%

표 2. 표준 가스 실린더 정보

가스	단위	평균	LOD (3σ)	기준	적합여부
이산화탄소		% 1.00	해당 없음	해당 없음	해당 없음
산소	ppm	0.06	0.06	< 1	적합
수분	ppm	-0.28	0.84	< 1	적합
암모니아	ppm	-0.01	0.00	< 0.01	적합
산화질소	ppm	-0.04	0.01	< 0.075	적합
이산화질소	ppm	-0.01	0.00	< 0.025	적합
총 탄화수소	ppm	0.07	0.01	< 0.1	적합
총 비메탄 탄화수소(C1)	ppm	0.07	0.01	< 0.1	적합
아세트알데히드	ppb	-15.38	2.07	< 5	적합
일산화탄소	ppm	-0.05	0.06	< 0.12	적합
총 방향족 탄화수소 (벤젠)	ppb	0.53	2.74	< 5	적합
총 황	ppb	5.75	6.49	< 10	적합

표 3. 불순물 LOD 결과

### 실험 절차 및 결과

#### 불순물 검출 한계

해당 평가는 일반적인 가스 혼합물에서 기준 이상 검출되는 불순물의 최소량을 보여줍니다. MAX-Bev 이산화탄소 순도 모니터링 시스템은 연구용 이산화탄소를 이용해 분석을 12회 연속 수행하였습니다. 각 불순물의 검출 한계(LOD)는 이러한 측정값의 표준 편차의 3배로 정의되었습니다.

오프셋이나 범위 계수는 적용되지 않았습니다. 아세트알데히드를 측정할 때 발생하는 음의 편향은 고순도 이산화탄소를 이용해 제로 교정할 수 있습니다.

### 이산화탄소 측정값의 정확성과 반복성

위 실험은 이산화탄소 절대 순도 측정값의 정확성과 반복성을 잘 보여주며, 실험을 수행하기 전 MAX-Bev 이산화탄소 순도 모니터링 시스템의 이산화탄소 반응은 연구용 이산화탄소 인증 농도(100%)로 고정되었습니다. 해당 과정은 기기 제어 소프트웨어를 통해 자동으로 정기적으로 수행할 수 있는 품질 보증 검사에 해당됩니다.

이산화탄소 측정값의 정확성과 반복성은 희석되지 않은 연구용 이산화탄소를 10 ~12회 연속 분석한 뒤, 백분율 오차의 경우, 각 실험 회차에 측정된 이산화탄소 농도와 예상되었던 이산화탄소 농도 간의 차이를 다시 예상 농도로 나누는 방식으로 구했습니다. 이산화탄소 농도의 상대 표준 편차(RSD)도 계산되었는데, 반복해 산출된 각 이산화탄소 값은 100±0.02% 수준으로, RSD는 <0.015%여야 유효한 것으로 인정되었습니다

### 반응 시간

기기가 불순물 농도 변화에 반응하는 데 걸리는 시간을 아는 것이 매우 중요합니다. 테스트에 사용된 표준 가스는 프로판, 황화카르보닐, 벤젠을 질소에 혼합한 것입니다. 이때, 황화카르보닐은 오븐에서 이산화황으로 변환되고 MAX-iR FTIR 가스 분석기로 측정되어 총 황화합물로 측정됩니다.

반응 시간을 평가하기 위해 연구용 이산화탄소를 MAX-Bev 이산화탄소 순도 모니터링 시스템에 주입한 다음, 레퍼런스 가스가 경보를 발령하는 상한 임계값을 초과하는 농도로 주입되었습니다. (임계값은 사용자가 원하는 값으로 설정 가능) 농도가 안정화되면(즉, 1% 이상 변하지 않음) 전체의 95% 수준까지 도달하는 데 필요한 시간(‘상승 시간’)을 기록하였습니다. 기록 후, 다시 연구용 이산화탄소가 주입되었으며 일단 농도가 안정화되면 전체의 5% 미만으로 떨어지는 데 필요한 시간(‘하강 시간’)을 기록하였습니다. 이때 기록한 상승 및 하강 시간은 모두 75초 미만이어야 합니다.

실험 반복	측정 농도	% 편차	기준	적합 여부
1	100.00%	0.00%	±0.02%	적합
2	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
3	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
4	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
5	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
6	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
7	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
8	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
9	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
10	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
11	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합
12	99.98%	-0.02%	±0.02%	적합

표 4. 이산화탄소 절대 순도 결과.

평균 이산화탄소	RSD	기준	적합 여부
99.98%	0.006%	< 0.015%	적합

표 5. 이산화탄소 반복 실험 결과

가스	타임스탬프 (hh:mm:ss)		상승 시간(초)	기준	적합 여부
	전체 스케일의 0%	전체 스케일의 >95%			
이산화탄소	10:15:46	10:16:54	69	75초 미만	적합
프로판	10:15:46	10:16:42	56	75초 미만	적합
벤젠	10:15:46	10:16:54	69	75초 미만	적합
이산화황	10:29:42	10:30:26	44	75초 미만	적합
가스	타임스탬프 (hh:mm:ss)		하강 시간(초)	기준	적합 여부
	전체 스케일의 100%	전체 스케일의 < 5%			
이산화탄소	10:18:49	10:19:51	62	75초 미만	적합
프로판	10:18:49	10:19:43	53	75초 미만	적합
벤젠	10:18:49	10:19:34	45	75초 미만	적합
이산화황	10:27:20	10:28:08	48	75초 미만	적합

표 6. 반응 시간 결과

**최대 허용 농도에 근접한 수준의 불순물을 측정할 때, 측정의 정확성, 선형성 및 정밀도**

해당 평가는 기기 제어 소프트웨어에서 불순물 측정의 정확성과 선형성을 보여주는 실험입니다. MAX-iR FTIR 가스 분석기는 모든 적외선 활성 불순물을 측정할 수 있으며, 산소는 ZR800 산소 분석기(Systech Illinois)로 측정됩니다. 더불어, 경보 상한 임계값 또는 최대 허용 농도에 근접한 농도에서도 정밀도가 평가되었습니다 (표 1).

표준 가스는 두 개의 질량 유량 제어기(MFC)를 사용하여 연구용 이산화탄소에 희석되었으며, MAX-iR FTIR 가스 분석기에 주입되었습니다. 총 황을 제외한 모든 불순물의 경우, 제로 가스를 포함한 7가지 표준 가스의 농도를 각각 3회 측정하였습니다(총 21회). 1~7회차는 농도를 오름차순으로 측정하였으며, 8~14회차는 내림차순으로 측정했고 15~21회차는 무작위로 측정을 실시하였습니다.

총 황 및 산소 정확도 및 선형성 연구 시에는 제로 가스를 포함한 5가지 표준 가스 농도를 반 무작위 순서로 4회 측정하여 동일한 농도가 연속해서 두 번 도입되지 않도록 주의하였습니다.

아울러, 유효한 정확도 평가를 위해 가장 낮은 불순물 농도 수준은 LOD의 2배 이상이었습니다. 총 탄화수소를 제외한 모든 불순물은 최고 수준이 경보를 유발하는 상한 임계값을 초과하도록 하였습니다(표 1). 또한, 총 탄화수소를 검증하기 위한 표준 가스로는 메탄이 사용되었습니다. 음료용 이산화탄소의 메탄 농도는 10ppm을 초과하지 않을 것으로 예상되므로 10ppm이 최대 값으로 설정되었습니다. 각 불순물의 목표 농도는 표 7에 정리되어 있습니다.

백분율 오차의 경우, 각 농도 수준에서 측정된 표준 가스의 농도와 예상되었던 농도 간의 차이를 다시 예상 농도로 나누는 방식으로 구했습니다. 선형성 평가를 위한 R<sup>2</sup>값은 예상 가스 농도와 실제 측정된 가스 농도를 그래프로 그려 산출되었습니다.

불순물	단위	레벨 0	레벨 1	레벨 2	레벨 3	레벨 4	레벨 5	레벨 6
총 탄화수소(C1)	ppm	0.00	0.54	1.07	2.54	4.92	7.55	10.14
총 방향족(벤젠)	ppb	0	10	17	25	34	43	50
아세트알데히드	ppb	0	41	83	206	413	619	825
수분	ppm	0.00	0.99	1.96	10.02	20.00	29.85	40.00
암모니아	ppm	0.00	0.27	0.53	1.33	2.53	3.45	5.03
산화질소	ppm	0.00	0.27	0.55	1.23	2.58	3.79	5.00
이산화질소	ppm	0.00	0.29	0.58	1.30	2.45	3.74	5.02
일산화탄소	ppm	0.00	1.10	2.06	4.92	10.02	15.19	20.44
총 황	ppb	0	44	102	146	248	해당 없음	해당 없음
산소	ppm	0.0	15.4	30.7	61.4	92.1	해당 없음	해당 없음

표 7. 표준 가스 타겟 농도

농도 수준	실험 반복	총 탄화수소 (C1)		
		목표 (ppm)	측정값 (ppm)	% 편차
0	1	0.00	0.00	~MDL
1	1	0.54	0.54	-2.73%
2	1	1.07	1.06	-0.98%
3	1	2.54	2.55	0.52%
4	1	4.92	4.98	1.19%
5	1	7.55	7.55	0.04%
6	1	10.14	9.99	-1.49%
6	2	10.14	9.98	-1.62%
5	2	7.55	7.55	0.11%
4	2	4.92	5.01	1.84%
3	2	2.54	2.56	0.97%
2	2	1.07	1.08	0.34%
1	2	0.54	0.52	-2.28%
0	2	0.00	0.02	~MDL
4	3	4.92	4.99	1.44%
2	3	1.07	1.07	-0.38%
5	3	7.55	7.53	-0.19%
1	3	0.54	0.52	-2.45%
6	3	10.14	9.94	-1.96%
0	3	0.00	0.02	~MDL

표 8. 총 탄화수소(C1) 정확도

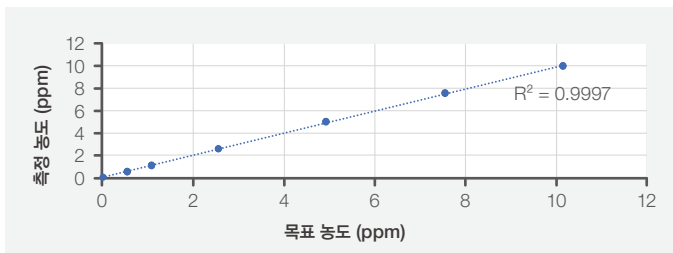


그림 1. 총 탄화수소(C1) 선형성

농도 수준	실험 반복	총 방향족 (벤젠)		
		목표 (ppb)	측정값 (ppb)	% 편차
0	1	0	0	~MDL
1	1	10	9	-6.43%
2	1	17	16	-4.24%
3	1	25	25	-1.13%
4	1	34	33	-2.69%
5	1	43	41	-2.72%
6	1	50	50	-0.16%
6	2	50	50	-0.96%
5	2	43	42	-1.18%
4	2	34	33	-1.65%
3	2	25	24	-3.16%
2	2	17	17	-0.18%
1	2	10	11	7.82%
0	2	0	0	~MDL
4	3	34	34	0.79%
1	3	10	10	4.12%
5	3	43	41	-2.45%
2	3	17	17	-1.67%
6	3	50	49	-2.17%
0	3	0	0	~MDL
	3	25	24	-4.02%

표 9. 총 방향족 탄화수소(벤젠) 정확도

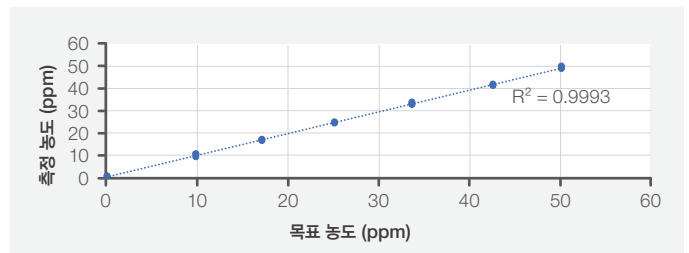


그림 2. 총 방향족 탄화수소(벤젠) 선형성

농도 수준	실험 반복	아세트알데히드		
		목표 (ppb)	측정값 (ppb)	% 편차
0	1	0	0	~MDL
1	1	41	40	-2.27%
2	1	83	89	8.42%
3	1	206	212	2.53%
4	1	413	423	2.45%
5	1	619	636	2.82%
6	1	825	847	2.65%
6	2	825	825	0.08%
5	2	619	623	0.65%
4	2	413	423	2.61%
3	2	206	213	3.16%
2	2	83	101	22.41%
1	2	41	45	8.17%
0	2	0	0	~MDL
4	3	413	426	3.19%
2	3	83	90	8.99%
5	3	619	634	2.48%
1	3	41	45	8.11%
6	3	825	832	0.87%
0	3	0	4	~MDL
3	3	206	217	5.33%

표 10. 아세트알데히드 정확도

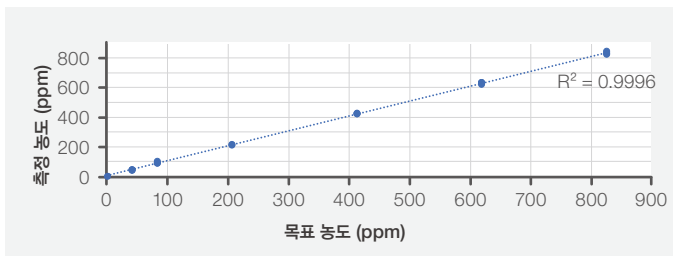


그림 3. 아세트알데히드 선형성

농도 수준	실험 반복	수분		
		목표 (ppm)	측정값 (ppm)	% 편차
0	1	0.00	0.00	~MDL
1	1	0.99	1.07	8.05%
2	1	1.96	1.88	-4.30%
3	1	10.02	9.69	-3.32%
4	1	20.00	19.50	-2.50%
5	1	29.85	29.05	-2.67%
6	1	40.00	39.32	-1.69%
6	2	40.00	39.31	-1.73%
5	2	29.85	29.61	-0.80%
4	2	20.00	19.88	-0.60%
3	2	10.02	10.23	2.05%
2	2	1.96	2.10	7.01%
1	2	0.99	0.96	-3.26%
0	2	0.00	0.00	~MDL
4	3	20.00	19.27	-3.65%
2	3	1.96	2.13	8.73%
5	3	29.85	28.82	-3.46%
1	3	0.99	1.11	12.28%
6	3	40.00	39.18	-2.06%
0	3	0.00	0.12	~MDL
3	3	10.02	10.02	0.04%

표 11. 수분 정확도

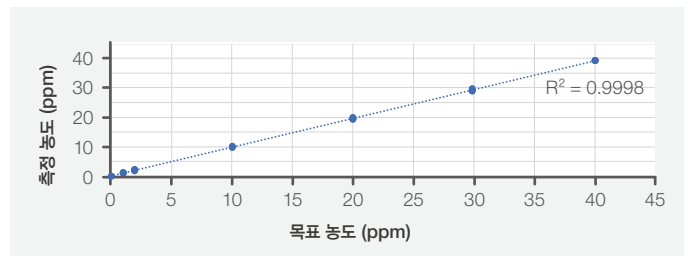


그림 4. 수분 선형성

농도 수준	실험 반복	암모니아		
		목표 (ppm)	측정값 (ppm)	% 편차
0	1	0.00	0.01	~MDL
1	1	0.27	0.23	-13.63%
2	1	0.53	0.50	-5.73%
3	1	1.33	1.30	-2.52%
4	1	2.53	2.51	-0.59%
5	1	3.45	3.45	-0.08%
6	1	5.03	5.05	0.42%
6	2	5.03	4.97	-1.14%
5	2	3.45	3.42	-0.77%
4	2	2.53	2.51	-0.64%
3	2	1.33	1.32	-1.01%
2	2	0.53	0.52	-2.71%
1	2	0.27	0.24	-9.71%
0	2	0.00	0.01	~MDL
4	3	2.53	2.53	0.15%
2	3	0.53	0.52	-1.96%
5	3	3.45	3.44	-0.17%
1	3	0.27	0.25	-6.38%
6	3	5.03	5.03	0.01%
0	3	0.00	0.02	~MDL
3	3	1.33	1.31	-1.96%

표 12. 암모니아 정확도

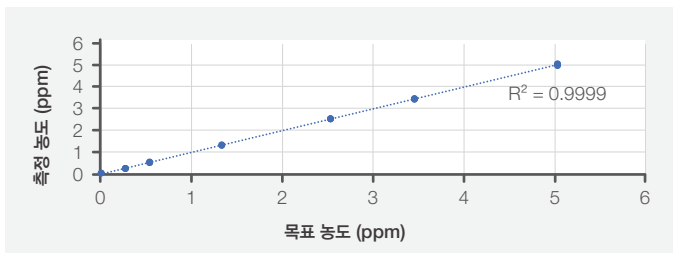


그림 5. 암모니아 선형성

농도 수준	실험 반복	산화질소		
		목표 (ppm)	측정값 (ppm)	% 편차
0	1	0.00	0.00	~MDL
1	1	0.27	0.25	-8.02%
2	1	0.55	0.49	-10.18%
3	1	1.23	1.17	-4.74%
4	1	2.58	2.45	-4.98%
5	1	3.79	3.71	-2.09%
6	1	5.00	4.99	-0.29%
6	2	5.00	4.93	-1.36%
5	2	3.79	3.72	-1.89%
4	2	2.58	2.53	-1.80%
3	2	1.23	1.20	-2.35%
2	2	0.55	0.53	-3.44%
1	2	0.27	0.26	-5.23%
0	2	0.00	0.01	~MDL
4	3	2.58	2.55	-1.09%
2	3	0.55	0.52	-3.98%
5	3	3.79	3.71	-2.12%
1	3	0.27	0.25	-8.28%
6	3	5.00	5.01	0.10%
0	3	0.00	0.02	~MDL
3	3	1.23	1.18	-3.38%

표 13. 산화질소 정확도

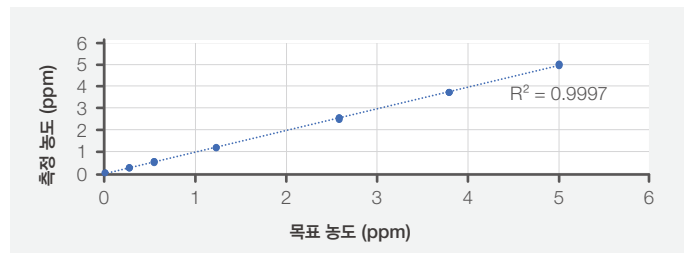


그림 6. 산화질소 선형성

농도 수준	실험 반복	이산화질소		
		목표 (ppm)	측정값 (ppm)	% 편차
0	1	0.00	0.01	~MDL
1	1	0.29	0.26	-11.47%
2	1	0.58	0.52	-9.31%
3	1	1.30	1.22	-5.73%
4	1	2.45	2.32	-5.34%
5	1	3.74	3.50	-6.33%
6	1	5.02	4.95	-1.37%
6	2	5.02	4.94	-1.52%
5	2	3.74	3.67	-1.79%
4	2	2.45	2.40	-2.01%
3	2	1.30	1.26	-2.94%
2	2	0.58	0.56	-3.56%
1	2	0.29	0.27	-5.21%
0	2	0.00	0.01	~MDL
4	3	2.45	2.41	-1.64%
2	3	0.58	0.56	-2.99%
5	3	3.74	3.68	-1.52%
1	3	0.29	0.28	-3.97%
6	3	5.02	4.92	-1.99%
0	3	0.00	0.01	~MDL
3	3	1.30	1.25	-3.45%

표 14. 이산화질소 정확도

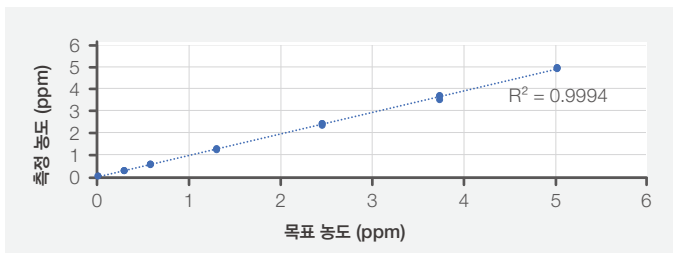


그림 7. 이산화질소 선형성

농도 수준	실험 반복	일산화탄소		
		목표 (ppm)	측정값 (ppm)	% 편차
0	1	0.00	0.06	~MDL
1	1	1.10	1.11	0.46%
2	1	2.06	2.03	-1.41%
3	1	4.92	4.80	-2.54%
4	1	10.02	9.69	-3.34%
5	1	15.19	14.69	-3.26%
6	1	20.44	19.82	-3.06%
6	2	20.44	19.82	-3.05%
5	2	15.19	14.79	-2.61%
4	2	10.02	9.78	-2.41%
3	2	4.92	4.85	-1.60%
2	2	2.06	2.01	-2.79%
1	2	1.10	1.09	-1.30%
0	2	0.00	0.05	~MDL
4	3	10.02	9.65	-3.73%
2	3	2.06	2.03	-1.43%
5	3	15.19	14.74	-2.95%
1	3	1.10	1.07	-3.28%
6	3	20.44	19.86	-2.85%
0	3	0.00	0.07	~MDL
3	3	4.92	4.83	-1.93%

표 15. 일산화탄소 정확도

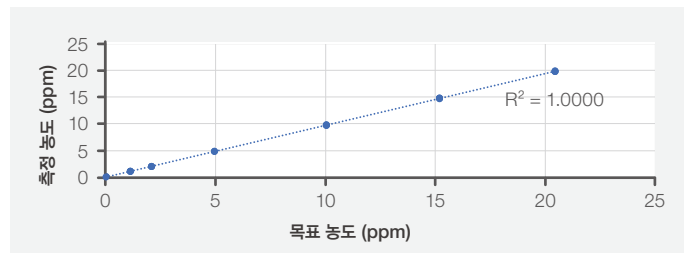


그림 8. 일산화탄소 선형성



농도 수준	실험 반복	총 황 (SO <sub>2</sub> )		
		목표 (ppb)	측정값 (ppb)	%편차
0	1	0	8	~MDL
2	1	102	99	-2.61%
4	1	248	270	9.20%
3	1	146	146	0.27%
1	1	44	50	15.16%
4	2	248	271	9.53%
1	2	44	47	7.90%
0	2	0	10	~MDL
3	2	146	157	7.75%
2	2	102	103	1.43%
3	3	146	142	-2.47%
0	3	0	10	~MDL
4	3	248	265	6.90%
2	3	102	108	5.92%
4	4	248	265	6.92%
1	3	44	42	-2.93%
3	4	146	156	7.26%
0	4	0	6	~MDL
2	4	102	104	2.11%
1	4	44	47	8.22%

표 16. 총 황 정확도

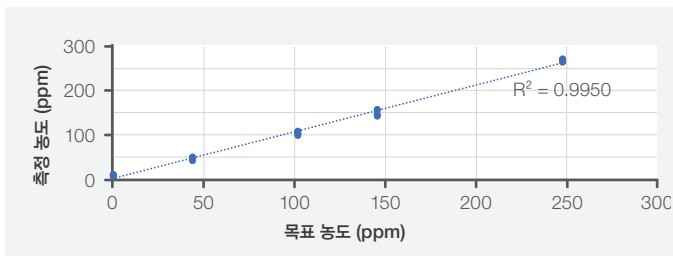


그림 9. 총 황 선형성

농도 수준	실험 반복	산소		
		목표 (ppm)	측정값 (ppm)	% 편차
4	1	92.1	95.4	3.57%
3	1	61.4	65.6	6.86%
1	1	15.4	16.5	7.25%
2	1	30.7	32.9	7.21%
0	1	0.0	0.0	~MDL
4	2	92.1	97.2	5.52%
1	2	15.4	16.6	8.35%
0	2	0.0	-0.3	~MDL
3	2	61.4	65.9	7.20%
2	2	30.7	33.4	8.87%
3	3	61.4	66.0	7.38%
0	3	0.0	0.0	~MDL
2	3	30.7	32.8	6.86%
4	3	92.1	94.4	2.47%
1	3	15.4	16.5	7.31%
2	4	30.7	32.1	4.61%
4	4	92.1	92.2	0.09%
1	4	15.4	16.7	8.48%
3	4	61.4	63.4	3.13%
0	4	0.0	0.0	~MDL

표 17. 산소 정확도

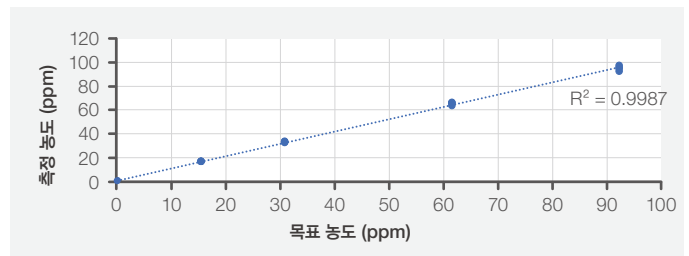


그림 10. 산소 선형성

정확도 및 선형성 연구에 대한 내용은 표 18에 요약되어 있습니다.

검사 대상으로 선정한 모든 불순물의 선형성(R<sup>2</sup>)은 >0.995였습니다. 평균 백분율 오차는 아세트알데히드를 제외한 모든 불순물에 대해 ±10% 이내였으며, 1회 반복 시(농도 수준 2, 반복 2)에는 오류가 22.41%로 이상치로 판정되었습니다. 단, 해당 결과는 나머지 농도 수준 2 반복 실험이 모두 목표 농도의 ±10% 내에 있었던 점을 감안하면 가스 혼합 오류로 인한 것일 가능성이 있습니다.

최대 허용 한계에 근접한 수준의 불순물을 측정했을 때 그 정확성과 정밀도를 평가하기 위해 한계에 가장 가까운 희석 수준에 대한 평균 오차 백분율과 RSD 또한 산출되었습니다 (표 19).

MAX-iR FTIR 가스 분석기로 측정된 모든 불순물에 대해 상한 임계값에 인접한 평균 백분율 오류는 ±4% 이내이거나 표준 가스의 분석 불확도와 유사했습니다. 아울러, 산소 정확도는 ±7% 이내였습니다. 모든 불순물에 대해 RSD는 4% 미만으로, MAX-Bev 이산화탄소 순도 모니터링 시스템의 경보를 유발하는 상한 임계값에 근접한 수준에서 탁월한 정밀도를 보여주었습니다.

가스	평균 백분율 오류						선형성 (R <sup>2</sup> )
	레벨 1	레벨 2	레벨 3	레벨 4	레벨 5	레벨 6	
총 탄화수소 (C1)	-1.80%	-0.34%	0.56%	1.49%	-0.01%	-1.69%	0.9997
총 방향족 (벤젠)	-0.09%	-2.03%	-2.77%	-1.18%	-2.12%	-1.10%	0.9993
아세트알데히드	4.67%	13.27%	3.67%	2.75%	1.98%	1.20%	0.9996
수분	5.69%	3.81%	-0.41%	-2.25%	-2.31%	-1.83%	0.9998
암모니아	-9.91%	-3.47%	-1.83%	-0.36%	-0.34%	-0.24%	0.9999
산화질소	-7.17%	-5.86%	-3.49%	-2.62%	-2.04%	-0.52%	0.9997
이산화질소	-6.88%	-5.28%	-4.04%	-2.99%	-3.22%	-1.63%	0.9994
일산화탄소	-1.37%	-1.88%	-2.02%	-3.16%	-2.94%	-2.99%	1.0000
총 황	7.09%	1.71%	3.20%	8.14%	N/A	N/A	0.9950
산소	7.85%	6.89%	6.14%	2.91%	N/A	N/A	0.9987

표 18. 정확도 및 선형성 결과 요약

가스	단위	최대 허용 농도	최대 허용 농도 근접치 성능			
			농도 수준	목표 농도	평균 백분율 오류	RSD
총 탄화수소 (C1)	ppm	50	레벨 6	10.14	-1.69%	0.25%
총 방향족 (벤젠)	ppb	20	레벨 2	17	-2.03%	2.10%
아세트알데히드	ppb	200	레벨 3	206	3.67%	1.42%
수분	ppm	20	레벨 4	20.00	-2.25%	1.58%
암모니아	ppm	2.5	레벨 4	2.53	-0.36%	0.44%
산화질소	ppm	2.5	레벨 4	2.58	-2.62%	2.13%
이산화질소	ppm	2.5	레벨 4	2.45	-2.99%	2.10%
일산화탄소	ppm	10	레벨 4	10.02	-3.16%	0.70%
총 황	ppb	100	레벨 2	102	1.71%	3.43%
산소	ppm	30	레벨 2	30.7	6.89%	1.64%

표 19. 최대 허용 농도 근접치의 정확도와 정밀도

더 자세한 정보는 [thermofisher.com/max-bev](http://thermofisher.com/max-bev) 에서 확인하세요

**thermo** scientific

Thermo Fisher Scientific 써모피셔사이언티픽코리아 주식회사

서울시 강남구 광평로 281 수서 오피스빌딩 10층, 06349 | 대표번호 : 1661-9555

연구 용도 전용. 진단 목적으로 사용 금지. 인증 현황 정보는 홈페이지([thermofisher.com/certifications](http://thermofisher.com/certifications))에서 확인하세요.

© 2023 Thermo Fisher Scientific Inc. 불허복제. 모든 상표는 별도 명시되어 있지 않는 한 Thermo Fisher Scientific과 그 자회사의 소유 자산입니다.

WP56379\_E 08/23M