

## 가스 크로마토그래피 - 질량분석기를 이용한 모발에서 암페타민형 각성제 약물의 동시 분석

김진영 · 서승일 · 고범준 · 이재일 · 정재철 · 서용준 · 인문교<sup>#</sup>  
대검찰청 마약감식실

(Received March 20, 2003; Revised May 6, 2003)

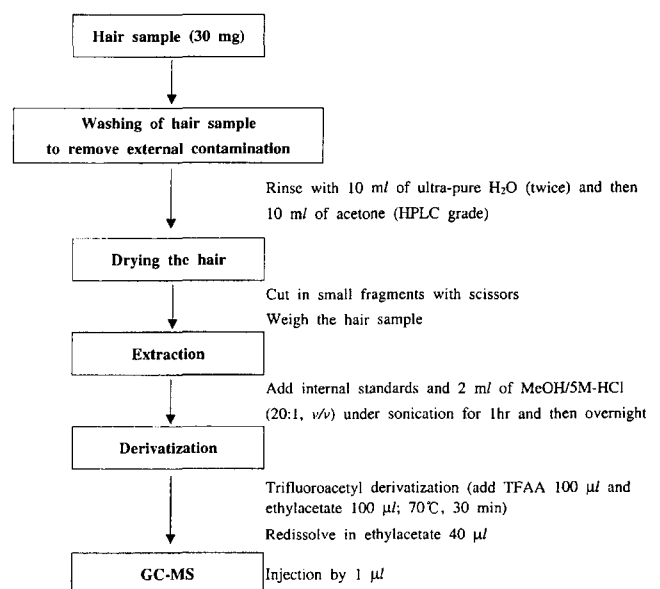
## Simultaneous Determination of Amphetamine-Type Stimulants (ATS) in Human Hair by GC-MS

Jin Young Kim, Sung Ill Suh, Beom Jun Ko, Jae Il Lee, Jae Chul Jeong, Yong Jun Suh and Moon Kyo In<sup>#</sup>  
Drug Analysis Laboratory, Supreme Public Prosecutor's Office, Seoul 137-730, Korea

**Abstract** — Gas chromatography-mass spectrometric (GC-MS) procedure is presented for the simultaneous qualification and quantitation of methamphetamine (MA), amphetamine (AMP), 3,4-methylenedioxymethamphetamine (MDMA), 3,4-methylenedioxyamphetamine (MDA), and 3,4-methylenedioxyethylamphetamine (MDEA) in human hair. The method procedure involves decontamination of hair with distilled water and acetone, acidic hydrolysis, extraction in the presence of deuterated internal standards, and GC-MS analysis after derivatization with trifluoroacetic anhydride (TFAA) in ethylacetate. The limit of detection for 5 drugs were about 0.1~0.15 ng/mg using 30 mg hair sample. Coefficient variations of correlation ranged from 0.9941 to 0.9993. The recoveries of these drugs were found to be 93.4~104.4%. The concentrations of AMP, MA, MDA, and MDMA in abusers' hair samples were measured 0.17~2.88, 2.09~18.34, 0.24~3.83, and 3.10~22.81 ng/mg, respectively. The ratios of MA/AMP and MDMA/MDA ranged 5.67~49.57 and 4.78~54.31, respectively. This assay has been successfully utilized in the evaluation of the deposition of amphetamine-type stimulants (ATS) in human hair.

**Keywords** □ ATS, methamphetamine, amphetamine, MDMA, MDA, MDEA, hair, GC-MS

그동안 우리나라에서는 중추신경흥분 효과가 있는 각성제 마약으로 메스암페타민이 많이 남용되어 왔다. 하지만 최근에는 새로운 각성제인 3,4-methylenedioxymethamphetamine(MDMA) 성분의 남용이 확산되고 있다. MDMA는 아담(Adam) 또는 엑스터시(Ecstasy)라 부르기도 한다. MDMA와 methamphetamine (MA)은 각성 효과 뿐 아니라 화학 구조도 유사하다. MDMA는 저 용량에서는 행복감, 자신감, 사회성을 증가시키는 내인성촉감 유도(entactogen) 효과가 있어 MDMA가 테크노 댄스파티에서 남용되는 요인이 된다. MDMA는 지속적인 체온 상승, 탈수증, 흥분상태 지속 효과가 있기 때문에 MDMA 남용자는 이온 음료나 생수를 다량 마시는 특징을 나타낸다. 고용량에서는 환각효과와 더불어 흥분, 우울증, 빈맥, 혈압상승, 동공확대, 수면장애, 부정맥 등 독성이 나타나며 사망할 수도 있다. 장기간 반복 복용



Scheme 1 – Preparation procedures of hair sample for the analysis of amphetamine-type stimulants.

<sup>#</sup>본 논문에 관한 문의는 저자에게로  
(전화) 02-535-4173 (팩스) 02-535-4175  
(E-mail) inmk@sppo.go.kr

용은 간, 뇌, 신경에 심각한 손상을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup>

MDMA는 1970년대에 정신과 치료제로 사용되었으나, 남용이 시작된 것은 1980년대에 테크노 댄스파티 등에서 남용되면서부터이다. 이와 같이 남용이 확산됨에 따라 미국에서는 1985년에 마약류(Schedule I)로 지정되었다. 국내에서 MDMA 남용 사례는 1999년에 최초로 적발되었고, 2000년대에는 외국 유학생과 국내 거주 외국인들로부터 남용이 시작되어 일반인에게 급속히 남용이 확산되었다. MDMA의 남용이 급속히 확산된 이유 중 하나는 정제 형태로 경구복용하기 때문에 혈관주사에 의해 투여되는 메스암페타민보다 남용이 간편하고 남용 흔적이 남지 않기 때문이다. 하지만 다른 암페타민형 각성제와 마찬가지로 반복 투여 시에는 내성이 나타나는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup>

최근의 MDMA의 남용으로 인하여 MDMA 투여 여부를 확인할 감식기법 개발이 필요하게 되었다. 일반적으로 약물의 투여 여부는 스변이나 모발을 시료로 하여 분석 확인한다. 소변을 이용한 감식은 MDMA의 경우 복용 후 3~5일 경과하면 약물 성분이 모두 체외로 배설되기 때문에 약물을 복용한 경우라도 복용 여부를 확인하는 것이 불가능하다. 반면에 모발을 이용한 감식은 수개월 전에 복용한 사실도 확인할 가능하다. 또한 모발감식은 약물 남용 시기나 정도 등 약물 남용이력을 추정할 수도 있다.<sup>4,5)</sup>

이러한 장점 때문에 외국에서는 모발에서 amphetamine (AMP), MA, 3,4-methylenedioxyamphetamine(MDA), MDMA, 3,4-methylenedioxyethylamphetamine(MDEA), cocaine, heroine, opiate 성분 등의 남용 여부를 확인을 위해 모발감식이 많이 활용되고 있다.<sup>9-11)</sup> 특히 모발에서 MDMA 분석에 관한 논문은 1990년대 초부터 발표되기 시작하여 MDMA 유도체 약물들에 대한 연구가 지속적으로 보고 되고 있다.<sup>12-14)</sup> 국내의 경우 모발 분석의 대상 약물은 남용 빈도가 높은 MA 성분에 한정되어 왔다. 그러나 2000년 이후 MDMA의 남용 빈도가 급격히 증가함에 따라 당 연구실에서는 모발시료에 대한 MDMA 분석법을 개발하여 2001년부터 MDMA 남용 용의자의 복용 여부 확인에

활용하기 시작하였다.

본 연구에서는 지금까지 모발에서 분석되어 왔던 MA, AMP와 함께 최근 남용이 급증하는 MDMA와 유사 성분들인 MDA, MDEA를 포함한 5종의 각성제 성분의 남용 여부를 동시에 확인할 수 있는 분석법을 확립하였다.

**실험방법**

**시약**

Amphetamine, methamphetamine, 3,4-methylenedioxyamphetamine, 3,4-methylenedioxyethylamphetamine, 3,4-methylenedioxyethylamphetamine, <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-amphetamine(<sup>2</sup>H<sub>5</sub>-AMP), <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-methamphetamine(<sup>2</sup>H<sub>5</sub>-MA), <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-3,4-methylenedioxyamphetamine(<sup>2</sup>H<sub>5</sub>-MDA), <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-3,4-methylenedioxyethylamphetamine(<sup>2</sup>H<sub>5</sub>-MDEA)는 미국 Cerilliant사에서 구입하였다(Fig. 1).

추출과정에서 사용된 용매 및 시약은 특급시약으로 미국 Fisher Scientific사에서 구입하였고, 정제용 카트리지(fritted reservoir)와 유도체 시약으로 사용된 trifluoroacetic anhydride(TFAA)는 미국 Alltech사로부터 구입하였다. 그리고 표준용액은 각각의 표준물질에 methanol을 사용하여 1 µg/ml로 희석시켜 조제하였으며, 사용하기 전에는 -20°C에서 보관하였다.

**분석 조건**

본 실험에서 사용된 분석기기는 미국 Agilent Technologies사 6890 Gas Chromatograph에 연결된 5973 Mass Selective Detector를 사용하였다. 분리관은 DB-5MS(25 m×0.25 mm I.D., 0.25 mm film thickness, J&W Scientific, USA)를 사용하였으며, 분리관 온도는 90°C에서 3분간 유지시킨 후 15°C/min으로 240°C까지 승온시키고, 계속하여 상승 속도를 30°C/min으로 바꿔 300°C까지 승온시켜 2분간 유지하였다. 주입구와 검출기의 온도는 각각 250°C와 280°C로 설정하였다. 운반기체 헬륨의 유속은

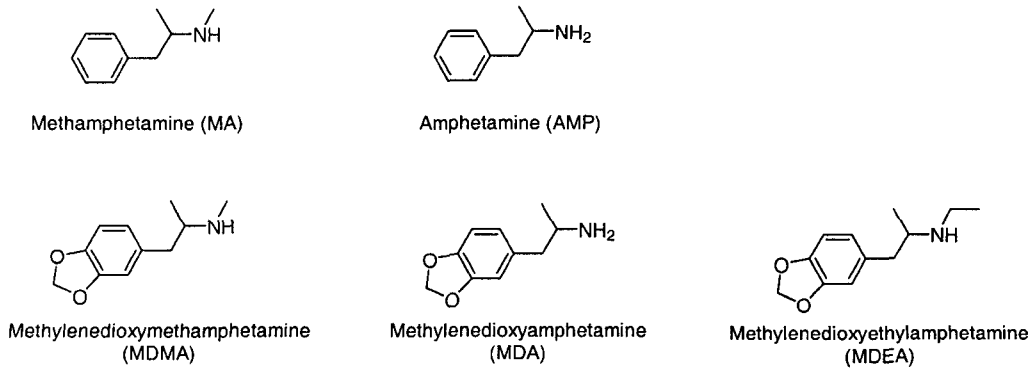


Fig. 1 – The structures of 5 amphetamine-type stimulants.

0.9 ml/min이었으며, 주입방법은 split mode(10:1)로 설정하였다. 시료의 주입은 미국 Agilent Technologies사 7673 Autosampler를 사용하였다.

#### 시료 채취

모발 시료는 2002년 1월부터 2002년 3월까지 본 기관에 감식 의뢰되었던 MA 또는 MDMA 남용 용의자의 모발이며 대조 모발은 약물을 복용하지 않은 사람의 모발로 하였다.

#### 모발 시료의 세척 및 추출

모발 시료 30 mg를 시험관(16×125 mm)에 넣은 후, 증류수 10 ml로 2회, acetone 10 ml로 1회 진탕하여 세척하였다. 세척된 시료를 무균 상에서 1시간 동안 건조시키고 외과용 가위를 이용하여 1 mm 이하로 절단한 후, 무게를 측정하였다. 칭량한 시료를 시험관에 넣고 내부표준물질  $^2\text{H}_5\text{-MA}$ ,  $^2\text{H}_5\text{-AMP}$ ,  $^2\text{H}_5\text{-MDMA}$ ,  $^2\text{H}_5\text{-MDA}$ ,  $^2\text{H}_5\text{-MDEA}$ 의 methanol 혼합표준용액(1 ppm) 100  $\mu\text{l}$ 를 첨가하였다. 여기에 추출용매(methanol : 5 M HCl, 20 : 1 v/v) 2 ml를 가해 1시간 동안 초음파 추출한 후 상온에서 하룻밤 방치하였다. 추출액을 여과한 후, 일정 압력(4.5 psi)과 온도(45°C)로 질소기류 하에서 증발시켰다. 증발 건조 잔사에 ethylacetate 100  $\mu\text{l}$ 와 유도체 시약 TFAA 100  $\mu\text{l}$ 를 가하여 70°C에서 30분간 유도체 반응을 시켰다. 시료를 상온으로 냉각시킨 후 다시 혼합물을 질소기류 하에서 증발 건조 시켰다. 건조된 시료를 ethylacetate 40  $\mu\text{l}$ 로 녹여 1  $\mu\text{l}$ 를 가스크로마토그래피-질량분석기(GC-MS)에 주입하여 분석하였다.

#### 표준용액의 검량선 작성

정량 범위는 모발 중에 존재하는 농도에 따라 각 성분별로 적절한 농도 범위를 정하여 각각의 성분을 혼합한 검량선 작성용 표준용액을 만들었다. MA, MDMA, MDEA는 정량 농도 범위를 0.5~20 ng/mg으로 하였고, AMP와 MDA는 0.1~5 ng/mg가 되도록 혼합하여 표준용액을 제조하였다. MA의 내부표준물질은

$^2\text{H}_5\text{-MA}$ , AMP는  $^2\text{H}_5\text{-AMP}$ , MDMA는  $^2\text{H}_5\text{-MDMA}$ , MDA는  $^2\text{H}_5\text{-MDA}$ , MDEA는  $^2\text{H}_5\text{-MDEA}$ 를 사용하여 각각의 내부표준물질들을 1 ppm 농도로 제조한 혼합 내부표준용액 100  $\mu\text{l}$ 를 취하여 표준용액에 넣고, 시료 처리 방법과 동일한 방법으로 처리하여 분석하였다. 시료 1  $\mu\text{l}$ 를 취하여 GC-MS를 이용하여 분석하였고 표준용액의 검량선을 작성하였다.

#### 실험 방법의 유효성 검증

대조 모발 시료에 혼합 표준용액 1.5, 3.5 ng/mg 해당 양을 각각 첨가한 후 시료 처리방법과 같은 방법으로 분석한 후, 첨가한 양과 측정된 양을 비교하여 정확도, 정밀도 및 회수율을 검토하였다. 일간(interday) 정확도 및 정밀도 측정은 5일간 매일 반복하여 측정하였다. 회수율은 대조 모발에 첨가한 양과 같은 양에 해당하는 표준용액을 취하여 전처리 과정을 거치지 않고 바로 유도체화 하여 GC-MS로 분석한 정량 결과와 대조 모발에서 첨가한 다음 위 실험방법과 동일한 과정을 거친 결과를 비교하여 그 평균값에서 회수율을 구하였다.

#### 결과 및 고찰

##### 암페타민형 각성제 약물 5종의 분석방법

사람과 동물에 대한 연구에서 MDMA는 생체 내에서 대사되어 MDMA, MDA 성분이, MDEA의 생체 대사체는 MDEA와 MDA 성분이 주요 대사체로 모발로 배설되는 것으로 알려져 있다.<sup>15)</sup> 또한 많이 알려진 바와 같이 MA는 주요 대사체로 MA와 AMP 성분이 모발로 배설된다.

따라서 AMP, MA, MDA, MDMA, MDEA 5종 약물의 남용 여부를 확인하기 위한 기준 성분은 개개의 약물의 주요 대사체를 고려하여 선정하였다. MDMA 복용여부는 MDMA와 MDA를 기준 성분으로, MDEA는 MDEA와 MDA를 기준 성분으로 하였다. MDA는 MDA를 판정 기준 성분으로 선택하였다. MA 투약 여부는 MA와 AMP를 판정기준 성분으로 하였다. 그러므로 5종

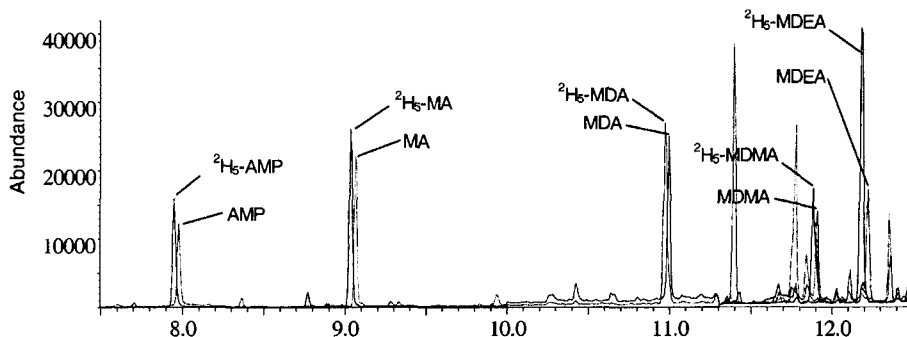


Fig. 2 - SIM chromatogram obtained after acidic extraction and derivatization with TFAA of hair specimen spiked 3.5 ng/mg of MA (m/z 154), AMP (m/z 140), MDMA (m/z 154), MDA (m/z 135), and MDEA (m/z 168).

의 약물 남용 여부를 동시에 확인하기 위한 분석 대상 성분은 AMP, MA, MDA, MDMA, MDEA 5종 성분과 각각의 성분에 대한 내수소 치환체 5종(내부표준물질)을 포함하여 총 10종의 성분에 대해 동시 분석하였다.

모발분석을 위한 전처리 단계 중 모발 오염물질을 제거하는 세척 과정은 본 실험에서는 Moeller의 방법을 참조하여 증류수와 acetone을 용매로 사용하여 세척하였다.<sup>16,17</sup> 모발에서 대상 성분들의 추출과정은 Nakahara의 추출방법을 참조하였으며, 아민기의 극성을 완화시키며 휘발성도 증가시킬 목적으로 5종의 약물을 유도체(TFAA) 반응시켜 GC-MS로 잘 분리되도록 하였다.<sup>18,19</sup>

본 연구에서 검토한 분석방법으로 표준용액을 첨가한 모발 시료를 분석한 결과 5종의 성분을 동시에 분리 확인하고 각각의 양을 정량범위 내에서 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 2는 내부표준물질을 포함한 10종 성분의 표준 혼합물 크로마토그램이다.

#### 아세틸화 유도체(TFAA) 성분의 특성 이온 선정

Fig. 1에서와 같이 본 실험 대상물질들의 화학구조식에 아민기(-NH)가 포함되어 있어 gas chromatograph의 분리관 내벽에 흡착이 일어나 분리가 쉽지 않다. 따라서 성분들의 분리와 감도를 향상시키기 위해서는 아민기를 비극성 성질로 전환해주는 유도체 선정이 필요하다. 이를 위해 ethylacetate를 용매로 하여 TFAA로 반응시켜 유도체 물질을 합성하여 분석하였다.

성분 분석방법은 모발 시료의 간섭물질을 효과적으로 배제하며 여러 가지 물질들을 선택적으로 동시에 정량할 수 있는 GC-MS의 selected-ion mode (SIM)를 이용하였다. 각각의 성분들에

**Table I** – Retention time and characteristic ions of TFAA derivatized amphetamine-type stimulants

Compounds	M.W. <sup>a</sup>	R.T. <sup>b</sup>	Characteristic ion (m/z)
AMP	231	7.94	<u>140</u> <sup>c</sup> , 118
<sup>2</sup> H <sub>5</sub> -AMP (IS <sup>d</sup> )	236	7.91	144
MA	245	9.06	<u>154</u> , 118
<sup>2</sup> H <sub>5</sub> -MA (IS)	251	9.03	158
MDA	277	10.96	<u>135</u> , 162
<sup>2</sup> H <sub>5</sub> -MDA (IS)	282	10.93	136
MDMA	291	11.90	<u>154</u> , 162
<sup>2</sup> H <sub>5</sub> -MDMA (IS)	296	11.87	158
MDEA	305	12.22	<u>168</u> , 162
<sup>2</sup> H <sub>5</sub> MDEA (IS)	310	12.20	173

<sup>a</sup>Molecular weight.

<sup>b</sup>Retention time.

<sup>c</sup>Underlined ion used for the quantitation.

<sup>d</sup>Internal standard.

대한 주요 검출 이온은 AMP는 m/z 140과 118, MA는 m/z 154와 118, MDA는 m/z 135와 162, MDMA는 m/z 154와 162, MDEA는 m/z 168과 162를 선정하였다. 각 성분들과 그 내부표준물질의 머무름 시간과 정량에 이용된 특성 이온들은 Table I에 나타내었다.

#### 표준검량선, 회수율, 검출한계 및 정량한계

AMP, MA, MDA, MDMA, MDEA 각각의 성분들에 대한 표준검량선을 작성한 결과 모든 성분은 정량 범위 내에서 직선성( $r > 0.9941$ )을 나타내었고, 각 성분들의 회수율은 93.4~104.4% 범위에 있었다. 검출한계(LOD)는 signal-to-noise(S/N)=3에서 측정하였을 때 0.04~0.15 ng/mg였고, 정량한계(LOQ)는 S/N=10에서 0.13~0.50 ng/mg였다.

**Table II** – Validation data for the analysis of amphetamine-type stimulants in human hair

	MA <sup>a</sup>	AMP <sup>b</sup>	MDMA	MDA	MDEA
Concentration range (ng/mg)	0.5~20.0	0.1~5.0	0.5~20.0	0.1~5.0	0.5~20.0
Linearity <sup>c</sup> (r)	0.9941	0.9980	0.9993	0.9981	0.9980
LOD <sup>d</sup> (ng/mg)	0.04	0.05	0.15	0.09	0.10
LOQ <sup>e</sup> (ng/mg)	0.13	0.18	0.50	0.30	0.36
Recovery (% C.V., n=5)					
1.5 ng/mg	96.0±2.4	95.9±1.1	96.6±4.4	95.2±4.0	98.8±7.5
3.5 ng/mg	93.4±0.8	93.6±1.7	93.6±0.2	103.3±5.2	104.4±11.8
Interday accuracy <sup>f</sup> (% bias, n=5)					
1.5 ng/mg	6.2	5.4	0.8	2.2	-0.7
3.5 ng/mg	1.1	2.9	2.5	1.7	-1.8
Interday precision <sup>g</sup> (% C.V., n=5)					
1.5 ng/mg	3.8	0.2	4.2	3.1	4.7
3.5 ng/mg	1.1	1.1	1.9	1.4	2.3

<sup>a</sup>Methamphetamine.

<sup>b</sup>Amphetamine.

<sup>c</sup>Linearity was described with linear correlation coefficients for calibration curve.

<sup>d</sup>LOD Limit of detection.

<sup>e</sup>LOQ Limit of quantitation.

<sup>f</sup>Calculated as [(mean calculated concentration - nominal concentration)/nominal concentration] × 100.

<sup>g</sup>Expressed as coefficient of variance of the peak area ratios of analyte/internal standard.

Table III - Concentration and ratio of MA-AMP and MDMA-MDA in hair samples

Sample no.	Concentration (ng/mg)		Ratio (MA/AMP)	Sample no.	Concentration (ng/mg)		Ratio (MDMA/MDA)
	MA <sup>a</sup>	AMP <sup>b</sup>			MDMA <sup>c</sup>	MDA <sup>d</sup>	
02-007-4	4.02	0.70	5.74	02-055-1	16.45	1.22	13.48
02-027-1	18.34	0.37	49.57	02-058-1	8.88	0.68	13.06
02-053-1	14.8	0.98	15.10	02-077-2	4.15	0.68	6.10
02-060-1	3.85	0.17	22.65	02-088-1	3.10	0.24	12.92
02-092-2	13.31	0.35	38.03	02-118-1	18.89	3.83	4.93
02-131-1	6.20	0.46	13.48	02-138-1	8.88	0.68	13.06
02-159-1	5.09	0.60	8.48	02-148-1	6.53	0.36	18.14
02-164-1	16.40	2.02	8.12	02-188-1	12.64	0.32	39.50
02-177-2	17.51	2.88	6.08	02-201-2	5.16	0.56	9.21
02-177-4	14.22	1.89	7.52	02-248-1	7.37	0.57	12.93
02-202-1	4.42	0.78	5.67	02-256-2	16.78	0.62	27.06
02-212-4	2.09	0.24	8.71	02-262-1	14.51	2.53	5.74
02-213-2	8.27	0.67	12.34	02-265-1	11.05	2.31	4.78
02-218-2	4.55	0.46	9.89	02-305-2	7.51	0.55	13.65
02-233-1	5.35	0.29	18.45	02-310-1	22.81	0.42	54.31

<sup>a</sup>Methamphetamine.<sup>b</sup>Amphetamine.<sup>c</sup>3,4-methylenedioxymethamphetamine.<sup>d</sup>3,4-methylenedioxyamphetamine.

또한 이 방법을 이용하여 측정된 일간 측정값 오차의 분산계수(coefficient of variance, % C.V.)는 0.2~4.7%로써 5% 내의 정밀도와 -1.8~6.2%의 정확도(% bias)를 나타내었다(Table II).

#### 모발 시료 중 MA 및 MDMA 대사체 성분 농도 측정

본 연구에서 개발된 실험 방법에 따라 2002년 1월부터 3월까지 당 실험실에 의뢰되었던 MA와 MDMA 남용 용의자의 모발(n=15)을 각각의 약물에 대해 분석한 결과 MA, AMP, MDMA, MDA의 농도는 Table III에서 보는 바와 같다. 메스암페타민 투약자 모발 중 AMP에 대한 MA의 비(MA/AMP)는 5.67~49.57 범위를 나타내었으며, MDMA 복용자 모발에서 MDA에 대한 MDMA의 비(MDMA/MDA)는 4.78~54.31을 나타내었다. 이 같은 결과는 정 등<sup>20)</sup>이 MDMA 남용자 모발을 분석하여 얻은 MDA에 대한 MDMA의 비 5.01~28.46 결과와 Kusman 등<sup>1)</sup>이 보고한 1.53~52.0 결과와 비교할 때 비슷한 숫치를 나타내었다.

#### 결 론

본 연구 결과 모발에서 AMP, MA, MDA, MDMA, MDEA 5종의 암페타민형 각성제 약물을 동시에 분석할 수 있는 방법을 확립하여 MA와 MDMA 남용자 모발 시료에 적용한 결과 남용 여부를 확인할 수 있는 좋은 결과를 얻었다. 분석방법 중 내부표준물질로는 <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-AMP, <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-MA, <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-MDA, <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-MDMA, <sup>2</sup>H<sub>5</sub>-MDEA를 사용하여, TFAA로 유도체시켜 GC-MS SIM으로 분석하였다.

각각의 성분에 대한 표준검량선은 정량범위 내에서 유의성 있

는 직선성(r>0.9941)을 나타내었으며, 회수율은 93.4~104.4%이었다. 또한 성분들의 검출한계(LOD)와 정량한계(LOQ)는 각각 0.04~0.15 ng/mg과 0.13~0.50 ng/mg으로 측정되었다.

분석방법은 MA 및 MDMA 남용자 각각 15명 모발 시료에 적용한 결과 MA 남용자 모발에서는 AMP에 대한 MA의 비(MA/AMP)의 범위는 5.67~49.57을 나타내었고, MDMA 남용자 모발에서는 MDA에 대한 MDMA의 비(MDMA/MDA)는 4.78~54.31 범위를 나타냈다. 모발에서 측정된 MA/AMP 및 MDMA/MDA 농도 비는 MA 및 MDMA 남용 여부 판단에 유용한 참고 자료로 생각된다.

#### 문 헌

- 1) Kusman, G. W., Levine, B., Kuhlman, J. J., Jones, R. L., Hughes, R. O., Fujiyama, C. L. and Smith M. L. : MDA-MDMA Concentrations in Urine specimens. *J. Anal. Toxicol.* **20**, 517 (1996).
- 2) Gudelsky, G. A. and Yamamoto, B. K. : Neuropharmacology and neurotoxicity of 3,4-methylenedioxymethamphetamine. *Methods Mol. Med.* **79**, 55 (2003).
- 3) Parrott, A. C. : Human psychopharmacology of ecstasy (MDMA) : a review of 15 years of empirical research. *Hum. Psychopharmacol.* **16**(8), 557 (2001).
- 4) Saito, T., Yamamoto, I., Kusakabe, T., Huang, X. L., Yukawa, N. and Takeichi, S. : Determination of chronic methamphetamine abuse by hair analysis. *Forensic Sci. Int.* **112**(1), 65 (2000).
- 5) Nakahara, Y., Kikura, R. and Konuma, K. : GC/MS analysis of drugs and metabolites in hair for diagnosis of chronic drug

- use. *Adv. In Chem. Diagnos. Treat. of Metab. Disord.* **2**, 207 (1994).
- 6) Scender, L. : Hair - a biological source in drug analysis. *Arch. Hig. Rada. Toksikol.* **51**(4), 409 (2000).
  - 7) Montagna, M., Stramesi, C., Vignali, C., Groppi, A. and Fioletti, A. : Simultaneous hair testing for opiates, cocaine, and metabolites by GC-MS: a survey of applicants for driving licenses with a history of drug use. *Forensic Sci. Int.* **107**(1-3), 157 (2000).
  - 8) Martz, R., Donnelly, B., Fetterolf, D., Lasswell, L., Hime, G. W. and Hearn, W. L. : The use of hair analysis to document a cocaine overdose following a sustained survival period before death. *J. Anal. Toxicol.* **15**(5), 279 (1991).
  - 9) Ishiyama, I., Nagai, T. and Toshida, S. : Detection of basic drugs (methamphetamine, antidepressants, and nicotine) from human hair. *J. Forensic Sci.* **28**(2), 380 (1983).
  - 10) Suzuki, O., Hattori, H. and Asano, M. : Detection of methamphetamine and amphetamine in a single human hair by gas chromatography/chemical ionization mass spectrometry. *J. Forensic Sci.* **29**(2), 611 (1984).
  - 11) Takahashi, K. : Determination of methamphetamine and amphetamine in biological fluids and hair by gas chromatography. *Nippon Hoigaku Zasshi* **38**(3), 319 (1984).
  - 12) Moeller, M. R., Fey, P. and Sachs, H. : Hair analysis as evidence in forensic cases. *Forensic Sci. Int.* **63**(1-3), 43 (1993).
  - 13) Kintz, P., Cirimele, V., Tracqui, A. and Mangin, P. : Simultaneous determination of amphetamine, methamphetamine, 3,4-methylenedioxy-amphetamine and 3,4-methylenedioxymethamphetamine in human hair by gas chromatography-mass spectrometry. *J. Chromatogr. B. (Biomed. Appl.)* **670**(1), 162 (1995).
  - 14) Kikura, R., Nakahara, Y., Mieczkowski, T. and Tagliaro, F. : Hair analysis for drug abuse: XV. Disposition of 3,4-methylenedioxy-methamphetamine (MDMA) and its related compounds into rat hair and application to hair analysis for MDMA abuse. *Forensic Sci. Int.* **84**(1-3), 165 (1997).
  - 15) Kraner, J. C., MacCoy, D. J., Evanes, M. A., Evanes, L. E. and Sweeney, B. J. : Fatalities caused by the MDMA-related drug paramethoxyamphetamine (PMA). *J. Anal. Toxicol.* **25**, 645 (2001).
  - 16) Moeller, M. R. and Mueller C. : The detection of 6-monoacetylmorphine in urine, serum, and hair by GC/MS and RIA. *Forensic Sci. Int.* **70**(1-3), 125 (1995).
  - 17) Moeller, M. R., Fey, P. and Wennig, R. : Simultaneous determination of drugs of abuse (opiates, cocaine and amphetamine) in human hair by GC/MS and its application to a methadone treatment program. *Forensic Sci. Int.* **63**(1-3), 185 (1993).
  - 18) Nakahara, Y., Takahashi, K., Shimamine, M. and Takeda, Y. : Hair analysis for drug abuse: I. Determination of methamphetamine and amphetamine in hair by stable isotope dilution gas chromatography/mass spectrometry method. *J. Forensic Sci.* **36**(1), 70 (1991).
  - 19) Rohrich, J. and Kauert G. : Determination of amphetamine and methylenedioxy-amphetamine-derivatives in hair. *Forensic Sci. Int.* **84**(1-3), 179 (1997).
  - 20) 정희선, 박미정, 김은미, 이재신, 유영찬 : GC/MS를 이용한 모발 중 MDMA의 분석. *한국법과학회지* **2**, 241 (2001).