J. Fd Hyg. Safety
Vol. 23, No. 1, pp. 6~14 (2008)

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

우리나라 논 토양 중 수은함량과 벼 흡수이행

박상원* · 양주석 · 김진경 · 박병준 · 김원일 · 최주현 · 권오경 · 류갑희
농업과학기술원 유해물질과

Mercury Contents of Paddy Soil in Korea and its Uptake to Rice Plant

Sang-Won Park*, Ju-Seok Yang, Jin-Kyoung Kim, Byung-Jun Park, Won-Il Kim, Ju-Hyeon Choi, Oh-Kyung Kwon, and Gab-Hee, Ryu
**National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea*
(Received November 20, 2007/Accepted March 4, 2008)

ABSTRACT – Objective of this study was to investigate the residual levels of mercury (Hg) in soil for "Top-rice" area and its uptake into rice plant for making sure food safety as compared to "Top-rice" & common rice produced from 2005 to 2006. Hg was analyzed with the direct mercury analyzer (DMA 80, Milestone, Italy), which implements the US/EPA method 7473. The average concentration of Hg in paddy soil was 0.031 mg/kg, which was below at 1/25-1/65 fold of the threshold levels (concern level 4 mg/kg, action level 10 mg/kg) for soil contamination designated by "The Soil Environment Conservation Law" in Korea. The maximum residue level (MRLs) for Hg residue in the polished rice is not designated in Korea. Therefore, Hg contents in the polished rice of "Top-rice" brand and common rice were compared to other country's criteria. Hg contents in the polished rice of "Top-rice" brand was 0.0018 mg/kg, which was lower at 1/10-1/30 fold than the MRLs, 0.02 mg/kg of China criteria and 0.05 mg/kg of Taiwan criteria, respectively. Hg were 0.02788, 0.00896, 0.00182, 0.00189, 0.00166, 0.00452 and 0.00145 mg/kg in soil, rice straw, unhulled rice, rice hulls, brown rice, rice bran, and polished rice produced in 2006 "Top-rice" area, respectively. For the ratio of Hg as compared to Hg contents in soil, there were 0.321 of rice straw >> 0.162 of rice bran >> 0.068 of rice hulls > 0.065 of unhulled rice > 0.060 of brown rice> 0.052 of polished rice. And, the slope of Hg uptakes was steeped as following order; rice straw >> rice bran >> rice hulls > unhulled rice > brown rice > polished rice. It means that the more slope steeped was the more uptakes. For the distribution of Hg uptaken, there was 83.8% into rice straw, and 16.2% into unhulled rice, 2.8% into rice hulls, 12.4% into brown rice, 3.5% into rice bran and 9.7% into polished rice. Consequently, it was appeared that the Hg contamination in the polished rice should not be worried in Korea.

Key words: Mercury, "Top-rice" brand, Direct Mercury Analyzer

수은(mercury)은 hydrargyrum, quick silver, liquid silver 등으로 오래전부터 알려진 유일한 액상 형태의 금속으로 크게 7개의 동위원소와 4개의 불안정한 방사성 동위원소로 존재하며 크게 무기성 수은과 유기성 수은으로 구분한다. 유기성 알킬수은에 오염된 물고기를 섭취한 일본 미나마타현과 니이가타현 주민들에서 발생한 이른바 "미나마타병"은 너무나 유명한 집단만성중독 사건으로, 이 사건을 계기로 체중 kg당 0.4-1.0 mg의 수은 섭취만으로도 신경성 장애를 일으킬 수 있음이 널리 알려지기 시작하였다[1,2].

*Correspondence author: Sang-Won Park, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea
Tel: 82-31-290-0526, Fax: 82-31-290-0506
E-mail: swpark@rda.go.kr

토양 잔류성이 강하여 반감기가 5-15년 정도로 긴 유기수은제 PMI (phenyl mercury iodide)와 PMA (phenyl mercury acetate)는 도열병의 특효약으로 1960-1970년대에 널리 사용되어졌으나, 작물에 대한 약해는 없지만 인축 및 어독성이 강한 농약으로 토양 및 작물체내에서 분해되어 무기수은으로 축적되는 특성이 밝혀져 1970년대 말에 제조·사용이 금지되었다. 유기수은계 살균제를 다량으로 오랫동안 사용해 온 일본의 경우 "미나마타병"의 발생을 계기로 1960년대에 쌀의 수은 잔류량을 조사한 결과 다른 나라에 비해 쌀의 수은농도가 10-40배나 높은 수준인 0.2-0.8 mg/kg이었고, 일본인들이 다른 나라 국민들보다 평균 3배 이상의 수은 농도를 보이는 원인이 쌀에 함유된 수은에서 주로 기인한다는 연구결과가 사회적으로 큰 문제가 되기도 했다[3]. 당시 우리나라는 국가 경제력이 상대적으로

미미하여 벼 농사에 있어서 유기수은계 살균제의 사용량이 일본처럼 많지는 않았지만, 쌀이 주식인 만큼 식품위생학적 견지에서 중금속(수은)에 대하여 관심을 갖기 시작하여 1967년에 처음으로 농촌진흥청에서 국산 쌀 중의 수은함량을 조사하였다. 그 후 1980년대에 들어와 곡류뿐만 아니라 채소, 과일, 수산물 등의 수은함량 조사가 다양하게 시도되었고[4,5], 1990년대에는 당류, 다류와 같은 가공제품에 대한 모니터링도 이루어졌다[6,7]. 잔류수은에 대한 모니터링 초기에는 주로 유기수은계 농약의 잔류여부를 검색하기 위해 실시되었으며, 후기에는 환경오염에 의한 수은노출 여부를 알기 위해 조사되었다.[8]

오염원으로부터 배출되는 수은은 단순히 대기오염만 야기하는 것이 아니라, 대기를 매체로 토양과 수질오염으로까지 확대되는 것으로 잘 알려져 있다[9]. 토양의 중금속 오염은 그 지역에서 생산되는 각종 농작물의 안전성과 직결될 뿐만 아니라 생태학적 측면에서 먹이사슬에 의한 생물농축현상[10]이 일어나 최종 피해자는 결국 상위 먹이사슬에 있는 인간이다. 따라서 최근에는 수은과 관련된 오염문제는 대기, 수질, 토양, 폐기물의 오염과 같은 고전적인 연구 분야에 한정되지 않고, 환경뿐만 아니라 동식물이나 인체의 유해성에 대한 연구로까지 확대되고 있는 추세에 있다[11].

최근 WT0 협상 결과 쌀 시장의 개방이 이루어져, 우리나라의 의무수입 물량이 2005년 225천톤에서 2014년에는 408천톤으로 늘어나게 됨에 따라, 외국 쌀과의 경쟁이 불가피한 실정이다. “탑라이스” 개발은 수입쌀의 시판을 앞두고 세계 최고수준의 쌀을 생산하는 기술을 보급하고, 고급 쌀 시장에서의 경쟁력을 확보함으로써 농업인에게는 우리 쌀 산업의 비전과 희망을 제시함과 동시에 소비자에게는 우리 쌀에 대한 신뢰와 자부심을 부여하기 위해 농촌진흥청이 추진하고 있는 프로젝트이다[12].

본 연구는 “탑라이스” 생산단지 농업인들에게 기술지원을 위한 기초자료로 활용하고, 소비자들에게 우리나라 쌀의 안전성을 널리 알리고자 하는 노력의 일환으로 수행한 토양, 쌀의 중금속 함량 및 흡수이행에 관한 연구결과의 일부이다.

재료 및 방법

시료채취

본 연구에서는 2005년-2006년 탑라이스 생산단지 토양 및 생산된 쌀에 함유된 수은 함유량을 조사하고자 하였다. 분석용 토양 및 쌀은 전국 33개단지의 탑라이스 생산단지와 인근 관행재배 대조지역에서 관할지역 농업기술센타 및 대표농가들의 도움을 받아 시료를 채취하였다. 2005년도에 생산된 쌀 시료는 해당지역의 농협에서 포장된 규격품을 구매하였고, 재배지 토양은 농가를 방문하여 직접 채취하였다. 또한, 2006년도 재배지 토양과 쌀(볏짚 포함) 시료는 농가를 방문하여 직접 채취하였다(Fig. 1).

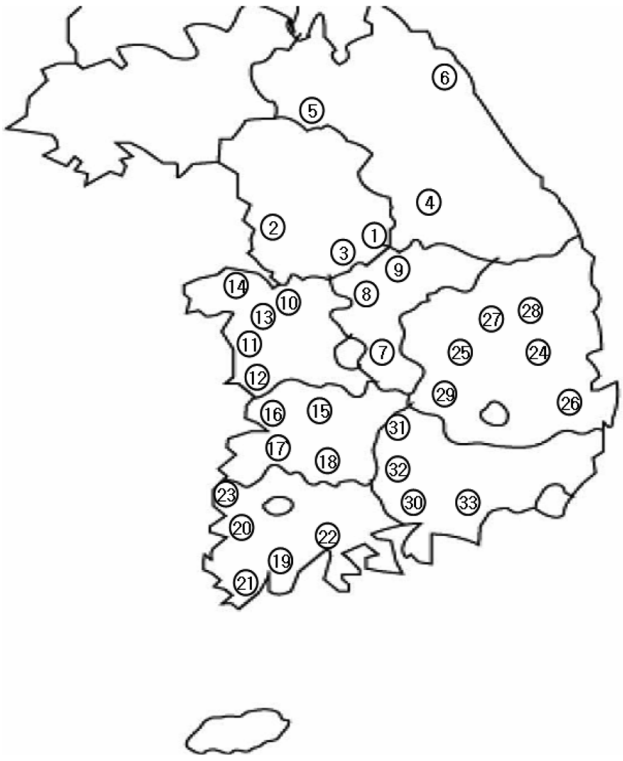

Fig. 1. Sampling location of “Top-rice” brand produced in 2005-2006.

시료조제

토양시료는 모종삽을 이용하여 작토층 10 cm 이내의 토양을 20여개 지점에서 채취 후 혼합하여 복합시료로 만들었다. 분석시료의 조제는 토양 및 식물체 분석법(농업과학기술원, 2000)과 토양오염공정시험법(환경부, 1999)에 준하여 실시하였다[13]. 수집된 토양시료는 음건시킨 후 막자와 유발을 이용해 뭉쳐진 부분을 분리시킨 다음 10 mesh (<2 mm)로 체질한 후 축분법을 이용하여 4분의 1을 취한 시료를 소량정밀분쇄기(Micro Hammer-Cutter Mill, Culatti AG Co. Swiss)를 이용하여 곱게 분쇄한 뒤, 다시 200 mesh(<0.074 mm) 입도로 체질하여 분석시료로 사용하였다.

한편, 건조된 벼는 실험용 현미기(SYTH88, 쌍용기계공업사, Korea)를 이용하여 현미로 만든 다음, 다시 McGill miller(HT McGill Inc., USA)를 이용하여 도정과정에서 부위별 쌀겨, 백미(10분도미)를 채취하여 polyethylene 병에 보존하였다. 현미와 백미는 곡류분쇄기(Cyclone Sample Mill, UDY Co. USA)를 이용하여 0.5 mm의 screen을 통과한 분말로 만든 다음 분석을 실시하였다.

수은분석

유기물 시료의 수은을 분석하는 방법으로 크게 EPA

method 7471B (Cold Vapor-Atomic Absorption Spectroscope) 법과 열분해 (Thermal Decomposition)를 이용한 가열기화법(EPA method SW-7473)이 있으나, 최근에는 EPA method 3052에 준하여 산분해시킨 분석액에 Gold Chloride($AuCl_3$) 용액을 첨가하여 수은의 흡착 문제를 해결한 뒤 ICP-MS[14] 로 측정하는 방법이 새롭게 시도되고 있다. 전통적인 CV-AAS 법(EPA method 7471B)은 널리 알려졌으나 분석방법이 어렵고, 시간이 많이 걸리며 검출농도는 10-2,000 ppb 로 그 자체로 여러 가지 위험 폐기물을 발생시킨다. 따라서, 좀더 정확하고 재현성 있는 결과를 빠르고 간단하게 얻고 폐기물이 없는 분석방법들이 요구되기 시작하였다[15]. 미환경보호청(US/EPA, US Environmental Protection Agency)이 개발한 분석법 EPA method 7473은 가열기화법으로 분석시료에 별도의 전처리 없이 고온으로 회화시켜 휘발되는 수은을 흡착관(cell)에 모으고, 다시 탈착시켜 흡광법(254 nm)에 의해 측정하는 방법으로 아직 국제적인 표준이 많지 않으나 별도의 전처리 조작이 필요 없고 빠르며 재현성 있는 결과를 도출할 수 있어 최근에 각광 받고 있는 분석법이다[16].

본 연구에서는 미국 EPA method 7473을 만족시키는 자동수은분석기(Direct Mercury Analyzer, DMA80, Milestone, Italy)에 조제된 토양, 볏짚, 왕겨, 쌀겨, 현미, 및 백미 시료를 직접 주입하여 수은함량을 분석하였다. 분석시 자료의 정확도와 정밀도를 확보하기 위하여 10개 시료마다 중복시료를 분석하였고, 미연방표준국(NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 보증 판매하는 국제표준시료 SRM 1568a (rice flour), SRM 2710 (Motana soil) 및 MESS-3 (marine sediment, NRC-CNRC, Canada) 등을 사용하여 안전성 테스트 및 회수율 검정을 실시하였다.

결과 및 고찰

토양 및 식물체 수은분석법 확립

EPA method 7374에서 추천된 분석조건을 참고하여 토양 및 쌀 중 수은 함량분석을 위한 기기조건을 설정하였다. 먼저, 분석시료 100-200 mg을 자동수은분석기(Direct Mercury Analyzer, DMA80, Milestone, Italy)의 시료도입부(sample boat)에 넣은 뒤 온도를 200°C로 60초간 유지시켜 수분을 제거하고 완전히 건조시켰다. 그리고 시료 분해관의 온도를 서서히 660°C까지 올린 뒤 120초 동안 유지시켜 시료를 완전히 분해시켰다(Fig. 2).

자동수은분석기(Direct Mercury Analyzer)에는 수은을 포집하는 2개의 흡착관(cell)이 있어 분석결과 그래프에 2개의 peak가 존재할 수 있다. 첫번째 peak는 흡착관1 (cell-1, low range)에 해당하며 수은함량 범위는 0.01-35 ng Hg 이다. 두 번째 peak는 흡착관2 (cell-2, high range)에 해당하며 수은함량 범위는 35-600 ng Hg이다. 따라서 표준정량곡선도 2개가 존재하게 된다. 토양 및 쌀 시료 분석조건을 확인한 후 수은농도를 정량하기 위해 표준정량곡선을 Fig. 3과 같이 작성하였다(Fig. 3). 표준정량곡선 작성에는 표준물질인 MESS-3 (marine sediment, NRC-CNRC, Canada)를 사용하였다.

지속적이고 안정된 기기분석을 위하여 매주 1회씩 18주 동안 자동수은분석기(DMA 80)의 안정성을 실시한 결과

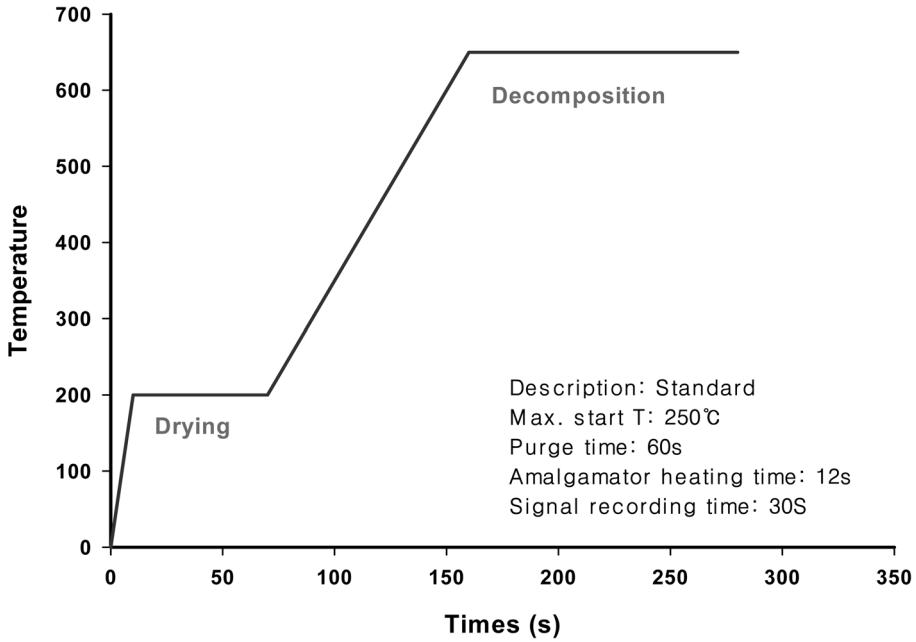

Fig. 2. Ramp control of direct mercury analyzer (DMA-80) for sample drying and decomposition.

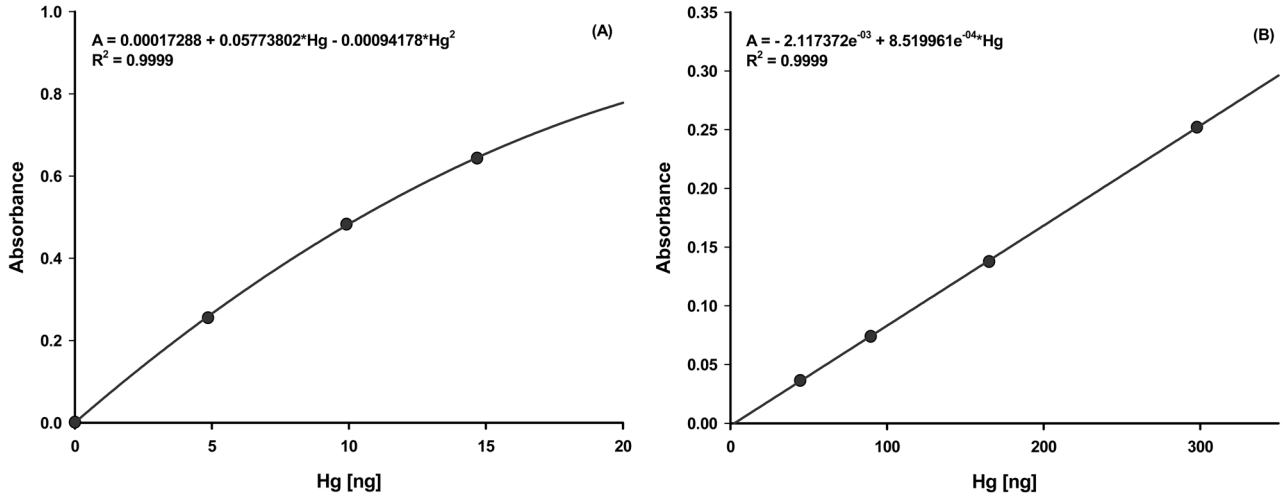

Fig. 3. Calibration curve of direct mercury analyzer (DMA-80) with MESS-3 (marine sediment). (A) Low range (0.01-35 ng Hg), (B) High range (35-600 ng Hg).

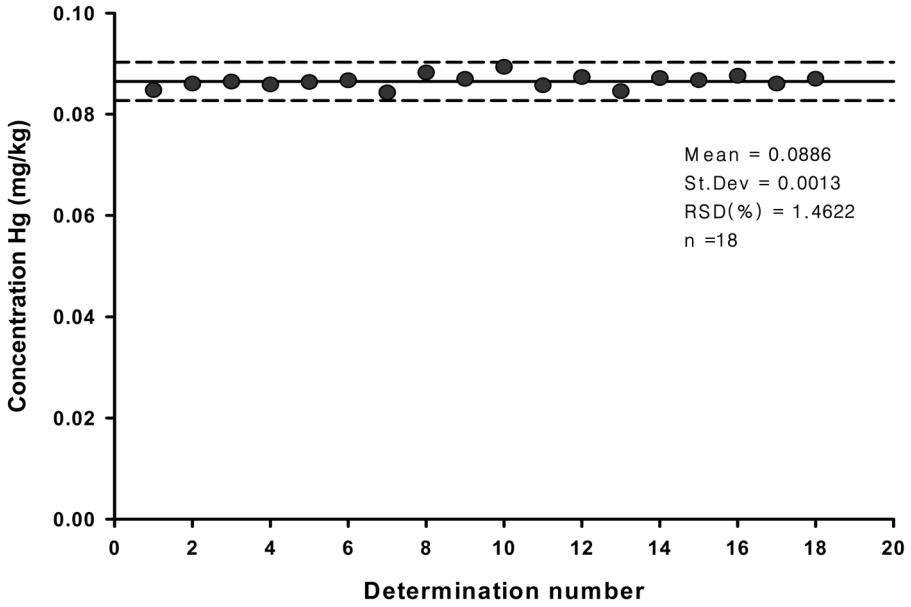

Fig. 4. MESS-3 (marine sediment) was analyzed 18 times over a period of six month for long-term stability test. Hg certified value 0.091±0.009 mg/kg. The dotted lines are established in house acceptance limits.

Fig. 4와 같이 만족스런 결과를 얻었다. 기기의 안정성 시험에도 표준물질인 MESS-3을 이용하였는데 보증값(Certified value 0.091±0.009 mg/kg) 이내로 안정적인 분석결과를 나타내었다(Fig. 4).

자동수은분석기(Direct Mercury Analyzer)를 이용한 수은함량 분석시 회수율 검정을 위해 미연방표준국(NIST)에서 보증 판매하는 국제표준시료 SRM 1568a (rice flour, NIST, USA), SRM 2710 (Montana soil, NIST, USA) 및 캐나다의 MESS-3 (marine sediment, NRC-CNRC, Canada) 등을 사용하여 검정한 결과 96% 이상의 회수율을 나타내었다(Table 1).

토양 중 수은함량

2005년, 2006년 탑라이스 생산단지 토양 및 인근의 관행재배지에서 토양 시료를 채취하여 수은함량을 분석한 결과 2005년 탑라이스 생산단지 토양 중 수은함량은 평균 0.033 mg/kg(0.008-0.144 mg/kg)이었고, 2006년도 탑라이스 생산단지 토양 중 수은함량은 평균 0.028 mg/kg(0.005-0.125 mg/kg)이었다. 한편, 관행재배지 토양 중 수은함량은 평균 0.031 mg/kg(0.010-0.064 mg/kg)으로 나타났다(Fig. 5). 탑라이스 생산단지와 일반 관행재배 지역을 같이 고려하여 보았을 때 재배단지간의 차이는 인정할 수 없었고, 우리나라 논토양 중 수은함량이 평균 0.031 mg/kg(0.005-0.144 mg/kg) 수준 정도로 수은에 대한 오염우려는 없다

Table 1. Recovery test of mercury in SRM 1568a (rice flour), SRM 2710 (Montana soil) and MESS-3 (marine sediment)

Standard reference materials	Certified value (mg/kg, Hg)	Measured value (mg/kg, Hg)	Recovery* (%)
SRM 1568a	0.0058 ± 0.0005	0.0056 ± 0.0001	96.5
MESS-3	0.091 ± 0.009	0.0886 ± 0.0010	97.4
SRM 2710	32.6 ± 1.8	32.04 ± 0.3177	98.3

*Recovery(%) = $\frac{\text{Measured Value}}{\text{Cerified Value}} \times 100$

고 하겠다. 다만, 일부지역 토양에서 수은함량이 다른 지역토양 보다 다소 높게 나타났는데, 이는 토양환경보전법상 우려기준(4 mg/kg)과 대책기준(10 mg/kg)의 1/25-1/65 이하로 매우 낮은 수준이었다.

토양은 원래 암석의 풍화산물로 각종 원소들을 미량씩 함유하고 있는데, 이를 천연부존량 또는 자연함유량이라고 한다. 일반 소비자들은 농산물에 중금속이 검출된 사실만 가지고도 위험한 것으로 생각하고 있으나, 자연함유 정도로 검출되는 것은 문제가 되지 않고 사람의 몸에서 중금속이 흡수축적 될 수 있는 이상의 많은 양이 농산물 중에 함유 될 때 유해하게 된다. 1980년대 이후에 우리나라 농경지 토양 중 중금속의 자연함유량이 지속적으로 조사되었으나 수은함유량 조사가 제외되는 경우가 많았다. 우리나라의 논토양과 일본의 논토양 중 수은의 자연함유량은 각각 0.098 mg/kg, 0.100 mg/kg[17,18] 그리고 밭토양 중 수은함량 0.098 mg/kg으로 조사되었다[19].

우리나라는 농경지토양 대부분이 화강암 내지는 화강편마암에서 유래된 충적토가 많고, 일본의 경우보다 금속광산이 적기 때문에 토양오염의 우려가 적다. 아직까지 전체 농경지에 대해서 체계적인 조사는 실시되지 않았으나 평야지역의 수은함량은 0.07-0.08 mg/kg 수준이고, 현미 중에는 0.006-0.053 mg/kg 정도로 나타났다[20].

최근에는 鄭 등[21]이 우리나라 토양의 중금속 자연함량을 평가하기 위하여 비오염 삼림지의 잔적토양에 대한 조사결과 총수은 함량은 0.025 mg/kg (0.004-0.082 mg/kg)으로 중금속 자연함량은 토양환경보전법(환경부, 1999)의 토양오염 우려기준 및 대책기준에 비해 1/159-1/398 이하라고 보고하였다. 또한, 金 등(2002)[22]에 의하면 우리나라에서 평야지역 수은함량은 0.07 mg/kg (0.01-2.05 mg/kg), 폐광지역 수은함량은 0.63 mg/kg (0.01-16.80 mg/kg) 수준이었다. 강원도 지역의 토양환경측정망에서 조사 분석된 결과를 살펴보면 강원도 토양의 수은함량은 0.02mg/kg (0.021-0.050 mg/kg) 수준이었다[23].

백미 중 수은함량

2005년에 생산된 해당지역의 농협 등 시판용 쌀과 2006년도 농가를 방문하여 채취한 쌀 중 수은함량을 분석한 결과 Fig. 6과 같았다. 토양과 유사하게 2005년, 2006년에

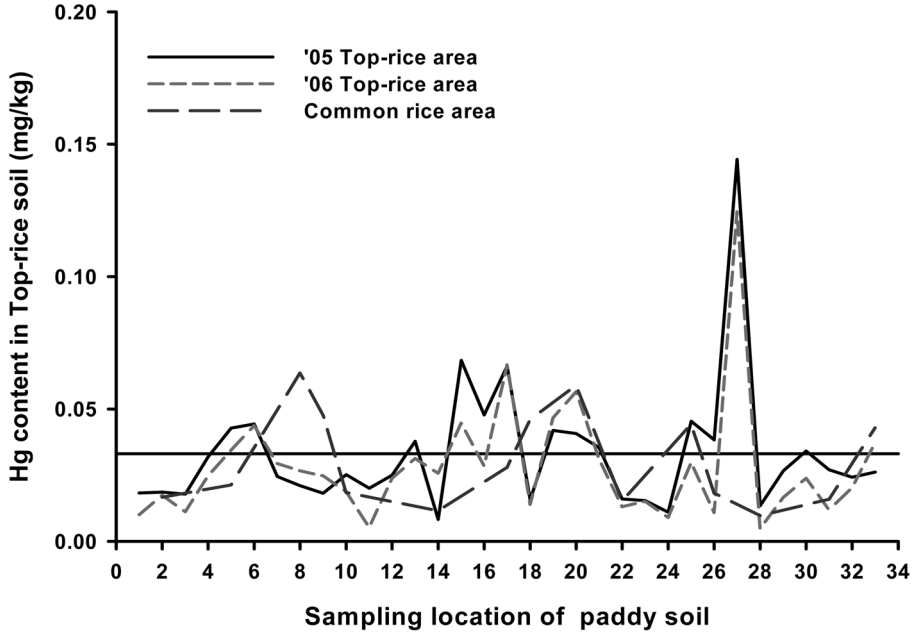

Fig. 5. Distribution of mercury concentration in paddy soil.

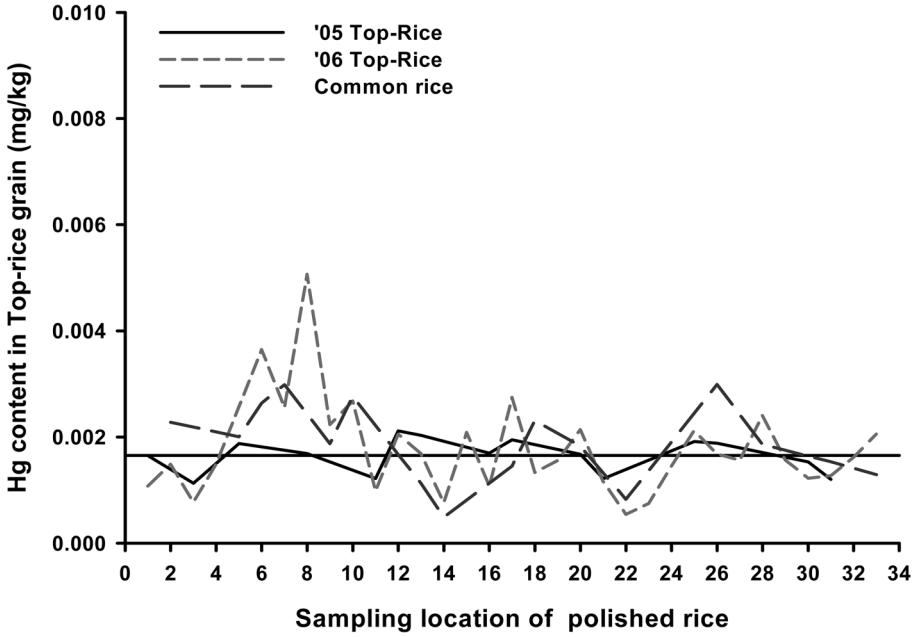

Fig. 6. Distribution of mercury concentration in polished rice.

생산된 백미 중 수은함량을 비교해보면 큰 차이가 없음을 알 수 있었고, 일반 관행재배 백미와 비교해도 차이가 없었다(Fig. 6).

즉, 2005년, 2006년에 생산된 탑라이스 백미 중 수은함량은 각각 0.0017 mg/kg, 0.0018 mg/kg 이었다. 한편, 관행재배 백미 중 수은함량은 평균 0.019 mg/kg으로 나타났다. 탑라이스 쌀과 일반 관행재배 지역에서 생산된 쌀을 같이 고려하여 보았을 때, 우리나라 쌀 중 수은함량이 평균 0.0018 mg/kg으로 나타나 수은에 의한 안전성 우려는 전혀 없다고 평가할 수 있었다.

우리나라 쌀 중 수은함량은 1967년부터 농촌진흥청에서 처음으로 조사하기 시작하였다. 조사결과 1967년산 쌀 중 평균 수은함량은 0.13 mg/kg[14], 1972년산 쌀중 평균 수은함량은 0.03 mg/kg[24]으로 보고되었다. 2005년-2006년 탑라이스 생산단지 및 인근 관행재배 지역에서 생산된 쌀 중 수은함량 0.0018 mg/kg은 1967년 및 1972년 자료와 비교해 볼 때 1/15-1/70 이하로 매우 낮았다. 또한, 최근까지 보고된 자료들과 비교 검토한 결과, 탑라이스 단지 및 인근 관행재배 지역에서 생산되는 쌀 중 수은함량은 매우 낮은 수준으로 쌀 섭취에 의한 수은중독 가능성은 희박할 것으로 판단되었다(Table 2).

현재, 쌀 중 수은의 잔류허용기준(MRL)은 전 세계적으로 대만이 0.05 mg/kg[25], 중국이 0.02 mg/kg[26]를 기준으로 삼고 있고, 미국은 밀에 대하여 1 mg/kg[38]을 잔류허용기준으로 설정해 관리하고 있다. 탑라이스 및 관행재배지역 쌀 중 수은함량은 중국 및 대만의 기준과 비교해 보았을 때 1/10-1/30 이하로 매우 적었으며, 본 연구에서 이용된 우리나라 쌀들 중에 이들 국가의 잔류허용기준(MRL)을 초과하는 시료는 1건도 없었다.

Table 2. Mercury contents of rice produce in Korea

Surveyor	Hg concentraion (mg/kg)	Remarks
Kim *et al*.(1972)[27]	0.13	white rice
Kee *et al*.(1972)[24]	0.03	white rice
Ko *et al*.(1972)[28]	0.01	white rice
Son *et al*.(1974)[29]	0.012	white rice
	0.014	brown rice
	0.095	rice bran
Lee *et al*.(1977)[30]	0.0089	brown rice
	0.0013	white rice
Kim *et al*.(1978)[31]	trace	unhulled rice
Yang *et al*.(1979)[32]	0.0053	brown rice
Kim *et al*.(1980)[33]	0.016	brown rice
	0.011	white rice
Kim *et al*.(1996)[34]	0.005	white rice
Park *et al*.(1997)[35]	0.0093	white rice
Kim *et al*.(2002)[22]	0.0042	white rice

토양잔류 수은의 식물체로 흡수이행

2006년 탑라이스 생산단지에서 채취한 시료를 각각 구분하여 토양, 볏짚, 왕겨, 현미, 쌀겨 및 백미 중 수은 함량을 분석한 결과 Table 4와 같았다. 논토양 중 수은함량은 0.02788 mg/kg 이었고, 볏짚은 0.00896 mg/kg, 정조는 0.00182 mg/kg, 왕겨는 0.00189 mg/kg, 현미는 0.00166 mg/kg, 쌀겨는 0.00452 mg/kg, 그리고 백미는 0.00145 mg/kg 이었다. 토양잔류 수은농도 대비 비율은 볏짚 0.321 >> 쌀겨 0.162 >> 왕겨 0.068 ≥ 정조 0.065 > 현미 0.060 >

Table 3. Distribution levels of mercury in soil, rice straw, unhulled rice, rice hulls, brown rice, rice bran and white rice from produced in Top-rice area.

Item	soil	rice straw	unhulled rice	rice hulls	brown rice	rice bran	polished rice
Hg (mg/kg)	0.02788 ±0.02078	0.00896 ±0.00296	0.00182 ±0.00073	0.00189 ±0.00086	0.00166 ±0.00083	0.00452 ±0.00265	0.00145 ±0.00035
Relative Hg	1.00	0.321	0.065	0.068	0.060	0.162	0.052
RSD(%)	74.5	33.0	39.9	45.5	49.9	58.6	24.5

백미 0.052 순으로 볏짚 및 쌀겨에 수은이 높게 분포하였다(Table 3).

田 등[36]은 미곡 중의 잔류수은의 화학적 형태에 관하여 조사한 결과 수은은 단백질과 결합되어 phenylmercury의 형태로서 단백질에 결합되어 있음을 확인하였는데, 이는 단백질 함량이 상대적으로 높은 쌀겨에 수은이 축적될 가능성이 있음을 의미하며, 본 연구에서도 같은 결과를 얻었다.

토양잔류 수은함량과 볏짚, 왕겨, 현미, 쌀겨 및 백미 중 수은함량간의 관계를 분석해 보면 토양잔류 수은농도에 비례하여 볏짚 >> 쌀겨 >> 왕겨 ≥ 정조 > 현미 > 백미 순으로 수은의 흡수 기울기가 큰 것을 알 수 있었다. 흡수기울기가 크다는 것은 토양 중 수은함량에 따라 흡수되는 정도가 크다는 것을 의미한다(Fig. 7).

Adriano(1986)는 카드뮴, 비소, 수은 등은 토양 중 함량과 작물 중 함량간에 정의 상관이 있으며, 일정 농도 이상이 되면 축적되는 경향이 낮아져 오히려 감소하는 경향을 보인다고 하였고[37], 중금속 첨가량 또는 토양 중 농도가 증가하면 흡수량도 증가하지만 현미의 농도는 일반적으로 그렇게 높아지지 않는다는 보고도 있다[20].

2006년 탑라이스 생산단지에서 채취한 벼를 건조한 뒤 각 부위별로 구분하여 무게를 측정한 결과 지상부 볏짚이 차지하는 비율이 51.2%로 가장 컸으며, 정조 48.8% > 현

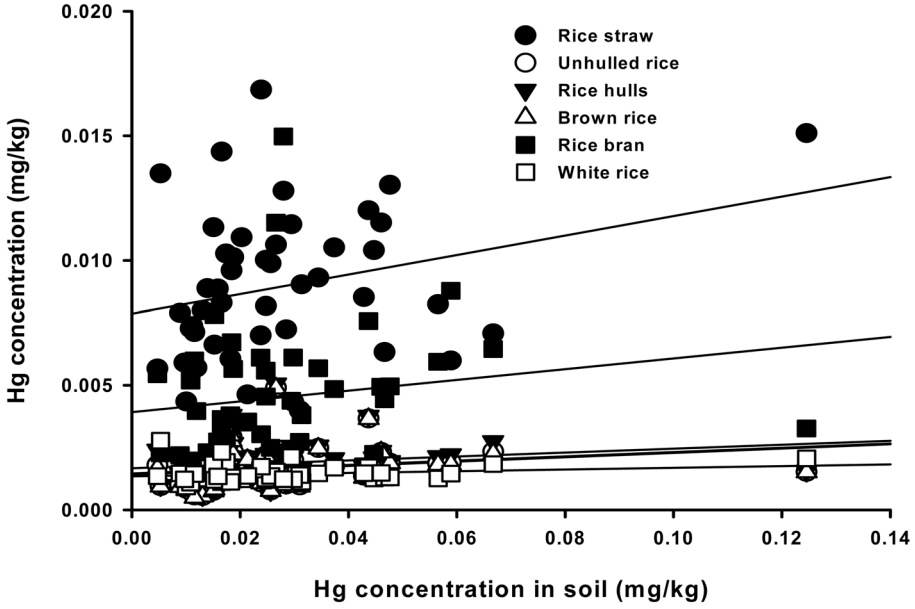

Fig. 7. Relationship mercury concentrations in soil and rice straw, unhulled rice, rice hulls, brown rice, rice brand and white rice from produced in Top-rice area.

Table 4. Relative distribution of mercury uptaken into rice plant per hill

Item	rice straw + unhulled rice	rice straw	unhulled rice	rice hulls	brown rice	rice bran	polished rice
Dry weight (g)	77.457 ±11.971	39.641 ±5.731	37.815 ±6.926	6.242 ±1.306	31.573 ±5.632	3.291 ±0.552	28.282 ±5.547
Relative dry weight (%)	100.0	51.2±2.7	48.8±2.7	8.1±0.7	40.8±2.2	4.2±0.8	36.5±2.4
Amount of Hg uptaken (mg)	4.24E-04	3.55E-04	6.87E-05	1.18E-05	5.24E-05	1.49E-05	4.10E-05
Relative distribution of Hg uptaken (%)	100.0	83.8±3.1	16.2±3.1	2.8±0.9	12.4±5.0	3.5±1.7	9.7±2.7

미 40.8% > 백미 36.5% > 왕겨 8.1% > 쌀겨 4.2% 순이었다(Table 4). 각 부위별로 측정한 건조중량에 부위별 수은농도를 곱하여 토양에서 지상부로 흡수된 수은량을 계산하였고, 지상부로 흡수된 값을 기준으로 각 부위별 상대적 수은분포량을 추정하였다.

지상부로 흡수된 수은 중 83.8%는 볏짚에 존재하였으며, 백미에는 지상부에 흡수된 수은량의 9.7%가 분포하는 것으로 나타났다. 한편, 쌀겨의 수은함량은 0.00452 mg/kg으로 현미의 0.00166 mg/kg, 백미의 0.00145 mg/kg 보다 높았으나 쌀 중에서 차지하는 상대적인 무게비가 작아 3.5%가 분포하는 것으로 나타났다(Table 4, 5). 본 연구에서도 벼 중의 각 부분의 잔류 수은 농도는 쌀겨가 가장 높고 다음이 왕겨, 현미, 백미 순으로 나타났으며 잔류수은의 절대량은 쌀겨 보다 백미가 많았다는 기존의 보고[20]와 유사한 경향이었다.

요 약

벼 재배 농업인들에게 기술지원을 하고, 소비자들에게 우리 쌀의 안전성을 널리 알리고자, 2005년-2006년 “탑라이스” 생산단지 및 인근 관행재배 지역에서 토양, 볏짚, 왕겨, 쌀겨, 현미, 및 백미 시료를 채취하여 미국 EPA 7473 규격을 만족시키는 자동수은분석기(DMA80)을 이용하여 분석한 결과 다음과 같았다.

우리나라 논 토양의 수은함량은 평균 0.031 mg/kg로 토양환경보전법상 우려기준(4 mg/kg)과 대책기준(10 mg/kg) 대비 1/25-1/65 이하로 매우 안전한 수준이었고, 탑라이스를 포함한 우리 쌀 중 수은잔류량은 평균 0.0018 mg/kg로, 중국의 잔류허용기준(MRL) 0.02 mg/kg 및 대만의 잔류허용기준(MRL) 0.05 mg/kg과 비교할 때 1/10-1/30 이하의 수준으로 수은에 의한 우리 쌀에 대한 안전성 우려는 거의 없는 것으로 나타났다. 2006년 탑라이스 생산단지 토양의 수은함량은 평균 0.02788 mg/kg, 볏짚 0.00896 mg/kg, 정조 0.00182 mg/kg, 왕겨 0.00189 mg/kg, 현미 0.00166 mg/kg, 쌀겨 0.00452 mg/kg, 그리고 백미 0.00145 mg/kg 수준이었다. 토양 중 수은농도 대비 비율로 계산해 보면 볏짚 0.321 >> 쌀겨 0.162 >> 왕겨 0.068 ≥ 정조 0.065 > 현미 0.060 > 백미 0.052 순으로 볏짚 및 쌀겨의 수은농도가 높았다. 잔류수은의 흡수이행 기울기는 볏짚 >> 쌀겨 >> 왕겨 ≥ 정조 > 현미 > 백미 순으로 기울기가 크다는 것은 상대적으로 흡수이행량이 크다는 것으로 해석되며, 지상부로 흡수된 총수은량의 83.8%는 볏짚에 존재하였으며, 정조에 16.2%, 왕겨에 2.8%, 현미에 12.4%, 쌀겨에 3.5% 및 백미 9.7%가 분포하였다. 결론적으로 “탑라이스” 생산단지를 포함한 인근의 관행재배지역 토양은 수은에 오염되지 않았으며, 여기에서 생산된 우리 쌀은 매우 안전한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Fujiki, M. and Tajima, S.: New Methods in Environmental Chemistry and Toxicology. International Academic Printing Co., Japan, p217 (1973).
2. Alexander, M.: *Advan. Appl. Microbiol.*, **14**, 44 (1974)
3. 上田雅彦, 田植 榮, 近澤紘史, 間鋳直典: 食品衛生雜誌, **19**, 105 (1978).
4. 이서래: 식품의 안전성 연구(제4장). 이화여대 출판부 (1993).
5. 이서래: 중금속의 오염현황과 위해성 평가. 식품영양정보(이화여대), **4**, 22-40 (1993).
6. 김길생, 이종옥, 소유섭, 서석춘, 강혜경, 류순영, 최병희, 권영범, 백덕우, 시도보건환경연구소: 식품 중의 미량금속에 관한 조사연구-연안 어패류 중의 미량금속 함유량에 관하여. 국립보건연구원보, **28**(2), 354-365 (1991).
7. 김길생, 이종옥, 소유섭, 서석춘, 강혜경, 류순영, 권영범, 이해빈: 식품 중의 미량금속에 관한 조사연구-농산물(곡류, 두류, 서류) 중의 미량금속 함유량에 관하여. 국립보건연구원보, **29**(2), 365-377 (1992).
8. Lee, S.R. and Lee, M.K.: Contamination and Risk Analysis of Heavy Metals in Korean Foods. *J. Fd Hyg. Safety*, **16**(4), 324-332 (2001).
9. Kim, K.H. and Kim, M.Y.: The Effect of Anthropogenic Sources on Temporal Distribution Characteristic of Total Gaseous Mercury. *Atmospheric Environment*, **34**(20), 3337-3347 (2000).
10. Campbell, N. A., Reece, J. B., and Mitchel, I. G.: Ecosystems, In Biology (4th Ed.) The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1145-1171 (1996).
11. Kim, K.H. and Jung, S.Y.: Mercury and Environmental Pollution. *DICER TechInfo Part I*, **3**(2), 13~25 (2004).
12. 가형로: 한국농업의 새로운 희망 『탑라이스』. 월간 농경과원예 2006(1), 106 (2006).
13. 농업과학기술원: 토양 및 식물체 분석법. 삼미기획 인쇄 (2000).
14. Entwisle, J.: The Determination of Mercury in Microwave Digests of Foodstuffs by ICP-MS. *American Laboratory* (Mar. 2004).
15. EPA Method 245.7 Mercury in Water by Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry. U.S. Environmental Protection Agency (Jan. 2001).
16. EPA Method 7473 Mercury in Solid and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry. U.S. Environmental Protection Agency (Jan. 1998).
17. 서윤수 외 5人: 국립환경연구소보, **3**, 177 (1981).
18. 서윤수 외 5人: 국립환경연구소보, **4**, 178 (1982).
19. Kim, B.Y., So, K.H., Kim, K.S. Cho, Cho, I.H, and Woo, K.D.: Survey on the Natural Heavy Metal Contents in Upland Soil and Crop Grains in Korea. *Res, Rept. RDA (S&F)*, **32**(2), 57-68 (1990).
20. 한국환경농학회: 환경농학(7장 토양 및 농산물 오염). 153-186 (1991).
21. Jung, G.B, Kim, W.I., and Hyeon, G.S.: Studies on the Distri-

bution of Background Concentrations of Heavy Metal of Soils in Korea. *NIAST Annual Reserach Report*, 24-31 (2000).
22. Kim, M.H., Sho, Y.S., Kim, E.J., Chung, S.Y., and Hong, M.K.: Studies on Heavy Metal Contamination of Agricultural Products, Soils and Irrigation Waters in Abandoned Mines. *J. Fd Hyg. Safety*, **17**(4), 178182 (2002).
23. Park, S.B., Kim, J.C., Park, Y.H., Jung, J.Y., Lee, S.Y., Shin, H.S., Park, C.K., Shin, Y.K., and Kim, B.U.: A Study on Contamination and Distribution of Cadmium (Cd) and Mercury (Hg) in Soil of Gangwon province. *Rep. Inst. Health & Environ.*, **16**, 173-183 (2005).
24. 이철, 김락배, 이인종: 한국원자력연구소 기술보고서, **2**(2), 567 (1975).
25. 臺灣 食品衛生標準(Taiwan Food Sanitary Standards), Standard for the Tolerance of Heavy Metals in Rice. (http://food.doh.gov.tw/chinese/ruler/hygiene_standed_e.htm)
26. 中和人民共和國國家標準(GB 2763-2005), 食品中污染物限量. 1-7 (2005). (http://www.foodmate.com)
27. Kim M.K., Woo, K.D., Han, S.S., Lee, S.H., and Do, U.H.: *Res, Rept. RDA*, **12**(3), 55 (1969).
28. 고인석, 노정배, 송철, 권혁희, 김길생, 정국희, 송창백: 국립보건연구원보, **9**, 389 (1972).
29. 손동헌, 허인회: 곡물 중의 중금속 함유량에 관한 연구 (I). 중앙대학교논문집, **19**, 75-84 (1974).
30. Lee, D.G. and Lim, K.T.: *J. KFN*, **6**(1), 73 (1977).
31. Kim, M.C., Shim, K.H. and Ha, Y.R.: On the Contents of Heavy Metals in Rice. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **10**(3), 299-305 (1978).
32. Yang, J.S.g, Lee, S.R. and Rho, C.S.: Mercury and Cadmium Concentrations of Brwon Rice Produced in Korea. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **11**(3), 176-181 (1979).
33. Kim, M.C., Shim, K.H., Chung, D.H., and Cho, K.T.: Heavy Metal Contents in Different Bran Layers of Rice. *J. Korean Agricultural Chemical Society*, **23**(3), 141-149 (1980).
34. 경상북도보건환경연구원, 김병태, 이경호, 김석균, 문성일, 이상조: 도내 농산물중 미량금속 함량에 관한 조사. 경상북도보건환경연구원, **8**, 42-54 (1996).
35. 박승우, 정중교, 이경호, 문성일, 신상천, 김병태, 경상북도보건환경연구원: 경북지역 농산물의 미량금속 함량에 관한 조사. 경상북도보건환경연구원, **9**, 15-26 (1997).
36. 田昌彦, 岩島淸: 日本公衆衛生阮研究報告書, **19**, 212 (1970).
37. Adriano, D. C.: Trace elements in the terrestrial environment - Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals (2nd Ed.), Spinger Verlag, USA, 263-314 (1986).
38. US FDA: Industry Activities Staff Booklet-Action Levels for Poisonous or Deleterious Substances in Human Food and Animal Feed. (2000). (http://www.cfsan.fda.gov/~lrd/fdaact.html#merc)