



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

식품별 비소 함유형태에 따른
체내흡수율 및 위해성 평가



연세대학교 보건대학원
환경보건학과
이 한 슬

식품별 비소 함유형태에 따른
체내흡수율 및 위해성 평가

지도 신 동 천 교수

이 논문을 보건학석사 학위논문으로 제출함



2015년 6월 일

연세대학교 보건대학원

환경보건학과

이 한 슬

이한슬의 보건학석사 학위논문을 인준함

심사위원 신 동 천 인

심사위원 임 영 욱 인

심사위원 양 지 연 인



연세대학교 보건대학원

2015년 6월 일

감사의 말씀

이제까지 도움을 주셨던 많은 분들께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

먼저, 환경보건이라는 학문 뿐 아니라 올바른 지식인의 생각과 방향을 보여 주신 신동천 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고, 환경보건이라는 학문을 공부할 수 있는 기회를 주시고 따뜻한 조언을 해주신 임영욱 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 아낌없이 배움의 기쁨을 알려주신 양지연 교수님께 진심으로 감사드립니다.

많은 도움을 주신 한국과학기술연구원 박경수 박사님께도 감사드립니다.

따뜻한 조언과 인간적인 배려를 해주신 이용진 박사님, 유쾌하고 강단 있는 카리스마를 가진 배문주 박사님께도 진심으로 감사한 마음을 올립니다. 바쁜 와중에 신경 많이 써주시고 따뜻한 말로 위로해주신 한국과학기술연구원 특성분석센터 이지연 선생님, 김지아 선생님께 감사드립니다.

연구소에서 셀 수 없이 많은 조언과 도움을 주신 김수환 선배님, 멀리서 지켜보고 있는 장지영 선배님, 독심을 보여주시는 멋진 홍승한 선배님, 부드러운 카리스마를 가진 이진우 선배님, 동기사랑 나라사랑 이상규 오빠, 황수희 사무관님, 또 다른 동기사랑 최원 오빠, 정 많고 눈물도 많은 여리디여린 예림이, 무한한 자비를 가진 혜림이, 석사방의 기둥 효정이, 귀엽고 착한 배려심을 가진 영은이, 말할수 없이 고마운 경은이, 똑부러지는 똑똑이 시은이, 많은 매력을 감추고 있는 세형이, 유들유들하면서도 눈빛이 살아있는 현정이, 언니같이 보듬는 마음이 이쁜 보미, 호탕한 웃음이 매력적인 기해에게 고맙다는 인사를 하고 싶습니다.

부족한 저에게 아낌없이 너무나 많이 도와주신 황지혜 팀장님, 언제 만나도 즐거운 김아름들이 선생님, 인자한 미소를 잃지 않으시는 강지연 팀장님, 많이 괴롭혀서 죄송한 따뜻한 마음을 가진 김소영 선생님께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

나의 룸메이저 늘 바른생활로 우러러보게 만드는 닥고 싶은 호경언니, 영원한 우정 민지, 유진, 민성, 우리 동기 큰주영 작은주영, 혜진, 영란, 영룡, 소중한 인연 용원에게 고마움을 표합니다. 서울생활을 즐겁게 시작할 수 있게 큰 도움 주신 고모님, 진한오빠, 환희언니께 감사드립니다. 연구소에서 새롭게 알게 된 소중한 인연 승현, 해안, 성훈, 슬취선생님, 늦은 밤의 sos에도 흔쾌히 도움주신 천사 같은 김선덕 선배님, 아낌없는 응원과 함께 든든한 버팀목이 되어주는 한구에게 감사의 마음을 전합니다.

끝으로, 늘 웃음으로 반겨주고 사랑해주는 한아언니, 수완형부, 누리, 큰 사랑으로 보듬어주시고 올바른 길로 인도해주시는 아버지, 어머니께 머리 숙여 감사드립니다.

2015년 6월
이한슬 사립

차 례

국 문 요 약	i
I. 서 론	1
II. 연구방법	4
1. 연구내용	4
2. 연구방법	5
2.1. 시료 선정	5
2.2. 인공소화모델구성	8
2.3. 총비소 및 무기비소 분석	12
2.4. 생체접근률(Bioaccessibility) 추정	18
2.5. 일일섭취노출량 및 위해성 평가	19
III. 연구결과	21
1. 식품 중 총비소 및 무기비소 분석	21
1.1. 총비소	21
1.2. 무기 비소	26
2. 식품 조리별 오염도 변이	30
3. 생체접근률(Bioaccessibility) 추정	33
5. 일일섭취노출량 및 위해도	38
IV. 고 찰	40
V. 결 론	44
참 고 문 헌	46
영 문 초 록	51

표 차 례

표 1. 인공소화용액 구성 성분 및 함량	9
표 2. 총비소 및 비소종 검출한계	16
표 3. 표준시험물질(SRM) 분석 농도	17
표 4. 국민건강영양조사 자료에 의한 연령군별 대상 식품별 식이섭취량	19
표 5. 대상 중금속의 인체 유해영향에 대한 용량 반응 정보	20
표 6. 백미와 현미 소화단계별 총비소 농도	22
표 7. 톳과 미역 소화단계별 총비소 농도	23
표 8. 백미와 현미의 무기비소 농도	27
표 9. 톳과 미역의 무기비소 농도	28
표 10. 식품 4종(백미, 현미, 톳, 미역)의 소화과정별 총비소 생체접근률 추정	34
표 11. 식품 4종(백미, 현미, 톳, 미역)의 소화과정별 무기비소 생체접근률 추정	36

그림 차례

그림 1. 연구의 틀	4
그림 2. 곡류의 원재료 및 소화단계별 분석대상 모식도	6
그림 3. 해조류의 원재료 및 소화단계별 분석대상 모식도	7
그림 4. 인공소화모델 시험법 모식도	10
그림 5. 인공소화액 제조사진	11
그림 6. 원재료 및 소화단계별 시료채취 사진	11
그림 7. 원재료 및 소화단계별 총비소 시료 전처리 및 기기분석 절차	13
그림 8. 원재료 및 소화단계별 무기비소 시료 전처리 및 기기분석 절차	15
그림 9. RIVM의 생체접근률 추정을 위한 인공 소화모델 모식도	18
그림 10. 백미와 현미의 원재료 및 조리·소화단계별 총비소 물질 이동량	25
그림 11. 톳과 미역의 원재료 및 조리·소화단계별 총비소 물질 이동량	25
그림 12. 백미와 현미의 원재료 및 조리·소화단계별 무기비소 물질 이동량	29
그림 13. 톳과 미역의 원재료 및 조리·소화단계별 무기비소 물질 이동량	29
그림 14. 원재료 대비 조리 및 소화단계별 총비소 함량 비율	31
그림 15. 원재료 대비 조리 및 소화 단계별 무기비소 함량 비율	32
그림 16. 대상 식품의 조리 및 소화단계별 총비소 생체접근률	35
그림 17. 대상 식품의 조리 및 소화단계별 무기비소 생체접근률	37
그림 18. 연령별 생체접근률 적용 유무에 따른 대상 식품의 총비소 일일섭취량 비교	38
그림 19. 연령별 생체접근률 적용유무에 따른 대상식품의 총비소 위해도 비교	39

국 문 요 약

식품 중 무기비소는 토양, 수계 등 환경매체로부터 자연적으로 이동되어 존재함에도 불구하고, 쌀과 같이 다소비 식품에서 검출됨으로서 사회문제가 되고 있다. JECFA 등 국제기구에서는 식품 중 중금속의 안전성을 확보하기 위해 위해성 평가 기법을 이용하여 인체 안전 기준을 설정하고 있다 특히 무기비소는 적합한 동물시험 자료가 불충분하여 무기비소가 고농도로 함유된 지하수를 장기간 복용하였던 역학 연구 결과를 바탕으로 식품 인체 안전 기준이 설정된 대표적인 물질이다. 그러나 물 중 이온 상태로 존재하는 무기비소의 체내 흡수율과 식이섭유에 함유된 식품에서의 흡수율 차이로 인해 식품 섭취 시 위해도는 과대평가될 우려가 존재한다.

이에 본 논문에서는 우리나라 특유의 식습관을 적용하여 무기비소 함유 가능성이 있는 곡류 중 백미, 현미와 해조류 중 툇, 미역을 선정하여 경구 섭취에 대한 생체접근률(bioaccessibility)을 추정하였다. RIVM에서 제시하고 있는 체외 소화모델 실험방법을 적용하여 조리 및 소화단계별 생체접근률을 평가하고, 이로 인한 일일섭취량을 추정하여 기존의 원재료 농도 기반의 노출량과 비교하였다. 대상 식품별로 각각 5개의 원재료를 구매하여 원재료에서부터 단순처리(세척), 단순가공(불림, 데침) 및 소화 단계로 나누어 총 5회 반복 시험을 하였다. 각 단계별 검출농도를 이용하여 원재료 100g 당 총비소 및 무기비소 함량을 산출함으로써 조리 및 소화단계별 물질 이동량(mass balance)을 평가하였다. 또한 국민건강영양 조사 자료(2008~2010)에서 산출된 대상 식품의 연령별 일일식이량을 이용하여 생체접근률 적용 유무에 따른 일일섭취노출량을 추정하여 JECFA의 인체안전수준(PTWI)과 비교하였다.

본 논문의 주요 결과는 다음과 같다. 각 식품 원재료에 대한 총비소 평균 농도는 백미 0.046 ± 0.004 mg/kg, 현미 0.401 ± 0.012 mg/kg, 툇 11.1 ± 1.0 mg/kg, 미역 9.0 ± 2.6 mg/kg 이었다. 무기비소는 백미

0.039±0.002 mg/kg, 현미 0.052±0.004 mg/kg, 톳 5.294±0.510 mg/kg 수준이었으며, 이는 식품의약품안전처의 조사 농도와 유사하였다(식품의약품 안전처 2012, 2013).

백미와 현미의 세척과정에 의해 원재료 농도 대비 총비소의 88%가 감소하였으며, 톳과 미역의 불림, 데침 과정에 의해서 총비소 27%가 감소하였다. 원재료 농도 대비 체외 소화모형에 의한 소화액 중 농도를 이용하여 추정된 생체접근률은 총비소의 경우 백미 57%, 현미 39%, 톳 15%, 미역 29%로 추정되었다. 무기비소의 생체접근률은 백미 50%, 현미 23%, 톳 21%로 추정되었다. 따라서 원재료 농도에 비해 소화과정에 의한 생체접근률을 보정한 위해도는 총비소 생체접근률 적용시 백미 43%, 현미 61%, 톳 84%, 미역 87%의 감소를 보였다.

이상의 연구결과를 통해 세척, 데침, 불림 등의 적절한 조리방법이 비소와 같은 수용성 유해물질을 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 관찰되었다. 또한 물 중 비소와는 달리, 식이섭유에 함유되어 있는 비소의 소화기를 통한 생체 접근률은 높지 않은 것으로 추정되었다. 따라서 현미, 톳 등과 같이 식이섭유 질이 높은 식품의 경우 원재료 농도 기반의 위해성 평가시 실제 노출수준보다 과대평가 될 가능성이 있었다. 특히 식이 섭유의 함량이 높을수록 생체접근률은 반대로 낮아지는 것으로 관찰된 바, 이를 이용한 건강한 식이습관을 제시할 수 있을 것이다.

핵심어: 비소, 무기비소, 인공소화모형, 생체접근률, 일일섭취노출량, 위해성 평가

I. 서론

식품 중 무기비소는 토양, 수계 등 환경매체로부터 자연적으로 이동되어 존재함에도 불구하고, 쌀과 같이 다소비 식품에서 검출됨으로서 사회문제가 되고 있다. JECFA(The joint FAO/WHO expert committee on food additives) 등 국제기구에서는 식품 중 중금속의 안전성을 확보하기 위해 위해성 평가 기법을 이용하여 인체 안전 기준을 설정하고 있다 특히 무기비소는 적합한 동물시험 자료가 불충분하여 무기비소가 고농도로 함유된 지하수를 장기간 복용하였던 역학 연구 결과를 바탕으로 식품 인체 안전 기준이 설정된 대표적인 물질이다. 그러나 물 중 이온 상태로 존재하는 무기비소의 체내 흡수율과 식이섭유에 함유된 식품에서의 흡수율 차이로 인해 식품 섭취시 위해도는 과대 평가될 우려가 존재한다.

식품의 경구섭취는 오염물질의 주요 인체 노출경로이다. 환경매체 중 식품 등의 경구노출로 인해 오염물질에 전이되는 수준은 매우 높은 것으로 알려져 있으며, 식품으로부터의 안전성 확보를 위한 기준제안이 주기적으로 검토되고, 위해평가의 과학적 평가 체계 도입으로 식품의 영향에 대한 위해평가가 이루어지고 있다.

2012년에는 국내에서 수입쌀 중 무기비소 검출 사건 등의 쌀 중 무기비소가 이슈화된 바 있으며, 2014년에는 국내에서 유럽으로 수출절차를 진행하였던 툿에서 해당국가의 기준치 이상의 무기비소가 검출되어 반환되는 사건이 발생한 바 있다. 식품 중의 무기비소에 대해 꾸준히 이슈화되어 왔으며, 식품으로부터 오는 비소의 영향에 대한 우려는 계속되고 있다.

비소는 유기형태와 무기형태를 모두 띠는 준금속(metalloid)물질로 환경에 널리 분포하고 있다(Smedley, Kinniburgh, 2002). 유기비소에 비해 무기비소가 독성이 더 큰 것으로 알려져 있으며, +5가 화합물 보다 +3가 화합물이 독성이 더 큰 것으로 알려져 있다(Lee et al., 1988; 배옥남 등, 2006).

일반적인 비소에 대한 인체노출 경로는 오염된 식품과 음용수의 섭취이며 (Del Razo et al., 2002; Meacher et al., 2002; Rahman, Ng, Naidu, 2009), 비소 위해평가에 있어서 먹는 물을 통한 평가가 대부분을 차지하고 있고, 이는 먹는 물에서는 비소가 주로 무기비소 형태를 이루고 있기 때문이다.

이미 세계적으로 무기비소의 독성영향에 대한 역학 자료가 많이 축적되어 독성이 입증되고 있으며, 음용수로 인한 비소 독성과 질병 이환의 연관성에 대해서는 역학적으로 충분히 증명된 결과가 학계에 많이 보고되고 있다 (Brandon, Janssen, Wit-Bos, 2014). 미국 환경보호청(US EPA, US environmental protection agency)에서는 식품 섭취로부터 체내에 들어오는 무기비소의 형태와, 먹는 물 음용으로부터 체내에 들어오는 무기비소 형태의 참고치(reference value)를 다르게 두었으나, 현재는 그 구분이 없어진 값으로 제시하고 있다(US EPA IRIS).

우리나라 국민건강영양조사의 식품섭취량 정보에 따르면, 주식인 쌀이 가장 높은 섭취량과 소비량을 보이고 있으며, 해조류의 섭취량의 경우, 미국 및 유럽 등의 다른 국가와 비교하였을때 상대적으로 높은 섭취량을 보인다(SCOOP, 2004). 식품의약품안전처 「식품중 중금속 안전관리연구」에서는 해산물 중 해조류에서 무기비소의 농도가 상대적으로 높게 나타나고 있다(식품의약품안전처, 2012).

식품에서의 비소는 유기비소 형태와 무기비소 형태 모두 검출된다. 특히 무기비소는 물에서 이온형태로 존재하며, 물에 용해된 상태로 존재하는 무기비소의 체내 흡수율은 약 50 ~ 95%로 보고되고 있다(ATSDR, 2007).

일반적으로 식품 중 중금속 위해 평가시, 오염도 적용부분에서 원재료 상태로 전처리 및 분석과정을 거쳐 분석된 중금속 농도를 사용하는데, 이는 실제 인체 노출량에 비해 과대평가 될 수 있는 소지가 있다. 매체별로 비소는 상이한 형태로 존재하며, 물에서의 거의 100%에 가까운 흡수와 달리 식품의 실제 체내흡수정도는 낮을 것으로 생각된다.

경구노출에서 가장 큰 영향을 미치는 식품에 대하여 사람이 섭취하였을 때 실제 체내에 들어올 수 있는 수준, 체내흡수율을 파악할 필요성이 있으며 이를 위해평가 혹은 기준 설정 시에 반영을 검토할 필요성이 있다.

이에 본 연구에서는 우리나라 특유의 식습관을 적용하여 주소비식품 및 대표적으로 문제를 제기할 수 있는 쌀과 해조류에 대하여 경구섭취에 대한 생체 접근률(bioaccessibility) 방법을 적용하여 체외 소화모델 실험을 진행하고 자 하며, 기존의 비소 위해평가 방법과 식이형태를 반영한 위해평가 및 생체 접근률을 고려한 위해평가를 비교분석하고자 한다.

본 연구에서는 우리나라 특유의 식습관을 적용하여, 무기비소가 함유될 수 있는 쌀과 해조류에서의 인공 소화액 중 비소 형태별 용출 농도에 따른 체내흡수율을 고려한 일일섭취노출량 및 위해 수준을 평가하고자 하였다.

본 연구의 세부 목적은 다음과 같다.

첫째, 무기비소 함유 가능성이 있는 쌀과 해조류에서의 총비소 및 무기비소 농도를 측정하며,

둘째, 조사 대상 식품의 단순처리(세척), 단순가공(불림, 데침) 및 소화단계별 총비소 및 무기비소 농도를 측정하여, 소화과정으로 인한 생체접근률을 평가하고,

셋째, 조사 대상 식품의 원재료 농도 대비 소화과정의 생체접근률을 고려한 비소의 일일섭취량 및 위해 저감 수준을 평가하였다.

II. 연구방법

1. 연구내용

본 연구에서는 우리나라 특유의 식습관을 적용하여 무기비소 함유 가능성이 있는 곡류 중 백미, 현미와 해조류 중 툇, 미역을 선정하여 경구 섭취에 대한 생체접근률(bioaccessibility)을 추정하였다. 대상 식품의 연령별 일일식이량을 이용하여 생체접근률 적용 유무에 따른 일일섭취노출량을 추정하여 JECFA의 인체안전수준(PTWI, Provisional tolerable weekly intake)과 비교하고자 한다.

본 연구의 틀은 다음과 같다.

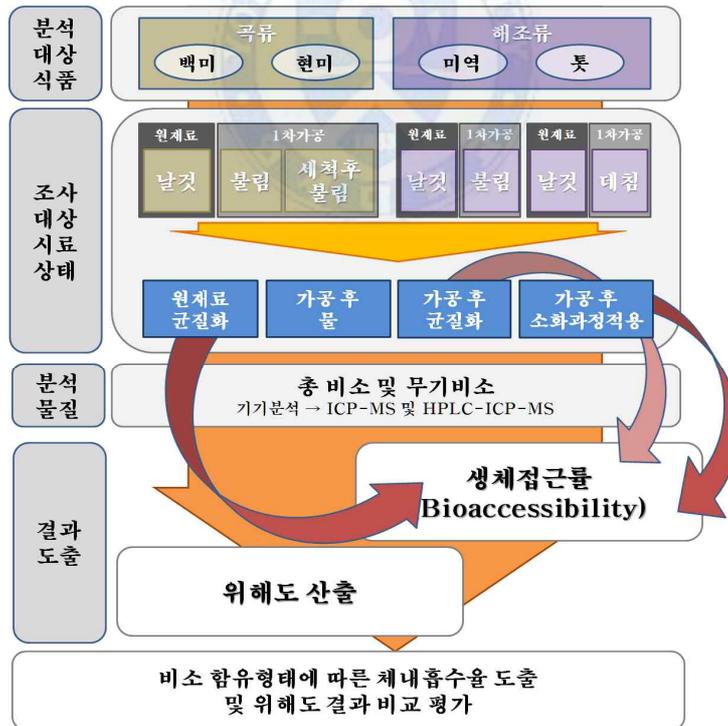


그림 1. 연구의 틀

2. 연구방법

2.1. 시료 선정

조사 대상 식품은 식품 중 중금속 안전관리 연구(2012, 2013)의 식품 중 중금속 분석결과에서 비소 농도 상위 식품을 1순위로 하였으며, 다음으로 국민건강영양조사의 식품섭취량 조사 결과에서 상위 섭취량으로 나타나는 식품군을 고려하였다. 이 중 국내외에서 비소와 무기비소의 오염도 및 독성영향 등으로 인해 문제화되고 꾸준히 언급되고 있는 식품인 곡류 중 백미와 현미, 해조류 중 미역과 툇을 선정하여 수집하였다.

수집 장소는 마트, 백화점 등 식품의약품안전처(2012, 2013)에서 원산지 상위농도순위에 포함되었던 시료를 수집하였다.

백미 300g 포장 식품, 현미 800g 포장 식품, 건미역 100g 포장 식품, 툇 230~260g 포장 식품으로 5개씩 구매하였으며, 툇은 생시료이므로 냉장 보관하였다. 무균 120 ml 통에 라벨한 후 곡류 중 백미, 현미, 해조류 중 툇은 50g씩 담았으며, 해조류 중 건미역은 20g씩 담아 보관하였다.

각 식품의 가공형태는 각 식품군의 비소 저감방안을 고려하였다. 곡류는 비소저감방안으로 세척이 제시되며, 해조류의 경우 소비저감을 방안으로 제시하고 있다. 곡류의 경우 날것, 그냥불린 것, 찐 것(밥)과 각각의 소화액을 적용한 것, 세척 및 불린 후 물 중 비소를 분석하였다. 해조류 툇의 경우 날 것, 씻은 후 데친 것과 각각의 소화액을 적용한 것, 데친 후 물 중 비소를 분석하였으며, 해조류 미역의 경우 날것, 불린 것과 각각의 소화액을 적용한 것, 불린 후 물 중 비소를 분석하였다.

분석 대상 시료에 대해 비소 함유에 대한 전반적인 경향성을 확인하기 위하여 다음 그림과 같이 분석 시료 순서를 정하였다(그림 2~3).

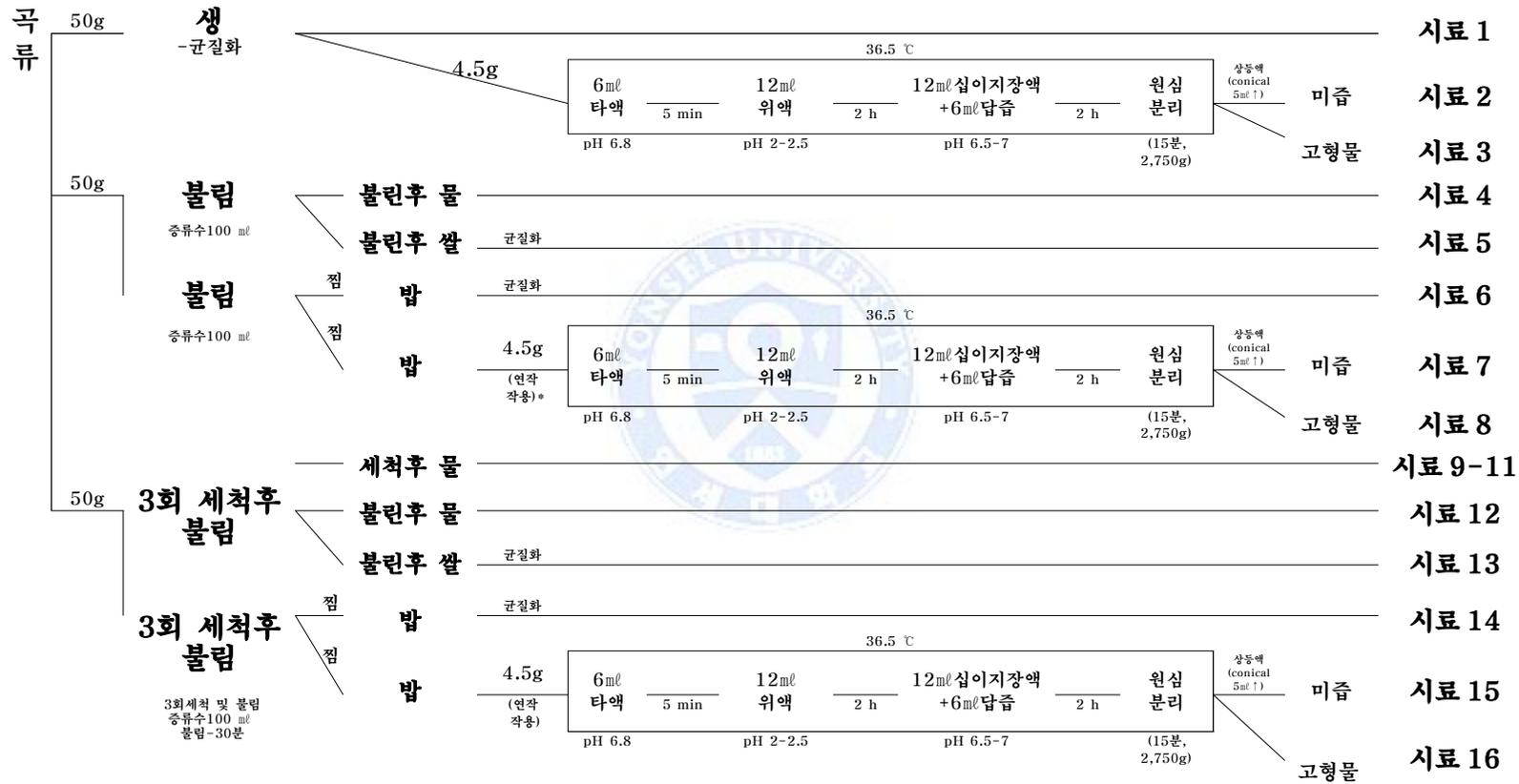


그림 2. 곡류의 원재료 및 소화단계별 분석대상 모식도

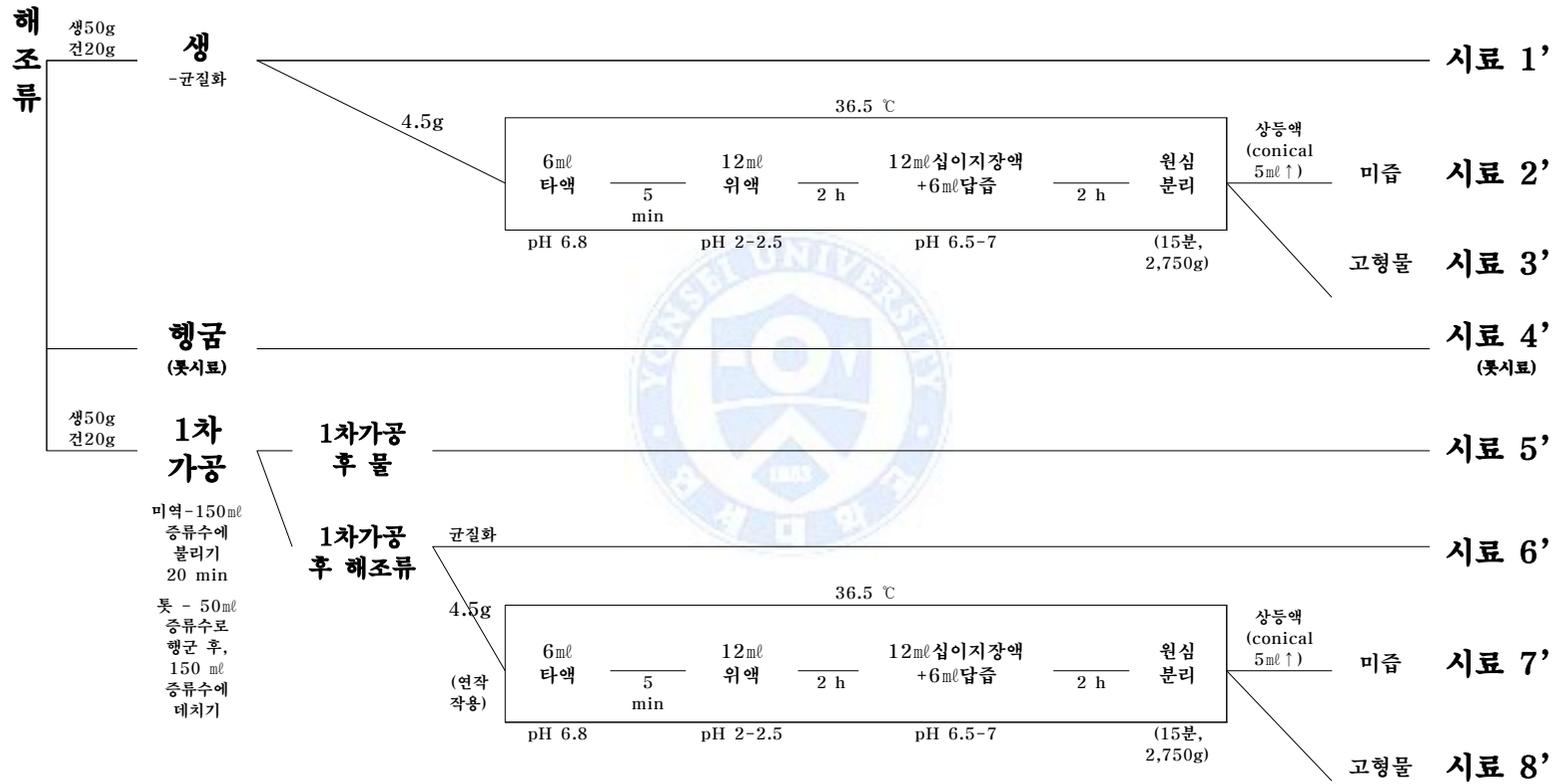


그림 3. 해조류의 원재료 및 소화단계별 분석대상 모식도

총비소는 곡류시료인 백미 현미 모두 시료 1부터 시료 16까지, 해조류시료 중 툃의 경우 시료1' 부터 시료 8' 까지, 해조류시료 중 미역의 경우 시료 1' 부터 시료7' 까지 모두 분석하였으며, 무기비소의 경우, 생체접근성 분석을 위하여 곡류에서 시료 1, 시료 2, 시료 15를, 해조류에서 시료1' , 시료 6' , 시료 7' 를 분석하였다(그림 2 ~ 3).

2.2. 인공소화모델구성

소화액을 적용한 식품 중 비소분석을 진행하기 위하여 인공소화액을 통한 추출시험을 진행하였다. 식품에 대한 위장관 실험은 네덜란드 국가공공보건환경연구원(RIVM, National institute for public health and the environment)에서 2004년에 발간한 '인공소화모형을 이용한 평가방법 개발 보고서' 의 방법을 따랐다(RIVM, 2004).

인공소화액 제조는 Oomen 등(2003) 및 Versantvoort 등(2005)의 체외 소화에 대한 인공소화액 구성성분 및 함량을 참고하였다. 소화기관인 입, 위, 장에 대한 인공소화액은 각각 타액, 위액, 십이지장액 및 담즙을 제조하여 적용하였다.

연구대상시료 중 단순 가공 시료의 인공소화액 추출 시험의 경우, 타액을 적용하기 전 연작작용을 가정하였다.

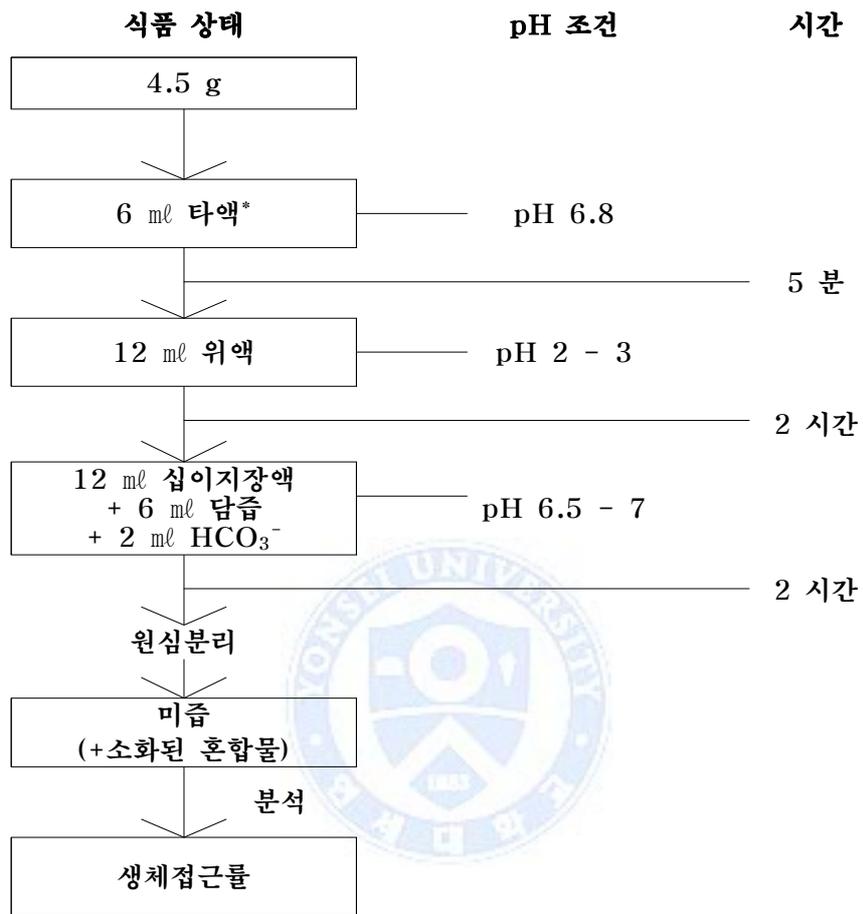
인공소화모델이 적용되는 연구 대상 시료에 대하여 250 ml 삼각플라스크에 4.5g을 취하였다. 피펫(pipet)으로 인공타액 6 ml을 취하여 삼각플라스크에 추가한 후, 체온(36.5 °C)으로 예열된 배양기(incubator) 안의 진탕기(shaker)에서 55 rpm으로 5분간 진탕하였다. 피펫(pipet)으로 인공위액 12 ml을 취하여 삼각플라스크에 추가한 후, 동일한 조건에서 2시간 진탕하였다. 피펫(pipet)으로 인공십이지장액 12 ml을 취하여 삼각플라스크에 추가한 후 바로 인공담즙 6 ml을 취하여 삼각플라스크에 추가하고 동일한 조건에서 2시간 진탕하였다. 인공소화액과정을 끝낸 시료는 50 ml 원뿔 관(conical

tube)에 담아 15분간 2,750 G 조건에서 원심분리한 후 상등액과 고형물을 분리하여 50 ml 원뿔 관(conical tube)에 옮겨 담은 후 냉장보관하였다.

표 1. 인공소화용액 구성 성분 및 함량

타액		위액		십이지장액		담즙	
구성요소	용량	구성요소	용량	구성요소	용량	구성요소	용량
inorganic solution							
KCl	89.6 g/L	NaCl	175.3 g/L	NaCl	175.3 g/L	NaCl	175.3 g/L
	10 ml		15.7 ml		40 ml		30 ml
KSCN	20 g/L	N a H ₂ P O ₄	88.8 g/L	NaHCO ₃	84.7 g/L	NaHCO ₃	84.7 g/L
	10 ml		3.0 ml		40 ml		68.3 ml
N a H ₂ P O ₄	88.8 g/L	KCl	89.6 g/L	KH ₂ PO ₄	8 g/L	KCl	89.6 g/L
	10 ml		9.2 ml		10 ml		4.2 ml
Na ₂ SO ₄	57 g/L*	CaCl ₂ · 2H ₂ O	22.2 g/L	KCl	89.6 g/L	HCl	37 %
	10 ml		18 ml		6.3 ml		200 µl
NaCl	17.3 g/L	NH ₄ Cl	30.6 g/L	MgCl ₂	5 g/L	-	-
	1.7 ml		10 ml		10 ml		
NaHCO ₃	84.7 g/L*	HCl	37 %	HCl	37 %	180 µl	-
	20 ml		8.3 ml		µl		-
Organic solution							
urea	25 g/L	glucose	65 g/L	urea	25 g/L	urea	25 g/L
	8 ml		10 ml		4 ml		10 ml
-	-	glucuronic acid	2 g/L	-	-	-	-
			10 ml				
-	-	urea	25 g/L	-	-	-	-
			3.4 ml				
-	-	glucoseamine hydro-chloride	33 g/L	-	-	-	-
			10 ml				
Add to mixture organic+inorganic solution							
α-amylase	145 mg	BSA	1g	CaCl ₂ · 2H ₂ O	22.2 g/L	CaCl ₂ · 2H ₂ O	22.2 g/L
			1g		9 ml		10 ml
uric acid	15 mg	pepsin	1g	BSA	1 g	BSA	1.8 g
			1g		1 g		1.8 g
mucin	50 mg	mucin	3g	pancreatin	3 g	bile	6 g
			3g		3 g		6 g
-	-	-	-	lipase	0.5 g	-	-
					0.5 g		
pH							
6.5 ± 0.2		1.07 ± 0.07		7.8 ± 0.2		8.0 ± 0.2	

출처 : Oomen et al. (2004), * 출처 : Versantvoort et al. (2005)



* 와류진탕기 조건 : 5 min, 55 rpm, 35 ~ 39 °C

그림 4. 인공소화모델 시험법 모식도

(출처 : Versantvoort et al., 2005; Brandon, Janssen, Wit-Bos, 2014)



그림 5. 인공소화액 제조사진

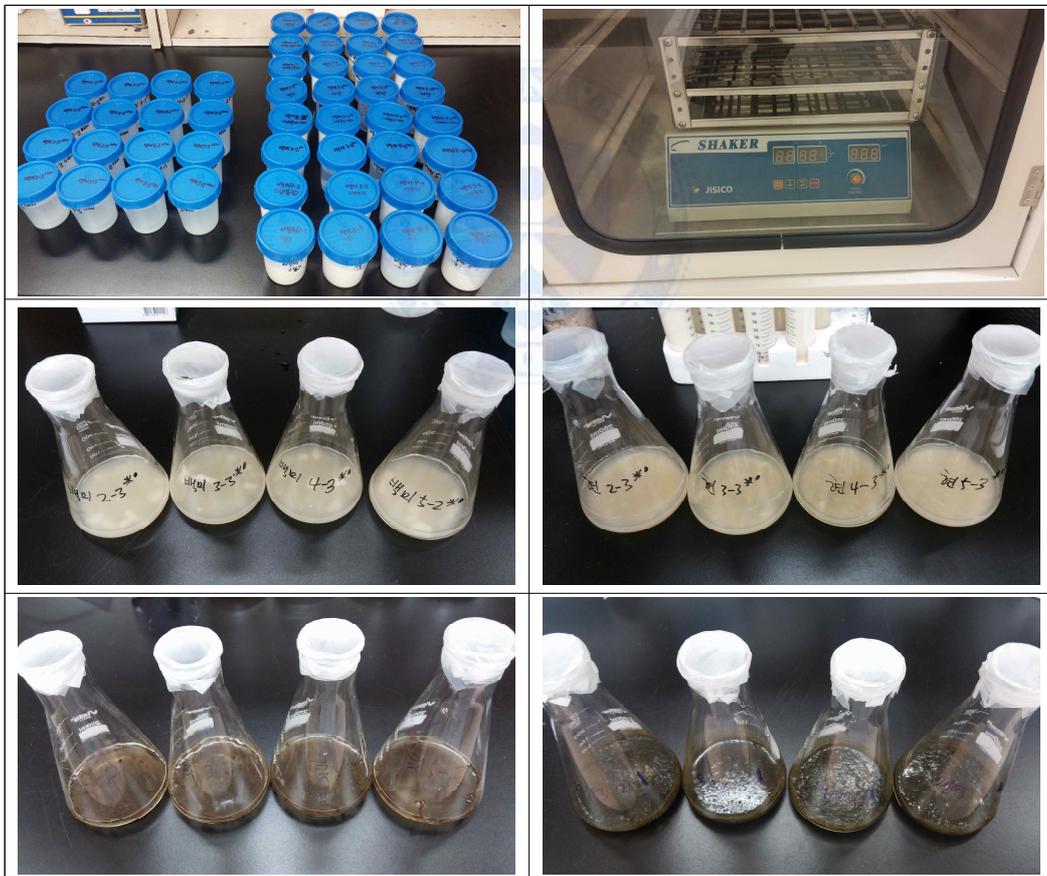


그림 6. 원재료 및 소화단계별 시료채취 사진

2.3. 총비소 및 무기비소 분석

2.3.1. 총비소 분석

식품 중 총비소 분석법은 식품의약품안전처 식품공전의 시험법을 따랐다.

시험검체는 쌀과 톳의 경우 0.5 g을, 건미역의 경우 0.1 g을 용기(Vessel)에 취하며, 세척수, 불린물, 소화과정 적용 후 원심분리한 상층액의 경우 희석률을 고려하여 10 g을 취한 후, 질산(HNO_3) 7 mL과 과산화수소(H_2O_2) 1 mL를 추가하여 가열판(hot plate)에서 150 °C로 40분간 예비 분해하였다. 예비전처리과정에서 산이 1 mL 증발하므로, 예비분해 후 용기(Vessel)를 충분히 식혀 준 다음 뚜껑을 살짝 열어 질산(HNO_3)을 1mL 추가하였다. 기기설정을 완료한 마이크로파 실험장치(microwave)에 질산처리 완료한 용기(Vessel)를 넣어 유기물을 용해시켰다. 부피플라스크를 사용하여 충분히 식힌 용액에 초순수를 추가하여 25 mL을 만들었다. 0.45 μm 막거르개(membrane filter)로 여과하여 시험용액으로 하며, 유도결합 플라즈마 질량 분석기(ICP-MS, Inductively coupled plasma-mass spectrometer, NEXION 300D, PerkinElmer, USA)로 분석하였다.



그림 7. 원재료 및 소화단계별 총비소 시료 전처리 및 기기분석 절차

2.3.2. 무기비소 분석

식품 중 쌀의 무기비소 분석법은 식품의약품안전처의 쌀 중 무기비소 시험법(고시예고)을 따랐으며, 해조류의 무기비소 분석법은 식품 중 중금속안전관리 연구(2012)의 해산물 중 해조류 비소화학종 분석방법을 따랐다.

곡류의 경우, 1 g을 원뿔 관(conical tube)에 담은 후, 5mM Malonic acid 10 ml을 추가하여 5분간 섞었다. 80℃ 물중탕기(water bath)에서 30분간 가열추출 후 1분간 초음파 추출하며 이 과정을 4회 반복한 후 최종 5분간 초음파 추출하였다. 이후 4℃냉장고에서 2시간 냉각한 후 10분간 3,000 G에서 원심분리하였다. 상층액을 0.45 μm 막거르개(membrane filter)로 여과하여 시험용액으로 하며, 고성능 액체 크로마토그래피 유도결합 플라즈마 질량 분석기(HPLC-ICP-MS, High performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometer, Series 200, PerkinElmer, USA)로 분석하였다.

해조류의 경우, 0.5 g을 원뿔 관(conical tube)에 담은 후, 초순수 10 ml을 추가하여 80℃로 1시간 동안 초음파 추출하였다. 이후 10분간 3,000 G에서 원심분리한 후 상층액을 0.2 μl 주사기 여과기(syringe filter)로 여과하여 시험용액으로 하였다. 이때 시료가 붙어 상층액 분리가 어려운 경우 초순수를 추가하여 원심분리한 후 고성능 액체 크로마토그래피 유도결합 플라즈마 질량 분석기(HPLC-ICP-MS, Series 200, PerkinElmer, USA)로 분석하였다.

<p>시료 전처리</p>	<p>전처리 용액과 적절히 섞어주는 과정</p>
<p>물중탕기 추출 과정</p>	<p>음파처리(Sonication) 추출 과정</p>
<p>전처리에 이용한 나일론 필터</p>	<p>HPLC-ICP-MS를 사용한 기기분석</p>

그림 8. 원재료 및 소화단계별 무기비소 시료 전처리 및 기기분석 절차

2.3.3. 시험분석 정도관리

이미 농도를 알고 있는 표준물질(SRM, Standard reference material)을 활용하여 분석결과에 대한 신뢰도를 확보하여 유효성을 검증하였다. 인증 표준물질로는 미국국립표준연구소(NIST, National institute of standards and technology)에서 제공하는 쌀가루(Standard reference material 1568b, rice flour)를 사용하였다. 전처리부터 기기측정까지 전 과정을 동일하게 수행하였다.

○ 검출한계

검출한계(LOD, Limit of detection)는 5개의 바탕값(blank)을 측정 한 후 표준편차를 계산하여 이 값의 3배를 검출한계로, 정량한계(LOQ, Limit of quantification)는 위 표준편차의 10배를 검출한계로 하였다.

표 2. 총비소 및 비소종 검출한계

대상 식품군	총비소 및 비소종 검출한계 [mg/kg]				
	총비소	As(III)	As(V)	DMA ¹⁾	MMA ²⁾
곡류	0.005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003
해조류	0.005	0.0112	0.0238	0.0732	0.0098

1) DMA, Dimethylarsinic acid

2) MMA, Monomethylarsonic acid

○ 재현성 및 회수율 결과

정밀도에 사용되는 상대표준편차(RSD, Relative standard deviation)은 분석결과의 재현성을 나타낸다. 표준인증물질 SRM[®]-1568b(NIST, USA)의 분석은 곡류 무기비소 분석 전처리 방법을 따랐으며, HPLC-ICP-MS를 사용하여 분석하였다. 표준물질에 대한 3가 비소, 5가 비소, 무기비소 및 DMA(Dimethylarsinic acid), MMA(Monomethyl-*arsonic acid*) 측정 결과는 미국국립표준연구소에서 제시하고 있는 해당 표준물질 농도 범위에 들었으며, 비소 종별 평균 회수율은 94.6%로 평가되었다.

표 3. 표준시험물질(SRM) 분석 농도

구분	무기비소	DMA ¹⁾	MMA ²⁾
인증 농도 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	92 \pm 10	180 \pm 12	11.6 \pm 3.5
검출 농도 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	87	145.3	9.2
회수율 (%)	94.6	80.7	79.3
상대표준편차 (RSD) (%)	2.5	2.5	2.5

1) DMA, Dimethylarsinic acid

2) MMA, Monomethylarsonic acid

2.4. 생체접근률(Bioaccessibility) 추정

인공소화모형 개발로 인하여 식품섭취를 하였을 때 체내로 들어올 수 있는 정도를 비율로 추정할 수 있다. 인공소화모형은 인간이 식품을 섭취 한 이후의 인체 위장관을 재현한 모델로 가장 빠른 소화 조건을 가정하였다. 생체접근률(bioaccessibility)은 위장관 과정을 거친 후 체내로 들어오는 비율을 말한다. 경구 노출된 물질들은 주로 소장에서 체내로 흡수되므로, 생체접근률은 소화과정을 거친 후의 액체인 카임(Chyme)의 양을 적용하여 도출한다 (RIVM, 2004).

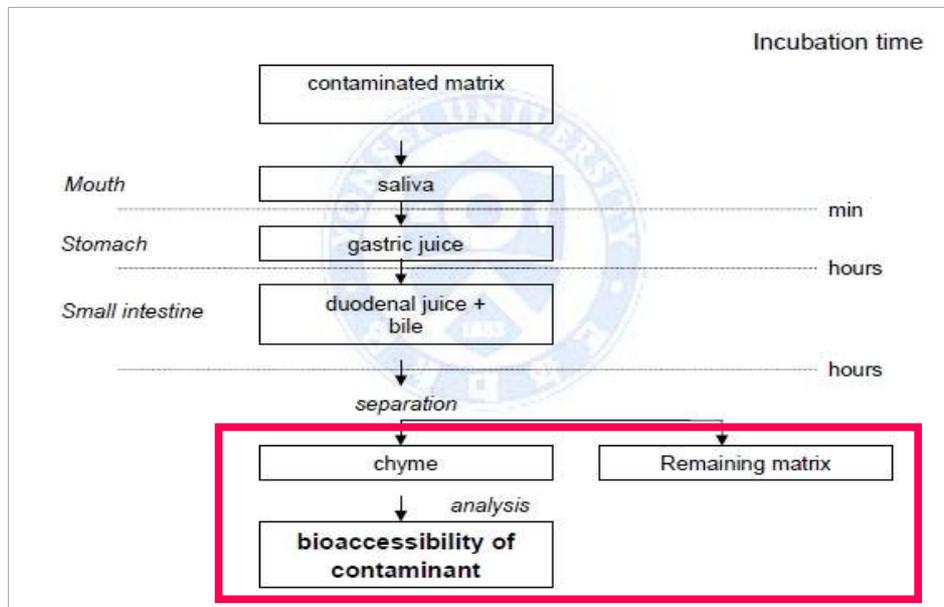


그림 9. RIVM의 생체접근률 추정을 위한 인공 소화모델 모식도
(출처 : RIVM, 2004)

조사 대상 시료에서 비소의 생체접근률은 아래 식으로 계산할 수 있다.

$$\text{Bioaccessibility}(\%) = \frac{\text{카임(Chyme)에서의 비소농도}}{\text{시료에서의 비소농도}} \times 100$$

2.5. 일일섭취노출량 및 위해성 평가

식품의 경구섭취를 통해 비소에 노출되게 되며, 국민건강영양조사의 개별 식품별 식이섭취량조사 결과에서 곡류 중 백미, 현미, 해조류 중 톳, 미역의 섭취량을 산출하였다.

주요 소비 식품인 곡류 뿐 아니라 해조류에서도 연령별 식이형태가 달리 확인되는 바, 섭취 연령군을 전연령, 3~6세, 7~12세, 13~19세, 20~64세, 65세 이상, 성인으로 나누어 연령별 식이형태에 따른 노출평가를 하였다.

표 4. 국민건강영양조사 자료에 의한 연령군별 대상 식품별 식이섭취량

식품 정보	연령군 별 식이섭취량 [g/day]*							성인
	전연령	2세 이하	3-6 세	7-12 세	13-19 세	20-64 세	65세 이상	
체중 [kg]	57.3	12.5	19.5	37.1	58.8	63.8	57.7	62.9
평균 식이섭취량								
백미	179.8	85.5	117.9	167.6	172.7	182.6	216.4	187.3
현미	4.0	2.2	3.2	4.8	3.1	4.1	3.6	4.1
톳	0.9	0.0	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	0.1
미역	8.4	4.7	6.2	6.0	5.7	9.2	9.3	9.2
95 th % 식이섭취량								
백미	364.7	179.4	224.1	305.8	364.9	372.7	397.2	379.5
현미	23.0	10.4	18.4	25.0	21.4	25.5	20.5	24.3
톳	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
미역	53.4	31.8	37.6	42.6	38.4	59.1	59.5	59.1

* 출처 - 국민건강영양조사 (2008-2010)

위해평가는 위험성확인(Hazard identification), 노출 평가(exposure assessment), 용량반응평가(dose-response assessment), 위험도 결정(risk characterization)절차로 진행된다(US NAS, 1983).

비소의 경우 형태에 따라 경구노출에 대하여 비발암 독성 영향과 발암 독성 영향이 모두 확인 된다(US EPA, 1993; US EPA, 1998 ; EFSA 2009; ATSDR, 2007).

노출평가를 통해 식품으로부터의 총비소 및 무기비소 섭취량을 선정하여 위해평가에 적용하였다. JECFA에서 무기비소의 PTWI를 2011년에 철회하였기 때문에 정량적인 위해 평가 대상에서 제외하였으며, 총비소의 섭취 위험도는 동물 실험 자료를 참고하여 JECFA (2000)에서 제시하고 있는 TDI, 50 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$ 를 인체안전기준으로 하여 산출하였다.

표 5. 대상 중금속의 인체 유해영향에 대한 용량 반응 정보

분석 대상 물질	대상군	Endpoint 및 POD, 산출근거	인체섭취 노출 권고기준	최종 적용 TDI	자료 출처
총비소	동물 실험	○ 실험동물(rat)의 섭취 노출 실험(만성/반복노출) ○ Endpoint : 설사 등의 위장관계 병변 ○ POD : 12mg - g - methylarsinate (BMDL ₁₀)	350 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-week}$ (PTWI)	50 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$	JECFA (2000)
무기 비소	성인	○ 음용수 중 비소 고노출군에 대한 역학 연구 ○ Endpoint : 피부, 신장, 폐암 ○ POD : 3.0 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$ (2~7 for dietary) (BMDL0.5)	철회 15 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-week}$ (PTWI)	-	JECFA (2011)

Ⅲ. 연구결과

1. 식품 중 총비소 및 무기비소 분석

1.1. 총비소

조사 대상 식품에 대해 원재료 시료에서부터 1차 가공시료까지 총 5회 반복 분석하였으며, 백미 74개, 현미 74개, 툇 37개, 미역 33개를 분석하여 총비소 분석 갯수는 총 218개이다.

백미의 각 단계별 총비소 검출 농도는 원재료 $46.4 \pm 4.1 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척수(3회) $10.4 \pm 3.3 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척 후 불린 물 $2.7 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척 후 불린 쌀 $27.7 \pm 4.1 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척 후 밥 $17.2 \pm 5.9 \mu\text{g}/\text{kg}$ 이었다. 이에 비해 소화액에서 검출된 총비소 농도는 원재료 소화액은 $13.0 \pm 13.7 \mu\text{g}/\text{kg}$, 밥(세척) $76.0 \pm 23.9 \mu\text{g}/\text{kg}$, 밥(미세척) $77.5 \pm 35.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ 이었다.

현미의 각 단계별 총비소 농도는 원재료 $40.9 \pm 12.0 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척수(3회) $5.74 \pm 4.2 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척 후 불린 물 $2.1 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척 후 불린 쌀 $39.4 \pm 9.7 \mu\text{g}/\text{kg}$, 세척 후 밥 $22.3 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{kg}$ 이었다. 이에 비해 소화액에서 검출된 총비소 농도는 원재료 소화액은 $21.0 \pm 33.2 \mu\text{g}/\text{kg}$, 밥(세척) $98.5 \pm 40.0 \mu\text{g}/\text{kg}$, 밥(미세척) $75.4 \pm 40.1 \mu\text{g}/\text{kg}$ 이었다.

툇의 원재료, 행굼물, 데침물, 데친 툇, 소화액 중 총비소 평균 농도는 11.1, 1.0, 3.5, 4.3, 1.9 mg/kg이었다. 미역은 원재료, 불림물, 불린 미역, 소화액 중 총비소 평균 농도는 9.0, 6.6, 5.9, 2.3 mg/kg이었다.

조사 대상 시료의 인공 소화 모형에 적용 후 잔류된 식이섬유에 남아 있는 총비소 농도는 백미(밥) $7.7 \pm 1.9 \mu\text{g}/\text{kg}$, 현미(밥) $12.7 \pm 3.4 \mu\text{g}/\text{kg}$ 이었다. 해조류의 소화 후 잔류물 중 총비소 농도는 툇(데침) $2.7 \pm 0.4 \text{ mg}/\text{kg}$ 이고 미역(불림)은 $3.7 \pm 1.6 \text{ mg}/\text{kg}$ 이었다.

표 6. 백미와 현미 소화단계별 총비소 농도

No	시료처리	백미 총 비소 농도 [$\mu\text{g}/\text{kg}$]				현미 총 비소 농도 [$\mu\text{g}/\text{kg}$]			
		N	Mean	SD	Range	N	Mean	SD	Range
원재료									
1	원재료	5	46.420	4.136	40.900-51.500	5	40.940	12.037	28.000-59.100
2	소화모델 적용-흡수	5	13.040	13.712	5.130-37.450	5	21.013	33.236	2.891-80.316
3	소화모델 적용-배설	4	12.725	0.877	11.600-13.700	4	9.825	1.242	8.700-10.900
세척없이 1차 가공* 시료									
4	불린 후 물	5	3.876	1.953	2.366-6.703	5	2.291	1.109	1.064-3.705
5	불린 후 쌀	5	29.040	1.839	27.100-31.200	5	35.140	8.006	29.700-49.300
6	불린 후 찜 (밥)	5	18.640	2.743	14.200-21.600	5	25.700	8.223	20.500-40.300
7	밥 소화모델 적용-흡수	5	77.494	35.481	38.577-118.675	5	75.423	40.126	34.676-142.410
8	밥 소화모델 적용-배설	4	8.325	0.822	7.100-8.800	4	14.400	4.073	10.600-19.700
3회 세척 후 1차 가공 시료									
9	1차 세척 물	4	4.120	0.446	3.466-4.441	4	1.872	1.168	0.515-2.872
10	2차 세척 물	4	3.535	1.632	1.640-5.556	4	2.407	1.914	0.661-4.574
11	3차 세척 물	4	2.814	1.312	1.041-4.095	4	1.588	1.207	0.227-2.606
12	불린 후 물	5	2.747	1.308	1.679-4.913	5	2.130	1.270	0.364-3.443
13	불린 후 쌀	5	27.760	4.126	20.700-31.100	5	39.360	9.705	33.300-56.600
14	불린 후 찜 (밥)	5	17.280	5.977	11.000-27.200	4	22.325	1.632	20.400-24.000
15	밥 소화모델 적용-흡수	5	76.043	23.921	37.643-102.394	5	98.479	40.001	63.069-147.077
16	밥 소화모델 적용-배설	4	7.700	1.920	6.400-10.500	4	12.675	3.355	10.100-17.300

* 1차 가공 ; 불린 후 밥짓기

표 7. 톳과 미역 소화단계별 총비소 농도

No	시료처리	N	톳 총 비소 농도 [mg/kg]			미역 총 비소 농도 [mg/kg]			
			Mean	SD	Range	N	Mean	SD	Range
원재료									
1	원재료	5	11.089	1.043	9.553-12.468	5	9.001	2.580	5.942-12.935
2	소화모델 적용-흡수	5	0.423	0.186	0.270-0.740	5	0.822	0.755	0.430-2.172
3	소화모델 적용-배설	4	1.667	0.224	1.378-1.911	4	2.712	0.205	2.522-2.902
1차 가공* 시료									
4	행군 후 물	4	0.987	0.021	0.968-1.008	-	-	-	-
5	가공 후 물	5	3.475	1.078	1.584-4.213	5	6.572	2.721	1.843-8.653
6	가공 후 해조류	5	4.340	0.706	3.540-5.141	5	5.897	0.864	4.504-6.869
7	소화모델 적용-흡수	5	1.879	0.909	0.312-2.459	5	2.285	1.132	0.303-3.066
8	소화모델 적용-배설	4	2.704	0.377	2.206-3.016	4	3.710	1.644	2.772-6.166

* 1차 가공 ; 톳-데침, 미역-불림

질량에 대한 흐름을 파악하기 위해 식품의 가공과정에서 적용되는 희석배율, 최종적용용량 등을 고려하여 물질 이동량(Mass balance)을 추정하였다.

원재료 100 g 당 총비소 함량에 대한 물질 이동량 추정하였으며, 미역의 경우 원재료를 수분이 있는 생시료 100 g에 대한 비소 함량을 산출하였다.

백미 중 원재료, 세척 후 쌀, 불린 쌀, 조리된 밥에서의 총비소 물질 이동량은 $3.3 \sim 4.6 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$ 이며, 세척수 및 불린 물에서는 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$, 소화액에서는 $2.5 \sim 3.4 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$, 소화 후 잔류물에서는 $1.3 \sim 1.8 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$ 이었다.

현미 중 원재료, 세척 후 쌀, 불린 쌀, 조리된 밥에서의 총비소 물질 이동량은 $3.7 \sim 4.1 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$ 이며, 세척수 및 불린 물에서는 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$, 소화액에서는 $1.3 \sim 2.8 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$, 소화 후 잔류물에서는 $1.0 \sim 2.3 \mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$ 이었다.

백미와 현미에 함유된 총비소 농도는 유사하였음에도 불구하고, 소화과정에서의 생체접근율이 백미에 비해 현저히 낮아 소화액에서의 총비소 농도는 오히려 백미로 지은 밥에 비해 낮은 양으로 평가되었다(그림 10).

투스 중 원재료의 총비소 양은 $1.11 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$ 이며, 세척수 $0.16 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$, 데침물 $1.07 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$, 데친 투스는 $0.44 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$, 소화액에서는 $0.22 \sim 0.34 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$, 소화 잔류물에서는 $0.17 \sim 0.28 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$ 이었다.

미역 중 원재료의 총비소 양은 $0.90 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$ 이며, 불린 물 $0.43 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$, 불린 미역은 $0.13 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$, 소화액에서는 $0.11 \sim 0.66 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$, 소화 잔류물에서는 $0.08 \sim 0.27 \text{ mg}/100 \text{ g-brown algae}$ 이었다.

투스과 해조류 중 총비소는 데치거나 불린 후 소화액 중 물질 이동량보다 소화 잔류물에서의 물질 이동량이 유사하거나 높았으며, 이는 원재료 함유된 총비소의 소화 흡수양은 크지 않을 것임을 추정할 수 있었다(그림 11).

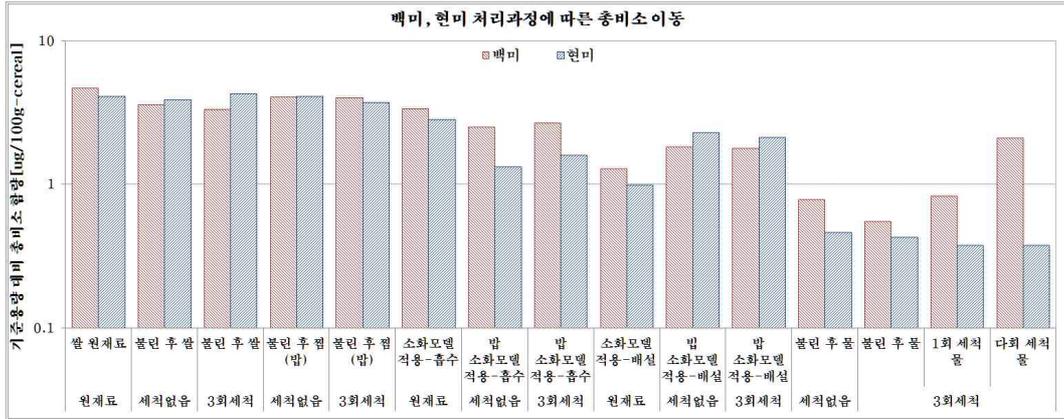


그림 10. 백미와 현미의 원재료 및 조리·소화단계별 총비소 물질 이동량

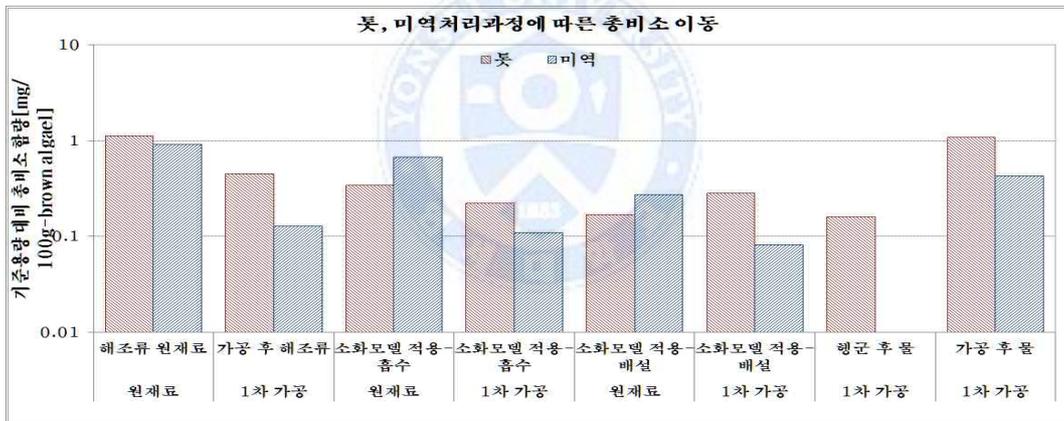


그림 11. 툇과 미역의 원재료 및 조리·소화단계별 총비소 물질 이동량

1.2. 무기비소

조사 대상 식품군 4종(백미, 현미, 툇, 미역)에 대해 각각 3개 시료를 5회씩 반복 실험하여 총 60개의 시료에 대하여 분석하였다.

백미의 각 단계별 무기비소 농도는 원재료 $39.2 \pm 2.0 \mu\text{g}/\text{kg}$, 원재료 소화액은 $3.6 \pm 1.2 \mu\text{g}/\text{kg}$, 밥(세척) $1.1 \pm 0.2 \mu\text{g}/\text{kg}$ 이었다. 현미의 각 단계별 무기비소 농도는 원재료 $51.5 \pm 4.0 \mu\text{g}/\text{kg}$, 원재료 소화액은 $3.0 \pm 0.4 \mu\text{g}/\text{kg}$, 밥(세척) $0.9 \pm 0.3 \mu\text{g}/\text{kg}$ 이었다(표 8).

툇의 무기비소 농도는 원재료 $5.3 \pm 0.5 \text{ mg}/\text{kg}$, 데친 툇은 $4.3 \pm 0.7 \text{ mg}/\text{kg}$, 데친 툇 소화액 $0.2 \pm 0.1 \text{ mg}/\text{kg}$ 이었다. 미역의 무기비소 농도는 원재료 $2.4 \pm 0.4 \text{ mg}/\text{kg}$, 불린 미역은 $1.3 \pm 0.4 \text{ mg}/\text{kg}$, 불린 미역 소화액 $1.5 \pm 0.5 \text{ mg}/\text{kg}$ 이었다(표 9).

백미와 현미의 원재료 중 무기비소 농도는 총비소 농도의 약 85% 이상으로 함유되어 있었으나, 툇과 미역과 같은 해조류에서의 총비소 대비 무기비소 비율은 50% 미만으로 측정되었다. 조사 대상 식품 모두 원재료 중 무기비소 농도에 비해 조리 후 소화액에서의 무기비소 농도가 감소되었다.

총비소 결과와 동일하게 원재료 100 g 당 무기비소 함량에 대한 물질 이동량 추정을 하였다.

백미 중 원재료, 소화액-원재료, 소화액-밥에서의 무기비소 물질 이동량은 각각 3.9, 2.9, 2.0 $\mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$ 이었다. 현미 중 원재료, 소화액-원재료, 소화액-밥에서의 무기비소 물질 이동량은 각각 5.2, 2.4, 1.2 $\mu\text{g}/100 \text{ g-cereal}$ 이었다. 총비소의 경향과 유사하게 현미 원재료에서의 무기비소 농도가 백미 원재료에서보다 높았음에도 불구하고 현미밥 소화액에서의 무기비소 농도는 오히려 백미밥 소화액에 비해 낮았다(그림 12).

툇 중 원재료, 데친 툇, 소화액-데친 툇에서의 무기비소 물질 이동량은 각각 0.53, 0.14, 0.17 $\text{mg}/100 \text{ g-brown algae}$ 이었다. 툇은 원재료에서의 무기비소 농도에 비해 조리 후 소화액에서의 물질 이동량이 감소되었다(그림 13).

표 8. 백미와 현미의 무기비소 농도

No	시료처리	N	무기비소 농도 [$\mu\text{g}/\text{kg}$]								
			As(III)			As(V)			무기비소		
			Mean	SD	Range	Mean	SD	Range	Mean	SD	Range
백미											
원재료											
1	원재료	5	39.182	1.979	36.773-42.058	ND	ND	-	39.182	1.979	36.773-42.058
2	원재료 소화모델 적용-흡수	5	3.603	1.243	1.398-4.336	ND	ND	-	3.603	1.243	1.398-4.336
3	3회 세척밥 소화모델적용-흡수	5	1.074	0.186	0.761-1.233	ND	ND	-	1.074	0.186	0.761-1.233
현미											
원재료											
1	원재료	5	51.534	3.990	48.390-58.336	ND	ND	-	51.534	3.990	48.390-58.336
2	원재료 소화모델 적용-흡수	4	2.960	0.363	2.462-3.243	ND	ND	-	2.960	0.363	2.462-3.243
3	3회 세척밥 소화모델적용-흡수	4	0.914	0.310	0.675-1.368	ND	ND	-	0.914	0.310	0.675-1.368

* 1차 가공 형태 - 찹

표 9. 톳과 미역의 무기비소 농도

No	시료처리	N	무기비소 농도 [mg/kg]								
			As(III)			As(V)			무기비소		
			Mean	SD	Range	Mean	SD	Range	Mean	SD	Range
톳											
원재료											
1	해조류 원재료	5	ND	ND	-	5.294	0.510	4.971-6.200	5.294	0.510	4.971-6.200
1차 가공* 시료											
2	1차 가공 시료	5	ND	ND	-	4.340	0.706	3.540-5.141	4.340	0.706	3.540-5.141
3	소화모델 적용-흡수	5	ND	ND	-	0.206	0.060	0.139-0.301	0.206	0.060	0.139-0.301
미역											
원재료											
1	해조류 원재료	5	0.152	0.007	0.147-0.163	2.330	0.379	1.984-2.861	2.357	0.368	2.015-2.861
1차 가공* 시료											
2	1차 가공 시료	5	0.024	0.001	0.023-0.025	1.289	0.371	0.871-1.792	1.313	0.371	0.894-1.815
3	소화모델 적용-흡수	5	0.021	0.002	0.020-0.025	1.382	0.447	0.899-2.063	1.476	0.480	0.920-2.083

* 가공 형태 ; 톳-데침, 미역-불림

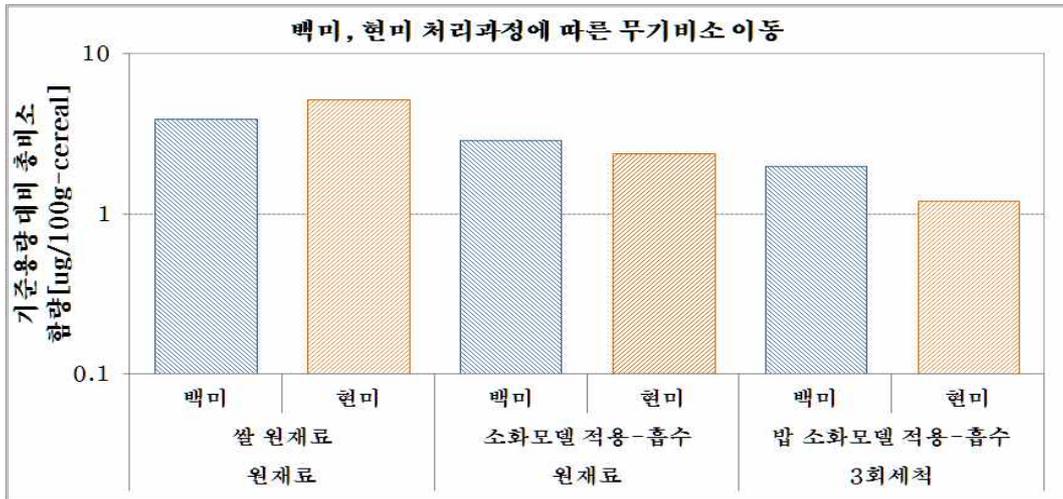


그림 12. 백미와 현미의 원재료 및 조리·소화단계별 무기비소 물질 이동량



그림 13. 뜻과 미역의 원재료 및 조리·소화단계별 무기비소 물질 이동량

2. 식품 조리별 오염도 변이

세척, 가공 및 소화모델 적용결과를 원재료에서의 비소 농도와 비교하여 각각의 저감수준을 분석하였다. 세척 없이 불린 후 시료, 3회 세척 후 불린 후 시료에 대해 비교하여 가공에 따른 저감수준을 분석하였으며, 각 시료의 소화모델 적용 결과에 따른 저감수준을 분석하였다.

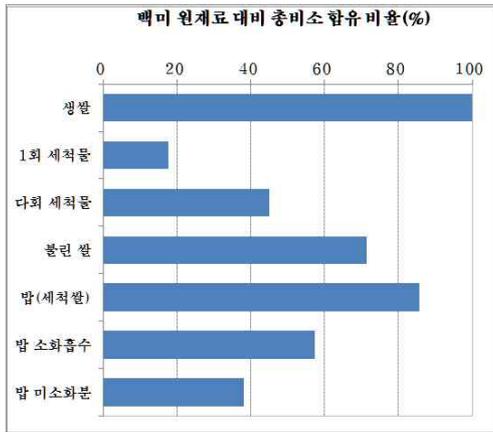
백미는 경우 총 3회 세척과정을 거칠 때마다 비소 농도가 줄어들었다. 이러한 경향은 세척하지 않고 불린 후의 물과 세척한 후 불린 후의 물에서도 동일하게 적용된다(그림 14(a)). 현미의 경우에는 백미와는 다른 양상으로 나타났다. 첫 번째보다 두 번째 세척에서 더 많은 양의 비소가 빠져나가는 것으로 확인된다(그림 14(b)). 해조류의 경우 곡류에서보다 1차 가공 후 물에서 상당량의 비소가 빠져나오는 것으로 나타났다(그림 14(c), (d)). 세척 과정에 의해 곡류는 원재료 대비 총비소의 37%가 세척수로 빠져나갔으며, 해조류는 14% 정도가 세척수로 제거되었다(그림 14).

또한 밥짓기, 데치기 등의 조리 과정에서도 비소 농도의 차이가 관찰되었다. 곡류의 경우 원재료와 조리과정을 거친 ‘밥’에서는 총비소 농도가 큰 차이(약 80% 내외)를 보이지 않았으나, 해조류는 원재료 대비 데침 또는 불림 등의 조리해조류에서의 비소 농도가 27% 정도로 검출되었다. 특히 톳을 데치는 과정에서 가장 많은 제거율(72%)이 관찰되었다(그림 14).

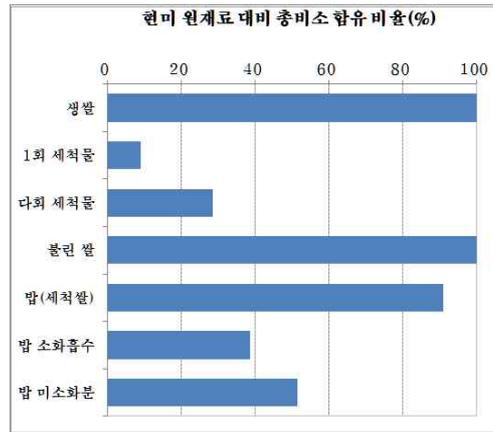
이와 같이 시료 특성 및 비소종에 따라 세척 과정 및 조리 방법에 의한 비소의 저감 정도는 다양하게 관찰되었다.

이에 비해 소화과정에 의한 총비소 및 무기비소의 저감 수준은 백미는 33% 및 49%, 현미는 61% 및 76%, 톳은 84% 및 78%, 미역은 71% 및 0.4%로 평가되었다(그림 14 ~ 15).

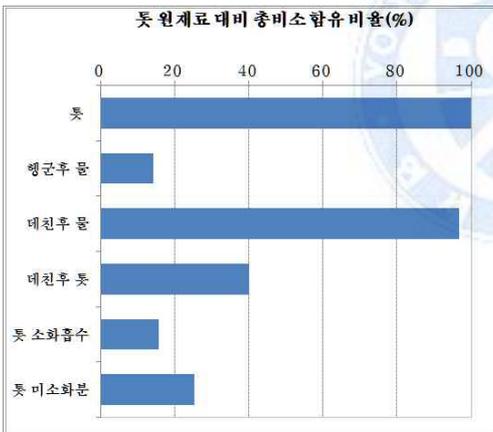
(a) 백미



(b) 현미



(c) 툇



(d) 미역

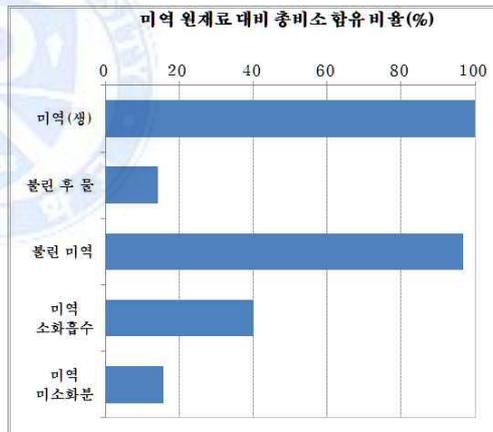
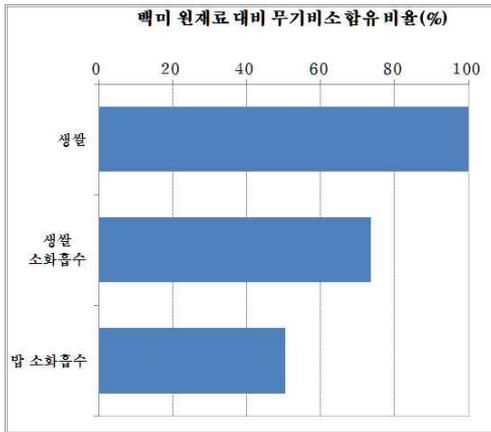
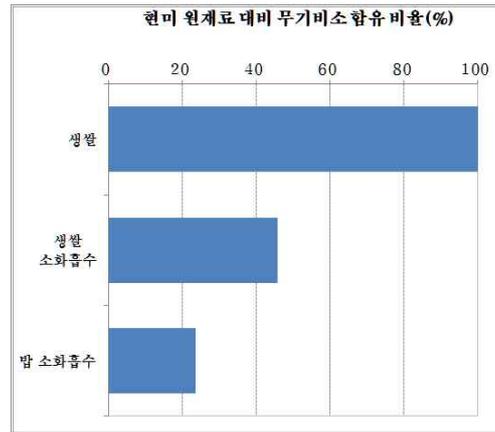


그림 14. 원재료 대비 조리 및 소화단계별 총비소 함량 비율

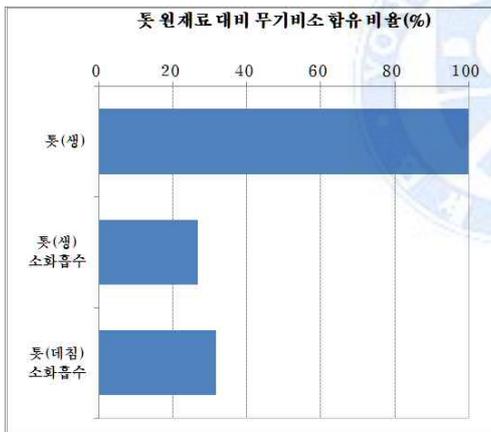
(a) 백미



(b) 현미



(c) 툇



(d) 미역

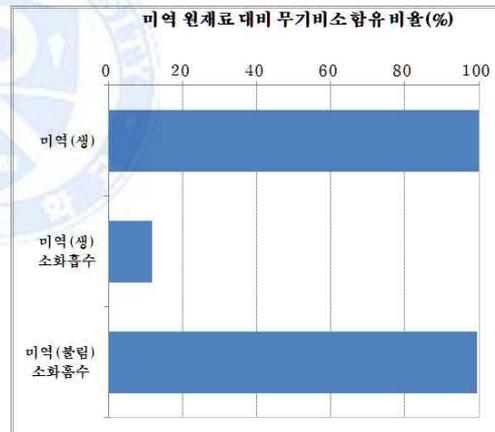


그림 15. 원재료 대비 조리 및 소화 단계별 무기비소 함량 비율

3. 생체접근률(Bioaccessibility) 추정

식품에 대해 인체 소화모델을 적용하여 추출정도의 비율을 이용하여 생물학적 접근률을 분석하였다.

원재료, 조리에 따른 가공적용에 대하여 각각 소화모델을 적용하였다. 전처리 결과 소화액과 소화 후 고형물의 두 상태로 분리 되며, 소화액은 체내 흡수되는 것으로, 고형물은 소화 후 배설되는 것으로 가정하였다.

식품처리 단계별 총비소의 생체접근률 및 원재료와 최종 섭취형태 사이의 생체접근률을 산출하여 비교하였다(표 10). 쌀의 원재료를 직접 소화할 경우의 총비소의 생체접근률은 71% 이었으며, 세척하지 않은 쌀로 지은 밥의 경우는 48%, 세척한 쌀로 지은 밥은 55% 수준이었다. 최종적으로 쌀(백미 및 현미)의 조리 후 섭취시 소화과정에 의한 총비소의 생체접근률은 48%이었다(그림 16).

해조류의 경우 원재료와 원재료의 총비소 생체접근률은 62%, ‘불림 혹은 데침’에 대해서는 66% 이었다. 최종적으로 해조류(툇과 미역)의 조리 후 섭취시 소화과정에 의한 총비소의 생체접근률은 23%이었다(그림 16).

표 11과 그림 16에는 식품처리 단계별 무기비소의 생체접근률 및 원재료와 최종 섭취형태 사이의 생체접근률을 산출하였다. 쌀의 원재료를 직접 소화할 경우의 무기비소의 생체접근률은 46 ~ 74% 이었으며, 세척한 쌀로 지은 밥은 24 ~ 51% 수준이었다. 최종적으로 쌀(백미 및 현미)의 조리 후 섭취시 소화과정에 의한 총비소의 생체접근률은 37%이었다(그림 16).

해조류의 원재료 함유 무기비소의 소화 과정에 의한 생체접근률은 22 ~ 99%의 넓은 범위로 추정되었다. 미역의 경우 낮은 무기비소 함량으로 인한 평가 과정에서의 불확실성이 큰 것으로 분석되었다. 해조류(툇)의 조리 후 섭취시 소화과정에 의한 총비소의 생체접근률은 20%이었다(그림 16).

표 10. 식품 4종(백미, 현미, 툇, 미역)의 소화과정별 총비소 생체접근률 추정

식품	시료	N	총비소 생체접근률 (%)		
			평균	표준편차	range
백미					
	원재료	5	72.1	1.1	71.1-73.6
	원재료 - 밥 (세척안함)	5	54.3	13.2	44.9-76.7
	원재료 - 밥 (세척함)	5	58.0	21.2	39.8-94.6
현미					
	원재료	5	69.6	7.3	57.5-75.9
	원재료 - 밥 (세척안함)	5	33.6	16.8	11.7-56.6
	원재료 - 밥 (세척함)	5	39.3	17.8	13.0-56.1
툇					
	원재료	5	31.7	17.5	19.7-62.0
	원재료 - 조리 해조류	5	15.8	4.7	9.6-21.6
미역					
	원재료	5	91.4	112.7	31.1-292.4
	원재료 - 조리 해조류	5	13.1	7.7	7.3-21.6

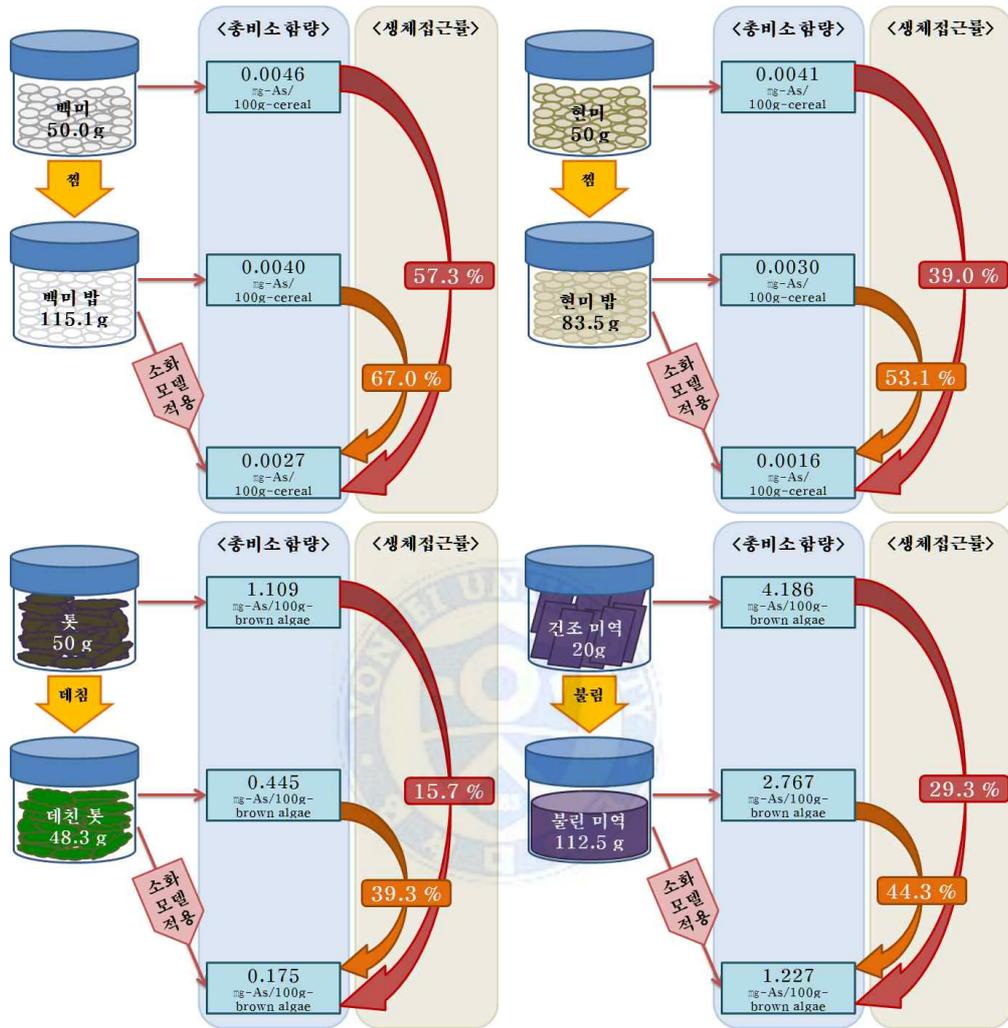


그림 16. 대상 식품의 조리 및 소화단계별 총비소 생체접근률

표 11. 식품 4종(백미, 현미, 툇, 미역)의 소화과정별 무기비소 생체접근률 추정

식품	시료	N	무기비소 생체접근률 (%)		
			평균	표준편차	range
백미					
	쌀 원재료	5	74.5	26.9	26.6-89.8
	원재료 - 밥 (세척함)	5	50.9	10.4	32.9-59.6
현미					
	원재료	5	47.4	4.9	40.7-51.9
	원재료 - 밥 (세척함)	5	24.5	8.4	18.8-36.8
툇					
	조리 해조류	5	119.0	25.3	95.4-160.9
	원재료 - 조리 해조류	5	31.4	6.0	22.7-37.5
미역					
	조리 해조류	5	851.1	80.0	780.1-953.2
	원재료 - 조리 해조류	5	98.4	12.8	78.7-108.8



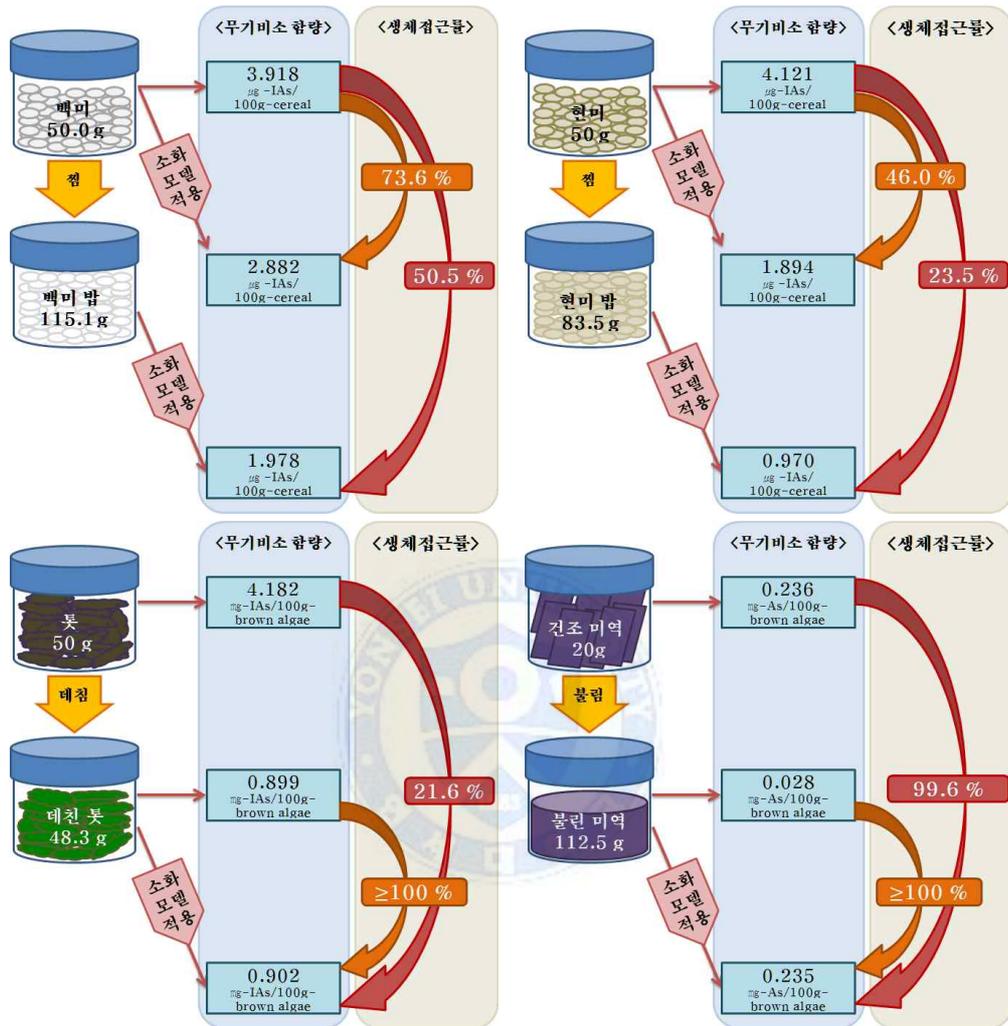


그림 17. 대상 식품의 조리 및 소화단계별 무기비소 생체접근률

5. 일일섭취노출량 및 위해도

현재 국제적으로 JECFA에서 인체 안전기준을 제시하고 있는 총비소에 대해 대상식품 4종의 원재료 오염도와 생체접근률을 반영한 일일섭취노출량과 위해성을 평가하였다.

국민건강영양조사(2008~2010) 자료에서 도출한 식품별 식이섭취량에서 평균 및 95th% 섭취군에 대하여 위해평가를 수행하였으며, 생체접근률을 통한 위해평가 결과와 비교하였다. 조사 대상 식품군 중에는 미역이 가장 높은 섭취율과 위해도를 보였으며, 현미가 가장 낮은 위해도를 보였다.

생체접근율을 반영하였을 때는 기존의 평가 결과와 비교하였을 때 전반적으로 낮아지는 결과를 보였으며, 톳에서는 다른 식품군과 비교하였을 때 위해도가 상대적으로 많이 낮아지는 결과를 보였다.

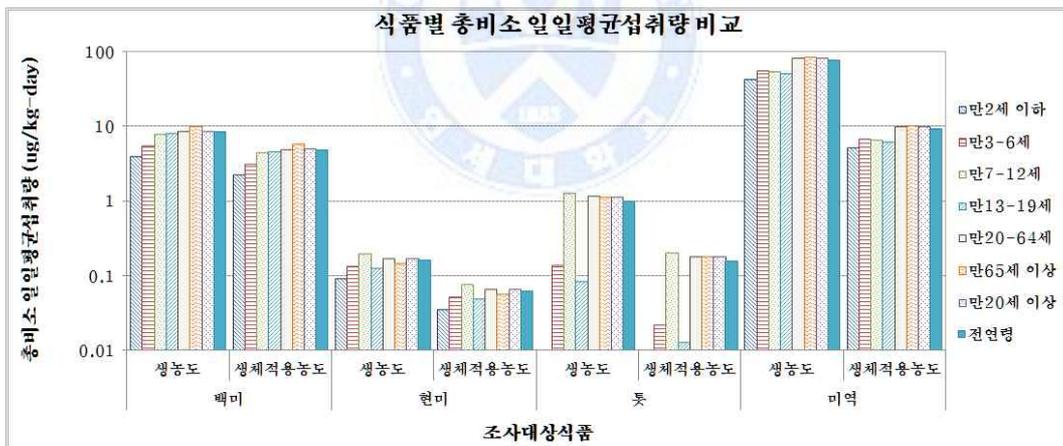


그림 18. 연령별 생체접근률 적용 유무에 따른 대상 식품의 총비소 일일섭취량 비교

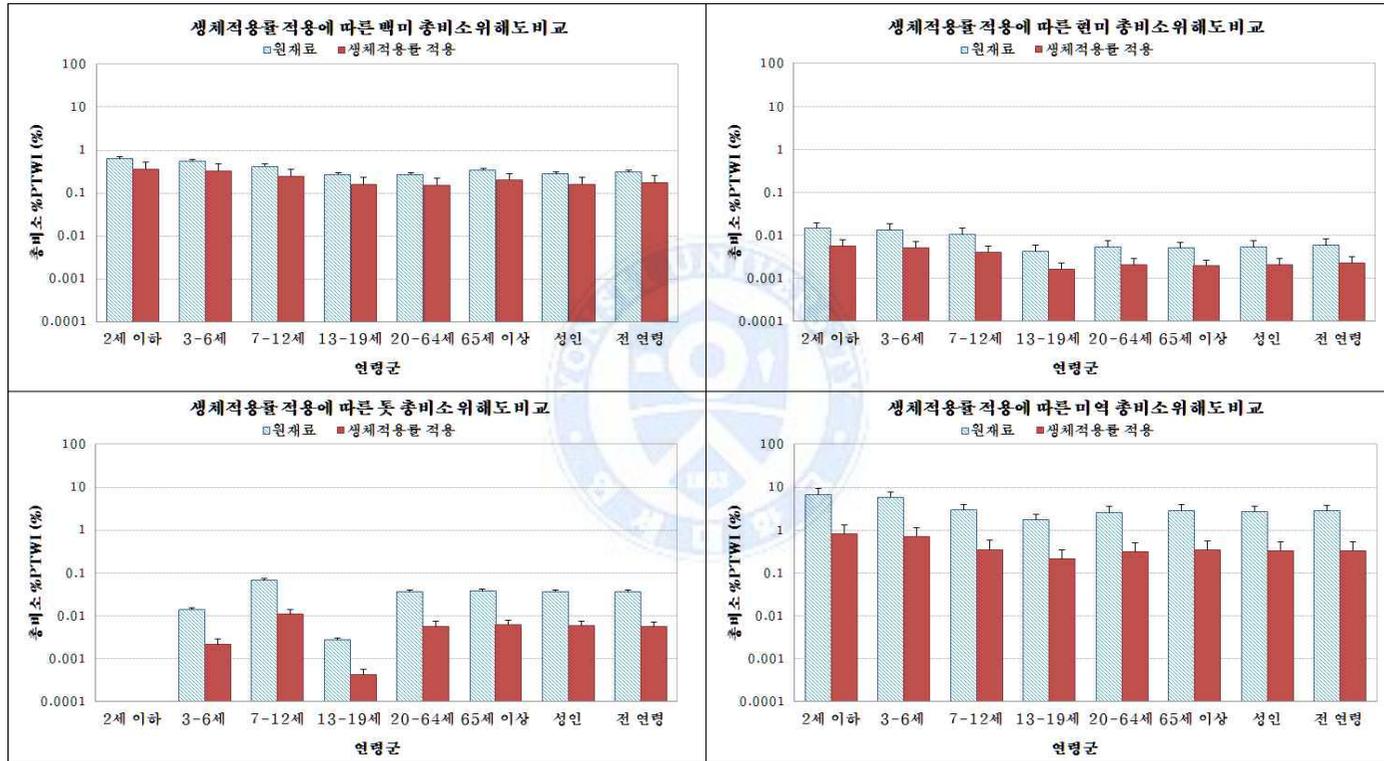


그림 19. 연령별 생체접근률 적용유무에 따른 대상식품의 총비소 위해도 비교

IV. 고찰

먹거리에 대한 안전의 문제는 인간의 일상생활에서 노출과 밀접한 관계가 있으며, 사회의 주요 관심사로 언급되고 있다. 원재료에 대한 안전을 담보할 수 있기 위해서는 자원 관리, 식품 원재료 관리, 식품 섭취 습관 관리 등 여러 관리방안들이 함께 맞물려 진행되어야 한다. 식품으로부터의 경구노출 시 인체로 들어올 가능성이 있는 수준을 파악하는 것도 중요한 부분이다. 현재 식품 중 중금속 위해평가에 적용하는 오염도는 식품 원재료에서 분석된 농도로, 위해평가의 기본적인 전제인 가장 최악의 경우(Worst case)를 가정하여 평가하고 있다. 위와 같은 기존의 방식이 위해평가를 도입하고 사용하는 목적에 적합하다고 할 수 있으나, 실제 식품섭취를 통해 체내로 들어올 수 있는 체내흡수량을 파악하여 적정 수준 확인을 확인하고 기존의 방식과 비교 평가하여, 여러 가지 고려사항이 필요한 식품 먹거리 안전 확보에 다양한 시나리오와 가능성을 논의 할 수 있는 계기가 될 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서는 조사대상 식품 4종의 검출농도를 이용하여 원재료 100 g 당 총비소 및 무기비소 함량을 산출함으로써 조리 및 소화단계별 물질 이동량(mass balance)을 평가하였다. 각 식품 원재료에 대한 총비소 평균 농도는 백미 0.046 ± 0.004 mg/kg, 현미 0.401 ± 0.012 mg/kg, 톳 11.1 ± 1.0 mg/kg, 미역 9.0 ± 2.6 mg/kg 이었다. 무기비소는 백미 0.039 ± 0.002 mg/kg, 현미 0.052 ± 0.004 mg/kg, 톳 5.294 ± 0.510 mg/kg 수준이었으며, 이는 식품의약품안전처의 조사 농도와 유사하였다(식품의약품안전처 2012, 2013). 총비소의 경우, 곡류에서는 현미보다 백미가, 해조류에서는 미역보다 톳이 더 많이 검출되는 것으로 보고되고 있으며, 식품 중 무기비소의 경우 곡류 중에서는 현미가, 해조류 중에서는 톳이 좀 더 높은 농도를 보였다. 다만 미역의 경우, 식품의약품안전처 (2012)에서는 무기비소가 모두 불검출이었으나, 본 과제에서는 모두 검출되었고, 톳보다는 낮은 농도로 검출되었다.

물질 이동량(mass balance)을 통해 처리과정에 따른 총비소 및 무기비소

의 이동을 추정할 수 있었는데, 곡류 세척수와 불린 물에서 상당량의 비소가 빠져나가는 것으로 확인되어, 식품 중 무기비소 저감 방안으로 제시되고 있는 ‘세척’에 대해 설명 가능한 자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다. 세부적으로는 세척횟수에 따른 비소 저감 수준이 백미와 현미가 달리 나타나 세척이 비소 저감에 기여하는 정도를 보다 쉽게 확인할 수 있었으며, 이는 도정을 한 상태인 백미의 특성상 총비소가 세척으로 인해 쉽게 빠져나올 수 있었던 것으로 추정된다. 해조류 톳의 경우 행군 후 물에서 총비소가 원재료의 14% , 가공 후 물에서는 96% 정도가 빠져나와 감소하였고, 미역의 경우 가공 후 물에서 47% 정도가 빠져나와 감소하였다. 국내에서 식품의 세척과 관련하여서는 교육인적자원부의 학교급식 위생관리지침서, 식품의약품안전처의 식품안전관리지침 등에서 언급하고 있으나, 원재료 대량 세척에 관하여 제시하고 있어 일반 가정에서 적용하기에는 제한점이 있었으며, 식품군별 세척횟수 및 방법 등의 명확 방법을 제시하고 있지는 않았다. 본 논문에서 비소 저감을 보이는 패턴을 반영하여 조리습관에서 비소를 저감 할 수 있는 방안으로, 곡류의 경우 일반적으로 3회 이상 세척하는 것을, 현미의 경우 적어도 2회 이상 세척하는 것을 제시할 수 있으며, 해조류의 경우, 행구거나 데친 후 물은 바로 버린 후 사용하도록 권고할 수 있을 것으로 생각된다.

경구노출로 인한 체내흡수량을 산출하는 방법으로 생체접근률(Bioaccessibility)을 적용하는 방법이 있다. 체외 소화모델을 구축하여 소화과정이 종료된 이후 액체상태(Chyme)가 장관흡수를 통해 체내로 들어오는 양으로 가정하고 이를 검체에서의 실제 농도와 비교하여 그 비율을 도출하게 된다. 이와 관련한 연구는 토양의 경구섭취 시나리오 설계를 계기로 시작되었으며(Oomen et al., 2003; RIVM, 2004), 때문에 기존의 연구에서는 주로 토양과 경구섭취에 관한 연구가 많이 보고되었다(NIPH, 2006; 류혜림 등, 2007). 국내에서는 학교 운동장의 인조잔디의 경구노출에 시나리오를 설정하여 생체접근률방법을 사용한 바 있다(환경부, 2010). 식품에 대한 체내 섭취율 적용 방법을 정리한 보고서가 2004년에 RIVM에서 발간되었으며, 관

런 연구가 학계에 보고되고 있다(RIVM, 2004; Brandon, Janssen, Wit-Bos, 2014).

RIVM(2004)에서 제시하고 있는 체내흡수율 산출 방법에서는 생체이용률(bioavailability)과 생체접근률(bioaccessibility)을 모두 다루고 있다. 생체이용률(bioavailability)은 물질의 체내흡수 및 생체기전을 통한 결과를 추정하는 것이며, 본 논문에서는 인공소화모형을 적용하여 체내로 들어올 수 있는 양의 비율을 계산한 체내흡수량을 추정값을 적용하였다. 쌀에서의 총비소 생체접근률은 50 ~ 100%수준으로(He et al., 2012; Signes-Pastor et al. 2012; Sun et al. 2012; Alava et al., 2013), 무기비소 생체접근률은 63 ~ 99% 수준(Laparra et al. 2005; Signes-Pastor et al., 2012)으로 학계에 보고되고 있다(Brandon, Janssen, Wit-Bos, 2014). 해조류의 총비소 생체접근률은 38 ~ 87%(Laparra et al. 2003; Almela et al. 2005; Koch et al. 2007; Torres-Escribano et al. 2011; Brondon EFA, 2014)로, 무기비소는 40 ~ 88%(Laparra et al., 2003; Brondon EFA, 2014)로 학계에 보고되고 있다. 본 논문에서는 총비소 생체접근률은 백미 58%, 현미 39%, 톳 15%이었으며, 무기비소 생체접근률은 백미 50%, 현미 24%, 톳 31%이었다. 조사대상식품 대부분이 기존에 보고되고 있는 결과와 유사하였으나, 미역의 경우 기존의 연구결과와 달리 무기비소에서 높은 수준의 생체접근률이 산출되었다.

기존의 식품 중 중금속 위해평가 방식인 원재료오염도를 사용한 위해평가와 생체접근률이 적용된 오염도를 사용한 위해평가를 비교하였다. 노출평가는 국민건강영양조사의 2008년부터 2010년까지의 자료를 통합하여 연령별 식이량을 도출하였다. 곡류는 주소비 식품이나, 해조류 톳의 경우 연령별로 식이 형태가 달라 가능한 나눌 수 있는 연령군으로 나누었으며, 2세 이하, 3~6세, 7~12세, 13~19세, 20~64세, 65세 이상, 성인(20세 이상), 전연령의 총 8개 군으로 나누어 평가하였다. 식품 중 총비소의 %PTWI 추정 결과, 원재료 오염도를 사용한 전연령 위해평가 결과는 백미에서 0.30%, 현미에서

0.01%, 툇에서 0.04%, 미역에서 2.77% 이었다. 생체접근률을 적용한 오염도를 사용하였을 때 전연령 위해평가 결과, 백미에서 0.17%, 현미에서 0.002%, 툇에서 0.01%, 미역에서 0.33% 이었다. 총비소 생체접근률 적용시 위해도 저감 비율은 백미에서 43%, 현미에서 61%, 툇에서 84%, 미역에서 87% 수준이었다. 전반적으로 식품에 가공 및 소화를 거친 결과 원재료에서의 비소 수준보다 낮아지는 것으로 확인되며, 이는 기존의 식품 중 비소에 대한 평가가 과대평가 되고 있을 가능성이 있음을 추정할 수 있다.

현재까지의 식품 중 중금속 위해평가방법은 원재료 내 비소의 100% 흡수를 가정하는 것이며, 실제 노출량에서 위해도 자체가 총량으로 적용하였을 때와 차이가 발생할 가능성이 있다. 이에, 식이섭취와의 결합 형태 등으로 인해 소화액으로의 용출이 어려운 물질의 경우에는 생체접근률을 이용한 일일섭취량 추정시 보정이 필요할 수 있다.

본 논문에서의 제한점은 다음과 같이 기술할 수 있다.

우선 식품의 다양한 처리 단계별 총비소, 무기비소 농도를 파악하는 것이 주요 연구 주제이었기에 조사 대상 식품 시료를 각 5개 제품에 대해서만 평가함으로써 시험 결과의 대표성에 대한 한계가 있었다.

또한 미역과 같이 유기비소 형태의 함유량이 높은 해조류의 경우, 무기비소 분석을 위한 전처리 과정에서 일부 유기비소가 분해되어 무기비소로 전환될 가능성이 있었다. 향후에는 산처리 하기 전에 가능한 유기비소를 제거할 수 있는 분석 방법 개선이 필요하였다.

마지막으로 본 논문은 인공 소화 모형 중 인공 소화액으로의 용출 단계까지만 실험함으로써 실제 위장관막을 통한 혈액으로의 이동 상황까지는 고려하지 못했다는 제한점이 있다. 이에 추후에는 오염물질의 소화액으로의 용출 이후 위장관막을 통한 혈관으로의 이동 과정까지 모사할 수 있는 인공 소화 모형 연구가 필요할 것으로 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 우리나라 특유의 식습관을 적용하여 무기비소함유 가능성이 있는 쌀 중 백미, 현미와 해조류 중 톳, 미역을 선정하여 경구섭취에 대한 생체접근률(bioaccessibility)을 추정·평가하였다. 이로 인한 일일섭취량을 추정하여 기존의 원재료 농도 기반의 노출량과 비교하였으며, 생체접근률 적용 유무에 따른 일일섭취노출량을 추정하여 JECFA의 PTWI와 비교하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 원재료 농도 대비 조리결과 총비소의 물질 이동량(mass balance)은 다음과 같다. 원재료 농도 대비 첫 번째 세척 후 약 13%, 총 3회 세척과정을 통해서는 약 36%가 세척수로 이동하여 저감되었다. 세척한 쌀로 지은 밥에서는 함량의 88%의 총비소가 검출되었다. 톳과 미역을 세척한 물에서 약 85%의 총비소 이동이 있었다. 톳에서는 행군 후 물에서 14%, 데친 후 물에서 96%의 총비소가 이동하여 저감되었으며, 미역은 불린 후 물에서 47%의 총비소가 이동하여 저감되었다.

둘째, 소화액의 물질 이동량(mass balance)은 다음과 같다. 곡류에서는 원재료 함량대비 총비소 47% 및 무기비소 59%의 물질이동이 있었으며, 해조류는 원재료 함량의 총비소 13% 및 무기비소 19%가 소화액으로 이동하였다.

셋째, 총비소 평균 생체접근률(%)은 백미 57%, 현미 39%, 톳 15%이며, 무기비소 평균 생체접근률(%)은 백미 50%, 현미 23%, 톳 21%로 추정되었다.

넷째, 전연령 평균 식이섭취량 및 생체접근률을 적용한 총비소의 일일평균 섭취량은 백미 섭취시 4.7 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$ 로, 원재료의 57% 수준이었으며, 현미는 0.06 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$ 로, 원재료의 38% 수준, 툇은 0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$ 로, 원재료의 15% 수준, 미역은 9.1 $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$ 로, 원재료의 12% 수준으로 감소하였다.

다섯째, 전연령 평균 식이섭취량 및 생체접근률 적용한 총비소의 일일평균 섭취량은 JECFA의 PTWI 대비 백미는 PTWI의 0.17%, 현미는 0.002%, 툇은 0.01%, 미역은 0.33% 이었다.

이상의 연구 결과를 통해 세척, 데침, 불림 등의 적절한 조리방법이 비소와 같은 수용성 유해물질을 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 보였다. 또한 물 중 비소와는 달리, 식이섭취에 함유되어 있는 비소의 소화기를 통한 생체접근률은 높지 않은 것으로 추정되었다. 따라서 현미와 툇과 같이 식이섭취질이 높은 식품의 경우 원재료 농도 기반의 위해성 평가시 실제 노출수준보다 과대 평가될 가능성이 있었다. 특히 식이 섭취의 함량이 높을수록 생체접근률은 반대로 낮아지는 것으로 관찰된 바, 이를 이용한 건강한 식이습관을 제시할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 교육인적자원부. 학교급식 위생관리지침서. 2015.
- 류혜림, 정재식, 남택우, 남경필. 2007. In vitro Bioaccessibility 실험을 통한 토양 내 Cd, Cu, Pb의 생물학적 이용성 평가 및 위해성평가. 대한토목학회. 3786-3789.
- 배옥남, 이무열, 정승민, 하지혜, 정진호. 2006. 환경오염물질 비소의 체내 대사 및 인체 위해성. J Environ Toxicol. 21;1:1-11.
- 식품의약품안전처. 식품 중 중금속 안전관리 연구. 2012.
- 식품의약품안전처. 식품 중 중금속 안전관리 연구. 2013.
- 식품의약품안전처. 식품안전관리지침. 2015.
- 환경부. 인조잔디와 탄성포장재의 유해물질 위해성 평가 및 관리대책 마련. 2010.
- Alava P, Du Laing G, Odhiambo M, Verliefde A, Tack F, Van de Wiele TR. 2013. Arsenic bioaccessibility upon gastrointestinal digestion is highly determined by its speciation and lipid-bile salt interactions. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. 48:656-665.
- Almela C, Laparra JM, Velez D, Barbera R, Farre R, Montoro R. 2005. Arsenosugars in raw and cooked edible seaweed: characterization and bioaccessibility. J Agric Food Chem. 53:7344-7351.
- ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Toxicological profile for arsenic. 2007.

- Brandon EFA, Janssen PJCM, Wit-Bos L. 2014. Arsenic: bioaccessibility from seaweed and rice, dietary exposure calculations and risk assessment. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 31;12:1993-2003.
- Del Razo LM, Garcia-Vargas GG, Garcia-Salcedo J, Sanmiguel MF, Rivera M, Hernandez MC, Cebrian ME. 2002. Arsenic levels in cooked food and assessment of adult dietary intake of arsenic in the Region Lagunera, Mexico. *Food Chem Toxicol*. 40:1423-1431.
- EFSA(European Food Safety Authority). committee on toxicity of chemicals in food, consumer products and the environment(cot) paper for information efsa opinion of the health risks of arsenic in food. 2009.
- He Y, Pedigo CE, Lam B, Cheng Z, Zheng Y. 2012. Bioaccessibility of arsenic in various types of rice in an in vitro gastrointestinal fluid system. *J Environ Sci Health B*. 47:74-80.
- JECFA(The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). 2000.
- JECFA(The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). Editorial amendments to the general standard for contaminants and toxins in food and feed. 2011.
- Juhaxa AL, Smith E, Weber J, Rees M, Rofe A, Kushel T, Sansom L, Naidu R. 2014. In vivo assessment of arsenic bioavailability in rice and its significance for human health risk assessment. *Environmental health perspectives*. 12:1826-1831.

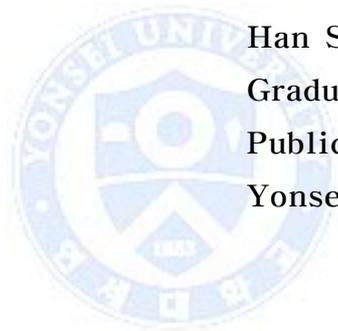
- Koch I, McPherson K, Smith P, Easton L, Doe KG, Reimer KJ. 2007. Arsenic bioaccessibility and speciation in clams and seaweed from a contaminated marine environment. *Mar Pollut Bull.* 54:586-594.
- Laparra JM, Velez D, Barbera R, Farre R, Montoro R. 2005. Bioavailability of inorganic arsenic in cooked rice: practical aspects for human health risk assessments. *J Agric Food Chem.* 53:8829-8833.
- Laparra JM, Velez D, Montoro R, Barbera R, Farre R. 2003. Estimation of arsenic bioaccessibility in edible seaweed by an in vitro digestion method. *J Agric Food Chem.* 51:6080-6085.
- Lee TC, Tanaka N, Lamb PW, Gilmer TM and Barrett JC. 1988. Induction of gene amplification by arsenic. *Science.* 241:79-81.
- Meacher DM, Menzel DB, Dillencourt MD, Bic LF, Schoof RA, Yost LJ, Eickhoff JC, Farr, CH. 2002. Estimation of multimedia inorganic arsenic intake in the US population. *Hum Ecol Risk Assess.* 8:1697-1721.
- Norwegian Institute of Public Health and the Radium Hospital (NIPH). Artificial turf pitches - an assessment of health risks for football players. 2006.
- Oomen AG, Rompelberg CJM, Bruil MA, Dobbe CJG, Pereboom DPKH, Sips AJAM. 2003. Development of an in vitro digestion model for estimating the bioaccessibility of soil contaminants. *Archives of environmental contamination and toxicology* 44:281-287.

- Rahman MM, Ng JC, Naidu R. 2009. Chronic exposure of arsenic via drinking water and its adverse health impacts on humans. *Environ Geochem Health*. 31:189-200.
- RIVM. Development and applicability of an in vitro digestion model in assessing the bioaccessibility of contaminants from food. 2004.
- RIVM. Development and suitability of in vitro digestion models in assessing bioaccessibility of lead from toy matrices. 2003.
- SCOOP(The Scientific Cooperation on Questions Related to Food). Assessment of the dietary exposure to arsenic, cadmium, lead and mercury of the population of the EU member states. 2004.
- Signes-Pastor AJ, Al-Rmali SW, Jenkins RO, Carbonell-Barrachina A, Haris PI. 2012. Arsenic bioaccessibility in cooked rice as affected by arsenic in cooking water. *J Food Sci*. 77:T201-T206.
- Smedley PL, Kinniburgh DG. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl Geochem*. 17:517-568.
- Sun G-X, Van de Wiele T, Alava P, Tack F, Du Laing G. 2012. Arsenic in cooked rice: effect of chemical, enzymatic and human gastrointestinal tract. *Environ Pollut*. 162:241-246.

- Torres-Escribano S, Denis S, Blanquet-Diot S, Calatayud M, Barrios L, Vázquez D, Alric M, Montoro R. 2011. Comparison of a static and a dynamic in vitro model to estimate the bioaccessibility of As, Cd, Pb and Hg from food reference materials *Fucus* sp. (IAEA-140/TM) and Lobster hepatopancreas (TORT-2). *Sci Total Environ.* 409:604-611.
- US EPA IRIS (Integrated Risk Information System), <http://www.epa.gov/iris>
- US EPA <http://www.epa.gov/>
- US NAS(National Academy of Science). *Risk Assessment in the Federal Government:Managing the Process*. 1983.
- Versantvoort CHM, Oomen AG, Kamp EV, Rompelberg CJM, Sips AJAM. 2005. Applicability of an in vitro digestion model in assessing the bioaccessibility of mycotoxins from food. *Food and Chemical Toxicology.* 43:31-40.

= ABSTRACT =

**Determination of Bioaccessibility and
Risk Assessment according to artificial digestion
model of Arsenic Forms in Food**



Han Seul Lee
Graduate School of
Public Health
Yonsei University

(Directed by Professor Shin, Dong Chun, M.D., Ph.D)

Inorganic arsenic is becoming a social issue even though it naturally exists in environment media as soil and water system because it was detected from commonly consumed food as rice. International organizations as JECFA are setting health based guidance level using ecological risk assessment to secure safety of heavy metals. Specially, inorganic arsenic is a representative

substance that set the health based guidance level based on the results of dynamics research of taking underground water containing high density inorganic arsenic because there was insufficient compatible animal test data. However, there are concerns that risk of food intake may be overestimated due to the difference in absorption rate of inorganic arsenic in ionic state in water and food containing dietary fiber.

Therefore, this study applied unique eating habits of our country to measure bioaccessibility of oral ingestion by selecting white rice and brown rice among grains and fusiformis and seaweed among maine plants with potential inorganic arsenic content. This study evaluated bioaccessibility by cooking and digestion step by applying the experiment method of external digestion model suggested in RIVM, and measured daily intake and compared with the existing raw material concentration dosage. This study purchased 5 types of raw material by examination food and conducted total 5 sessions of repetition test of basic process(cleaning), simple processing(soaking, blanching), and digestion stage. Mass balance by cooking and digestion step was evaluated by calculating total arsenic and inorganic arsenic content per 100g of raw material using detection density by each step. Also, this study measured acceptable daily intake according to the bioaccessibility by age of object food which was calculated in the national nutrition survey(2008~2010) to compare it with health safety level(PTWI) of JECFA.

Main findings of this study are as follows. For average

density of arsenic of each raw food materials, white rice was 0.046 ± 0.004 mg/kg, brown rice was 0.401 ± 0.012 mg/kg, fusiformis was 11.1 ± 1.0 mg/kg, and seaweed was 9.0 ± 2.6 mg/kg. For inorganic arsenic, white rice was 0.039 ± 0.002 mg/kg, brown rice was 0.052 ± 0.004 mg/kg, and fusiformis was 5.294 ± 0.510 mg/kg that it was similar to the investigated concentration by Korea's Ministry of Food and Drug Safety (Korea's Ministry of Food and Drug Safety, 2012, 2013).

88% of total arsenic decreased compare to the concentration of raw material by cleaning process of white rice and brown rice, and 27% of total arsenic decreased by soaking and blanching process of fusiformis and seaweed. For measured bioaccessibility using concentration among digestive fluids by external digestion model, white rice was 57%, brown rice was 39%, fusiformis was 15%, and seaweed was 29% for total arsenic. For bioaccessibility of inorganic arsenic, white rice was 50%, brown rice was 23%, and fusiformis was 21%. Therefore, the revised risk rate of bioaccessibility by digestion process showed 43% of reduction rate for white rice, 61% for brown rice, 84% for fusiformis, and 87% for seaweed in bioaccessibility of arsenic compare to the concentration of raw material.

This study proved that proper cooking methods as cleaning, blanching, and soaking process can reduce harmful water soluble materials effectively as arsenic. Also, unlike arsenic in water, it was identified that bioaccessibility through digestive organs contained in dietary fiber is not high. Therefore, for

food with high dietary fiber as brown rice and fusiformis, there was possibility that it may be overestimated than actual exposure level in risk assessment. Specially, the results of study can suggest healthy eating habits as high dietary fiber content is observed to lower bioaccessibility.

Key words : arsenic, inorganic arsenic, artificial digestion model, bioaccessibility, acceptable daily intake, risk assessment

