

# 하수처리수의 관개용수 재이용을 위한 위해성 평가

Risk assessment of wastewater reuse for Irrigation water

한정윤\* · 윤춘경 · 정광욱 · 장재호 (건국대학교)

Han, Jung Yoon\* · Yoon, Chun Gyeong · Jung, Kwang Wook · Jang, Jae Ho

## Astract

Wastewater reuse are exposed public health risk by pathogens. Therefore, this study was examined for microbial risk assessment after irrigation as treated wastewater in paddy rice plots. Five treatments were used: biofilter effluent, UV disinfected water, pond treatment, wetland treatment and conventional irrigation water. Risk assessment was calculated based on the beta-Poisson model by concentration of *E. coli* from 2003 to 2005. Monte-Carlo simulation (n=10,000) was used to estimate the risk characterization of uncertainty. The risk range was from  $10^{-5}$  to  $10^{-8}$  except biofilter effluent was  $10^{-4}$  in June. The USEPA(1992) has recommended that risk of  $< 10^{-4}$  is acceptable level of safety for potable waters. In 2005, risk value was lower than 2003, 2004 because of the first irrigation for plowing water is lower *E. coli* concentration used tap water. It is shown that the first irrigation water quality was important for wastewater irrigation in paddy. UV disinfection and natural treatment used pond and wetland were thought to be an effective for wastewater reuse.

## I. 서론

전 세계에 걸쳐 많은 지역에서 사용 가능한 수자원이 한계에 도달하면서, 물의 재처리 및 재이용이 수자원 보전과 이용성 확대라는 측면에서 큰 대안이 되었다. 실제로 물 부족을 겪는 많은 국가에서 하수 재이용수를 대체수자원으로 다양하게 이용하고 있으며, 전 세계 120여 개국에서 하수처리수를 농업적으로 이용하고 있다(USEPA, 1992). 우리나라의 경우 물 사용량의 46.3%를 차지하고 있는 농업용수를 하수 재이용수로 대체하여 이용할 경우 활용가능성이 더 클 것이다. 그러나 하수처리수를 농업용수로 사용할 경우에 그 수질은 사용자인 농민은 물론이고, 공공보건에 대한 위험으로부터 안전성이 보장되어야 할 것이다.

현재까지 하수 처리수를 농업용수로 재이용하여 발생하는 질병에 관한 많은 연구가 보고 되어지고 있다. 멕시코에서는  $10^3 \sim 10^5$  FC 100mL<sup>-1</sup>의 농도로 재이용수를 관개한 경우 5~14세의 어린이들이 설사 등의 장내질환이 발생할 확률이 4~7배 높아졌다고 보고되었고,  $10^6$  FC 100mL<sup>-1</sup>로 관개할 경우에는 호흡기의 감염이 우려되나 질병 발생률은 낮다고 보고하였다. 우리나라 논외의 관개방식과 유사한 Flood 방식으로 관개할 경우에는 아이들의 설사의 발병률이 4~5배 높아지고, 강우에 의해 *E. coli*의 농도가 높은 물이 유출되어 발병가능성이 높아진다고 제시하였다(Bastos and Mara, 1995). 그러나 우리나라의 경우에는 아직까지 하수처리수를 농업적으로 재이용하여 발생하게 되는 질병에 대한 역학조사나 위해성평가가 이루어진 예가 드문 실정이다. 그러므로 하수처리수를 관개용수로 재이용할 경우 병원성 미생물에 의한 질병발생과 전염 등의 위험을 평가하고, 그에 따른 적절한 처리방법과 수준을 결정하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 Biofilter, UV, Pond, 습지를 통해 처리한 하수를 각각 벼재배 포트에 관개하였을 경우에 관찰된 3년 동안의 대장균농도(*E. coli*)를 바탕으로 하수처리수를 농업용수로 재이용하였을 경우 위해성을 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

2003년은 경기도 양평군에 위치한 40×50×35 cm 규모로 표면적이 약 2,000 cm<sup>2</sup>인 벼재배 실험포트에서, 연립주택 16가구의 생활하수를 biofilter처리수, 자외선조사량 6 mW·s/cm<sup>2</sup> 와 자외선조사량16 mW·s/cm<sup>2</sup>의 UV소독수를 각각 관개용수로 이용하였고, 대조구로 양평군 신애리의 관개용수인 하천수를 사용하였다. 2004년과 2005년의 벼재배 포트는 건국대학교 평생교육원에 위치한 100×100×50 cm로 표면적이 약 10,000 cm<sup>2</sup>인 콘크리트 구조이다. 2004년에는 관개용수로 평생교육원의 하수를 biofilter, 자외선조사량 40 mW·s/cm<sup>2</sup>, 자외선조사량 68 mW·s/cm<sup>2</sup>의 UV와 연못으로 각각 처리하여 이용하였고, 대조구는 건국대학교 일감호수를 관개용수로 사용하였다. 2005년에는 biofilter 처리수, 자외선조사량 68 mW·s/cm<sup>2</sup>의 UV소독수, 연못처리수, 습지처리수를 각각 관개용수로 이용하였으며, 대조구로는 건국대학교 일감호수 와 수돗물을 이용하였다. 실험포트는 각 처리구별 3반복을 실시하여 평균 2주일에 한번 씩 샘플링 하여 분석하였고, 수질분석은 Standard Method (APHA, 1995)에 따랐으며, *E. coli*의 분석은 최적확수시험법(MPN)을 통해 분석하였다.

위해성 평가는 위험성 확인(Hazard identification), 용량-반응 평가(Dose-response assessment), 노출평가(Exposure assessment), 위험도 결정(Risk characterization)의 4단계 방법(US EPA, 1989)을 통해 이루어지며, 용량-반응 평가는 beta-Poisson 모델을 활용하여 평가하였으며(식 1), 본 연구에서는  $N_{50} = 8.6 \times 10^7$  과  $\alpha = 0.1778$  값을 이용하였다(Hass, 1999).

$$P_i = [1 + N/N_{50}(2^{1/\alpha} - 1)]^{-\alpha} \quad (\text{식 1})$$

$P_i$  : The risk infection by ingesting pathogens in drinking water

$N$  : Number of pathogens ingested

$N_{50}$  : Number of pathogens that will infect 50% of the exposed population

$\alpha$  : Parameters defining dose-response curves

위해도 결정의 단계에서는 본연구의 선행연구인 Jung *et al.*(2005)에 의한 가정에 따라 위해성 평가를 농민과 아이들로 나누어 평가하였다. 농민의 경우 영농기간(100일)동안 관개용수에 직접 노출된다고 가정하였고, 현재 우리나라의 농민 연령이 고령화 되었으므로 감염가능성을 2배로 하였다. 어린이(19세미만)의 경우 미생물에 의한 정량적 위해성 평가에서 신경, 면역, 소화기계통이 발달하고 있는 단계이므로 감염위험성이 성인에 비해 크다고 보고되어졌고(Nena, 2004), 특히 수인성질병의 원인인 rotavirus는 어른에 비해 감염확률이 56%증가하는 것으로 나타났다(Charles P, 1996). 그러므로 어린이의 경우 감염가능성을 5배 높여 평가하였고, 노출기간을 직접 논에서 작업하는 농민보다는 상대적으로 적은 30일로 하였다. 발병가능성은 정확한 발병가능성이 확인되지 않았으므로 50%를 사용하였고(Hass, 1993), 관개용수는 음용수와 같이 섭취하지 않으므로 위해성을 10<sup>-3</sup>배 낮추어 평가하였다. 위해성 평가과정에서 실측치가 존재하지 않으므로, 실제로 도출된 결과가 사실성이 결여될 수 있는 불확실성을 최소화하기 위하여 Monte-Carlo simulation기법을 이용하였다(Hass, 1993).

## III. 결과 및 고찰

### 수질분석

실험기간 동안 사용된 관개용수의 평균수질은 Table 1과 같다. UV소독수의 경우 미생물을 제외한 수질항목은 biofilter처리수와 비슷한 값을 나타내었기 때문에 수질분석에서 제외하였고(Jung, 2003), 수돗물의 경우 서울특별시 상수도사업본부에서 제공한 정수장 수질검사결과(광진구) 자료를 이용하였다.

Table 1. Comparison of water quality of irrigation waters.

	TC (MPN/100mL)	FC (MPN/100mL)	<i>E. coli</i> (MPN/100mL)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	
2003	BE	9,150	6,500	4,200	5.9	3.4	1.1	38.1	4
	UV6	45	50	48	-	-	-	-	-
	UV16	0	0	0	-	-	-	-	-
	STR	795	587	498	1.8	0.8	0.4	5	0.18
2004	BE	33,288	33,288	717	19.2	26.1	16.7	85.7	8.8
	Pond	1,374	1,334	868	18	23.4	9.2	27.2	5.5
	UV40	625	600	44	-	-	-	-	-
	UV68	7	4	0	-	-	-	-	-
	RES	600	480	260	5.8	10.5	7.2	3.4	0.01
2005	Pond	3,419	1056	603	8.8	48.0	20.8	64.9	5.1
	Wet	29,200	27,383	450	93.3	76.5	38.5	50.7	6.5
	UV68	4	4	2	-	-	-	-	-
	RES	357.7	30.7	16.7	5.1	10.8	11.5	3.5	0.1
Tap	0	0	0	-	0	0.1	-	-	

BE: biofilter effluent; UV6: UV disinfection by 6 mW · s/cm<sup>2</sup>; UV16: UV disinfection by 16 mW · s/cm<sup>2</sup>; UV40: UV disinfection by 40 mW · s/cm<sup>2</sup>; UV68: UV disinfection by 68 mW · s/cm<sup>2</sup>; Pond: pond effluent; Wet: wetland effluent; STR: stream; RES: Ilgam reservoir; Tap: tap water

US EPA(1992)의 농업용수 재이용수질기준은 BOD<sub>5</sub>가 10~30 mg/L이고 SS는 30 mg/L로, 본 연구에서 사용한 재이용수와 비교해 볼 때 습지처리수를 제외한 나머지 처리용수는 수질기준을 만족시켰으나, 대장균의 경우 USEPA의 200FC/100 mL에 비하여 높은 값을 나타내었기 때문에 추가적인 처리가 필요한 것으로 생각된다. UV소독수는 조사량에 따라 차이가 매우 크게 나타나므로 관개용수로 이용되는 하수의 수질에 따른 조사량의 적절한 조절이 필요할 것으로 판단된다.

### *E. coli* 의 위해성 평가

3년 동안의 *E. coli*의 농도는 영농기간인 5월말에서부터 8월말까지 각 처리구별로 3반복한 값을 평균과 표준편차를 내어 계산하였고, 위해성 평가는 Monte-Carlo simulation을 10,000 반복하여 95 % 신뢰구간의 위해도 값을 농민과 어린이로 각각 나누어분석하였다(Table 2, Fig. 1).

Table 2. Concentrations of *E. coli* during rice growing period(unit: MPN/100mL).

	2003		2004		2005
BE	584 ± 992	BE	5224 ± 7868	Wet	107 ± 290
UV40	235 ± 479	Pond	1141 ± 2078	Pond	62 ± 115
UV16	368 ± 563	UV68	622 ± 978	UV68	42 ± 66
STR	839 ± 1140	UV40	510 ± 728	RES	28 ± 45
-	-	RES	503 ± 848	Tap	53 ± 130

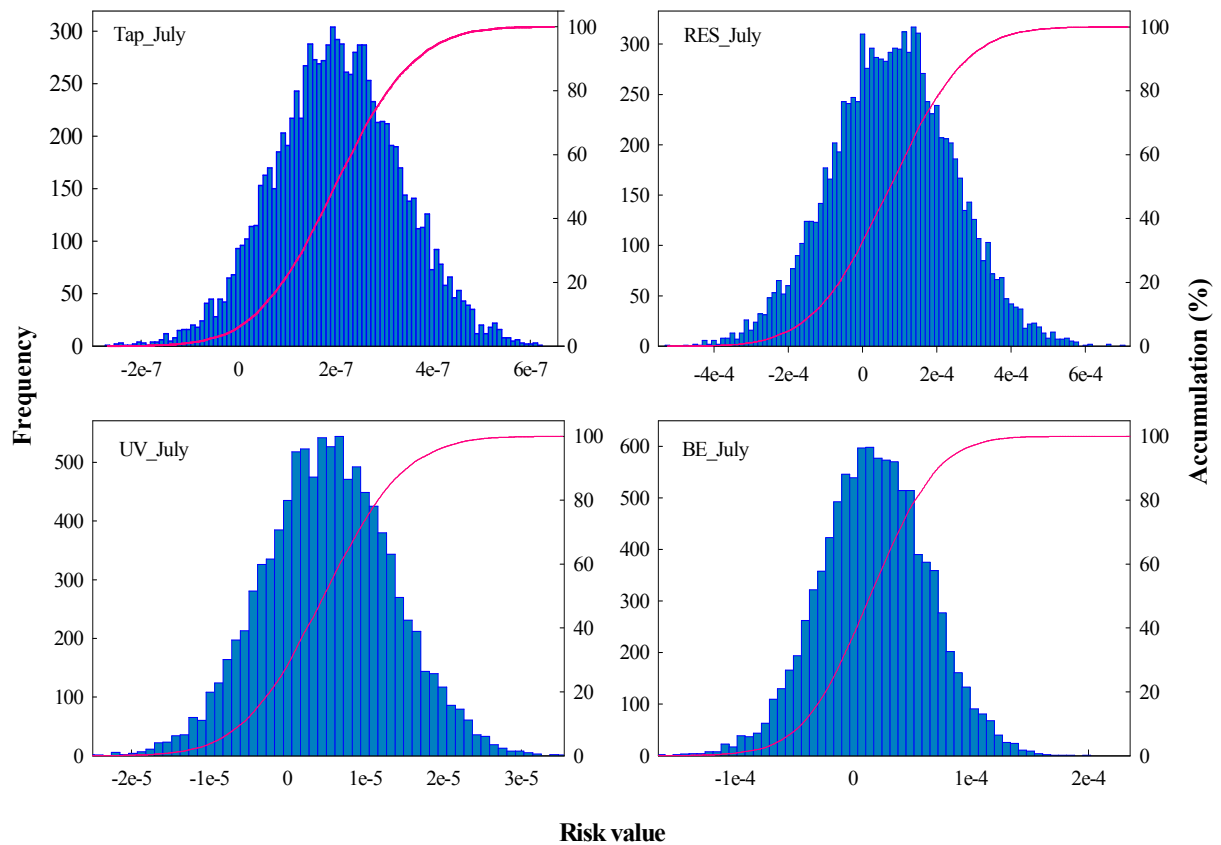


Fig. 1. Risk assessment by Monte-Carlo simulation in July from 2003 to 2005. The risk value estimate of 95% confidence interval.

영농기간 동안 실험포트의 대장균 농도는 각 처리용수별로 약간의 차이는 있지만 전체적으로 2005년의 농도가 2003년과 2004년에 비하여 낮게 조사되었다. 3년간의 실험결과모두 *E. coli*의 농도가 UV로 소독한 물로 관개하였을 때 가장 낮게 나타났고, 논에서 관행적으로 사용하고 있는 하천이나 저수지의 물로 관개하였을 경우보다도 상대적으로 낮게 나타났다. 위해성 평가를 한 결과 역시 하수를 UV로 소독한 물로 관개하였을 때  $10^5 \sim 10^6$ 으로 다른 처리구에 비해 낮게 나타났다. 2005년의 경우 다른 해에 비하여 위해성이 낮은데, 2003년과 2004년에 경운을 위한 초기 담수를 대장균의 농도가 높은 하수와 호수로 한 반면, 2005년에는 수돗물로 하였기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다(Fig. 2). 초기 담수를 비교적 수질이 깨끗한 물을 사용한 후 하수 처리수로 관개한다면 미생물에 대한 위해성이 감소할 것으로 생각된다.

음용수의 장내 질병에 관한 위해도 값은  $10^4$  이하인 경우 안전하며,  $10^6 \sim 10^8$  인 경우 질병을 일으킬 수 있는 가능성이 있다고 판단한다(USEPA, 1992). 3년 동안의 *E. coli* 농도를 평균하여 직접적으로 위험에 노출되는 농민과 어른에 비해 상대적으로 면적이 약한 어린이에 대해 위해성을 평가한 결과 이양 전 초기관개 시에는  $10^6 \sim 10^8$  으로 위해도가 낮게 나타났으나, 이양을 하고 시비를 주는 본격적인 영농활동시기에는 위해성이  $10^4 \sim 10^7$  으로 증가하였다. 본 연구의 선행 연구인 Jung (2005)에 의하면 관개 후 24시간이 경과하면 그 위해성이 감소하므로 관개 후 1~2일이 경과한 후 작업에 임하는 것이 위험을 줄일 수 있다고 보고하였다. Biofilter처리수는 6월에  $10^4$ 의 높은 위험성을 나타내었고, biofilter처리수를 습지와 연못을 이용하여 자연정화 한 경우  $10^5 \sim$

10<sup>-8</sup> 이었다. 이러한 결과는 자연정화방법인 pond를 하수처리에 이용할 경우 *E. coli* 농도가 크게 줄어들기 때문이다(Yoon, 2003). UV소독수는 3년동안의 결과를 평균하여 평가한 값이 10<sup>-5</sup> ~ 10<sup>-6</sup> 로, 각각 따로 평가하였을 때 보다 조금 높게 나타났는데, 2003년과 2004년에 UV소독수의 대장균 농도가 2005년에 비해 상대적으로 높아 표준편차가 높게 나왔기 때문이라 판단된다(Table 3). 그러나 다른 처리구와 비슷하거나 약간 낮은 값을 나타내므로 하수처리수를 UV로 처리한다면 위험이 낮아질 것이다.

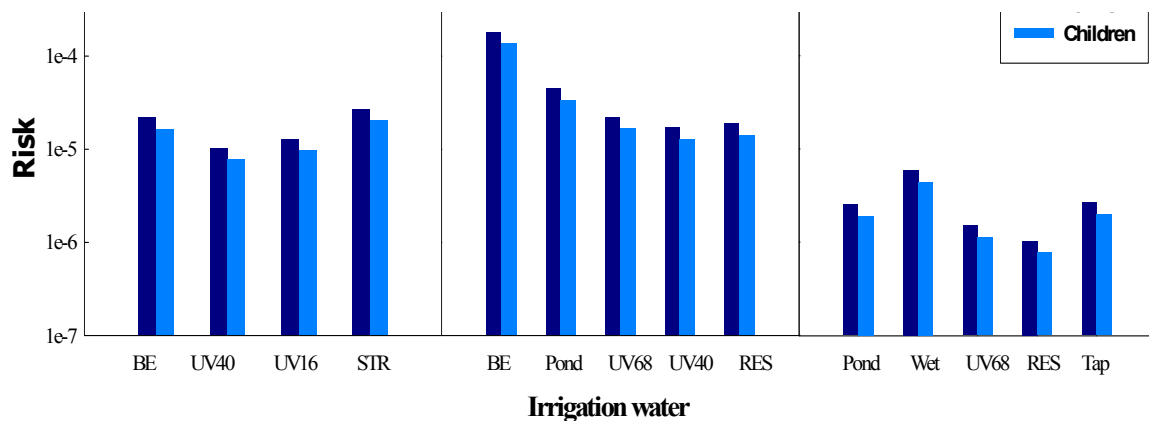


Fig. 2. Risk value of irrigation as each wastewater reclamation in three years

Table 3. Risk for farmer and children in reclaimed wastewater Irrigation(2003~2005).

	May		June		July		August	
	Farmer	Children	Farmer	Children	Farmer	Children	Farmer	Children
BE	5.8×10 <sup>-6</sup>	4.4×10 <sup>-6</sup>	1.9×10 <sup>-4</sup>	1.5×10 <sup>-4</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>	7.5×10 <sup>-6</sup>	9.9×10 <sup>-8</sup>	7.4×10 <sup>-8</sup>
NT	4.1×10 <sup>-8</sup>	3.1×10 <sup>-8</sup>	3.4×10 <sup>-5</sup>	2.6×10 <sup>-5</sup>	1.9×10 <sup>-6</sup>	1.4×10 <sup>-6</sup>	8.9×10 <sup>-6</sup>	6.7×10 <sup>-6</sup>
UV	2.3×10 <sup>-6</sup>	1.7×10 <sup>-6</sup>	2.1×10 <sup>-5</sup>	1.6×10 <sup>-5</sup>	2.7×10 <sup>-6</sup>	2.1×10 <sup>-6</sup>	9.4×10 <sup>-6</sup>	7.1×10 <sup>-6</sup>
CI	4.7×10 <sup>-6</sup>	3.5×10 <sup>-6</sup>	1.8×10 <sup>-5</sup>	1.4×10 <sup>-5</sup>	1.6×10 <sup>-5</sup>	1.2×10 <sup>-5</sup>	2.9×10 <sup>-5</sup>	2.2×10 <sup>-5</sup>
Tap	4.6×10 <sup>-6</sup>	3.5×10 <sup>-6</sup>	5.1×10 <sup>-7</sup>	3.8×10 <sup>-7</sup>	4.1×10 <sup>-7</sup>	3.1×10 <sup>-7</sup>	1.8×10 <sup>-6</sup>	1.4×10 <sup>-6</sup>

BE: biofilter effluent; NT: natural treatment(pond and wetland); UV: UV disinfection; CI: common irrigation water(stream and reservoir); Tap: tap water

대장균농도의 경우 토양교란에 의한 영향이 커서 같은 처리수임에도 불구하고 실험포트별로 농도차이가 크게 나타났으나, 위해성을 평가한 결과 하수를 자연정화 시설이나 UV로 소독하여 관개할 경우 위험이 낮아지는 것으로 관찰되었다. 그러므로 하수처리수를 재이용 할 경우 위해성을 줄이기 위해서는 UV소독 등의 적절한 처리를 거치는 과정이 중요할 것이다. 그리고 경운을 위한 초기 담수는 가능한 깨끗한 수질의 물로 하고, 그 이후 관개용수를 처리된 재이용수로 이용하는 것이 위험을 줄이는데 많은 영향을 줄 것으로 판단되어진다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 하수처리수를 관개용수로 재이용할 때 발생하는 위해성을 평가하였다. 3년간의 모니터링 결과 UV소독수와 Pond처리수에서 *E. coli* 농도가 낮게 측정되었다. 이를 beta-Poisson

모델로 농민과 어린이의 위해성을 평가한 결과 biofilter처리수를 제외한 다른 처리구에서는  $10^{-5}$  ~  $10^{-8}$  으로 나타났다. 이는 음용수의 위해도 기준 값인  $10^{-4}$  보다는 낮은 값이지만 질병을 일으킬 가능성이 있는 수준이므로 추가적인 처리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 초기 담수로 수질이 깨끗한 수돗물을 이용한 2005년의 위해도 값은 2003년과 2004년에 비해 매우 낮은 수준을 나타내었다. 그러므로 하수를 관개용수로 재이용 할 경우 수질에 따라 Pond저류나 UV소독의 추가적인 처리가 반드시 필요하며, 영농기간 초기에 경운을 위해 담수할 경우에는 비교적 수질이 양호한 물을 사용하는 것이 위해성을 줄일 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Ed. APHA, Washington, DC.
2. Bastos, R.K.X. and D.D. Mara. 1995. The bacteriological quality of salad crops drip and furrow irrigated with waste stabilization pond effluent: an evaluation of the WHO guidelines. *Water Science and Technology* 31 (12): 425-430.
3. Hass, C.N., J.B. Rose and C. Gerba. 1999. Quantitative microbial risk assessment. Wiley, New York.
4. Hass, C.N., J.B. Rose, C. Gerba and S. Regli. 1993. Risk assessment of virus in drinking water. *Risk Analysis*. 13: 545-552.
5. Jung, K. W., C. G. Yoon, H. S. Hwang, J. H. Ham, 2003, Disinfection and reactivation of microorganisms after UV irradiation for agricultural water reuse of biofilter effluent. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 45(7): 94-106.
6. Jung, K. W., C. G. Yoon, Y. J. An, J. H. Jang, J. H. Jeon 2005, Microbial risk assessment in treated wastewater irrigation on paddy rice plot. *Korea J. Limnol.* 38(2): 225-236.
7. Lee, H. M., S. N. Choi, E. K. Yoon, J. Y. Yoon 1999, Study on the methodology of the microbial risk assessment in food. *J Fd Hyg Safety* 14(4): 319-326
8. Nena Nwachuku, Charles P Gerba 2004, Microbial risk assessment: don't forget the children. *Current opinion in microbiology* 7:206-209
9. Peasey, A., U. Blumenthal. D. Mara. D. and G. Ruiz-Palacios, 2000, WELL study: A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: a Latin American perspective, Task No: 68 Part 2: 15-18.
10. Shuval, H., Y. Lampert and B. Fattal. 1997. Development of a risk assessment approach for evaluation wastewater reuse standards for agriculture. *water science and technology*. 35(11-12): 15-20.
11. USEPA. 1992. Manual, Guidelines for water reuse. USEPA/625/R-92/004. US Agency international development. <http://www.epa.gov>. Assessed 9 Aug. 2002.