



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](#)

2016년 8월
박사학위 논문

국내 원전 삼중수소의 거동특성 및 선량평가를 통한 인체 노출 영향분석 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

한 상 준

국내 원전 삼중수소의 거동특성 및 선량평가를 통한 인체 노출 영향분석 연구

A Tritium Environmental Dosimetric Analysis of
Domestic Nuclear Power Plants

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

한 상 준

국내 원전 삼중수소의 거동특성 및 선량평가를 통한 인체 노출 영향분석 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.

2016년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

한 상 준

한상준의 박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 송 종 순 (인)
위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)
위 원 조선대학교 교수 정 운 관 (인)
위 원 동국대학교 교수 김 유 석 (인)
위 원 한국원자력연구원 박사 박 정 훈 (인)

2016년 6월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	x
제1장 서 론	1
제2장 연구 내용 및 방법	3
제1절 삼중수소(³H)의 특성	3
1. 물리적 특성	3
2. 발생원	5
가. 자연발생	5
나. 핵실험	5
다. 원자력발전과 핵연료 재처리	6
3. 환경거동 특성	6
4. 방사선학적 특성	7
5. 생물학적 특성	8
제2절 원전 기체 및 액체의 삼중수소 배출관리	11
제3절 액체섬광계수기 특성	15
제4절 국내 원전 삼중수소 배출량, 풍향 빈도 및 환경거동 특성 평가	17
1. 고리원전	19
가. 기체 및 액체 배출량 평가	19
나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가	24
다. 환경매체 중 방사능농도 평가	25
2. 한빛원전	30

가. 기체 및 액체 배출량 평가	30
나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가	35
다. 환경매체 중 방사능농도 평가	35
3. 한울원전	40
가. 기체 및 액체 배출량 평가	40
나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가	45
다. 환경매체 중 방사능농도 평가	45
4. 월성원전	49
가. 기체 및 액체 배출량 평가	49
나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가	55
다. 환경매체 중 방사능농도 평가	56
5. 국내 원전 종합 평가	75
가. 기체 및 액체 배출량 평가	75
나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가	78
다. 환경매체 중 방사능농도 평가	78
제5절 환경매체 중 방사능농도 측정에 의한 선량평가 방법	79
1. 선량평가 결정집단	79
2. 선량평가 기본식	82
3. 선량평가 주요 입력변수	84
가. 평가대상 지점선정	84
나. 환경매체의 사용인자	85
다. 사용인자의 지역생산분율	87
라. 선량환산계수	88
제6절 노 시료 선량평가 방법 및 염색체 분석 방법	89
1. 표본선정	90
2. 노 시료 삼중수소 방사능농도 분석	91

가. 뇨 시료 삼중수소 분석 방법	91
나. 뇨 시료 삼중수소 방사능농도 평가	93
3. 염색체 분석 및 평가	99
가. 염색체 분석 방법	99
나. 염색체 분석 평가	100
4. 뇨 시료 분석에 따른 유효선량 평가 방법	101
제3장 연구 결과	104
제1절 기체 및 액체 삼중수소 배출물에 대한 유효선량 평가결과	104
제2절 환경매체 중 방사능농도 측정에 의한 유효선량 평가결과	107
제3절 뇨 시료 삼중수소 방사능농도에 따른 유효선량 평가결과	113
제4절 국내 삼중수소 음용수 섭취기준 제시 결과	114
1. 해외 사례 연구	114
2. 국내 삼중수소 음용수 섭취기준 제시 결과	116
제4장 결 론	118
참고문헌	120

표 목 차

[표 2.1] 삼중수소 생성 핵반응식과 반응 단면적	4
[표 2.2] 수소 및 수소동위원소	4
[표 2.3] 수소동위원소의 열역학적 특성	4
[표 2.4] 자연 중 삼중수소 분포	5
[표 2.5] 삼중수소의 핵분열 분율	6
[표 2.6] 원전 설계 기준치	12
[표 2.7] 삼중수소제거설비(TRF) 제원	15
[표 2.8] 국내 원전 삼중수소 환경방사능분석 환경매체	18
[표 2.9] 고리원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황	21
[표 2.10] 고리원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황	21
[표 2.11] 고리원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과	27
[표 2.12] 한빛원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황	32
[표 2.13] 한빛원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황	32
[표 2.14] 한빛원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과	37
[표 2.15] 한울원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황	42
[표 2.16] 한울원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황	42
[표 2.17] 한울원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과	47
[표 2.18] 월성원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황	51
[표 2.19] 월성원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황	51
[표 2.20] 월성원전 삼중수소제거설비(TRF) 운영 결과	54
[표 2.21A] 월성원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과	62
[표 2.21B] 월성원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과	63
[표 2.22] 국내 원전 기체 및 액체 삼중수소 배출량 비교	76
[표 2.23] 주요 국가별 선량평가 대상 개인 설정 현황	81

[표 2.24] 유기물 중 수소분율 및 유기물 비율	84
[표 2.25] 주요 국가별 평가대상 지점 설정 현황	85
[표 2.26] 주요 국가별 음식물 섭취량 적용 기준 현황	86
[표 2.27] 최대개인의 호흡 및 섭취자료(기체상 방사성유출물)	87
[표 2.28] 섭취량 중 지역 자급 생산 비율	88
[표 2.29] 농작물 중 수분의 비율	88
[표 2.30] 삼중수소의 연령군별 호흡 및 섭취선량환산인자(유효선량)	89
[표 2.31] 연구 대상자의 지역별, 성별, 연령별 인구 할당	91
[표 2.32] 뇨 중 삼중수소 방사능농도 분석 관련 이상 시료	95
[표 2.33] 삼중수소 검출률 및 방사능농도	95
[표 2.34] 1,000 증기세포 전체 계놈 기준 염색체 이상빈도 평균 비교	100
[표 3.1] 국내 원전 년도별 기체 및 액체 삼중수소에 대한 유효선량 평가결과	106
[표 3.2A] 국내 원전 환경매체에 대한 유효선량 평가결과	111
[표 3.2B] 국내 원전 환경매체에 대한 유효선량 평가결과	112
[표 3.3] 월성원전 주변지역 뇨 시료 중 삼중수소 유효선량 평가결과	113
[표 3.4] 해외 나라별 음용수 섭취한도 및 설정방법	115
[표 3.5] 연령군 별 음용수 섭취 삼중수소 농도 계산결과	117

그림 목차

[그림 2.1] 삼중수소 구조	3
[그림 2.2] 표준인에 대한 물의 체내 대사	10
[그림 2.3] 삼중수소화 된 물의 인체 대사모델(ICRP)	10
[그림 2.4] 유기결합 삼중수소의 인체 대사모델(ICRP)	11
[그림 2.5] 경수로 원전 기체폐기물처리계통	13
[그림 2.6] 경수로 원전 액체폐기물처리계통	13
[그림 2.7] 중수로 원전 기체폐기물처리계통	14
[그림 2.8] 중수로 원전 액체폐기물처리계통	14
[그림 2.9] 삼중수소제거설비(TRF) 원리	15
[그림 2.10] 액체섬광계수기 구성도	17
[그림 2.11] 고리원전 년도별 기체 배출량 비교	22
[그림 2.12] 고리원전 호기별 평균 기체 배출량 비교	22
[그림 2.13] 고리원전 년도별 액체 배출량 비교	23
[그림 2.14] 고리원전 호기별 평균 액체 배출량 비교	23
[그림 2.15] 고리원전 풍향 빈도	24
[그림 2.16] 빗물 중 삼중수소 년도별 농도 분포(고리원전주변)	27
[그림 2.17] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(고리원전주변)	28
[그림 2.18] 지표수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(고리원전주변)	28
[그림 2.19] 지표수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(고리원전주변)	29
[그림 2.20] 해수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(고리원전주변)	29
[그림 2.21] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(고리원전주변)	30
[그림 2.22] 한빛원전 년도별 기체 배출량 비교	33
[그림 2.23] 한빛원전 호기별 평균 기체 배출량 비교	33
[그림 2.24] 한빛원전 년도별 액체 배출량 비교	34

[그림 2.25] 한빛원전 호기별 평균 액체 배출량 비교 34

[그림 2.26] 한빛원전 풍향 빈도 35

[그림 2.27] 빗물 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한빛원전주변) 38

[그림 2.28] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한빛원전주변) 38

[그림 2.29] 지표수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한빛원전주변) 39

[그림 2.30] 해수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한빛원전주변) 39

[그림 2.31] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한빛원전주변) 40

[그림 2.32] 한울원전 년도별 기체 배출량 비교 43

[그림 2.33] 한울원전 호기별 평균 기체 배출량 비교 43

[그림 2.34] 한울원전 년도별 액체 배출량 비교 44

[그림 2.35] 한울원전 호기별 평균 액체 배출량 비교 44

[그림 2.36] 한울원전 풍향 빈도 45

[그림 2.37] 빗물 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한울원전주변) 47

[그림 2.38] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한울원전주변) 48

[그림 2.39] 해수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한울원전주변) 48

[그림 2.40] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한울원전주변) 49

[그림 2.41] 월성원전 년도별 기체 배출량 비교 52

[그림 2.42] 월성원전 호기별 평균 기체 배출량 비교 52

[그림 2.43] 월성원전 년도별 액체 배출량 비교 53

[그림 2.44] 월성원전 호기별 평균 액체 배출량 비교 53

[그림 2.45] TRF 운영에 따른 저감율 비교 54

[그림 2.46] 월성원전 풍향 빈도 56

[그림 2.47] 공기(수분) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 64

[그림 2.48] 공기(수분) 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향) 64

[그림 2.49] 공기(수분) 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-울산방향) 65

[그림 2.50] 빗물 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 65

[그림 2.51] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향) 66

[그림 2.52] 지표수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 66

[그림 2.53] 지표수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-울산방향) 67

[그림 2.54] 식수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 67

[그림 2.55] 식수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향) 68

[그림 2.56] 식수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-울산방향) 68

[그림 2.57] 지하수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 69

[그림 2.58] 지하수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향) 69

[그림 2.59] 곡류(보리) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 70

[그림 2.60] 곡류(쌀) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 70

[그림 2.61] 농산물(배추) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 71

[그림 2.62] 과일류(감) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 71

[그림 2.63] 과일류(감) 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향) 72

[그림 2.64] 육류(닭) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 72

[그림 2.65] 우유 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 73

[그림 2.66] 우유 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향) 73

[그림 2.67] 해수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변) 74

[그림 2.68] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변) 74

[그림 2.69] 국내 원전 삼중수소 년도별 기체 배출량 추이 비교 76

[그림 2.70] 국내 원전 삼중수소 년도별 액체 배출량 추이 비교 77

[그림 2.71] 원전별 삼중수소 전체(2003~2013년) 평균 배출량 비교 77

[그림 2.72] 중수로 원전 액·기체 삼중수소 호기당 평균(2006~2012년) 배출량 비교 78

[그림 2.73] 방사성물질의 인체피폭 주요경로 80

[그림 2.74] 월성원전 주변군 및 대조군 지역선정 90

[그림 2.75] 전처리 장비 및 채취한 주민 뇨 시료 91

[그림 2.76] 삼중수소 분석 절차도 92

[그림 2.77] 주변군(양남면) 삼중수소 방사능농도 분포도 95

[그림 2.78] 주변군(양북면) 삼중수소 방사능농도 분포도 96

[그림 2.79] 주변군(감포읍) 삼중수소 방사능농도 분포도96

[그림 2.80] 대조군1(경주시) 삼중수소 방사능농도 분포도97

[그림 2.81] 대조군2(울진군) 삼중수소 방사능농도 분포도97

[그림 2.82] 원전으로부터 거리별 삼중수소 검출률98

[그림 2.83] 원전으로부터 거리별 삼중수소 방사능농도 분포98

[그림 2.84] 세포유전학적 분석 방법 도식화99

[그림 2.85] 안정형 염색체 이상 예시99

[그림 2.86] 1,000 중기세포 전체 계놈 기준 염색체 이상빈도 평균 비교100

[그림 3.1] 국내 원전 기체 삼중수소 평균 유효선량 비교106

[그림 3.2] 국내 원전 액체 삼중수소 평균 유효선량 비교107

[그림 3.3] 국내 원전 지표수 삼중수소 최대 방사능농도에 대한 유효선량108

[그림 3.4] 월성원전 농·축산물 삼중수소 평균 방사능농도에 대한 유효선량109

[그림 3.5] 국내 원전 시료별 삼중수소 최대 방사능농도에 대한 유효선량110

[그림 3.6] 월성원전 주변지역 인체 뇨 중 삼중수소 유효선량 평가결과114

Abstract

A Tritium Environmental Dosimetric Analysis of Domestic Nuclear Power Plants

By : Han Sang-Jun

Advisor : Prof. Lee Goung-Jin, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

A tritium released at domestic nuclear power plants is an important nuclide in terms of emission quantity among all of gaseous and liquid radioactive wastes. Especially, a tritium is produced and discharged in heavy-water reactors much more than light-water reactors. In this paper, a discharge amount and environmental behavior characteristic of tritium was investigated, and exposure dose by it was analysed by using urine samples of Wolsong NPP surroundings. Also, based on above analysis results, improvement methods for reducing the exposure dose of residents were presented

By research result, in case of Gori NPP, although the tritium discharge amount of gaseous and liquid form is similar, that of liquid form increased as time passed. And, in case of Hanbit NPP, the tritium discharge amount of liquid form is about four times more than that of gaseous form, and an influence according to time didn't appear. Otherwise, gaseous tritium was discharged three times more than liquid tritium, and the discharge amount of gaseous tritium decreased as time passed. it is judged that these trend is due to the operation of tritium removal facility.

By an evaluation result on the tritium discharge amount of NPP, it can be

seen that Wolseong NPP discharge a gaseous tritium above 53 times compared with Hanul NPP, and that release a liquid tritium above 4.5 times compared with Gori NPP. It can be seen that the discharge amount of gaseous tritium in light-water reactor is the lowest at Hanul NPP, and that the discharge amount of liquid tritium is the lowest in Gori NPP. Therefore, it is judged that measures for reducing the discharge amount of liquid tritium in Gori NPP, and the discharge amount of gaseous liquid tritium in Hanul NPP must be established.

By analysis result on behavior characteristic in environmental media, it can be seen that the correlation according to distance from Gori, Habbit, Wolseong NPP targeting rain samples turns up as relatively $R^2=0.950$, $R^2=0.889$, $R^2=0.990$. That is, the more the distance from nuclear power plants is near, the more tritium concentrations included into rain samples is high.

Also, by a behavior characteristic evaluation result on environmental media-moisture in air(Gyeongju and Ulsan direction), rain(Gyeongju direction), surface water(Ulsan direction) etc.-of Wolseong NPP surroundings, the correlation of three points turns up as relatively $R^2=0.921$, $R^2=0.967$, $R^2=0.903$, $R^2=0.988$, and it can be seen that the effect by tritium appear distinctly as the distance from NPP increase

Merely, to confirm the effect by a distance difference from NPP targeting environment media which the picking sites of tritium is only 2, it is judged that picking sites above 3 for analyzing have to be selected, and that sample picking sites on main wind direction is needed additionally.

By an human exposure influence valuation result due to tritium targeting the resident of Wolseong NPP surroundings, the more the distance from Wolseong

NPP is near, the correlation between detectability factor and degree of exposure a noticeable distinction by way of $R^2=0.9744$. And chromosome abnormality frequency does not appear, because of a low level radioactivity

By an exposure dose evaluation on environmental media and urine samples, it can be confirmed that a contribution by inhalation is low, and that a contribution by ingestion is high. Especially, by an exposure dose evaluation result by ingestion targeting Wolseong NPP, environmental media which have the greatest effect on exposure dose were barley, cabbage, rice etc.

An exposure dose evaluation was carried out targeting one year of age and the barley of Wolseong NPP surroundings, and by an evaluation result, it turns out that an exposure dose calculated amounts to 4.5 % of annual dose limit(1 mSv/hr). Generally, because values measured are more accurate than those calculated theoretically, it is judged that the retention of measurement data by supplementing picking sites according to main wind direction is very important in this paper.

By an exposure dose evaluation on urine samples, even if Uljin country residents are exposed to radiation during 1 year by the high tritium concentration, an exposure dose calculated amounts to 0.253 % of dose limit(1 mSv/hr)

In this paper, because a tritium intake standard on a drinking water does not exist, an intake standard on drinking water based on foreign examples was established. By establishment and analysis result, it is judged that a tritium intake standard of 2,000 Bq/L—which amounts to 2 % of domestic radioactivity disaster prevention measures law—on a drinking water is the most reasonable in this paper.

Because the energy tritium is low, the effect on environment is insignificant. However, the discharge amount of tritium is lots of, and because tritium is continuously released from NPP, it is judged that continuous monitoring is needed. Especially, it is judged that technical studies and applications on tritium removal facility of heavy-water reactor are needed, and that management solutions for continuous monitoring on the surrounding environment and residents of NPP are needed.

Also, in respect of an resident exposure dose evaluation, because values measured are correct compared to those calculated theoretically, it is judged that long-term plan on this is needed.

제1장 서론

국내 원자력발전소는 현재 24기가 가동 중에 있으며, 대부분 경수로이고 유일하게 경북 경주시에 중수로 4기가 있다. 중수로인 월성1,2,3,4호기는 월성1호기가 1983년 4월 상업운전을 시작으로 현재 30년 운영 중에 있다.

원자력발전소는 가동 중에 필연적으로 여러 방사성핵종을 포함한 기체 및 액체 방사성폐기물을 배출하는데 대부분 방사성핵종은 계획적이고 통제된 상태에서 법적 기준치 미만으로 배출 관리를 하고 있지만 원전 주변지역 주민들에게는 소량의 배출만으로도 심리적 불안감을 주는 것이 사실이다.

특히, 국내 원전에서 배출되는 기체 및 액체 방사성폐기물 중 배출 기여도가 가장 높은 방사성물질이 삼중수소이다. 중수호가 경수호보다 삼중수소가 더 많이 배출되고 있으며 2015년 기준 삼중수소 액체 방사성폐기물은 약 2배 내지 3배, 기체 방사성폐기물의 경우는 약 10배 정도가 배출되고 있다. 중수호는 냉각재와 감속재로 중수(D₂O)를 사용하기 때문에 중성자 조사에 의해 생성된 삼중수소의 양은 경수호에 비해 절대적으로 많은 양을 차지하고 있다.

삼중수소는 12.3년의 반감기를 가진 순수β 방출핵종으로 붕괴하여 18.6 keV의 β선을 방출하면서 안정동위원소인 헬륨(³He)으로 변환된다. 삼중수소는 인체조직에서의 투과거리는 8 μm로 매우 작아 종이 두께 정도의 차폐물질을 통과하지 못해 외부피폭의 우려는 거의 없지만, 내부피폭으로 피부, 호흡 및 섭취를 통해 물이나 수증기 상태로 인체 내에 유입되면 전체 삼중수소 방사선 에너지가 체내에 흡수되어 방사선 장해를 가져올 수도 있다[10]. 그리고 체내에 기체 형태로 유입된 삼중수소는 인체 내에서 대부분 용해되지 않고 배출이 된다. 호흡을 통해 한번 흡입된 기체 형태의 삼중수소 중 약 0.004% 이하만이 흡수되는 반면 삼중수소화 된 물(HTO)의 경우는 증발된 후 공기 중에서 4~5분 동안 호흡으로 인체에 유입되면 98~99% 정도가 흡수되는 것으로 알려져 있다[10].

이러한 삼중수소가 원전으로부터 다량으로 배출되고 있고 이 배출된 삼중수소는 환경 및 인체에 영향을 미칠 수 있기 때문에 항상 모니터링을 해야 하는 중요한 방사성핵종 중 하나이다. 특히 중수로가 운영 중인 월성원전은 배출량도 많을 뿐만 아니라 일반 환경매체에서도 눈에 띄게 검출이 되고 있기 때문에 월성원전 주변지역은 항상 삼중수소에 대한 관심의 대상이 되고 있다.

본 연구에서는 원전 기체 및 액체 방사성폐기물 중 배출 기여도가 높은 삼중수소를 대상으로 경수로 및 중수로에서의 배출량 비교 평가와 환경매체에서의 거동 특성을 비교 평가하였다. 또한 선량평가를 수행하여 어느 정도 수준인가를 확인하였다.

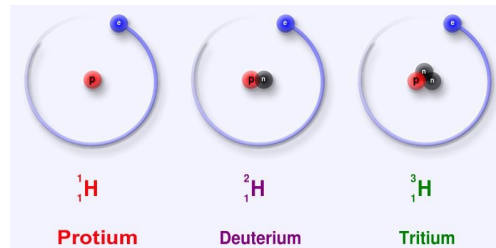
그리고 중수로인 월성원전 주변지역 주민을 대상으로 삼중수소로 인한 인체 노출 정도와 영향평가를 실시하고 그에 따른 향후 삼중수소 관리에 대한 대안을 제시해 보고자 하였다.

제2장 연구 내용 및 방법

제1절 삼중수소(^3H)의 특성

1. 물리적 특성

삼중수소(三重水素, ^3H) 또는 트리튬(tritium)은 수소의 동위원소로 ^3H 로 표기하며 흔히 T(←Tritium)로 표기한다. 수소의 가장 풍부한 동위원소인 경수소의 원자핵은 중성자를 가지고 있지 않지만, ^3H 의 원자핵은 두 개의 중성자와 하나의 양성자로 구성되어 있다. ^3H 의 원자 질량은 3.016이다. 표준 압력 및 기온에서 기체 형태로서 ^3H 는 산소와 결합하여 $^3\text{H}(\text{T}_2\text{O}$ 혹은 $\text{THO})$ 를 형성하며, 이는 중수소 산화물인 중수(D_2O)와 유사하다[5][10][11].



[그림 2.1] 삼중수소 구조

^3H 는 Physical Half life가 12.3년으로써 ^3He 로 전환되며, 에너지는 최대 18.0 keV, 평균 5.7 keV의 β 를 방출한다. ^3H 의 물리·화학적 특성은 H와 비슷하며, 산소(O)와 반응하여 삼중화 된 물(HTO , Tritiated Water)의 형태로 형성되기 때문에 물(H_2O)속의 ^3H 는 HTO 의 형태로 물의 순환에 의해 거동을 하고, 이러한 ^3H 는 유기화합물의 H와 교환이 가능하고 플라스틱 벽을 통해 확산이 가능하다. 화합물(T_2O , HTO 등)은 물(H_2O)에 비해 비중과 끓는점이 더 크며, 확산과 화학반응 속도는 느리다. 그리고 수소동위원소는 광합성과 생물학적 과정을 거쳐 H 가스 형태, 물(H_2O)의 형태, 메탄(CH_4) 형태의 다양한 분자 구조를 형성한다[5][10][11].

지구에 존재하는 H는 보통의 ^1H , ^2H , ^3H 가 있는데 이 중 ^3H 가 차지하는 비율은 전체 수소동위원소 중 1E-18% 정도로 무시할 수 있지만 원전을 운영할 때 발생되는 ^3H 양은 무시할 수 없는 양으로 판단된다[5][10][11]. [표 2.1]에서 [표 2.3]까지 ^3H 특성에 대해 나타내었다.

[표 2.1] 삼중수소 생성 핵반응식과 반응 단면적

구분	핵반응	발열량(MeV)	핵반응 단면적(barns)
1	$^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$	6.258	5.3E-4
2	$^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$	0.765	5.3E+3
3	$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$	4.794	9.5E+2
4	$^7\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$	- 2.465	8.6E-2

[표 2.2] 수소 및 수소동위원소

구분	수소	중수소	삼중수소
기호	H 또는 ^1H	D 또는 ^2H	T 또는 ^3H
이름	Protium	Deuterium	Tritium
질량(amu)	1.00783	2.01410	3.01605
존재비(%)	99.985	0.015	~1E-16
중성자포획 반응단면적(barn)	0.33	5.1E-4	
방사성 붕괴	-	-	베타선

[표 2.3] 수소동위원소의 열역학적 특성

특성	H ₂ O	D ₂ O	T ₂ O
끓는점	100.00	101.42	101.51
삼중점 온도(°C)	0.010	3.82	4.49
삼중점 압력(mmHg)	4.58	5.02	4.87
기화열(kcal/mole)	9.72	9.9	10.1

2. 발생원

가. 자연발생

자연적으로 생성되는 ^3H 의 대부분은 우주선의 양자(P)나 중성자(n)가 대기 중의 O, N, H_2O 등과 충돌로 즉, $^{14}\text{N}(n, T)^{12}\text{C}$ 반응이나 $^{16}\text{O}(n, T)^{14}\text{N}$ 등의 반응으로 생성된다.

이렇게 생성된 ^3H 는 성층권과 대류권에 gas 형태로 존재하다가 산화되어 주로 HTO의 형태로 비, 눈 또는 대기 중의 수분에 함유되어 지구 표면에 도달하게 된다. 이렇게 자연적으로 매년 생성되는 ^3H 양은 약 $7.2\text{E}+4$ TBq 정도이고, 이중 생물권 내에 정상적인 상태에서의 존재량은 약 $1.04\text{E}+8$ TBq 정도로 추정되고 있다. [표 2.4]에 자연 중 ^3H 분포를 나타내었다[4][6].

[표 2.4] 자연 중 삼중수소 분포

Environmental Compartment	Percent Tritium Distribution(%)
Hydrosphere	~90
Troposphere	
Water vapour	0.1
Molecular hydrogen	0.02 to 0.2
Methane	<0.04
Stratosphere	
Water	~10
Molecular hydrogen	0.004 to 0.007

나. 핵실험

핵분열시 생성된 중성자(n)는 원자로 구조물 내에 존재하는 N와 O 원소를 방사화 시키고 이에 따라 ^3H 가 생성된다. 1970년까지 핵실험에 의하여 방출된 ^3H 의 총량은 $1.3\text{E}+8 \sim 1.7\text{E}+8$ TBq 정도로 추정된다. 핵실험으로 방출된 ^3H 는 성층권으로 들어갔다가 다시 대류권으로 이동하여 빗물로 인하여 대기 중에서 급격히 제거되며 최종 해수나 육수에서 검출된다[10].

다. 원자력발전과 핵연료 재처리

원자로에서의 ^3H 는 핵연료 물질의 붕괴 및 B, Li의 원소들의 중성자 방사화 반응으로 생성되며, 경수로에서의 반응은 $^{235}\text{U}(n, f)^3\text{H}$, $^{239}\text{Pu}(n, f)^3\text{H}$ 등이며, 생산되는 양은 $0.22\text{E}+8$ TBq이고 중수로에서는 $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ 반응으로 $0.37\text{E}+8$ TBq가 생산된다.

원전 시설 가동으로 환경에 배출되는 양은 $0.23\text{E}+8$ TBq 정도이며, 핵연료 재처리 시설에 의한 ^3H 는 사용이 끝난 핵연료봉 중에 존재하고 재처리과정에서 HT 형태로 생성되며, 이러한 과정에서 대기 중으로 방출될 경우 그 양은 약 0.89 TBq/MWe·yr로 추정된다[5][10][11]. 아래 핵분열에 의해 생성되는 ^3H 의 핵연료 물질 당 Thermal fission yield를 [표 2.5]에 나타내었다.

[표 2.5] 삼중수소의 핵분열 비율

핵종	Fission yield(triton/fission)
^{233}U	$0.68\text{E}-4 \sim 1.11\text{E}-4$
^{235}U	$0.80\text{E}-4 \sim 1.44\text{E}-4$
^{239}Pu	$1.34\text{E}-4 \sim 1.75\text{E}-4$

3. 환경거동 특성

^3H 의 환경거동 특성을 파악하기 위해서는 원전으로부터 환경으로 방출된 ^3H 가 어떻게 거동하는지를 파악하는 것이 중요하다. 자연적으로 생성되는 ^3H 중 2/3 이상이 성층권에서 생성되고, 이렇게 생성된 ^3H 는 대류권으로 유입된 후 강수와 강설에 의해 지표면에 도달하거나, 대기 중 수분의 형태로 존재하게 된다. 자연적이든 핵실험에 의한 것이든 ^3H 는 전 지구에 영향을 미치게 된다[5][10][11].

^3H 는 환경 중에서 대기 중 지표면과 식물로 침착하기도 하며 환경으로부터 생물체로 흡입하여 농축되기도 한다.

대기에 존재하는 ^3H 는 강수 및 강설에 의해 토양으로 이행되기도 하고 대기 중 HT는 토양 중에 존재하는 미생물에 의해 HTO 산화되어 흡수되기도 하며 대기와 토양 간의 ^3H 의 교환과정에 의한 이동이 이루어진다.

식물 표피와 HT와의 접촉에서 HT가 HTO로 산화, 흡수되거나 식물 경근으로부터 HTO의 흡수가 되며 잎새 기공을 통한 대기 HTO의 흡수가 이루어지는데 흡수 정도는 계절 및 대기의 온도, 습도에 따라 급격하게 변화한다[5].

생물체 중에 존재하는 ^3H 는 세포 내 수분 중 ^3H 인 TFWT와 세포의 구성원소인 C, O, N, P 등에 결합되어 있는 OBT형으로 구분하고 있다. 인체로의 유입경로는 피부, 호흡, 음식물 섭취에 의한 흡수이며 인체 내 흡수되는 ^3H 는 대부분이 HTO이며, HT가 인체에서 HTO로 산화되어 흡수될 확률은 0.004%로서 주민피폭선량 평가상 HT는 크게 중요하지 않으며 인체에 주로 영향을 주는 것은 HTO이다[5].

생물체 내 TFWT ^3H 는 잎새 기공을 통해 흡수, 잎 표면에서의 동위체 교환반응, 뿌리를 통한 수분 흡수 등에 의해 존재하는데 반면, OBT형 ^3H 는 대부분 광합성 반응에서 H와 ^3H 의 동위체 교환반응에 의해 생성된다.

식물체내의 ^3H 농축계수는 0.04~0.45로서 식물체 내 농축은 거의 일어나지 않는 것으로 알려져 있다. 월성원전 주변의 솔잎 내에 ^3H 가 농축되는 것이 아니고 솔잎 내 ^3H (TFWT)가 잎의 기공과 토양수로부터 뿌리를 통하여 동시에 흡수하기 때문에 빗물이나 토양수 중 농도보다 약간 높은 경향을 나타내는 것이다.

4. 방사선학적 특성

^3H 는 인체의 구성 성분 중 가장 기본이 되는 원소이기 때문에 대부분의 생체는 필수적으로 H의 동위원소인 ^3H 를 함유하게 된다. ^3H 는 주로 HTO 형태로 존재하며 물리·화학적으로 물(H_2O)과 유사하여 물과 동일한 양상으로 거동하고 인간은 피부, 호흡, 음식물 섭취 등을 통한 ^3H 에 오염될 우려가 있다.

^3H 에서 방출된 β 는 표적 세포에 도달하지 못하므로 외부피폭은 무시할 수 있지만 물이나 수증기를 통해서 인체 내부로 들어와 내부피폭을 유발할 경우에는 문제가 될 수 있다.

인체의 ^3H 는 직접 측정이 불가능하므로 뇨시료를 분석하여야 한다. ^3H 의 체내 거동은 유입 경로보다는 화학적 형태에 의해 좌우되지만 ^3H 는 여러 방사성핵종에 비해 방사선위해도가 낮은 것으로 알려져 있다.

HTO는 세포 사이를 자유로이 이동하여 짧은 시간에 인체 체액과 평형을 이루므로 체내에 균일하게 분포하고, 체내에 축적되지 않고 체류시간도 짧아 ^3H 에서 방출되는 β 의 평균 비정이 $0.68 \mu\text{m}$ 로 세포의 크기에 비해 작으므로 조직에 미치는 평균 선량이 적다[11].

또한 ^3H 를 가지고 있는 DNA 선형핵은 세포핵 내에서 ^3H 의 선택적인 침착을 일으키는데, DNA에 결합된 ^3H 는 특정 세포에 피폭을 주게 되며 이는 결과적으로 균일하게 분포한 경우보다 더 큰 생물학적 영향을 줄 수 있다.

DNA 연결고리(C-H)가 ^3H 로 치환되었다 하더라도 ^3H 에서 방출하는 β 의 에너지가 낮고 ^3H 가 붕괴하여 생성되는 ^3He 의 되튐에너지는 3 eV로 낮아 화학결합을 끊지 못하므로 무시할 수 있으나, ^3He 원자는 C와 결합력이 약하여 DNA의 분자 구조를 변화시켜 생리적 장애와 유전적 장애를 유발할 수 있다.

5. 생물학적 특성

원전으로부터 주변 환경으로 방출된 ^3H 는 주로 HTO 형태로서 환경에서 일반 물과 거의 동일한 거동을 보이고, 인간은 항상 물을 이용하고 있기 때문에 음식물 섭취나 호흡을 통해 ^3H 에 피폭될 가능성이 충분히 있다.

ICRP Pub.23에 의하면 체중 70 kg인 표준인은 42 kg 정도가 체액으로 구성되어 있고, 그 중 44%가 세포 외액에 나머지 56%가 세포 내액에 존재한다고 기술되어

있다. 이와 관련하여 [그림 2.2]에 체중이 70 kg인 표준인을 대상으로 인체 내에서 물의 대사를 나타내었다.

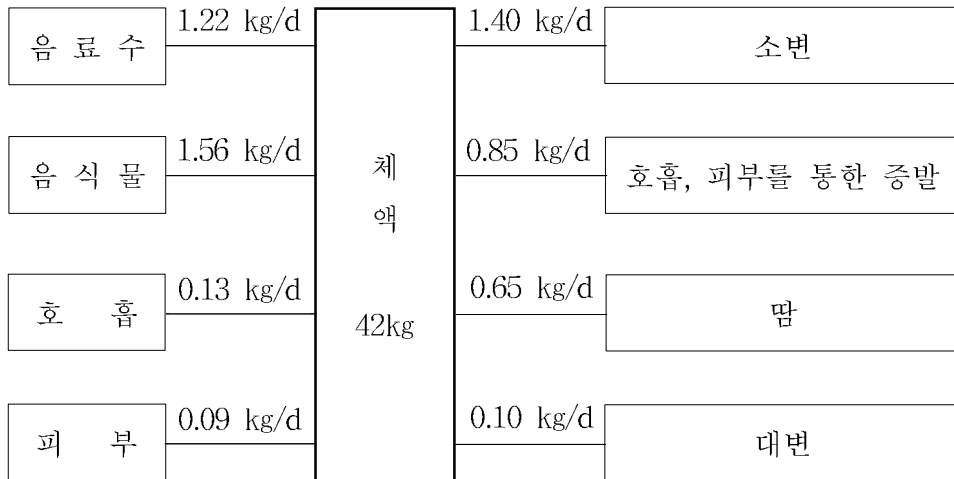
체액 중 ^3H 의 일부는 각종 과정을 통해 조직 결합성 OBT(Organically Bound Tritium)가 되는데, 유기 성분으로 들어가는 속도는 간이나 소화관 등에서는 빠르고, 근육이나 뇌 등은 비교적 느리며, 지방조직으로 들어가는 속도는 매우 느린 ^3H 는 체내에서 붕괴함으로써 내부피폭을 일으킨다[15].

또한 ^3H 는 DNA 합성시 DNA를 구성하고 있는 수소와 치환되어 C-H-3의 결합 상태가 되고, 붕괴를 하여 C-He-3 상태로 되는데, 이 결합은 매우 약해 탄소 이온과 헬륨 원자로 분리되고, 탄소 이온이 DNA 내의 위치 변동에 따라 생리적 장애와 유전적 장애를 유발 할 수 있다. 수분은 인체에 쉽게 흡수되므로 ^3H 의 산화물은 수소분자 형태일 때에 비해 10,000~20,000배 인체에 유해하다[11].

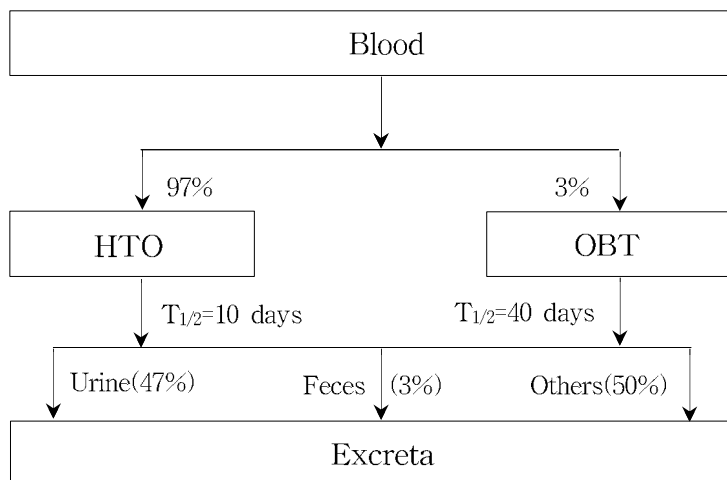
인체에 수분의 형태로 흡수된 ^3H 는 4~18일의 Biologic Half life를 가지고 체류한 후 배출되게 되는데 흡수된 ^3H 중 일부는 체내 유기화합물과 화학교환 반응을 일으킨다. 실제 90% 이상의 피폭은 체내수 형태의 ^3H 에 기인하며, 유기화합물 형태는 피폭이 10% 이하로 영향을 미친다. 체내수의 반감기는 하루에 물을 2.7 L 마실 때 10.2일, 12 L 마실 때 2.4일 정도이다. 따라서 ^3H 피폭을 줄이기 위해서는 물을 많이 마시는 것이 매우 중요함을 알 수 있다[10].

그리고 유기화합물 형태로 치환된 체내 ^3H 의 생물학적 반감기는 대개 한달 내외 이나 DNA 등에 치환된 ^3H 의 생물학적 반감기는 수백 일에 달한다.

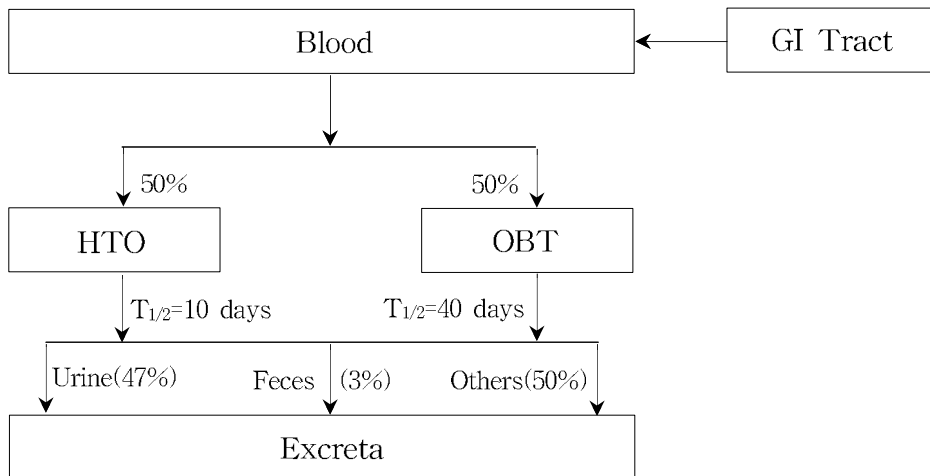
아래 [그림 2.3]과 [그림 2.4]는 ICRP에서 제시하고 있는 ^3H 의 HTO와 OBT 형태의 신체대사 모델을 나타내었다.



[그림 2.2] 표준인에 대한 물의 체내 대사



[그림 2.3] 삼중수소화 된 물의 인체 대사모델(ICRP)



[그림 2.4] 유기결합 삼중수소의 인체 대사모델(ICRP)

제2절 원전 기체 및 액체의 삼중수소 배출관리

원전에서는 원전 운영으로 방사선학적 위험을 방지하고자 방사성유출물을 지속적으로 감시하고 있다. 이를 위해 원전에서는 방사성핵종(^3H)에 대해 방사능 농도 기준으로 배출관리기준(Effluent control limits)을 만족하도록 방사성유출물을 감시하고 있다. 그리고 배출된 기체 및 액체 방사성유출물이 피폭경로를 거쳐 인간에게 섭취되는 경우를 고려하여 원전주변지역에 거주하고 있는 주민의 방사선량이 일반인 연간선량한도와 원전 운영에 따른 환경상의 위해방지조항을 만족하도록 배출 관리하고 있다[42].

원자력안전위원회고시 제2014-34호 ‘방사선방호 등에 관한 기준’에는 각 방사성핵종의 배출관리기준과 일반인에 대한 방사선량기준이 제시되어 있다. 이렇듯 원전에서 방사성유출물의 배출에는 핵종별 방사능 농도 기준인 배출관리기준과 피폭 방사선량에 대한 기준을 동시에 만족하도록 규정하고 있으나 경수로 원전의 경우는 원전 호기별로 배출된 방사성유출물의 총량에 대해 별도로 규제하지 않고 있다. 다만, 중수로 원전(월성원전)의 경우 연속배출(Continuous release) 형태를 고려하여 배출관리기준과 피폭방사선량 기준과 더불어 추가적으로 각 방사성핵종별 배출 총량을 정하여 감시하고 있다. 이것을 유도배출한계(Derived release limits,

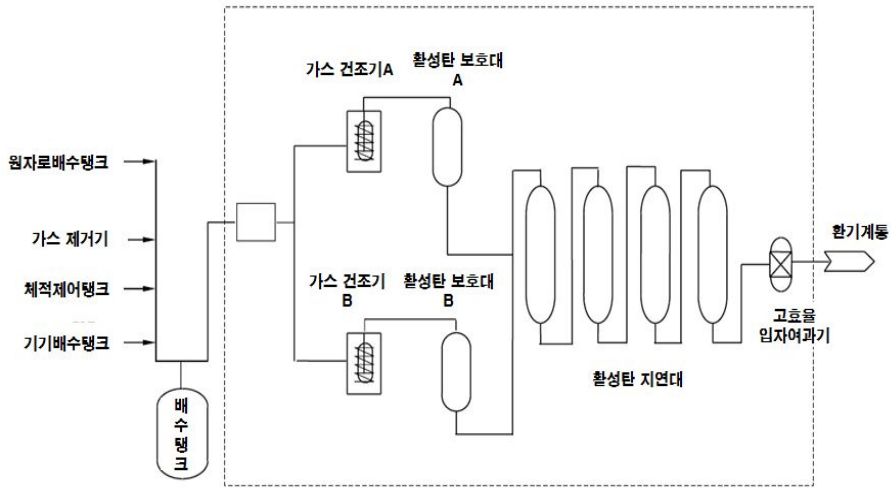
DRLs)라 한다. 예를 들어 중수로 원전 호기별 기체 삼중수소의 경우 1.05E+5 TBq로 정하고 있으며, 액체 삼중수소는 3.48E+4 TBq로 정하고 있다[42].

원전의 주요 기체폐기물 발생원은 체적제어탱크 배기, 1차 계통 탈기기, 원자로 냉각재 배수탱크 배기 등으로 발생된 공기 중 입자성 방사성물질은 Filter 등에 의한 여과기법이 사용되며 방사성요오드와 불활성가스 등의 방사성기체는 활성탄에 의한 흡착과 감쇄 등의 방법을 사용하고 있다[42].

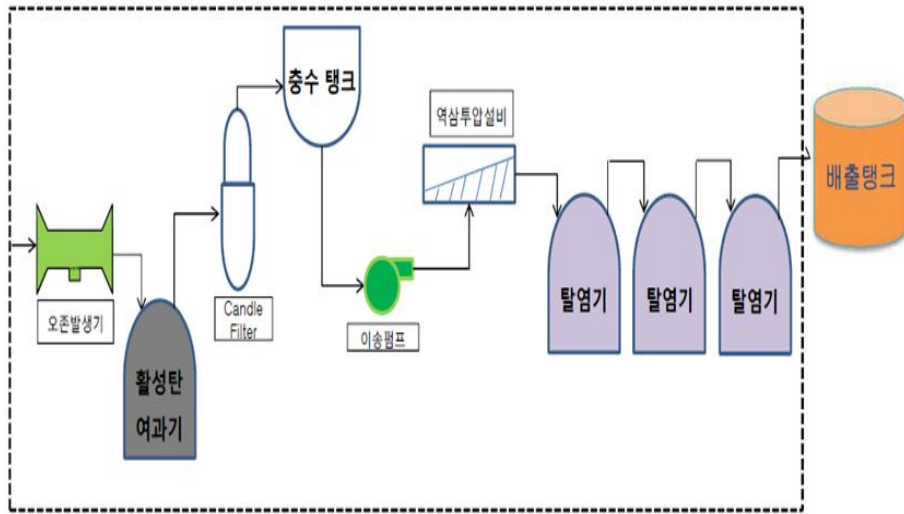
액체 방사성폐기물 처리계통은 발전소별로 방사성폐기물의 특성에 따라 다양한 처리공정을 이용하고 있다. 시료채취구역 배수 및 장치 배수, 바닥배수 등과 같이 고체 성분의 비율이 높고 방사능 준위가 다양한 액체폐기물은 일반적으로 증발기에 의해 처리되며, 발생된 증발기 응축액은 이온교환수지에 의해 재처리된다. 이외에 액체방사성물질의 처리를 위해 선택적 이온교환수지, 역삼투압 처리 등이 이용되고 있다[42]. [그림 2.5]부터 [그림 2.8]까지 경수로 및 중수로 원전의 기체 및 액체 방사성폐기물 처리 공정을 나타냈다.

[표 2.6] 원전 설계 기준치

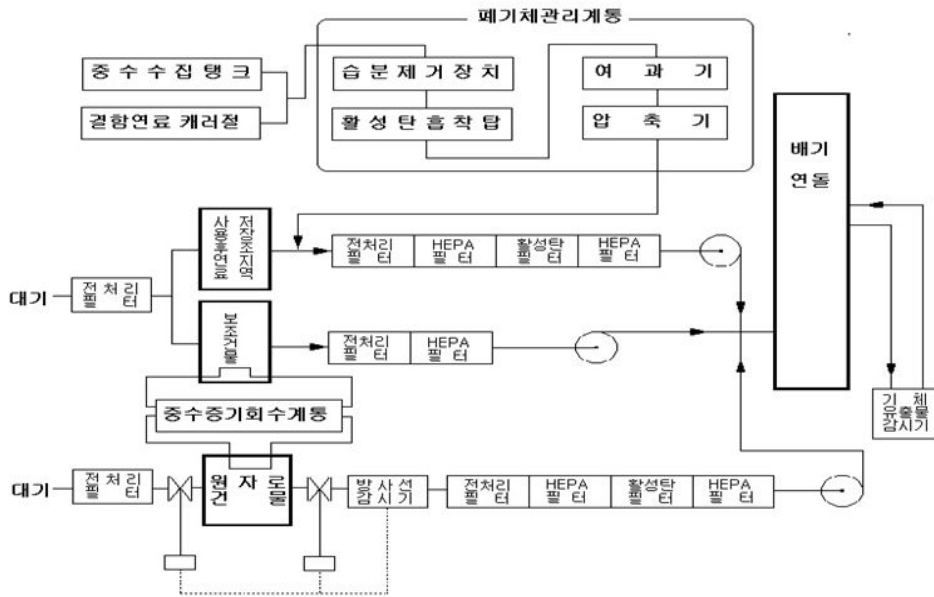
구분	항목	호기당 설계기준	비고
기체상태 방출물	감마선에 의한 공기의 흡수선량	0.1 mGy/yr	○ 지점 : 제한구역경계 ○ 동일 부지내 다수호기 운영시 적용기준 - 유효선량 : 0.25 mSv/yr-site - 감상선 증가선량 : 0.75 mSv/yr-site
	베타선에 의한 공기의 흡수선량	0.2 mGy/yr	
	외부피폭에 의한 유효선량	0.05 mSv/yr	
	외부피폭에 의한 피부등가선량	0.15 mSv/yr	
입자상 방사성물질, ³ H, ¹⁴ C 및 방사성옥소에 의한 인체 장기 등가선량	0.15 mSv/yr		
액체상태 방출물	유효선량	0.03 mSv/yr	
	인체 장기 등가선량	0.1 mSv/yr	



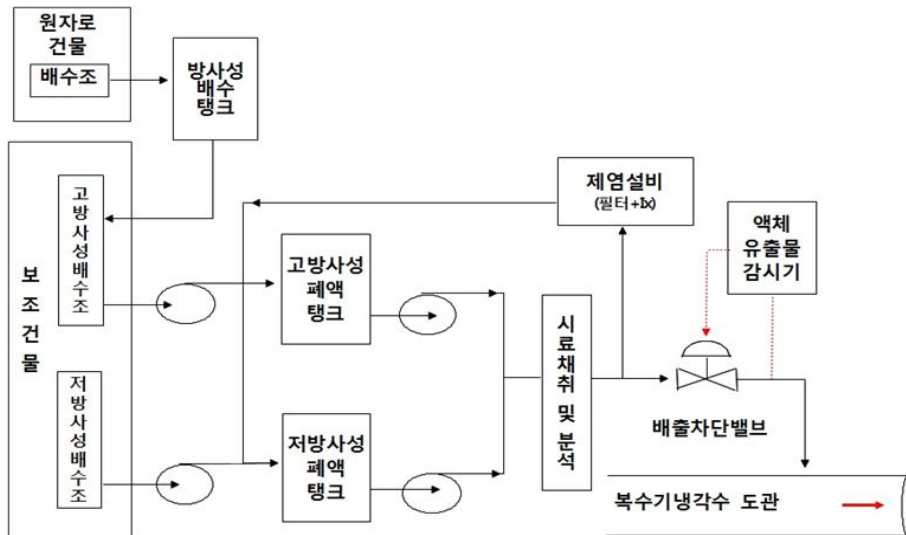
[그림 2.5] 경수로 원전 기체폐기물처리계통



[그림 2.6] 경수로 원전 액체폐기물처리계통



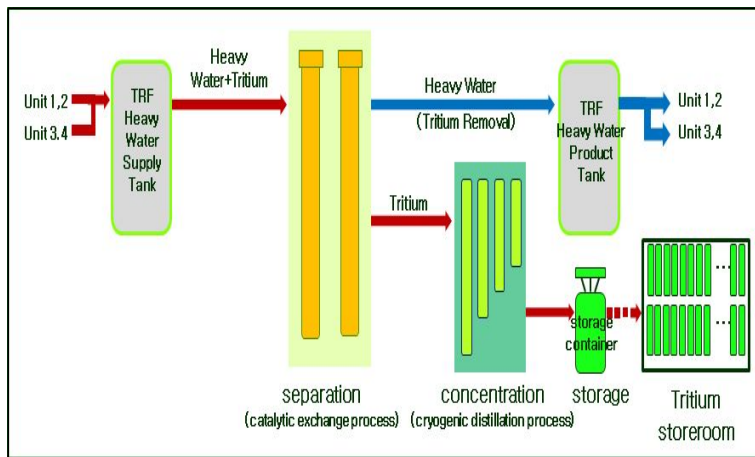
[그림 2.7] 중수로 원전 기체폐기물처리계통



[그림 2.8] 중수로 원전 액체폐기물처리계통

[표 2.7] 삼중수소제거설비(TRF) 제원

설치	'07.6.30	
위치	2호기와 3호기 사이	
중수취급용량	100 kg/hr(2.4ton/day)	
³ H 제거율	97%	
설계수명	40년(설계 : AECL)	
취급농도	감속재	10 Ci/kg 이하
	냉각재	0.5 Ci/kg 이하



[그림 2.9] 삼중수소제거설비(TRF) 원리

제3절 액체섬광계수기 특성

액체섬광계수기(LSC, Liquid Scintillation Counter)는 시료 내에서 β 입자와 Cocktail 간의 상호작용으로 발생한 섬광을 측정하여 시료중의 방사능 농도를 측정하고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 방사능 측정기는 검출기와 선원 간에 이루는 각도 안으로 방사선이 들어왔을 때만 측정되지만 LSC의 경우는 방사성 핵종이 Vial내의 Cocktail에 모두 녹아 있고, Cocktail이 Detector 역할을 하기 때문에 어떠한 방향으로 β 선이 방출되더라도 계측이 가능하다[10][17][26].

또한, β 선에 의하여 발생한 섬광펄스는 수백 1E-9초 수명의 즉발형광(Prompt fluorescence)인 반면에 α 선에 의하여 발생한 섬광펄스는 수백 1E-9초 수명의 지발형광(Delayed fluorescence)으로 β 선과 α 선에서 발생하는 섬광의 수명 차이를 이용하여 α 선과 β 선의 동시계측이 가능하다[26].

β 선 입자의 에너지가 클수록 섬광체에 전달되는 에너지가 크고, 이에 따라 섬광이 세게 발생하기 때문에 이 세기를 측정함으로써 β 선의 에너지를 측정할 수 있지만 β 선의 에너지가 연속적이므로 시료에 여러 종류의 방사성핵종이 혼합되어 있으면 방사성핵종간의 구별은 어려워지기 때문에 측정하고자 하는 방사성핵종을 가능한 화학적으로 순수하게 분리해야 하는 단점 때문에 전처리를 수행해야 한다[10].

또한, 섬광체에서 발생한 빛이 PMT까지 가는 경로에서 흡수, 산란 등의 현상으로 빛의 세기가 감소하는 물리적 소광(Physical Quenching)이 발생하거나 β 선이 용매와 반응하기 전에 시료의 불순물이 전자의 에너지를 흡수하여 β 선의 에너지가 섬광체에 모두 전달되지 못하는 Chemical quenching 즉, 소광현상이 일어날 수 있기 때문에 LSC로 방사능 농도를 측정하려면 먼저 계측시료의 소광 정도와 계측 효율간의 상관관계에 대한 정량적 정성적 분석이 필요하다[18].

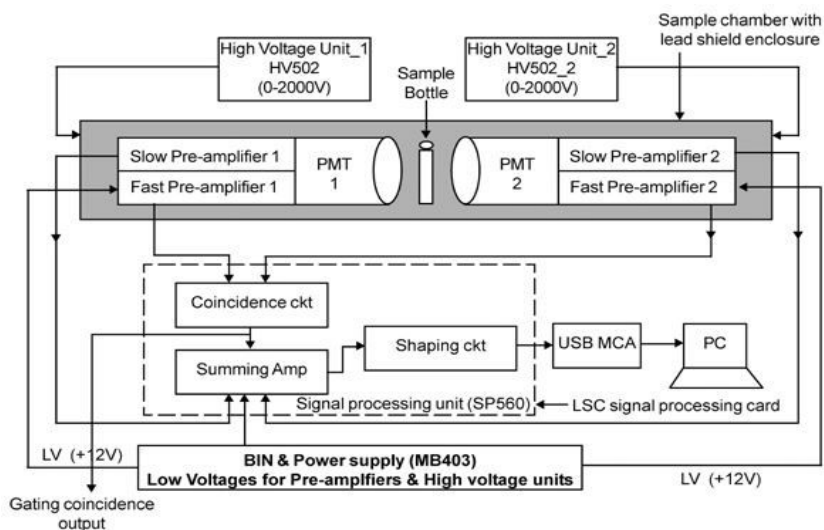
LSC는 Gas Proportional α/β counter나 α -spectrometry에 비해 계측시료의 조제가 간단하고, 계측효율이 높은 장점이 있는 반면 정전기, PMT 자체의 noise, PMT 표면의 유리에 의한 체렌코프(Cerenkov)현상, 시료와 Cocktail간의 화학반응 등의 영향으로 Gas Proportional α/β counter나 α -spectrometry보다 Background에 대한 계수율이 높은 단점이 있다[19].

LSC는 일반적으로 ^3H , ^{14}C , ^{226}Ra , ^{222}Rn 등의 핵종분석에 많이 사용되고 있으며, 특히 β 선 에너지가 매우 낮은 ^3H 의 계측에 유일하게 사용되는 기기이다.

LSC를 이용하여 방사능을 계측하는 방법에는 PC 화면에서 사용자가 기기를 직접 조정하여 계측할 수 있는 cpm/dpm Counting Mode와 Queue Counting Mode

의 두 가지가 있다[17][18][19].

Queue Counting Mode는 계측된 β 선의 스펙트럼을 표준 시료와 Blank 시료의 β 선 스펙트럼과 비교 분석하여 시료중의 방사능 농도를 구하는 방법이고, cpm/dpm Counting Mode는 소광정도를 나타내는 SQP(Spectrum Quenching Parameter)와 효율간의 상관관계를 계측장비 안에 저장하여 계측을 완료한 후 시료중의 방사능 농도를 계산 하는 방법으로 방사능 농도가 높고, 시료의 양이 많은 경우에는 cpm/dpm Counting Mode로 계측하는 것이 편리하다[17][18][19].



[그림 2.10] 액체섬광계수기 구성도

제4절 국내 원전 삼중수소 배출량, 풍향 빈도 및 환경거동 특성 평가

국내 원전에서 배출되는 기체 및 액체 방사성폐기물 중 가장 기여도가 높은 방사성핵종이 삼중수소이다. 이 삼중수소는 경수로 원전이든 중수로 원전이든 약 90% 이상의 배출을 나타내는 대표적인 방사성핵종이고, 또한 환경매체에 대해 방사능분석을 수행하면 검출되는 것이 특징이다.

[표 2.8] 국내 원전 삼중수소 환경방사능분석 환경매체

원전	환경매체	비고
고리, 한빛, 한울	빗물, 지표수(하천수), 식수, 지하수, 해수	'15.10월 현재
월성	공기 중 수분, 빗물, 지표수(하천수), 식수, 지하수, 곡류(보리, 쌀), 농산물(배추), 과일류(감), 육류(닭), 우유, 해수	

이러한 삼중수소를 대상으로 국내 원전인 고리, 한빛, 한울, 월성원전에 대해 년도별, 호기별 배출량과 배출추이를 평가해 보았다. 그리고 삼중수소를 배출함에 있어 가장 중요한 환경으로의 이동경로가 기체의 경우 풍향이 중요한 인자로서 풍향빈도 평가를 통해 환경매체 분석을 위한 지점선정 및 지점수가 적절한지를 평가하였다.

그리고 삼중수소를 측정하기 위한 환경매체는 경수로 원전과 중수로 원전을 분리하여 분석지점 및 환경매체를 선정하고 있다. [표 2.8]에서 보는 바와 같이 경수로 원전인 고리, 한빛, 한울 원전은 배출량이 중수로와 마찬가지로 전체 방사성폐기물 중 90% 이상을 차지하지만 배출량이 중수로 원전에 비해 월등히 작아 환경매체를 물 시료에 대해서만 환경방사능 분석을 수행하고 있다. 중수로 원전은 경수로 원전에 비해 월등히 많은 삼중수소 배출에 따라 환경매체 또한 공기, 물, 농산물, 곡류, 과일류 등 다양한 환경매체 분석을 통해 경향 및 특성을 파악하고 있다.

본 연구에서는 경수로 원전과 중수로 원전에서의 환경매체에 따른 삼중수소 방사능농도 수준과 원전으로부터의 거리에 따른 상관관계를 평가하고 향후 환경에서의 삼중수소 거동특성 평가를 위한 방향 제시를 하고자 하였다.

추가적으로 중수로 원전인 월성원전은 감속재와 냉각재로 중수를 사용하기 때문에 삼중수소가 원전 계통에서 많이 생성되고 배출되고 있는 관계로 다수의 환경매체에서 검출되는 것이 특징이다. 이러한 삼중수소를 방호차원의 원전 종사자 보호

와 계통 보호를 위해 월성원전은 2007년부터 TRF(Tritium Removal Facility, 삼중수소제거설비)를 설치 운영 중에 있다. 따라서 본 연구에서는 삼중수소에 대한 연구이므로 중수로 원전인 월성원전 특징인 TRF 운영에 따른 삼중수소 배출량 저감 효과와 환경에서의 저감효과의 효율성을 추가적으로 평가해 보았다.

본 연구에서 사용된 방법은 원전 운영사인 한국수력원자력(주)는 원전 운영 초기부터 기체 및 액체 방사성폐기물 배출관리와 환경에서의 거동 특성을 확인하고자 매년 환경방사능분석을 수행하고 있다. 본 연구에서는 사업자가 수행한 결과를 바탕으로 비교 평가를 수행하였다[1,2].

사용된 자료는 원전 운영 초기(고리1호기 상업운전)부터 평가해보고자 했으나 초기 자료 관리에 미흡한 부분이 많아 취합하는데 한계가 있어 배출량 및 환경매체 방사능분석 자료는 2003년부터 2013년까지, 풍향 빈도는 1998년부터 2013년까지 정리 비교 평가하였다.

1. 고리원전

가. 기체 및 액체 배출량 평가

고리원전의 삼중수소 기체 및 액체 방사성폐기물 배출량에 대해 2003년부터 2013년까지 각 호기별, 년도별로 비교 평가하였다.

고리원전은 4기를 운영 중으로써 먼저 기체의 경우 호기별 배출량을 살펴보면 1호기는 전체 53.08 TBq(평균 4.83 TBq), 2호기는 전체 89.61 TBq(평균 8.15 TBq), 3호기는 전체 40.56 TBq(평균 3.69 TBq), 4호기는 전체 40.99 TBq(평균 3.73 TBq)을 배출하였으며, 평균 기준으로 [표 2.9]와 [그림 2.12]에서 보는 바와 같이 2호기가 다른 호기에 비해 약 2배 이상 배출한 것을 알 수 있었으며, 2006년도에 22.9 TBq로 최대 배출량을 나타냈다.

1호기부터 4호기까지 기체의 전체 배출량은 224.24 TBq(평균 5.10 TBq)을 배출하였음을 알 수 있으며 [그림 2.11]에서 보듯이 년도별 전체 배출량은 전 호기 모두 2006년,

2007년까지 증가세를 보이다가 이후 배출량이 감소하는 것을 알 수 있었다.

액체의 경우는 호기별 배출량을 살펴보면 1호기는 전체 26.11 TBq(평균 2.37 TBq), 2호기는 전체 14.28 TBq(평균 1.30 TBq), 3호기는 전체 107.65 TBq(평균 9.79 TBq), 4호기는 전체 107.67 TBq(평균 9.79 TBq)을 배출하였으며, 특이할 만한 사항으로 1호기 및 2호기에 비해 3호기 및 4호기가 액체의 경우는 최대 약 7배 이상의 배출량을 나타냈다.

1호기부터 4호기까지의 액체의 전체 배출량은 255.71 TBq(평균 5.81 TBq)을 배출하였음을 알 수 있었으며 [표 2.10]과 [그림 2.13]에서 보듯이 연도별 전체 배출량 추이는 점차 증가하는 경향($R^2=0.68$)이 뚜렷하게 나타났다.

기체와 액체 배출량을 종합 평가해본 결과 기체의 경우는 전체 224.24 TBq를 배출하였으며 선행호기인 1호기와 2호기가 142.69 TBq로 3호기와 4호기의 81.55 TBq 보다 약 2배 정도 많은 배출량을 보이고 있었다. 액체의 경우는 후행호기인 3호기와 4호기가 215.3 TBq로 1호기와 2호기의 40.39 TBq 보다 약 5배 정도 더 많은 배출량을 보이고 있음을 알 수 있었다. 전체 기체 및 액체의 배출 총량은 224.24 TBq와 255.71 TBq로서 비슷한 수준이지만 기체 및 액체 배출에 따른 연도별 변동추이는 기체는 증가 내지 감소에 따른 변화는 없으나, 액체의 경우는 꾸준히 증가세($R^2=0.68$)를 보이고 있는 것을 뚜렷히 알 수 있었다.

[표 2.9] 고리원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황

[단위 : TBq]

호기 년도	1호기	2호기	3호기	4호기	년도별 총배출량
2003	4.29	5.7	1.42	2.31	13.72
2004	8.87	13.1	1.32	1.93	25.22
2005	11.1	14	1.93	1.9	28.93
2006	11.3	22.9	3.86	5.34	43.40
2007	4.19	11.8	4.55	6.4	26.94
2008	2.48	4.77	4.91	3.39	15.55
2009	1.51	3.53	4.23	3.52	12.79
2010	1.54	4.03	2.83	3.51	11.91
2011	1.96	2.1	4.76	4.34	13.16
2012	2.51	3.4	5.94	2.99	14.84
2013	3.33	4.28	4.81	5.36	17.78
호기별	53.08	89.61	40.56	40.99	224.24 ^{a)}
평균	4.83	8.15	3.69	3.73	5.10 ^{b)}

a) 고리원전 기체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 배출량

b) 고리원전 기체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 평균

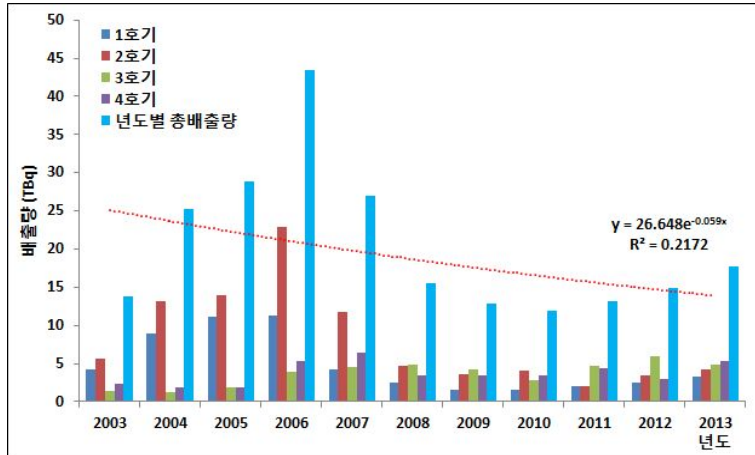
[표 2.10] 고리원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황

[단위 : TBq]

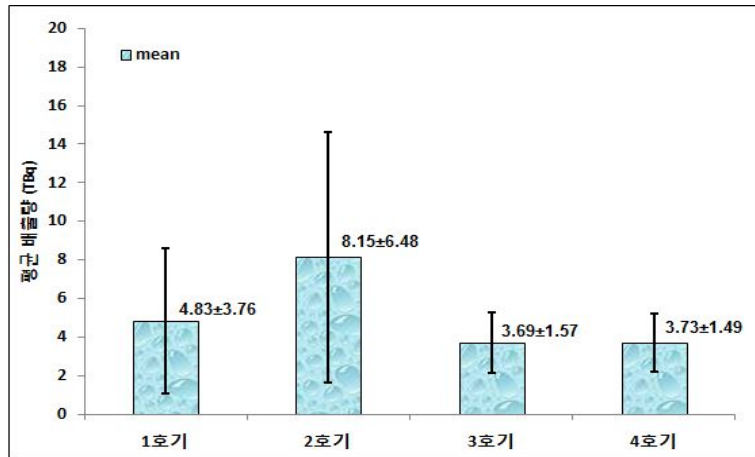
호기 년도	1호기	2호기	3호기	4호기	년도별 총배출량
2003	3.78	2.35	1.93	1.93	9.99
2004	2.13	1	1.65	1.65	6.43
2005	1.83	1.9	1.86	1.86	7.45
2006	2.11	1.32	6.04	6.04	15.51
2007	2.34	0.313	7.51	7.51	17.67
2008	1.8	2.31	12	12	28.11
2009	1.85	0.664	14.7	14.7	31.91
2010	1.67	0.567	14.8	14.8	31.84
2011	1.95	0.596	18	18	38.55
2012	1.93	2.36	22	22	48.29
2013	4.72	0.901	7.16	7.18	19.96
호기별	26.11	14.28	107.65	107.67	255.71 ^{a)}
평균	2.37	1.30	9.79	9.79	5.81 ^{b)}

a) 고리원전 액체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 배출량

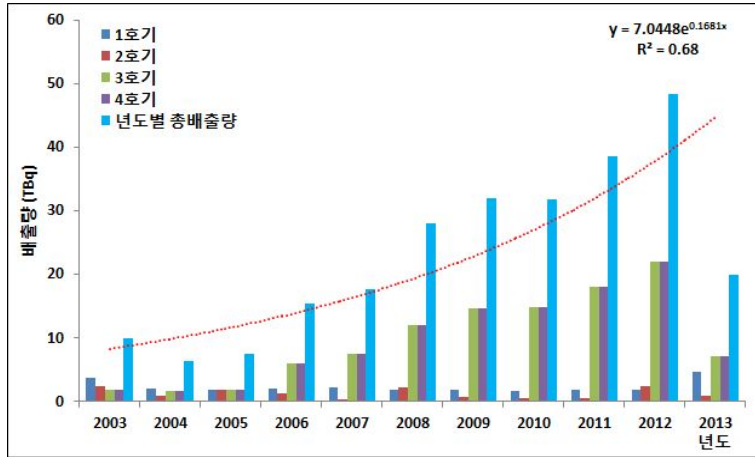
b) 고리원전 액체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 평균



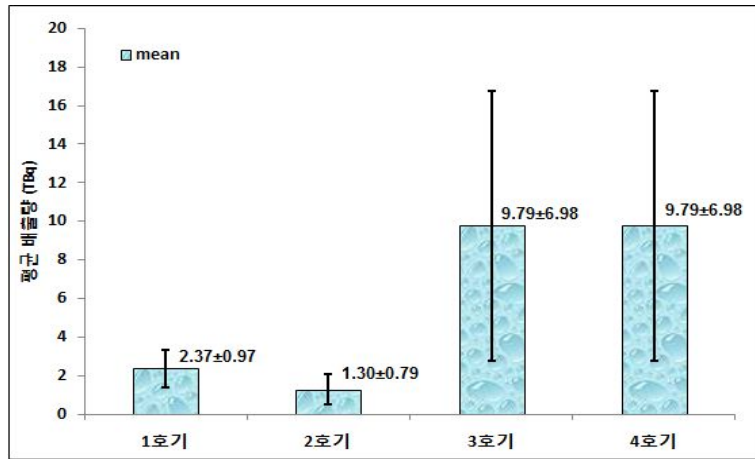
[그림 2.11] 고리원전 년도별 기체 배출량 비교



[그림 2.12] 고리원전 호기별 평균 기체 배출량 비교



[그림 2.13] 고리원전 년도별 액체 배출량 비교



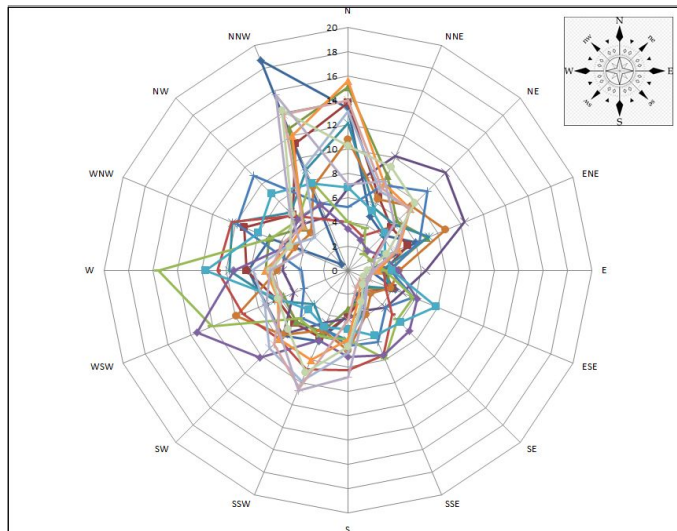
[그림 2.14] 고리원전 호기별 평균 액체 배출량 비교

나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가

고리원전의 1998년부터 2013년까지의 풍향 발생 빈도를 16방위로 분석한 결과 16년 기간 동안의 평균 풍향 빈도는 N 방향으로가 최소 빈도로서 3.1%를 나타냈고 NNW 방향으로로는 최대 빈도로서 10.0%의 빈도를 나타냈다. 대체적으로 N~NW와 W~SW 방향이 다른 방향보다 다소 큰 빈도로 나타난 것을 [그림 2.15]에서 보는 바와 같이 알 수 있었다.

풍향 빈도별 환경매체에 대한 시료채취 및 분석을 위한 지점 타당성을 평가해 본 결과 가장 영향이 두드러지게 나타날 것으로 판단되는 빗물 시료 채취지점에 대해 평가해 본 결과 풍향 빈도가 높은 지점에 대체적으로 잘 선정되어 있는 것으로 나타났다.

그러나 가장 삼중수소 검출 확률이 높은 만큼 같은 방향으로의 부지내와 비교지점으로 원거리 선정이 보강되어야 할 것으로 판단된다. 즉, 근거리 1발 소내와 원거리 부산대는 상호 비교가 가능할 것으로 판단되나, 풍향 빈도가 높은 근거리의 사택3단지의 비교를 위한 원거리 지점이 같은 방향으로 없어 추가 지점 검토가 필요할 것으로 판단된다.



[그림 2.15] 고리원전 풍향 빈도

다. 환경매체 중 방사능농도 평가

고리원전의 삼중수소 분석 환경매체는 빗물, 지표수(하천수), 식수, 지하수, 해수를 분석하고 있었다. [표 2.11]에서 보는 바와 같이 빗물과 지표수, 해수에서 삼중수소가 검출되었고 나머지 환경매체는 삼중수소가 검출이 되지 않았다.

먼저 빗물에서의 삼중수소는 1발 소내, 기상관측소, 사택3단지, 부산대 지점에서 분석을 수행하였고 [그림 2.16]과 [그림 2.17]에서와 같이 전 지점에서 삼중수소가 검출되었다. 각 지점별 방사능농도는 각각 평균 32.36 Bq/L(21.6~57.9 Bq/L), 15.12 Bq/L(5.42~27.8 Bq/L), 3.02 Bq/L(2.37~3.81 Bq/L), 2.07 Bq/L(<1.74~2.27 Bq/L)로 검출되었다.

빗물에서의 지점에 따른 거리별 삼중수소 거동 특성을 살펴보면 [그림 2.16]과 [그림 2.17]에서 보는 바와 같이 연도별 전체 평균 검출 방사능농도는 점차 감소하는 경향($R^2=0.6982$)을 나타냈고 거리별 경향은 원전으로부터 거리가 가장 근거리인 1발 소내에 비해 가장 원거리에 위치한 부산대 지점이 월등이 낮게 검출됨을 확인할 수 있듯이 거리별 경향($R^2=0.9504$)이 뚜렷히 나타났다.

지표수의 경우는 효암, 월내, 울산 지점에 대해 삼중수소 분석을 수행하였으며, 각 지점별 방사능농도는 각각 평균 2.50 Bq/L(<1.90~3.33 Bq/L), 2.50 Bq/L(2.06~2.49 Bq/L), 불검출(<1.79~<2.32 Bq/L)로 검출되었다.

지표수에서의 지점에 따른 거리별 삼중수소 거동 특성을 살펴보면 [그림 2.18]과 [그림 2.19]에서 보는 바와 같이 연도별 전체 평균 검출 방사능농도는 점차 감소하는 경향($R^2=0.2149$)을 나타냈고 거리별 경향은 원전으로부터 거리가 가장 근거리인 효암에 비해 가장 원거리에 위치한 울산 지점이 월등이 낮게 검출됨을 확인할 수 있듯이 거리별 경향($R^2=0.8154$)이 뚜렷히 나타났다.

해수는 2008년 3배수구 지점을 제외한 나머지 지점은 정상 농도 수준을 나타냄을 알 수 있었고 3배수구는 2008년도에 최대 11.9 Bq/L로 검출되었다. [그림 2.20]과 [그림 2.21]에서 보듯이 연도별 평균 방사능농도는 점차 감소($R^2=0.4933$)하는 추세를 보이고

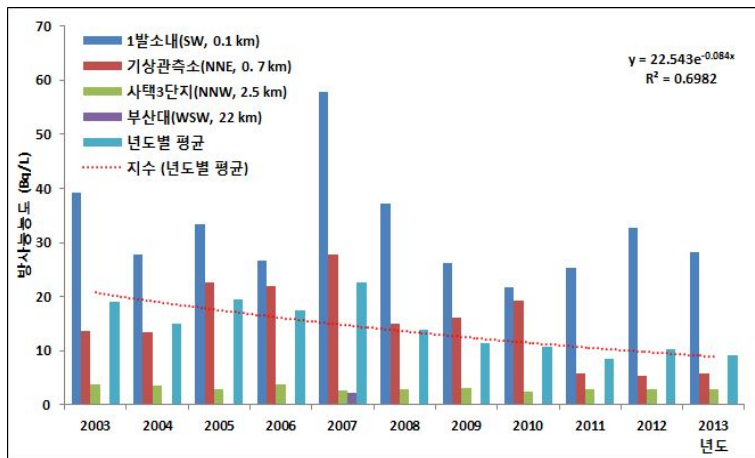
있었으나 시료 지점별 거리에 따른 경향($R^2=0.251$)은 나타나지 않았다.

고리원전 주변의 지하수에서는 한수원은 삼중수소가 검출되지 않았지만 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 고리원전 주변 지하수 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위는 0.756~1.91 Bq/L로 나타났다.

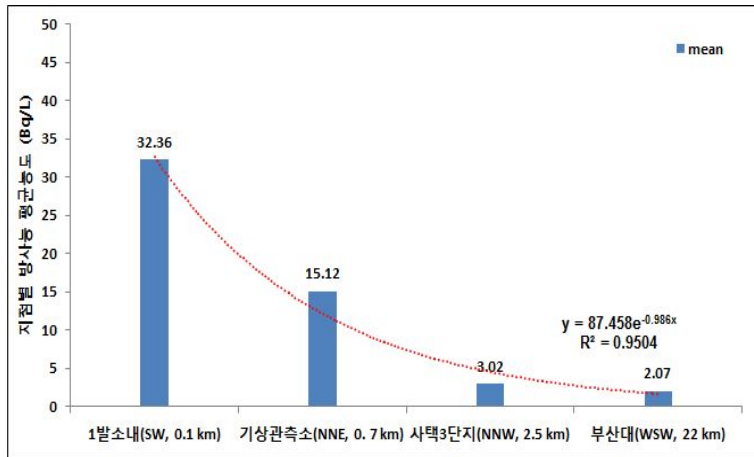
고리원전 주변지역의 환경매체 분석결과를 평가해본 결과 해수시료를 제외한 빗물과 지표수 시료에서 원전으로부터 거리가 가까운 지점일수록 삼중수소 방사능농도가 더 높은 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

[표 2.11] 고리원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과

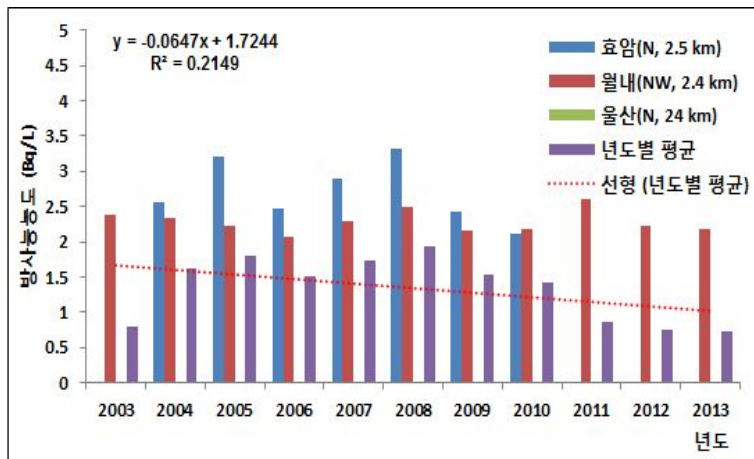
매체	지점	위치		방사능농도(Bq/L) (2003~2013년)	
		방위	거리(km)	평균	범위
빗물	1발 소내	SW	0.1	32.36	21.6~57.9
	기상관측소	NNE	0.7	15.12	5.42~27.8
	사택3단지	NNW	2.5	3.02	2.37~3.81
	부산대	WSW	22.0	2.07	<1.74~2.27
지표수 (하천수)	효암	N	2.5	2.50	<1.90~3.33
	월내	NW	2.4	2.28	2.06~2.49
	울산	N	24.0	0	<1.79~<2.32
해수	1,2 취수구	WNW	0.3	2.46	<1.84~3.42
	3,4 취수구	E	0.8	1.98	<1.31~2.45
	1 배수구	S	0.3	2.38	<1.31~3.39
	2 배수구	SE	0.3	2.29	<1.32~2.87
	3 배수구	SE	0.4	3.04	<1.28~11.9
	4 배수구	SE	0.5	2.11	<1.36~2.95
	월내	WNW	1.5	2.29	<1.65~3.07
	신리	NE	3.8	2.31	<1.88~2.05
	송정	SSW	17.5	0	<1.29~<2.27



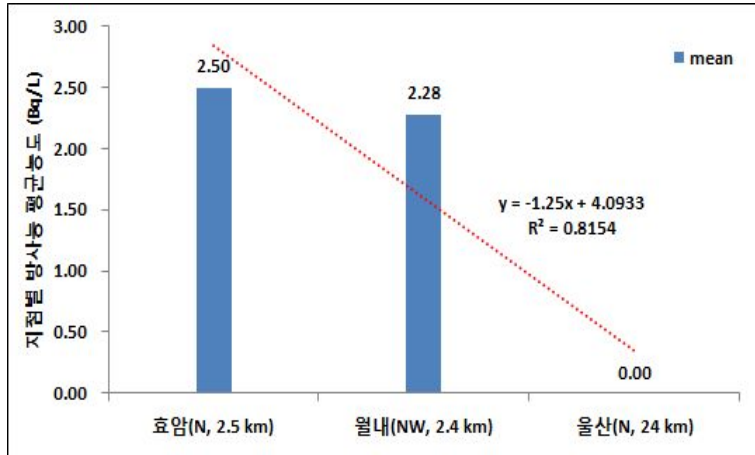
[그림 2.16] 빗물 중 삼중수소 년도별 농도 분포(고리원전주변)



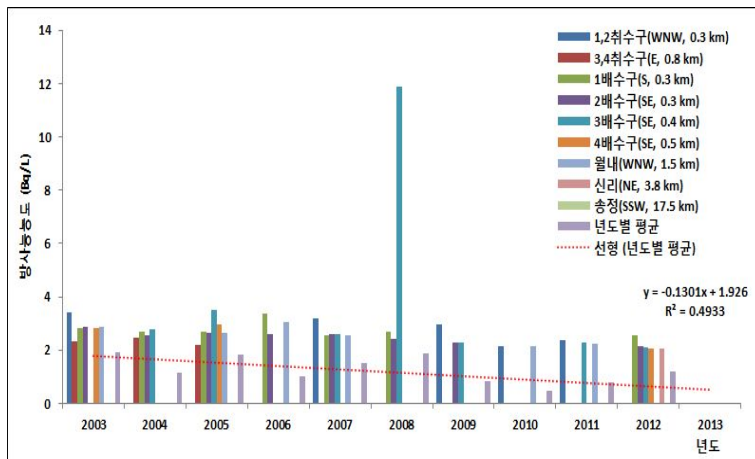
[그림 2.17] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(고리원전주변)



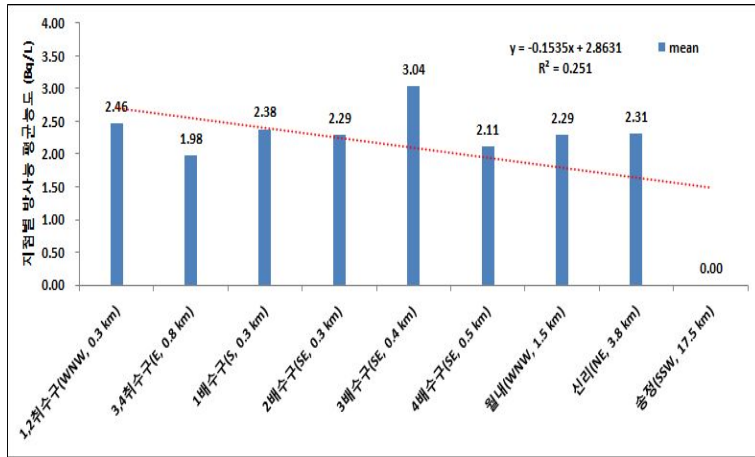
[그림 2.18] 지표수 중 삼중수소 연도별 농도 분포(고리원전주변)



[그림 2.19] 지표수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(고리원전주변)



[그림 2.20] 해수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(고리원전주변)



[그림 2.21] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(고리원전주변)

2. 한빛원전

가. 기체 및 액체 배출량 평가

한빛원전도 고리원전과 마찬가지로 삼중수소 기체 및 액체 방사성폐기물 배출량에 대해 2003년부터 2013년까지 각 호기별, 년도별로 비교 평가하였다.

한빛원전은 6기를 운영 중으로써 먼저 기체의 경우 호기별 배출량을 살펴보면 1호기부터 6호기까지 각각 전체 63.03 TBq(평균 5.73 TBq), 58.34 TBq(평균 5.30 TBq), 4.77 TBq(평균 0.43 TBq), 4.03 TBq(평균 0.37 TBq), 11.83 TBq(1.08 TBq), 8.73 TBq(0.79 Bq)을 배출하였으며, 가장 배출량이 많은 호기는 선행호기인 1호기와 2호기로서 3호기 및 4호기에 비해서는 약 10배 이상, 5호기 및 6호기에 비해서는 약 5배 이상 배출량이 많음을 [표 2.12]와 [그림 2.23]에서 보는 바와 같이 알 수 있었다.

기체의 전체 배출량은 150.73 TBq(평균 2.28 TBq)을 배출하였음을 알 수 있었고 년도별 전체 배출량 추이는 [그림 2.22]에서와 같이 거의 일정한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

액체의 경우는 호기별 배출량을 살펴보면 1호기부터 6호기까지 전체 배출량 및 평균

배출량은 각각 72.72 TBq(평균 6.61 TBq), 73.01 TBq(평균 6.64 TBq), 123.09 TBq(평균 11.19 TBq), 123.09 TBq(평균 11.19 TBq), 139.22 TBq(12.66 TBq), 143.29 TBq(13.03 TBq)로서 기체의 경우와는 반대로 1호기 및 2호기가 3호기부터 6호기까지에 비해 약 2배 정도 배출이 더 적음을 알 수 있듯이 후행호기로 갈수록 배출량이 더 많은 것을 알 수 있었다. 액체의 총 배출량은 674.42 TBq(평균 10.22 TBq)로 나타났다.

특이사항은 액체 배출의 경우 1호기 및 2호기, 3호기 및 4호기, 5호기 및 6호기, 즉, 각 발전소별로 두 개호기의 배출량이 똑같이 배출된 것을 알 수 있었다. 이는 고리 3호기 및 4호기와 마찬가지로 각 호기별 배출량 평가를 독립적으로 해야 하나 계통 특성을 반영한 결과라 판단할 수 있으나, 향후 각 호기별 독립적 배출 평가가 이루어지도록 계통 개선, 또는 보완 등이 필요할 것으로 판단된다.

기체와 액체 배출량을 종합 평가해본 결과 기체 총 배출량은 150.73 TBq이고 액체 총 배출량은 674.42 TBq로서 상대적으로 액체가 기체보다 약 4배 정도 더 많이 배출된 것을 알 수 있었다. 특히 기체의 경우는 선행호기인 1호기와 2호기가 후행호기보다 더 많은 배출을 하고 있음을 알 수 있었고, 액체의 경우는 선행호기보다 후행호기로 갈수록 더 많은 배출을 하고 있음을 알 수 있었다. 기체 및 액체의 연도별 변동 추이는 증가 내지 감소하는 뚜렷한 경향은 확인할 수 없었다.

[표 2.12] 한빛원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황

[단위 : TBq]

연도 \ 호기	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기	년도별 총배출량
2003	6.6	5.23	0.0845	0.45	0.533	0.347	13.24
2004	5.89	4.96	0.157	0.29	0.449	0.348	12.09
2005	5.66	5.58	0.133	0.275	0.8	0.404	12.85
2006	6.07	5.25	0.15	0.177	1.42	0.72	13.79
2007	7.62	5.91	0.401	0.308	1.5	1.08	16.82
2008	5.56	7.73	0.678	0.637	1.72	1.25	17.58
2009	4.4	6.01	0.872	0.245	1.23	0.765	13.52
2010	5.17	4.64	0.699	0.253	0.955	0.594	12.31
2011	3.44	4.58	0.412	0.251	1.24	0.964	10.89
2012	3.31	3.15	0.487	0.322	1.36	1.4	10.03
2013	9.31	5.3	0.693	0.823	0.625	0.854	17.61
호기별	63.03	58.34	4.77	4.03	11.83	8.73	150.73 ^{a)}
평균	5.73	5.30	0.43	0.37	1.08	0.79	2.28 ^{b)}

a) 한빛원전 기체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 배출량

b) 한빛원전 기체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 평균

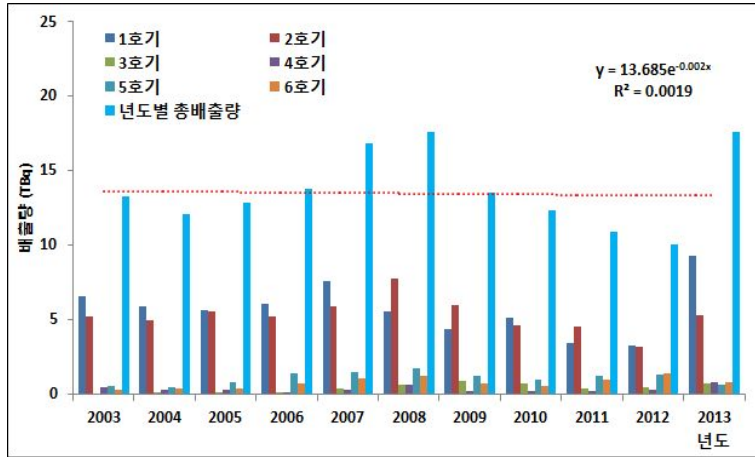
[표 2.13] 한빛원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황

[단위 : TBq]

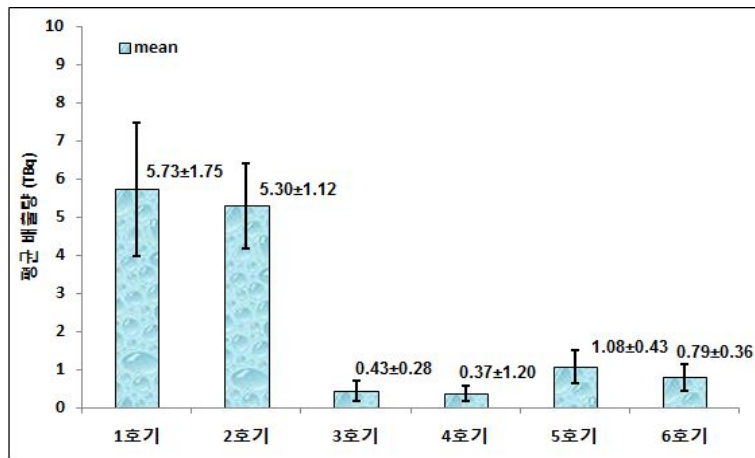
연도 \ 호기	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기	년도별 총배출량
2003	4.03	4.03	11.4	11.4	10	14.2	55.06
2004	6.2	6.2	14.2	14.2	7.12	7.09	55.01
2005	4.33	4.33	13.2	13.2	9.77	9.77	54.60
2006	3.23	3.23	8.01	8.01	15.6	15.6	53.68
2007	7.83	7.83	8.82	8.82	8.81	8.81	50.92
2008	9.34	9.33	13	13	22.4	22.4	89.47
2009	5.32	5.32	13.3	13.3	19.2	19.2	75.64
2010	10.6	10.6	14.3	14.3	10.2	10.3	70.30
2011	9.31	9.31	4	4	15.3	15.1	57.02
2012	5.19	5.24	16.7	16.7	17.1	17.1	78.03
2013	7.34	7.59	6.16	6.16	3.72	3.72	34.69
호기별	72.72	73.01	123.09	123.09	139.22	143.29	674.42 ^{a)}
평균	6.61	6.64	11.19	11.19	12.66	13.03	10.22 ^{b)}

a) 한빛원전 액체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 배출량

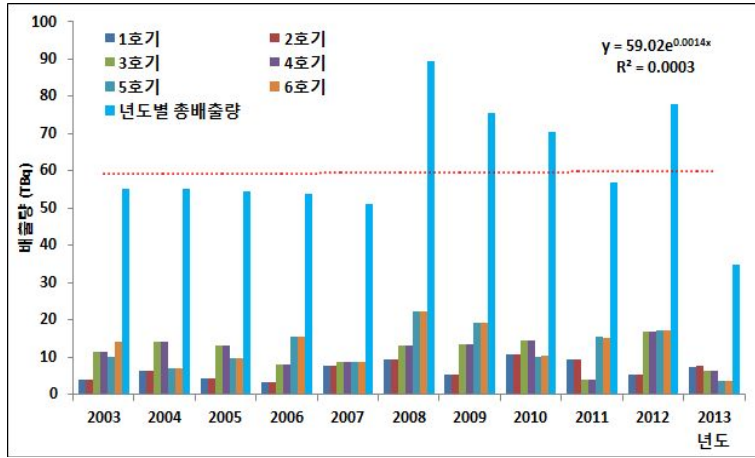
b) 한빛원전 액체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 평균



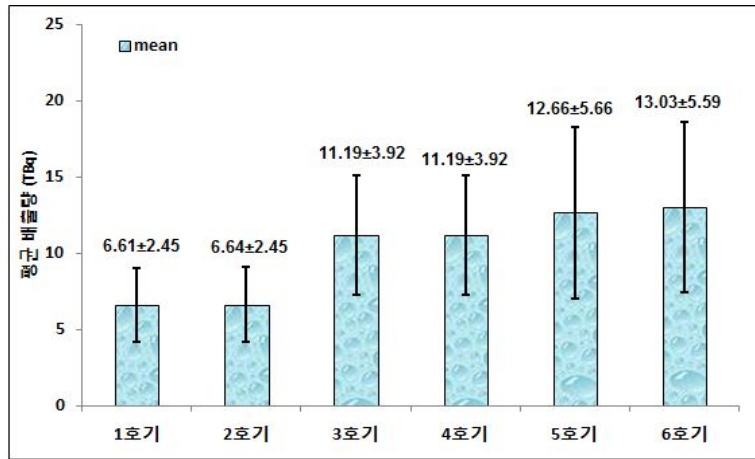
[그림 2.22] 한빛원전 년도별 기체 배출량 비교



[그림 2.23] 한빛원전 호기별 평균 기체 배출량 비교



[그림 2.24] 한빛원전 년도별 액체 배출량 비교

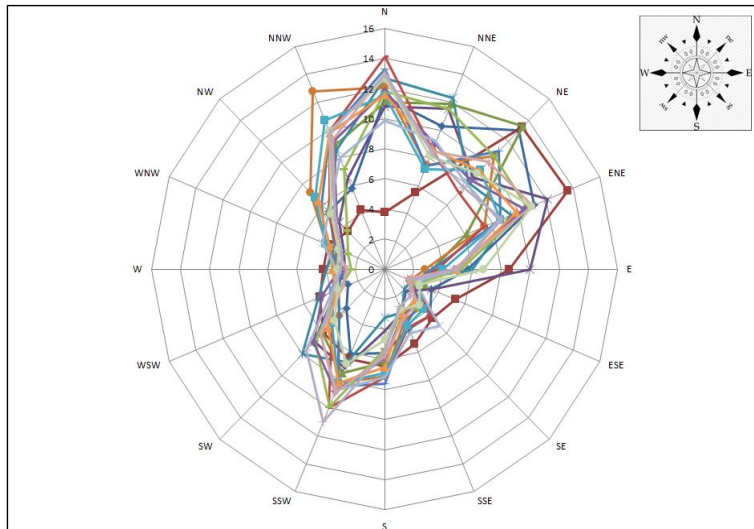


[그림 2.25] 한빛원전 호기별 평균 액체 배출량 비교

나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가

고리원전과 마찬가지로 한빛원전 또한 1998년부터 2013년까지의 풍향 발생 빈도를 16방위로 분석한 결과 16년 기간 동안의 평균 풍향 빈도는 ESE 방향으로가 최소 빈도로서 2.6%를 나타냈고 N 방향으로는 최대 빈도로서 11.5%의 빈도를 나타냈다. [그림 2.26]에서 보는 바와 같이 대체적으로 NNW~ENE로의 넓은 방향으로의 빈도와 특정 SSW 방향으로의 빈도가 두드러지게 나타났다.

풍향 빈도별 환경매체에 대한 시료채취 및 분석을 위한 지점 타당성을 평가해 본 결과 가장 영향이 두드러지게 나타날 것으로 판단되는 빗물 시료 채취지점에 대해 평가해 본 결과 NNE 방향의 전망대는 선정이 잘 되었으나, 풍향빈도가 대체적으로 낮은 E 방향의 주사무실과 ESE 방향의 홍농사택은 지점 검토가 필요할 것으로 판단되며, 풍향빈도가 두드러진 SSW 방향은 분석지점이 없어 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다.



[그림 2.26] 한빛원전 풍향 빈도

다. 환경매체 중 방사능농도 평가

한빛원전의 삼중수소 분석 환경매체는 고리원전과 동일한 빗물, 지표수(하천수), 식수, 지하수, 해수를 분석하고 있었다. [표 2.14]에서와 같이 빗물과 지표수, 해수에서

삼중수소가 검출되었고 나머지 환경매체는 삼중수소가 검출이 되지 않았다.

검출된 빗물 중 삼중수소는 [그림 2.27]과 [그림 2.28]에서 보듯이 전망대, 주사무실, 흥농사택, 광주 전 지점에서 검출되었고 방사능농도는 각각 평균 35.75 Bq/L(23.3~45.8 Bq/L), 8.40 Bq/L(4.13~10.4 Bq/L), 2.70 Bq/L(<1.77~3.7 Bq/L), 2.55 Bq/L(<1.99~3.44 Bq/L)로 나타났다. 년도별 평균 방사능농도를 살펴보면 일정한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 그러나 거리가 근거리에 위치한 전망대와 원거리에 위치한 광주와의 거리별 상관 관계를 살펴보면 전망대의 경우 35.75 Bq/L, 광주 2.55 Bq/L로 거리에 따른 지점별 방사능 평균 농도가 감소하는 경향($R^2=0.8888$)을 나타냈다.

참고로 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 한빛원전 주변 빗물 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위는 기상 관측소에서 3.85~83.4 Bq/L로, 한수원에서 분석한 2003년부터 2013년까지 가장 높게 나타난 지점인 전망대의 23.3~45.8 Bq/L와 비교했을 때 차이가 나타났다. 이는 분석 지점의 차이와 거리, 풍향 등에 따른 영향에 의한 것으로 판단된다.

지표수는 연우교 및 광주 지점에서 분석을 수행하였고 원전에서 4.5 km 떨어진 연우교 지점에서 평균 2.51 Bq/L(1.93~3.46 Bq/L)로 나타났고, 원거리에 위치한 광주는 삼중수소가 검출되지 않았다. 전체적으로 년도별 평균 방사능농도는 [그림 2.29]에서 보듯이 증가 내지 감소하는 경향은 나타나지 않고 일정한 수준을 나타냄을 알 수 있었다.

해수는 취수구, 배수구, 몽내기, 함평 지점에서 분석을 수행하였고, [그림 2.30]과 [그림 2.31]과 같이 전 지점을 포함한 년도별 평균은 일정한 수준을 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 배출 관리 측면에서 취수구 지점을 제외한 배수로, 몽내기, 함평의 거리별 방사능 평균 농도는 거리가 가까울수록 높은 수준을 나타내는 경향($R^2=0.8597$)을 보였다.

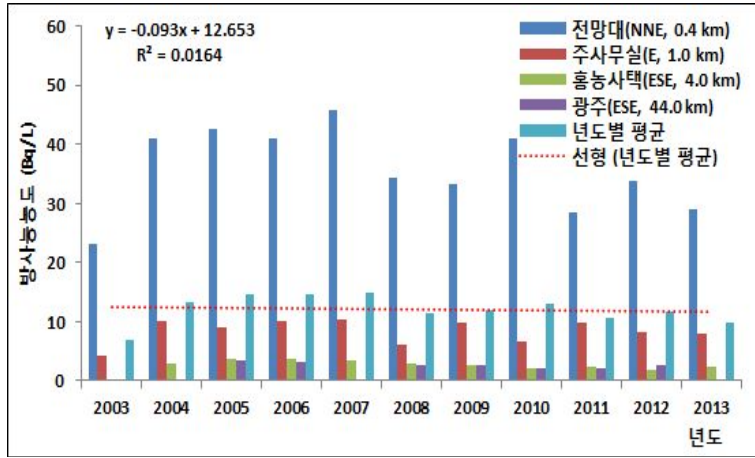
참고로 한빛원전 주변의 지하수에서는 한수원은 삼중수소가 검출되지 않았지만 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 한빛원전 주변

지하수 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위는 0.168~1.03 Bq/L로 나타났다[3].

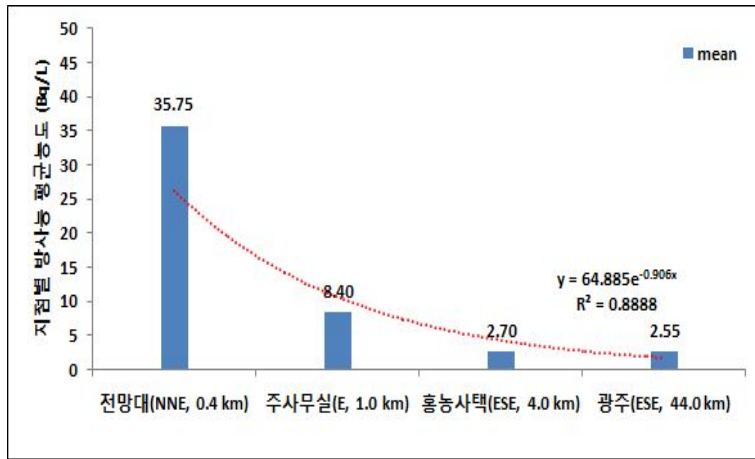
한빛원전 주변지역의 환경매체 분석결과를 평가해본 결과 빗물, 지표수, 해수시료가 원전으로부터 거리가 가까운 지점일수록 삼중수소 방사능농도가 더 높은 경향을 나타낼 수 있었다. 그러나 지표수의 경우 거리에 따른 경향을 보기 위해서는 같은 방향으로의 지점이 최소 3지점 이상이 되어야 하나 2지점 밖에 없어 경향 분석은 신뢰성이 떨어지는 측면이 있었다.

[표 2.14] 한빛원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과

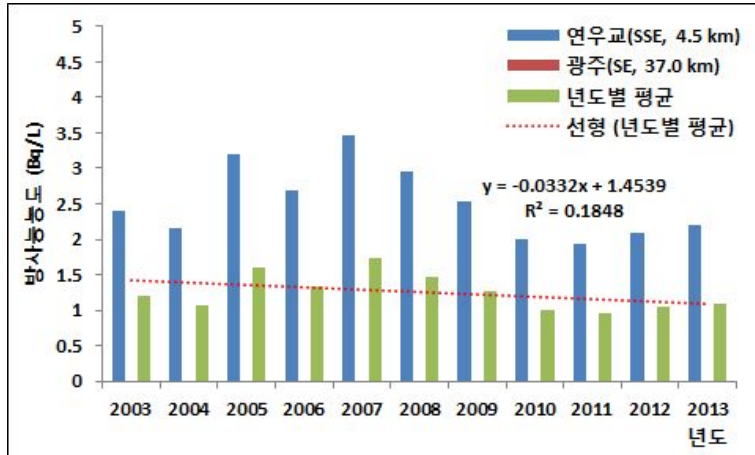
매체	지점	위치		방사능농도(Bq/L) (2003~2013년)	
		방위	거리(km)	평균	범위
빗물	전망대	NNE	0.4	35.75	23.3~45.8
	주사무실	E	1.0	8.40	4.13~10.4
	홍농사택	ESE	4.0	2.70	<1.77~3.7
	광주	ESE	44.0	2.55	<1.99~3.44
지표수 (하천수)	연우교	SSE	4.5	2.51	1.93~3.46
	광주	SE	37.0	0	<0.88~<2.55
해수	취수구	WSW	0.3	4.00	2.19~8.04
	배수구	NNE	2.4	9.04	4.05~12.4
	몽내기	S	4.5	3.77	2.77~4.75
	함평	S	31.5	3.23	<2.08~7.17



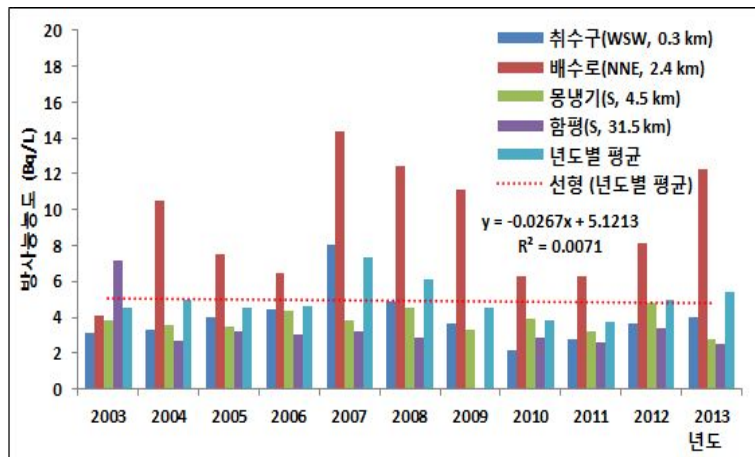
[그림 2.27] 빗물 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한빛원전주변)



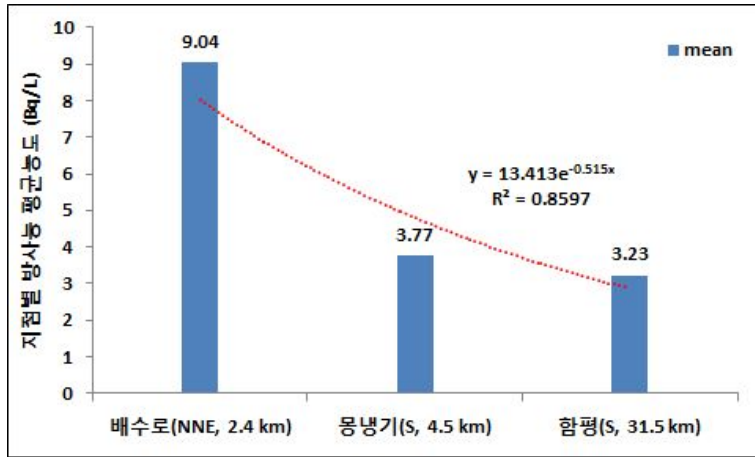
[그림 2.28] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한빛원전주변)



[그림 2.29] 지표수 중 삼중수소 연도별 농도 분포(한빛원전주변)



[그림 2.30] 해수 중 삼중수소 연도별 농도 분포(한빛원전주변)



[그림 2.31] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한빛원전주변)

3. 한울원전

가. 기체 및 액체 배출량 평가

한울원전 또한 한빛원전과 마찬가지로 6개 호기가 운영 중에 있으며, 각 호기별 전체 배출량 및 평균 배출량을 살펴보면 [표 2.15]와 [그림 2.33]에서 보듯이 1호기부터 6호기까지 각각 27.75 TBq(평균 2.52 TBq), 26.33 TBq(평균 2.39 TBq), 6.71 TBq(평균 0.61 TBq), 5.48 TBq(평균 0.50 TBq), 8.87 TBq(평균 0.81 TBq), 11.27 TBq(평균 1.02 TBq)로 나타났다

한울원전의 기체 전체 배출량은 86.41 TBq(평균 1.31 TBq)로 나타났으며, 선행호기인 1호기 및 2호기가 다른 호기에 비해 약 2배 내지 5배 정도 배출량이 많음을 알 수 있었다.

[표 2.16]과 [그림 2.35]의 액체의 경우는 각 호기별 전체 배출량 및 평균 배출량을 살펴보면 1호기부터 6호기까지 각각 125.15 TBq(평균 11.38 TBq), 125.15 TBq(평균 11.38 TBq), 92.38 TBq(평균 8.40 TBq), 92.42 TBq(평균 8.40 TBq), 38.31 TBq(평균 3.48 TBq), 37.22 TBq(평균 3.38 TBq)로 나타났다

액체의 전체 배출량은 510.63 TBq(평균 7.74 TBq)로 나타났으며, 기체와 마찬가지로 선행호기인 1호기 및 2호기가 5호기 및 6호기에 비해 약 3배 정도 배출량이 많음을 알 수 있었다.

특이사항은 액체의 경우 한빛원전과 마찬가지로 한울 1호기 및 2호기, 3호기 및 4호기, 5호기 및 6호기, 즉, 각 발전소별로 두 개호기의 배출량이 똑같이 배출된 것을 알 수 있었다. 이는 각 호기별 배출량 평가를 독립적으로 해야 하나 그렇게 하지 않았다는 것을 한빛 원전과 동일하게 확인할 수 있었다.

기체와 액체 배출량을 종합 평가해본 결과 기체 총 배출량은 86.41 TBq이고 액체 총 배출량은 510.63 TBq로서 상대적으로 액체가 기체보다 약 6배 정도 더 많이 배출되는 것으로 나타났다. 호기별 배출량은 기체와 액체 모두 선행호기인 1호기와 2호기가 후행호기보다 더 많은 배출을 하고 있음을 알 수 있었고, 기체 및 액체의 년도별 변동 추이는 [그림 2.32]와 [그림 2.34]에서 보듯이 기체는 시간에 따라 배출량이 증가하는 경향($R^2=0.8827$)이 뚜렷히 나타난 반면 액체는 증가 내지 감소하는 뚜렷한 경향은 없었다.

[표 2.15] 한울원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황

[단위 : TBq]

연도 \ 호기	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기	년도별 총배출량
2003	1.89	1.56	0.636	0.348	1.87E-07	0	4.43
2004	2.85	2.68	0.367	0.0178	0.215	0.0187	6.15
2005	1.82	2.39	0.25	0.24	0.475	0.176	5.35
2006	2.83	1.54	0.253	0.306	0.704	0.245	5.88
2007	1.88	1.83	0.507	0.422	0.635	1.28	6.55
2008	0.901	0.933	0.542	0.545	0.439	2.18	5.54
2009	2.65	2.61	0.786	0.493	1.13	1.05	8.72
2010	3.13	2.98	0.674	0.426	1.01	1.47	9.69
2011	3.13	3.25	0.937	0.905	0.859	1.1	10.18
2012	3.46	3.39	0.92	0.899	1.18	1.61	11.46
2013	3.21	3.17	0.839	0.883	2.22	2.14	12.46
호기별	27.75	26.33	6.71	5.48	8.87	11.27	86.41 ^{a)}
평균	2.52	2.39	0.61	0.50	0.81	1.02	1.31 ^{b)}

a) 한울원전 기체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 배출량

b) 한울원전 기체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 평균

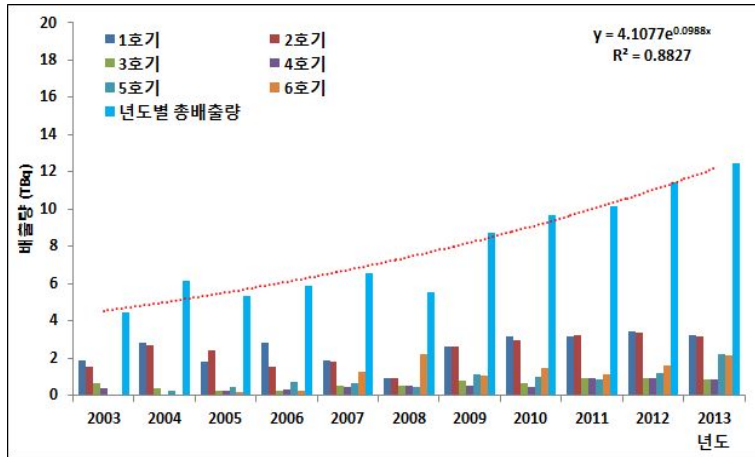
[표 2.16] 한울원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황

[단위 : TBq]

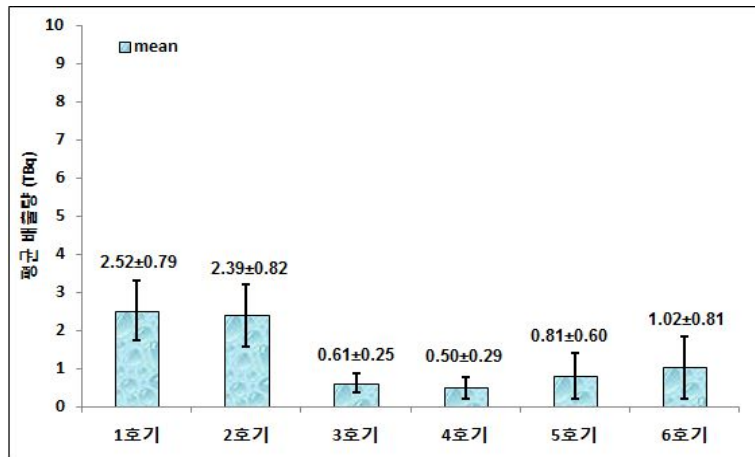
연도 \ 호기	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기	년도별 총배출량
2003	12.4	12.4	7.41	7.46	1.83E-07	-	39.67
2004	17.8	17.8	10.1	10.1	1.11	1.85E-07	56.91
2005	8.2	8.2	9.51	9.51	3.21	3.21	41.84
2006	10.5	10.5	9	9	3.67	3.67	46.34
2007	16.2	16.2	9.38	9.38	2.36	2.36	55.88
2008	8.34	8.34	7.64	7.64	3.62	3.62	39.20
2009	10.5	10.5	9.4	9.4	2.54	2.54	44.88
2010	13.3	13.3	4.71	4.71	6.52	6.53	49.07
2011	10.3	10.3	12.5	12.5	6.34	6.34	58.28
2012	8.16	8.16	9.63	9.62	4.43	4.44	44.44
2013	9.45	9.45	3.1	3.1	4.51	4.51	34.12
호기별	125.15	125.15	92.38	92.42	38.31	37.22	510.63 ^{a)}
평균	11.38	11.38	8.40	8.40	3.48	3.38	7.74 ^{b)}

a) 한울원전 액체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 배출량

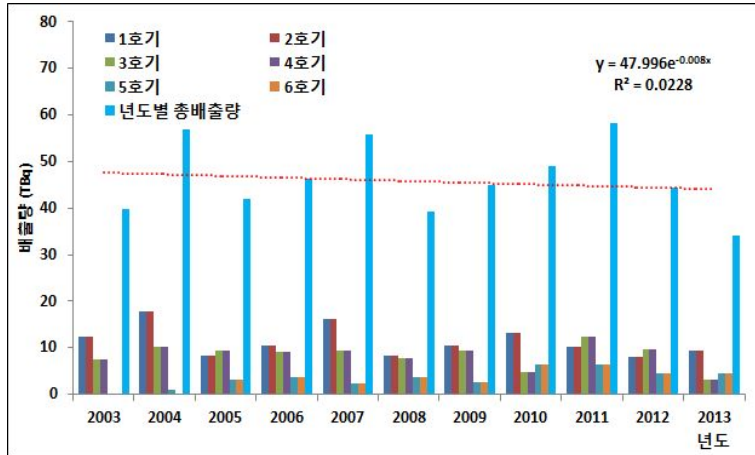
b) 한울원전 액체 삼중수소 전체(2003년~2013년) 평균



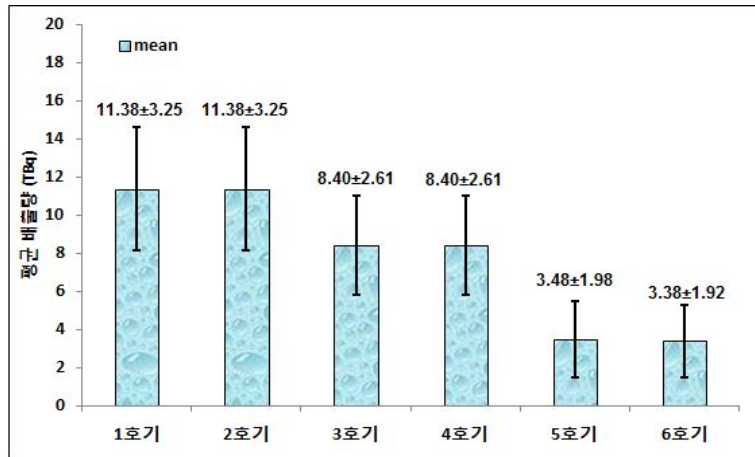
[그림 2.32] 한울원전 년도별 기체 배출량 비교



[그림 2.33] 한울원전 호기별 평균 기체 배출량 비교



[그림 2.34] 한울원전 년도별 액체 배출량 비교



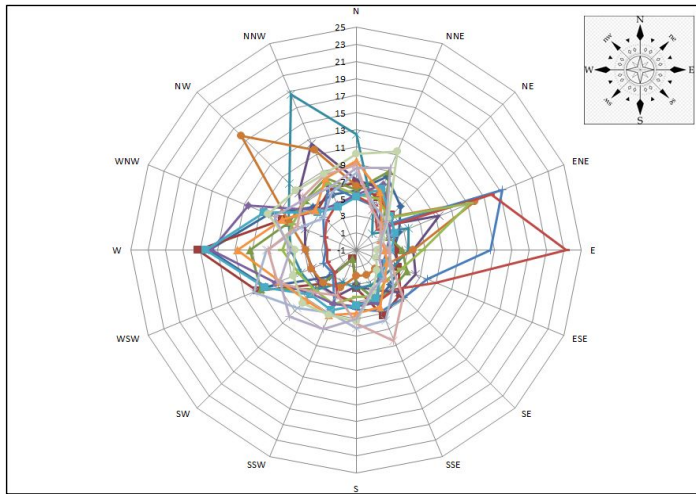
[그림 2.35] 한울원전 호기별 평균 액체 배출량 비교

나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가

한울원전의 평균 풍향 빈도는 NE 방향으로가 최소 빈도로서 3.8%를 나타냈고 W 방향으로로는 최대 빈도로서 9.3%의 빈도를 나타냈다. 대체적으로 W 방향으로의 빈도가 다른 원전에 비해 두드러지게 나타난 것을 [그림 2.36]에서 보는 바와 같이 알 수 있었다.

풍향 빈도별 환경매체에 대한 시료채취 및 분석을 위한 지점 타당성을 평가해 본 결과 가장 영향이 두드러지게 나타날 것으로 판단되는 빗물 시료 채취지점에 대해 평가해 본 결과 풍향 빈도가 높은 지점에 대체적으로 잘 선정되어 있는 것으로 나타났다.

즉, 가장 빈도가 높은 W 방향으로 구기상관측소 지점을 두고 W방향의 상호 주변의 영향을 확인하기 위한 NW 방향의 환경실험실과 SSE 방향의 기상관측소가 잘 선정되어 있었다.



[그림 2.36] 한울원전 풍향 빈도

다. 환경매체 중 방사능농도 평가

한울원전의 삼중수소 분석 환경매체는 고리 및 한빛 원전과 동일한 빗물, 지표수(하천수), 식수, 지하수, 해수를 분석하고 있었다. [표 2.17]에서 보는 바와 같이 빗물과 해수에서 삼중수소가 검출되었고 나머지 환경매체는 검출이 되지 않았다.

[그림 2.37]과 [그림 2.38]에서와 같이 빗물은 구기상관측소, 환경실험실, 궁촌초교 지점에서 분석을 수행하였고, 각 지점별 방사능농도는 각각 평균 3.10 Bq/L(1.63~4.29 Bq/L), 1.82 Bq/L(<1.04~2.61 Bq/L), 8.43 Bq/L(2.82~19.4 Bq/L), 불검출로 나타났다.

빗물에서의 시간에 따른 전체 삼중수소 년도별 평균은 시간에 따라 점차 증가하는 경향($R^2=0.478$)을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 같은 방향으로의 구기상관측소, 환경실험실, 궁촌초교를 대상으로 원전으로부터 근거리 및 원거리에 따른 경향을 평가해 본 결과 거리가 멀어질수록 삼중수소가 감소하는 경향($R^2=0.99$)을 나타냄을 알 수 있었다.

참고로 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 한울원전 주변 빗물 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위는 기상관측소에서 <0.748~11.7 Bq/L로, 한수원에서 분석한 2003년부터 2013년까지 가장 높게 나타난 지점인 구기상관측소의 1.63~5.06 Bq/L와 비교했을 때 차이가 나타났다. 이는 분석 지점의 차이와 거리, 풍향 등에 따른 영향에 의한 것으로 판단된다.

해수의 경우는 [그림 2.39]와 [그림 2.40]에서 보는 바와 같이 취수구에서는 검출되지 않았고 배수구 및 덕천리에서 삼중수소가 검출되었고 시간에 따른 감소 내지 증가 경향은 나타나지 않았다. 그리고 거리에 따른 경향은 배수구와 덕천리 지점이 인접되어 있고 또한 3지점 이상이 되어야 경향을 볼 수 있으나 [그림 2.40]과 같이 2개 지점만으로는 상관관계가 1에 가까워 신뢰성은 없는 것으로 나타났다.

한울원전 주변의 지하수에서는 한수원은 삼중수소가 검출되지 않았지만 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 한울원전 주변 지하수 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위는 0.583~1.09 Bq/L로 나타났다.

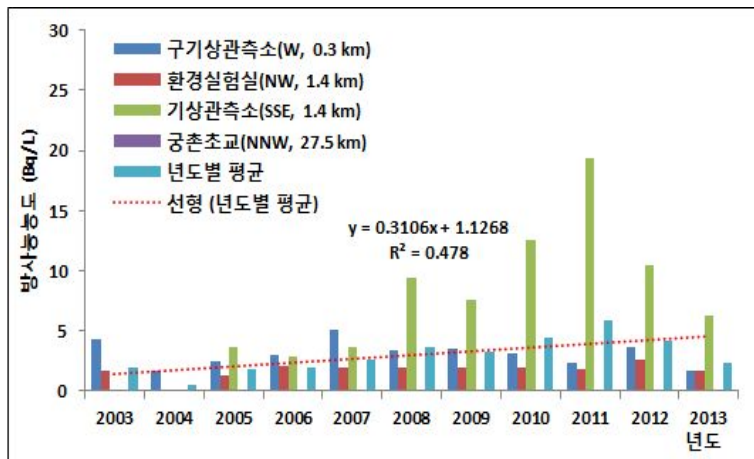
한울원전 주변지역의 환경매체 분석결과를 평가해본 결과 빗물시료가 원전으로부터

거리가 가까운 지점일수록 삼중수소 방사능농도가 더 높은 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

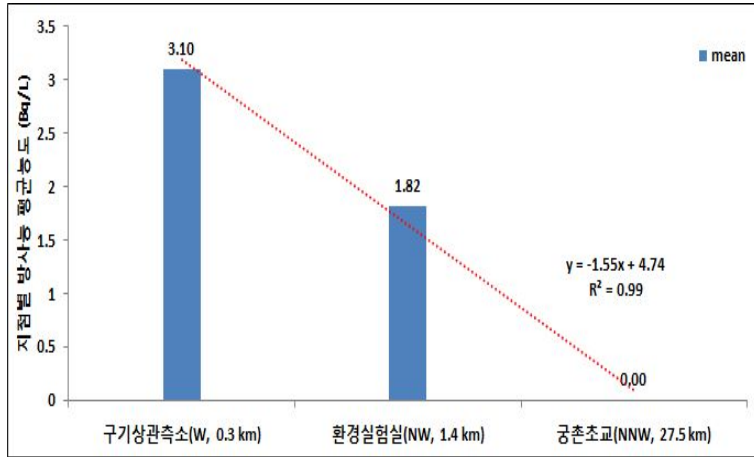
[표 2.17] 한울원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과

매체	지점	위치		방사능농도(Bq/L) (2003~2013년)	
		방위	거리(km)	평균	범위
빗물	구기상관측소	W	0.3	3.10	1.63~4.29
	환경실험실	NW	1.4	1.82	<1.04~2.61
	기상관측소	SSE	1.4	8.43	2.82~19.4
	궁촌초교	NNW	27.5	0	<0.98~<1.31
해수	취수구	NNE	0.6	0	<0.78~<1.19
	배수구	ESE	1.8	3.02	<0.928~5.85
	덕천리 ^{a)}	SSE	2.8	2.89	1.1~4.74

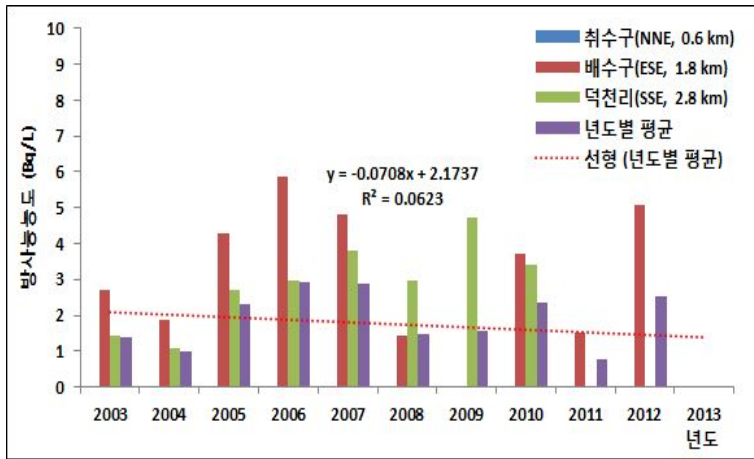
a) 2011년부터는 분석을 수행하지 않음



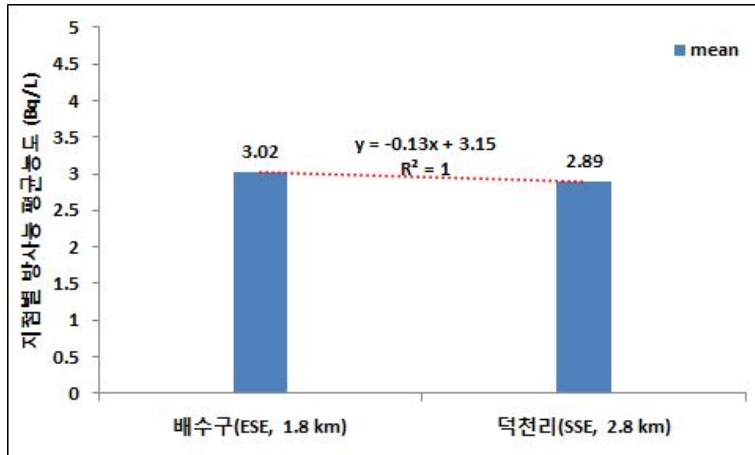
[그림 2.37] 빗물 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한울원전주변)



[그림 2.38] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한울원전주변)



[그림 2.39] 해수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(한울원전주변)



[그림 2.40] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(한울원전주변)

4. 월성원전

가. 기체 및 액체 배출량 평가

[표 2.18]과 [표 2.19]와 같이 월성원전의 기체 및 액체 배출량을 비교 평가한 결과 기체의 경우 호기별 전체 배출량 및 평균 배출량은 각각 1,187.0 TBq(평균 107.91 TBq), 670.80 TBq(평균 60.98 TBq), 721.30 TBq(평균 65.57 TBq), 488.40 TBq(평균 44.40 TBq)로 나타났다.

기체의 전체 배출량은 3,067.5 TBq(평균 69.72 TBq)로 나타났으며, 1호기가 다른 호기에 비해 약 2배 정도 배출량이 많음을 알 수 있었다.

액체의 경우는 호기별 전체 배출량 및 평균 배출량은 488.81 TBq(평균 44.44 TBq), 155.56 TBq(평균 14.14 TBq), 349.60 TBq(평균 31.78 TBq), 151.19 TBq(평균 13.74 TBq)로 나타났다.

액체의 전체 배출량은 1145.16 TBq(평균 26.02 TBq)로 나타났으며, 호기별 배출 특성은 1호기와 3호기가 2호기와 4호기에 비해 약 2배 내지 3배 배출량이 많음을 알 수 있었다.

또한 계통의 배출관리 측면에서는 경수로의 고리 1호기와 2호기를 제외한 나머지 원전은 각 발전소별로 계통 구조상 독립적 배출 관리가 어려운 반면 중수로 원전인 월성원전의 액체 배출은 각 호기별 배출관리를 하고 있는 것으로 나타났다. 이는 계통 특성일 것으로 판단된다.

기체와 액체 배출량을 종합 평가해본 결과 기체 전체 배출량은 3,067.5 TBq이고 액체 총 배출량은 1,145.16 TBq로서 상대적으로 기체가 액체보다 약 2배 이상 배출량이 많음을 알 수 있었다. 배출 특성은 기체의 경우 [그림 2.41]에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라 배출량이 감소하는 경향($R^2=0.8448$)이 뚜렷히 나타났다. 그러나 액체의 경우는 [그림 2.43]에서 보는 바와 같이 감소 내지 증가하는 경향을 확인하기 어려웠다.

월성원전은 중수로 원전으로서 냉각재와 감속제를 중수를 사용하기 때문에 상대적으로 삼중수소가 많이 생성되고 배출되는 것이 사실이다. 이에 사업자는 삼중수소 저감을 통한 계통 보호 및 종사자 보호를 위하여 TRF(삼중수소제거설비)를 2007년부터 설치 운영하고 있다.

[표 2.20]과 [그림 2.45]에서 보듯이 각 호기별 TRF 운영 현황을 살펴보면 운영 전과 운영 후 삼중수소 저감효과는 감속재와 냉각재 계통에서는 뚜렷히 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 TRF가 운영된 이후 배출 저감 추이를 평가해본 결과 기체의 경우는 시간이 지날수록 약간 감소함을 알 수 있었으나, 액체의 경우는 저감효과를 확인하기가 어려웠다.

[표 2.18] 월성원전 년도별 삼중수소 기체 배출 현황

[단위 : TBq]

연도 \ 호기	1호기	2호기	3호기	4호기	년도별 총배출량
2003	180	67	53.5	22.4	322.90
2004	218	60.2	81.4	42.8	402.40
2005	159	75.7	61.3	74.2	370.20
2006	140	75.4	95.9	52.2	363.50
2007	150	83.9	60.9	40.2	335.00
2008	125	81.7	77.8	30.3	314.80
2009	91	73.6	65.7	44.3	274.60
2010	46.8	58.4	63.8	37.2	206.20
2011	36.7	41.3	58.5	51.4	187.90
2012	25.6	26.7	58.8	44.3	155.40
2013	14.9	26.9	43.7	49.1	134.60
호기별	1187.00	670.80	721.30	488.40	3,067.5 ^{a)}
평균	107.91	60.98	65.57	44.40	69.72 ^{b)}

a) 월성원전 기체 삼중수소 전체 (2003년~2013년) 배출량

b) 월성원전 기체 삼중수소 전체 (2003년~2013년) 평균

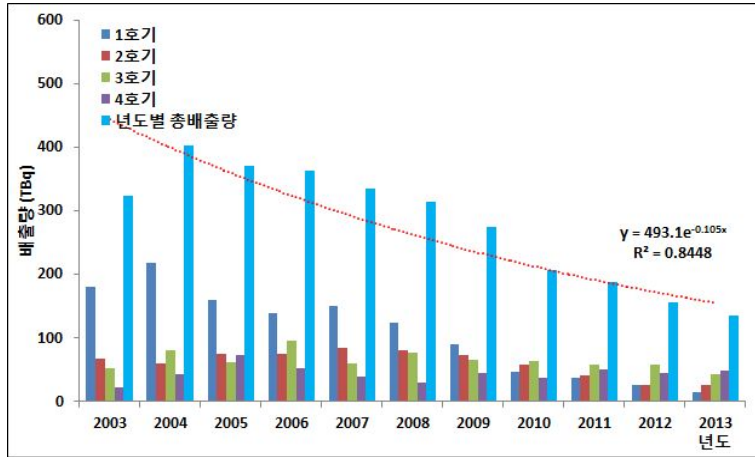
[표 2.19] 월성원전 년도별 삼중수소 액체 배출 현황

[단위 : TBq]

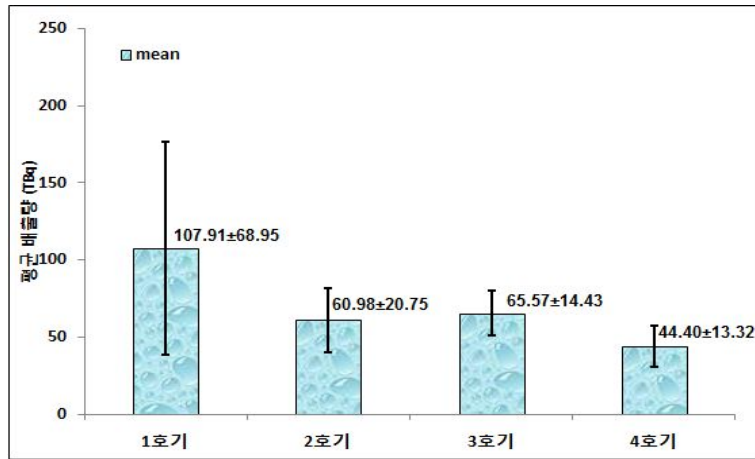
연도 \ 호기	1호기	2호기	3호기	4호기	년도별 총배출량
2003	24.7	7.95	35.4	6.2	74.25
2004	29.3	6.19	23.3	5.76	64.55
2005	35.3	18.7	15.2	7.21	76.41
2006	46.3	20.8	21.7	2.76	91.56
2007	73.7	27.6	22.1	14.1	137.50
2008	50	22.3	33.2	9.66	115.16
2009	75.3	31.6	33.8	23	163.70
2010	65.2	8.68	56.7	12.4	142.98
2011	38.5	3.52	36.9	13.2	92.12
2012	47.3	6.13	35.2	35.1	123.73
2013	3.21	2.09	36.1	21.8	63.20
호기별	488.81	155.56	349.60	151.19	1,145.16 ^{a)}
평균	44.44	14.14	31.78	13.74	26.02 ^{b)}

a) 월성원전 액체 삼중수소 전체 (2003년~2013년) 배출량

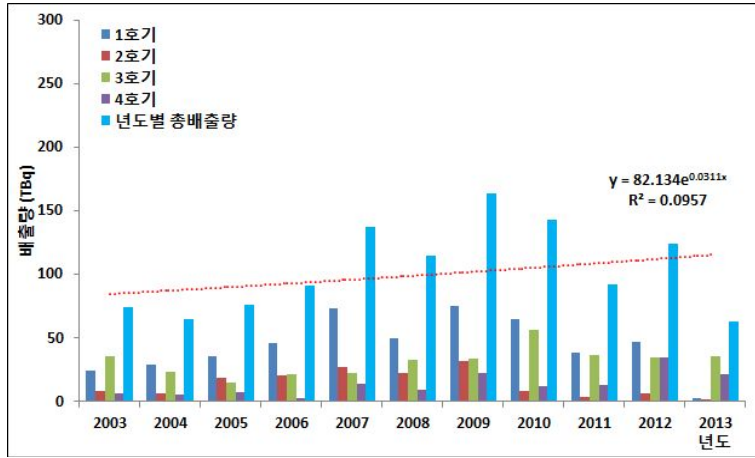
b) 월성원전 액체 삼중수소 전체 (2003년~2013년) 평균



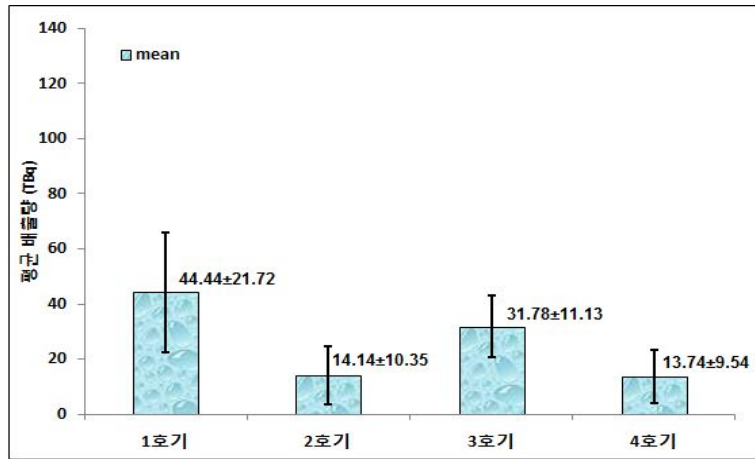
[그림 2.41] 월성원전 년도별 기체 배출량 비교



[그림 2.42] 월성원전 호기별 평균 기체 배출량 비교



[그림 2.43] 월성원전 년도별 액체 배출량 비교

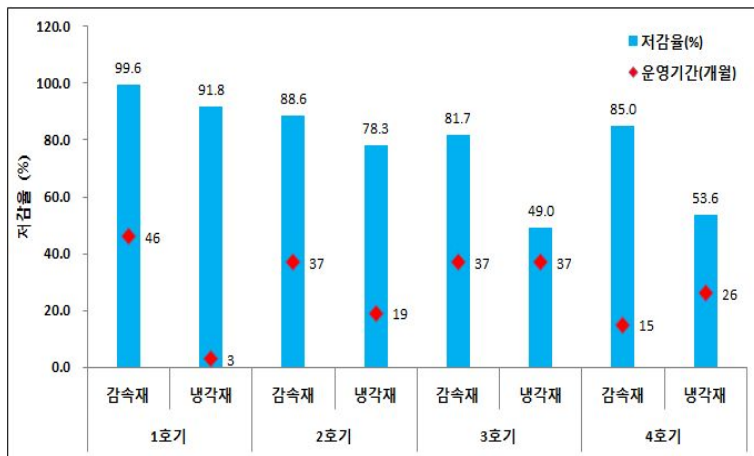


[그림 2.44] 월성원전 호기별 평균 액체 배출량 비교

[표 2.20] 월성원전 삼중수소제거설비(TRF) 운영 결과

[단위 : Ci/kg]

구분		TRF 운영결과		³ H 농도분포 (‘15.8월 현재)
호기	분류	운영전	운영후	
1	감속재	62.7	0.25	7.51
		‘07.07월	‘10.11월	
	냉각재	1.70	0.14	0.34
		‘10.12월	‘11.03월	
2	감속재	48.3	5.5	21.4
		‘09.06월	‘12.07월	
	냉각재	1.84	0.4	0.82
		‘10.12월	‘12.07월	
3	감속재	48.9	8.95	8.95
		‘12.07월	‘15.08월	
	냉각재	2.59	1.32	1.32
		‘12.07월	‘15.08월	
4	감속재	53.5	8.0	9.16
		‘14.02월	‘15.05월	
	냉각재	2.22	1.03	1.06
		‘13.03월	‘15.05월	



[그림 2.45] TRF 운영에 따른 저감율 비교

나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가

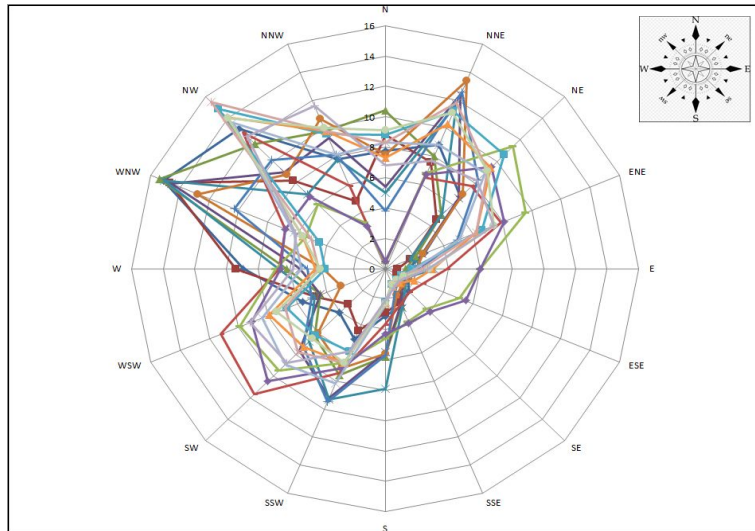
월성원전의 평균 풍향 빈도는 1.7~11.1%의 범위를 나타냈으며 대체적으로 WNW~NW, NNW 방향으로 빈도가 높은 것을 [그림 2.46]에서 보는 바와 같이 알 수 있었다.

월성원전의 경우 풍향 빈도별 환경매체 시료채취, 분석을 위한 지점 타당성을 평가해 본 결과 가장 풍향 빈도가 많은 지점에 대체적으로 잘 선정되어 있으나, 빈도가 높은 WNW와 NW 방향의 원전 인근지역의 추가 분석지점의 검토가 필요함을 알 수 있었다.

월성원전의 경우 평균 풍향 빈도는 SE 방향으로가 최소 빈도로서 1.7%를 나타냈고 NW 방향으로는 최대 빈도로서 11.1%의 빈도를 나타냈다. 대체적으로 해안가를 제외한 육지방향으로는 [그림 2.46]에서 보는 바와 같이 두드러지게 골고루 나타났다.

풍향 빈도별 환경매체에 대한 시료채취 및 분석을 위한 지점 타당성을 평가해 본 결과 가장 영향이 두드러지게 나타날 것으로 판단되는 빗물 시료 채취지점에 대해 평가해 본 결과 풍향 빈도가 육지 방향으로 골고루 나타난 만큼 등 간격으로 NNE 방향의 상봉, NNW 방향의 폐기물저장고, W 방향의 나산, SSW 방향의 직원사택 지점이 대체적으로 잘 선정되어 있는 것으로 나타났다.

그러나 가장 빈도가 높은 방향인 NW~WNW와 WSW~SW 방향으로의 지점이 없어 지점 전환 또는 추가 지점 선정이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 월성원전은 다량의 삼중수소가 배출되는 만큼 보다 세밀한 검토를 통해 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.



[그림 2.46] 월성원전 풍향 빈도

다. 환경매체 중 방사능농도 평가

월성원전의 삼중수소 분석 환경매체는 [표 2.21A]와 [표 2.21B]에서 보는 바와 같이 공기 중 수분, 빗물, 지표수(하천수), 식수, 지하수, 곡류(보리, 쌀), 농산물(배추), 과일류(감), 육류(닭), 우유, 해수를 분석하고 있었다.

분석 대상 시료를 확인해 본 결과 모든 분석 시료에서 삼중수소가 검출되고 있음을 알 수 있었다.

먼저 [그림 2.47], [그림 2.48], [그림 2.49]와 같이 공기 중 수분을 살펴보면 후문서쪽, 후문동쪽, 폐기물저장고, 1발 정수장, 나산, 직원사택, 상봉, 경주, 울산 지점에서 분석을 수행하였고, 각 지점별 방사능농도는 각각 평균 1.88 Bq/m^3 ($0.405 \sim 3.13 \text{ Bq/m}^3$), 2.57 Bq/m^3 ($0.672 \sim 4.58 \text{ Bq/m}^3$), 8.79 Bq/m^3 ($5.29 \sim 15.2 \text{ Bq/m}^3$), 3.66 Bq/m^3 ($0.931 \sim 6.64 \text{ Bq/m}^3$), 1.65 Bq/m^3 ($0.0981 \sim 4.57 \text{ Bq/m}^3$), 0.90 Bq/m^3 ($0.288 \sim 1.56 \text{ Bq/m}^3$), 1.50 Bq/m^3 ($0.595 \sim 2.77 \text{ Bq/m}^3$), 0.03 Bq/m^3 ($0.0218 \sim 0.0408 \text{ Bq/m}^3$), 0.04 Bq/m^3 ($0.024 \sim 0.0789 \text{ Bq/m}^3$)로 나타났다.

각 지점별 원전에서 가장 가까운 폐기물저장고 지점에서 다른 지점보다 높게 검출되

고 있는 것을 알 수 있었고 2008년도에 가장 높은 농도를 보이다가 점차 감소하는 추세를 보였다. 다른 지점의 경우도 2008년 이후부터는 점차 감소하는 추세를 나타내었다.

공기 중 수분에 대한 거리별 평균 방사능농도는 먼저 경주방향으로 폐기물저장고, 1발정수장, 나산, 경주 지점을 평가해 본 결과 원전으로부터 0.5 km 떨어진 근거리에 위치한 폐기물저장고에서 8.79 Bq/m³으로 22.3 km 떨어진 경주 0.03 Bq/m³ 보다 높게 검출되어 거리에 따라 감소하는 경향(R²=0.9206)이 뚜렷히 나타났다.

그리고 울산방향으로는 후문동쪽, 직원사택, 울산 지점을 평가해 본 결과 경주방향과 마찬가지로 원전으로부터 0.8 km 떨어진 근거리에 위치한 후문동쪽에서 2.57 Bq/m³으로 23.6 km 떨어진 울산 0.04 Bq/m³ 보다 높게 검출되어 거리에 따라 감소하는 경향(R²=0.967)이 뚜렷히 나타났다.

참고로 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 월성원전 주변 대기 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위는 상봉 0.095~6.73 Bq/m³과 직원사택 0.084~2.59 Bq/m³으로, 한수원에서 분석한 2003년부터 2013년까지 상봉은 0.595~2.77 Bq/m³, 직원사택은 0.288~1.56 Bq/m³으로 약간 높은 농도값을 나타냈다. 이는 대기 수분 중 삼중수소 농도는 기체 방출량과 풍향, 대기습도 및 강우량과 같은 환경적 요인에 따라 차이가 있는 것에 기인한 것으로 판단된다.

그리고 방사능농도 수준은 원자력안전위원회 고시 제2014-34호 방사선방호 등에 관한 기준에서 정하는 배기 중 배출 관리기준 값인 3,000 Bq/m³과 비교할 때 아주 미미한 수준인 것을 확인하였다.

빗물은 취수구 부근, 폐기물저장고, 나산, 직원사택, 상봉, 경주, 울산 지점에서 분석을 수행하였고, 각 지점별 방사능농도는 각각 평균 355.0 Bq/L(171~490 Bq/L), 243.08 Bq/L(77.6~381 Bq/L), 60.09 Bq/L(22.5~105 Bq/L), 98.60 Bq/L(46.5~146 Bq/L), 62.35 Bq/L(27.7~143 Bq/L), 1.60 Bq/L(1.18~2.39 Bq/L), 2.53 Bq/L(1.64~4.18 Bq/L)로 나타났다.

[그림 2.50]과 [그림 2.51]과 같이 취수구 부근과 폐기물저장고에서 삼중수소 농도가 높게 검출되고 있었고 그보다 거리가 먼 다른 지점은 낮게 검출되고 있는 것을 알 수 있었다. 가장 높게 검출된 취수구 부근의 경우 2007년도에 490 Bq/L로서 최대치를 나타냈고 대체적으로 2007년, 2008년 이후부터는 점차 감소하는 경향($R^2=0.3067$)이 있는 것을 알 수 있었다.

빗물의 거리별 경향은 경주방향을 고려하여 평가해 본 결과 폐기물저장고, 나산, 경주 지점으로 갈수록 방사능농도가 [그림 2.51]에서 보듯이 감소하는 경향($R^2=0.9033$)을 나타냄을 알 수 있었다.

또한 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 월성원전 주변 빗물 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위는 기상 관측소에서 2.65~834 Bq/L로, 한수원에서 분석한 2003년부터 2013년까지 가장 높게 나타난 취수구 부근의 171~490 Bq/L보다 높은 농도를 나타내었다. 이는 분석 지점의 차이와 거리, 풍향 등에 따른 영향에 의한 차이가 있는 것으로 판단된다.

그리고 지표수는 나산, 하서, 경주, 울산 지점에서 분석을 수행하고 있었고 각 지점별 평균 방사능농도는 각각 11.07 Bq/L(6.21~15.6 Bq/L), 7.13 Bq/L(3.58~10.3 Bq/L), 1.29 Bq/L(<1.04~1.6 Bq/L), 1.25 Bq/L(<1.03~1.45 Bq/L)로 나타났다. [그림 2.52]와 [그림 2.53]에서 보듯이 각 지점별 년도별 평균 추이는 약간씩 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있었고, 3개 지점을 울산방향에 대해 거리별 추이를 평가해 본 결과 근거리일수록 삼중수소가 높게 검출되는 경향($R^2=0.9876$)이 뚜렷히 나타났다.

식수는 나아, 봉길, 경주, 울산 지점에서 분석을 수행하였고 각 지점별 평균 방사능농도는 각각 9.27 Bq/L(5.96~12.5 Bq/L), 9.69 Bq/L(2.37~16.9 Bq/L), 1.22 Bq/L(<1.00~1.52 Bq/L), 1.18 Bq/L(<1.01~1.36 Bq/L)으로 나타났다. [그림 2.54]에서 [그림 2.56]까지 보듯이 년도별 평균 삼중수소는 감소 내지 증가하는 뚜렷한 경향은 나타내지 않고 일정한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 거리에 따른 경향분석은 분석 지점이 2개 지점밖에 없어 상관관계는 1에 가까우나 신뢰성은 없는 것으로 나타나 거리별 경향

을 파악하기 위해서는 최소 3개 지점을 선정하여 분석해 볼 필요가 있었다.

지하수는 또한 식수와 마찬가지로 같은 지점을 분석하고 있었고 지점별 평균 방사능 농도는 각각 4.97 Bq/L(<1.13~10.9 Bq/L), 10.55 Bq/L(2.37~17.0 Bq/L), 1.22 Bq/L(<1.01~1.57 Bq/L), 1.24 Bq/L(<1.04~1.49 Bq/L)로 나타났다. [그림 2.57]과 [그림 2.58]과 같이 년도별 평균 삼중수소는 감소 내지 증가하는 뚜렷한 경향은 나타나지 않고 일정한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있었고 거리별 경향은 분석 지점수의 한계로 판단하는데 한계가 있었다.

그리고 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 기술된 월성원전 주변 지하수 중 삼중수소 조사결과는 2014년 기준 최근 5년간 농도범위인 0.196~11.3 Bq/L로서 한수원이 분석한 가장 높게 나타난 나아 지점의 2003년부터 2013년까지 6.21~14.7 Bq/L와 비슷한 수준을 나타냈다.

방사능농도 수준은 원자력안전위원회 고시 제2014-34호 방사선방호 등에 관한 기준에서 정하는 배수 중 배출 관리기준 값인 40,000 Bq/L와 세계보건기구(WHO) 음용수 권고기준 값인 10,000 Bq/L와 비교할 때 미미한 수준인 것으로 나타났다.

곡류는 보리와 쌀을 대상으로 분석을 수행하였고 분석지점은 읍천과 경주 지점에서 수행하였다. 분석결과 평균 방사능농도는 보리의 경우 읍천과 경주에서 각각 TFWT 5.32 Bq/kg-fresh(0.796~14.8 Bq/kg-fresh), 0.16 Bq/kg-fresh(<0.072~0.536 Bq/kg-fresh)이고 OBT는 각각 26.13 Bq/kg-fresh(7.47~60.8 Bq/kg-fresh), 2.93 Bq/kg-fresh(<0.675~4.48 Bq/kg-fresh)로 나타났다. 쌀의 경우는 각각 TFWT 2.64 Bq/kg-fresh(0.784~7.73 Bq/kg-fresh), 0.31 Bq/kg-fresh(<0.0838~0.668 Bq/kg-fresh)이고 OBT는 각각 11.61 Bq/kg-fresh(2.57~42.4 Bq/kg-fresh), 2.02 Bq/kg-fresh(<0.628~5.36 Bq/kg-fresh)로 나타났다.

보리와 쌀의 경우 TFWT 보다 OBT에서 삼중수소 방사능농도가 더 높게 나타남을 알 수 있었는데 이는 수분의 함량 대비 조직에 결합되어 있는 삼중수소가 더 많음을

알 수 있었다. [그림 2.59]와 [그림 2.60]에 보리와 쌀의 년도별 평균 추이를 나타냈는데 시간의 흐름에 따라 정도의 차이는 있지만 각각 점차 감소하는 경향($R^2=0.548$, $R^2=0.1026$)을 나타냈다.

농작물인 배추는 읍천과 경주 지점에서 분석을 수행하였고 분석결과 평균 방사능농도는 읍천과 경주에서 각각 TFWT 116.82 Bq/kg-fresh(61~198 Bq/kg-fresh), 1.89 Bq/kg-fresh(<1.17~4.68 Bq/kg-fresh)이고 OBT는 각각 2.16 Bq/kg-fresh(0.7~3.37 Bq/kg-fresh), 0.21 Bq/kg-fresh(<0.0254~0.341 Bq/kg-fresh)로 나타났다. 배추의 경우 수분 함량이 높아 TFWT에서 OBT보다 월등히 높은 삼중수소가 검출되었으며, 시간의 흐름에 따라 삼중수소가 약간 높게 검출되는 추세를 보이고 있었다.

과일류인 감은 나산과 경주에서 분석을 수행하였고 평균 방사능농도는 나산과 경주에서 각각 TFWT 26.75 Bq/kg-fresh(11.3~49.2 Bq/kg-fresh), 2.37 Bq/kg-fresh(<0.78~5.62 Bq/kg-fresh)이고 OBT는 각각 2.88 Bq/kg-fresh(0.73~5.02 Bq/kg-fresh), 0.30 Bq/kg-fresh(<0.0931~1.13 Bq/kg-fresh)로 나타났다. 감의 년도별 평균 방사능농도 추이는 [그림 2.62]에서 보는 바와 같이 일정한 수준을 유지하고 있었다.

육류인 닭은 환서와 경주 지점에서 분석을 수행하였고 평균 방사능농도는 각각 TFWT 2.45 Bq/kg(<1.07~4.79 Bq/kg), 1.20 Bq/kg(<0.731~1.61 Bq/kg)이고 OBT는 각각 0.77 Bq/kg(<0.232~1.46 Bq/kg), 0.41 Bq/kg(<0.194~0.857 Bq/kg)로 나타났다. 닭 또한 감과 마찬가지로 [그림 2.64]에서 보는 바와 같이 일정한 수준을 유지하고 있었다.

우유는 용동과 경주 지점에서 분석을 수행하였고 평균 방사능농도는 각각 TFWT 3.90 Bq/L(1.76~6.27 Bq/L), 1.24 Bq/L(<0.91~2.11 Bq/L)이고 OBT는 각각 0.40 Bq/L(0.175~0.834 Bq/L), 0.20 Bq/L(<0.0954~0.357 Bq/L)로 나타났다. 우유의 경우는 [그림 2.65]와 같이 시간에 따라 점차 감소하는 경향($R^2=0.1645$)을 나타냈다. 2014년 KINS 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서에 최근 5년간 농도범위인

<1.27~6.59 Bq/L와 비슷한 수준을 나타냈다.

해수는 취수구 부근, 배수구 1, 배수구 2, 구룡포 지점에서 분석을 수행하였고 [그림 2.67]과 [그림 2.68]에서와 같이 연도별 평균 삼중수소는 시간이 지남에 따라 약간이나마 증가하는 추세를 나타냈다. 특이사항으로 2013년도에 배수구1에서 90 Bq/L로 갑자기 증가한 사실을 알 수 있었다. 이는 월성1호기 설비개선 및 계속운전을 위한 압력관 교체시 다량의 삼중수소가 배출된 것을 알 수 있었다. 또한 취수구와 비교했을 때 배수구 1 및 배수구 2에서 높게 나타난 것은 삼중수소가 배출이 되고 있음을 알 수 있었다.

월성원전 주변의 환경매체 중 삼중수소 농도를 평가해본 결과 타원전과 마찬가지로 원전으로부터 거리가 가까울수록 삼중수소 농도가 더 높은 것을 확인할 수 있었고 특히 중수로의 특성을 나타낸 삼중수소가 모든 환경매체에서 검출이 되고 있으며 경수로보다 높은 수준을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

[표 2.21A] 월성원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과

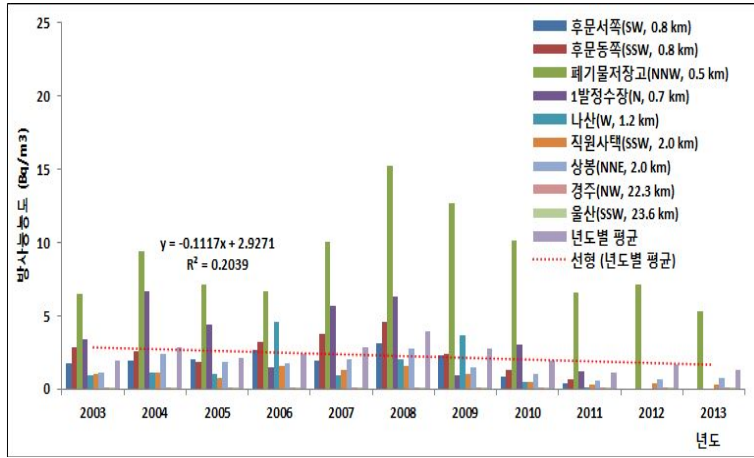
매체	지점	위치		방사능농도(Bq/m ³ , Bq/L) (2003~2013년)	
		방위	거리(km)	평균	범위
수분 ^{a)}	후문서쪽	SW	0.8	1.88	0.405~3.13
	후문동쪽	SSW	0.8	2.57	0.672~4.58
	폐기물저장고	NNW	0.5	8.79	5.29~15.2
	1발 정수장	N	0.7	3.66	0.931~6.64
	나산	W	1.2	1.65	0.0981~4.57
	직원사택	SSW	2.0	0.90	0.288~1.56
	상봉	NNE	2.0	1.50	0.595~2.77
	경주	NW	22.3	0.03	0.0218~0.0408
울산	SSW	23.6	0.04	0.024~0.0789	
빗물 ^{b)}	취수구 부근	ESE	0.5	355.0	171~490
	폐기물저장고	NNW	0.5	243.08	77.6~381
	나산	W	1.2	60.09	22.5~105
	직원사택	SSW	2.0	98.60	46.5~146
	상봉	NNE	2.0	62.35	27.7~143
	경주	NW	22.3	1.60	1.18~2.39
	울산	SSW	23.6	2.53	1.64~4.18
지표수 (하천수)	나산	S	1.5	11.07	6.21~15.6
	하서	SSW	4.5	7.13	3.58~10.3
	경주	NW	28.3	1.29	<1.04~1.6
	울산	SSW	21.4	1.25	<1.03~1.45
식수	나아	S	1.5	9.27	5.96~12.5
	봉길	N	2.5	9.69	2.37~16.9
	경주	NW	22.3	1.22	<1.00~1.52
	울산	SSW	23.6	1.18	<1.01~1.36
지하수	나산	W	1.3	4.97	<1.13~10.9
	봉길	NNW	2.5	10.55	2.37~17.0
	경주	NW	22.3	1.22	<1.01~1.57
	울산	SSW	23.6	1.24	<1.04~1.49

a) 후문서쪽, 후문동쪽, 1발정수장, 나산은 2012년부터 분석을 수행하지 않음

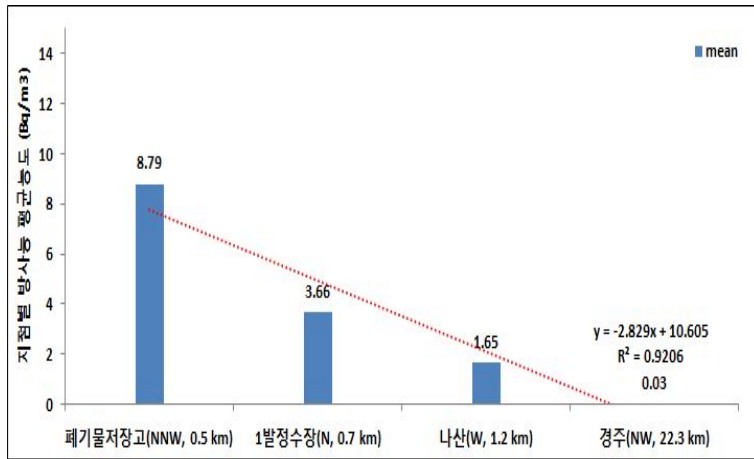
b) 취수구 부근, 폐기물저장고, 나산은 2011년부터 분석을 수행하지 않음

[표 2.21B] 월성원전 환경매체 중 삼중수소 방사능 분석결과

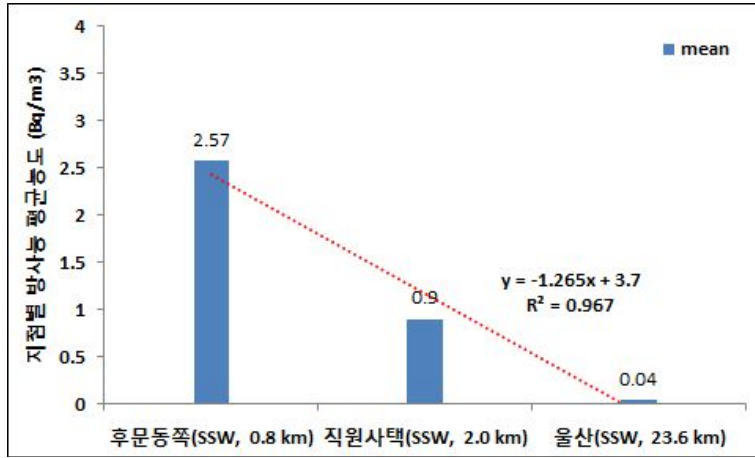
매체	지점	위치		방사능농도(Bq/L, Bq/kg) (2003~2013년)		
		방위	거리(km)	평균	범위	
해수	취수구 부근	ESE	0.5	2.29	1.11~3.51	
	배수구 1	NNE	0.5	18.0	3.36~90.0	
	배수구 2	NNE	0.6	4.49	1.51~12.1	
	구룡포	NNE	37.0	1.18	<1.03~1.45	
보리	TFWT	읍천	SSW	2.5	5.32	0.796~14.8
		경주	NW	22.3	0.16	<0.072~0.536
	OBT	읍천	SSW	2.5	26.13	7.47~60.8
		경주	NW	22.3	2.93	<0.675~4.48
쌀	TFWT	읍천	SSW	2.5	2.64	0.784~7.73
		경주	NW	22.3	0.31	<0.0838~0.668
	OBT	읍천	SSW	2.5	11.61	2.57~42.4
		경주	NW	22.3	2.02	<0.628~5.36
배추	TFWT	읍천	SSW	2.5	116.82	61~198
		경주	NW	22.3	1.89	<1.17~4.68
	OBT	읍천	SSW	2.5	2.16	0.7~3.37
		경주	NW	22.3	0.21	<0.0254~0.341
감	TFWT	나산	W	1.7	26.75	11.3~49.2
		경주	NW	22.3	2.37	<0.78~5.62
	OBT	나산	W	1.7	2.88	0.73~5.02
		경주	NW	22.3	0.30	<0.0931~1.13
닭	TFWT	환서	SSW	3.4	2.45	<1.07~4.79
		경주	NW	22.3	1.20	<0.731~1.61
	OBT	환서	SSW	3.4	0.77	<0.232~1.46
		경주	NW	22.3	0.41	<0.194~0.857
우유	TFWT	용동	NNW	11.5	3.90	1.76~6.27
		경주	NW	34.8	1.24	<0.91~2.11
	OBT	용동	NNW	11.5	0.40	0.175~0.834
		경주	NW	34.8	0.20	<0.0954~0.357



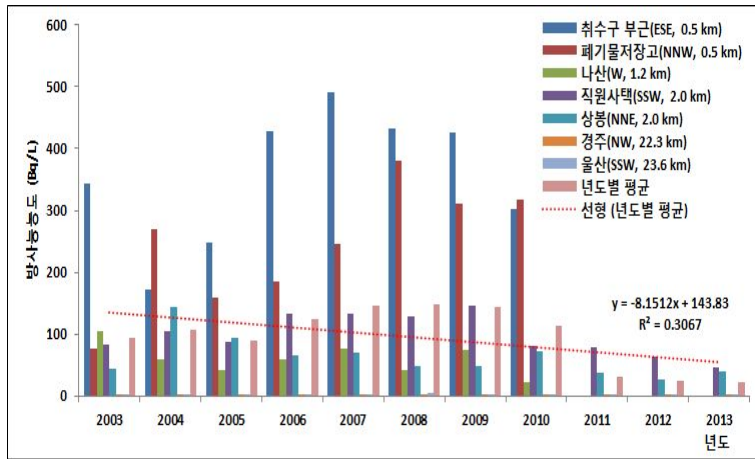
[그림 2.47] 공기(수분) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



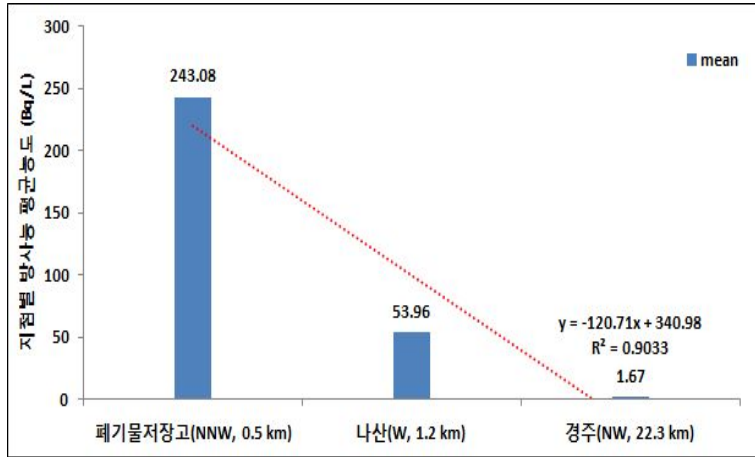
[그림 2.48] 공기(수분) 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향)



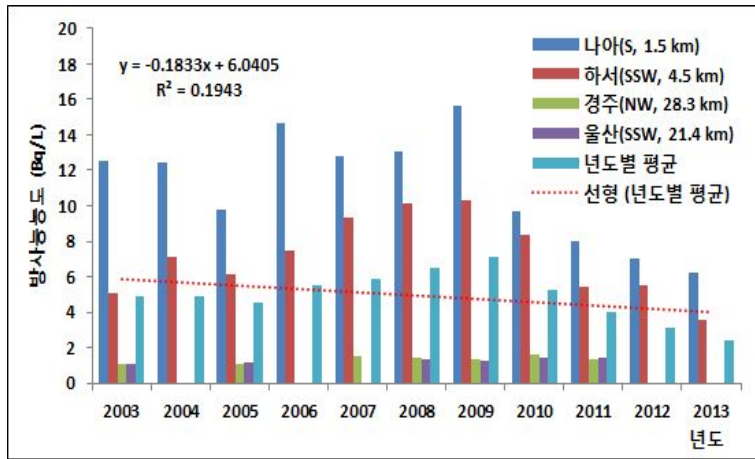
[그림 2.49] 공기(수분) 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-울산방향)



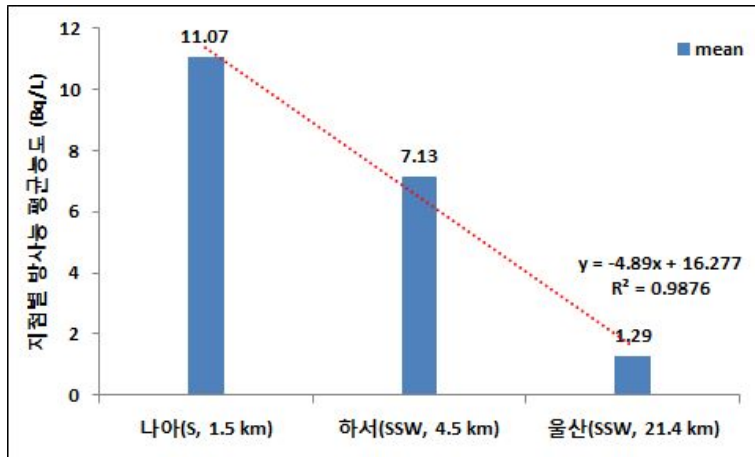
[그림 2.50] 빗물 중 삼중수소 연도별 농도 분포(월성원전주변)



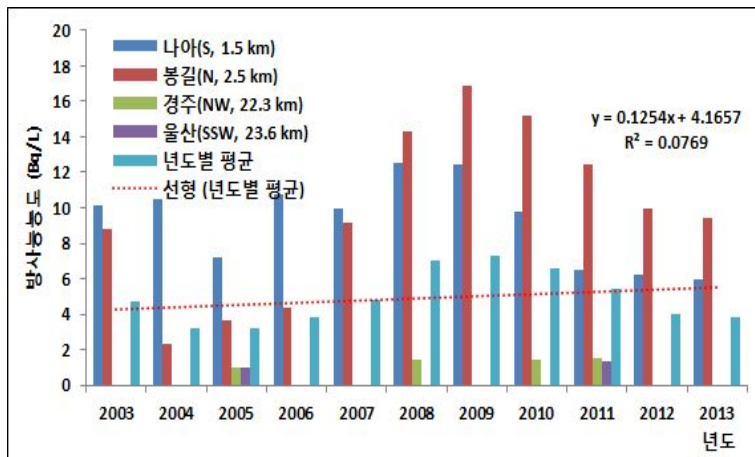
[그림 2.51] 빗물 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향)



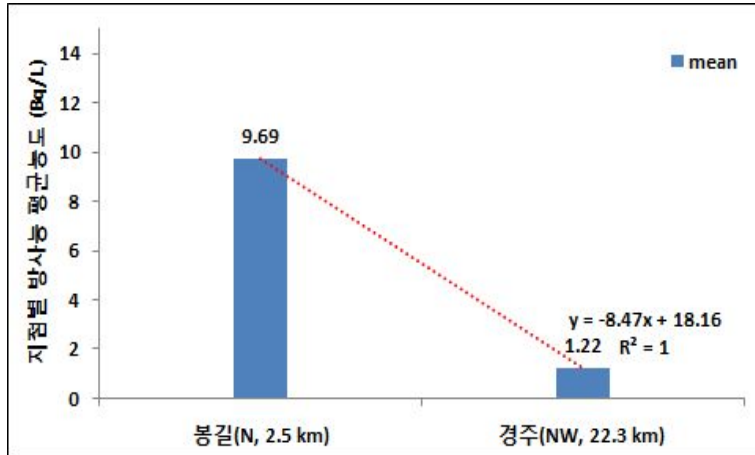
[그림 2.52] 지표수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



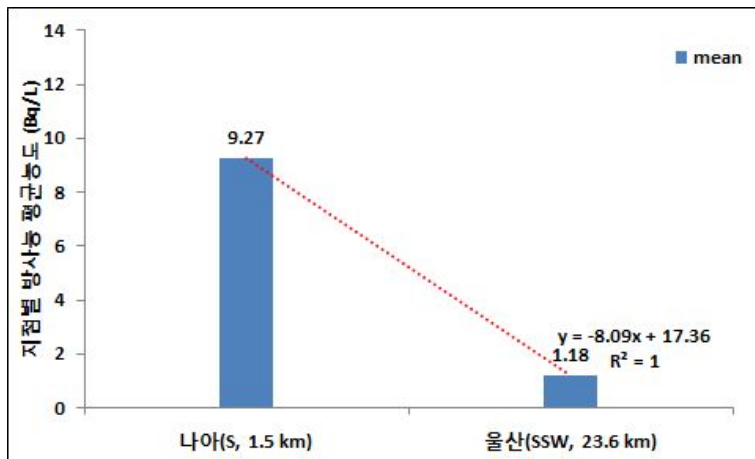
[그림 2.53] 지표수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-울산방향)



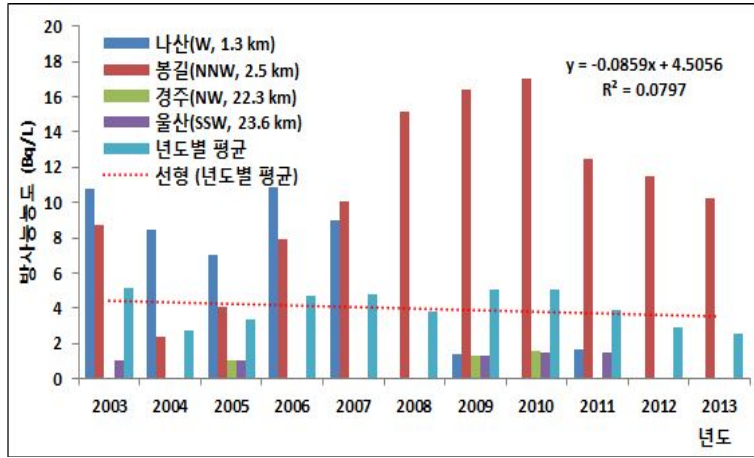
[그림 2.54] 식수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



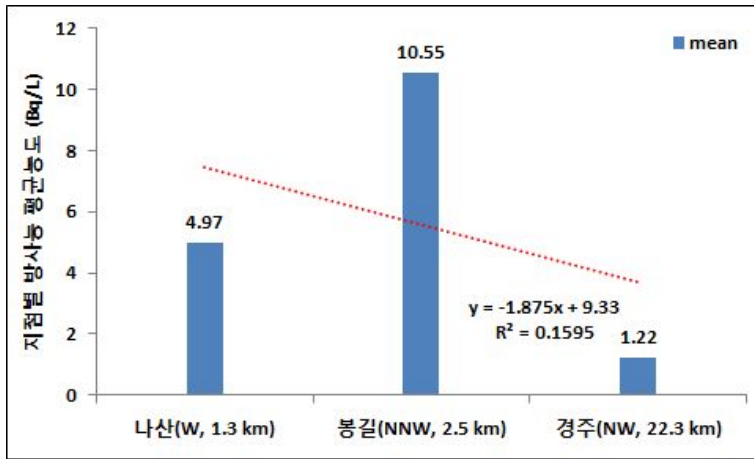
[그림 2.55] 식수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향)



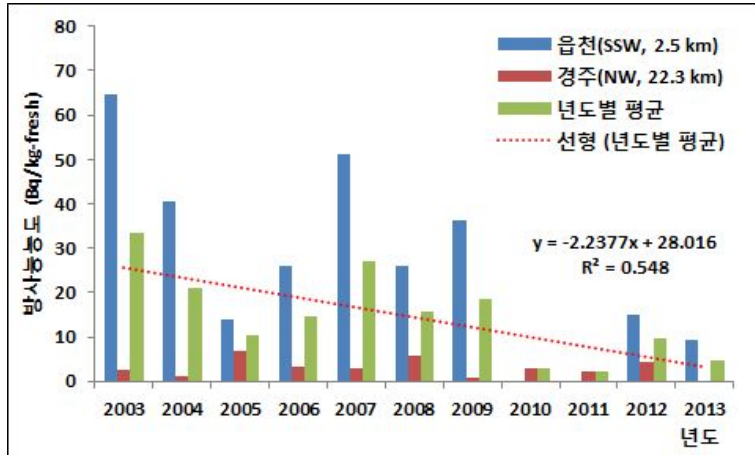
[그림 2.56] 식수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-울산방향)



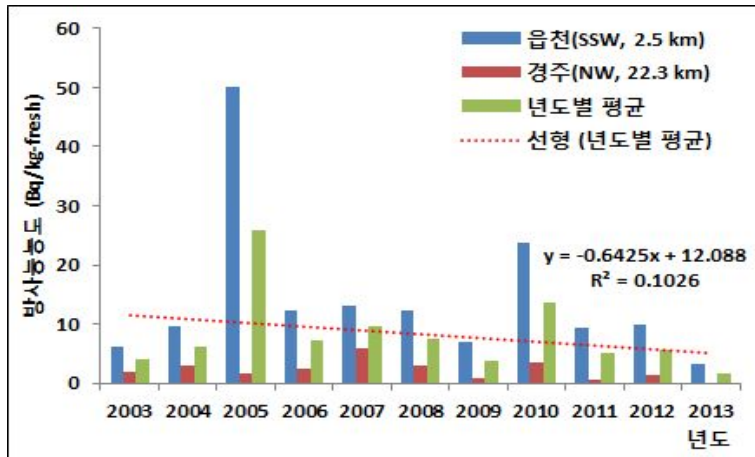
[그림 2.57] 지하수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



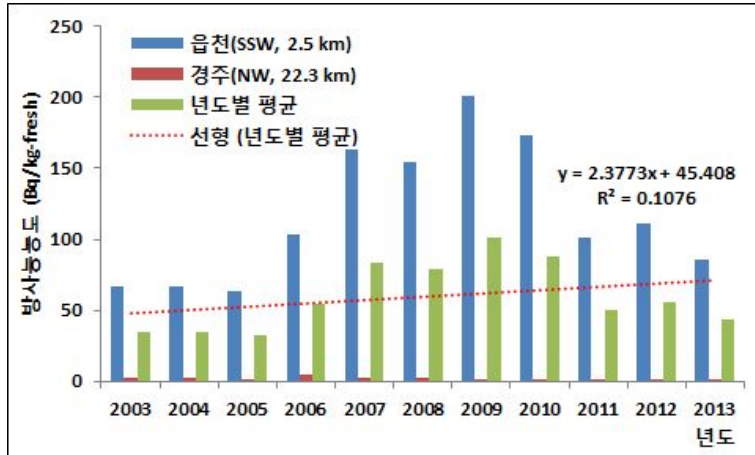
[그림 2.58] 지하수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향)



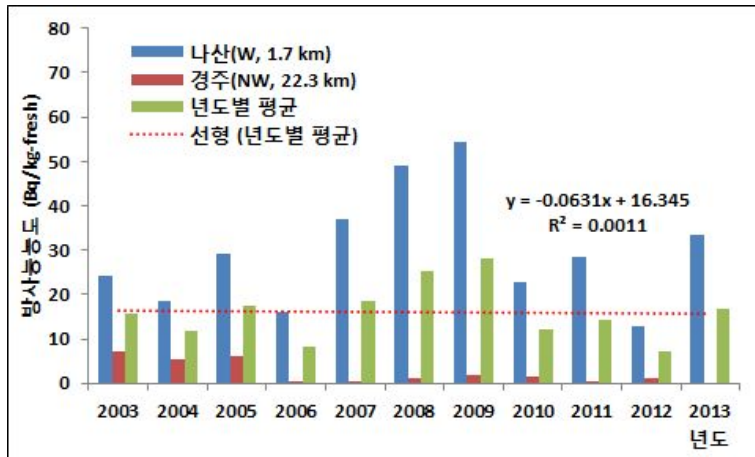
[그림 2.59] 곡류(보리) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



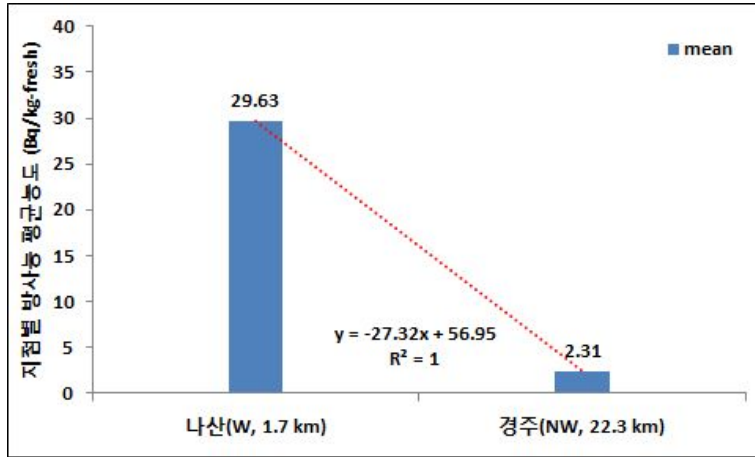
[그림 2.60] 곡류(쌀) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



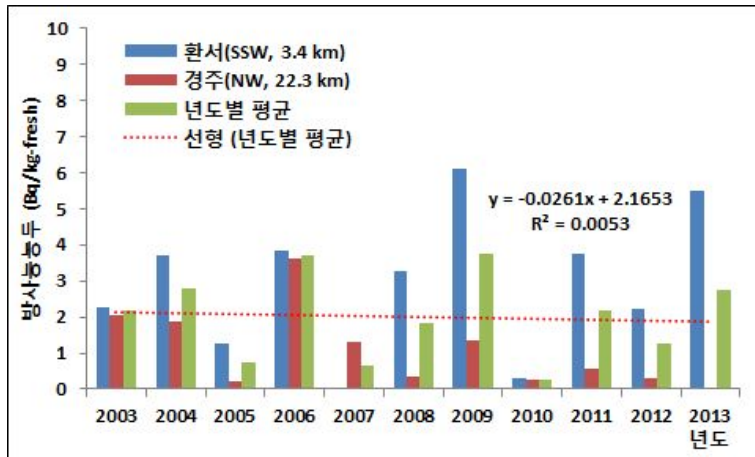
[그림 2.61] 농산물(배추) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



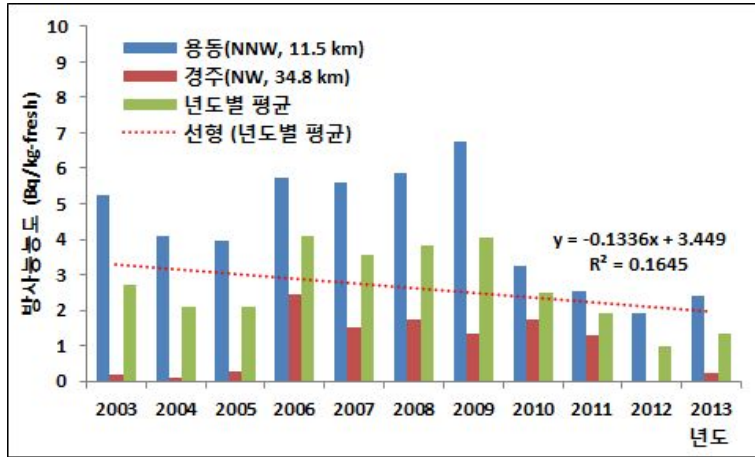
[그림 2.62] 과일류(감) 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



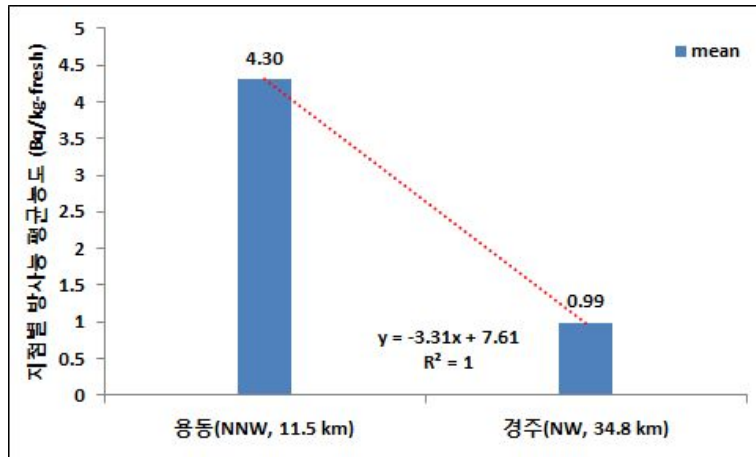
[그림 2.63] 과일류(감) 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향)



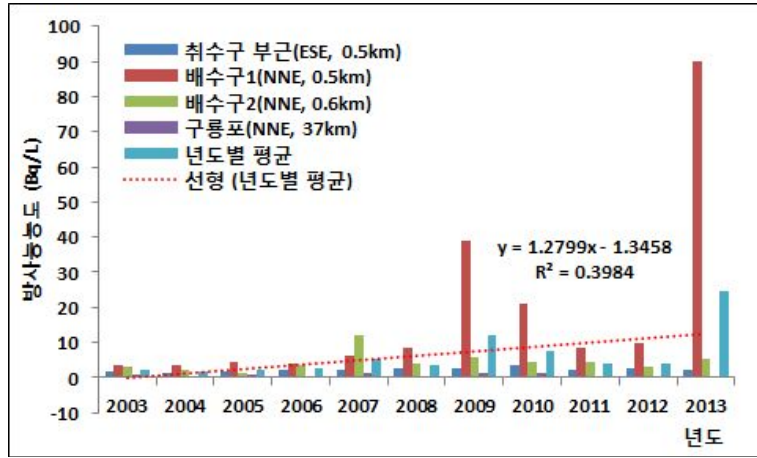
[그림 2.64] 육류(닭) 중 삼중수소 연도별 농도 분포(월성원전주변)



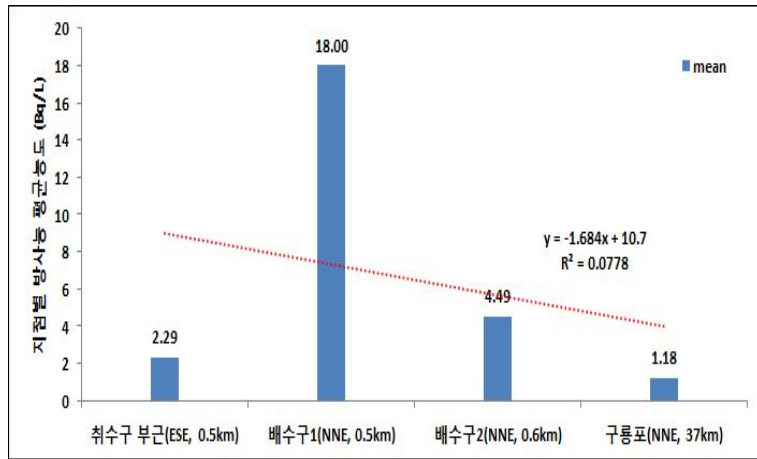
[그림 2.65] 우유 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



[그림 2.66] 우유 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변-경주방향)



[그림 2.67] 해수 중 삼중수소 년도별 농도 분포(월성원전주변)



[그림 2.68] 해수 중 삼중수소 거리별 농도 분포(월성원전주변)

5. 국내 원전 종합 평가

가. 기체 및 액체 배출량 평가

[표 2.22]와 [그림 2.69]와 [그림 2.70], [그림 2.71]에서 확인할 수 있듯이 국내 원전 기체 및 액체 삼중수소 배출량을 비교해본 결과 기체는 경수로로는 한울원전이 고리원전 및 한빛원전보다 상대적으로 적게 배출되고 있음을 확인할 수 있었다. 중수로인 월성원전은 기체 배출량이 시간에 따라 감소하고는 있지만 상대적으로 경수로에 비해 평균 배출량 대비 13~53배 정도 월등히 많은 삼중수소가 배출되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 중수로의 특징인 냉각재와 감속재를 중수를 사용하고 있는데 따른 것으로 판단된다.

액체의 경우는 경수로에서는 고리원전이 상대적으로 한울원전과 한빛원전보다 적게 배출하고 있는 것을 알 수 있었다. 중수로인 월성원전은 경수로에 비해 평균 배출량 대비 2.5~4.5배 정도 더 많이 배출이 되고 있는 것을 알 수 있었고, 이는 기체와 마찬가지로 중수로의 특징인 냉각재와 감속재를 중수를 사용하고 있는데 따른 것으로 판단된다.

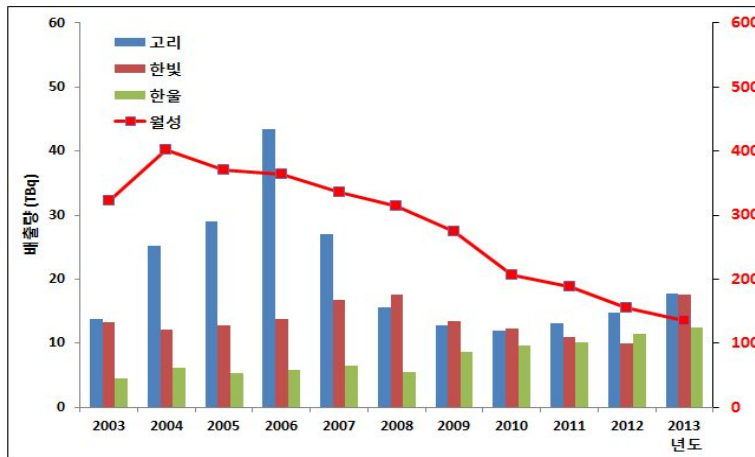
또한 참고로 중수로에서 삼중수소가 다량 배출되는 것을 해외 원전 중수로와 비교 평가해본 결과 [그림 2.72]에서 보는 바와 같이 기체 및 액체 호기당 평균을 보면 가장 많이 배출하고 있는 원전이 Point Lepreau로서 575 TBq을 배출하고 있는 반면 월성원전은 그보다 약 6배 적은 97 TBq를 배출하고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 상대적으로 삼중수소 배출관리가 잘 되고 있음을 알 수 있었으나, 월성 2호기 및 3호기, 4호기를 참조모델로 건설한 중국 Qinshan 원전의 경우 TRF를 운영하지 않음에도 월성원전 TRF 운영하는 것보다 약 2배 정도 적게 배출되는 것을 알 수 있었다. 이는 Qinshan 원전의 삼중수소 관리에 대한 자료 조사와 적용을 통해 월성원전의 삼중수소 저감에 벤치마킹할 필요가 있을 것으로 판단된다.

[표 2.22] 국내 원전 기체 및 액체 삼중수소 배출량 비교

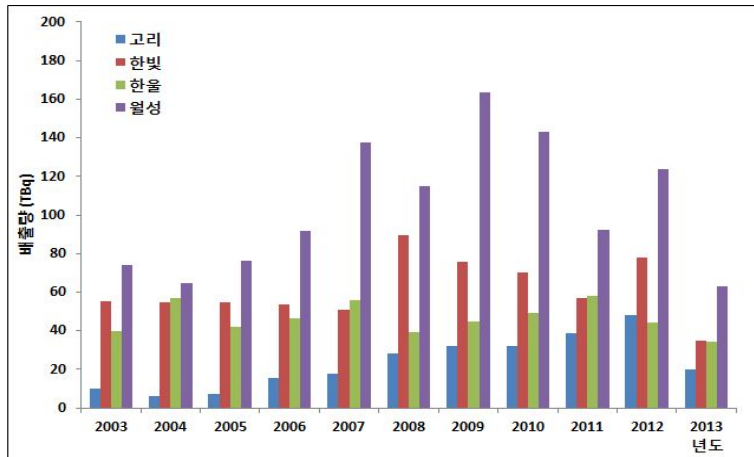
[단위 : TBq]

	고리		한빛		한울		월성	
	기체	액체	기체	액체	기체	액체	기체	액체
평균 ^{a)}	5.10	5.81	2.28	10.22	1.31	7.74	69.72	26.02
범위 ^{a)}	1.32 ~22.9	0.313 ~22.0	0.0845 ~9.31	3.23 ~22.4	1.87E-7 ~3.46	1.83E-7 ~17.8	14.9 ~218	2.09 ~75.3
총배출량 ^{a)}	224.24	255.71	150.73	674.42	86.41	510.63	3067.5	1,145.16

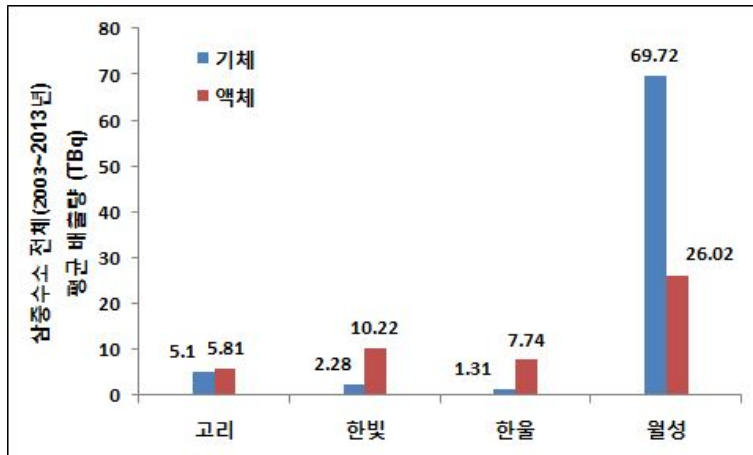
a) 2003년부터 2013년까지 각 원전별 평균, 범위, 총배출량을 표기함



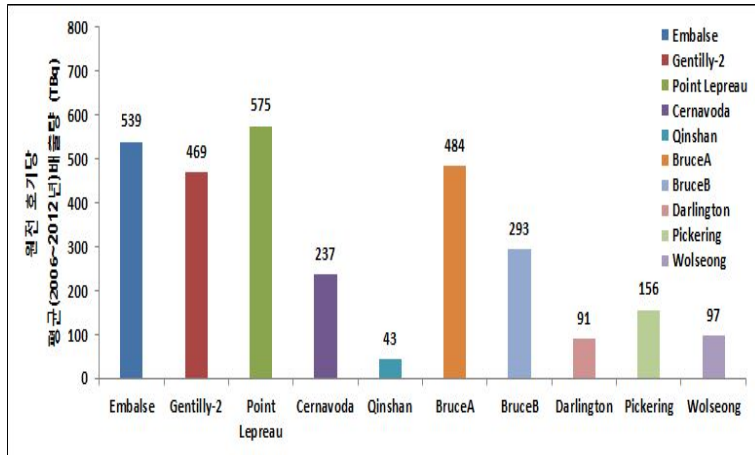
[그림 2.69] 국내 원전 삼중수소 년도별 기체 배출량 추이 비교



[그림 2.70] 국내 원전 삼중수소 연도별 액체 배출량 추이 비교



[그림 2.71] 원전별 삼중수소 전체(2003~2013년) 평균 배출량 비교



[그림 2.72] 중수로 원전 액·기체 삼중수소 호기당 평균(2006~2012년) 배출량 비교

나. 풍향 빈도 및 환경매체 지점 평가

풍향 빈도의 경우 고리원전은 대체적으로 N~NW와 W~SW 방향, 한빛원전은 NNW~ENE와 두드러진 SSW 방향, 한울원전은 W 방향, 월성원전은 WNW~NW, NNW 방향으로 빈도가 다소 높은 경향을 나타냈다.

본 연구에서 풍향빈도를 나타낸 것은 원전내에 위치한 풍향계를 이용한 결과로서 원전으로부터 원거리의 풍향빈도는 약간의 차이는 있을 것으로 판단된다.

그러나 원전에서 배출되는 삼중수소의 근거리 분석 지점은 선원향을 제외한 환경에서의 가장 근거리 분석지점으로서 가장 정확한 측정 분석이 이루어져야 할 것으로 판단되며 시료채취 지점 선정시 각 원전 부지 특성에 맞는 풍향 빈도를 고려하여 선정하여야 하며, 주기적인 검토를 통해 개선해 나가야 할 것으로 판단된다.

다. 환경매체 중 방사능농도 평가

환경매체 중 삼중수소 농도를 평가해본 결과 경수로와 중수로 모두 원전에서 근거리 에 위치한 지점에서 삼중수소가 검출되고 있음을 확인하였고 원거리 지점은 경수로는 극히 낮은 수준을 나타냈지만 중수로는 경수로 근거리 지점보다 더 높은 농도를 나타내는 환경매체도 있었다. 또한 중수로는 모든 환경매체에서 삼중수소가 검출되고 있는

것을 알 수 있었고 원전으로부터 거리가 가까울수록 기준치 미만이긴 하지만 확연히 높은 수준을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

제5절 환경매체 중 방사능농도 측정에 의한 선량평가 방법

1. 선량평가 결정집단

기체 및 액체 방사성 폐기물은 배출과 동시에 환경매체를 통한 이동경로를 통해 인체에 방사선 영향을 미치게 된다. 방사성물질은 [그림 2.73]에서 보는 바와 같이 복잡한 이동 경로를 거쳐 인체에 도달하기 때문에 원전으로부터 배출된 방사능 양이 같더라도 개인별 생활습관, 행동양식 등 많은 요소에 따라 선량은 다르게 나타난다. 이러한 모든 특성을 고려하여 개인별 선량을 평가하는 것은 불가능하므로 주변 주민을 대표하는 가상적 개인(Critical group)을 설정하여 선량을 평가하는 것이 일반적 접근법이다.

일반인의 피폭 관리와 결정집단의 상관관계는 다양한 성별, 연령별, 주거 위치별로 다양한 일반인의 피폭 상황을 모두 평가 할 수 없기 때문에 피폭원으로부터 가장 많이 피폭을 받을 것으로 예상되는 결정집단의 피폭을 선량한도 이하로 유지하고 최적화 한다면 피폭원으로부터 일반인이 받는 피폭은 최적화 되었다고 판단 할 수 있다.

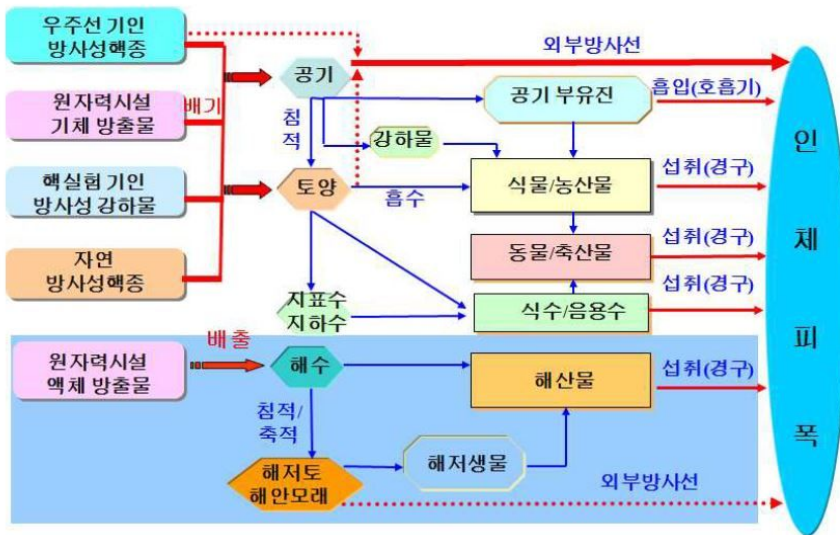
일반적으로 생활특성, 원전 입지환경 특성 등을 고려하여 가상적 개인을 설정하는데 국가별로 가상적 개인의 개념은 조금씩 상이하며 대표개인, 결정집단, 최대개인, 평균개인 등으로 표현된다. 우리나라에서는 상대적으로 보수적인 개념인 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission) 규제지침을 준용하여 규제기관 및 사업자가 적용하고 있다. 참고로 주요 국가에서 적용중인 가상적 개인의 개념을 [표 2.23]에 정리하였다[15][35].

국내에서 주민선량평가를 위해 적용하고 있는 최대개인의 개념은 음식물 섭취량, 활동시간 등이 실제 거주 여부와 상관없이 부지 제한구역 경계에서 365일 거주한

다고 가정하며, 경로별로 최대오염이 발생할 가능성이 있는 지점에서 생산된 식품물을 섭취한다고 가정한다.

선량평가 지점을 거주성과 관계없이 부지 제한구역으로 정한 것은 일반인이 자유롭게 접근 가능한 원전으로부터의 최단거리를 고려하기 위해서이며, 이는 상상할 수 있는 최대 피폭지점에서 선량이 기준치를 만족하면 원거리에 있는 모든 다른 지점에서 저절로 기준치를 만족하게 된다는 방사선 방호원칙에 입각한 것이다.

따라서 본 연구에서도 각 원전별 삼중수소에 대한 환경매체 환경방사능분석 지점을 최대피폭 지점으로 가정하고, 분석된 그 지점에서 거주하는 주민을 최대개인의 관점으로 보고 선량평가를 수행하였다. 즉, 환경매체 시료채취 및 분석지점이 곧 최대개인이 거주하고 호흡 및 섭취를 한다고 가정하고 평가를 수행하였다.



[그림 2.73] 방사성물질의 인체피폭 주요경로

[표 2.23] 주요 국가별 선량평가 대상 개인 설정 현황

국가	규제지침 및 원전 적용현황
국내	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최대개인 : 미국의 개념 적용 - 부지 제한구역경계(EAB)에 거주하면서 그 지역에서 생산된 음식을 섭취하는 최대개인
미국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최대개인 : 음식물 섭취량 등이 평균적인 사람과 합리적인 편차를 가지는 개인 - 외부피폭, 호흡 : 부지 경계 또는 최인근 거주 최대개인 - 섭취 : 최인근 거주지 또는 최인근 생산지에서 생산된 식품을 섭취하는 최대개인
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> ○ 결정집단 : 지역, 습관, 식단 등 때문에 피폭인구의 다른 집단이 받는 평균 선량보다 많은 선량을 받는 동종의 인구집단 - 각 피폭경로별로 최대의 피폭이 예상되는 지점을 선정하여 그 지점의 구성원 - OPG에서는 5개 내·외의 발전소 주변의 집단 취락지 및 주요 음식물 생산지
유럽	<ul style="list-style-type: none"> ○ 결정집단 : 원자력시설 운영으로 인해 최대로 피폭될 수 있는 대중 구성원 - 주된 피폭경로나 습성 측면에서 결정집단을 정의(아래 예시 참조) <ul style="list-style-type: none"> · 부지 주변의 야외에서 작업하는 농부 · 해변에서 개를 산책하는 사람 등 발전소별로 부지 특성에 따라 다양하게 활동
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 별도의 법적 요건 없으며 유럽연합의 결정집단 개념 적용 - CEA : 기체, 액체 등 각 유형별로 최대피폭을 받는 집단 취락지를 결정집단으로 선정 - EDF : 대기확산인자가 최대인 경작지와 거주지 주민
	<ul style="list-style-type: none"> ○ ICRP의 결정집단 준용하여 가장 많은 피폭이 이루어지는 지점의 주민 구성원으로 적용 - 적용 가능한 현실적인 습관에 바탕을 두고 개별주민들의 극단적인 방법들과 소비습성은 무시
일본	<ul style="list-style-type: none"> ○ 표준개인 - 외부 및 호흡선량 : 최대 피폭을 받는 지점에 거주하는 개인 - 섭취 : 현실에 존재하는 피폭경로에 대해 집단취락지에서 생활, 식습관이 표준적인(평균적인) 사람
IAEA	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대표개인 : 결정집단의 평균적인 구성원과 동등한 개념 - 결정집단 : 가장 많은 피폭을 받는 인구집단 - 음식물 섭취량 등 습관자료는 인구집단의 한 개인의 극단적 특성치가 아닌 소수의 개인들을 대표하는 소규모 인구집단에 대한 평균적인 특성자료 적용

<출처> “원전주변주민과 갑상선암 발생에 관한 과학적 분석”, 한국원자력학회, 대한방사선방어학회

2. 선량평가 기본식

원전 주변 환경매체 중 삼중수소 방사능분석 결과로부터 선량평가에 사용되는 일반적인 계산식은 다음과 같다.

$$\text{(호흡)} D_{\text{tritium}}^{\text{inh}} = \sum C_{\text{tritium}} \times M \times DF_{\text{tritium}}^{\text{inh}}$$

$D_{\text{tritium}}^{\text{inh}}$: 삼중수소의 호흡에 의한 유효선량(mSv/yr)

C_{tritium} : 삼중수소의 공기중 농도(Bq/m³)

M : 호흡량(성인)

$DF_{\text{tritium}}^{\text{inh}}$: 삼중수소의 호흡선량환산계수(성인)

$$\text{(섭취)} D_{\text{tritium}}^{\text{ing}} = \sum_{p=1}^n C_{\text{tritium},p} \times DF_{\text{tritium}}^{\text{ing}} \times U_p$$

$D_{\text{tritium}}^{\text{ing}}$: 삼중수소 함유 음용수, 음식물 섭취에 따르는 유효선량(mSv/yr)

$C_{\text{tritium},p}$: 음용수, 음식물 p중 삼중수소의 농도

$DF_{\text{tritium}}^{\text{ing}}$: 삼중수소의 섭취선량환산계수(성인)

U_p : 음용수, 음식물 p의 섭취량(성인)

그러나 본 연구에서는 호흡에 의한 유효선량 평가는 일반식을 적용하였으나, 최대개인을 대상으로 피폭대상에 따른 경로별 인자(지역생산분을 등) 등을 고려하여 선량평가를 수행하는 것은 다음과 같은 계산식을 사용하였다. 각 피폭경로별 선량을 평가하는 방법은 다음과 같다.

삼중수소의 HTO에 대한 선량계산

$$D_{\text{HTO-apj}} = U_{ap} \cdot DF_{\text{HTO-aj}}^{\text{ing}} \cdot F_p [R_T \cdot C_{T\text{-air}} \cdot \frac{F_{p-H}}{H}]$$

- $D_{HTO-apj}$: HTO에 의한 유효선량(Sv/yr)
- U_{ap} : 식품군별, 연령군별 음식물 섭취량(kg/yr)
- F_p : 식품의 오염분율
- DF_{HTO-aj}^{ing} : HTO에 의한 섭취선량환산계수
- R_T : 대기 수분의 ^3H 농도와 식물체 수분의 ^3H 농도의 비
- C_{T-air} : 대기 중 ^3H 농도(Bq/m³)
- F_{p-H} : 식품의 수분 분율
- H : 절대습도(kg/m³)

여기서 F_p 식품의 오염분율은 지역에서 생산된 것은 모두 100% 오염되었다고 가정을 하였으며, R_T 대기 수분의 ^3H 농도와 식물체 수분의 ^3H 농도의 비는 미국 NRC 기본값인 0.5를 적용하였다. 그리고 F_{p-H} 식품의 수분 분율은 아래 [표 2.29]의 ‘원자력발전소 주변 주민피폭선량 계산지침서’를 참조하였다. H 절대습도(kg/m³)는 성장기간 평균값인 0.012 kg-moisture/kg-air를 적용하여 평가하였다.

삼중수소의 OBT에 대한 선량계산

$$D_{OBT-apj} = U_{ap} \cdot DF_{OBT-aj}^{ing} \cdot F_p [9R_T \cdot C_{T-air} \sum (F_{org} \cdot F_{org-H})] / H$$

- $D_{OBT-apj}$: OBT에 의한 유효선량(Sv/yr)
- DF_{OBT-aj}^{ing} : OBT에 의한 섭취선량환산계수
- F_{org} : 식품의 유기물 분율
- F_{org-H} : 유기물 중 수소분율

삼중수소의 OBT에 대한 선량계산에서의 F_{org} 식품의 유기물 분율과 F_{org-H} 유기물 중 수소분율은 [표 2.24]의 ‘원자력발전소 주변 주민피폭선량 계산지침서’를 참조하였다.

[표 2.24] 유기물 중 수소분율 및 유기물 비율

단백질	지방	탄수화물	
0.07	0.12	0.062	유기물 중 수소분율
0.067	0.004	0.804	농작물(곡식) 중 유기물 비율
0.003	0.006	0.15	농작물(과일) 중 유기물 비율
0.013	0.002	0.025	농작물(김장채소) 중 유기물 비율
0.013	0.002	0.025	농작물(기타채소) 중 유기물 비율
0.035	0.001	0.22	목초 중 유기물 비율

방사선량은 인체 전체에 대한 유효선량과 각 장기별 등가선량으로 구분하여 평가한다. 동일한 방사성물질이라 하더라도 유효선량과 장기 등가선량은 피폭경로, 핵종, 연령군에 따라 다르게 계산된다. 특히 연령이 어릴수록 방사능에 대한 민감도가 크고, 신진대사가 성인에 비해 빠르기 때문에 폐나 위로 유입된 방사성물질이 인체에 빠르게 흡수되므로 높은 선량을 받게 된다. 따라서 신진대사의 정도에 따라 연령군을 일정한 범주로 나누어 선량을 평가하게 된다. 연령군은 국제방사선 방호위원회(ICRP)에서는 6개 연령군, 미국 NRC에서는 4개 연령군을 적용할 것을 권고하고 있는데 우리나라에서는 ICRP-60 권고에 따라 3개월(신생아~1세 미만), 1세(1세~2세 미만), 5세(2세~7세 미만), 10세(7세~12세 미만), 15세(12세~17세 미만), 성인(17세 이상)으로 6개 연령군으로 구분하여 평가하고 있다[38],[39].

3. 선량평가 주요 입력변수

가. 평가대상 지점선정

평가대상 지점선정은 외부피폭 및 호흡은 부지 제한구역경계, 음식물 섭취는 최대 오염 가능성이 있는 경작지를 선정하여 평가를 수행하여야 한다. 본 연구에서는 환경매체의 방사능농도 평가결과를 바탕으로 평가대상 지점 선정은 현재 수행하고 있는 환경매체 분석지점이 경로별 최대 피폭이 발생할 가능성이 있는 지점이라고 가정하였다. [표 2.25]는 주요 국가별 평가대상 지점 설정을 나타내었다.

[표 2.25] 주요 국가별 평가대상 지점 설정 현황

국가	규제지침 및 원전 적용현황	
국내	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경로별 최대 피폭이 발생할 가능성이 있는 지점(해양은 제외) - 외부피폭, 호흡 : 부지 제한구역경계 - 음식물 섭취 : 최대오염 가능성 있는 경작지 	
미국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 피폭 경로에 따라 부지경계, 최인근 거주지 또는 생산지에서 평가 ○ 현재 또는 가까운 장래에 사람이 거주하기 어려운 지점(해양 등)은 제외 	
캐나다	○ 여러 결정집단 중 최대의 피폭이 나타나는 지점	
유럽	영국	○ 각 피폭경로 중 환경감시 농도가 최대가 되는 지점
	프랑스	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원자력시설별로 상이 - 대부분 결정집단의 위치를 피폭평가지점으로 결정 - EDF : 대기확산인자가 최대가 되는 경작지 및 거주지 각각 1곳씩 선정 - 마르쿨 : 풍하방향에서 부지에서 가장 인접한 마을 - CEA : 지표면 침적이 최대인 가상 집단이 위치한 지점
	독일	○ 최대피폭지점이라고 정의되어 있으나, 토지나 물이용 측면에서 현재 또는 원전 수명동안 거주 가능성이 없는 지역은 제외
일본	<ul style="list-style-type: none"> ○ 각 피폭경로에 대해 선량이 최대가 되는 지점 ○ 사람이 거주할 수 없는 지역은 제외 	

〈출처〉 국내 원자력발전소 정상운전시 주변주민 방사선량 평가 교육 자료, 2015, 한수원 중앙연구원

나. 환경매체의 사용인자

환경매체의 사용인자는 오염된 환경매체에 피폭자가 노출되거나 흡입, 섭취하는 양을 의미한다. 피폭 경로별 사용인자는 먼저 기체상 배출물에 대해서는 외부피폭은 노출시간을 1년 365일 오염된 환경매체에 노출된다고 가정하고, 호흡에 의한 내부피폭은 연령군별 호흡량, 섭취에 의한 내부피폭은 연령군별 농산물, 축산물 최대 섭취량을 말한다. 액체상 배출물에 대해서는 외부피폭은 노출시간이며 연령군별 해변활동, 수영, 어업활동시간이다. 섭취에 의한 내부피폭은 연령군별 수산물 섭취량이다. [표 2.26]에 주요 국가별 음식물 섭취량 적용 기준을 나타내었다.

본 연구에서는 [표 2.27]에서 보는 바와 같이 최대개인의 호흡 및 섭취자료를 사용하여 유효선량을 평가하였으며, 명시되어 있지 않은 음용수는 ICRP-23 'Report

of the Task Group on Reference Man'에 근거를 둔 국내 원자력안전법 고시 제 2014-34호의 '방사선방호 등에 관한 기준, [별표 3 및 별표 4 주석] '연간섭취한도, 유도공기중농도 및 배출관리기준의 적용시 유의사항 등' 7번 다 항목의 물 섭취율 0.73 m³/yr(730 L/yr)을 적용하여 평가하였다.

[표 2.26] 주요 국가별 음식물 섭취량 적용 기준 현황

국가	규제지침 및 원전 적용현황	
국내	<ul style="list-style-type: none"> ○ 평가지점에 365일 거주하며, 그 지역 경작지에서 생산된 음식물만을 최대로 섭취한다고 가정 ○ 섭취량 : 2007년도 국민건강영양조사 자료 이용 95백분위 최대섭취량 결정 	
미국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 평가지점에 365일 거주하며, 최인근 마을, 지역 경작지에서 생산된 음식물만을 최대로 섭취 ○ 섭취량 : 1970년대 농무성, 중서부 지역 초등학교 조사자료, Hanford 부근의 조사자료 등을 이용하여 평균섭취량과 최대섭취량의 비율을 추정하여 최대섭취량 결정 	
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> ○ 캐나다 보건부 조사자료(1972년 이후)의 90백분위수 최대섭취량 적용 	
유럽	영국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 육상식품 : 1990년대 후반 전국 대상 조사자료를 이용하여 음식물 별로 97.5백분위를 최대 섭취량으로 이용(TOP 2 rule : 상위 2개 피폭경로는 최대섭취량, 나머지는 평균섭취량 적용) ○ 해양식품 : 원자력시설 주변의 현장조사 자료(FSA, 식품표준청 조사자료 이용, TOP 2 rule) ○ 그 지역에서 주로 생산되는 음식물만을 고려(타 지역에서 유입되는 식품은 고려하지 않음)
	프랑스	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모든 식품을 그 지역에서 생산된 것을 먹는다고 가정 단, 식품이 그 지역에서 생산되지 않는 것을 명확하면 제외할 수 있음(현장조사 자료 사용 권장) ○ 원자력시설마다 상이함(예, La Hague : 그 지역에서 평균적인 식품 소비 및 식습관을 가진 사람을 가정)
	독일	<ul style="list-style-type: none"> ○ 평가 영역 내 음식물은 그 지역 내 최대 오염된 지역에서 모두 생산된 것으로 가정(거주지 및 생산지 불문) ○ 최대섭취량은 전국 조사자료를 이용하며 95백분위수를 이용
일본	<ul style="list-style-type: none"> ○ 업체류, 우유 및 해산물만 고려하며, 평균섭취량을 적용 ○ 1970년대 전국 대상 조사자료 이용(원자력시설에서 별도의 조사없이 정부가 제시한 자료 활용) 	

<출처> 국내 원자력발전소 정상운전시 주변주민 방사선량 평가 교육 자료, 2015, 한수원 중앙연구원

[표 2.27] 최대개인의 호흡 및 섭취자료(기체상 방사성유출물)

구분	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
곡식(kg/yr)	28.80	84.69	105.78	132.50	159.98	160.26
김치(kg/yr)	0.51	9.83	27.16	48.14	62.34	89.88
엽채류(kg/yr)	11.46	39.92	68.22	98.04	121.69	161.80
과일(kg/yr)	37.49	76.95	81.29	93.91	62.31	97.02
우유(L/yr)	241.48	219.55	184.40	166.48	151.33	73.18
소고기(kg/yr)	2.45	6.88	7.77	13.51	12.67	15.73
돼지고기(kg/yr)	2.19	3.71	13.29	25.29	40.41	28.84
닭고기(kg/yr)	6.35	12.78	21.17	28.43	38.03	26.62
호흡량(m ³ /yr)	1,400	2,500	6,700	7,300	7,900	7,400

<출처> 원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서

다. 사용인자의 지역생산분율

지역생산분율은 주민이 섭취하는 음식물 중 지역생산비율을 의미하며 지역생산 농·수산물은 보수적으로 모두 오염되었다고 가정한다. 주민이 직접 재배하지 않더라도 거주 주변 지역에서 생산된 것을 소비하는 경우는 모두 오염된 음식물 소비로 가정한다.

농산물은 과일을 제외하고 모두 지역 생산물을 소비한다고 가정한다. 과일은 수입하는 것(열대 과일 등)이 약 30% 정도 소비되는 비율을 고려하여 70%가 지역에서 생산된다고 가정한다. 축산물은 대부분의 육류와 우유가 유통식품을 섭취하기 때문에 지역에서 생산된 음식물을 소비할 가능성은 크지 않다. 그러나 보수적인 선량평가를 위해 지역생산분율을 50%로 적용하고 있다. 수산물은 원전이 해안지역에 위치하고 있는 점을 감안하여 모두 지역 생산물로 가정한다[41].

음용수에 대해서는 대부분 지자체에서 공급하는 상하수도 사용이 증가하고 있지만 보수적인 관점에서 대부분의 지역주민이 거주하고 있는 지역에서 나오는 음용수(지하수, 식수)를 100% 사용한다고 가정하였다. 또한 호흡에 대해서는 보통 근

로지가 원거리인 도심에 있고 거주는 주변지역에서 하는 경향이 두드러지지만 이 또한 보수적인 관점에서 주변지역에서 100% 생활하며 호흡한다고 가정하였다. 그리고 환경매체 중 삼중수소의 TFWT와 OBT 선량평가를 위해 농작물에 대한 수분의 비율을 고려하여 평가하였으며 [표 2.29]에 나타내었다.

[표 2.28] 섭취량 중 지역 자급 생산 비율

구분	곡식	김장채소	엽채류	과일	우유	육류 ^{a)}
비율	1	1	1	0.7	0.5	0.5

<출처> 원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서

^{a)} 육류는 소고기, 돼지고기, 닭고기 등이 해당

[표 2.29] 농작물 중 수분의 비율^{a)}

구분	곡식	과일	김장채소	엽채류	목초
비율	0.12	0.84	0.951	0.951	0.727

<출처> 원자력발전소 주변 주민피폭선량 계산지침서

^{a)} 닭, 우유에 대한 수분의 비율은 각각 0.727, 0.885로 가정(중수로에서의 TRF 가동영향 평가 기술개발 최종보고서, 2003)

라. 선량환산계수

선량환산계수는 단위 방사성물질의 흡입, 섭취 또는 노출에 의하여 각 연령군을 대표하는 가상개인이 받는 유효 및 장기등가선량을 적절한 단위로 정량화한 것이다. 공기, 지표면, 해변, 해수 등으로부터의 외부피폭 선량환산계수는 연령군에 따른 피폭량의 크기가 차이가 크지 않기 때문에 모든 연령군에 동일하게 적용한다.

그러나 호흡 및 섭취에 의한 내부피폭 선량환산계수는 인체 신진대사의 차이를 반영하기 위해 6개의 피폭 연령군별로 세분하여 적용하는데 피폭자가 70세가 될 때까지의 방사선 영향을 누적하여 선량을 평가한다. 예를 들면 성인의 경우는 20세를 기준으로 피폭 이후 50년간 누적되는 선량, 5세 연령군의 경우는 65년간의 누적 선량을 계산하게 된다[40].

[표 2.30] 삼중수소의 연령군별 호흡 및 섭취선량환산인자(유효선량)

[단위 : mSv/Bq]

구분		3개월	1세	5세	10세	15세	성인
섭취	Particulates	6.4E-8	4.8E-8	3.1E-8	2.3E-8	1.8E-8	1.8E-8
	Tritiated Water	6.4E-8	4.8E-8	3.1E-8	2.3E-8	1.8E-8	1.8E-8
	OBT	1.2E-7	1.2E-7	7.3E-8	5.7E-8	4.2E-8	4.2E-8
호흡	Particulate F	2.6E-8	2.0E-8	1.1E-8	8.2E-9	5.9E-9	6.2E-9
	Particulate M	3.4E-7	2.7E-7	1.4E-7	8.2E-8	5.3E-8	4.5E-8
	Particulate S	1.2E-6	1.0E-6	6.3E-7	3.8E-7	2.8E-7	2.6E-7
	Tritiated Water Vapour	6.4E-8	4.8E-8	3.1E-8	2.3E-8	1.8E-8	1.8E-8
	OBT	1.1E-7	1.1E-7	7.0E-8	5.5E-8	4.1E-8	4.1E-8
	Tritium Gas	6.4E-12	4.8E-12	3.1E-12	2.3E-12	1.8E-12	1.8E-12
	Tritiated Methane	6.4E-10	4.8E-10	3.1E-10	2.3E-10	1.8E-10	1.8E-10

<출처> 원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서

제6절 노 시료 선량평가 방법 및 염색체 분석 방법

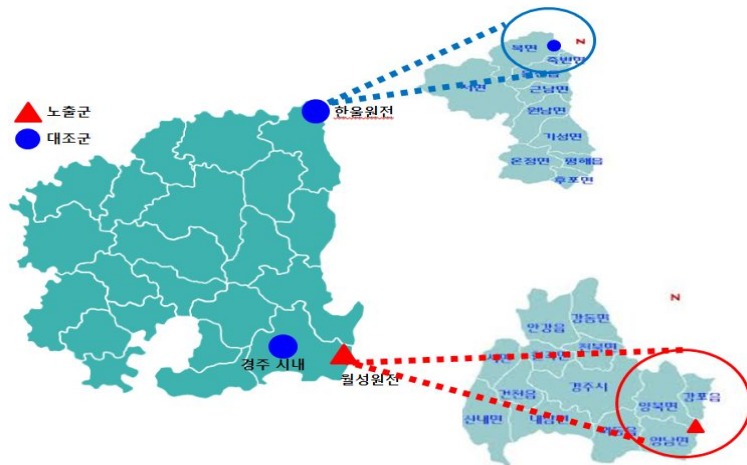
중수로 원전인 월성원전은 경수로 원전인 고리, 한빛, 한울원전 주변지역에 비해 삼중수소가 환경매체에서 많이 검출되고 있는 것이 사실이다. 이러한 월성원전 주변지역을 대상으로 환경매체에서 검출되고 있는 삼중수소가 인체 존재 가능성에 주목하여 인체 노 시료를 대상으로 삼중수소 방사능농도를 평가해 보았다. 그리고 방사능농도 평가를 수행한 결과를 바탕으로 선량평가를 수행하여 어느 정도 수준인가를 파악하고 향후 관리대책에 대해 모색해보고자 하였다. 또한 삼중수소가 인체에 미량 존재하는 것과 연계하여 인체 영향에 대한 우려가 대두되어 추가적으로 염색체 이상여부 조사 평가를 수행하였다.

1. 표본선정

삼중수소에 대한 뇨 시료 및 염색체 분석을 위한 표본 대상자는 월성원전 주변군 및 대조군1, 대조군2로 지역을 선정하였다. 먼저 주변군은 월성원전 인접 지역인 양남면, 양북면, 감포읍 지역이며, 대조군1은 경주 시내 지역과 대조군2는 중수로와 경수로의 차이를 평가하기 위해 생활환경과 음식문화가 비슷한 동해안권의 한울원전 주변지역인 북면과 죽변면으로 선정하였다.

표본 대상자는 뇨 시료에 대한 삼중수소 방사능분석을 위해서는 삼중수소 노출기간을 고려하여 40~59세 사이로 주변군 250명, 대조군1 125명, 대조군2 125명으로 총 500명을 선정하였다.

인체 염색체 분석을 위한 혈액시료는 총 50명으로서 주변군 36명, 대조군1 14명을 선정하였고, 평생 100개비 이상 흡연자, 암발생 과거력자, CT 촬영 시행자는 제외하였다. 대조군2를 제외한 이유는 중수로 원전인 월성원전으로 인한 삼중수소가 환경매체에 두드러지게 확인이 되므로 이를 반영하여 월성원전 주변지역만 시행하였다.



[그림 2.74] 월성원전 주변군 및 대조군 지역선정

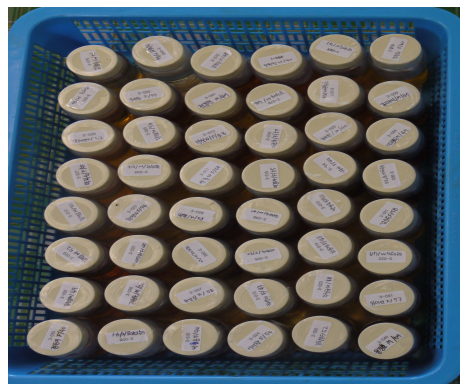
[표 2.31] 연구 대상자의 지역별, 성별, 연령별 인구 할당

나이 (세)	월성원전주변군 (감포읍, 양북면, 양남면)			대조군					
				울진군 (북면, 죽변면)			경주 시내		
	남	여	합계	남	여	합계	남	여	합계
40~49	42	50	92	21	25	46	21	25	46
50~59	67	91	158	33	46	79	34	45	79
합계	109	141	250	54	71	125	55	70	125

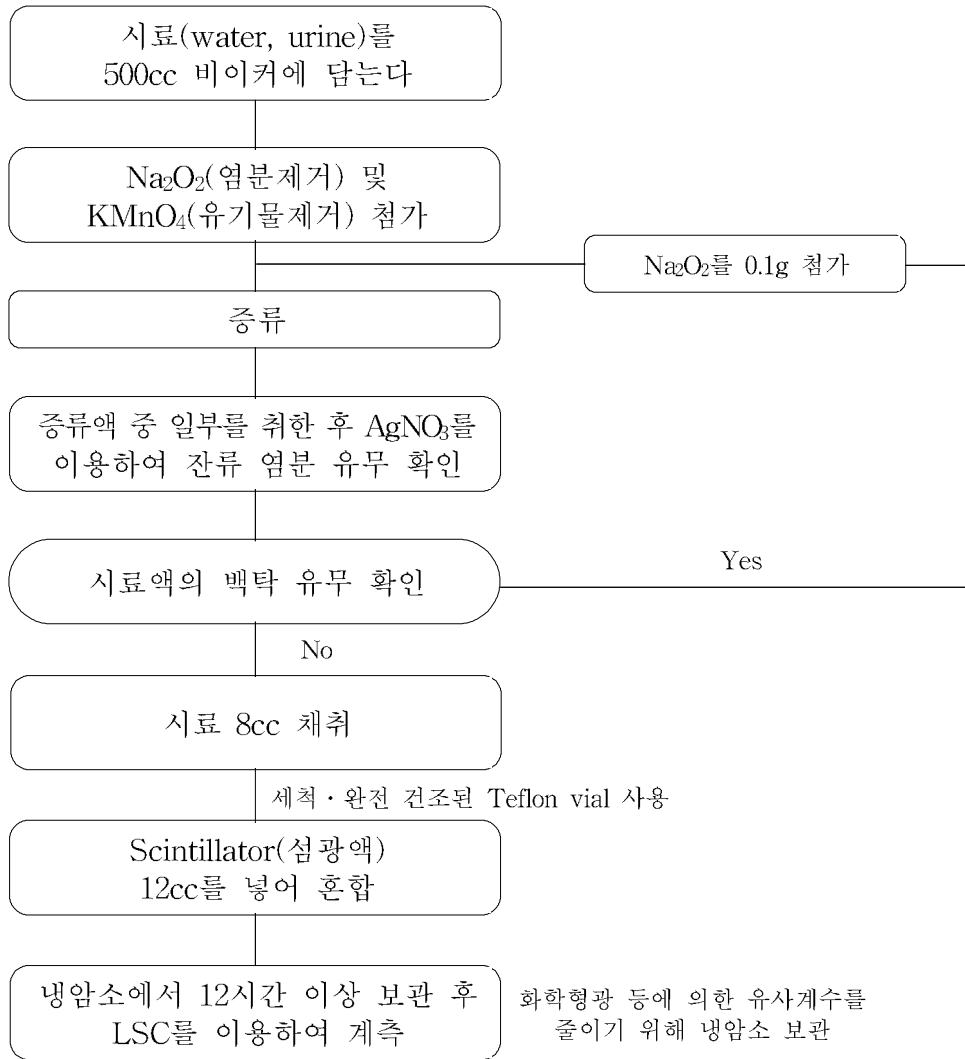
2. 뇨 시료 삼중수소 방사능농도 분석

가. 뇨 시료 삼중수소 분석 방법

삼중수소 방사능농도를 분석하기 위해 액체섬광계수기(Quantulus 1220)를 이용하였고, 뇨 시료 중 물리·화학적 불순물을 제거하기 위하여 Na_2O_2 , KMnO_4 를 이용한 전처리를 수행하였다. 또한 분석에 따른 계측효율 보정을 위해 소광 보정용 표준선원을 사용하여 효율곡선을 작성하였다. 분석은 조제된 시료와 백그라운드용 시료를 액체섬광계수기에서 24시간 안정화 시킨 후 30분씩 10회 반복하여 분석하고 통계적 기법으로 방사능농도를 계산하였다[10][11].



[그림 2.75] 전처리 장비 및 채취한 주민 뇨 시료



[그림 2.76] 삼중수소 분석 절차도

분석된 뇨 시료는 다음과 같은 통계적 방법에 의해 자료를 처리하였다. 먼저 분석한 시료에 대해서는 t_s 분씩 측정하여 H channel에서의 측정치 n_{si} (cpm)을 J_s 번씩 구한다.

따라서 평균 측정치는 $\bar{n}_s = \frac{1}{J_s} \sum_i n_{si}$, 평균 표준편차는 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n m_i^2}{n-1}}$ 이 된다. 측정치가 $n_{si} > n_s + 1.64(\text{자유도}) \times \bar{\sigma}_s$ 또는 $n_{si} < n_s - 1.64(\text{자유도}) \times \bar{\sigma}_s$ 조건이면

n_{si} 는 오차가 큰 측정치로 판단하여 이상치를 제거한다. 이상치를 제거한 나머지 측정치를 가지고 다시 $\overline{n_{si}}$ 를 구한다. 이때 분석시간은 이상치를 제거한 측정치의 총합으로 T_s 한다.

백그라운드 시료는 t_b 분씩 측정하여 H channel에서의 측정치 n_{bi} (cpm)을 J_b 번씩 구한다.

따라서 평균치는 $\overline{n_b} = \frac{1}{J_b} \sum_i n_{bi}$, 평균 표준편차는 $\sigma_s = \sqrt{\overline{n_b}}$ 이 된다. 측정치가 $n_{bi} > \overline{n_b} + 1.64(\text{자유도}) \times \overline{\sigma_b}$ 또는 $n_{bi} < \overline{n_b} - 1.64(\text{자유도}) \times \overline{\sigma_b}$ 조건이면 n_{bi} 는 오차가 큰 측정치로 판단하여 이상치를 제거한다. 이상치를 제거한 나머지 측정치를 가지고 다시 $\overline{n_{bi}}$ 를 구한다. 이때 분석시간은 이상치를 제거한 측정치의 총합으로 T_b 한다.

방사능 계산은 다음과 같은 식으로 구한다

순계수율(Net Count)와 표준편차

$$N_n \pm \sigma_n = (\overline{n_s} - \overline{n_b}) \pm \sqrt{\frac{\overline{n_s}}{T_s} + \frac{\overline{n_b}}{T_b}}$$

방사능농도

$$\frac{(N_n \pm \sigma_n)}{Eff(\%) \times 60} \times 100 \times \frac{1,000}{V(ml)} \quad (Bq/L)$$

MDA

$$n_{DL} = \frac{k}{2} \times \left[\frac{k}{T_s} + \left[\left(\frac{k}{T_s} \right)^2 + 4n_b \times \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_b} \right) \right]^{1/2} \right] , \quad k=\text{자유도}$$

나. 뇨 시료 삼중수소 방사능농도 평가

표본 대상자 총 500명을 대상으로 분석한 결과 [표 2.32]에서 보듯이 원자력안전위원회 고시 제2014-12호 ‘원자력이용시설주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영

향평가에 관한 규정'에서 제시한 최소검출가능방사능농도(MDA)인 5 Bq/L를 만족하지 못하는 4건과 분석값이 이상치(9,318 Bq/L)를 나타내는 1건은 심층 면접결과 원전 작업 출입자로 판정되어 총 5건을 제외한 495건을 평가하였다[14].

평가결과 [표 2.33]과 [그림 2.82]에서 보는 바와 같이 먼저 삼중수소 검출률은 주변군의 경우 양남 100%, 양북 96%, 감포 80%를 나타냈으며, 대조군1은 18%, 대조군2는 40%를 나타내었다.

삼중수소 방사능농도 분포는 [그림 2.77]에서 [그림 2.81]까지 보듯이 주변군의 경우 양남 3.0~28.8 Bq/L(평균 8.4 Bq/L), 양북 <1.9~21.6 Bq/L(평균 5.8 Bq/L), 감포 <1.5~21.7 Bq/L(평균 3.8 Bq/L)로 나타났으며, 대조군1은 <1.8~36.2 Bq/L(평균 3.2 Bq/L), 대조군2는 <2.1~120 Bq/L(평균 4.3 Bq/L)로 나타났다.

거리별 삼중수소 인체 노출 정도는 [그림 2.83]에서 보듯이 원전으로부터 거리가 가장 가까운 양남면이 가장 원거리인 경주에 비해 약 3배 정도 높게 검출되는 경향($R^2=0.9744$)을 나타냈다.

삼중수소 검출률과 방사능 농도를 종합 평가한 결과 월성원전으로부터 가장 인접한 지역인 주변군에서 대조군1보다 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 즉, 월성원전과 거리가 가까울수록 주민 인체에 삼중수소가 더 높게 존재하고 있음을 알 수 있었다.

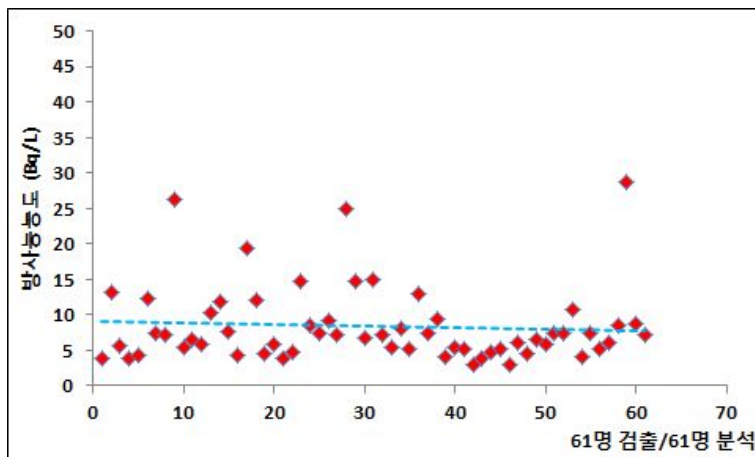
대조군2의 경우는 중수로와 경수로 원전 인근 지역의 삼중수소 검출률과 노출 정도를 확인하기 위한 것으로서 연구결과 중수로에 비해 검출률과 노출 정도가 다소 적었지만 경수로 원전 주변지역에서도 삼중수소가 검출되고 있음을 확인할 수 있었다.

[표 2.32] 뇨 중 삼중수소 방사능농도 분석 관련 이상 시료

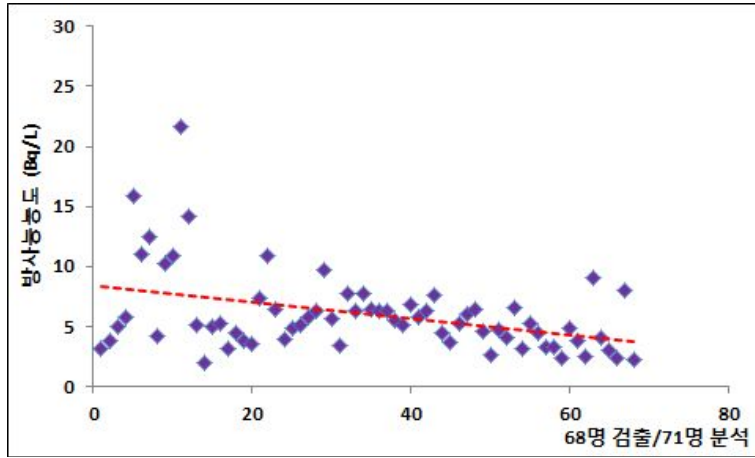
이상시료	계측값	재계측값	제외 사유
1-018	243 ± 1	<20.9 (10.2 ± 3.8)	검출 목표치 불만족
2-027	87.8 ± 0.9	<20.8 (22.2 ± 4.2)	
2-063	35.0 ± 0.7	<20.1 (18.8 ± 3.9)	
3-006	106 ± 1	<20.1 (26.2 ± 4.1)	
4-117	9,318 ± 8	8,440 ± 26	연구 배체기준 해당자

[표 2.33] 삼중수소 검출률 및 방사능농도

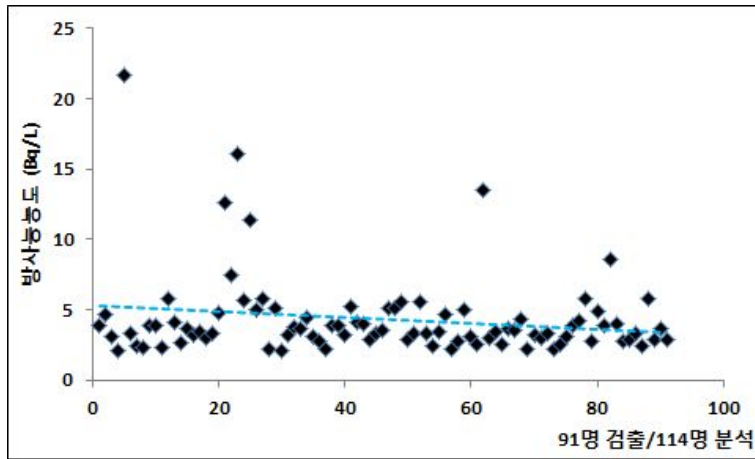
시료군		검출률(%)	방사능농도(Bq/L)		
			평균	최소	최대
주변군	양남면	100.0	8.4	3.0	28.8
	양북면	96.0	5.8	<1.9	21.6
	감포읍	80.0	3.8	<1.5	21.7
대조군 1 (경주시)		18.0	3.2	<1.8	36.2
대조군 2 (울진군)		40.0	4.3	<2.1	120



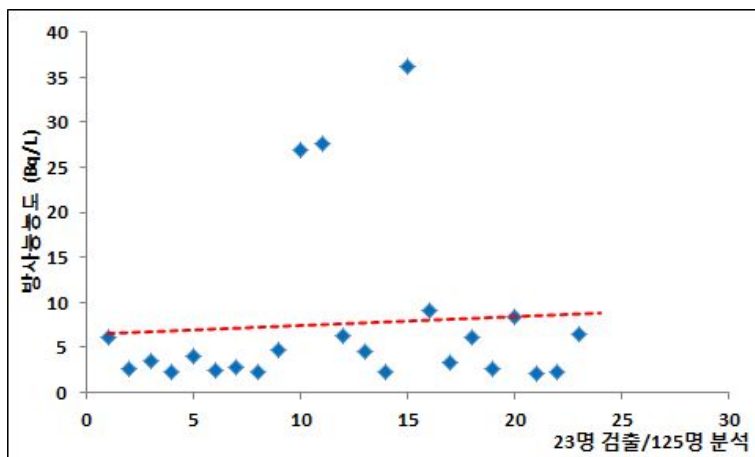
[그림 2.77] 주변군(양남면) 삼중수소 방사능농도 분포도



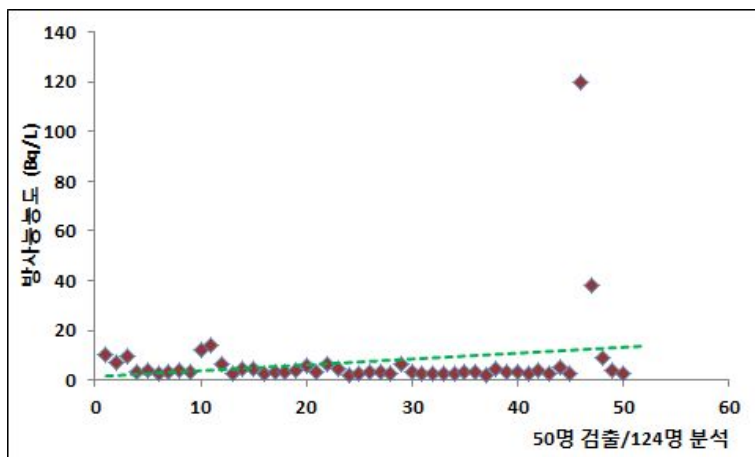
[그림 2.78] 주변군(양북면) 삼중수소 방사능농도 분포도



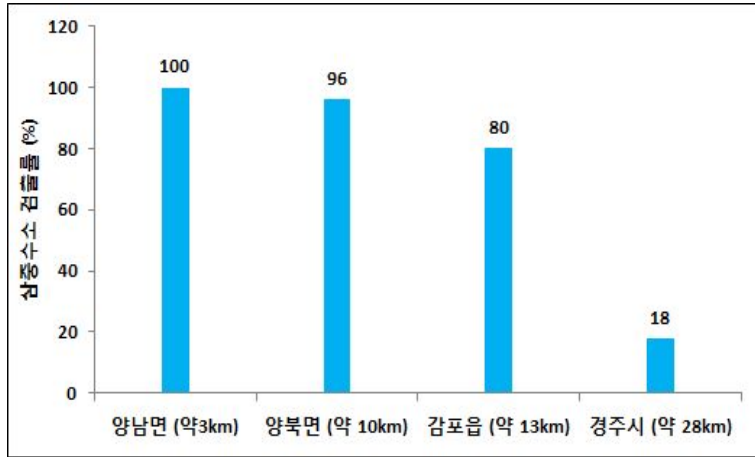
[그림 2.79] 주변군(감포읍) 삼중수소 방사능농도 분포도



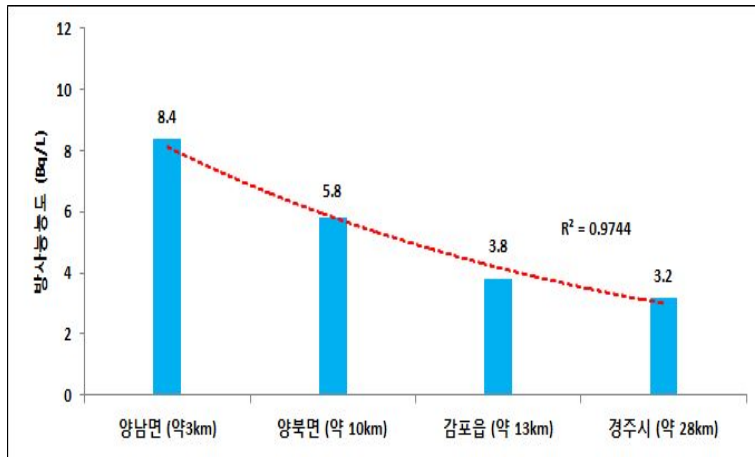
[그림 2.80] 대조군1(경주시) 삼중수소 방사능농도 분포도



[그림 2.81] 대조군2(울진군) 삼중수소 방사능농도 분포도



[그림 2.82] 원전으로부터 거리별 삼중수소 검출률

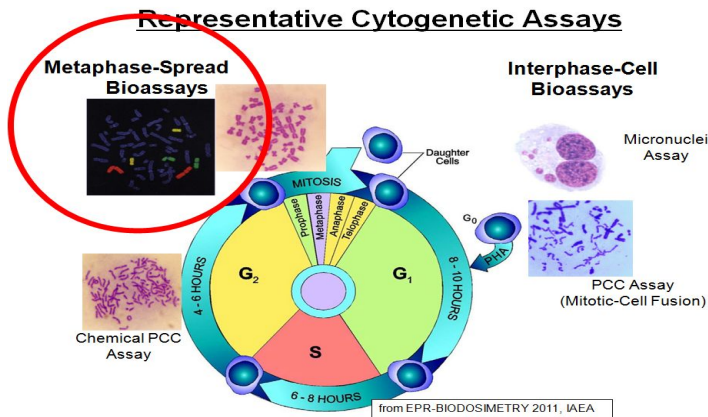


[그림 2.83] 원전으로부터 거리별 삼중수소 방사능농도 분포

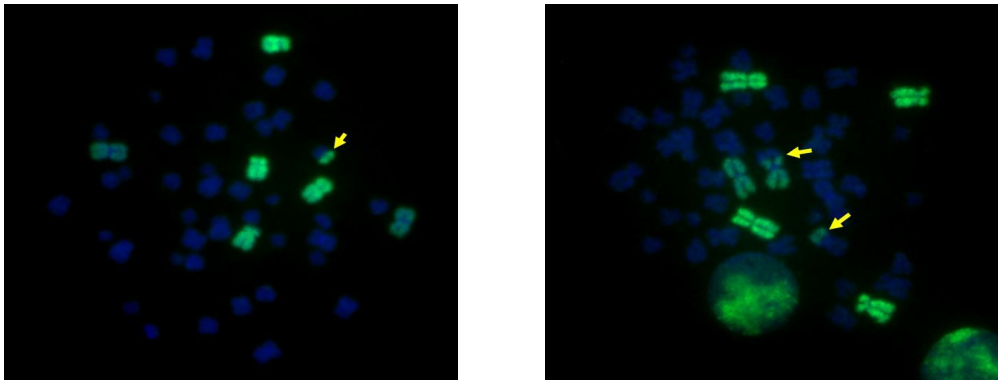
3. 염색체 분석 및 평가

가. 염색체 분석 방법

염색체 분석은 IAEA에서 제시한 안정형 염색체 분석을 위한 기술기준을 바탕으로 수행하였다[33]. 염색체 분석의 원리는 방사선 피폭시 발생하는 유전자 이상의 결과적인 산물인 염색체 이상을 관찰하는 것으로 말초혈액(T 림프구)을 대상으로 세포분열 유도물질인 PHA(Phytohemagglutinin)를 처리하여 48시간을 배양하고 수확 전 2~4시간 정도 Colcemid를 처리하여 세포분열 과정 중 중기(metaphase)에 머물게 한 후 수확하여 방사선 특이적 염색체 이상을 관찰하여 피폭 유무 및 피폭 정도를 분석하였다.



[그림 2.84] 세포유전학적 분석 방법 도식화



[그림 2.85] 안정형 염색체 이상 예시

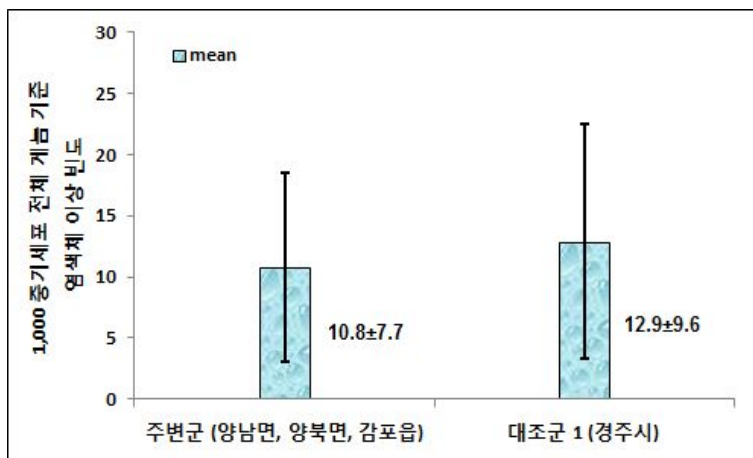
나. 염색체 분석 평가

인체 영향 여부를 확인하기 위해 혈액검사를 시행한 주변군 36명과 대조군 14명의 1,000 중기세포 전체 계놈 기준 안정형 염색체 이상 빈도에 대하여 분석한 결과 피험자의 수가 적어 표준편차가 다소 높은 경향을 나타내나, 염색체 이상 빈도의 평균은 유의한 차이가 없었다. [표 2.34]와 [그림 2.86]에 1,000 중기세포 전체 계놈 기준 염색체 이상빈도 평균 비교를 나타내었다.

국내 연구결과를 바탕으로 외국(유럽)의 사례를 분석해 본 결과 외국의 경우 각각의 값이 구해진 피험자의 수가 많으나 남녀 구분이 없고 흡연자 일부 및 원전 관련 종사 후 퇴직자가 일부 포함되어 있는 연구결과만 있어 비교 평가는 어려웠다.

[표 2.34] 1,000 중기세포 전체 계놈 기준 염색체 이상빈도 평균 비교

시료군	실험 대상자	염색체 이상 수
주변군(양남면, 양북면, 감포읍)	36	10.8±7.7
대조군 1(경주시)	14	12.9±9.6
총합	50	11.4±8.2



[그림 2.86] 1,000 중기세포 전체 계놈 기준 염색체 이상빈도 평균 비교

4. 뇨 시료 분석에 따른 유효선량 평가 방법

체내로 유입된 삼중수소에 대해 인체 내 기관이나 조직에서의 피폭방사선량(H_T , $mrem/day$)은 다음과 같이 계산하였다.

$$H_T(mrem/day) = K \times Q \times N \times E \times C_T(t) \quad \text{-----식(1)}$$

여기서 K 는 비례상수, Q 는 선질계수, N 은 보정계수(Modifying), E 는 삼중수소 붕괴당 방출되는 입자의 평균에너지($0.0057MeV$), $C_T(t)$ 는 기관이나 조직에서의 삼중수소 농도($\mu Ci/L$)를 나타낸다. 한편 비례상수 K 는 삼중수소의 베타입자에 의해 조직이나 기관에 흡수된 에너지를 피폭선량당량률($mrem/day$)로 환산하는 과정에서 발생하는 상수로서 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned}
 K &= 1\mu Ci/L \times \frac{3.7 \times 10^4 Bq}{1\mu Ci} \times \frac{86,400sec}{day} \times \frac{1.6 \times 10^{-13} J}{MeV} \times \frac{100rem}{J/kg} \times \frac{1,000mrem}{rem} \times \frac{1L}{kg} \\
 &= 51.1(mrem/MeV \cdot day)
 \end{aligned}$$

한편 선질계수(Quality factor)는 국제방사선방호위원회의 1977년 권고 ICRP-26에서 도입되었으며, 1990년 권고인 ICRP-60에서의 방사선가중계수(Radiation weighting factor)로 정의되었다. 선질계수는 삼중수소에 대해서 1을 적용한다. 또한 기타 보정계수도 삼중수소에 대해 1을 적용한다. 이를 대입하면 위의 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 H_T(mrem/day) &= 51.1(mrem/MeV \cdot day) \times 1 \times 1 \times 0.0057MeV \times C_T(t) \\
 &= 0.292C_T(t) \quad \text{-----식(2)}
 \end{aligned}$$

한편 중수로원전의 환경과 같은 현장에서는 삼중수소가 한번 섭취되는 것만으로 끝나지 않고 계속해서 섭취가 일어난다(평형상태 유지). 이런 경우 지수 함수적으로 계산보다는 선형적인 평균 방법이 더 효율적으로 이용되고 있다. 이 경우 50년 예탁선량은 아래와 같이 계산한다.

$$H_{50,E}(mrem) = 0.292 \times F \times \sum \frac{(C_i + C_{i+1}) \times (t_i - t_{i+1})}{2} \text{ -----식(3)}$$

여기서 C_i 는 전회 뇨시료 중의 삼중수소 농도($\mu Ci/L$), t_i 는 전회 삼중수소 농도 제출일(day), C_{i+1} 는 금회 뇨시료 중 삼중수소 농도($\mu Ci/L$) t_{i+1} 는 금회 삼중수소 농도 제출일(day)을 나타낸다.

그런데 여기에서 중요한 인자는 전환인자 F 이다. 이는 인체 물속에 존재하는 삼중수소의 붕괴로 인해 피폭되는 인체 물속과 인체 연조직까지 피폭을 고려한 인자이다. 즉, 방사선작업종사자가 방사선작업 종료 후에 제출하는 뇨 시료 중의 삼중수소 농도는 인체 물속에 존재하는 삼중수소 농도이다. 그런데 삼중수소에 의한 피폭은 인체에 존재하는 물, 또한 이와 접촉하고 있는 인체의 연조직도 피폭을 받게 된다. 따라서 물속에 존재하는 삼중수소로 인해 물과 연조직이 동시에 피폭을 받게 되는 과정을 고려하여 산출한 인자가 인체 연조직 전환인자이다. 즉, 기관이나 조직에서의 삼중수소 농도 $C_T(t)$ 는 뇨 시료 중의 삼중수소 농도 $C_U(t)$ 와는 아래 관계가 성립한다.

$$C_T(t) = F(t) \times C_U(t) \text{ -----식(4)}$$

우리 몸으로 유입되어 신체 내에서 평형에 도달한 삼중수소는 거의 대부분이 몸의 물속에 존재하나 아주 일부분이 몸의 유기적으로 결합된 삼중수소가 존재한다. 이러한 유기결합 삼중수소 농도가 매우 낮고 그 비율이 차이가 없기 때문에 일정한 값을 고려하여 내부피폭선량평가에 반영이 가능하다. 미국방사선방호위원회의 간행물 NCRP-63에 따르면 연조직에서의 삼중수소 농도는 인체 물속에 존재하는 삼중수소 농도의 최대 20% 정도로 알려져 있다. 또한 표준인(Standard man)은 인체 연조직의 질량이 63 kg이며, 물의 질량이 42 kg이므로 평형에서 전환인자 $F(\alpha)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$F(\alpha) = \frac{42}{63} \times \left(1 + \frac{63-42}{42} \times 0.2\right) = 0.733$$

뇨 시료 중의 삼중수소 농도 측정결과를 이용한 내부피폭 선량평가는 위의 식 (3)에 SI 단위를 고려하면 아래와 같이 계산된다.

$$E(mSv) = 0.292 \times \frac{1}{37} \times 1E-2 \times 0.733 \times \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \times T \right)$$

$$\text{즉, } E(mSv) = 0.214 \times 0.027E-2 \times \left[\frac{(C_1 + C_2)}{2} \times T \right] \text{-----식(5)}$$

여기서 E 는 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량(mSv), T 는 뇨 시료 제출일의 차이(days)로서 $T_2 - T_1$ 로 나타낸다(T_1 :전회 뇨 시료 제출일, T_2 :금회 뇨 시료 제출일). C_1 은 전회 뇨 시료 농도(Bq/cm^3), C_2 는 금회 뇨 시료 농도(Bq/cm^3)를 나타낸다.

보통 뇨 시료 중 방사능농도는 Bq/L 로 나오므로 식(5)에 C_1, C_2 를 Bq/cm^3 로 대입하기 위해서 1,000으로 나누어주거나 또는 식(5)를 산출하고 1,000으로 나누어주면 된다.

만약 중수로 원전에 근무하는 종사자가 방사선작업종사자를 해제하거나 다른 사업소로 파견 또는 이동시에는 예탁유효선량을 아래 식을 이용하여 계산한다.

$$E(mSv) = 3.09 \times \frac{1}{37} \times 1E-2 \times C_3 \text{-----식(6)}$$

여기서 C_3 는 최종 뇨 시료 농도(Bq/cm^3)를 나타낸다.

본 연구에서 주민 인체 뇨 시료 중 삼중수소 방사능농도에 대한 피폭방사선량 평가는 위의 식(5)를 사용하여 계산하였다.

제3장 연구 결과

제1절 기체 및 액체 삼중수소 배출물에 대한 유효선량 평가결과

국내 원전 기체 및 액체 삼중수소 배출물에 대한 유효선량 평가하였다. [표 3.1]과 [그림 3.1] 및 [그림 3.2]에서 보는 바와 같이 경수로 원전과 중수로 원전을 비교한 결과 삼중수소 배출량은 2005년부터 2013년까지 평균 배출량은 기체의 경우 고리 3.55 TBq, 한빛 1.71 TBq, 한울 1.07 TBq, 월성 44.82 TBq로 나타났고, 액체의 경우는 고리 5.27 TBq, 한빛 7.72 TBq, 한울 5.64 TBq, 월성 21.14 TBq로 나타났다.

이 배출량과 유효선량 평가결과가 배출량 대비 비례성을 유지하는 것이 이론적 평가방식의 결과이나 [그림 3.1]과 [그림 3.2]에서 보듯이 경수로에 비해 중수로가 유효선량이 상대적으로 저평가된 것처럼 확인이 되었다. 이러한 결과는 삼중수소가 환경매체에서 검출되고 있는 중수로 원전인 월성원전 유효선량 평가시 환경매체 실측치를 바탕으로 보정계수를 적용, 평가한 결과가 일부 적용되어 있는 결과라 할 수 있다. 그러나 규제기관의 권고로 현실적인 평가방식이 아닌 보수적인 평가방식인 이론치에 근거한 방식으로 현재는 환원되어 평가를 수행하고 있다.

중수로 원전의 중주국인 캐나다는 환경매체 실측치를 바탕으로 보정계수를 산출하고, 산출된 결과를 이론치에 보정 적용하여 평가를 수행하는 현실적인 방법을 사용하고 있고, 영국은 환경매체에서 검출되는 실측치는 반영을 하고, 실측치가 없는 경우는 MDA 농도 또는 이론치를 바탕으로 평가를 수행하고 있다.

그러나 국내 원전은 주민피폭선량평가시 보수적 접근방식인 최대개인의 개념으로 부지경계를 대상으로 이론적인 방법을 바탕으로 평가를 수행하고 있다. 그 근거를 살펴보면 경수로의 경우 삼중수소 배출량에 대한 환경매체 실측치가 배출에 대한 주풍향 방향에서만 일부 검출될 뿐 현실적으로 검출에 한계가 있어 적용이 어려운 측면이 있어 이론치에 근거한 평가를 수행하고 있는 현실이다.

그리고 중수로의 다량의 배출에 따라 공기 중 삼중수소 실측치를 바탕으로 평가가 가능하나 규제기관의 보수적 평가 방식의 권고에 따라 중수로 또한 이론치를 바탕으로 평가를 수행하고 있다.

실제 규제기관에서 중수로 원전인 삼중수소를 대상으로 환경매체의 실측치로 대기확산인자 보정계수를 적용한 평가와 이론치를 평가한 결과를 보면 예측치가 실측치의 2배 정도 보수적인 값을 유지한다는 결과가 있다. 이에 근거하여 규제기관은 이론치를 현재까지도 권고하고 있는 것이다[12][15][38].

원전에 대한 주민피폭선량 평가는 규제기관에서 권고하는 가장 보수적인 접근방식을 바탕으로 평가를 수행하는 것이 타당하다고 판단되나 본 연구에서는 환경매체 실측치를 바탕으로 보정계수를 산출하여 평가하는 방식이 가장 합리적이고 현실적인 평가방식이라 판단된다.

그래서 이러한 평가를 위해서는 경수로 원전에 대해 현재 일부분에 대해서는 환경매체를 분석하는 것을 주풍향 방향에 대해 좀 더 다양한 환경매체를 분석하여 실측치를 얻어내는 것이 가장 중요하다고 판단된다.

중수로의 경우는 환경매체의 다양성은 존재하나 이 환경매체 실측치를 근거로 한 이론치와 상호 평가를 수행하여 어느 평가 방식이 현실적인 방법인가 기술적, 공학적 판단이 서야 할 것으로 판단된다.

이러한 평가를 통해 좀 더 현실적 적용이 필요하며, 결과를 바탕으로 원전 주변 주민의 실질적 피폭량 정보를 제공하기 위한 기술공학적 판단근거와 사회적 논의가 필요하다고 판단된다.

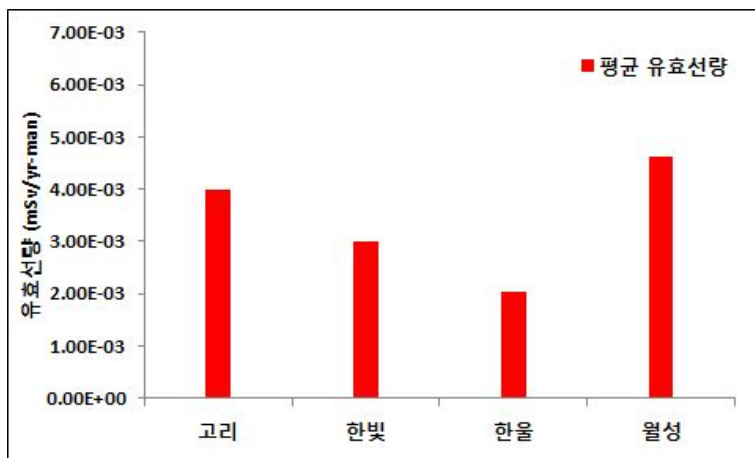
[표 3.1] 국내 원전 년도별 기체 및 액체 삼중수소에 대한 유효선량 평가결과

[단위 : mSv/yr·man]

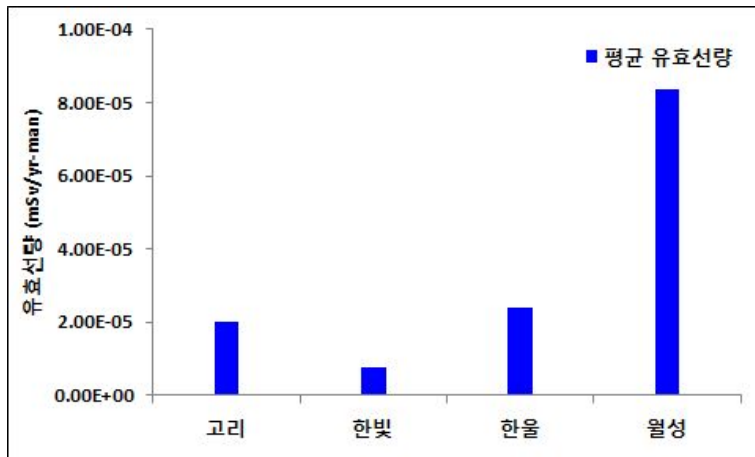
원전 년도	고리		한빛		한울		월성	
	기체 ^{a)}	액체 ^{b)}	기체	액체	기체	액체	기체	액체
2005	3.97E-3	4.74E-6	2.11E-3	9.26E-6	3.10E-3	2.38E-5	2.17E-3	9.16E-6
2006	6.57E-3	4.88E-6	4.80E-3	3.82E-6	1.46E-3	2.59E-5	2.37E-3	1.05E-5
2007	1.49E-2	3.65E-6	5.11E-3	4.23E-6	1.98E-3	3.05E-5	3.21E-3	1.61E-5
2008	4.56E-3	4.50E-6	4.04E-3	6.48E-6	1.81E-3	2.20E-5	4.85E-3	1.33E-5
2009	2.23E-3	4.44E-6	4.22E-3	5.81E-6	2.03E-3	2.51E-5	4.02E-3	2.51E-4
2010	1.32E-3	8.28E-6	2.72E-3	3.71E-6	3.24E-3	3.03E-5	3.98E-3	1.75E-4
2011	1.53E-3	4.92E-5	2.69E-3	3.42E-6	2.98E-3	3.83E-5	2.68E-3	8.76E-5
2012	3.60E-4	3.56E-5	6.26E-4	2.33E-5	8.52E-4	1.23E-5	9.82E-3	3.28E-5
2013	4.97E-4	6.52E-5	6.78E-4	9.34E-6	9.95E-4	7.21E-6	8.35E-3	1.58E-4
평균	3.99E-3	2.01E-5	3.00E-3	7.71E-6	2.05E-3	2.39E-5	4.61E-3	8.37E-5
총선량	3.59E-2	1.80E-4	2.70E-2	6.94E-5	1.84E-2	2.15E-4	4.15E-2	7.53E-4

a) 기체 삼중수소 평균 배출량(2005년~2013년) : (고리)3.55 TBq (한빛)1.71 TBq (한울)1.07 TBq (월성)44.82 TBq

b) 액체 삼중수소 평균 배출량(2005년~2013년) : (고리)5.27 TBq (한빛)7.72 TBq (한울)5.64 TBq (월성)21.14 TBq



[그림 3.1] 국내 원전 기체 삼중수소 평균 유효선량 비교



[그림 3.2] 국내 원전 액체 삼중수소 평균 유효선량 비교

제2절 환경매체 중 방사능농도 측정에 의한 유효선량 평가결과

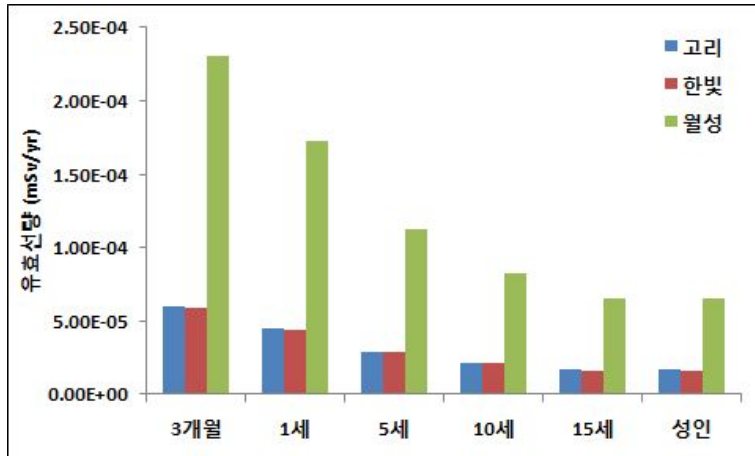
국내원전 환경매체 삼중수소 방사능농도 분석결과에 따라 각 원전별 유효선량을 평가해 보았다. 평가는 2003년부터 2013년까지의 환경매체에 대한 삼중수소 분석결과를 바탕으로 검출된 각 시료별 평균과 가장 높게 검출된 방사능농도를 대상으로 유효선량을 평가하였다.

먼저 국내 원전 지표수에 대한 삼중수소 평균 및 최대 방사능 분석결과를 바탕으로 유효선량을 각 연령군 별로 평가해 보았다. 평가 결과 [표 3.1B]와 [그림 3.3]에서 보는 바와 같이 삼중수소 방사능 농도가 가장 높은 월성원전의 유효선량이 높게 나타났고 고리원전과 한빛원전이 비슷한 수준으로 나타났다. 한울원전의 경우는 지표수에서 삼중수소가 검출되지 않아 평가대상에서 제외하였다.

지표수에서 평가시 각 연령군별로 평가한 결과 3개월 연령군에서 가장 높게 나타난 것은 섭취에 대한 선량환산인자가 성인에 비해 3.5배 높은 것에 기인한 것으로 판단되고 연령군에서 3개월, 1세 등은 성인 연간 섭취량인 730 L/yr 보다 적게 섭취될 것으로 판단되나 어린 연령에 대한 섭취량은 자료가 없어 성인 기준으로

평가한 결과 결과가 높게 나타난 영향이라 판단된다.

이에 따라 물 섭취에 따른 각 연령군별 섭취량을 조사하고 평가하여 적용함으로써 정확한 선량평가가 이루어질 것으로 판단된다.



[그림 3.3] 국내 원전 지표수 삼중수소 최대 방사능농도에 대한 유효선량

농·축산물에 대한 평가는 경수로 원전의 경우 농·축산물에 대한 환경매체 분석 결과가 없어 중수로 원전인 월성원전을 대상으로 평가하였다. [그림 3.4]에서 같이 평가결과 삼중수소 방사능 결과는 모든 환경매체에서 검출이 되었으며, 가장 선량 기여도가 높은 환경매체는 보리로서 TFWT 보다 OBT가 더 높은 결과를 나타냈다. 방사능 농도는 TFWT는 최대 14.8 Bq/kg이나 OBT는 90.8 Bq/kg으로 더 높고 또한 성인 기준으로 선량환산인자가 TFWT에 비해 OBT가 2.3배 더 높은 영향에 기인한 것으로 판단된다.

쌀의 경우도 보리와 마찬가지로 TFWT는 최대 7.73 Bq/kg이나 OBT는 42.4 Bq/kg으로 더 높고 또한 성인 기준으로 선량환산인자가 TFWT에 비해 OBT가 2.3배 더 높은 영향에 기인한 것으로 판단된다.

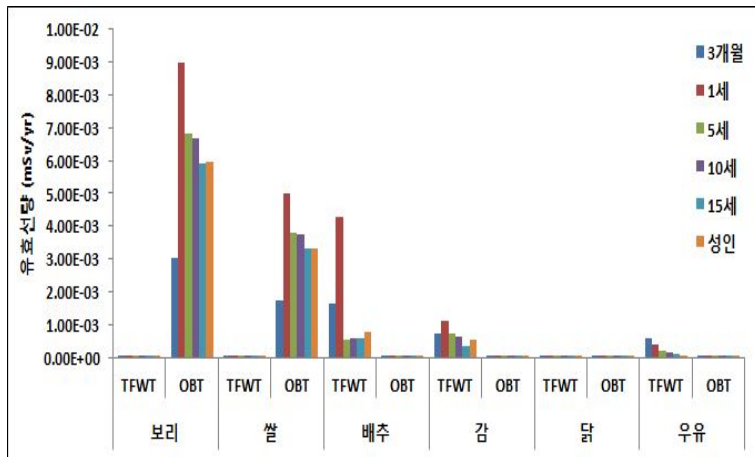
배추와 감은 성인 기준 선량환산인자는 보리와 쌀과 같은 2.3배 높으나 삼중수소

방사능 농도가 배추는 TFWT가 198 Bq/kg, OBT는 3.37 Bq/kg, 감은 TFWT가 49.2 Bq/kg, OBT는 5.02 Bq/kg으로서 방사능농도가 TFWT에서 더 높은 것에 기인한 것이라 판단된다. 우유도 TFWT가 더 높은 방사능 농도에 기인한 결과이다.

전체 농·축산물에 대한 평가결과는 선량 기여도가 높은 환경매체는 보리와 쌀, 배추, 감, 우유 순으로 유효선량이 높은 것으로 나타났다.

가장 높은 보리의 TFWT와 OBT를 합산한 유효선량은 3개월은 1.53E-2 mSv/yr, 1세는 4.50E-2 mSv/yr, 5세는 3.42E-2 mSv/yr, 10세는 3.34E-2 mSv/yr, 15세는 2.97E-2 mSv/yr, 성인은 2.98E-2 mSv/yr로서 1세가 가장 높은 선량을 나타냈다. 쌀과 배추도 보리와 같이 1세 기준이 가장 높은 유효선량을 나타냈다.

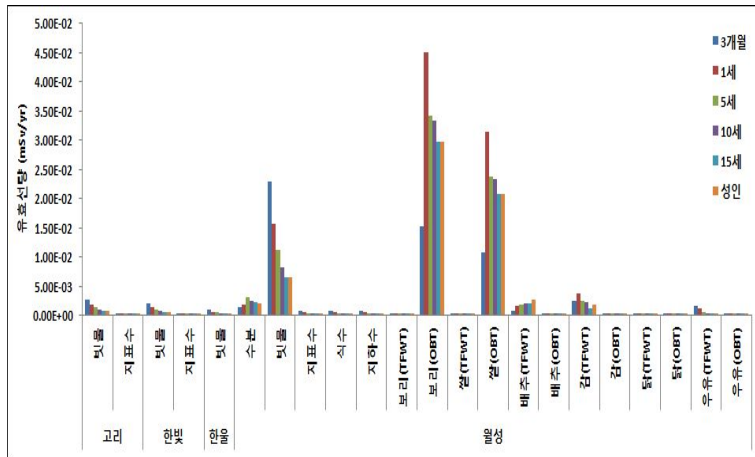
일반인 선량한도와 비교했을 때 가장 높은 보리 환경매체에 대해 1세 기준으로 1 mSv/yr의 4.5% 수준으로 나타났다.



[그림 3.4] 월성원전 농·축산물 삼중수소 평균 방사능농도에 대한 유효선량

국내 전 원전을 대상으로 삼중수소가 검출된 환경매체에 대해 비교 평가한 결과는 [그림 3.5]에 나타낸 바와 같이 경수로 원전인 고리, 한빛, 한울 원전은 유효선량이 매우 미미한 수준으로 나타났고, 월성원전의 경우는 농·축산물 섭취에 의한

선량 기여가 공기 중 수분 등 호흡에 의한 선량 기여보다 월등히 높은 것을 알 수 있었다.



[그림 3.5] 국내 원전 시료별 삼중수소 최대 방사능농도에 대한 유효선량

본 연구에서 환경매체를 대상으로 유효선량을 평가한 결과는 일반적인 선량평가 계산식에 적용하는 성인 기준의 호흡 및 섭취량에 근거한 결과가 아닌 각 연령군별 호흡 및 섭취량을 고려하였으며, 또한 TFWT와 OBT에 따른 수분량과 사회환경인자로서 원전 주변지역의 지역 자급 생산 비율을 고려한 것으로 최대개인을 대상으로 평가를 수행한 결과이다.

이러한 평가는 여러 환경 인자를 반영한 결과로서 좀 더 공학적이고 현실적인 유효선량 평가결과라 판단된다.

[표 3.2A] 국내 원전 환경매체에 대한 유효선량 평가결과

원전	환경매체	연평균 별 최대 개인의 호흡 및 섭취량 (kg/yr, L/yr, m ³ /yr)																		
		3개월		1세		5세		10세		15세		성인								
		전체 ^{a)}	인접지역 ^{b)}	전체	인접지역	전체	인접지역	전체	인접지역	전체	인접지역	전체	인접지역							
고리	빛물	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	지표수	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	730	730				
한빛	빛물	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	지표수	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	730	730				
한울	빛물	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	지표수	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	730	730				
월성	수분	1,400	1,400	2,500	2,500	6,700	6,700	7,300	7,300	7,900	7,900	7,400	7,400							
	지표수	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	730	730							
	식수	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	730	730							
	지하수	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	730	730							
	브리	TFWT	28.80	3.456 (0.12)	3.456 (1.0)	84.69	10.163 (0.12)	10.163 (1.0)	105.78	12.694 (0.12)	12.694 (1.0)	132.50	15.9 (0.12)	15.9 (1.0)	159.98	19.198 (0.12)	19.198 (1.0)	160.26	19.231 (0.12)	19.231 (1.0)
		OBT		25.344 (0.88)	25.344 (1.0)		74.527 (0.88)	74.527 (1.0)		93.086 (0.88)	93.086 (1.0)		116.6 (0.88)	116.6 (1.0)		140.782 (0.88)	140.782 (1.0)		141.029 (0.88)	141.029 (1.0)
	쌀	TFWT	28.80	3.456 (0.12)	3.456 (1.0)	84.69	10.163 (0.12)	10.163 (1.0)	105.78	12.694 (0.12)	12.694 (1.0)	132.50	15.9 (0.12)	15.9 (1.0)	159.98	19.198 (0.12)	19.198 (1.0)	160.26	19.231 (0.12)	19.231 (1.0)
		OBT		25.344 (0.88)	25.344 (1.0)		74.527 (0.88)	74.527 (1.0)		93.086 (0.88)	93.086 (1.0)		116.6 (0.88)	116.6 (1.0)		140.782 (0.88)	140.782 (1.0)		141.029 (0.88)	141.029 (1.0)
	배추	TFWT	11.46	10.898 (0.951)	10.898 (1.0)	39.92	37.964 (0.951)	37.964 (1.0)	68.22	64.877 (0.951)	64.877 (1.0)	98.04	93.236 (0.951)	93.236 (1.0)	121.69	115.727 (0.951)	115.727 (1.0)	161.80	153.872 (0.951)	153.872 (1.0)
		OBT		0.562 (0.049)	0.562 (1.0)		1.956 (0.049)	1.956 (1.0)		3.343 (0.049)	3.343 (1.0)		0.804 (0.049)	0.804 (1.0)		5.963 (0.049)	5.963 (1.0)		7.928 (0.049)	7.928 (1.0)
감	TFWT	37.49	31.492 (0.84)	22.044 (0.7)	76.95	64.638 (0.84)	45.247 (0.7)	81.29	68.284 (0.84)	47.799 (0.7)	93.91	78.884 (0.84)	55.219 (0.7)	62.31	52.340 (0.84)	36.659 (0.7)	97.02	81.497 (0.84)	57.048 (0.7)	
	OBT		5.998 (0.16)	4.199 (0.7)		12.312 (0.16)	8.618 (0.7)		13.006 (0.16)	9.104 (0.7)		15.026 (0.16)	10.518 (0.7)		9.97 (0.16)	6.979 (0.7)		15.523 (0.16)	10.866 (0.7)	
닭 ^{b)}	TFWT	6.35	4.616 (0.727)	2.308 (0.5)	12.78	9.291 (0.727)	4.646 (0.5)	21.17	15.390 (0.727)	7.695 (0.5)	28.43	20.668 (0.727)	10.334 (0.5)	38.03	27.648 (0.727)	13.824 (0.5)	26.62	19.353 (0.727)	9.676 (0.5)	
	OBT		1.734 (0.273)	0.867 (0.5)		3.489 (0.273)	1.744 (0.5)		5.78 (0.273)	2.89 (0.5)		7.762 (0.273)	3.881 (0.5)		10.382 (0.273)	5.191 (0.5)		7.267 (0.273)	3.634 (0.5)	
우유 ^{b)}	TFWT	241.48	213.71 (0.885)	106.86 (0.5)	219.55	194.30 (0.885)	97.15 (0.5)	184.40	163.194 (0.885)	81.597 (0.5)	166.48	147.335 (0.885)	73.668 (0.5)	151.33	133.927 (0.885)	66.963 (0.5)	73.18	64.764 (0.885)	32.382 (0.5)	
	OBT		27.77 (0.115)	13.885 (0.5)		25.25 (0.115)	12.625 (0.5)		21.206 (0.115)	10.603 (0.5)		19.145 (0.115)	9.572 (0.5)		17.403 (0.115)	8.701 (0.5)		8.416 (0.115)	4.208 (0.5)	

a) 원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서¹⁾ 농작물 중 수분의 비율(곡식, 과일, 김장채소, 열채류, 목초) 참조

b) 중수로에서의 TRF 가동영향 평가 기술개발 최종보고서, 2003²⁾. 닭, 우유에 대한 수분의 비율은 각각 0.727, 0.885로 가정

c) 원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서¹⁾ 농산물 섭취량 중 지역 자급 생산 비율(곡식, 김장채소, 열채류, 과일, 우유, 육류(소고기, 돼지고기, 닭고기)) 참조

[표 3.2B] 국내 원전 환경매체에 대한 유효선량 평가결과

원전	환경매체	방사능농도 (Bq/L, Bq/m ³ , Bq/kg) (2003년~2013년)		유효선량(mSv/yr)												
		평균	최대	평균						최대						
				3개월	1세	5세	10세	15세	성인	3개월	1세	5세	10세	15세	성인	
고리	빗물	11.57	57.9	5.41E-4	4.05E-4	2.62E-4	1.94E-4	1.52E-4	1.52E-4	2.71E-3	1.86E-3	1.31E-3	9.72E-4	7.61E-4	7.61E-4	
	지표수	1.28	3.33	5.98E-5	4.49E-5	2.90E-5	2.15E-5	1.68E-5	1.68E-5	1.56E-4	1.07E-4	7.54E-5	5.59E-5	4.38E-5	4.38E-5	
한빛	빗물	12.1	42.5	5.65E-4	4.24E-4	2.74E-4	2.03E-4	1.59E-4	1.59E-4	1.99E-3	1.37E-3	9.62E-4	7.14E-4	5.58E-4	5.58E-4	
	지표수	1.25	3.46	5.84E-5	4.38E-5	2.83E-5	2.10E-5	1.64E-5	1.64E-5	1.62E-4	1.11E-4	7.83E-5	5.81E-5	4.55E-5	4.55E-5	
한울	빗물	3.0	19.4	1.40E-4	1.05E-4	6.79E-5	5.04E-5	3.94E-5	3.94E-5	9.06E-4	6.23E-4	4.39E-4	3.26E-4	2.55E-4	2.55E-4	
월성	수분	2.34	15.2	2.10E-4	2.81E-4	4.86E-4	3.93E-4	3.33E-4	3.12E-4	1.36E-3	1.82E-3	3.16E-3	2.55E-3	2.16E-3	2.02E-3	
		빗물	117.61	490.0	5.49E-3	4.12E-3	2.66E-3	1.97E-3	1.55E-3	1.55E-3	2.29E-2	1.57E-2	1.11E-2	8.23E-3	6.44E-3	6.44E-3
		지표수	4.94	15.6	2.31E-4	1.73E-4	1.12E-4	8.29E-5	6.49E-5	6.49E-5	7.29E-4	5.01E-4	3.53E-4	2.62E-4	2.05E-4	2.05E-4
		식수	4.92	16.9	2.30E-4	1.72E-4	1.11E-4	8.26E-5	6.46E-5	6.46E-5	7.90E-4	5.43E-4	3.82E-4	2.84E-4	2.22E-4	2.22E-4
		지하수	3.99	17.0	1.86E-4	1.40E-4	9.03E-5	6.70E-5	5.24E-5	5.24E-5	7.94E-4	5.46E-4	3.85E-4	2.85E-4	2.23E-4	2.23E-4
	보리	TFWT	2.24	14.8	2.48E-6	5.46E-6	4.41E-6	4.10E-6	3.87E-6	3.88E-6	1.64E-5	3.61E-5	2.91E-5	2.71E-5	2.56E-5	2.56E-5
		OBT	12.12	60.8	3.05E-3	8.96E-3	6.81E-3	6.66E-3	5.93E-3	5.94E-3	1.53E-2	4.50E-2	3.42E-2	3.34E-2	2.97E-2	2.98E-2
	쌀	TFWT	1.45	7.73	1.60E-6	3.54E-6	2.85E-6	2.65E-6	2.51E-6	2.51E-6	8.55E-6	1.89E-5	1.52E-5	1.41E-5	1.34E-5	1.34E-5
		OBT	6.79	42.4	1.71E-3	5.02E-3	3.82E-3	3.73E-3	3.32E-3	3.33E-3	1.07E-2	3.14E-2	2.38E-2	2.33E-2	2.07E-2	2.08E-2
	배추	TFWT	59.13	198	1.63E-3	4.27E-3	5.54E-4	5.91E-4	5.74E-4	7.63E-4	6.44E-4	1.68E-3	1.86E-3	1.98E-3	1.92E-3	2.56E-3
		OBT	1.18	3.37	3.01E-7	1.05E-6	1.09E-6	2.04E-7	1.12E-6	1.49E-6	8.59E-7	2.99E-6	3.11E-6	5.84E-7	3.19E-6	4.24E-6
	감	TFWT	14.33	49.2	7.08E-4	1.09E-3	7.43E-4	6.37E-4	3.31E-4	5.15E-4	2.43E-3	3.74E-3	2.55E-3	2.19E-3	1.14E-3	1.77E-3
		OBT	1.58	5.02	1.20E-5	2.46E-5	1.58E-5	1.42E-5	6.96E-6	1.08E-5	3.80E-5	7.80E-5	5.01E-5	4.52E-5	2.21E-5	3.44E-5
	딸	TFWT	1.46	4.79	6.53E-6	9.86E-6	1.05E-5	1.05E-5	1.10E-5	7.70E-6	2.14E-5	3.24E-5	3.46E-5	3.45E-5	3.61E-5	2.53E-5
		OBT	0.55	1.46	1.38E-6	2.78E-6	2.81E-6	2.94E-6	2.90E-6	2.03E-6	3.67E-6	7.39E-6	7.45E-6	7.81E-6	7.70E-6	5.39E-6
	우유	TFWT	2.35	6.27	5.93E-4	4.04E-4	2.19E-4	1.47E-4	1.04E-4	5.05E-5	1.58E-3	1.08E-3	5.85E-4	3.92E-4	2.79E-4	1.35E-4
		OBT	0.3	0.83	1.21E-5	1.10E-5	5.62E-6	3.96E-6	2.65E-6	1.28E-7	3.35E-5	3.04E-5	1.55E-5	1.10E-5	7.34E-6	3.55E-6

제3절 노 시료 삼중수소 방사능농도에 따른 유효선량 평가결과

중수로 원전인 월성원전 주변지역과 경수로 원전인 한울원전 주변지역을 대상으로 인체에 존재하는 삼중수소 방사능농도를 평가한 결과를 바탕으로 유효선량을 평가하였다.

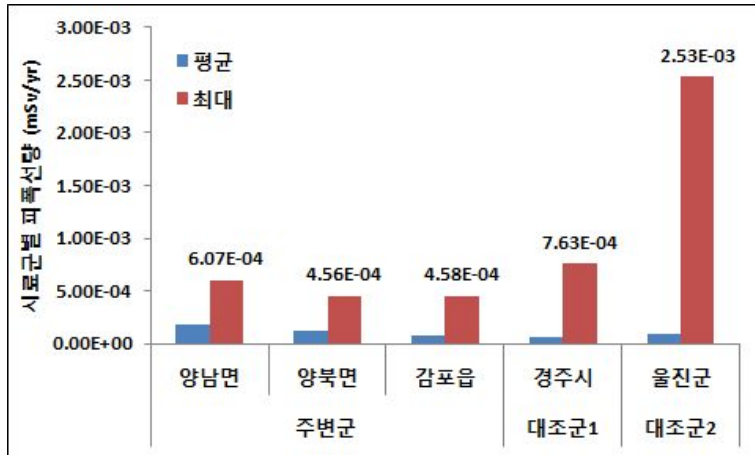
[표 3.3]과 [그림 3.6]에서 보는 바와 같이 평가결과 먼저 주변군에 대해 양남면은 평균 $1.77E-4$ mSv/yr, 최대 $6.07E-4$ mSv/yr, 양북면은 평균 $1.22E-4$ mSv/yr, 최대 $4.56E-4$ mSv/yr, 감포읍은 평균 $8.01E-5$ mSv/yr, 최대 $4.58E-4$ mSv/yr로 나타났다.

대조군1인 경주시는 평균 $6.75E-5$ mSv/yr, 최대 $7.63E-4$ mSv/yr, 대조군2는 평균 $9.07E-5$ mSv/yr, 최대 $2.53E-3$ mSv/yr로 나타났다.

삼중수소로 인한 인체 노 중 유효선량 평가결과는 대조군2인 울진군의 최대 방사능농도(120 Bq/L)를 1년간 지속적으로 피폭을 가정하더라도 일반인 선량한도(1 mSv/yr) 대비 0.253%로 낮게 나타남을 알 수 있었다.

[표 3.3] 월성원전 주변지역 노 시료 중 삼중수소 유효선량 평가결과

시료군		방사능농도(Bq/L)		유효선량(mSv/yr)		선량한도 수준(%)	
		평균	최대	평균	최대	평균	최대
주변군	양남면	8.4	28.8	$1.77E-4$	$6.07E-4$	0.0177	0.0607
	양북면	5.8	21.6	$1.22E-4$	$4.56E-4$	0.0122	0.0456
	감포읍	3.8	21.7	$8.01E-5$	$4.58E-4$	0.00801	0.0458
대조군1	경주시	3.2	36.2	$6.75E-5$	$7.63E-4$	0.00675	0.0763
대조군2	울진군	4.3	120	$9.07E-5$	$2.53E-3$	0.00907	0.253



[그림 3.6] 월성원전 주변지역 인체 노 중 삼중수소 유효선량 평가결과

제4절 국내 삼중수소 음용수 섭취기준 제시 결과

국내 원전은 음용수에 대해 섭취기준이 마련되어 있지 않다. 이로 인해 경수로 원전 주변지역은 물론 중수로 원전 주변지역 주민들은 국내 음용수 섭취기준에 대해 많은 논란을 야기하고 있다. 이에 따라 해외 적용사례 및 계산방법을 검토하여 국내 음용수 섭취기준을 제시해 보고자 하였다.

1. 해외 사례 연구

해외 많은 나라들이 음용수에 포함되어 있는 삼중수소 섭취로 인한 내부피폭 방호를 위해 섭취량을 설정하여 사용하고 있다. [표 3.4]에서 알 수 있듯이 나라별 설정방법 및 기준이 약간씩 상이하다.

가장 보수적으로 설정한 나라는 오스트레일리아로서 연간선량한도 1.0 mSv/yr로부터 76,103 Bq/L로 설정하여 사용하고 있으며, 그 다음은 핀란드로 0.5 mSv/yr를 적용하여 사용하고 있다.

음용수 섭취량을 계산하는 기본식은 아래에 기술되어 있듯이 동일하나, 나라별 다른 인자는 기본적으로 연간 선량한도를 결정하기 위한 일반인 선량한도와 그 나라의 연간 음용수 섭취량에 따라 상이하게 나온다. 동일하게 적용되는 것은 삼중수소 섭취에 대한 선량환산인자는 동일하다.

이러한 나라별 특성을 반영한 계산결과는 스위스와 같이 그대로 반영하는 나라도 있는 반면 계산결과를 약간 하향 또는 상향하여 사용하는 나라도 있다. 또한 유럽연합 같이 계산결과에 근거를 두고 문화적 차이를 고려하여 그 나라 의회에서 좀 더 보수적으로 권고하는 형식의 음용수 섭취한도를 설정하는 나라도 있다.[41].

$$GL = \frac{RDL}{DCF \times q}$$

GL : guideline reference level of radionuclide in drinking water(Bq/L)

RDL : reference dose level, equal to 0.1 mSv per year

DCF : dose conversion factor for ingestion by adults(mSv/Bq)

q : annual ingestion volume of drinking water

[표 3.4] 해외 나라별 음용수 섭취한도 및 설정방법

국가	삼중수소 농도(Bq/L)	설정방법			
		선량한도 (mSv/yr)	섭취량 ^{a)} (L/yr)	계산결과 (Bq/L)	최종권고 (Bq/L)
캐나다	7,000	0.1	730	7,610	7,000
유럽연합	100	0.1	730	7,610	100 ^{b)}
핀란드	30,000	0.5	803	34,592	30,000
오스트레일리아	76,103	1.0	730	76,103	76,103
러시아	7,700	0.1	730	7,610	7,700
스위스	10,000	0.1	600	9,259.3	10,000
미국	740	0.04	730	7,610	740
WHO	10,000	0.1	730	7,610	10,000

^{a)} 일반적으로 섭취량을 2.0 L/day(730 L/yr)로 설정하였으나, 핀란드와 스위스는 섭취율을 각각 2.2

L/day(803 L/yr), 0.6 m³/year(600 L/yr)를 설정함.

b) 유럽연합의 경우 계산결과 7,610 Bq/L가 나왔지만 의회 권고로 100 Bq/L를 적용함

2. 국내 삼중수소 음용수 섭취기준 제시 결과

해외의 경우는 그 나라의 적용 선량한도 논의, 음용수 연간 섭취량 근거, 일반 국민이 받아들이는 사회적 논의 절차 등을 통해 성인 기준으로 삼중수소로 인한 음용수 섭취 기준을 마련하였다.

국내는 오래전부터 기준을 마련할 것을 요구하고 있지만 아직까지 논의가 제대로 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 여러 기술적 바탕과 정책적 바탕에 근거를 둔 논의가 있어야 하지만 해외 사례 연구를 바탕으로 기본적인 계산식을 근거로 몇 가지 기준을 설정하여 제시해 보고자 하였다.

먼저 선량한도의 경우 해외 대부분의 나라가 일반인 선량한도인 1 mSv/yr의 10% 수준인 0.1 mSv/yr를 선량한도로 적용하여 계산하고 있다. 국내도 해외와 마찬가지로 0.1 mSv/yr 수준이면 합당하다고 판단된다.

두 번째는 음용수 연간 섭취량을 결정하는 것이다. 해외의 경우는 ICRP-23 'Report of the Task Group on Reference Man'의 표준인 물 섭취량을 적용하여 730 L/yr로 섭취량을 적용하여 계산을 수행하고 있다. 국내도 보수적인 관점에서 730 L/yr를 적용하여 계산하는 것이 타당하다고 판단된다.

세 번째는 선량환산인자로서 6개 연령군 중 3개월의 선량환산인자가 6.4E-8으로 성인의 1.8E-8에 약 3.5배 더 높다. 따라서 본 연구에서는 각 연령군 별 선량환산인자를 모두 적용하여 계산을 수행하여 보았다.

이러한 몇 가지 기준에 근거하여 계산한 결과 [표 3.5]에서 보는 바와 같이 각 연령군에 따른 음용수 삼중수소 섭취 농도를 계산한 결과 3개월군에서 가장 보수적인 2,140.4 Bq/L가 나왔다.

국내 원전 사고시를 대비한 「원자력시설등의 방호 및 방재대책법 시행규칙」(이하 방재대책법)의 [별표 4] ‘긴급 주민보호조치 결정기준’과 [별표 5] ‘식료품과 음료품, 농·축·수산물의 반출 또는 소비 통제 등의 결정기준’에 삼중수소는 방사성핵종의 제5군으로 야채, 과일, 물, 우유, 유아식품, 농·축·수산물에 대해 100,000 Bq/L로 정하고 있다.

이와 연계하여 계산결과를 바탕으로 국내 적용하기 위해서는 국내 원전 입지 여건, 문화적 차이, 국민 공감대 등을 고려하여 가장 보수적 수치인 2,140.4 Bq/L를 근거로, 방재대책법의 1/50 수준으로 2,000 Bq/L 정도가 합당하다고 판단된다. 이는 방재대책법의 제1군 방사성핵종인 ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{89}Sr 에 대한 농·축·수산물의 결정기준인 2,000 Bq/kg과 동일한 수치이다.

[표 3.5] 연령군 별 음용수 섭취 삼중수소 농도 계산결과

구분	선량환산인자 (mSv/Bq)	섭취량 (L/yr)	삼중수소 농도 (Bq/L)
3개월	6.4E-8	196.3	7,959.8
		730	2,140.4
1세	4.8E-8	196.3	10,613.0
		730	2,853.9
5세	3.1E-8	196.3	16,433.0
		730	4,418.9
10세	2.3E-8	196.3	22,148.9
		730	5,955.9
15세	1.8E-8	196.3	28,301.4
		730	7,610.4
성인	1.8E-8	196.3	28,301.4
		730	7,610.4

제4장 결 론

본 연구에서 국내원전 삼중수소 배출량 및 환경거동, 인체노출 특성, 유효선량평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

먼저 국내 원전 삼중수소 배출량 평가결과는 고리원전은 기체 및 액체 배출이 비슷한 수준을 나타냈으며 액체의 경우 년도별 배출 추이는 증가하는 경향($R^2=0.68$)이 뚜렷히 나타났다. 한빛원전은 액체가 기체보다 약 4배 이상 배출한 것을 알 수 있었고 년도별 배출 추이는 증가 내지 감소하는 경향이 나타나지 않았다. 한울원전은 액체가 기체보다 약 6배 이상 배출한 것을 알 수 있었고 년도별 배출 추이는 기체의 경우 증가하는 경향($R^2=0.8827$)이 뚜렷히 나타났다. 중수로인 월성원전은 기체가 액체보다 약 3배 정도 더 배출한 것을 알 수 있었고 년도별 배출 추이는 기체의 경우 시간이 지남에 따라 감소하는 경향($R^2=0.8448$)이 뚜렷히 나타났다. 이렇게 원전별 기체 및 액체에 대한 삼중수소 배출 특성이 나타난 만큼 부지 특성에 맞는 배출관리 목표를 설정하여 관리하는 것이 타당하다고 판단된다.

환경매체에서의 삼중수소 거동 특성 평가결과는 경수로 원전이든 중수로 원전이든 환경매체에서 삼중수소가 검출되었으며, 원전으로부터 거리에 따른 상관관계가 뚜렷히 나타남을 알 수 있었다. 다만 환경매체 분석지점이 2개 지점밖에 없는 시료의 경우 상관관계를 평가하기 어려우므로 풍향빈도를 고려한 주풍향 방향에 대해 지점 검토 및 추가 등 개선대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

또한 환경매체에서 검출된 삼중수소 방사능농도를 바탕으로 주민피폭선량을 평가한 결과 가장 유효선량이 높은 월성원전 보리 시료의 경우 연령군 1세 기준으로 연간선량 한도(1 mSv/yr)와 비교했을 때 4.5%의 미미한 수준으로 나타났다. 그리고 유효선량에 기여도가 가장 높은 것은 호흡보다는 섭취에 의한 것으로 나타났다. 현재 국내 주민피폭 선량 평가 방식은 가장 보수적인 이론치에 근거한 평가를 수행하고 있으나, 환경매체 중 삼중수소 실측치를 바탕으로 보정 적용하여 평가하는 것이 가장 정확하고 신뢰성

있는 평가방법이라 판단되며, 이를 위해서는 주풍향 방향에 대한 지점을 추가하여 실측 자료를 확보하는 것이 중요하다고 판단된다.

중수로 원전(월성)을 대상으로 인체의 삼중수소 노출정도를 평가한 결과는 원전으로부터 거리가 가까울수록 삼중수소 검출률과 노출 정도가 높은 상관관계($R^2=0.9744$)가 두드러지게 나타났다. 또한 노시료에 대한 주민피폭선량 평가결과는 대조군2인 울진군의 최대 방사능농도(120 Bq/L)를 1년간 지속적으로 피폭을 가정하더라도 일반인 선량 한도(1 mSv/yr) 대비 0.253%로 낮게 나타남을 알 수 있었다.

국내는 삼중수소에 대한 음용수 섭취기준이 없어 본 연구에서는 계산에 근거한 기준을 제시해보고자 하였다. 계산결과 보수적인 결과인 3개월 연령군의 결과값을 바탕으로 국내 방재대책법의 1/50 수준인 2,000 Bq/L가 가장 합리적인 섭취기준이라고 판단하여 제시하였다.

삼중수소는 에너지가 낮아 환경 및 인체의 영향은 미미하나 원전에서 배출 기여도가 상대적으로 높은 만큼 원전 운영으로 인해 지속적으로 배출이 되고 있고, 환경에서 검출이 되고 있으므로 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다. 특히 중수로 원전은 원전 계통 운영에서의 삼중수소 저감을 위한 기술적인 검토와 적용이 필요하며, 주변지역 주민을 위한 환경 및 인체 모니터링을 지속적으로 수행하는 관리대책이 필요할 것으로 판단된다.

또한 주민피폭선량 평가 관점에서 이론치에 의한 평가보다는 환경매체 삼중수소 실측치를 통한 평가가 정확하고 신뢰성이 있으므로 이에 대한 장기적인 계획을 수립하여 반영하여야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 한국수력원자력(주), “원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가보고서”, 1998~2013.
- [2] 한국수력원자력(주). “방사선관리연보”, 2003~2013.
- [3] 한국원자력안전기술원, “원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가보고서”, 2014.
- [4] 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, “C-14 추적 및 선량평가 기술개발“, 최종연구보고서, 2005.
- [5] 한국원자력안전기술원, “삼중수소의 생성과 그 영향평가에 관한 연구”, KINS /AR-310-87, 1994.
- [6] 전력연구원, “삼중수소 및 C-14 선량평가 기술교류회”, 2000.
- [7] 한국표준과학연구원, “액체섬광측정법”.
- [8] 한국원자력안전기술원, “환경으로 방출된 삼중수소의 환경내 거동에 관한 연구”, KINS/AR-384, 1995.
- [9] 강희동 외 3인, “감마선 핵종 분석”, 도서출판 일일사, 2002.
- [10] 영광원전 환경·안전 감시센터, “환경시료 분석을 위한 액체섬광계수기용 표준선원의 개발 및 보정에 관한 연구”, 전력산업연구개발 최종보고서, 2007.
- [11] 한국전력공사, “환경방사능 분석법 연구”, KRC-90C-JO2, 1992.
- [12] 한국원자력안전기술원, “방사능 방재 환경 규제기술 개발 : 주민피폭선량 평가지침 및 INDAC 사용자지침서”, KINS/GR-199.
- [13] 한국원자력연구소, “방사선 환경 방호기술 개발 : 육상생태계 사고영향 평가기술 개발”, KAERI/RR-2035/99.
- [14] 과학기술부고시 제2014-12, “원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향평가에 관한 규정”, 2014.
- [15] 한국원자력안전기술원, “방사선방호를 위한 환경 및 선원감시 기본지침(안)”, 2014.
- [16] 보건복지부, “국민건강영양조사”, 2007.
- [17] Wallac Company, “1220 Quantulus Liquid Scintillation Counter, Instrument

- Manual", 1995.
- [18] Packard Instrument Company, "Laboratory Manual for Liquid Scintillation Counting", 1988.
- [19] PerkinElmer, "Quantulus 1220 Liquid Scintillation Counter Instrument Manual", 2004.
- [20] Michael F. L'Annunziata, Handbook of Radioactivity Analysis, 2nd Edition, Academic press, 2003.
- [21] KINS. Manual of standard procedures for Environmental sampling and radioactivity analysis. Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/G-009.
- [22] A Canberra Company. Science and Technology, Liquid Scintillation Analysis.
- [23] RADIOCARBON, "Liquid Scintillation Spectrometry", 1994.
- [24] RADIOCARBON, "Advances in Liquid Scintillation Spectrometry", 2001.
- [25] RADIOCARBON, "International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry", 2008.
- [26] Knoll GF. "섬광검출기의 원리", In: 이수용. "Radiation Detection and Measurement", 1997.
- [27] S. J. Han, K. J. Lee, J. M. Yeom, D. Y. Shin, "A study and analysis on tritium radioactivity and environmental behavior in domestic NPPs," Journal of Radiation Protection and Research, vol.40, No.4 December, pp.267-276, 2015.
- [28] CNSC, INFO-0799, "Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium", Part of the Tritium Studies Project, 2010.
- [29] CNSC, INFO-0798, "Tritium Activity in Garden Produce from Pembroke in 2007 and Dose to the Public", Part of the Tritium Studies Project, 2010.
- [30] CNSC, INFO-0793, "Tritium Releases and Dose Consequences in Canada in 2006", Part of the Tritium Studies Project, 2009.
- [31] CNSC, INFO-0766, "Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water", Part of the Tritium Studies Project, 2008.

- [32] KHNP, "A study for the effect of tritium among residents nearby wolseong nuclear power plants," 2015.
- [33] IAEA, "Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment," A Manual Technical Report, No. 405.
- [34] IAEA, "Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency," IAEA-TECDOC-1162, 2000.
- [35] Reg. Guide 1.109, "Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10CFR Part 50 Appendix I", Rev.1, 1977.
- [36] IAEA Technical Report Series No. 472, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, 2010.
- [37] ICRP Publication No. 60, "1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection", 1990.
- [38] 한국원자력안전기술원, "방사능 방재 환경 규제기술 개발 최종보고서. 별책부록 : 주민피폭선량 평가지침 및 INDAC 사용자 지침서", KINS/GR-199 별책 1, 2000.
- [39] ICRP Publication No. 101, "Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public", 2006.
- [40] ICRP Publication No. 72, "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients", 1996.
- [41] 한국수력원자력(주), "원자력발전소 주변 방사선 환경감시 및 영향평가 체계 개선 - Part B : 주민방사선량 평가 분야(최종보고서)", 2009.
- [42] KEPCO Research Institute, "Review on the Management for Radioactive Effluent and Methodology for Setting of Derived Release Limits at Pressurized Heavy Water Reactors in Korea", 2010.