

## 삼중수소 역학 연구 사례

김수근

성균관대 의대 직업환경의학교실 교수



- 한양대 의대 의학사
- 가톨릭대 보건대학원 보건학 석사
- 동국대 대학원 의학박사
  
- 동국대 의대 조교수
- 한수원 방사선보건연구원 책임연구원
  
- 성균관대 의대 교수(07~)
- 직업환경의학전문의, 예방의학전문의

**삼**중수소는 자연으로부터 생성되는 것 외에 원전에서 중성자 방사화 과정(Neutron activation process)이나 삼중핵분열 과정(Ternary fission process) 등에 의해 생성되는 방사성 물질이다. 붕괴 과정에서 베타 입자만 방출하므로 외부 피폭에 의한 영향은 없으나 원전 작업자는 호흡, 피부 흡수, 일반인들은 음식물 섭취 등이 주된 내부 피폭 경로이다.

일반적으로 삼중수소에 의한 피폭량은 의료용 방사선, 항공기 이용으로 발생하는 피폭량보다 미미한 것으로 알려져 있다. 그러나 삼중수소로 인한 건강 영향은 최근에 많은 주목을 받고 있다.

정부와 부산시는 2014년 하반기에 해수 담수화 시설을 준공하고도 '삼중수소' 문제로 담수화 수돗물 공급을 하지 못하고 있다[1]. 2015년에는 월성원전 인근 주민의 소변에서 삼중수소가 검출돼 논란이 되고 있다[2].

### 삼중수소 역학 연구의 필요성

삼중수소는 수소의 방사성 동위원소이다. 삼중수소는 베타 입자를 방출하며  ${}^{3}\text{He}$ 을 생성한다. 반감기는 12.3년이다. 삼중수소는 다른 수소 동위원소와 화학적으로 거의 동일하고 삼중수소수(HTO), 삼중수소 가스(HT) 및 다양한 유기결합 삼중수소(OBT)의 형태로 존재한다. 대기 중 삼중수소의 대부분은 HTO의 형태로 존재한다.

삼중수소는 낮은 에너지를 방출하기 때문에 1Gy의 선량을 발생시키려면

플로늄-210의 알파 방사선보다 약 1,000배 이상의 삼중수소 봉괴가 요구된다. 또한 삼중수소의 생체 조직 내에서의 평균 비정거리는  $0.56\mu\text{m}$ 이며 최대 비정거리는 약  $6\mu\text{m}$ 이다[3].

세포는 직경이 약  $30\mu\text{m}$ 이기 때문에 삼중수소는 1개 세포를 통과할 수 없다. 따라서 삼중수소에 의한 생체의 피폭에 관해서는 내부 피폭만을 고려한다.

삼중수소로 인한 건강 영향은 최근에 많은 주목을 받고 있다. 많은 사람들은 방사능을 가진 물질에 조금이라도 노출되면 당장 큰 병이 걸릴지 모른다는 우려를 하고 있다. 이러한 우려에서 벗어나려면 삼중수소의 역학 연구 결과를 보다 잘 이해하는 것이 필요하다.

삼중수소에 의한 건강 피해의 우려를 해소하려면 양질의 방사선 피폭 데이터를 사용한 역학 연구 결과를 살펴보는 것이 많은 도움이 될 수 있다. 역학 연구는 피폭에 의한 인간의 실제 건강 영향을 평가하기 때문에 방사선 피폭에 따른 건강 위험을 추정하고 이해하는 데 있어 가장 좋은 증거이다.

핵시설의 삼중수소 배출에 따른 방사선 피폭은 자연 방사선에 기인한 것보다 훨씬 낮다. 삼중수소 배출에 따

른 선량은 매우 낮고 역학 연구에서는 높은 선량에 피폭된 방사선 작업 종사자에서 건강상 악영향이 보이지 않는 점을 감안하면, 삼중수소 위험에 관한 의미 있는 결과를 생산할 가능성은 매우 희박하다.

역학이란 질병을 포함한 건강과 관련된 이슈들의 발생, 분포, 경향과 그들의 원인 및 위험 요인 등을 조사하는 학문으로, 일반적으로 인간 집단을 대상으로 한다.

방사선 피폭의 인체 영향에 대한 과학적인 견해는 생물학적 연구와 함께 역학 연구를 토대로 이루어지며, 역학 연구의 일차적인 목적은 방사선 피폭인구 집단의 다년간 추적 조사를 통해 방사선과 질병의 관련성을 조사하고 이를 정량화하는 데 있다.

## 영국에서 수행한 연구

영국의 원자력에너지기구 소속 근로자(1980년 이전), 핵무기개발기구 소속 근로자(1983년 이전), 셀라필드 지역 근로자(1976년 이전) 등 3군(群)의 40,961명의 근로자 중에서 4,111명이 삼중수소에 피폭되었다.

삼중수소 선량은 평가되지 않았지만, 삼중수소에 피

### 표준화사망비(SMR)란?

서로 다른 두 집단의 사망률을 비교할 때 각 집단의 연령 구조가 서로 다를 경우 노령 인구가 더 많은 집단의 사망률이 더 높은 것처럼 보여지게 된다. 따라서 이를 고려하여 예상되는 사망자 수를 산출한 다음 실제 사망자 수에 대한 비를 구한 값이 표준화사망비(SMR, Standardized Mortality Ratio)이다.

표준화사망비가 1.0보다 낮으면 예상되는 사망자 수에 비해 실제 사망자 수가 적다는 의미이고, 1.0보다 높으면 예상되는 사망자 수에 비해 실제 사망자수가 많다는 의미이다. 위 역학 연구의 경우 삼중수소에 피폭된 근로자 집단에 삼중수소에 피폭되지 않은 근로자 집단의 사망률을 적용하여 구한 예상 사망자 수에 비해 실제 사망자 수가 적었다는 것이 있고, 이는 삼중수소 피폭 근로자 집단의 사망률이 삼중수소에 피폭되지 않은 근로자 집단의 사망률보다 증가하지 않고 오히려 감소했다는 의미이다.



〈그림〉 삼중수소의 안전성(〈에너지경제〉 카드뉴스)

폭된 근로자의 모든 사인, 모든 암, 암 이외의 모든 사인에 대한 표준화사망비(SMR)[4]는 1.0보다 훨씬 낮았다.

삼중수소에 피폭된 근로자와 그렇지 않은 방사선작업 종사자의 비교에서 모든 사인에 대한 위험이 0.92(95% CI[5] : 0.83 – 1.01), 암 이외의 원인에 대한 위험이 0.88(95% CI : 0.78 – 0.98)로 삼중수소 피폭 근로자에서 통계적으로 유의하게 사망률이 감소하였다[6].

Fraser 등[7]은 영국원자력에너지기구(UKAEA) 코호트를 1986년까지 추적한 연구에서 1946년부터 1986년 까지 사망한 1,506명을 근거로 한 암 사망률은 국가 평균보다 20% 낮았다.

1971년부터 1984년까지 1,699명의 암 등록을 근거로 한 암 발병률은 국가 평균보다 12% 낮았다.

Atkinson 등[8]은 리슬리(Risley)와 쿠체스(Culcheth) 시설에 1980년과 1997년 사이에 채용된 근로자를 추가하고 1997년까지 사망률 추적 연구를 연장하면서 업데이트된 UKAEA 코호트를 연구하였다.

최종적으로 코호트에 포함된 인원은 총 51,367명이

었고, 그 중 51%가 방사선작업 종사자였으며, 내부 선량은 평가되지 않았다.

평균 연간 외부 선량은 새로 추가된 개인이 1.57mSv인데 반해 기존의 코호트(1946~1979년)는 4.26mSv였다. 삼중수소 추적 관찰 근로자에서 모든 사인에 대한 SMR은 0.69(95% CI : 0.62 – 0.76)이었고, 모든 암에 대한 SMR은 0.71(95% CI : 0.59 – 0.85)이었다.

삼중수소를 생산하는 데 사용되었던 채플크로스 원전에서 1955년부터 1995년까지 고용된 적이 있는 영국핵연료공사(BNFL)와 UKAEA 근로자 2,628명의 사망률과 암 발병률을 평가했다.

얼마나 많은 근로자가 삼중수소에 피폭되었는지는 명확하지 않다. 사망 데이터는 1955년부터 1995년까지, 암 등록 데이터는 1971년부터 1991년까지 이용하였다. 사망률은 국가 전체의 사망률에 비하여 낮았다. 암 표준화등록률(SRR)은 1.0 미만이었다[9].

## 미국에서 수행한 연구

1952년부터 1980년까지 서배너 리버 사이트(SRS)의 백인 남성 근로자 9,860명의 코호트에서 사망률을 평가했다.

근로자의 내부 피폭은 직업상 피폭 선량의 약 15%였다. 다만 삼중수소나 다른 방사성핵종에 대한 특정한 선량 평가 정보는 사용할 수 없었다.

약 5,000명의 전·현직 근로자는 삼중수소에 대한 직업적 피폭을 경험했고, 약 800명의 직원이 삼중수소로부터 0.5mSv를 초과한 피폭을 받았으며, 1명의 근로자는 연간 30mSv를 초과했다. 이들은 미국 백인 남성과 비교하여 모든 사인과 모든 암으로 인한 SMR은 1.0 이하였다[10].

## 캐나다에서 수행한 연구

캐나다원자력공사(AECL) 근로자들은 삼중수소에 대한 내부 피폭 기록이 존재한다. 코호트의 총 인/년은 157,100이었고, 평균 추적 기간은 17.5년이었다. 모든 사인의 경우의 SMR은 0.77(95% CI : 0.72 – 0.83)이었고, 모든 암의 경우는 0.87(95% CI : 0.76 – 0.99)이었다.

삼중수소 선량은 이 연구에서 이용되지 않았지만, 삼중수소의 피폭 정보를 확보하고 있기 때문에 근로자의 향후 추적 연구에서 삼중수소의 인체 영향을 조사할 수 있을 것으로 기대된다[11, 12].

Zablotska의 연구[13]에서 캐나다의 방사선작업 종사자에 대한 내부 선량은 주로 삼중수소에서 기인하였으며, 삼중수소 선량은 작업자의 정기 소변 검사로 평가되었고, 삼중수소 피폭 정보를 확보하고 있다. 외부 선량을 합한 작업자들의 평균 누적 선량은 13.5mSv이었다.

이 연구에서 모든 사인의 경우 예상치 2,538명 대비 1,599명의 사망자가 관찰되었다(SMR=0.63, 95% CI : 0.60 – 0.66). 모든 암의 경우 예상치 721명 대비 531명의 사망자가 관찰되었다(SMR=0.74, 95% CI : 0.68 – 0.80).

## 결어

지역 주민의 불안을 해소할 수 있도록 삼중수소의 인체 영향에 대한 객관적이고 과학적인 정보가 필요하다.

많은 사람들은 방사능을 가진 물질에 조금이라도 노출되면 당장 큰 병이 걸릴지 모른다는 공포를 가지고 있다. 대중 매체를 통해 정제 없이 전달되었던 수많은 정보는 심각한 방사능 공포심과 사회적 부작용을 초래하여 불필요한 소모적 논쟁을 유발하고 있다.

특히 가장 민감하게 생각하는 인체 영향 부분에 있어 전문가적 소견이 부족한 대중에게 생소한 방사선 측정 수치의 비교 제시는 더욱 큰 불안감만을 증폭시키는 결과를 가져오고 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이 직업상 삼중수소와 다른 유형의 방사선에 피폭된 방사선작업 종사자의 여러 코호트 및 환자-대조군 연구가 수행되었다.

삼중수소는 근로자와 일반인에 대한 총 방사선 피폭 중에서 일부에만 해당되며 삼중수소에 의한 피폭 선량은 전체 방사선의 일부이다.

현재까지 삼중수소 피폭 여부에 따른 역학 연구에서 전체 사망률, 암 사망률에 따른 사망률 증가를 확인할 수 있는 결과는 없었다.

지금까지의 연구는 삼중수소의 피폭 선량을 이용할 수 없었지만, 앞으로 캐나다 코호트는 삼중수소 피폭 선량 자료를 이용한 캐나다 원자력산업 종사자의 사망률을 평가하기 위한 연구가 기대된다[14].

그러나 이러한 연구 또한 광범위한 역학 연구와 전체 방사선 피폭에서 초과 위험이 발견되지 않은 사실에 근거하여, 현재 환경이나 직업적 수준에서 삼중수소에 피

폭된 사람들의 암 발병률 또는 사망률이 증가했다는 결과를 도출할 가능성은 매우 낮아 보인다. ●

#### 〈참고 문헌〉

1. 민영규 기자 '삼중수소'에 발목 잡힌 부산 해수담수화 수돗물, 연합뉴스, 2015/02/16  
<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2015/02/12/0200000000AKR20150212091800051.HTML>
2. 박주영 기자. 월성원전 주민 소변서 '삼중수소' 검출…인체 영향은, 연합뉴스, 2016/09/07  
<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2016/09/06/0200000000AKR20160906100700063.HTML?input=1195m>
3. 김희근, 공태영, 정우태. 삼중수소 피폭방사선량 평가의 경향과 이슈에 대한 고찰, 방사선방어학회지 2011; 36(2): 99–106
4. 표준화사망비(SMR, Standard Morality Ratio)는 피폭군의 사망률을 일반 인구의 기대값에 비교한 것으로 1미만이면 피폭으로 인한 발병이나 사망이 증가하지 않았다는 것이다.
5. CI (Confidence Interval): 모수에 대한 점추정치의 신뢰구간으로 모수의 범위를 확률로 보여 주는 구간이다.
6. Carpenter LM, Higgins D, Douglas AJ, Maconochie NES, Omar RZ, Fraser P, Beral V, and Smith PG, 1998. Cancer mortality in relation to monitoring for radionuclide exposure in three UK nuclear industry workforces. British Journal of Cancer 78: 1224–1232.
7. Fraser P, Carpenter L, Moconochie N, Higgins C, Booth M and Beral V, 1993. Cancer mortality and morbidity in employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946–86. British Journal of Cancer 67: 615–24.
8. Atkinson WD, Law DV, Bromley KJ, and Inskip HM, 2004. Mortality of employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946–97. Occupational and Environmental Medicine 61: 577–585.
9. McGeoghegan D and Binks K, 2001. The mortality and cancer morbidity experience of employees at the Chapelcross plant of British Nuclear Fuels plc, 1955–95. Journal of Radiological Protection 21: 221–250.
10. Cragle DL, McLain RW, Qualters JR, Hickey JLS, Wilkinson GS, Tankersley WG, and Lushbaugh CC, 1988. Mortality among workers at a nuclear fuels production facility. American Journal of Industrial Medicine 14: 379–401.
11. Howe GR, Weeks JL, Miller AB, Chiarelli AM and Etizadi-Amoli J, 1987. A study of the health of the employees of Atomic Energy of Canada Limited IV. Analysis of mortality during the period 1950–1981. AECL-9442.
12. Gribbin MA, Weeks JL, and Howe GR, 1993. Cancer mortality (1956–1985) among male employees of Atomic Energy of Canada Limited with respect to occupational exposure to external low-linear-energy-transfer ionizing radiation. Radiation Research 133(3):375–80.
13. Zablotska LB, Ashmore JP, and Howe GR, 2004. Analysis of mortality among Canadian Nuclear Power Industry Workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. Radiation Research 161: 633–641.
14. Canadian Nuclear Safety Commission 2010. Health effects, Dosimetry and Radiological Protection of tritium