

시료 채취 조건 및 검사방법에 따른 지하수내 섬유상 물질 검출 양상에 관한 연구

동국대학교 의과대학 예방의학교실*, 병리학교실**,
서울대학교 보건대학원***

김지용* · 김정란** · 정해관* · 임현술* · 백남원***

— Abstract —

Effect of Sampling and Analytical Methods on the Fibrous Materials from the Ground Water

Ji-Yong Kim*, Jung Ran Kim**, Hae-Kwan Cheong*,
Hyun-Sul Lim*, Nam-Won Paik***

Department of Preventive Medicine and Department of Pathology**,
College of Medicine, Dongguk University
School of Public Health, Seoul National University****

Authors surveyed the ground water near the waste disposed from a fiberglass production factory to confirm the presence of glassfiber in the water and to determine the effect of sampling conditions and storage on the recovery of fibrous materials in the ground water.

Sample was collected at every 4 hours for 48 hours consecutively. After finishing the 48 hours sample, water sampling was done from each tap after repeated turning on and off the water for 30 seconds at each time. Sample was collected in the two 1.5 liter polyethylene bottle after vigorously shaking the bottle with the same water several times with the flowing tap water. At each paired sample, one bottle was stored stand still at room temperature, and the other sample was filtered immediately after sampling. Water was filtered on the Mixed Cellulose Ester filter with negative pressure. Each sample was divided into upper and lower layer. The other bottle was stored at room temperature standstill for 7 days and filtered in the same fashion as the other pair of sample did. Each MCE filter was divided into 4 pieces and one piece was treated with acetone to make it transparent. Each prepared sample was observed by two researchers under the light and polarizing microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray microanalysis. Fibers were classified by the morphology and polarizing pattern under the polarizing microscope, and count was done.

1. There was a significant fluctuation in number of the fibers, but there was no specific demonstrable pattern.

2. Non-polarizing fibers frequently disappeared after 7 days's storage. But cluster of fibers were found at the wall of the same container by scratching technique.

3. Polarizing fibers were usually found in between the filter and the manicure pasted area. Possible explanations for this phenomenon will be that either these fibers are very light or have electronic polarity. Hence, these fibers are not able to be attached on the surface of slide glass.

4. Under the scanning electron microscopic examination, the fibers which are not refractive under the light microscopy were identified as glassfiber. Other fibers which is refractive under the polarizing microscopy were identified as magnesium silicate fibers.

It is strongly suggested that development of standardized method of sample collection and measurement of fibrous material in the water is needed.

Key Words : glass fiber, ground water, magnesium silicate fiber, sample collection technique

I. 연구 배경

1994년 10월경 인천시 고잔동의 유리섬유 제조공장 주변의 주민들에게서 집단적으로 피하종양이 발생하였으며 소화기계 암으로 사망하는 사례가 있었다는 언론 매체의 보고가 있었다(환경운동, 1994). 문제가 된 유리섬유 공장은 20년 전인 1974년 9월 가동하였는데, 유리를 재료로 하여 유리솜을 뽑아 내어 파이프 커버 등 보온용 유리솜을 만드는 공장으로 연간 약 630만 톤 정도의 유리섬유를 생산하고 있으며 시기에 따라 차이가 많으나 평균 40여 명의 근로자가 일하고 있다. 최근 5년간은 유리섬유를 직접 제조하지 않고 원료를 수입하여 제품 생산만을 하고 있었다. 이 공장은 인근 주거지역에 비하여 비교적 고지대에 위치하고 있으며 생산된 제품 중 불량품 등을 주거지역과 인접한 공터에 가동 이래 계속

매립하여 왔으며 일부는 야적하였다. 폐기물의 발생량은 연간 60여 톤으로 1994년 당시 부지 내에 보관 중이던 폐기물은 700 여 톤에 달하였으며 1995년 초 매립한 유리섬유를 포함하여 부지 내 모든 폐기물을 집단 매립지로 옮겼다. 주민들은 그 동안 야적한 유리섬유의 비산으로 인한 생활불편 및 건강상의 장애를 계속 호소하였으며, 폐기 과정에서 주민들의 상수원인 우물을 매립하여 지하수가 오염되었다고 주장하였다. 이에 본 연구자들은 1995년 2월 현장 조사를 통해 지하수의 수질 검사 및 역학조사를 시행한 바, 음용수로 사용하던 지하수에서 섬유상 물질을 발견하였다고 보고한 바 있다(임현술 등, 1995). 또한 주민의 피하종양 조직을 광학현미경으로 관찰한 바 정상 조직과는 다른 양상의 지방 조직의 과증식 소견을 보였으며 편광현미경 및 전자현미경상 편광이 되는 섬유상 물질을 관찰하여 유리섬유에 의한 건강장해로 의심하였다.

Table 1. 채취 시기별 시료 채취 방법 및 분석 방법에 따른 섬유상 물질 확인 결과

일시	1995. 2 ¹⁾	1995. 10 ²⁾	1995. 12 ³⁾
실시 기관	동국대학교 의과대학	국립환경연구원	동국대학교 의과대학
채취 방법	Polypropylene bottle	Polyethylene bottle	Polyethylene bottle
채취 횟수 및 양	1회 50ml	1회 200ml	1회 1.0 l
분석방법	광학현미경	주사전자현미경	광학현미경
결과	발견됨	발견 안됨	발견 안됨

1) 임현술 등, 1995

2) 조수현 등, 1995

3) 동국대학교 의과대학 내부 실험 자료

그러나 1995년 8월 국립환경연구원 용역 팀은 동일 지역에 대하여 조사한 결과 지하수에서 위와 같은 소견을 관찰하지 못했다고 하였으며 이에 따라 피하종양과 유리섬유와의 관련성을 부인하는 결과를 발표하였다(조수현 등, 1995). 본 연구자들도 동년 8월부터 12월까지 4차례에 걸쳐 지하수를 채취하여 섬유상 물질의 존재를 확인하고자 하였으나 역시 발견할 수가 없었다. Table 1은 위의 조사들의 일시, 채취 방법, 채취 횟수 및 양, 분석 방법과 조사의 결과를 도표로 비교해 본 것이다.

표에서 보는 바와 같이 매 조사 방법이나 분석 방법의 차이에 따라 상이한 결과가 있었으며 이는 아직까지 수증 섬유상 물질에 대한 표준화된 공정 시험법이 확립되지 않았다는 점에서 각 방법에 대한 검증이 필요하다고 보겠다(NIOSH, 1989, Brackette, 1992).

따라서 본 연구는 고잔동 지역의 지하수내에 섬유상 물질이 과연 존재하는지를 확인하고, 섬유상 물질의 존재가 확인되는 경우 채취 시간이나 보관 기간에 따라 다른 양상으로 나타나는지를 살펴보고, 섬유상 물질의 물리 화학적 성상을 확인함으로써 추후 지하수내 섬유상 물질을 확인하기 위한 적절한 방법을 고안하기 위한 기초 자료로 삼는 것을 목적으로 하였다.

II. 연구 대상 및 방법

1) 시료 채취 대상

공장에 가장 인접한 가구 중 피부 종양이 발생한 3 가구의 지하수를 대상으로 하였다. 대조시료로는 피부 종양이 발생하지 않고 지하수계가 다른(조수현 등, 1995) 인근 지역의 수도물 2 개소, 경주 지역 지하수 2 개소, 증류수 3 개를 이용하였으며 각 분석 단계마다 공시료를 3 개씩 만들어 보정하였다.

2) 시료 채취 방법

피부 종양이 발생한 3 가구의 지하수는 지하수펌프 가동 후 경과된 시간에 따른 차이를 살펴보기 위하여 각 가구마다 지하수 펌프를 계속 가동시킨 뒤 2개의 1.2 l 폴리에틸렌 병에 매 4시간마다 48 시간에 걸쳐 총 12 개의 시료를 채취하였다. 3 개소 모두 채취 당시 현재 거의 석달간 지하수 펌프 가동

을 하지 않은 상태로 한 가구의 지하수는 펌프가동 시작과 동시에 시료를 채취하였으며 다른 2 군데의 지하수는 6 시간 이상 틀어 놓은 뒤부터 시료를 채취하기 시작하여 펌프에 의한 지하수 내부 환경의 활성화 여부에 따른 섬유상 물질의 존재 여부를 살펴본다.

펌프 가동이 이물질의 발생에 어떠한 영향을 미치는 가를 살펴보기 위하여 48 시간 동안 채취가 모두 끝난 후 지하수의 펌프를 틀었다가 잠그는 동작을 1 분간 3회 연속하여 행한 뒤 다시 한 차례 시료를 채취하였다.

또한 보관 상태에 따른 발견 성상의 차이를 알아보기 위하여 채취된 2개의 시료중 하나는 채취 즉시 현장에서 여과하였으며 다른 하나는 7일간 상온 보관한 뒤 여과를 하여 분석하여 그 결과를 비교하였다. 시료를 담을 용기는 채취하기 전 대상 지하수로 3번 이상 충분히 행군 뒤 시료를 채취하였다.

3) 시료 전처리

1 l 여과장치(Millipore, Glassware, USA)에 MCE filter(mixed cellulose ester membrane filter, AA type, 0.8 μ m pore size, Millipore Co., USA)를 설치한 뒤 진공 펌프의 압력을 300-400 mmHg로 하여 여과를 시행하였다. 여과는 매번 약 500 ml의 양을 하였으며 여과 세트는 여과 전후에 걸쳐 증류수 100 ml로 충분히 행구었다.

여과 방법은 부유 물질과 침전물질의 양상을 살펴보고자 폴리에틸렌 병의 내용물을 이등분하여 상층액과 하층액으로 나누어 여과하였으며, 이는 현장에서 즉시 시행한 것이나 7일간 상온에서 보관한 시료에 모두 동일한 방법으로 시행하였다.

보관이 오래될수록 채취된 이물질이 여과되지 않고 채취 용기에 계속적으로 부착되어 있을 수 있다는 가정 하에 7일간 보관된 채취 용기의 시료를 충분히 흔들어 모두 여과시키고 난 빈 용기의 중간을 자른 뒤, MCE 여과지를 이용하여 내부를 훑어 내용물을 검사하였다.

여과한 여과지 및 용기 내부를 훑은 여과지는 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, 이하 NIOSH)의 공정시험법 7400에 제시한 전처리 방법에 따라, 상온에서 건조시킨 뒤 외과용 수술 칼로

자로 잘라 슬라이드 글라스에¹ 올려놓고 acetone 증기를 이용해 투명화시켰다(NIOSH, 1994). 이를 상온에서 건조시킨 뒤 여과지 위에 커버 글라스를 조심스럽게 덮었다. 이때 다른 물질의 침입이나 화학적 반응 등을 염려하여 트리아세틴(triacetin)은 사용하지 않았다. 커버 글라스 주위는 매니큐어(nail polish)를 이용하여 밀봉하였다(NIOSH, 1994). 각 단계마다 공시료를 각각 3개씩 사용하여 시료 전처리 과정에서 발생할 수 있는 오염에 의한 영향을 보정하고자 하였다.

4) 시료 분석

분석은 정확성을 기하기 위해 산업위생 전문가 1인과 유리섬유 및 섬유상물질에 대한 검경 경험이 풍부한 해부병리학 전문의 1인이 시료 채취된 여과지를 관찰하기 전에 우선 현장에서 구한 유리섬유 시료를 충분히 관찰하여 그 형태학적 특성을 충분히 숙지한 후 시행하였다. 채취된 시료를 관찰하는데 있어서는 다인용 현미경을 이용하여 두 전문가가 동시에 동일 현미경 시야상의 이물질을 관찰하면서 두 명이 모두 동의한 경우에만 섬유상 물질로서 인정하였다. 우선 광학현미경(Light microscope, BH-2, Olympus, 일본)으로 섬유상 물질을 관찰한 뒤 각 섬유상물질에 대하여 편광현미경(Polarizing

microscope, BH-2, Olympus, 일본)으로 편광 여부를 관찰하였다.

또한 발견된 섬유상 물질의 물리 화학적 성상을 관찰하고자 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, XL30, Philips, 네델란드) 및 에너지확산분광기(Energy Dispersive Spectrometers, EDS, PV9760-68, EDAX International, 네델란드)를 이용하여 관찰하였다. 주사전자현미경으로 관찰시 시료가 채취된 여과지에 전기전도성을 주기 위해 시편 holder에 carbon tape를 이용하여 고정된 후 진공관에서 gold coating 하였다(Beckett, 1973).

Ⅲ. 연구 결과

1) 채취 시간에 따른 소견

4시간 간격으로 48시간 동안 채취한 시료는 3가 구 모두 시간에 따라 차이가 심하였다(Fig 1, 2). 시간에 따라 여과된 모든 이물질들의 성분을 분석할 수 없었으나 여과지를 시간대별, 상하층별, 보관 시기별로 나누어 나열한 바 여과된 물질의 성분과 양의 변화가 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다(Fig 1, 2). 관찰되는 양상은 매 시간에 따라 달랐는데 일부 시료는 오염이 심하고 기름 냄새가 심하였으나

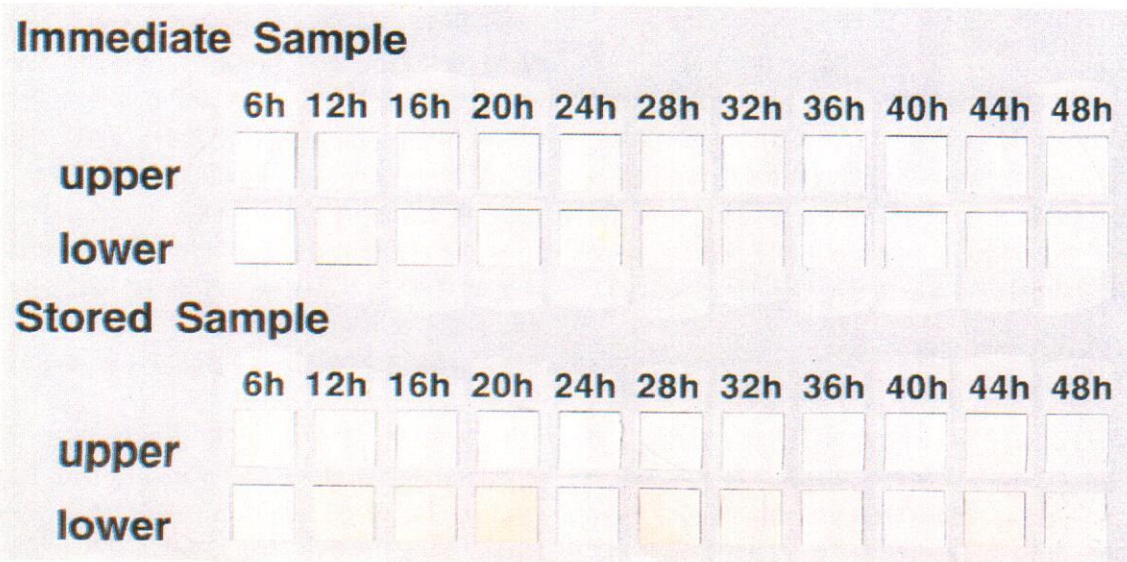


Fig. 1. 채취 시간 및 방법에 따른 여과내용물 변화 (김○○씨택 지하수)

동일 가구의 다른 시료에는 이러한 소견 없이 식물성 섬유상 물질만이 엉켜서 나오는 경우도 있었으며 모래와 같은 성분이 다량 검출되는 곳도 있었다. 또한 거의 이물질이 검출되지 않는 시료도 있었다.

섬유상 물질은 3가구 모두에서 검출되었으나 시간 별로 검출이 되기도 하고 전혀 검출이 되지 않는 등 특별한 패턴을 보이지는 않았다(Table 2, 3, 4). 또한 물질의 중량이나 밀도에 따라 시료간에 분포에 차이가 나는가를 살펴보기 위하여 상층과 하층을 나

누어 관찰하였으나, 시료의 보관기간과 무관하게 상층과 하층간에 특별한 차이를 보이지는 않았다.

섬유상 물질은 광학현미경 소견상 직경과 길이의 비가 모두 1:20 이상인 큰 주상형태로 보였으며 석면과는 쉽게 구별되었다(Fig 3, 4). 편광현미경 소견상 섬유상 물질은 크게 두 가지 형태로 분류할 수 있었다. 즉, 광학현미경 하에서는 전체적인 외관은 차이를 발견할 수 없었지만 보통 길이가 50-150 μm , 직경이 4-6 μm 인 섬유상 물질은 편광이 되지 않는

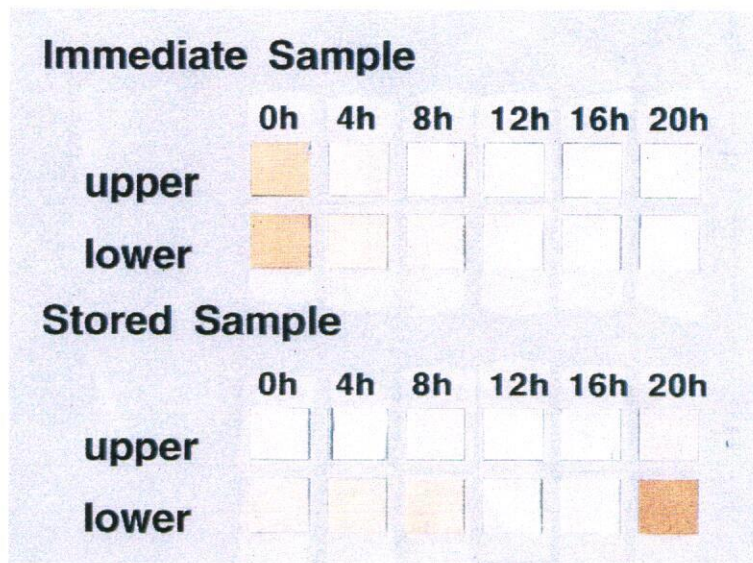


Fig. 2. 채취 시간 및 방법에 따른 여과내용물 변화 (변○○씨택 지하수)

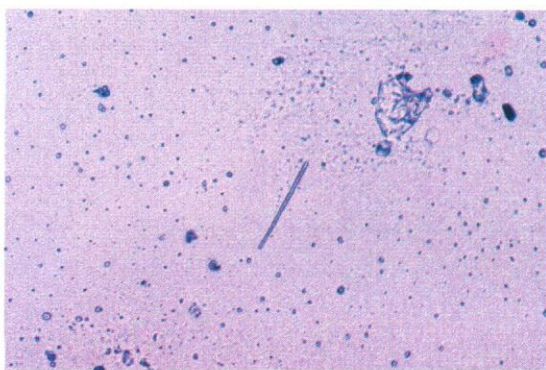


Fig. 3. 유리 섬유의 광학현미경 소견(배율 100배)

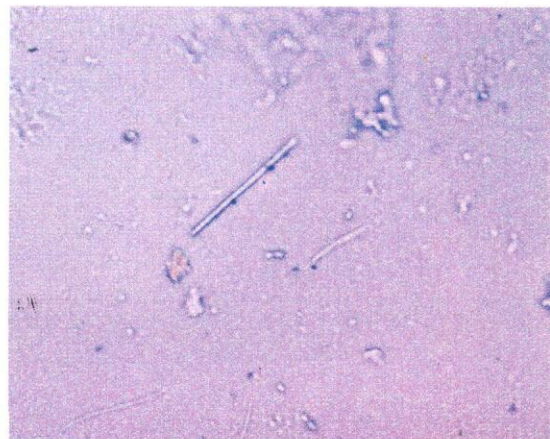


Fig. 4. 유리 섬유의 편광현미경 소견(배율 100배)

Table 2. 채취 시간 및 방법에 따른 섬유상 물질의 검출 소견 (민○○씨택 지하수)

시료번호	펌프가동후 시료채취시간	채취 즉시 분석				7일간 보관된 분석			
		상층		하층		상층		하층	
		P(-)	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)	P(+)
1	6	-	+	+	+	-	+	-	-
2	8	-	-	-	-	-	-	-	-
3	12	-	-	-	-	-	-	-	+
4	16	-	-	-	-	-	-	-	-
5	20	-	+	+	-	-	-	-	+
6	24	-	+	+	-	-	-	-	-
7	28	-	+	-	+	-	-	-	-
8	32	+	-	-	-	-	-	-	-
9	36	-	-	-	-	-	-	-	-
10	40	+	-	-	+	-	-	-	+
11	44	+	-	-	+	-	-	-	+
12	48	-	-	-	-	-	+	-	-
13	펌프연속개폐	-	-	-	-	-	-	-	-

P(+): 편광 양성인 섬유상 물질 P(-): 편광 음성인 섬유상 물질
 +: 검출되었음 -: 검출되지 않았음

Table 3. 채취 시간 및 방법에 따른 섬유상 물질의 검출 소견 (김○○씨택 지하수)

시료번호	펌프가동후 시료채취시간	채취 즉시 분석				7일간 보관된 분석			
		상층		하층		상층		하층	
		P(-)	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)	P(+)
1	6	-	-	-	-	+	+	-	-
2	8	-	-	-	-	-	-	-	-
3	12	-	-	-	-	-	+	-	-
4	16	-	-	-	+	-	-	-	-
5	20	+	-	-	-	-	-	-	-
6	24	+	-	+	+	-	+	-	+
7	28	-	-	-	-	-	-	-	-
8	32	-	-	+	-	-	-	-	-
9	36	-	-	-	-	-	-	-	-
10	40	-	-	-	-	-	-	-	+
11	44	-	-	+	-	-	-	-	+
12	48	-	-	-	-	-	+	-	-
13	펌프연속개폐	-	-	+	-	-	-	-	+

P(+): 편광 양성인 섬유상 물질 P(-): 편광 음성인 섬유상 물질
 +: 검출되었음 -: 검출되지 않았음

Table 4. 채취 시간 및 방법에 따른 섬유상 물질의 검출 소견 (변○○씨택 지하수)

시료번호	펌프가동후 시료채취시간	채취 즉시 분석				7일간 보관된 분석			
		상층		하층		상층		하층	
		P(-)	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)	P(+)
1	0	-	-	+	+	-	-	-	+
2	4	-	-	-	-	-	+	-	-
3	8	-	+	-	-	-	-	+	+
4	12	-	-	-	-	-	-	-	-
5	16	-	-	-	-	-	-	+	-
6	20	-	-	-	-	-	-	-	-
7	펌프연속개폐	-	-	+	+	-	-	-	-

P(+): 편광 양성인 섬유상 물질 P(-): 편광 음성인 섬유상 물질

+: 검출되었음 -: 검출되지 않았음

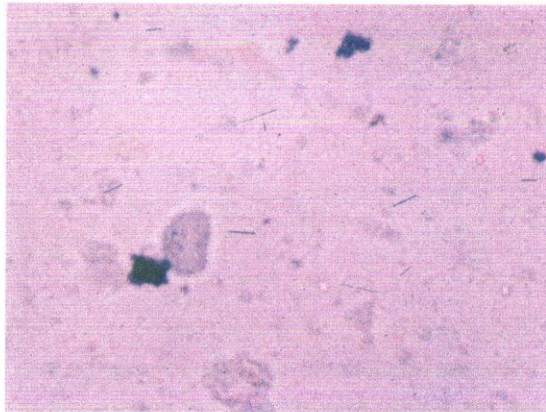


Fig. 5. 규산 마그네슘 섬유상 물질의 광학현미경 소견 (배율 100배)



Fig. 6. 규산 마그네슘 섬유상 물질의 편광현미경 소견 (배율 100배)

반면, 길이는 비슷하지만 직경이 약 1-2 μm 으로 약간 작은 섬유상 물질은 이중반사를 보여 편광이 되었다(Fig 5, 6). 다른 대조시료나 공시료 중에서 위와 같은 섬유상 물질이 보이는 경우는 없었다.

편광 여부에 따른 두 가지의 섬유상 물질은 시간에 따라 각각 다른 양상으로 검출되었으며 역시 특별한 패턴을 보이지는 않았다.

2) 보관 시간에 따른 소견

3가구의 지하수를 시료 채취 현장에서 즉시 채취하여 분석한 것과 7일간 상온에서 보관된 후 분석한 시료는 각각 66개로서 그 차이를 살펴보았다. 편광

이 되지 않는 섬유상 물질은 채취 즉시 여과한 66개 시료중 14개 시료에서 관찰이 되었으나 7일간 보관된 지하수 시료에서는 66개의 시료중 3개의 시료에서만 관찰되어 보관으로 인한 차이가 있음을 알 수 있었다. 반면에 편광이 되는 섬유상 물질은 채취 즉시 분석한 것중 13개의 시료에서, 7일간 보관된 후 분석한 것중 17개의 시료에서 검출되어 보관에 의한 분석 사이에 큰 영향이 없었음을 알 수 있었다 (Table 2, 3, 4).

3) 채취 방법과 채취 용기에 따른 소견

지하수를 그냥 계속 틀어 놓으면서 채취한 시료보

다 지하수를 틀었다가 잠그는 동작을 1분간 3회 연속하여 행한 뒤 채취한 시료에서는 이물질이 다른 시료에 비해 더 많이 존재하였으며, 이로 인해 광학현미경의 시야를 가로막아 정확한 소견을 관찰하기 힘들 정도였다(Fig 1, 2).

또한 보관 시간에 따른 차이의 원인을 알아보고자, 채취 즉시 여과하여 관찰한 경우에는 섬유상 물질이 관찰되었으나 7일간 보관 후 여과하여 관찰하였을 때는 섬유상 물질이 관찰되지 않았던 시간대의 용기를 선택하여 내부를 여과지로 훑어보았다. 이 여과지를 투명화하여 광학현미경 및 편광현미경으로 관찰한 결과 다수의 편광이 되지 않는 섬유상 물질이 관찰되었다(Fig 7). 그러나 이 경우 편광이 되는 섬유상 물질은 발견할 수 없었다. 섬유상 물질이 전혀 관찰되지 않았던 1995년 10월 동일 지역에서 채취한 용기도 동일한 방법으로 용기 내부를 훑어 관찰한 결과 역시 다수의 편광이 되지 않는 섬유상 물질을 발견할 수 있었다. 그러나 다른 대조시료나 공시료에서 위와 같은 소견을 보이는 경우는 없었다.

4) 섬유상 물질의 분포

보통 공기 중 측정시에 여과지에 여과되는 섬유상 물질이나 이물질들은 여과지의 중심부위에 집중되는 소견을 보인다. 그러나 물에 대한 검사의 경우 진공상태 속에서 물을 여과시키는 과정에서 중심부에 압력이 주변부에 비해 커져 소용돌이 현상을 일으키며 섬유상 물질 등 이물질들은 주로 압력이 적은 주변부로 몰리게 되어 주로 주변부에서 관찰이 되는 반면 중심부에는 거의 관찰되지 않았다.

편광이 되지 않는 섬유상 물질은 광학현미경 소견상 여과지 위에서 관찰된 반면, 편광이 되는 섬유상 물질은 여과지 위뿐만 아니라 커버 글라스 아래 매니큐어로 밀봉된 내부 중 한쪽으로 몰려 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 다른 대조군이나 공시료에서는 관찰되지 않는 소견들로서 편광이 되는 섬유상 물질들이 몰려있는 방향은 시료 처리한 슬라이드를 보관하기 위해 세워두었을 경우 밑 쪽으로 몰려있음을 알 수 있었다(그림 1).

또한 광학현미경 및 편광현미경으로 관찰된 섬유상 물질들의 물리 화학적 성상들을 알아보기 위하여 gold coating 후 주사전자현미경으로 관찰하였는데

편광이 되지 않는 섬유들은 표시한 자리에서 쉽게 관찰할 수 있었으나, 편광이 되는 섬유상 물질들은 표시를 한 자리에 고착되지 않고 소실되는 경우가 많아 관찰하기가 상당히 어려웠다.

5) 섬유상 물질의 물리화학적 성상

위에서 언급한 바와 같이 관찰된 섬유상 물질은 크게 두 종류로서 광학현미경상 편광이 되지 않는 섬유상 물질과 편광이 되는 섬유상 물질로 나눌 수 있었는데(Fig 8, 9), 이들의 화학적 구성 차이를 확인하기 위하여 주사전자현미경(SEM) 및 에너지확산분광기(EDS)를 사용하여 분석을 하였다. 그 결과 편광이 되지 않는 섬유상 물질은 규소와 칼슘이 주된 구성 성분으로서 폐기물 현장에서 습득한 유리섬유의 구성성분과 동일한 데 반해(Fig 10), 편광이 되는 섬유상 물질의 주된 구성 성분은 규소와 마그네슘이었다(Fig 11).

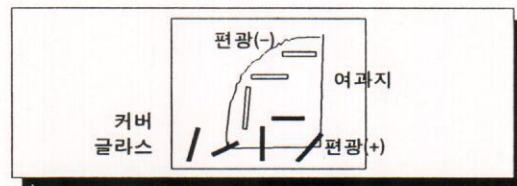


그림 1. 슬라이드 위의 섬유상 물질의 분포

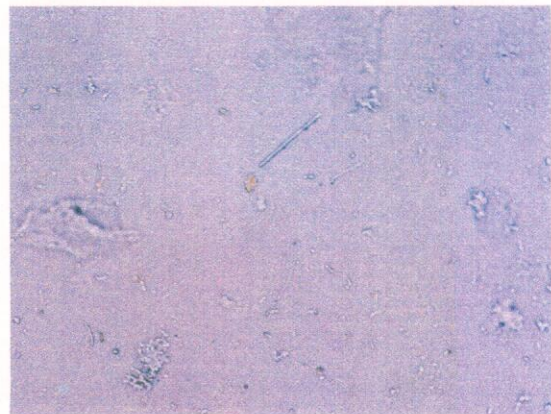


Fig. 7. 규산 마그네슘 섬유상 물질의 광학현미경 소견 (배율 100배)

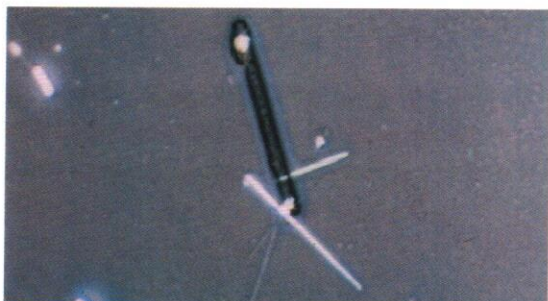


Fig. 8. 채취 용기를 닦은 결과 검출된 유리 섬유의 편광현 미경 소견(배율 200배)



Fig. 9. 유리 섬유와 규산 마그네슘 섬유상 물질의 전자현 미경 소견(배율 400배)

Prst:None

Lsec:151

20:46:10

7-12-96

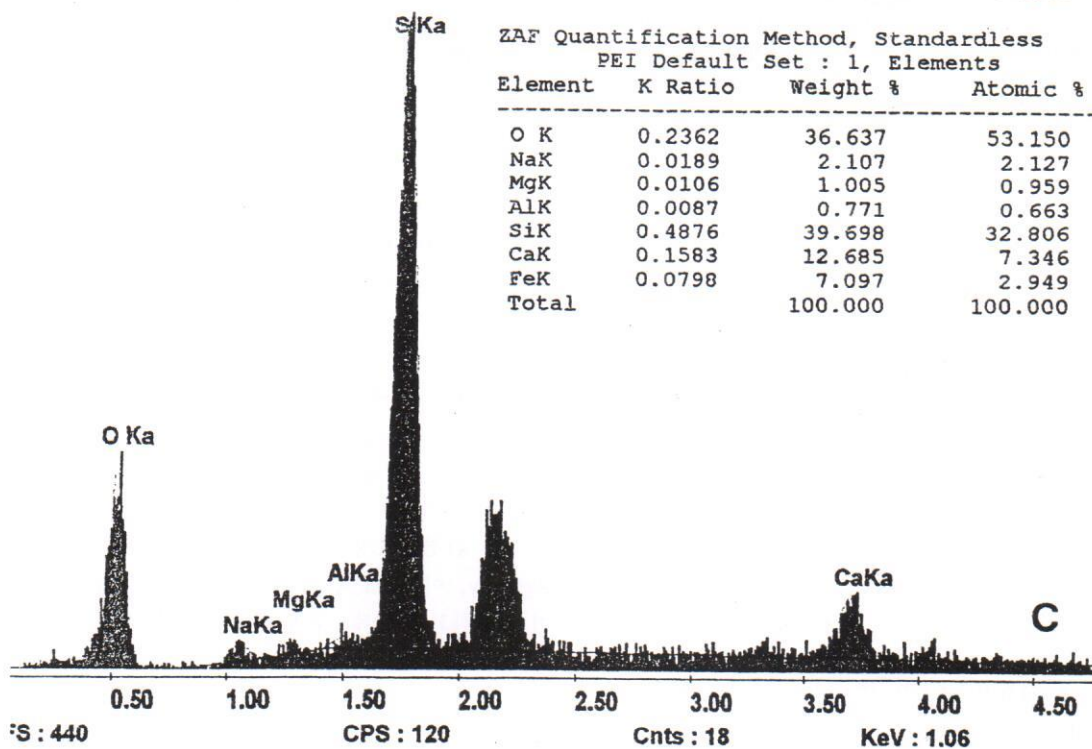


Fig. 10. 유리 섬유의 에너지확산분광기 분석 결과

Prst:None

Lsec:84

16:11:18

6-14-96

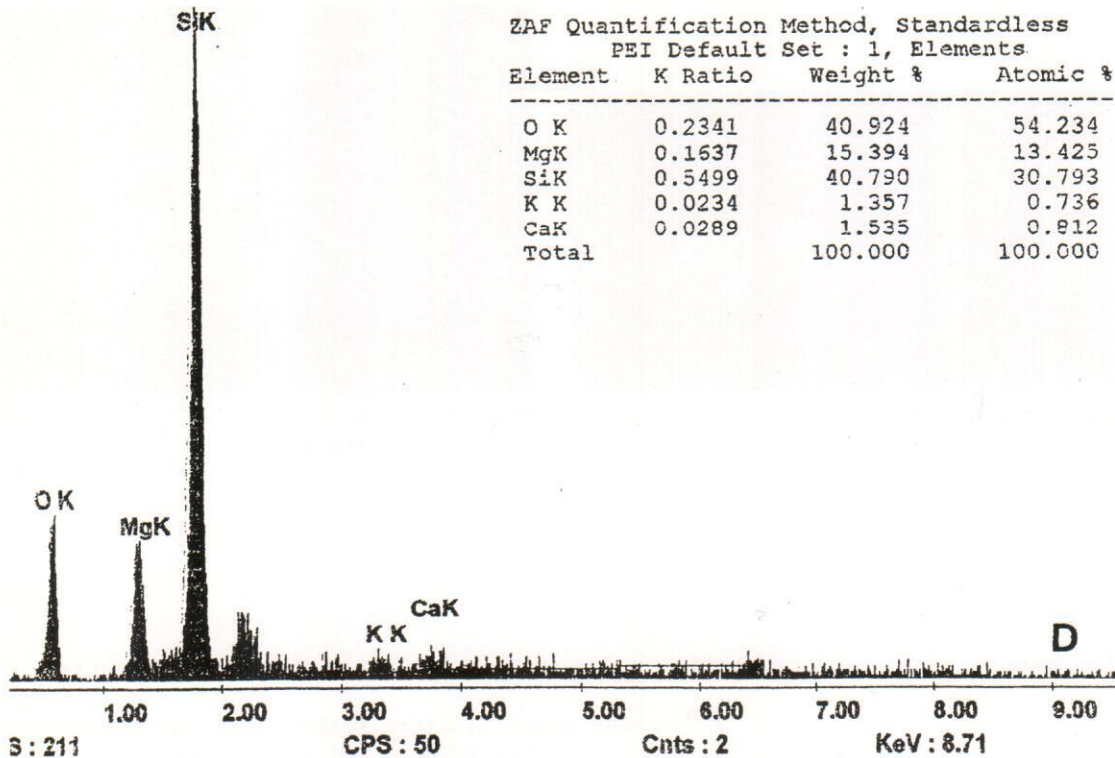


Fig. 11. 규산 마그네슘 섬유상 물질의 에너지확산분광기 분석 결과

IV. 고 찰

공기중이나 물 속에서 미지의 물질을 밝혀 내기 위해서는 시료 채취나 분석 방법이 적절하였는지에 대한 검토가 이루어져야 한다. 즉 첫째, 시료의 채취 방법은 적절하였는가, 둘째, 시료의 전처리 및 분석 방법은 적절하였는가, 셋째, 결과에 대한 해석이 적절하였는가 등에 대한 고찰이 있어야 한다.

산업위생 분야에서 가장 널리 이용되는 섬유상 물질에 대한 대표적인 채취 및 분석방법으로는 공기중 석면에 대한 연구를 통하여 확립된 미국 국립 산업 안전 연구원(NIOSH)의 공정 시험법이 있다. 그러나 수중 섬유상 물질을 관찰하는 방법에 대한 공정 시험법은 아직 제시된 바가 없었다(NIOSH, 1989, Brackette, 1992). 1995년 일본 나고야에서 FRP

물탱크에 보관된 물에서 유리섬유를 검출한 예가 있으나 어느 정도의 폭으로 인해 건강 장애를 일으키는지에 대해서는 분명한 결론을 도출하지는 못했다. 유리섬유는 국제적으로 작업장의 공기중 허용기준이 1.0 fiber/cc(AFL-CIO 1991)인데 반해 우리나라의 경우 유리섬유 분진이 작업환경에서 시간 가중 평균 농도가 1 mg/m³(노동부, 1991) 이하로 정해진 것 외에는 생활환경 기준 및 수중 섬유상 물질에 대한 허용 기준은 없다.

미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, 이하 EPA)은 음용수의 수질 기준을 정하여 규제하고 있는데, 음용수 중 석면은 앞으로 규제할 물질로 분류되어 있으나 아직 허용기준이 제시되지 않았을 뿐 아니라 유리섬유를 포함한 기타의 섬유상 물질에 대한 기준은 전혀 정해진 바가 없고(Rosenstock & Cullen 1994), 우리나라의 음용

수 수질 기준에도 석면을 포함하여 섬유상 물질에 대한 기준은 없다(보건사회부 1994).

지하수는 일반적인 수돗물과는 달리 상당히 복잡한 양상의 환경(system)에 있다고 할 수 있다. 즉 주위의 지질학적 상태나 지중 생물학적 상황에 따라 복잡한 물리화학적 환경 및 생물학적 환경에 폭로되고 있는 상태라고 할 수 있다. 또한 외부 환경의 변화, 즉 비나 눈으로 인해 외부에서 물이 침투하거나 외부 이물질에 의한 오염에 따라 내부 구성물질의 큰 변화가 있을 수 있다(Piver et al., 1997). 특히 지하수를 이용하는 행태가 지상의 펌프를 통하여 지하의 물을 활성화시켜 끌어올리기 때문에 펌프 가동 시간이나 정도에 따라 활성화되는 부위나 정도가 달라지게 되며 이에 따라 여과하여 관찰되어지는 내용물도 크게 차이가 나리라고 생각된다.

따라서 지하수의 물질을 분석하는데 있어 단 한번의 검사를 통해 이물질의 유무를 판단할 경우 잘못된 결론을 내릴 수 있다. 이는 이물질 및 지하수 내부의 구성물질을 판단하는 데에도 마찬가지라고 할 수 있다(Piver et al., 1997). 이러한 점이 물의 채취나 분석 방법을 설정하는데 어려운 점이라고 할 수 있을 것이다.

본 연구에서도 지하수를 그냥 계속 틀어 놓으면서 채취한 시료보다 지하수를 틀었다가 잠그는 동작을 1분간 3회 연속하여 행한 뒤 시료를 채취한 시료를 여과한 여과지에 이물질이 더 많이 존재하였다는 사실을 미루어 볼 때 지하수층의 활성화가 시료 채취에 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 사실을 미루어 볼 때 현재 법률적으로 지하수의 수질을 규제하는 내용은 식수로 이용하기에 적합한지를 결정하는데 있어 허용기준치를 초과하거나 절대 검출되어서는 안되는 물질을 나열하고 있는 바, 수질검사시 단지 한 차례 검사를 통해 결정을 내리기보다는 여러 차례의 검사를 통해 종합적인 결론을 내려야 한다고 볼 수 있다.

그러나 본 연구자들이 연구 초기(1995년 1월)에 쉽게 섬유상 물질을 관찰할 수 있었던 반면 국립환경연구원에서 실시한 조사 연구에서 섬유상 물질을 관찰할 수 없었던 이유를 생각해 보면 다음과 같은 설명을 할 수 있을 것이다.

첫째, 연구 초기에는 지하수를 끌어올리는 펌프를 계속 사용하다가 중지한 지 얼마 되지 않았고 또한

매립한 유리섬유를 제거한 지 얼마 되지 않았기 때문에 활성화된 지하수에서 쉽게 관찰할 수 있었던 반면 후속적인 연구에서는 시간이 상당히 흘렀다는 점을 고려할 수 있다. 즉 채취 조건의 변화로 인하여 더 이상의 유입이 차단된 상태에서 계속 제거되어 나가거나 지하수 하층에 침착될 수 있다는 사실을 고려할 때 일상적인 방법으로는 검출하기 힘들었을 것이라고 볼 수 있다. 따라서 시간별로 채취한 본 연구의 결과를 통해 볼 때 섬유상 물질의 발견을 위해서는 단 한 차례의 시료 채취를 통해 관찰되지 않았다 하여 쉽사리 결론을 이끌어 낸 점은 과학적이지 못하다고 할 수 있다. 즉 현재 폭로가 중지되어 있는 상태에서 상당한 시간이 경과한 뒤 과거 폭로의 증거를 찾기 위해서는 위에서 언급한 여러 가지 점을 고려할 필요가 있다고 할 수 있다.

둘째, 편광이 되지 않는 유리섬유의 관찰은 채취 방법에 따라 차이가 있을 수 있다는 점이다. 즉 본 연구에서 관찰한 바와 같이 유리섬유는 채취 용기에 보관을 오래할수록 용기에 부착되기 쉽다. 이러한 소견은 지하수중 석면을 관찰하기 위해 3년간 연구한 EPA 보고서(Chatfield et al, 1983)를 통해서 그 원인을 짐작할 수 있으리라 본다. 이 연구는 지하수중 석면을 검출하기 위한 정성분석과 정량분석에 대한 EPA 프로젝트의 일환으로 시행되었는데 석면의 경우 유리 용기나 폴리에틸렌 용기에 오래 보관하는 경우 석면이 용기 내벽에 고착되어 분석에 큰 오류를 범하는 경우가 많아 이에 대한 대책을 세우는 것을 그 목적으로 한 것이다. 용기 내벽에 고착하기 쉬운 원인으로는 수중 박테리아 등이 분비한 유기물질 등에 의한 것이라고 밝히고 있다. 따라서 분석을 용이하게 하기 위해서 채취 용기를 유리나 폴리에틸렌 재질보다는 폴리테트라플로오르에틸렌(polytetrafluoroethylene, PTFE) 용기를 사용할 것을 권하고 있으며 채취 직후 용기에 자외선(ultraviolet ray)을 조사하여 섬유상물질을 용기 내벽에 부착시키는 유기물질의 영향을 최소화하고 초음파를 통해 그 수중 분포상태를 일정하게 유지시킨 뒤 분석하는 방법을 권고하고 있다(Chatfield et al, 1983). 그러나 아직 이러한 방법들은 대해 확실히 표준화되어 있지 않은 실정이다(Brackett, 1992). 이러한 사실은 본 연구에서 부딪힌 문제에 대해 여러 가지 해석을 가능하게 해 주고 있다. 즉

첫째 Table 1에서 보는 바와 같이 채취 용기에 따라 검출 결과의 차이가 있었다는 점과 둘째, Table 2, 3, 4에서 보는 바와 같이 보관 시간에 따라 검출 결과의 차이가 있었다는 점, 셋째 보관이 오래되었으며 섬유상 물질이 검출이 되지 않는 용기의 내벽을 긁어 본 결과 유리섬유 성분을 가진 섬유상 물질이 검출되었다는 점이다. 그러나 유리섬유가 EPA 보고서에서 제시한 석면의 검출 양상과 동일한지에 대한 연구가 진행되어야 하겠지만 본 연구의 결과에 비추어 볼 때 충분한 가능성을 찾을 수 있다. 그러나 용기 내벽에 고착하게 되는 원인은 석면과는 다른 유리섬유의 고유한 성질인지 아니면 오랜 시간 지하수라는 복잡한 물리화학적 상태에서 풍화과정을 통해 유리섬유 자체 혹은 이를 둘러싼 수지 성분이 변하여 고착 성질을 띄게 되는지 또는 석면과 같이 지하수의 어떤 성분이 유리섬유의 주위에 도포되어 고착성질을 띄게 되는지에 대해서는 추후 실험적 연구가 필요하다. 이와 더불어 석면과 비교하여 어떤 용기를 이용하여 시료를 채취해야 하는지 또는 분석 전에 초음파 처리 등을 하더라도 물리적 손상을 가하지 않고 대부분의 유리섬유를 여과지에 올려놓을 수 있는지에 대한 실험적 연구도 역시 필요하다.

셋째, 편광이 되는 규산 마그네슘 섬유상 물질은 위의 연구의 결과에서 살펴본듯이 물리적 특성상 가볍거나 혹은 정전기적인 이유 등으로 인하여 여과지에서 쉽게 분리가 되었다는 사실이다. 이러한 특성으로 인해 시료의 전처리시 특히 전자현미경 관찰을 위한 전처리 과정에서 손실이 많았다고 본다. 이는 광학현미경 소견상 여과지에서 벗어난 곳에서 다수 관찰되었다는 점과 광학현미경에서 관찰된 위치를 표시한 곳에서 전자현미경에서는 관찰되지 않은 점으로 유추할 수 있다. 광학현미경 소견상 여과지에서 벗어난 곳에서 관찰된 것에 대해서 분석 초반에는 전처리시 오염된 다른 이물질이나 전처리과정 중(투명화 과정 등) 생길 수 있는 부산물이 아닌가 의심하였으나 다른 대조군이나 공시료에서 같은 소견을 발견하지 못했으며 분석 전 잠시 보관을 위해 슬라이드를 세워 보관할 때 세워 놓은 방향의 아래쪽으로 섬유상 물질이 몰려 있었다는 점을 고려할 때 여과지에서 유리되었다고 추론할 수 있다. 또한 이 물질의 손실 요인으로, 전자현미경 전처리 과정 중에 발생할 수 있다고 생각되는데, 즉 시편 위

에 올려놓은 후 carbon tape를 이용하여 고착시키는 작업이나 gold coating을 하기위해 공기를 빨아들이는 과정에서 대부분의 규산 마그네슘 섬유상 물질이 흡입기로 빨려 들어가거나 여과지에서 주위로 날아가 버렸다고 생각할 수 있다. NIOSH method 7402 나 EPA method에서는 석면을 분석하는데 있어 전자주사현미경 법을 권고하고 있으며 (NIOSH, 1989) 전처리상에서는 특별한 문제점을 제시하고 있지 않아 분석자의 미숙이나 오류로 인해 관찰을 하지 못하지 않았나 생각할 수 있다. 그러나 동시에 같이 전처리하여 분석을 한 유리섬유 시료는 전자현미경 관찰을 하는데 있어서 아무런 문제가 없었다는 점을 고려할 때 단지 분석자의 미숙이라고만 볼 수 없다.

즉 물리적 특성이나 화학적 조성이 다른 규산 마그네슘 섬유는 전처리 과정 중 석면이나 유리섬유와는 다른 양상을 보이고 있어 특히 주의를 기울여야 하리라고 생각하며 이의 객관적인 증명을 위해서는 계속적인 연구가 필요하리라고 본다. 이에 대한 가능성은 이미 주사전자현미경을 통하여 지하철내 공기중 섬유상 물질을 확인하는 연구에서도 지적된 바가 있다(이기라, 1996).

지금까지의 소견을 바탕으로 볼 때 국립환경연구원에서 시행하였던 분석 방법상 지하수내 섬유상 물질을 확인하기 위해서 간단한 방법인 광학현미경적 관찰을 우선적으로 시행하지 않은 채, 처음부터 전자현미경을 이용하여 관찰하려고 함으로서 상당수의 시료를 확인하지 못했을 가능성을 제기할 수 있다. 즉 석면이나 유리섬유와 같이 길이나 직경이 큰 섬유상 물질들은 저배율의 광학현미경이나 편광현미경으로도 쉽게 판별할 수 있는 반면, 전자현미경은 전처리의 문제점이나 시야의 제한성 등으로 인하여 쉽게 관찰되기가 어려운 점이 있어 연구의 목적이 섬유상 물질의 검출을 위한 정성 분석임을 고려할 때, 분석 초기 단계부터 전자현미경을 이용한다는 점은 부적절하다고 생각한다. 전자현미경은 발견된 섬유상 물질의 물리적 구조나 화학적 구성 성분의 동정 및 광학현미경으로 관찰할 수 있는 범위보다 더 작은 섬유상물질도 포함시켜 관찰하고자 할 경우에는 필수적이다. 이 경우 위에서 언급한 바와 같이 전처리 과정 중의 시료의 손실 등과 같은 전자현미경의 분석상의 제한점을 고려해야 한다. 즉 섬유상 물질

등의 분석을 하기 위해서는 광학현미경 또는 편광이나 위상차현미경을 이용하여 우선적으로 존재 여부를 확인 관찰한 뒤 추가적인 정보를 얻기 위해 전자현미경의 관찰이 이루어져야 한다고 생각한다.

본 연구에서는 섬유상 물질의 존재를 확인하였을 뿐 농도를 계산하는 정량 분석을 실시하지 못하였다. 이는 첫째, 유리섬유는 용기에 부착되어 상당부분 누락되었을 가능성이 있으며, 둘째 규산 마그네슘 섬유상 물질은 전처리 과정 중에 손실되었을 가능성이 높기 때문에 역시 계산이 불가능하다고 판단하였기 때문이다.

따라서 추후 전처리방법이 표준화된 후 이에 대한 계속적인 연구가 필요하다. 그런데 이에 앞서 고려해야 할 점은 환경오염에 의한 역학조사시 정량 분석을 하고자 하는 가장 커다란 이유는 원인-결과 관계를 해석하는데 있어 용량-반응(dose-response relationship)간의 관계를 보고자 하기 위한 것이라는 점이다. 이 연구의 배경도 한 지역 주민에게서 발생한 집단 피부하 종양의 원인을 규명할 필요에 의해 진행된 것으로서, 가설상 과거 20년간 방치된 유리섬유 폐기물에 오염된 지하수에 폭로됨으로서 야기된 문제라고 가정할 때 현재 원인 물질이라고 제기된 유리섬유 폐기물이 제거되어 더 이상의 유출이 중지되고 난 뒤 상당한 시간이 경과된 상태에서 조사하게 된 것이다. 따라서 이러한 점을 고려하지 않고 조사 당시만의 물질의 농도를 계산하여 이를 근거로 결과를 해석한다는 점은 중대한 오류를 유도할 수 있다. 그렇지만 현재 농도를 이용하여 과거 폭로 수준을 예측한다는 것은 더욱 어려운 작업으로서 환경 측정 즉 폭로 수준의 결정에 있어서 중대한 한계가 될 수 있다고 보여진다.

또한 채취 용기에 따라 손실 정도가 차이가 있으리라고 보아 처음부터 이를 고려하여 여러 가지 용기를 이용하여 채취하여 이를 비교 분석해야 했으나 실시하지 못하였으며 추가적인 채취는 동일 조건이라고 보기 힘들어 시행하지 않았다. 따라서 좀 더 잘 고안된 연구 방법을 이용하여 어떤 용기가 적절한지에 대해 선택을 하는 것이 필요하다고 본다.

V. 결 론

지하수내 섬유상 물질을 확인하는데 있어 펌프 가

동기간에 따른 채취 시간이나 시료 보관 시간 등의 조건에 따라 차이가 생기는지를 살펴보기 위하여 지하수를 펌프 가동후 72시간 내 4시간 별로 채취하였으며 또한 7일간 보관한 시료와 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 지하수를 분석하는데 있어 지하수 가동 시간에 따라 여과된 지하수내 구성 성분이 상당히 다양하였으며 섬유상 물질의 검출도 역시 시간에 따라 변화가 심하였다.

2. 편광이 되지 않는 섬유상 물질은 유리섬유와 유사한 화학적 구성을 갖고 있었으며 채취 즉시 여과지에서는 관찰되었으나 7일간 방치한 뒤에는 여과지에서는 관찰되지 않았다. 그러나 여과지를 이용하여 채취 용기 바닥을 훑어 살펴본 결과 다수 관찰되었다.

3. 편광이 되는 규산 마그네슘 섬유상 물질은 채취 즉시 및 7일간 방치 후 관찰하였을 때 같은 양상을 보였으나 주사전자현미경하에서는 매우 적은 양이 관찰되었다. 이는 물리적 특성상 여과지에서 분리가 잘 되어 전처리 과정에서 손실이 많았기 때문이라고 생각된다.

따라서 지하수내 섬유상 물질을 확인하기 위한 채취, 전처리 및 분석 방법에 대한 계속적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

- 노동부: 유해물질의 허용농도, 노동부고시 제 91-21호, 1991
- 보건사회부: 음용수의 수질기준 등에 관한 규칙, 보건사회부령, 1994
- 이기라: 서울시 지하철역 구내의 분진 및 섬유 농도에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원 보건학석사학위논문 1996
- 임현술, 정해관, 김지용, 정희경, 김정란, 홍윤철, 임종한, 백남원: 유리섬유에 장기간 폭로된 지역주민의 건강장해에 관한 역학조사, 한국역학회지, 1995; 17(1): 76-93
- 조수현, 홍재용: 인천시 고잔동 주민의 유리섬유 건강피해에 관한 역학조사, 학술연구용역 최종보고서, 국립환경연구원 1995
- 환경운동: 환경운동연합, 1994; 28-38

AFL-CIO: Man-made Mineral Fibers. Position paper of the Safety and Health Committee, Building and Construction Trades Department, AFL-CIO. Glass Molders, Pottery, Plastics and Allied Workers International Union, Medina, 1991

Beckett ST: The evaluation of airborne asbestos fibers using a Scanning Electron Microscope. *Ann Occup Hyg*, 1973; 16: 405-408

Brackett KA, Clark PJ, Millette JR. Method for the Analysis of Asbestos Fibers in Water Using MCE filters. *Microscope* 1992; 40: 159-163

Chatfield EJ, Dillon MJ, Riis P, Stott R. Asbestos Fiber Determination in Water Samples: Preparation

Techniques, Improved Analytical Method and Rapid Screening in Project Summary. EPA-600/S4-83-044, 1983

NIOSH: NIOSH Manual of Analytical Methods. 4th ed., Method 7400, US DHEU/NIOSH Cincinnati, OH, 1994

Piver WT, Jacobs TL, Medina MA: Evaluation of Health Risks for Contaminated Aquifer. *Env Health Perspectives*, 1997; (105, Suppl.1): 127-43

Rosenstock L, Cullen MR: Textbook of Clinical Occupational and Environmental Medicine. W.B. Saunders, USA, 1994; 47-53