

## 大氣 中 납의 RISK豫測模型 開發

金 鍾 爽

環境處 大氣保全局

### The Development of Risk Predictive Model for Air-borne Lead in Blood

Jong-Suk Kim

Air Quality Management Bureau Ministry of Environment

#### ABSTRACT

In order to survey the risk of air-borne lead to human, the relation between air-borne lead level and blood lead level was examined by using of the kinetic model and statistical model. The results of this survey were as follows :

1. The pathways of lead intake were food and water, mainly.
2. Though blood lead level of Korean urbanite was higher than that of American or Japanese, it was not so severe as to influence human health.
3. The lead content in food and water was high, and so it is needed to confirm the cause of high content was whether second contamination by air pollution or not.

**Keywords :** Air-borne level, blood lead level, kinetic model, statistical model.

#### I. 序 論

産業의 發達 및 生活水準의 향상에 따라 각종 汚染源 및 각종 汚染物質 排出量이 증가하고 있으며 이로 인한 環境汚染 및 人體影響이 날로 深化되고 있다.

특히 과거에는 非鐵金屬 製鍊所나, 蓄電池工場 등으로 납을 사용하는 곳에서만 문제가 되었던 大氣 中 납汚染現象이 최근에는 납합유油類를 사용하는 자동차통행량의 급증에 따라 都市의 심각한 大氣環境汚染問題로 대두되고 있다.

大氣 中 납은 호흡, 음식물攝取 등의 經路를 통하여 人體에 흡수되며, 人體내 각 장기에 분포됨에 따라 代謝 및 生理作用 등에 影響을 미치게 된다. 또한 人體내 납攝取量이 多量일 때, 어린이의 경우에는 大腦障害, 중년남성의 경우에는 高血壓, 여성의 경우에는 妊娠中毒症 등의 납中毒現象이 야기되고 있다.

이러한 납에 의한 人體의 影響을 파악하기 위하여 흔히 毛髮, 骨髓 및 血液내 납濃度 調査方法<sup>1)</sup>이 사

용되어 왔으나 최근에는 보다 체계적이고 보편적인 방법이 개발되고 있다.

本 研究에서는 납의 人體有害性 규명을 위하여 미국 환경청에서 1980년경, 研究·開發하여 사용 중인 "납의 人體有害性 評價方法"<sup>2)</sup>을 응용하여, 우리나라 都市의 大氣 中 납汚染도와 都市人의 血中 납濃度 關係를 分析하였다.

즉, 大氣 中 납은 一次的으로 土壤, 耕作物 및 물 등을 汚染시키게 되어 그로부터 얻어지는 飲食物 및 飲用水가 연쇄적으로 납을 함유하게 되므로 空氣, 食品, 飲用水 中的 납합량을 分析하고 이들 經路를 통한 人體내 납吸收量を 豫測하여 이에 의한 血中 납濃度別 人口分布를 豫測함으로써, 環境汚染에 의한 납의 人體有害성을 규명하였다.

미국에서는 납汚染으로 인한 人體의 有害성을 줄이기 위해 食品衛生分野에서 食品내 납합유량의 年度別 低減計劃을 수립·추진함으로써 미국인의 血中 납濃度<sup>3)</sup>를 획기적으로 低減시켰다. 또한 일본의 경우에도 1970년도에는 일본인의 血中 납濃도가 평균 23~25 g/m<sup>3</sup>이었으나 최근에는 10 μg/m<sup>3</sup> 정도로 크

게 減少한 것으로 보고되고 있어 일본에서도 미국과 같이 飮食物 중 납함량에 대한 特別管理가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

정확한 통계는 없지만 우리나라의 경우에도 그동안 飮生活 등이 刮目할 만큼 改善되어 와서 우리 국민의 平均 血中 납濃度가 1960년대에 비해 크게 개선된 것은 사실이나 아직은 일본의 1970년대 수준에 해당되는 미흡한 실정이다.

따라서 향후 우리나라에서도 납에 의한 人體有害性 低減을 위해 大氣汚染分野 및 食品衛生分野에서 납함량 低減計劃 樹立 등 적극적인 對策이 추진되어야 할 것이다.

II. 調査方法 및 分析資料

本 研究에서는 먼저 空氣, 물, 飮食物 등의 environmental pathway를 통하여 人體로 吸收된 납의 量을 예측한 후 이를 本 研究를 통해서 開發한 biokinetic model을 사용하여 血中 납濃度를 算定하고 그 有害性을 分析하였다.

Environmental pathway를 통한 납의 吸收量을 豫測하기 위해 각각의 媒質에 대한 intake predictive equation에 實測한 大氣 중 납汚染度, 食品내 납함량, 飮用水내 납함량을 각각 代入하였다.

III. 結果 및 考察

1. 環境媒質을 통한 납의 人體 吸收關係

아래 Fig. 1은 납이 人體에 吸入되는 각종 經路를 설명한 것이다. 납은 土壤, 非鐵金屬製鍊所 및 車輛 排出가스 등 각종 汚染源으로부터 排出되어 一次的으로는 環境媒質인 공기, 물, 植物 등을 汚染시키게 되며, 이들이 呼吸이나 飮食物攝取 등을 통하여 人體내로 吸收되게 된다.<sup>4)</sup>

그림에 나타난 바와 같이 人體의 납吸收에 대한 주요 environmental pathway는 飮食物과 空氣이다.

(1) 空氣를 통한 人體의 납吸收量

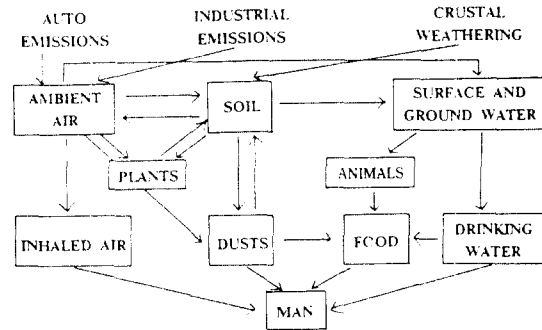


Fig. 1. Principal pathways of lead from the environment to human consumption.

空氣를 통한 人體의 납吸收量은 空氣 중의 납의 量과 呼吸量으로 결정된다. 空氣 중의 납의 量을 Cpb, 呼吸量을 V, 外部活動時間을 To, 内部活動時間을 Tin, 體내 呼吸率을 α라하면 體내吸收量 Pb는 아래 豫測式으로 나타낼 수 있다.

$$Pb = Cpb / 24 (To + Tin * R) * V * \alpha$$

空氣의 經路를 통한 人體의 납吸收量을 얻기 위해서 주요도시의 大氣 중 重金屬 汚染度를 조사한 내용은 다음 Table 1과 같다.

서울의 경우 商業地域에서 오염도가 가장 높게 나타났으며, 1990년도의 年평균값은 0.34 μg/m<sup>3</sup>이었다. 기타도시에서는 이보다 낮은 값이 나타났었다. 이들 資料를 윗식에 代入한 결과 서울의 경우 남자의 日 平均 납吸收量은 0.218 μg/m<sup>3</sup>이고, 여자는 0.17 μg/m<sup>3</sup>이었다.

(2) 飮食物과 물을 통한 人體의 납吸收量

飮食物과 물을 통한 人體의 납吸收量(각각 Pf, Pw)도 飮食物과 물 중의 납함량(각각 Cf, Cw) 및 日 攝取量(각각 Qgm, Ll), 腸에서의 吸收率(각각 α1, α2)<sup>6)</sup>로부터 아래 豫測式을 사용하여 각각 얻을 수 있다.

$$Pf = Qgm * Cf * \alpha 1$$

Table 1. Annual average values of heavy metals in major cities in Korea (1991) (Unit : μg/m<sup>3</sup>)

City	Seoul		Pusan		Kwangju	
	average	range	average	range	average	range
Pb	0.3093	0.1077-0.7470	0.2367	0.0490-0.8437	0.0957	0.0137-0.4133
Cd	0.0057	0.0010-0.0100	0.0044	0.0013-0.0093	0.0033	0.0002-0.0112
Cr	0.0207	0.0013-0.1060	0.0182	0.0017-0.0500	0.0195	0.0042-0.0885
Ni	0.0313	0.0083-0.0903	0.0160	0.0000-0.0563	0.0174	0.0063-0.0622

**Table 2.** Heavy metal content in sampled raw crops

(Unit : µg/l)

	Cd	Cu	Ni	Zn	Pb
Rice	0.11± 0.03	1.46± 0.53	2.33± 1.14	5.86± 3.02	0.85± 0.47
Cucumber	0.02± 0.01	1.30± 0.26	0.22± 0.07	1.30± 0.99	0.11± 0.26
Chinese cabbage	0.01± 0.03	2.69± 2.82	0.29± 0.16	2.41± 1.92	0.14± 0.10
Raddish	0.01± 0.04	2.54± 2.75	0.26± 0.24	1.33± 1.01	0.08± 0.11
Apple	0.02± 0.01	0.66± 0.25	0.14± 0.13	0.67± 0.52	0.09± 0.13
Pear	0.03± 0.01	1.83± 1.55	0.21± 0.14	0.71± 1.51	0.04± 0.06
Grape	0.03± 0.01	1.23± 0.37	0.25± 0.16	0.97± 0.72	0.22± 0.32
Orange	0.01± 0.01	0.43± 0.15	0.24± 0.06	0.97± 0.29	0.31± 0.27

**Table 3.** The average levels of heavy metal in water in Korea

(Unit : mg/l)

		Fe	Cd	Pb	Mn	Cu	Hg
Stream Water (Han Kang)	RW	0.47	0.008	0.066	0.508	0.038	0.002
	TW	0.53	0.008	0.063	0.508	0.02	0.002
Drinking Water	Paldang	0.002	—	0.03	0.01	0.01	ND
	Kimpo	0.01	—	0.03	0.01	0.01	ND

RW : Raw Water, TW : Treated Water.

**Table 4.** The average total level of lead intake

	Total (µg/day)	Air (µg/day)	Food (µg/day)	Water (µg/day)
Male	74.518	0.218	52.6	21.7
	100%	0.29%	70.6%	29.1%
Female	75.77	0.17	52.6	23
	100%	0.224%	69.4%	30.4%

$$Pw = Li * Cw * \alpha 2$$

위 식 중  $H$  日平均 飲食物攝取量  $Qgm$ 은 年齡別 및 性別 등에 따라 달라지므로 本 研究에서는 보사부에서 매년 조사하는 “食品群別 都市別 1人 1日 攝取量”<sup>1)</sup> 조사자료를 이용하였으며, 서울시 成人 남자의 1일 평균 물攝取量  $L1$ 은 건설기술연구소의 “上水 原水 水質改善을 위한 調査”<sup>2)</sup>의 자료를,  $\alpha 1$ ,  $\alpha 2$ 는 미국환경청의 研究報告書<sup>3)</sup> 자료를 활용하였다. 또한 食品 및 물 중의 납함량  $Cf$ 와  $Cw$ 는 우리나라의 1980년도 예방의학지의 “農作物 重金屬汚染도와 一日 攝取量 및 許容基準設定에 관한 研究”<sup>4)</sup> 중 食品別 납함유량 자료(Table 2)와 건설기술연구소의 “飲用水內 납含有量” 자료(Table 3)를 사용하였다.

이와 같이 각종 자료를 代入하여 豫測된 成人의 日平均 납吸收量은 서울의 경우 飲食物 經路에 의해서는 남자 52.6 µg/m<sup>3</sup>이었으며 물의 經路에 의해서는 남자는 21.7 µg/m<sup>3</sup>, 여자는 23 µg/m<sup>3</sup> 이었

다.

Table 4는 이들 각각의 environmental pathway를 통하여 人體에 吸收된 납의 量을 總合한 것이다.

위 표에 나타난 바와 같이 人體에 吸收되는 납 量의 99% 이상이 飲食物과 물의 經路를 통하여 이루어지고 있으므로 납有害性 防止를 위하여 이들 두 개의 pathway를 관리하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

## 2. 납의 人體有害性 分析

本 研究에서는 납의 Risk analysis를 위하여 납에 대한 Hazardous identification, Dose response evaluation 및 Exposure assessment의 과정을 거쳐서 그 有害성을 分析하였다.

즉, 都市人을 대상으로 하여 空氣, 飲食物 등 environmental pathway를 통하여 人體에 吸收되는 납의 量으로부터 Biokinetic model을 사용하여 血中 납濃度を 豫測하고 그 豫測된 血中 납濃度を 有害濃度基準과 비교함으로써 環境汚染으로 인한 납의 人體有害성을 分析하였다.

本 研究에서 개발하고 사용한 Risk model은 人體에 吸收된 납을 血中 납濃度로 換算豫測하는 Biokinetic 부분과 都市人의 血中 납濃度の 人口分布特性을 分析, 豫測하는 Statistical model 부분으로 구성되어 있다.

Biokinetic model은 人體에 吸收된 납의 체내 장

**Table 5.** Population distribution for blood lead levels

Blood lead level (µg/dl)	age/sex	20-30	30-40	40-50	Over 50
Under 10	male	0.14	35	0.07	0.38
	female	0.2	0.125	3.8	3.4
15-20	male	53.5	36	45	48
	female	38	33	40	40
20-25	male	27	5.5	33	25
	female	31	28.6	12.5	12.8
25-30	male	5.7	0.49	9.2	5.8
	female	11.5	22.4	3	2.7
over 30	male	—	0.01	1.8	1.2
	female	0.1	7	0.5	0.5
over 40	male	—	—	0.01	0.01
	female	—	0.6	—	—

**Table 6.** Comparison of Blood Lead Level for different countries

Country	U.S.	Japan	Israel
Blood lead level(µg/dl)	7.5	6	8.2

기별 分布, 滯留特性 특히 血液내 滯留, 移動特性을 수학적 model로 개발한 것으로서, 이는 人體내의 납의 吸收, 排泄關係를 간단히 化學공장의 process로 생각하여 분석하는 방법이다.<sup>6)</sup> 즉, 납을 工程내 反應物質로 보고 각 장기를 化學공장의 unite process로 생각하면 吸收된 납이 장기내로 出入(移動)하는 關係는 아래의 First order linear differential equation으로 얻을 수 있다.

$$d(x)/dt = I_i(t) + K_iX(t) + \dots + K_{in}X_{in}(t) - (K_{oi} + \dots + K_{ni})(t)$$

윗 式에서 장기를 血液으로만 국한시키면 윗 式의 解는 아래식과 같이 간단히 할 수 있다.

$$X_e = I(t)/K_{oi} * V_i$$

여기에서  $X_e$ 는 血液내 平均 濃度,  $I(t)$ 는 日平均 吸收量,  $V_i$ 는 체내 總血液量이다. 바로 이 式이 single compartment biokinetic model이며 여기에 日平均 吸收量과 總血液量을 代入하면 血液 平均 濃度를 쉽게 얻을 수 있다.

Statistical model은 都市人의 血液 濃度에 대하여 아래와 같은 統計의 特性을 Model化한 것이다.

- 1) 都市人의 平均 血液 濃度 統計値는 對數 分布한다.

- 2) 統計値가 對數 分布하는 母集團의 幾何 平均値는 累積度數 分布 50%에 해당하는 變量이며, 이 幾何 平均値에 母集團의 幾何 標準 偏差値를 곱하여 얻은 수치는 이 母集團의 累積度數 分布 중 84%에 해당하는 變量이 된다.

- 3) 對數 確率 방안지에 對數 分布하는 母集團의 幾何 平均値와 이 母集團의 累積度數 分布 84%에 해당하는 變量의 위치를 점으로 찍고 이 두 점을 연결하여 직선을 얻는다.

따라서 Biokinetic model로부터 얻은 血中 濃度의 통계치, 즉 幾何 平均과 幾何 標準 偏差로부터 母集團 累積度數 分布의 84%에 해당하는 變量들 먼저 얻은 후에 이를 對數 確率 방안지에 Plot하면 母集團 전체인구에 대한 平均 血中 濃度 分布를 알 수 있게 된다.

### 3. Model 適用의 結果

Table 1~3의 자료를 위 Model에 각각 적용하여 都市人에 대한 性別, 年齡別, 都市別 血中 濃度 分布를 얻을 수 있었으며 그 결과는 다음 Table 5와 같았다.

참고로 세계 주요국들의 都市人의 血中 濃度는 아래 Table 6과 같다.

현재 우리나라 都市人의 血中 濃度를 위 표에 나타난 값과 比較해 보면 다소 높은 것으로 分析 되었으나, 다음 Table 7, 8에 제시된 미국 환경청의 血中 濃度에 따른 有害程度 調査·研究 結果와 比較해 보면 健康에 障害을 일으키는 程度의 수준은 아님을 알 수 있다.

**Table 7.** Summary of lowest observed effect levels for key lead-induced health effects in children

Lowest observed effect level (PbB)*	Heme synthesis and hematological effects	Neurological effects	Renal system effects	Gastrointestinal effects
80~100 µg/dl		Encephalopathic signs and symptoms	Chronic nephropathy (aminoaciduria, etc.)	Colic, other overt gastrointestinal symptoms
70 µg/dl	Frank anemia	Peripheral neuropathies		↓
60 µg/dl		↓		---
50 µg/dl		?		
40 µg/dl	Reduced hemoglobin Synthesis	Peripheral nerve dysfunction (slowed NCV's)		
	Elevated coproporphyrin	CNS cognitive effects (IQ deficits, etc.)		
	Increased urinary ALA			
30 µg/dl		?	Vitamin D metabolism interference	
15 µg/dl	Erythrocyte protoporphyrin elevation	Altered CNS electrophysiological responses	↓	
10 µg/dl	ALA-D inhibition	↓	?	
	Py-5-N activity inhibition	?		
	↓			
	?			

\*PbB=blood lead concentrations.

'Py-5-N=pyrimidine-5'-nucleotidase.

**Table 8.** Summary of lowest observed effect levels for key lead-induced health effects in adults

Lowest observed effect level (PbB)*	Heme synthesis and hematological effects	Neurological effects	Effects on the kidney	Reproductive function effects	Cardiovascular effects
100~120 µg/dl		Encephalopathic signs and symptoms	Chronic nephropathy		
80 µg/dl	Frank anemia	---	↓	Female reproductive effects	
60 µg/dl		↑	↓	Altered testicular function	
50 µg/dl	Reduced hemoglobin production	Overt subencephalopathic neurological symptoms	↓	↓	
40 µg/dl	increased urinary ALA and elevated coproporphyrins	Peripheral nerve dysfunction (slowed nerve conduction)	---	---	
30 µg/dl		↓			
25 ~ 30 µg/dl	Erythrocyte protoporphyrin (EP) elevation in males	---			Elevated blood pressure (white males) aged 40~59
15 ~ 20 µg/dl	Erythrocyte protoporphyrin (EP) elevation in females				↓
<10 µg/dl	ALA-D inhibition				?

\*PbB=blood lead concentrations.

#### IV. 結 論

- ① 납의 人體吸收는 environmental pathway 중 주로 飮食物과 물의 經路를 통하여 이루어지고 있다.
- ② 우리나라 都市人 血中 납濃度는 미국인이나 일본인 보다는 다소 높은 편이나 健康에 障害를 일으키는 수준은 아니었다.
- ③ 食物性和 물 중의 납의 含量이 비교적 높게 나타났는데 이것이 외국의 예에서와 같이 大氣汚染에 의한 二次汚染인지에 대한 研究가 시급하다.

#### 參考文獻

- 1) 보건사회부 : 국민영양보고서. p. 11, 1989.
- 2) 엄용태 등 : "농작물 중 중금속오염도와 일일섭취량 및 허용기준 설정에 관한 연구". 예방의학회지, 13(1), 3-12, 1980.
- 3) 한국건설기술연구원 : "상수 수질향상을 위한 수처리공정 개선에 관한 연구". 기술연 88-EE-113, p. 56, 1988.
- 4) EPA : "Air quality criteria for Lead". 3, EPA/600/8-83/028.
- 5) EPA : "Health effects assessment summary tables". US. EPA Report, 1990. 9.
- 6) EPA : "Research and development". Environmental criteria and assessment office of Health and Environmental Assessment. US. EPA Report, 1990.
- 7) Hinds : "Aerosol technology, properties, behavior, and Measurement of Airborne particles". Wiley interstate.
- 8) Jrezy Piotrowski : "The Application and excretion kinetics to problems of industrial toxicology". US Department of Health, Education and Welfare.