

# 하수관거 균열발생에 따른 오염확산의 수치실험 평가

## Evaluation of Numerical Experiment of Pollution Dispersion on the Sewer Crack Occurrence

박재성<sup>1)</sup> · 배우석<sup>2)</sup> · 이호진<sup>†</sup>

Park, Jaesung · Bae, Wooseok · Lee, Hojin

**ABSTRACT** : Because sewer is embedded in land, the pollutant permeating to underground so fast can cause contamination of soil when crack of sewer occurs. In this study, numerical modelling on dispersion of pollutant at sewer crack was performed. Based upon the study, the following conclusions were obtained. It was shown that transfer direction of pollutant was similar to the flow with topography slope of surface. It was exposed that the pollutant permeated to 8~10 m depth. It is expected to offer efficiency in sewer management in the future through this research.

**Keywords** : Sewer, Pollutant, Dispersion, Permeating

**요지** : 하수관거는 지중에 매설되기 때문에 균열발생 시 오염원이 빠르게 지하로 침투되어 오염을 야기한다. 본 연구에서는 하수관거 균열발생 시의 오염원의 확산에 대한 수치모델링을 수행하였다. 모델링 수행 결과를 이용하여 오염원의 이동경로를 예측해보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다. 오염원의 이동방향은 지표면의 지형경사에 따른 흐름과 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 지하방향으로는 약 8~10m 깊이까지 침투되는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 장래 하수관거 관리에 효율성을 제공할 것으로 기대된다.

**주요어** : 하수관거, 오염, 확산, 침투

## 1. 서론

하수관거는 하수 및 오수를 하수처리장으로 이동시켜 정화함으로써 수질오염을 막도록 하며, 빗물을 빠르게 흘러 보내 침수에 의한 재해를 막는 공공 시설물이다. 이러한 하수관거는 국민의 정맥이라고 할 수 있을 정도로 도시의 환경관리와 치수, 쾌적한 환경조성에 있어서 매우 중요한 시설이며 그 규모가 광범위하고 복잡한 네트워크로 구성되어 있다(최계운등, 2005). 이러한 하수관망을 통해 이송되는 물은 지저분하고 냄새가 심하기 때문에 지하에 관의 형태로 대부분 매설·시공되어 왔으며, 상수관망처럼 압력관이 아니라 대부분 중력에 의한 이송방식을 채택하고 있어 문제 발생 시 원인파악과 대처를 힘들게 하는 요인을 가지고 있다. 특히 하수관거의 관리 소홀은 토양오염과 인근 환경오염으로 직결되며 장기적으로 상수를 오염시키는 요인으로 작용하므로 명확한 분석을 시행할 수 있는 시스템을 가지고 최적으로 유지관리 되어야 한다(홍성완등, 2001).

따라서 본 연구에서는 다공성매질의 포화 및 비포화 조건 모두에서 오염물질의 흐름과 이송을 모의할 수 있는 3차원 지하수흐름해석 모형을 이용하여 경기도 용인시 수지읍일대의 하수관거정비사업과 관련하여 임의의 하수관거 균열발생시 야기될 수 있는 지하수오염·확산 모델링을 실시하였다.

## 2. 수치모델링 개요

### 2.1 흐름 및 이송에 대한 기본식

#### 2.1.1 흐름방정식

3D-FEMWATER는 다공성매질의 포화 및 비포화 조건 모두에서 오염물질의 흐름과 이송을 모의할 수 있는 3차원 흐름해석 모형이며, 흐름에 대한 기본방정식은 Richards 방정식을 기초로 하며, 방정식은 다음과 같다(Bear, 1979).

1) 정회원, 주성대학 토목과 강사·공학박사

2) 정회원, 청주대학교 이공대학 토목환경공학과 전임강사

† 정회원, 강원대학교 소방방재학부 강사·공학박사(E-mail : lhjce@chungbuk.ac.kr)

$$\frac{\rho}{\rho_0} F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left( K \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) \right) + \frac{\rho^*}{\rho_0} q, \quad (1)$$

$$F = \alpha' \frac{\theta}{n} + \beta \theta + n \frac{dS}{dh}$$

여기서, F는 저류계수, h(m)는 압력수두, K(m/d)는 수리 전도도, q (m<sup>3</sup>/s) / m<sup>3</sup>)는 유입/유출, ρ(kg/m<sup>3</sup>)는 농도 C에서의 물의 밀도, ρ<sub>0</sub>(kg/m<sup>3</sup>)는 C=0에서의 물의 밀도이며, ρ\* (kg/m<sup>3</sup>)는 주입수(injection fluid) 또는 양수(withdrawn water)의 밀도, θ는 습윤상수, α' (cm<sup>-1</sup>)은 매질의 수정 압축성, β' (cm<sup>-1</sup>)는 물의 수정 압축성, n은 공극률, S는 포화 상태를 나타낸다.

밀도와 동점성계수는 농도의 함수이며 각각 다음 형식을 취하여 가정한다.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = a_1 + a_2 C + a_3 C^2 + a_4 C^3 \quad (2)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = a_5 + a_6 C + a_7 C^2 + a_8 C^3 \quad (3)$$

여기서, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, ..., a<sub>8</sub>은 물의 밀도와 점성의 농도변수로 정의되는 변수이며, C는 농도이다.

Darcy속도는 다음과 같이 정의된다.

$$V = -K \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} \nabla h + \nabla z \right) \quad (4)$$

흐름방정식에 대한 초기조건은 식 (5), 경계조건은 각각 식 (6)과 같이 주어진다.

$$h = h_i(x, y, z) \text{ in } R \quad (5)$$

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t),$$

$$-n \cdot K \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} \nabla h \right) = q_n(x_b, y_b, z_b, t),$$

$$-n \cdot K \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} \nabla h + \nabla z \right) = q_c(x_b, y_b, z_b, t) \quad (6)$$

여기서, R은 대상영역이며, (x<sub>b</sub>, y<sub>b</sub>, z<sub>b</sub>)는 경계조건에서의 특징좌표, h<sub>d</sub>는 Dirichlet의 함수값, n은 외부방향으로의 단위법선벡터이다.

### 2.1.2 이송방정식

이송에 대한 기본 방정식은 질량과 플럭스의 연속법칙을 기초로 유도된다. 주계산과정은 이류, 분산/확산, 흡착, 감쇄, 생물분해와 유입/유출이다.

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} + V \nabla C - \nabla \cdot (\theta D \nabla C) = - \left( \alpha' \frac{\partial h}{\partial t} + \lambda \right) (\theta C + \rho_b S) - (\theta K_w C + \rho_b K_s S) +$$

$$m - \frac{\rho^*}{\rho} q C + \left( F \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho_0}{\rho} V \cdot \nabla \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) C \quad (7)$$

여기서, θ는 습윤농도, ρ<sub>b</sub>는 bulk density, C는 물에 녹았을 때의 물질농도, α'은 지층의 압축률, λ는 감쇠상수, S는 흡착점에서의 물질농도로서 목적에 따라 다음과 같은 형태를 취한다.

$$S = K_d C \text{ (linear isotherm)} \quad (8)$$

이송방정식에 대한 초기조건은 식 (9), 경계조건은 각각 식 (10)와 같이 주어진다.

$$C = C_i(x, y, z) \text{ in } R \quad (9)$$

$$C = C_d(x_b, y_b, z_b),$$

$$n \cdot (-\theta D \cdot \nabla C) = q_n(x_b, y_b, z_b, t)$$

$$n \cdot (VC - \theta D \cdot \nabla C) = q_c(x_b, y_b, z_b, t) \quad (10)$$

여기서, R은 대상영역, C<sub>i</sub>는 초기경계면에서의 초기농도값, C<sub>d</sub>는 Dirichlet경계에서의 농도, θ는 습윤농도, q<sub>c</sub>, q<sub>n</sub>은 각 플럭스 경계에서의 총플럭스이다.

## 2.2 관정자료구축 및 모델링 적용조건

그림 1과 2는 본 모델링 수행을 위한 전처리 작업으로

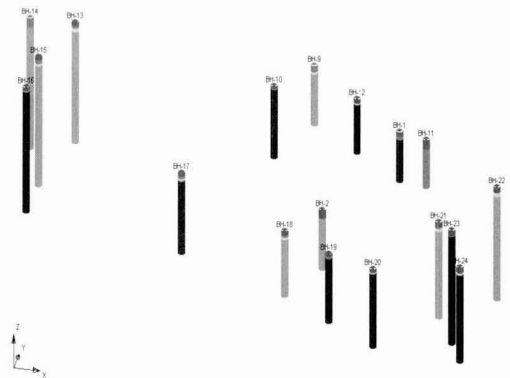


그림 1. 관리지역내의 모든 관정에 대한 3차원 공간자료

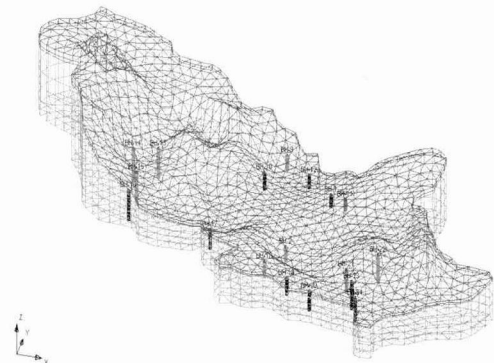


그림 2. 관정의 3차원 영상정보

표 1. 수리지역 수리매개변수 설정

Property	Layer				
	매립층	퇴적층	풍화토	풍화암	연암층
Hydraulic conductivity(m/s)	2.5e <sup>-3</sup>	4.17e <sup>-3</sup>	2.22e <sup>-3</sup>	1.39e <sup>-5</sup>	8.33e <sup>-4</sup>
Bulk density(kg/m <sup>3</sup> )	1,850	1,550	1,580	1,500	1,580
Water viscosity(kg/m <sup>3</sup> ·hr)	3.63e <sup>-5</sup>				
Density of water(kg/m <sup>3</sup> )	1,000				

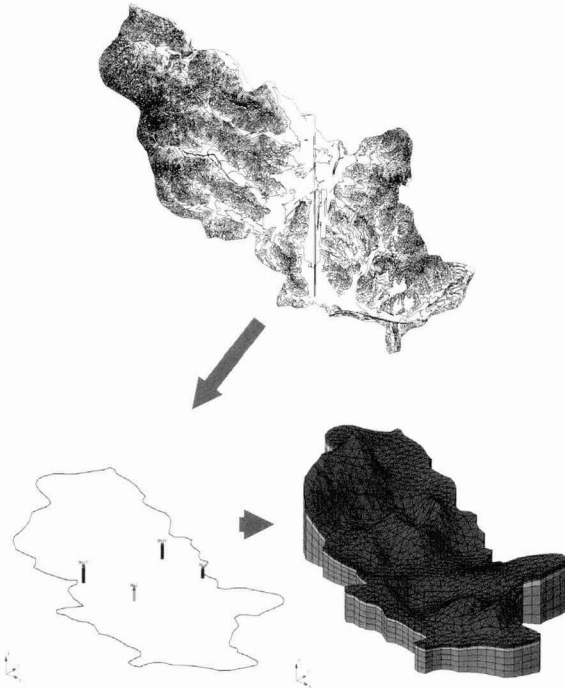


그림 3. 임의의 오염물질 누출지점 구축

서 수리지형도를 이용하여 기 조사된 시추주상도(건설교통부, 1990)를 바탕으로 관정자료를 구축하고 이로부터 3차원 유한요소 격자망으로 이루어진 3차원 지형도를 구축한 것이다(이재기등, 1998).

그림 1에서의 각 지층은 시추조사를 통해 얻은 지층구조를 서로 연결한 것으로서, 지표면부근부터 지하방향으로 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암층의 순서이며, 매립층은 자갈섞인 실트질 모래, 퇴적층은 과거 경작지로서 모래섞인 점토, 풍화토는 실트섞인 세립 내지 조립의 모래, 풍화암층은 모래섞인 자갈, 연암층은 실트섞인 세립내지 조립의 모래로 구성되어있는 것으로 조사되었다. 이를 토대로 Freeze and Cherry(1979)의 토양에 따른 수리전도도 범위값과 Mills(1985)등의 토양분류에 따른 마른흙의 밀도(bulk density)의 범위값을 이용하였고 기타 수리매개변수(Mercer et al, 1982; Neuman, 1990)는 표 1과 같이 정의하였다.

그림 3은 임의의 균열발생지점 4군데를 선정하였다.

표 2. 모델링 수행을 위한 임의의 지점

모델링 지점명	x좌표	y좌표	지하수위
bh-1	209606.63	425842.80	5.4m
bh-2	209071.47	423332.72	3.7m
bh-10	207804.46	426124.11	3.2m
bh-17	207103.56	423360.70	7.4m

일반적으로 지하수오염을 판단하기 위한 전기전도도 시험에서는 TDS(Total Dissolved Solids)농도를 기준으로 그 오염도를 판단하므로 선정된 관거에서 TDS를 균열발생시 누출될 수 있는 오염물질로 가정하였다. 또한, 모의결과를 분명히 확인하기 위하여 1,000ppm의 오염물질이 누출됐다고 가정하고 10년간 모의하였다. 오염·확산 모델링을 수행하기 위한 임의의 지점은 표 2와 같다.

### 3. 모델링 결과 및 고찰

3D-FEMWATER모델은 해안지역에서의 염수침투모의에 주로 이용하는 모델로서 본 연구에서는 오염물질의 이송·확산 모형이라는 점에서 하수관거 균열발생시 야기될 수 있는 오염물질의 이송확산경로를 예측하는데에도 적용이 가능한지를 알아보려고 하였다.

하수관거 균열발생시 오염원 확산 이동경로를 알아보기 위해서 표 3의 모델링 지점자료인 bh-1, bh-2, bh-10과 bh-17지점에서 1,000mg/L의 오염원이 지속적으로 누출된다고 가정하고 10년간 모의하여 확산이동경로를 예측해보았다. 그림 4~7은 각각 모의수행 1년, 3년, 5년, 10년일 때의 모의결과이며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 오염원의 이동방향은 지표면의 지형경사가 낮은 곳으로 확산되어가는 것을 확인할 수 있으며, 시간경과에 따라서 오염원의 확산이 점진적으로 이루어지는 것을 알 수 있다.

그림 8~11은 4곳의 임의의 오염원 누출지점에서 방향별 시간에 따른 오염원의 농도변화를 살펴본 것이다. 그림 결과에 의하면 E방향에서는 BH-10>BH-17>BH-2순으로 선형적인 확산이 이루어졌으며, BH-1에서는 오염원 확산이 다른 지점보다 느린 것으로 나타났다. W방향에서는 BH-1>BH-17>BH-2순으로 선형적으로 확산이 이루어졌고 BH-10지점이 느린 것으로 나타났다. 이하 S방향에서의 확산세기는 BH-2>BH-17> BH-1>BH-10순서이고, N방향에서의 확산세기는 BH-17>BH-1>BH-10>BH-2순으로 선형적인 확산이 발생하였다.

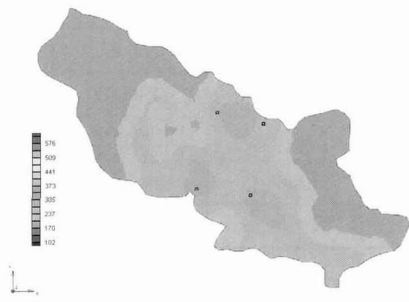


그림 4. 1년 경과 후

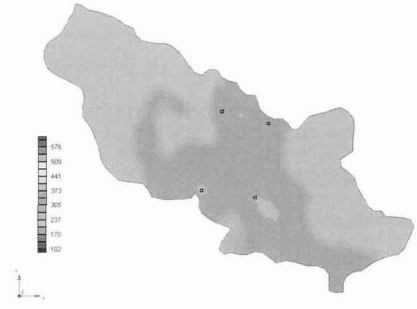


그림 5. 3년 경과 후

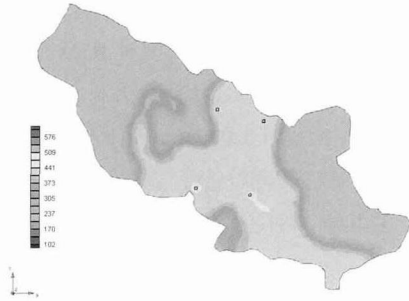


그림 6. 5년 경과 후

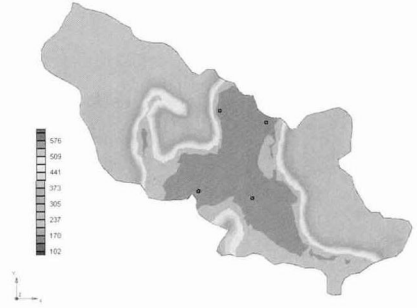


그림 7. 10년 경과 후

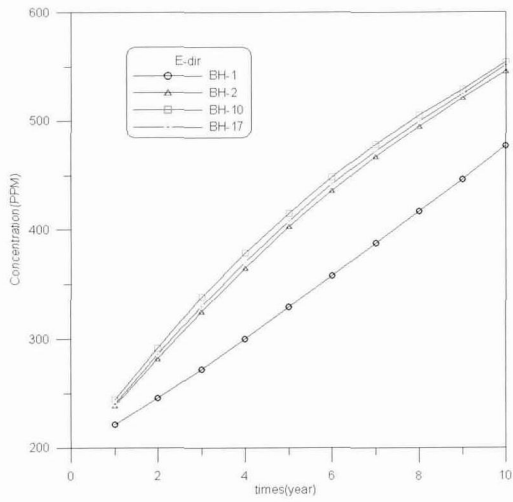


그림 8. E방향으로의 오염원 확산분포양상

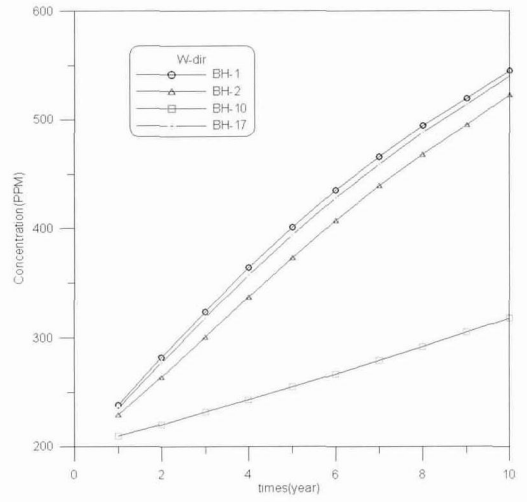


그림 9. W방향으로의 오염원 확산분포양상

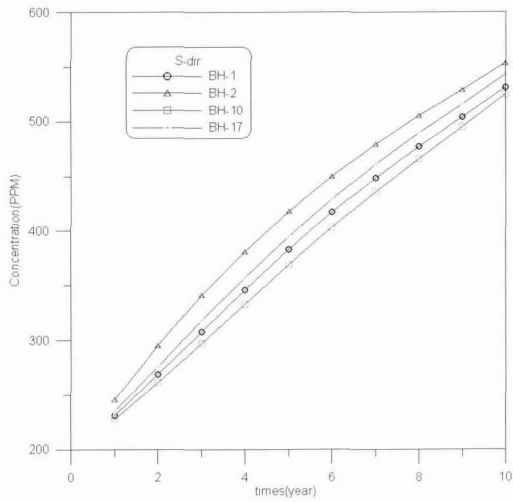


그림 10. S방향으로의 오염원 확산분포양상

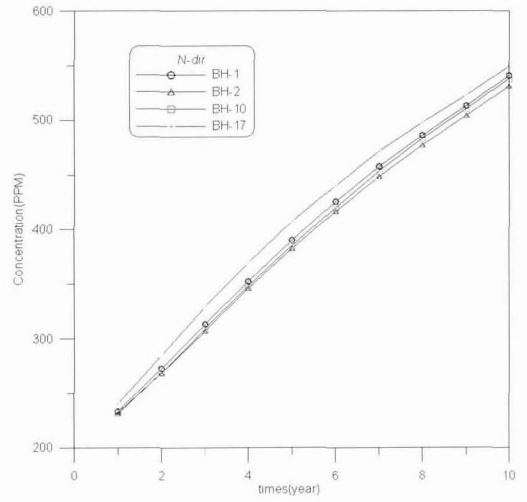


그림 11. N방향으로의 오염원 확산분포양상

## 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 해안지역에서 염수침투를 주로 모의하는 3DFEMWATER모델을 이용하여 임의의 하수관거 균열발생 시 야기될 수 있는 지하수오염·확산 모델링을 실시해 보았으며, 그 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 경기도 용인시 수지지역을 선정하였고, 각종 조사와 시추를 통해 얻어진 18개 시추주상도의 데이터를 바탕으로 수치지형도, 관정의 좌표와 지층의 두께, 지하수위 등의 자료를 하나로 묶는 3차원 공간자료를 구축하였다. 또, 구축된 자료를 이용하여 4개의 임의의 오염원 발생지점을 선정하고 모델링하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 오염원의 이동방향은 지표면의 지형경사에 따른 흐름과 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 지하방향으로는 약8~10m깊이까지 침투되는 것으로 나타나 이동방향과 침투깊이를 예측할 수 있다.
- (2) 4개의 임의의 지점 중 BH-1지점에서는 E방향으로의 확산이 다른 방향보다 느리게 진행되었고, BH-2지점에서는 확산성향이 비슷하였으며, BH-17지점에서는 각각 E, W, S, N방향으로 균일하게 확산되었다. 반면에 BH-10지점에서는 W방향의 확산이 거의 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지층의 조건을 반영한 결과라고 사료된다.
- (3) 오염원 누출에 대한 시뮬레이션을 통해 오염원의 이동 경로를 예측하고 방향에 따른 확산세기를 예측함으로써 장래 하수관거 관리의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부(1990), *지하수 조사시공 실적자료 조사 보고서*, GW-99-3, 한국수자원공사, pp. 4-12~4-27.
2. 이재기, 최석근, 신필수, 임인섭(1998), GIS를 이용한 지하수 관정 정보관리, *1998년도 학술발표회 논문집(IV)*, 대한토목학회 pp. 469~472.
3. 최계운, 이호선, 조형근(2005), 하수관망 최적관리를 위한 통합 하수관거 시스템의 부정류 해석적용에 대한 연구, *한국수자원학회 05 학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 1148~1153.
4. 홍성완, 배규진, 김창용, 서용석, 이광호(2001), 3차원 지반정보 가시화 시스템, *2001년 학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp. 1~4.
5. Bear, J.(1979), *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, p. 567.
6. Freeze, R.A. and Cherry, J.A.(1979), *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, p. 375.
7. Mercer, J.W., Thomas, S.D., and Ross, B.(1982), *Parameters and Variables Appearing in Repository Siting Models*, NUREG/CR-3066, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., Ground Water, Vol. 21, No. 5, p. 631.
8. Mills, W., Porcella, D., Unga, M., Gherini, S., and Summers, K.(1985), *Water quality assessment: A Screening procedure for toxic and conventional pollutants in surface and ground water Part II*, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA. pp.6~85.
9. Neuman, S.P.(1990), *Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media*, Water Resources Research, Vol. 26 No. 8, pp. 1749~1758.

(접수일: 2007. 11. 14 심사일: 2007. 11. 19 심사완료일: 2008. 2. 13)