

불포화 투수계수함수에 대한 연구

Determination of the Unsaturated Hydraulic Conductivity Function

황 창 수¹ Hwang, Chang-Soo

김 태 형² Kim, Tae-Hyung

Abstract

An unsaturated hydraulic conductivity function and a soil-water characteristic curve are the essential constitutive factors in studying unsaturated soils. In order to obtain the unsaturated hydraulic conductivity function, prediction functions, which are based on the soil-water characteristic curve, have been used because it is difficult to measure the unsaturated hydraulic conductivity function directly. In this study, a parameter estimation method using the flow pump technique is introduced to determine the unsaturated hydraulic conductivity function. This method provides more accurate and independent solution than previous methods for the determination of the unsaturated hydraulic conductivity function which is not subordinate to the soil-water characteristic curve or prediction models.

요 지

불포화 투수계수함수는 흙-수분 특성곡선과 함께 불포화토를 이해 연구하는데 있어서 없어서는 안 될 중요한 요소이다. 일반적으로 불포화 투수계수함수를 직접 측정하기에는 많은 어려움이 있기에, 흙-수분 특성곡선에 근거한 예측함수를 사용하여 불포화 투수계수함수를 구하곤 했다. 본 연구에서는 이러한 예측함수를 사용하지 않고, 피스톤 펌프 기법과 역해석 기법을 이용한 불포화 투수계수함수를 구하는 방법을 제시한다. 이렇게 구해진 불포화 투수계수함수는 예측함수를 사용하지 않았기 때문에, 흙-수분 특성곡선으로부터 독립적이며 예측함수를 사용한 경우보다 보다 정확한 불포화토의 특성을 보여준다.

Keywords : Flow pump technique, Inverse problem solution technique, Soil-water characteristic curve, Unsaturated hydraulic conductivity function

1. 서 론

본 연구는 “*피스톤 펌프 기법을 이용한 흙수분 특성곡선 측정방법*”(황창수 & 김태형, 2003)의 연결편으로서, 불포화토의 연구에 있어서 필수적인 요소인 불포화 투수계수함수(unsaturated hydraulic conductivity function)를 피스톤 펌프 기법(flow pump technique)과 역해석 기법(inverse problem solution technique)을 이용하여 구하는

방법을 제시하고자 한다.

불포화 투수계수함수를 측정하기 위한 방법에는 Richards가 제시한 흡기둥(vertical soil column)을 이용한 정상상태(steady state) 실험방법(Richards, 1931), Hassler가 제안한 반침투막(semi-permeable membrane)을 이용한 정상상태 실험방법(Hassler & Brunner, 1945), Welge가 고안한 비정상상태(unsteady state) 실험방법(Welge, 1952), 그리고 여러 연구자에 의해 연구된 계수예측방

1 정회원, 미국 콜로라도 주립대학교 토목공학과 박사후 연구원 (Member, Post Doc., Dept. of Civil, Environ., and Architectural Engrg., Univ. of Colorado at Boulder, Colorado, U.S.A.)

2 정회원, 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 전임강사 (Member, Full time Instructor, Division of Civil and Environmental System Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hotmail.com)

법(parameter estimation method 또는 역해석 기법) (Zachman et al., 1981; Dane & Hruska, 1983; Abu-Hejleh et al., 1993; Wildenschild et al., 1997) 등이 있다. 이 중 계수예측방법을 이용한 불포화 투수계수함수 추정방법은 불포화 투수계수함수를 직접 측정하는 어려움을 극복하기 위하여, 흡수분 특성곡선과 불포화 투수계수함수의 관계에 근거한 불포화토 지배방정식 (governing equation or Richards equation)을 풀어서 구한 수치해석의 결과와 불포화토의 석션반응치(measured suction response)를 비교하여 불포화 투수계수함수를 구하는 방법이다.

본 연구에서는 피스톤 펌프 기법으로 구한 흡수분 특성곡선과 같은 기법을 이용하고 강제경계조건(imposed boundary condition)을 적용한 석션반응치(measured suction response)를 이용한 역해석 기법으로 불포화 투수계수함수를 구하였다.

2. 역해석 기법(Inverse Problem Solution Technique)

일반적으로 불포화토 내의 수두변화를 구하기 위해서는 주어진 불포화토의 영역, 경계조건, 초기조건, 불포화토 지배방정식, 불포화토의 물성 값이 필요하다. 만약 이 모든 것이 다 갖춰졌다면 불포화토 내의 수두변화를 직접 구할 수 있는데, 이와 같은 방법을 정해석 기법(direct problem solution technique)이라고 한다. 하지만 이 중에서 불포화토의 물성 값은 모르지만 불포화토 내의 수두변화의 측정값을 이미 알고 있다면 이 경우도 역시 구해질 수 있는데, 이 경우를 역해석 기법이라고 한다.

불포화토 지배방정식에서 필요로 하는 불포화토의 물성 값에는 불포화 투수계수함수와 체적함수비(volumetric water content)가 있는데, 이들은 식 (1)에서와 같이 둘 다 간극수압의 함수값으로서 비선형값을 보여준다. 본 연구에서 체적함수비와 간극수압과의 관계인 흡수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)은 피스톤 펌프 기법(황창수 & 김태형, 2003)으로 구하였으며, 불포화 투수계수함수는 역해석 기법으로 구해진다. 또한 지배방정식의 결과 값인 불포화토 내의 수두변화는 피스톤 펌프 기법을 이용하여 측정되었다. 본 연구에서 강제경계조건에 의한 수두변화 측정값을 특히 석션반응치라고 정의내렸다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\Psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\Psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\Psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta(\Psi)}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, k 는 불포화 투수계수함수, Ψ 는 간극수압, h 는 전수두, 그리고 θ 는 체적함수비이다.

본 연구에서는 피스톤 펌프 기법을 이용하여 양질의 실험측정결과인 흡수분 특성곡선과 강제경계조건에 의한 수두변화측정결과를 구할 수 있었기에 역해석 기법을 이용하여 불포화 투수계수함수를 구할 수 있었다.

본 연구에서 불포화토의 영역, 경계조건, 초기조건은 피스톤 펌프 기법을 사용함에 따라 정해지는데, 영역은 흡수 시료 전체이다. 경계조건은 영역의 윗 부분, 옆 부분, 그리고 아랫 부분으로 나뉘서 고려할 수 있는데, 먼저 윗 부분에는 일정한 기준압력(reference pressure)을 가했으며 옆 부분은 흡수 시료를 고무막(latex rubber membrane)으로 고정시켰으므로, 이 두 경계조건은 모두 Neumann 형인 불침투성(impervious) 또는 $\partial h / \partial n = 0$ (여기서, n 은 임의의 공간좌표이며 $\partial h / \partial n$ 는 변화도(gradient)이다.)으로 정의된다. 그리고 실험이 진행됨에 따라 아랫부분에서는 피스톤 펌프로 일정한 유속을 가하게 되므로 이 경계조건도 역시 Neumann형으로 $\partial h / \partial n = constant$ 이다. 초기조건으로는 포화도와 간극수압 값이 있는데, 초기 포화도는 피스톤 펌프 기법에서 실험이 항상 완전한 포화상태에서 시작되기 때문에 100%이며, 초기 간극수압 값은 실험이 끝난 후 항상 영으로 보정되기 때문에 zero이다. 본 연구는 불포화토에 대한 해석이기 때문에 지배방정식은 Richards equation(식 (1))이며, 지배방정식을 풀기 위한 두 계수 중 첫 번째는 흡수분 특성 곡선 값인 체적함수비이다. 그리고 두 번째 계수는 불포화 투수계수함수인데 이 두 번째 계수 값은 본 연구에서 역해석 기법으로 구해질 값이다.

3. 실험시료와 흡수분 특성곡선

불포화토 해석을 위하여 선정된 흙은 미국 콜로라도주 동쪽에 위치한 Bonny Dam지역에 분포하는 Bonny silt로서 비중은 2.6이며 평균입자크기는 0.008~0.06mm이며 그림 1에서 입경분포가 제시되고 있다. 포화 투수계수(saturated hydraulic conductivity)는 간극률이 0.39일 때 $2.7 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 였다. 실험에 사용된 흡수 시료의 직경은 72.5mm, 높이가 33.5mm이었다.

불포화토 해석에 필요한 첫 번째 물성 값인 흡수분

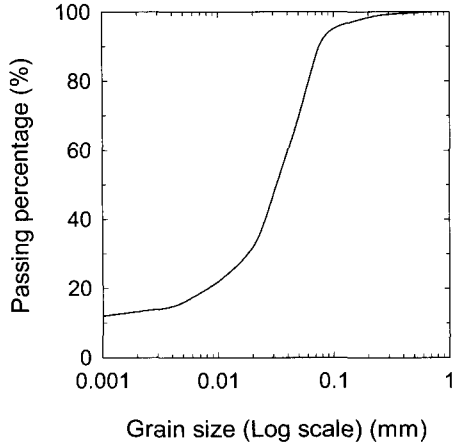


그림 1. Grain size distribution of Bonny silt

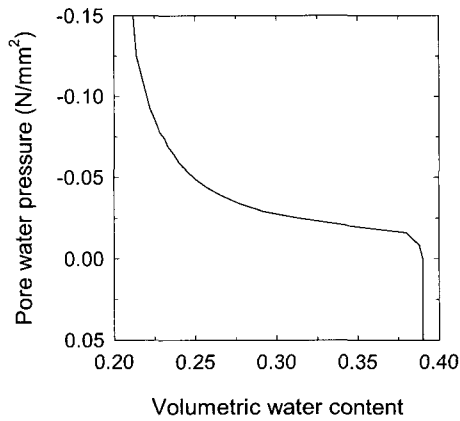


그림 2. Soil-water characteristic curve of Bonny silt

특성곡선은 피스톤 펌프 기법(황창수 & 김태형, 2003)을 사용하여 구하였다(그림 2). 그림 2에 제시된 흡수분 특성곡선은 건조곡선(drying curve)으로 이는 피스톤 펌프 기법에서 강제경계조건에 의한 석션반응치를 측정할 때 항상 흡 공시체를 포화상태($S=100\%$)에서 포화도를 낮춰가며 실험을 했기 때문이었다.

4. Brooks와 Corey의 예측모델을 이용한 해석

본 연구를 통해 제안하는 역해석 기법을 사용하여 불포화 투수계수함수를 구하기 이전에, 기존의 예측함수로 구한 불포화 투수계수함수를 이용하여 주어진 문제를 정해석 기법으로 먼저 풀어보았다. 이는 단순히 흡수분 특성곡선의 모양에 근거하여 불포화 투수계수함수를 예측하기 때문에, 예측함수를 이용하여 구한 불포화 투수계수함수가 주어진 문제에 얼마나 잘 맞는지를 시험해 보기 위함이었다. 불포화도 해석에는 Geo-Slope

사의 Seep/w가 사용되었다.

정해석 기법을 위한 예측함수 선택에 있어서는 Brooks와 Corey의 모델(Brooks and Corey, 1964)을 선택하였는데, 그 이유는 Brooks와 Corey의 모델의 공기침입값(air entry value point)이 다른 예측함수들, 예를 들면 Childs와 Collis-George의 모델(Childs and Collis-George, 1948), Irmay의 모델(Irmay, 1954), van Genuchten의 모델(van Genuchten, 1980) 등에 비해 피스톤 펌프 기법(황창수 & 김태형, 2003)으로 구한 실험결과값과 가장 근사하기 때문이다.

본 연구에서 사용 되어진 Brooks와 Corey의 모델식은 다음과 같다.

$$S_e = \left(\frac{a}{\Psi} \right)^\lambda \quad \text{and} \quad S_e = \frac{S(\Psi) - S_r}{1 - S_r} \quad (2)$$

$$k_r = S(\Psi)e^\varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{2+3\lambda}{\lambda}, \quad \text{and} \quad k(\Psi) = k_r k_{sat} \quad (3)$$

여기서, S_e 는 유효(effective) 포화도, a 와 λ 와 ε 는 조정상수(fitting parameter), Ψ 는 간극수압, S_r 은 잔류(residual) 포화도, S 는 포화도, k_r 은 상대투수계수, e 는 간극비, k 는 투수계수, 그리고 k_{sat} 은 포화투수계수이다. 본 연구에서 사용한 상수 값으로는 a 가 1.6, λ 는 1.1, S_r 은 0.5, 그리고 k_{sat} 은 2.7×10^{-8} m/sec였으며, 이 모델로 구한 불포화 투수계수함수는 그림 3에 제시되고 있다.

그림 4에서는 예측모델로 구한 불포화 투수계수함수를 이용하여 정해석 기법으로 구한 해석결과와 피스톤 펌프 기법을 이용한 실제 측정결과(석션반응치)를 비교한 것이다. 그림 4에서 검고 작은 점으로 표시된 값은 강제경계조건에 의한 석션반응치로서 피스톤 펌프 기법

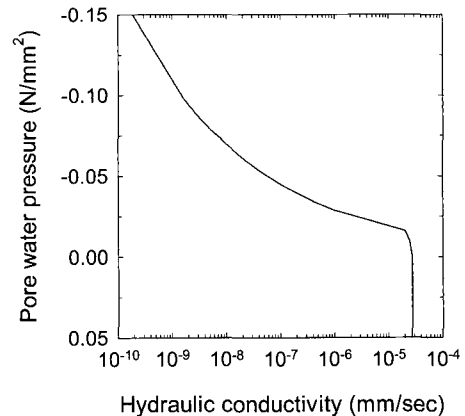


그림 3. Predicted unsaturated hydraulic conductivity function based on the Brooks and Corey's model

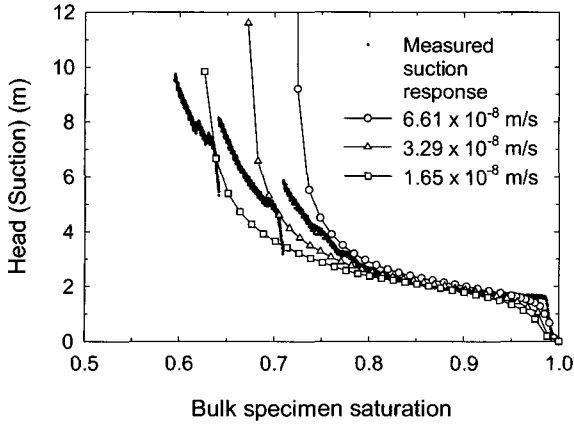


그림 4. Comparison between experimental and simulation results with the predicted unsaturated hydraulic conductivity function using the Brooks and Corey's model

으로 측정한 실험결과이며, 흰색기호와 실선으로 표시된 값은 정해석 기법의 결과이다. 실험에서는 실험결과와 해석결과의 보다 정확한 비교를 위하여 동일한 초기 조건에 대한 각기 다른 세 가지 유속(Darcian velocity)을 사용하였다. x축의 포화도는 석션반응치의 경우 측정되어진 포화도가 흙 시료 전체를 대표할 수 없기 때문에 포화도가 아닌 겉보기포화도(bulk specimen saturation)라고 정의되었다(황창수 & 김태형, 2003).

그림 4는 피스톤 펌프 기법으로 강제경계조건에 의한 수두변화값을 측정한 석션반응치를 정해석 기법으로 모의실험(simulation)을 하였기 때문에 적절한 불포화 투수계수함수가 사용되었다면 실험결과와 해석결과가 동일했어야 된다. 하지만 그림 4에서 보여지는 것과 같이 부간극수압(negative pore water pressure)이 발달함에 따라 실험결과와 해석결과에 있어서 많은 차이를 보여주고 있다. 예를 들어 그림 4에서 겉보기포화도가 0.725 일 때 Darcian velocity가 $6.61 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ 에 대한 부간극수압 값이 석션반응치는 5m, 그리고 정해석 기법의 결과에서는 9m로 나타나고 있다. 여기서 석션반응치와 정해석 기법의 결과에서 부간극수압의 차이는 정해석 기법의 해석이 피스톤 펌프 기법의 실험에 대한 모의 실험이었기 때문에 예측함수로 예측된 불포화 투수계수함수가 적절하지 못했다는 잠정적인 결론을 내릴 수 있다. 이러한 석션반응치와 정해석 기법의 결과에서 부간극수압의 차이는 역해석 기법을 이용한 해석에서 더욱 잘 비교 설명된다.

5. 역해석 기법을 이용한 해석

역해석 기법을 이용한 해석에서는 먼저 임의의 불포화 투수계수함수를 사용하여 주어진 문제의 석션반응치(measured suction response)을 구한 다음 피스톤 펌프 기법으로 측정한 실험측정결과와 비교하였다. 역해석 기법을 이용한 해석이 피스톤 펌프 기법의 실험결과를 모의 실험한 것이기 때문에 해석결과가 실험결과와 일치할 때까지 불포화 투수계수 값을 변화시켰다.

그림 5와 6에서는 역해석 기법을 이용한 해석결과와 실험측정결과의 비교를 보여주었고, 그림 7에서는 역해석 기법으로 구한 불포화 투수계수함수를 보여주고 있다. 특히 그림 5에서는 피스톤 펌프 기법에 의한 실험이 진행됨에 따라 시간 변화에 따른 수두변화 값의

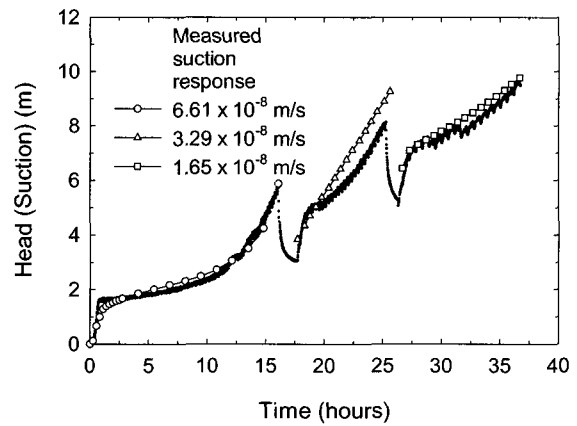


그림 5. Experimental and simulation results with the proper unsaturated hydraulic conductivity function using the inverse problem solution technique with time according to the experimental procedure

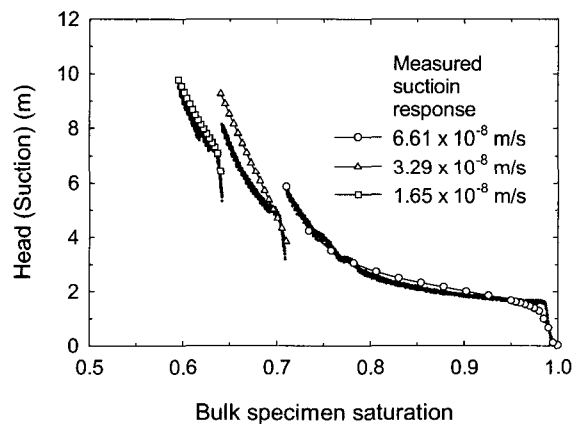


그림 6. Comparison between experimental and simulation results with the proper unsaturated hydraulic conductivity function using the inverse problem solution technique

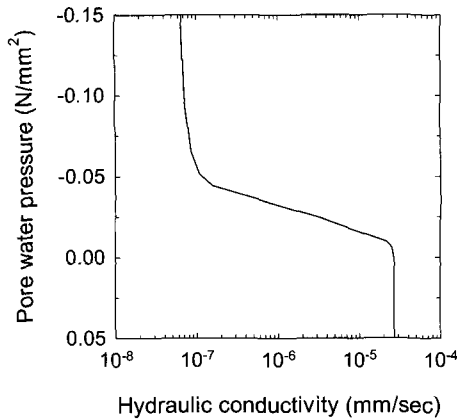


그림 7. The proper unsaturated hydraulic conductivity function solved using the inverse problem solution technique

측정(검고 작은 점)과 역해석 기법의 해석 값(흰색기호와 실선)에서의 일치율을 잘 보여주고 있다. 여기서는 역해석 기법으로 구한 적절한 불포화 투수계수함수를 이용했기 때문에, 피스톤 펌프 기법으로 측정되고 역해석 기법으로 해석된 수두변화 값이 각기 다른 세 가지의 유속(Darcian velocity)뿐만이 아니라 각각의 유속에 대한 각각의 초기조건에서도 잘 일치함을 보여주고 있다. 그림 6에서는 그림 5에서의 시간 변화를 겹보기포화도 값으로 보여 줌으로서 그림 4에서 나타난 실험결과와 해석결과의 불일치와 좋은 대비를 보여준다.

6. 결론

본 연구에서는 피스톤 펌프 기법에 바탕을 둔 보다 신뢰할 수 있고 보다 정확한 불포화 투수계수함수를 구할 수 있는 역해석 기법이 제시되었다. 다음은 본 연구에서 얻을 수 있었던 결론이다.

- (1) 본 연구에서 제시된 역해석 기법은 기존에 이미 연구되어진 역해석 기법보다 피스톤 펌프 기법으로 구한 양질의 실험결과에 근거하였기 때문에 기존의 방법에 비해 보다 신뢰할 수 있고 보다 정확한 불포화 투수계수함수를 구할 수 있다.
- (2) 본 연구에서 비교했듯이 기존의 예측함수를 이용하여 불포화 투수계수함수를 구하는 경우보다 역해석 기법으로 구한 불포화 투수계수함수는 실제 실험측

정결과에 근거했기 때문에 흡수분 특성곡선으로부터 독립적이며 보다 신뢰할 수 있고 보다 정확한 불포화 투수계수함수를 구할 수 있다.

- (3) 본 연구에서 사용한 피스톤 펌프 기법의 실험에서는 가장 단순한 실험상황인 1차원(1-dimension) 조건(황창수 & 김태형, 2003)으로 실험을 했기 때문에 역해석 기법에 사용되어질 실험결과를 구하는데 있어서 실험상의 오차를 최대한 줄일 수 있다.

참고 문헌

1. 황창수, 김태형 (2003), "피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법", 한국지반공학회지, 제19권 5호, pp.155-162.
2. Abu-Hejleh, A.N., Znicari, D., and Illangasekare, T.H. (1993), "Permeability determination for unsaturated soils", *Unsaturated Soils*, GSP No.39, ASCE, Houston, S. and Wray, W. eds., pp. 163-174.
3. Brooks, R.H., and Corey, T. (1964), *Hydraulic properties of porous media*, Colorado State University, Hydrology Papers, Ft. Collins, Colorado, USA.
4. Childs, E.C. and Collis-George, N. (1948), "Soil geometry and soil-water equilibria", *Disc., Faraday Society*, No.3, pp.78-85.
5. Dane, J.H., and Hruska, S. (1983), "In-situ determination of soil hydraulic properties during leaching", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.47, No.4, pp.619-624.
6. Hassler, G.L., and Brunner, E. (1945), "Measurement of capillary pressures in small core samples", *Petroleum Technology*, Technical Paper, pp.114-123.
7. Irmay, S. (1954), "On the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol.35, pp.463-467.
8. Richards, L.A. (1931), "Capillary conduction of liquids in porous media", *Journal of Applied Physics*, Vol.1, pp.318-333.
9. SEEP/W. (1996), Version 4, GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
10. van Genuchten, M. Th. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *SSSA Journal*, Vol.44, pp.892-898.
11. Welge, H. J. (1952), "A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive", *Transactions AIME*, Vol.195, pp.91-98.
12. Wildenschild, D., Jensen, K.H., Hollenbeck, K.J., Illangasekare, T.H., Znicari, D., Sonnenborg, T. and Butts, M.B. (1997), "A two-stage procedure for determining unsaturated hydraulic characteristics using a syringe pump and outflow observations" *Soil Science Society of America Journal*, Vol.61, pp.347-359.
13. Zachman, D.W., Duchateau, P.C., and Klute, A. (1981), "The calibration of the Richards flow equation for a draining column by parameter identification", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.45, pp.1012-1015.

(접수일자 2003. 7. 28, 심사완료일 2004. 1. 27)