

〈기술보고〉

방사성 폐기물 처분동굴 내로 유입되는 지하수량 추정 및  
처분동굴 폐쇄후 지하수 유동 경로 분석

최희주 · 박주완 · 김창락 · 이명찬

한국원자력연구소

(1995. 8. 9 접수)

요 약

지하 암반내에 방사성 폐기물 영구 처분을 위한 동굴이 건설될 경우 정상 상태에서 처분동굴 주변 암반이 균질 다공성 매질이라는 가정 아래 동굴내로 유입되는 지하수량을 NAMMU 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산하였다. 계산 결과는 산정상 밑과 해저밑이 약간 유입량이 많았으나 위치에 크게 영향 받지는 않았다. 계산값의 검증을 위해서 비교적 단순 지형에 대한 해석해를 유도하여 비교하였다. 처분시설 폐쇄후 성능 평가를 위해 지하수 유동 거리가 가장 길 것으로 예상되는 산정상 밑 동굴에 대해 유동 경로 분석을 수행하여, 처분 동굴로부터 지표수로의 지하수 유동 거리 및 유동 시간 등을 구하였다. 또한, 산정상 밑 처분동굴을 실제와 같이 5개로 모델링하여 유입량의 변화를 살펴 보았으며, 동굴 주변 암반 특성의 값에 대한 지하수 유입량 변화를 알아 보았다.

1. 서 론

국내에서 발생하는 중·저준위 방사성 폐기물의 영구 처분을 위해 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터에서는 서해에 위치한 굴업도에 인공 동굴의 건설을 계획하고 있다. 이 동굴 처분시설에는 원자력 발전소 등에서 발생하는 중·저준위 방사성 폐기물이 1차 처분 용량 10만 드럼을 시작으로 총 25만 드럼이 처분될 계획이다.

지하 혹은 해저에 동굴을 건설하면 동굴내로는 지하수두 차에 의해 지하수가 유입된다. 방사성 폐기물 영구 처분을 위해 동굴을 건설하여 처분시설을 운영할 경우, 운영 기간중 처분 동굴내에는 폐기물 드럼만이 적재될 뿐 빈 공동 상태로 유지된다. 지금까지 방사성 폐기물 처분 시설 주변에서의 지하수 유동에 관한 연구가 국내에서 여러 차례 있었고, 이에 대한 계산 결과가 발표되었다. 그러나 이들은 대부분 처분시설의 안전성 평가를 위한 처분장 주변에서의 지하수위의 예측 및 지하수 유동 경로를 결정하는 것에 한정되었다[1, 2].

본 논문에서는 운영 기간중 예상되는 처분동굴내로 유입되는 지하수량을 계산하여 처분시설내의 배수설비 설계를 위한 예비 자료를 생산하고, 지하수 유입 측면에서 최적의 처분시설 위치를 제시하고자 하였다. 아직 굴업도에 대한 지질 조사가 충분히 진전되지 않아 본 평가에는 문헌의 대표적인 지질 자료를 이용하였고, 암반은 균질한 특성을 갖고 있다고 가정하였다. 처분 동굴 주변

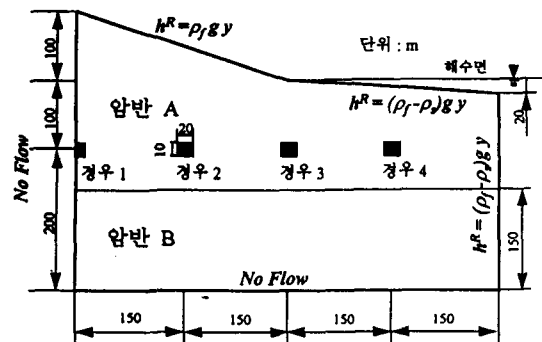


그림 1. 지형 단면, 처분동굴의 위치 및 경계조건.

지질구조를 가능한 한 단순화시켰으며 (그림 1 참조), 처분 동굴에 대한 제원은 현재까지 진행된 개념설계 자료를 이용하였다[3]. 또한, 처분시설 폐쇄후 처분시설로부터 지표수로의 지하수 유동 경로에 대한 분석을 수행하였다. 본 계산을 통해 얻어진 지하수 유동 거리 및 유동 시간등의 결과는 향후 처분시설의 안전성 평가에 필수적인 방사성 핵종 이동 현상 분석의 중요한 입력자료가 될 것이다.

수치적인 계산은 국제 지하수 유동 검증 프로그램인 HYDROCOIN[4]을 통해 검증되었고 지하수 해석에 있어 널리 이용되고 있는 NAMMU 프로그램을 이용하였다[5]. 수치해석 계산 결과는 비교적 단순한 지형에 대해서 유도된 해석해와 비교하였다.

## 2. 이론 및 해석

일반적으로 지하에 동굴이 건설되면, 주변의 지하수체는 곧 바로 정상 상태를 회복하며 동굴내로 지하수가 유입된다. 균질 다공성 매질내에서 정상 상태에서 지하수두는 Darcy 법칙과 연속 방정식으로부터 라플라스 방정식으로 표시할 수 있으며, 2차원의 경우 직교 좌표에서 다음과 같이 표현된다[6]:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 지하수두[m]로 압력수두와 위치수두의 합이다.

또한 지하수의 유량은 Darcy의 법칙을 따르며, 이는 다음과 같다:

$$q = -K \nabla h, \quad (2)$$

여기서  $q$ 는 단위 단면적을 통해 흐르는 유량 [ $m^3/sec m^2$ ],  $K$ 는 수리전도도 [ $m/sec$ ]이다.

라플라스 방정식(1)은 비교적 간단하지만 대상 지형이 그림 1과 같이 단순하지 않을 경우, 이에 대한 해석해를 구하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 지하수 해석에 널리 이용되는 프로그램인 NAMMU를 이용하였다. 이 프로그램은 Galerkin 방식을 이용한 유한요소법으로 작성되었다.

유입되는 지하수량의 계산 방법은 먼저 식 (1)의 해로부터 지하수두를 구하고, 식 (2)로부터 단위 면적당의 유량을 구하여 처분동굴 단면에 대해 선적분을 수행하였다.

또한, 수치해를 통해 구한 유량의 검증을 위하여 수평한 지형내의 동굴에 대한 해석해를 이용하였다. 다음의 식은 수평한 지형내 깊이  $H_0$  [m] 되는 곳에 반경  $r$  [m]인 동굴로의 지하수 유입량을 나타낸다 (부록 참조):

$$Q = \frac{2\pi KH_0}{\ln(2H_0/r)}, \quad (3)$$

여기서  $Q$ 는 단위길이를 통해 유입되는 지하수량 [ $m^3/sec m$ ],  $K$ 는 암반의 수리전도도 [ $m/sec$ ]이다.

## 3. 처분 시스템 설정

본 논문의 관심은 (1) 지하에 동굴이 건설되어 처분장이 운영중일 때, 이 동굴내로 유입되는 지하수량이 어느 정도될 것인가를 추정하여 처분시설의 배수설비등의 설계 예비 입력자료를 생산하고, (2) 지하수 유입량 측면에서 최적의 동굴위치를 결정해 보며, (3) 처분동굴 폐쇄후 처분동굴로부터의 지하수 유동 경로를 분석하는 것이다.

동굴내로 지하수 유입량 평가를 위해 그림 1에 나타난 바와 같은 굴업도의 한 수직 단면에 지하동굴을 건설한다고 가정하였다. 지하수 해석은 2차원 수직단면에 대하여 수행하였고, 지하수 해석을 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 요소들을 결정하였다(그림 2는 경우 2에 대한 유한요소망이다). 지하 암반의 투수계수는  $10^{-15}m^2$ , 공극률은 0.03을 이용하였으며[7], 이와 같은 암반내에 높이 10m, 폭 20m, 길이 700m의 지하 동굴이 건설된다고 가정하였다. 여기서 해석상의 편의를 위

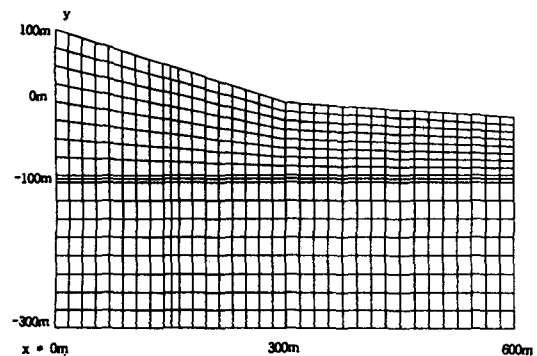


그림 2. 경우 2 계산에 이용된 그리드.

해 700m 길이의 지하 동굴은 140m 길이의 동굴 5개를 한 곳에 일렬로 붙여 놓았다고 가정하였다.

본 계산에 이용된 경계 조건은 다음과 같다. 굴입도 정상에서의 지하수위 대칭 조건으로부터 왼쪽 경계면에서의 지하수 흐름은 없다고 가정하였으며, 지표면에서는 지하수위가 지표면과 일치하여 비례한다고 가정하였다. 해저 및 오른쪽 경계면에서 지하수 유동에 영향을 주는 압력은 해수와 지하수의 밀도차에 의한 것이므로 다음과 같은 경계 조건을 부여하였다 :

$$h^R = (\rho_f - \rho_s)gy \quad (4)$$

여기서  $\rho_f$ 는 지하수의 밀도 [ $kg/m^3$ ],  $\rho_s$ 는 해수의 밀도 [ $kg/m^3$ ] 이며,  $g$ 는 중력가속도 [ $m/sec^2$ ],  $y$ 는 해수면으로부터의 깊이[m]를 나타낸다. 또한, 해수면으로부터 지하 300m의 바닥면에 지하수의 흐름이 없다는 조건을 부여하였다. 처분 동굴내에서의 경계 조건은 처분시설 운영중 동굴 내부가 대기와 연결되어 있어 대기압이 유지된다고 간주하였다.

일정한 깊이에서 최적의 처분 위치를 결정하기 위하여 그림 1에 나타난 바와 같이 4가지의 경우를 고려하여 보았다. 즉, 산 정상 바로 밑(경우 1), 섬 내부(경우 2), 육지와 해수의 경계 밑(경우 3), 해저 밑(경우 4) 등에 4가지의 처분동굴 위치를 선정하고 각각에 유입되는 지하수량을 계산하였다.

#### 4. 계산 결과

그림 1에 나타난 바와 같은 서로 다른 4가지 동굴 위치에 대해 지하수 유입량을 계산하였다. 그림 3은 경우 1에 대한 지하수 유동 방향을 나타내는 벡터도이다. 운영기간중 처분동굴 내의 수압이 대기압으로 유지되기 때문에 주변 암반으로부터 동굴내로 지하수가 유입되고 있음을 쉽게 알 수 있다. 각 위치별 동굴내로 유입되는 지하수량을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 산정상 바로 밑(경우 1)과 해수밑(경우 4)에 동굴을 건설하였을 경우가 높은 수두영향으로 약간 많은 유입량을 보여주었으나, 대체적으로 동굴 위치의 영향을 많이 받지 않는 것을 알 수 있다. 또한, 지층의 영향을 보기 위해 암반 B의 투수계수가  $10^{-16}m^2$ 로 낮아졌을 경우에 대해서도 그림 4에 2 layer에 대한 계산 결과를 별도로 나타내었다. 그림 4로부터 동굴내로의 지하수 유입량은 하부 지층이 상대적으로 불투수성을

가질 때 약간 감소함을 알 수 있다. 동굴내로 유입되는 지하수량에 가장 크게 영향을 미치는 값은 동굴이 위치한 지층의 투수계수임을 알 수 있다.

본 계산에 대한 검증을 위하여 경우 3에 대해서 구한 유입량을 식(3)에 주어진 해석해를 이용하여 비교하였다. 식(3)을 이용하기 위하여 동굴 둘레 길이와 동등한 길이를 갖는 원통형 처분장을 고려하여 계산하였다. 계산 결과를 살펴보면, NAMMU를 이용하여 계산할 경우 산 정상 바로 밑에 위치한 700m 길이의 처분 동굴로의 지하수 유입량이 66.2 l /min 이었으며, 식(3)을 이용할 경우는 95.4 l /min 이었다. 계산값의 차이는 처분동굴의 형태 및 경계조건의 차이 등에 의한 것으로 생각된다.

실제 처분 시스템의 경우 700m 길이의 동굴 1개가

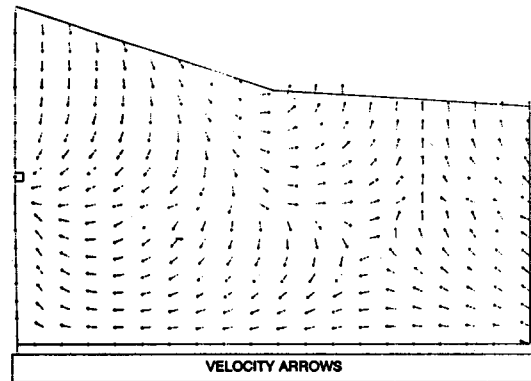


그림 3. 경우 1에 대한 지하수 유동 벡터도.

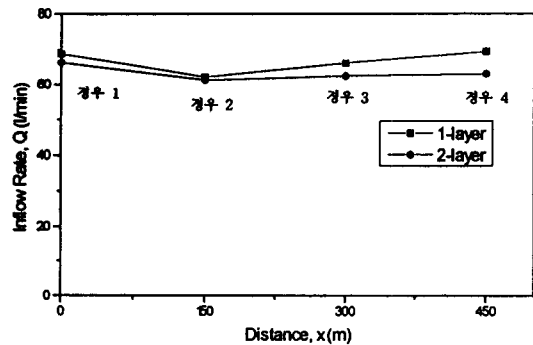


그림 4. 각 동굴로의 지하수 유입량. 여기서 1 layer는 암반 A와 B의 투수계수가  $1 \times 10^{-15}m^2$ 로 동일한 경우이고, 2 layer는 암반 B의 투수계수가  $1 \times 10^{-16}m^2$ 인 경우이다.

건설되지 않고, 140m 길이 처분 동굴 5개가 60m 간격을 갖고 서로 평행하게 위치하고 있다. 따라서 이러한 차이가 지하수 유입량에 미치는 영향을 알아보기 위해 경우 1에 대해 그림 5에 나타난 바와 같은 동굴 배치를 이용하여 계산하였다. 계산 결과를 살펴보면 700m 길이 동굴로의 지하수 총유입량이 66.9ℓ/min 인 반면, 140m 길이 동굴 5개의 지하수 총유입량은 36.5ℓ/min으로 지하수 유입량 계산에 큰 영향을 미쳤다. 이것은 하나의 단일 동굴이 아닌 5개 동굴로 분산시켰을 경우, 인접한 동굴이 있는 방향의 지하수 두 차가 작아지기 때문이다. 따라서 보다 정확한 계산을 위해서는 실제 동굴의 배치 상태를 고려한 모델링이 필수적인 것으로 판단된다.

또한, 처분동굴 주변 암반의 투수계수 변화에 따른 지하수 유입량 계산을 하였다. 그림 6에 주어진 바와 같이 주변 암반의 투수계수값에 대해 지하수 유입량은 선형적인 변화를 보였다. 그림 6의 결과를 이용하면 처분 부지에 대한 지질 조사로부터 얻어진 주변 암반의 투수계수값을 이용하여 동굴내로의 지하수 유입량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

경우 1의 처분동굴로부터 지하수 유동 경로가 가장 길 것으로 예상되어, 처분시설 폐쇄후에 대한 지하수 유동 경로 분석을 수행하였다. 폐쇄시 처분동굴 내부는 충전 물질로 채워진 후 폐쇄된다. 따라서 이 경우 지하수 유입량 계산에 이용하였던 경계조건을 더 이상 이용하지 못하게 되고, 폐쇄 후의 충전 상태를 고려한 별도의 계산이 필요하다. 그림 7은 투수계수  $10^{-14}m^2$ , 공극률 0.079의 파쇄석으로 동굴 내부를 충전한 경우 폐쇄후 처분 동굴 주변의 등수위선과 지하수 유동경로를 나타내고 있다. 폐쇄후 지하수 유동 방향은 더 이상 동굴로 향하지 않고 수두가 높은 산 정상으로부터 해수면을 향하고 있음을 알 수 있다. 이 때 처분장으로부터 지표수까지 지하수 유동 경로는 길이 744m였으며, 유동 시간은 약 1,470년이었다.

### 5. 결 론

굴업도와 같은 도서내의 암반에 동굴 처분시설을 건설할 경우 운영기간중 동굴내부는 공동 상태로 인하여 수두차에 의해 지하수가 유입된다. 유입되는 지하수 유량을 NAMMU 프로그램을 이용하여 추정하여 보았다. 아직 지질 조사가 충분히 수행되지 않아 암반이 균질 다

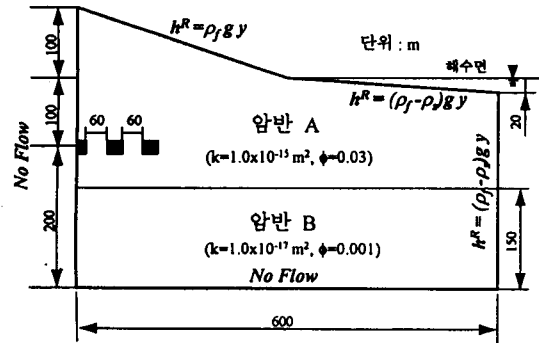


그림 5. 처분동굴의 배치를 고려한 경우 1에 대한 지형 단면 및 경계조건.

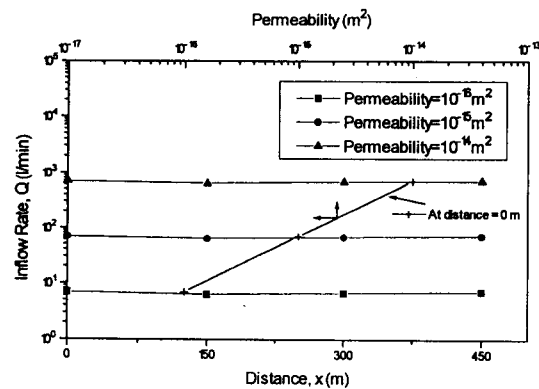


그림 6. 투수계수에 따른 4가지 동굴 위치에 대한 지하수 유입량 변화. x는 왼쪽 경계면으로부터의 거리를 나타낸다.

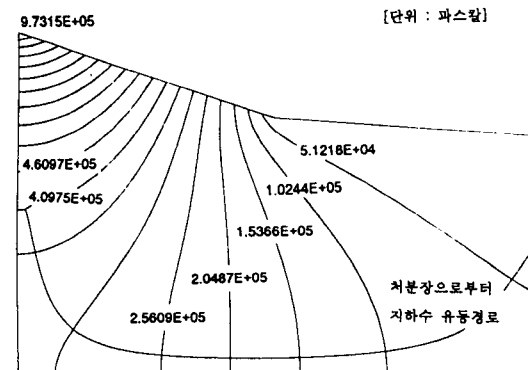


그림 7. 경우 1에 대한 동굴 폐쇄후의 등수위선 및 유동 경로.

공성 매질이라 가정하였고 지질 자료는 대표적인 값을 이용하였다. 처분 동굴의 위치 및 형태, 크기 등은 현재 까지 진행된 처분시설 개념설계 자료를 이용하였다.

지하수 유입량 계산 결과를 살펴 보면, 도서내 약 100m 깊이에 높이 10m, 폭 20m, 길이 700m의 인공 동굴을 건설할 경우 산정상 아래가 약간 많은 유입량을 보였으나 나머지 위치들의 경우는 거의 비슷하였다. 각 경우 주변 암반의 투수계수가  $10^{-15}m^2$ 일 때, 유입량은 60~70 l /min을 보였다. 터널을 700m 길이의 1개로 간주하여 계산하는 것보다 실제와 같이 140m 길이로 각각 60m 씩 떨어져 있는 5개의 동굴로 모델링하여 계산하는 경우 지하수 유입량이 크게 감소하였다. 주변 암반의 투수계수에 대한 지하수 유입량은 서로 선형 관계로 민감도를 보였고, 동굴이 위치한 암반 밑에 투수계수가 더욱 낮은 암반이 위치할 경우도 유입량에 크게 영향을 미치지 않았다. 따라서 추후 이 지역에 대한 부지 조사가 이루어지면, 배수시설 설계 등을 위한 예비 자료의 확보에 본 계산에서 구해진 투수계수-유입량 계산 결과가 이용될 수 있을 것이다.

처분시설이 건설되어 운영후 폐쇄되었을 경우, 처분 시설로부터 지표수로의 방사성 핵종 이동의 경로를 알아보기 위하여 이에 대한 해석을 수행하였다. 유동거리가 가장 길 것으로 예상되는 산정상 밑 동굴에 대해 분석해 본 결과, 지하수 유동 거리 744m, 유동 시간 1,470년 등이 구해졌으며, 여기서 구해진 유동거리, 유동시간은 추후 처분시설의 성능 평가에 필수적인 방사성 핵종 이동 계산의 중요한 입력자료가 될 것이다.

본 논문에서는 아직 굴업도에 대한 지질 조사가 충분히 수행되지 않아 대표적인 지질 조건에 대해서 분석을 수행하여 보았다. 또한 처분시설이 바닷가에 위치하고 있어 해수 침입 효과도 고려하여야 하나 이에 대한 분석은 충분히 수행되지 않았다. 이들에 대한 분석은 추후 부지 지질 자료가 구해진 후 본 논문에서 제시한 분석 방법을 따라 수행할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 서경석, 이한수, 한경원, "방사성 폐기물 처분장 주변에서 정상상태의 지하수 수치모델 개발," 대한 토목학회 논문집 제 9권, pp. 103~112 (1989)
2. 김 천수의, 자연방벽 안전성 연구. 제3권 암반의 지하수유동 해석절차 개발, KAERI-NEMAC /

- RR-124 /94 (1994)
3. 박 현수의, 중·저준위 방사성 폐기물 영구처분시설 건설, KAERI-NEMAC /PR-38 /94 (1994).
4. OECD /NEA, The International HYDROCOIN PROJECT, Level 1 : Code Verification, OECD /NEA Paris 1988 (1988)
5. Rae, J., P.C. Robinson and L.M. Wickens, A User's Guide for the Program NAMMU 1. General Information, AERE-R 12120, UKAEA, UK (1981)
6. Wang, H.F. and M.P. Anderson, Introduction to Groundwater Modeling : Finite Difference and Finite Element Methods, W.H. Freeman and company, New York (1982)
7. Freeze, R.A. and J.A. Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Inc (1979)
8. Greenberg. M.D., Advanced Engineering Mathematics, Prentice-Hall, Inc (1988)

부록. 동굴내로의 유입량 계산을 위한 해석해 (3) 유도

식(3)의 유도는 다음과 같은 등각사상(conformal mapping)을 통하여 구해졌다.

먼저 깊이  $H_0$ , 직경  $r$ 의 동굴 형태를 직경 1과 깊이  $H_0^* = \frac{H_0}{r}$ 이 되도록 변환하였다. 그림 8의  $z$ -평면에서 라플라스 방정식(1)의 해는 직접 해석적으로 구해지지 않아 이를 다른 복소평면인  $w$ -평면으로의 사상(mapping)을 하였다. 본 논문에서 고려하고 있는 시스템에 적합한 등각사상은 다음과 같으며 그림 8은 사상전과 사상후의 도형이다.

$$w = \frac{z-a}{az-1}, \tag{A-1}$$

여기서  $z, w$ 는 복소수이다.

이와 같은 등각사상후  $w$ -평면에서의 원통좌표계에서 라플라스 방정식은 다음과 같이 표시된다 :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \frac{1}{\xi^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} = 0, \tag{A-2}$$

여기서  $\Phi$ 는  $w$ -평면에서의 수위,  $\xi$ 와  $\theta$ 는  $w$ -평면에서의 좌표이다.

각 방향으로의 대칭성에 의해, (A-2) 식은 다음과 같이 간단히 된다 :

$$\frac{1}{\zeta} \frac{\partial}{\partial \zeta} \zeta \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} = 0. \quad (A-3)$$

또한 다음의 경계조건

$$\Phi(\zeta=1) = 0, \quad (A-4)$$

$$\Phi(\zeta=R) = H_0^* \quad (A-5)$$

에 대한 식(A-3)의 해는 다음과 같다 :

$$\Phi(\zeta) = \frac{H_0^*}{\ln R} \ln \zeta \quad (A-6)$$

여기서  $R$ 은  $\omega$ -평면에서 내부 원의 반경이며, 다음과 같이 주어진다[8] :

$$R = H_0^* - \sqrt{H_0^* - 1}. \quad (A-7)$$

동굴내로의 유량  $Q$ 는 다음과 같다 :

$$Q = \int_0^{2\pi} Kr \frac{d\Phi}{dr} d\theta, \quad (A-8)$$

여기서  $K$ 는 수리전도도,  $r$ 은  $z$ -평면에서의 좌표이다.

식(A-6)을 (A-8)에 대입하여 사용하기 위하여  $\omega$ -평면의 해를  $z$ -평면으로 다시 변환한 뒤 (A-8)식에 따라 적분하면 다음과 같은 유량  $Q$ 을 얻는다 :

$$Q = -\frac{2\pi KH_0^* r}{\ln R}. \quad (A-9)$$

(A-7)식을 (A-9)에 대입하고,  $H_0^* \gg 1$

라는 가정을 도입하면, 다음과 같은 근사해를 얻는다 :

$$Q \cong \frac{2\pi KH_0}{\ln(2H_0/r)}. \quad (A-10)$$

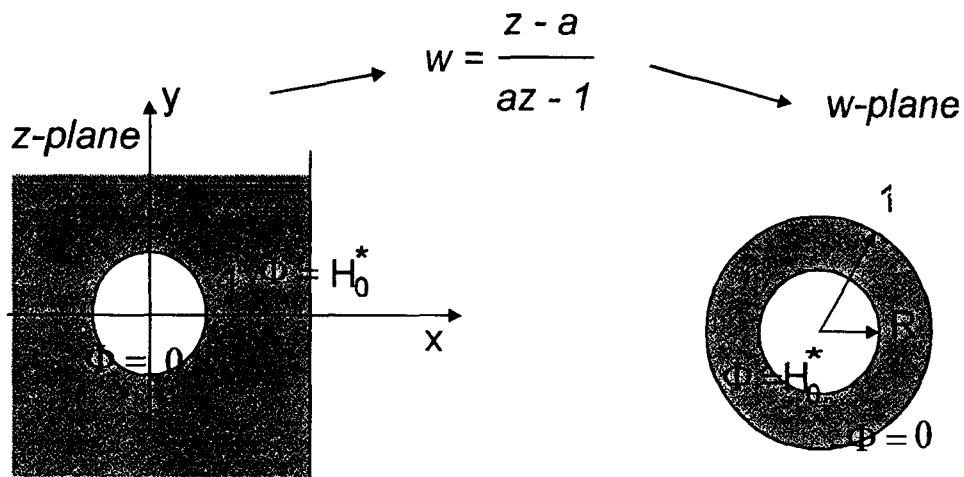


그림 8.  $\omega$ -평면으로의 라플라스 방정식의 등가 사상.