

## 회전노즐장비 작동시 하수관내의 열전달 및 유동현상에 관한 연구

박 영 기 · 이 장 춘 · 이 동 주\*  
익산대학 건설환경시스템과, \*군산대학교 토목환경공학부  
(2005년 8월 1일 접수; 2005년 12월 18일 채택)

### A Study On Heat Transfer and Flow Characteristics for Boring in Sewer by Rotating Cutter Tool

Young-Ki Park, Jang-Choon Lee and Dong-Joo Lee\*

Department of Civil & Environmental Engineering, Iksan National College, Iksan 570-752, Korea  
\*Division of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-702, Korea  
(Manuscript received 1 August, 2005; accepted 18 December, 2005)

Heat transfer and flow characteristics in a pipe in which the rotating cutting tool for boring a underground pipe without digging were considered in this study. The amount of heat generation due to the friction between the rotating cutter and pipe wall, mixing flow of air and water injected to cool down are the two important factors to design the boring machine. Computational fluid dynamics analysis using the Eulerian mixture model and the standard k- $\epsilon$  turbulence model was used to analyze the complex phenomena in a pipe during the process. Results show that pipe wall temperature decreased with increasing the cooling water inlet velocity. It is also shown that pipe wall temperature was lowered when the cutter rotation speed was increased until 600 rpm. There was no further cooling effect over 600 rpm.

Key Words : Heat transfer, Boring machine, k- $\epsilon$  turbulence model, Cooling effect

#### 1. 서 론

일반적으로 콘크리트 관, 합성수지 염화비닐관 또는 도관과 같이 지하에 매설된 관로는 시간이 지남에 따라 관 자체의 노후화나 지반 침하 등에 의해 균열, 파손 또는 접속 부분의 분리와 같은 문제점이 발생하게 된다. 이러한 부분을 통해 오폐수가 관로 외부로 유출되어 수질과 토양을 오염시키거나 관로 외부에서 물이 유입되어 하수처리에 과유량이 발생되는 원인이 되기도 한다.

이와 같이 지하에 매설된 관로를 보수하기 위한 공법에는 크게 땅을 굴착하여 보수하는 굴착식 방법과 땅을 굴착하지 않고 시행하는 비굴착식 방법이 있다. 비굴착식 방법은 보통 기존의 맨홀을 이용하여 된다. 비굴착 방식<sup>1)</sup>은 관로 손상부위의 특성

및 주위 여건에 따라 부분 보수 공법과 전체 보수 공법으로 나누어진다. 이 중 전체 보수 공법은 맨홀과 맨홀 사이의 관로 전체가 노후화 되고 손상정도가 심해 보강이 필요한 경우 시행되는데 보강 튜브 삽입 공법, 변형관 삽입 공법, 제관 공법 또는 신관 삽입 공법 등이 있으며 관로 전체의 내벽에 라이닝하여 넓은 범위에 걸쳐 있는 손상 부위를 일시에 보강하는 방법이다.

한편 대부분의 관로는 원하는 목적지까지의 길이를 갖도록 조인트 방식이나 소켓 방식에 의해 여러 개의 관을 연속적으로 결합시키게 된다. 따라서 각각의 관을 연결하는 이음부의 시공 불량, 지반 변동에 의한 침하 등에 의해 시간이 지남에 따라 관로 자체의 부식화가 심해지고, 관과 관 사이에 단차가 발생되며 관로 내벽에는 퇴적물이 퇴적되어 응고하게 된다. 이 외에도 관 연결 시, 관로 안쪽으로 연결관이 돌출 되는 경우가 종종 발생된다. 그럼에도 불구하고 관로 전체를 라이닝 보강 공사하는 경우 단 순히 보수재를 투입시켜 관로의 손상부위를 보강하

Corresponding Author : Young-Ki Park, Department of Civil and Environmental Engineering, Iksan National College, Iksan 570-752, Korea  
Phone: +82-63-850-0797  
E-mail: parkyk@iksan.ac.kr

고 있는 실정<sup>2)</sup>이다. 이 경우 관로의 안쪽 벽 전체에 라이닝을 한다 하더라도 단차 부분의 손상을 보수할 수 없게 되며 안쪽 벽의 부식층을 그대로 방치한 상태에서 덧씌우기 함으로서 기존 관의 보강기능이 약화될 뿐만 아니라 라이닝 두께만큼 관경의 축소를 가져오게 된다. 따라서 기존 관의 기능이 급속히 약화되고 하수 수송 능력이 저하되는 문제점이 있다.

본 연구에서 고려하고 있는 비굴착 관로 보링 장치의 위에서 서술한 문제점을 감안하여 관로 전체에 라이닝 보강 공사를 하기 전에 관로의 안쪽 벽을 연속적으로 보링 하도록 한 것이다. 이렇게 함으로써 관로의 부식단면을 제거하고 부수적으로 관로 내벽에 퇴적되어 있는 응고물질 및 관로 내측으로 돌출된 연결관을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 관과 관 사이에 형성된 단차를 제거할 수 있도록 되어 있다. Fig. 1에 이러한 회전 절삭 기구의 개념<sup>3)</sup>을 나타내었다.

이와 같은 회전 장치에서는 슬러지나 관로의 단차를 절삭하기 위한 회전 기구를 지닌 지장물

제거기의 설계가 가장 중요하다. 회전 커터 부분이 고속으로 회전하며 관로의 단차나 슬러지 등을 절삭하게 되며 절삭으로 제거된 파편은 노즐에 의해 분사되는 물에 의해 관 외부로 이송된다. 회전 커터 부분은 회전 시 관로 벽 등과 마찰하게 되므로 접촉 부분에서 열이 발생하게 되는데 노즐을 통해 분사되는 물은 또한 이 열을 냉각시키는 작용을 한다. 설계상의 문제점 중의 하나는 회전 커터 부분에서 발생하는 열을 적절히 냉각시키기 위한 물의 유량을 결정하는 것이다. 본 연구에서는 설계인자 도출의 첫 단계로서 먼저 전산유체역학 해석을 이용하여 노즐을 통해 분사되는 냉각수의 유량에 따른 냉각효과를 해석하였다.

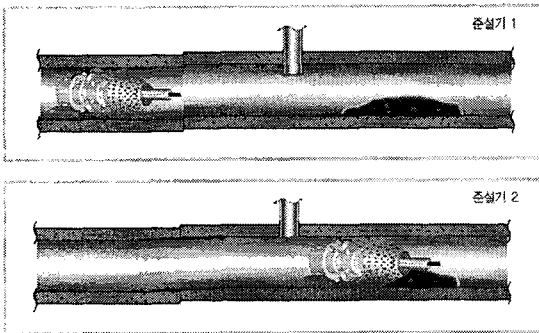


Fig. 1. Sketch of boring in sewer by rotating cutter tool.

## 2. 난류모델

### 2.1. 기본방정식

관로 내에서 공기와 물의 혼합물 유동을 정상상태, 비압축성으로 가정하면 지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다. 이 때 혼합물에 대한 모델은 Eulerian 모델을 적용하였다. 다상 유동에 대한 지배방정식을 기술하기 위해서는 상분율에 대한 개념이 필요하다. 임의의 상(phase)  $q$ 의 체적분율을  $\alpha_q$ 라 하면  $q$ 상의 체적  $V_q$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (1)$$

여기서,

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

이다. 이 정의를 이용하면 각 상의 체적분율은 다음과 같은 연속방정식에 의해 계산할 수 있다.

$$\nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}_q) = -\frac{1}{\rho_q} \left( \alpha_q \frac{d\rho_q}{dt} \right) \quad (3)$$

여기서,  $\vec{v}_q$ 와  $\rho_q$ 는  $q$ 상 물질의 속도 벡터와 밀도를 나타낸다. 각 secondary 상에 대해 위 식을 적용하고 식(2)의 각 상의 합이 1이라는 조건을 이용하면 primary 상에 대한 체적분율 값을 구할 수 있다. 상  $q$  유체에 대한 운동량 보존 방정식은

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 여기서  $\vec{\tau}_q$ 는  $q$ 상의 응력-변형률 텐서로서

$$\vec{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있다. 위 식에서  $\mu_q$ 와  $\lambda_q$ 는 각각  $q$ 상의 전단응력과 체적응력을 나타낸다. 식 (4)를 계산하기 위해서는 각 상사이의 운동량 교환을 나타내는 우변 마지막 항에 대한 모델이 필요하다. 여기서는 다음과 같은 비교적 간단한 형태의 모델을 사용하였다.

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (6)$$

여기서  $K_{pq}$ 는 각 상 사이의 운동량 교환계수를 나타내며 이에 대한 자세한 내용은 문헌<sup>4)</sup>을 참고하

기 바란다.

Eulerian 다상유동 모델에서는 에너지 보존을 기술하기 위해서 각 상에 대해 각각의 엔탈피 방정식을 사용한다. 각 상 사이의 에너지 교환을 무시할 수 있다고 하면

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = -\nabla \cdot \vec{q}_q \quad (7)$$

와 같이 쓸 수 있으며 이 때 점성소산(Viscous Dissipation)이나 생성열은 무시할 수 있다고 가정하였다. 식 (7)에서  $h_q$ 와  $\vec{q}_q$ 는 각각 q상의 비엔탈피와 열유속을 나타낸다. 기본적으로 위에 나타낸 연속 방정식과 운동량 및 에너지 보존방정식을 해석하면 관로내의 유동과 온도에 대한 특성을 파악할 수 있다. 이와 함께 유동이 난류일 경우에는 적절한 난류모델에 대한 식이 필요하다.

### 2.2. 수치해석

해석을 위해 Fig. 2와 같이 영역을 설정하였다. 본 연구에서 고려하고 있는 해석영역은 공기와 물이 혼합되어 있으며 커터의 회전에 의한 유동과 노즐을 통한 분사 등이 복합적으로 나타나게 된다. 이 경우 이론적 해석은 매우 어려우므로 유한체적법<sup>5)</sup>에 바탕을 둔 전산유체역학을 이용한 수치해석 방법을 적용하였다. 유한체적법은 해석영역을 많은 수의 제어체적으로 분할하고 각 제어체적에 대해 위의 지배방정식을 이산화(discretization)한 후 얻어진 대수방정식을 적절한 수치해석법을 이용하여 풀어서 해를 구하는 방법이다.

유체의 관로 내부에서 회전장치가 작동하게 되면 관 절삭 부분은 관과 접촉상태에 놓이게 되며 회전장치가 진행하는 오른쪽 방향은 유체가 자유롭게 유동할 수 있게 된다. 관로는 원통형이므로 관로내부의 현상은 축대칭으로 나타나므로 해석 영역은 이와 같은 대칭성을 고려하여 전체의 1/12을 모델링 하였다. 정해진 유량의 냉각수는 축 부분의 노즐입구를 통해 해석 영역으로 유입되며 커터의 회전에 의해 공기와 함께 회전하면서 오른쪽 방향으로 빠져나가게 된다. 따라서 노즐 입구에 유량과 온도가 주어지며 오른쪽 면은 압력 일정 조건을 사용하였다. 원관을 자른 면인 앞면과 뒤 면은 주기 경계조건을 적용하였으며 회전 커터 면의 속도에 대해서는 커터의 회전 속도를, 온도는 등은 조건을 적용하였다. 하수관 벽에 대해서는 점착조건을 사용하였으며 커터의 회전에 의해 절삭이 이루어지는 면에 대해서는 일정량의 열이 발생하는 것으로 간주하였다.

Fig. 3은 삼각형 요소로 분할 된 해석 대상, 즉 격자 시스템을 나타내고 있으며 격자수를 변화시키

면서 해의 정확도를 비교하는 격자의존성 테스트를 실시하여야 하나 여기서는 가장 작은 길이 스케일을 갖는 노즐의 단면적이 최소 10개 이상으로 분할되도록 하였다. 그 결과 해석영역은 약 13만 6천 개의 요소로 분할되었다. 해석은 유한체적기법에 바탕을 둔 상용 전산유체역학 해석 소프트웨어인 FLUENT<sup>4)</sup>를 사용하였다. 전산유체역학 계산에 의해 냉각수 유량과 냉각효율 등을 정확히 결정하기 위해서는 공기 중에 혼합되는 물에 대한 정확한 모델링이 선행되어야 한다. 이에 대한 모델링 작업을 통해 각 종 작업 변수에 따른 해석을 수행하여 설계인자를 밝히고자 하였다.

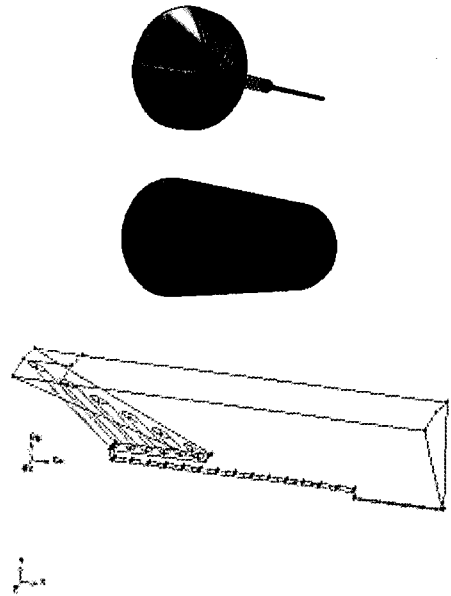


Fig. 2. Geometric shape of the nozzle section, concrete pipe, and computational domain considering periodic boundary condition, nozzles can be seen at the bottom.

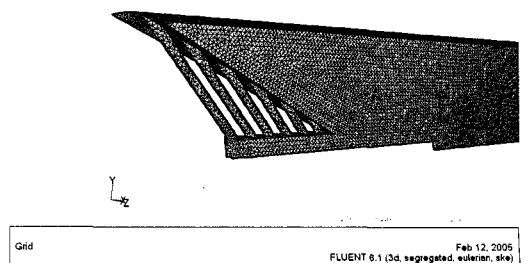


Fig. 3. Grid system for the simulations.

Table 1. Materials properties used in the simulations

properties	air	liquid water	concrete
density(kg/m <sup>3</sup> )	1.225	998.2	2000.0
specific heat(J/kg-K)	1006.4	4182.0	880.0
viscosity(kg/m-s)	1.789×10 <sup>-5</sup>	0.001	-
thermal conductivity(W/m-K)	0.0242	0.6	1.37

Table 2. Constants for standard k-εmodel turbulence model

C <sub>μ</sub>	C <sub>ε,1</sub>	C <sub>ε,2</sub>	σ <sub>k</sub>	σ <sub>ε</sub>
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

관은 콘크리트로 가정하였으며 Table 1에 공기와 물 및 콘크리트의 밀도, 열전도계수, 비열 등의 물성치<sup>6)</sup>를 나타내었다. 공기는 비압축성으로 가정하였으며 노즐을 통해 유입되는 혼합물의 물의 체적분율은 0.5로 하였다. 노즐 입구속도와 노즐의 지름을 기준으로 한 레이놀즈 수는 약 3 000에서 12 000사이이므로 난류영역이 된다. 난류모델은 혼합 유체에 대한 Euleria모델을 고려하여 표준 k-ε모델<sup>7)</sup>을 사용하였으며 이에 필요한 상수는 Table 2에 나타내었다.

### 3. 수치해석 결과 및 토의

#### 3.1. 관로내의 유동특성

먼저 관로내에 회전 장치가 작동할 경우에 대해 유동특성을 파악하기 위하여 노즐을 통한 유입속도가 0.1m/s, 회전기구, 즉 그라인더의 회전속도가 500rpm인 경우에 대해 해석을 수행하였다. 이 때 절삭되는 콘크리트 벽의 온도는 500K로 일정하다고

가정하였다. Fig. 4는 해석결과로서 주기경계조건을 부여한 단면에서의 압력분포를 나타낸다. 노즐을 통해 유입되는 부분과 유도관 부분에서 비교적 높은 압력분포를 나타내며 그 이외의 영역에서는 압력에 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 이것은 노즐을 통해 유입된 유체가 회전하는 유도관 벽에 부딪치면서 반경방향으로 전달되기 때문이다. 이러한 흐름은 Fig. 5에 나타낸 물의 체적분율을 통해 명확하게 볼 수 있다. 노즐을 통해 유도관으로 유입되는 부분에서 물의 체적분율이 높게 나타나며 일단 회전장치를 벗어나면 물은 유체운동의 원심력에 의해 주로 관 벽 부분에서 높게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 6은 그라인더 표면 부근에서의 속도벡터를 나타내는데 회전에 의한 운동량이 반지름이 커짐에 따라 증가하는 것을 볼 수 있으며 최대 속도는 약 0.49m/s로 나타났다. 이러한 비교적 빠른 원주방향 속도에 의해 공기에 비해 밀도가 큰 물이 관의 벽 쪽으로 집중되게 된다.

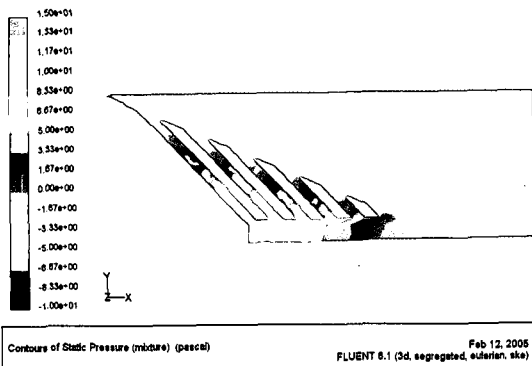


Fig. 4. Contours of static pressure for mixture flow.

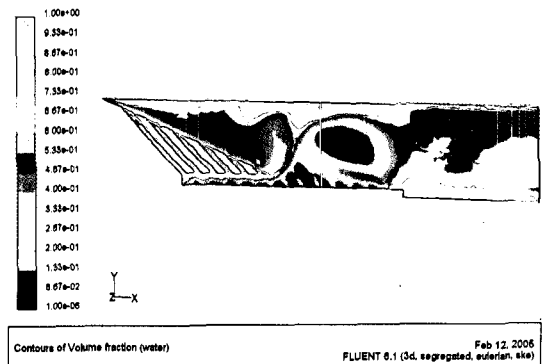


Fig. 5. Water volume fraction contour map, inlet velocity through nozzle and grinder rotation speed were 0.1m/s and 500rpm, respectively.

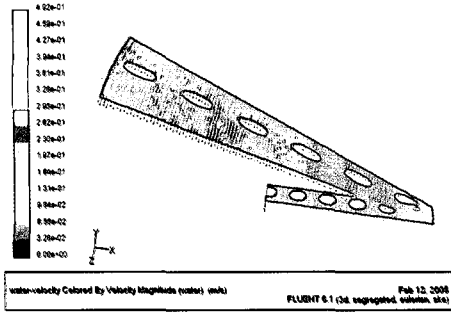


Fig. 6. velocity vectors on the surface of the grinder.

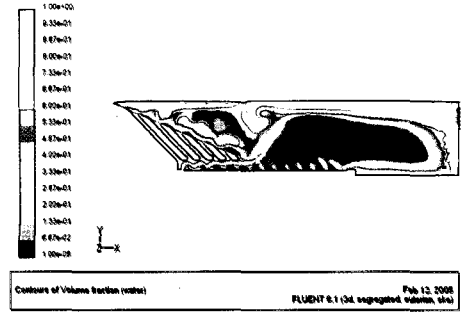


Fig. 7. Water volume fraction contours when inlet velocity was 0.4m/s.

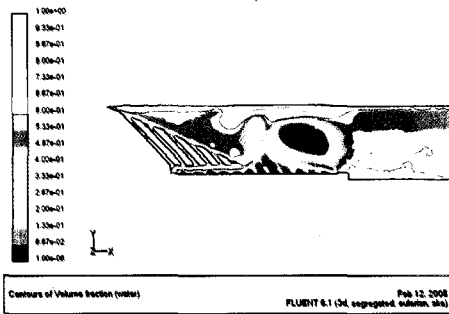


Fig. 8. Water volume fraction at grinder rotation speed of 300rpm.

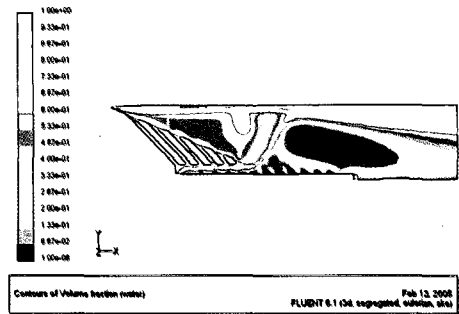


Fig. 9. Water volume fraction at grinder rotation speed of 700rpm.

### 3.2. 작업변수의 영향

노즐 유입 속도의 영향을 알아보기 위하여 회전 속도를 고정한 다음, 유입 속도를 0.2m/s, 0.3m/s 및 0.4m/s로 증가시키면서 유동 및 온도분포에 대해 해석을 수행하였다. 노즐을 통한 유입속도가 증가하게 되면 압력은 크기가 약간 증가할 뿐 그 분포는 0.1m/s인 경우와 유사하게 나타났다. 반면에 물의 체적분율 분포에는 변화가 있었다. 노즐을 통한 유입속도가 증가함에 따라 공기에 비해 밀도가 큰 물의 운동량이 증가하여 대부분 관로의 벽을 따라 흐르게 되므로 관로의 중앙 부근에서의 공기의 체적분율이 증가한다. 다시 말해 유입속도가 증가하면 물은 관벽으로 더욱 집중하게 된다. 이는 Fig. 7에 나타난 유입속도 0.4m/s인 경우의 물의 체적분율 결과를 Fig. 4의 결과와 비교해보면 명확히 알 수 있다.

그라인더의 회전속도가 관로내의 유동과 관벽의 온도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 회전속도를 300rpm에서 1000rpm까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. 해석 결과 회전속도가 증가할수록 그라인더의 오른쪽 끝단 부분의 유동에서 차이가 발생하였다. 그라인더의 회전속도가 증가하면 그라인더 부분의 유체의 원주방향 속도가 증가하게 되므로 그라인더 끝단 부분의 유체와의 속도차이가 커지게 된다. 이러한 특성을 300rpm일 때의 결과인 Fig. 8

과 700rpm에 대한 해석결과인 Fig. 9를 비교해보면 명확히 알 수 있다.

노즐의 유입속도와 그라인더의 회전속도에 따른 관로벽 작업부분의 온도변화를 Fig. 10과 11에 나타내었다. 노즐의 유입속도가 크면 그에 따른 물의 유량도 증가하기 때문에 관로벽 작업부의 온도는 낮아지게 된다. 본 연구에서 고려한 속도 범위에서는 온도가 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 효율적인 냉각을 위해서는 유입속도를 크게 하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 그라인더의 회전속도에 따른 작업부의 온도변화를 살펴보면 약 600rpm까지는 유입된 냉각수가 콘크리트 벽에 충돌하는 속도가 원심력의 증가에 따라 커지기 때문에 온도가 낮아지지만 그 이후에는 원심력 증가에 의한 냉각수의 충돌효과가 제한적인 유량에 의해 더 이상 증가하지 않기 때문에 일정한 온도로 유지된다. 회전속도가 증가하면 어느 정도 낮은 값까지는 유체의 속도증가에 따라 냉각효과가 커지지만 그 이후에는 냉각효과가 커지지 않는다는 것을 알 수 있다. 이 해석에서는 벽의 온도를 일정하다고 가정하였기 때문에 600rpm 이후에서 일정온도 값을 나타내지만 실제 상황에서는 회전속도가 증가하면 발열량이 커지게 되므로 온도가 오히려 증가할 가능성이 있다.

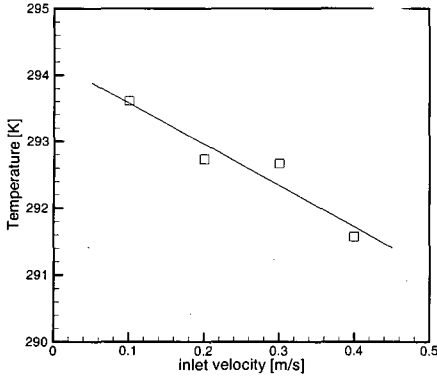


Fig. 10. Wall temperature variation according to the inlet velocity at nozzles.

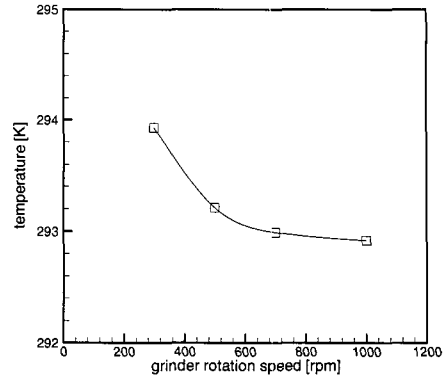


Fig. 11. Wall temperature variation according to the grinder rotation speed.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비굴착 방법으로 관로의 보수를 위한 장비를 개발하기 위하여 장비 작동 중, 노즐 유입속도와 그라인더의 회전에 따른 관로 내부의 유동특성과 관로 벽 작업부의 온도변화에 대해 전산유체역학을 이용하여 해석하였다. 해석을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 유입속도가 증가할수록 분사된 물은 관벽쪽으로 집중된다.
- 2) 회전속도가 증가할수록 그라인더 부분과 관의 공동부분의 유동영역이 구별된다.
- 3) 노즐의 유입속도가 증가할수록 냉각효과는 증가한다.
- 4) 회전속도가 증가하면 600rpm까지는 냉각효과가 커지나, 그 이상 값에서는 냉각효과가 더 이상 증가하지 않는다.
- 5) 해석 결과 노즐을 통한 유입속도는 크게 할수록 효과가 좋으며 그라인더의 회전속도는 적정 값이 존재한다는 사실을 알 수 있었다. 본 연구에서 고려한 작업 범위에서는 약 600rpm이 적정한 것으로 나타났다.

앞으로 회전속도에 따른 발열량을 나타낼 수 있

는 적절한 함수관계를 이용하여 그라인더 회전 시의 온도에 대해 정밀하게 해석할 필요가 있을 것으로 보인다.

#### 참고문헌

- 1) 모약개발 주식회사, 2002, CCTV·수밀검사 동시수행관로조사 공법, 특허공법 제 0296173호.
- 2) 모약개발 주식회사, 2001, 그라우팅·라이닝 복합보수공법, 특허공법 제 0292581호.
- 3) 모약개발 주식회사, 2001, 관로보링장치 및 그 공법, 특허출원번호 10-2001-0072050.
- 4) FLUENT 6.1 User's Guide Volume III, Fluent Inc., 10 Cavendish Court, Centerra Resource Park, Lebanon, NH 03766, USA, 20-22.
- 5) Versteeg, H. K. and W. Malalasekera, 1995, An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method, Longman Scientific & Technical, NewYork.
- 6) White, F. M., 1991, Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, Singapore.
- 7) Wilcox, D. C., 1993, Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., California.