KSS Fall '98 National Conference / November 6~7, 1998 / Seoul / Korea

압력분사 그라우트 유효경 평가기법 및 실내모형실험

Estimation Technique of Effective Diameter and Laboratory Model Tests for Pressure-Injected Grout

김홍택[1], Hong-Taek Kim, 강인규[2], In-Kyu Kang, 권영호[3], Young-Ho Kwon,
박사원[4], Sa-Won Park, 박시삼[4], Si-Sam Park

[1] 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik Univ.
[2] (주)브니엘 컨설턴트 책임연구원, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.
[3] (주)한라건설 기술연구소 대리, Assistant Manager, R&D Center, Halla Eng.&Constr. Co.
[4] 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

SYNOPSIS : There are many geotechnical engineering support systems where it is advantageous to inject a cement grout under pressure. The ground behaviour by the pressure-injected grout is assumed to the elastic behaviour, the elasto-plastic behaviour, and the plastic behaviour to the degree of the injection pressure. This study is proposed the estimation technique of the critical injection pressure starting elasto-plastic behaviour and the limit injection pressure occurring hydrofractures. Also, to verify an applicability of the proposed equations, laboratory model tests are carried out. Measured values of the expanded effective radius by pressure-injected grout are compared with predicted values. And comparisons of the relationship to the time vs the injection pressure show relatively good agreements.

Key Words : pressure-injected grout, laboratory model test, effective diameter, scale effect

1. 서론

압력분사 그라우트는 흙막이 벽체의 차수 및 굴착으로 인한 인접건물의 영향을 최소화하기 위해, 원지반 보강용으로 사용되고 있는 기법으로 최근에는 소구경 현장타설말뚝 및 지반앵커 등 토목관련 구조물에 다양하게 적용되고 있다. 압력분사 그라우트는 중력식 그라우트에 비해 발휘되는 마찰저항력이 주입압에 비례하여 선형적으로 증대하며(Hobst & Zajic, 1983), 최근의 연구결과에 의하면 현장타설말뚝의 경우 압력분사 그라우팅의 주입압력을 단계별로 서서히 증가시켰을 경우가 일정하게 유지시켰을 경우보다 지지력이 우수할 뿐만 아니라 수압파쇄(hydrofractures) 현상도 방지할 수 있는 것으로 나타났다(Kleyner at al., 1993). 그러나 압력분사 그라우트의 주입압이 고압일 경우에는 주변지반에서 수압파쇄 현상이 발생하는 등의 문제가 수반되기 때문에, 소구경 말뚝(micropiles)의 경우 일반적으로 5~10kg/cm^2 정도의 주입압으로 시공이 이루어 지고 있다. 따라서 압력분사 그라우트에 대한 경제적인 설계 및 시공을 위해서는 주변 지반조건을 고려한 주입압의 크기 결정과 압력분사로 인해 팽창된 그라우트체의 유효경에 대한 예측방법 등이 제시되어야 한다. 그러나 압력분사의 경우 주변지반의 거동 및 그라우트체의 고결과정 등 복잡한 메카니즘으로 인해 대부분 경험적인 접근방식을 토대로 설계가 이루어 지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 압력분사시 지반의 거동을 파악하여 수압파쇄가 발생할 수 있는 한계주입압에 대한

결정과 압력분사시 그라우트체의 팽창을 예측하기 위해 지반을 탄성 및 탄·소성모델로 가정하여 주입압에 따른 유효경의 변화를 예측하였으며, Kleyner 등(1996)이 제시한 시멘트 그라우트체의 압밀모델을 이용하여 시간에 따른 주입압의 변화를 예측하였다. 또한 실내압력분사 실험장치를 제작하여 시간에 따른 천공주면의 주입압의 변화와 주입압에 따른 유효경의 변화를 측정하여, 본 연구에서 제시한 유효경 평가기법의 타당성을 검증하였다.

2. 기본이론

2.1 압력분사시 지반거동

압력분사시 천공주면 지반의 거동은 공내재하시험시의 지반의 거동과 유사하며, 이를 구체적으로 설명하면 표 1과 같다. 표 1과 같이 분사압력이 낮은 상태에서 지반은 탄성적인 거동을 나타내며, 분사압력이 임계압력(p_{cr})보다 커지면 균열이 발생하면서 수압파쇄(hydrofracture) 현상이 발생한다. 이 때의 지반은 탄·소성거동을 나타내며, 분사압력이 더욱 커져서 한계압력($p_{\lim}$)보다 커지게 되면 지반은 소성거동을 나타낸다.

표 1. 압력분사시의 주입압력에 따른 지반거동

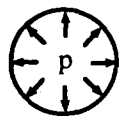
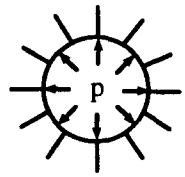
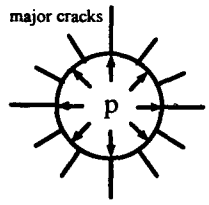
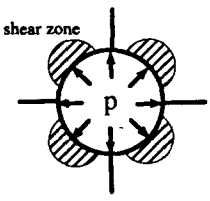
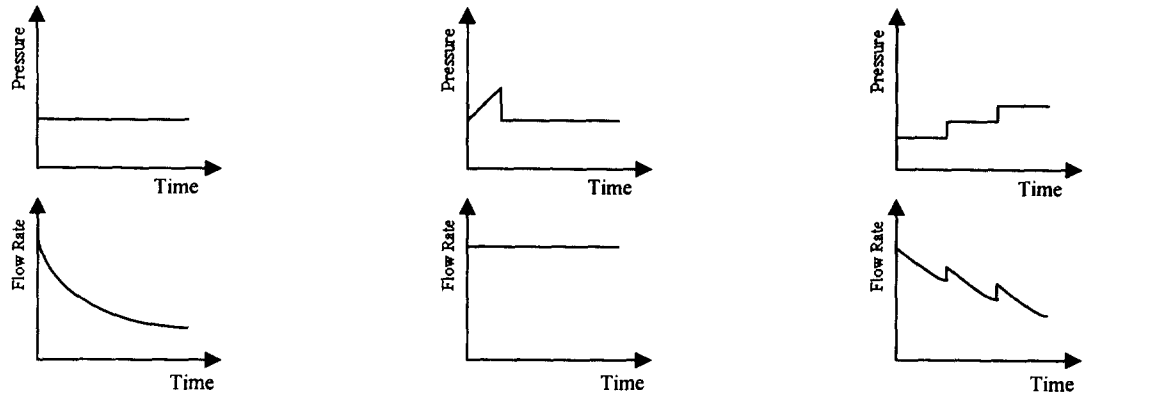
구 분	개 요 도	주 입 압 력	지 반 거 동
경 우 ①		$p < p_{cr}$	◦ 탄성거동 ◦ 지반내에 균열이 발생하지 않음
경 우 ②		$p = p_{cr}$	◦ 지반내에 균열이 발생하기 시작함 ◦ 수압파쇄(hydrofracture) 현상이 발생함
경 우 ③		$p_{cr} < p < p_{\lim}$	◦ 탄·소성거동 ◦ 지반내에 균열이 점점 크게 발달함
경 우 ④		$p > p_{\lim}$	◦ 소성거동

표 1에서 수압파쇄 현상은 주변지반의 소성화로 그라우트체의 팽창이 가속되지만 지반의 지지력의 증가는 발생하지 않기 때문에 분사압력은 수압파쇄 현상이 발생하지 않도록 조절하여야 한다. 이러한 수압파쇄 현상의 방지를 위한 방법으로 그라우트의 주입압력을 그림 1(c)와 같이 단계별로 증가시켜 시공할 경우 주변지반이 보강되면서 주입압력이 서서히 증가되기 때문에 수압파쇄 현상을 방지하면서 주변지반의 보강효과 및 지지력의 증가효과가 우수하게 나타난 연구사례도 있다(Kleyner 등, 1993).



(a) Constant Pressure (b) Constant Flow Rate (c) Incremental Pressure

그림 1. 그라우트 주입압력 방식

2.2 임계주입압 및 한계주입압

지반을 탄성상태로 가정하고 축대칭 상태에서의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용시켜 유도하면, 임계주입압(p_{cr})은 식(1)과 같이 정의할 수 있다(Kleyner 등, 1993). 또한 임계주입압은 표 1의 경우②와 같이 수압파쇄 현상이 발생되는 경계 및 지반의 탄성거동과 탄·소성거동을 구분하는 경계를 의미한다.

$$p_{cr} = \frac{1-K_a}{2}[\sigma_h + c \cdot \cot\phi] \tag{1}$$

여기서, σ_h : 정지상태에서의 수평토압, K_a : 주동토압계수

한계주입압($p_{\lim}$)은 천공주변 지반이 저항할 수 있는 최대주입압으로 Vesic의 공팽창 이론(1972)을 토대로 유도할 수 있다.

$$p_{ult} = c \cdot F_c + q \cdot F_q \tag{2}$$

여기서, $F_c = (F_q - 1) \cdot \cot\phi$, $F_q = (1-\sin\phi) \cdot (I_{rr} \cdot \sec\phi)^{\frac{\sin\phi}{(1+\sin\phi)}}$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1+I_r \Delta \sec\phi} \quad , \quad I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c+\sigma_h \tan\phi)}$$

Δ : 평균 체적변형율(비압축성인 경우, $\Delta = 0$), q : 초기 지중응력

2.3 시멘트 그라우트의 압밀모델

Kleyner 등(1996)은 압력분사시 시멘트 그라우트체 내부에 발생된 과잉간극수압은 시간이 지남에 따라 주변지반으로 흡수되어 소산되므로 점토의 압밀과정과 유사하다고 생각하여 시멘트 그라우트체 내부에 대한 압밀방정식을 식(3)과 같이 제시하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c\left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right] \tag{3}$$

여기서, c : 시멘트 그라우팅체의 압밀계수(포틀랜드 시멘트의 경우, 약 $0.5\,cm^2/\sec$)

r : 천공중심에서 방사방향으로의 임의 거리($0 < r < r_0$), r_0 : 천공반경

또한 천공 내부에 주입된 시멘트 그라우트는 방사방향으로 침투되므로 천공 바깥쪽 지반에 대한 방사방향으로의 임의 점에서의 과잉간극수압은 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial r} + h \cdot u = 0 \tag{4}$$

여기서, $h = \dfrac{k_s / k_g}{r_0 \ln(R/r_0)}$, $R^2 - r_0^2 = \dfrac{2 k_g p_0 / \gamma_w t}{e_g \ln\left(\dfrac{R}{r_0}\right)}$

R : 그라우트의 침투 영향반경

(일반적으로 지반의 투수계수, k_s=10^{-7}~10^{-4}cm/sec에서 1~3m 정도임.)

p_0 : 그라우트의 초기 주입압 , e_g : 그라우트의 간극비

따라서 식(3)에서의 과잉간극수압은 시멘트 그라우트 내부에서의 과잉간극수압을 의미하며, 식(4)에서의 과잉간극수압은 천공주변 지반에서의 과잉간극수압을 의미한다. 식(3) 및 (4)로부터 천공 내부에 주입된 시멘트 그라우트의 압밀은 천공 주변지반의 투수계수(k_s)와 시멘트 그라우팅체의 투수계수(k_g)에 크게 좌우되는 것을 알 수 있다. 압력분사로 인해 시멘트 그라우트체가 팽창되는 정도를 알기 위해, 식(3) 및 (4)로 부터 천공주면에서의 초기조건($u(r,0) = p_0$) 및 경계조건($u(r_0,t) = 0$)을 이용하여 천공주면에서의 과잉간극수압을 유도하면 식(5)와 같이 근사적으로 정리할 수 있다. 식(5)로부터 천공주면에 발생하는 과잉간극수압은 시멘트 그라우트의 압밀도, U(%)에 좌우됨을 알 수 있다.

$$\Delta p = u(r_0, t) = 2 p_0 h r_0 \frac{\exp(-c\mu_m^2 t / r_0^2)}{(\mu_1^2 + h^2 r_0^2)} \fallingdotseq \frac{16 p_0 h^2 r_0^2}{h r_0 + 4} [1 - U(t)] \tag{5}$$

여기서, $U(t) = 1 - \dfrac{4 h^2 r_0^2}{\mu_1^2 (\mu_1^2 + h^2 r_0^2)} \exp\left(-\dfrac{c \mu_1^2 t}{r_0^2}\right)$, $\mu_1^2 = \dfrac{8 h r_0}{h r_0 + 4}$

2.4 유효경의 평가

압력분사되는 시멘트 그라우트는 천공 주변지반의 저항정도에 따라 천공반경의 확대가 예상되기 때문에 시멘트 그라우트 주면을 따라 발생하는 마찰저항력의 평가가 전체 안정성에 중요한 문제가 되는 쏘일 네일링 공법 또는 지반앵커 공법에서는 압력분사 그라우트의 주입압에 따른 유효경의 평가가 중요한 문제이다. 시멘트 그라우트의 주입압에 따른 천공반경의 증가량은 표 1에서 정의된 주입압의 정도에 따라 탄성해석 또는 탄·소성해석으로부터 식(6) 및 (7)과 같이 예측할 수 있다.

(1) 탄성 해석($\Delta p < p_{cr}$ 인 경우)

$$\Delta r = \int_0^t \Delta_r \, dt \fallingdotseq \int_0^t \frac{(1+\nu)}{E} \frac{16 p_0 h^2 r_0^2}{h r_0 + 4} (1 - U(t)) \cdot r_0 \, dt \tag{6}$$

여기서, $\Delta_r = \dfrac{1+\nu}{E} \cdot \Delta p \cdot r_0$

(2) 탄·소성 해석($p_{cr} < \Delta p < p_{\lim}$ 인 경우)

$$\Delta r = \int_0^t \Delta_r \, dt \fallingdotseq \int_0^t \frac{(1+\nu)}{E} \left\{ \frac{2\left(\dfrac{r_p}{r_0}\right)^{f+1} + (f-1)}{f+1} \right\} \frac{16 p_0 h^2 r_0^2}{h r_0 + 4} (1 - U(t)) \cdot r_0 \, dt \tag{7}$$

여기서, $\Delta_r = \dfrac{(1+\nu)}{E} \cdot \Delta p \cdot r_0 \left\{ \dfrac{2\left(\dfrac{r_p}{r_0}\right)^{f+1} + (f-1)}{f+1} \right\}$, $f = \dfrac{\tan(45 + \frac{\phi}{2})}{\tan(45 + \frac{\phi}{2} - \psi)}$

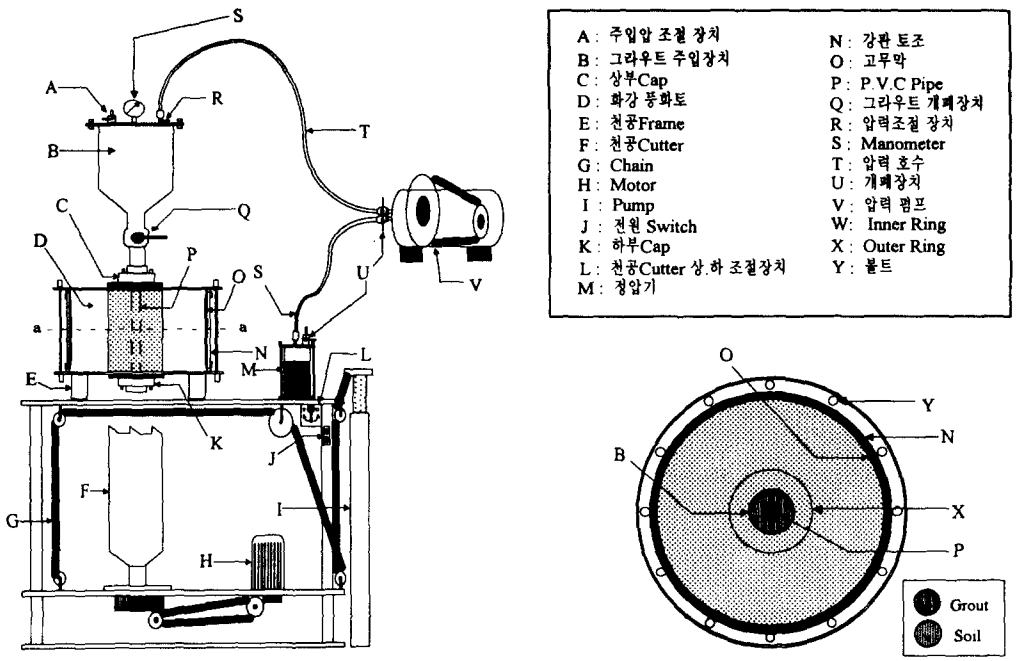
$$\frac{r_p}{r_0} = 1 + \frac{\Delta p - p_{cr}}{p_{\lim} - p_{cr}} (\sqrt{I_{rr} \sec\phi} - 1) \, , \quad \psi = \text{dilatancy angle}$$

3. 실내 압력분사 그라우트 실험

3.1 장치개요

본 연구에 사용한 압력분사 그라우팅 실험장치는 그림 2와 같이 두께 10mm, 직경 500mm, 높이 250mm의 강재 실린더형 토조와 압력분사 그라우팅 주입장치, 천공장치, 다짐기, 정압기 등으로 구성되어 있다. 또한 토조 내부는 90mm 또는 115mm로 천공하여 압력분사 그라우팅을 할 수 있도록 제작하였으며, 압력분사장치는 최대 10kg/cm^{2}까지 가압할 수 있도록 설계하였다.

실험시 천공주면에 작용하는 압력 및 지중에 작용하는 압력을 측정하기 위해 천공주면과 토체 내부에 각각 직경 90mm/115mm와 202mm의 스테인레스링에 strain gauge를 각각 4개씩 부착하였다. 또한 천공장치는 최대 10ton 용량의 모터와 정압기를 이용하여 일정속도로 커터를 회전시켜 가능한 시료가 교란되지 않게 했다.



(a) 측면도 (b) A-A 단면도

그림 2. 실내 압력분사 그라우트 실험 개요도

3.2 기본 물성실험

압력분사 그라우팅실험에 사용된 시료는 #200번체 통과율이 30%이상인 화강풍화토를 사용했다. 사용된 흙시료는 #4번체를 모두 통과하는 시료로서, 통일분류법에 의해 SM으로 분류되었다. 직접전단시험, 다짐시험, 삼축압축시험 및 비중시험에 의한 시료의 특성을 정리하면 표 2와 같다. 또한, 인장시험에 의한 스테인레스링의 특성치는 표 3과 같다.

표 2. 시료의 특성치

단위중량 (t/m^3)	내부마찰각 (°)	점착력 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)	포아슨비	비 중	간극비	투수계수 (cm/sec)
1.70	34.7	0.204	350	0.35	2.64	0.556	4.7×10^{-3}

표 3. 스테인레스링의 특성치

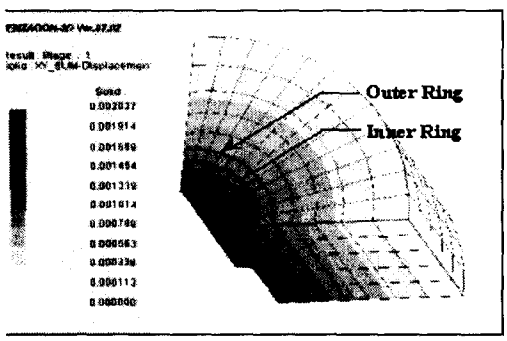
인장강도 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)
3200	2.40×105

3.3 실내 압력분사 실험장치에 대한 Scale Effect 평가

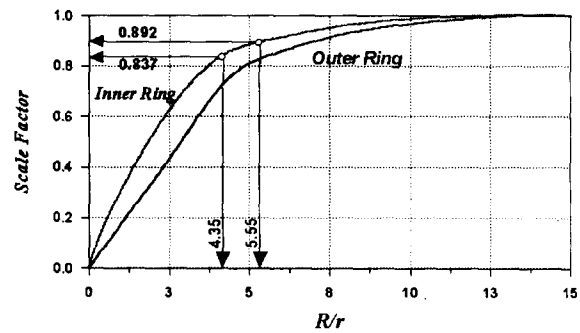
본 연구에서 수행된 실내 압력분사 실험장치는 직경 50cm의 토조 내에서 얻어진 결과이므로 측방변위가 구속되지 않는 실제의 현장조건과는 상이한 결과가 얻어질 수 있다. 즉, 실내 압력분사 실험장치로부터 압력분사된 시멘트 그라우트는 직경 50cm의 강철 토조에 의해 팽창이 억제되어 유효경이 실제 상태보다 작을 것으로 예상된다. 이러한 경향은 실내 압력분사 실험장치에 대한 Scale Effect로 평가할 수 있으며, 본 연구에서는 수치해석적인 접근방법을 통해 실내 압력분사 실험장치에 대한 Scale Effect를 정량적으로 분석하였다.

수치해석에 사용된 상용프로그램은 국내의 Emerald Soft사에서 개발한 PENTAGON-3D 프로그램을 사용하였다. 본 실내 압력분사 실험장치에 대한 Scale Effect 평가는 inner ring과 outer ring의 위치에서 방사방향 변위가 일정값에 수렴할 때까지 토조의 외경을 점점 크게 하여 해석한 결과, 천공직경의 15배정도에서 Scale Effect가 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서 Scale Effect는 천공반경(r)과 토조의 반경(R)의 비가 15일 때(즉, R/r=15)의 inner ring과 outer ring의 위치에서의 방사방향 변위를 1로 하여 R/r에 따라 계산된 변위값을 정규화시킨 Scale Factor를 도시하면 그림 3과 같다.

그림 3에서 알 수 있듯이 본 실험장치의 Scale Factor는 천공직경이 90mm인 경우 0.892 정도로 평가되었으며, 천공직경이 115mm인 경우 0.837 정도로 평가되었다. 즉, 천공직경이 90mm인 경우에는 본 실험에서 측정된 시멘트 그라우트의 유효경은 강철 토조의 구속으로 실제 현장상태의 89.2% 정도에 해당되며, 천공직경이 115mm인 경우에는 본 실험에서 측정된 시멘트 그라우트의 유효경은 실제 현장상태의 83.7% 정도로 판단할 수 있다.



(a) 격자요소망



(b) R/r의 변화에 따른 Scale Factor

그림 3. 실내 압력분사 실험장치의 Scale Effect 평가

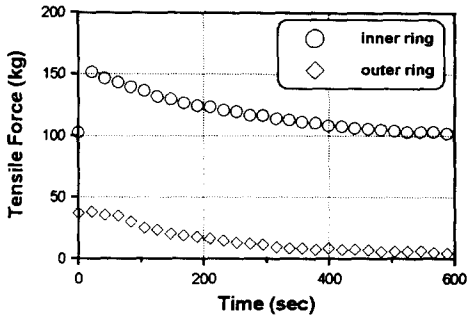
4. 실험결과 및 분석

4.1. 실험결과

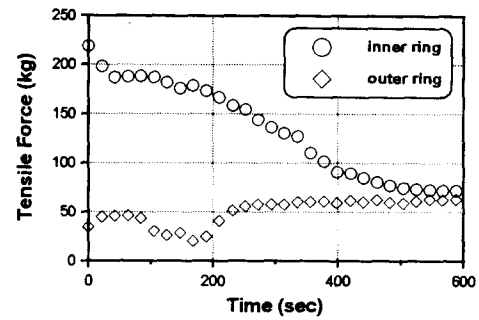
주입압에 따른 천공직경의 팽창정도를 알기위해, 각 실험조건별로 3회 이상 실험하여 평균치를 정리하면 표 4와 같다. 또한 각 경우별 시간에 따른 스테인레스링의 strain으로부터 예측된 스테인레스링의 인장력을 도시하면 그림 4와 같다. 그림 4는 천공면 안쪽에 설치되는 inner ring과 천공면 바깥부 토체 내부에 설치되는 outer ring에 각각 4개씩 부착된 strain gauge 값을 평균하여 정리하였다.

표 4. 실내 압력분사 그라우트 실험 결과

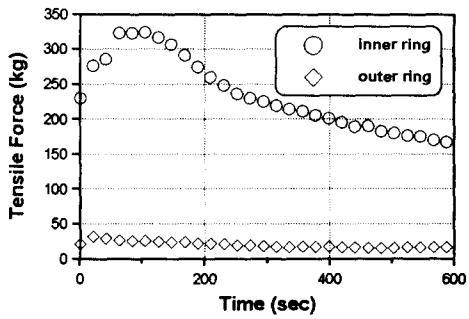
구 분	천공직경 (cm)	주입압 (kg/cm^2)	함 수 비 (%)		팽창반경 (cm)	주입시간 (sec)	W/C (%)
			실험전	실험후			
Case 1	11.5	4	14.3	15.7	0.60	300	40
Case 2	11.5	6	13.0	14.6	0.78	300	40
Case 3	11.5	8	11.8	12.0	1.14	300	40
Case 4	9.0	8	15.4	15.4	1.15	300	40



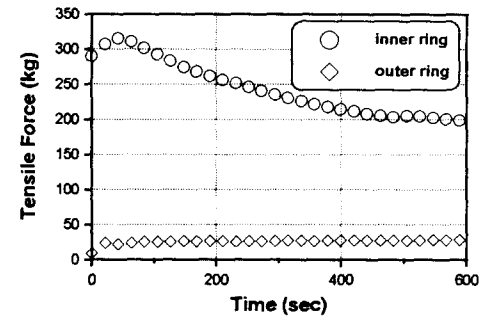
(a) Case 1



(b) Case 2



(a) Case 3

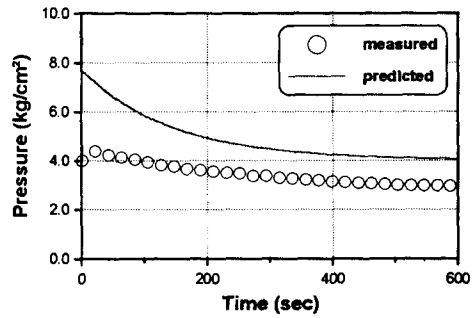


(b) Case 4

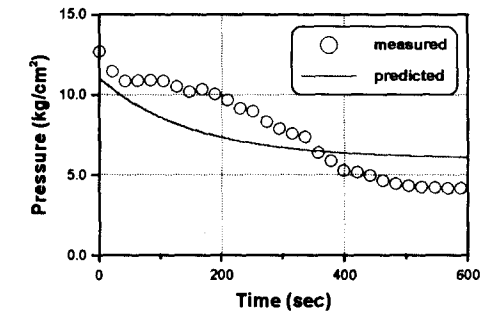
그림 4. 주입압에 따른 스테인레스링의 시간-인장력 관계곡선

4.2 시간에 따른 주입압의 변화

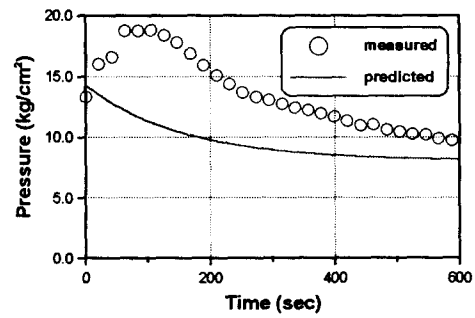
그림 4와 같이 측정된 스테인레스링의 인장력으로부터 inner ring에 작용하는 시멘트 그라우트의 주입압을 주장력공식(hoop tension formula)으로 부터 계산한 결과와 식(5)로부터 시간에 따른 주입압의 변화를 예측한 결과를 도시하면 그림 5와 같다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(a) Case 3

그림 5. 시간에 따른 주입압의 변화

4.3 주입압에 따른 유효경의 변화

주입압에 따른 시멘트 그라우트의 유효경의 변화는 주입압의 정도에 따라 식(6) 및 (7)로부터 예측할 수 있으며, 실험치와 예측치를 도시한 결과 그림 6과 같이 실내모형실험 장치에 대한 scale effect를 고려한 실험치와 예측치가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었다.

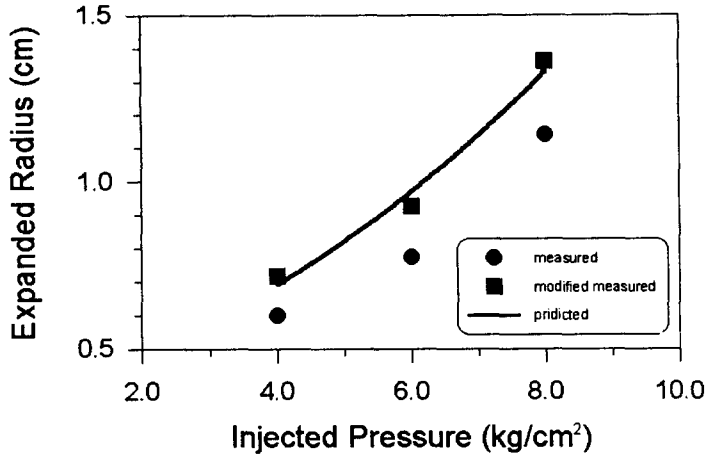


그림 6. 주입압에 따른 유효경의 변화

5. 결론

이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 압력분사시 지반의 거동을 파악하여 수압파쇄(hydrofracture)가 발생하는 시점 및 지반의 탄성거동에 대한 한계인 임계주입압과 지반의 소성거동 시점인 한계주입압에 대한 결정식을 제시하였다.

(2) 압력분사로 인한 시멘트 그라우트체의 유효경을 예측하기 위해 주입압의 정도에 따라 탄성해석 및 탄·소성해석으로부터 주입압에 따른 유효경의 변화를 예측하였다.

(3) 실내압력분사 실험장치를 제작하여 시간에 따른 천공주면의 주입압의 변화와 주입압에 따른 유효경의 변화를 측정하여, 본 연구에서 제시한 유효경 평가기법의 타당성을 검증하였다.

6. 참고문헌

(1) Chang, Y and Hassler, L. (1993)," An Analytical Solution of Ground Reaction Curves for Grouted Tunnels," Proc. of the International Coference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria, pp. 481-487.

(2) Clarke, B. G. (1995), Pressuremeters in Geotechnical Design, Blackie Academic & Professional, pp. 130-160.

(3) Hobst, I. L. and Zajic, I. J. (1983), Anchoring in Rock and Soil, 2nd Ed., Elsevier Scientific Pub.

(4) Kleyner, I. M. and Krizek, R. J. (1996)," Mathematical Model for Bore-Injected Cement Grout Installations," ASCE, Jour. of Geotech. Eng., pp. 782-788.

(5) Kleyner, I. M., Krizek, R. J. and Pepper, S. F. (1993)," Influence of Grout Pressure on Capacity of Bore-Injected Piles and Anchors," Proc. of the International Coference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria, pp. 159-165.

(6) Vesic, A. S. (1972)," Expansion of Curves in Infinite Soil Mass," ASCE, Vol. 98, No. SM3, pp. 265-288.