

# PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 필름형 트랜스듀서 하이브리드 터널배수재에 대한 오염퇴적물 제거효율의 현장 적용성 평가

신진화, 문준호, 김영욱\*  
명지대학교 토목환경공학과

## Assessment of Field Application of Contaminated Sediment Removal Efficiency Using PVDF Combined Hybrid Tunnel Drainage

Zhen-Hua Xin, Jun-Ho Moon, Young-Uk Kim\*

Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

**요약** 배수 시스템에서 오염퇴적물이 장기간 발생하게 되면 배수관 폐색현상을 일으켜 유지관리가 어렵고 배수관의 잔류수압이 커져 파손의 위험이 있다. 이에 본 연구에서는 PVDF 필름에 의해 발생하는 진동에너지를 활용하여 물리/화학적 폐색에 의한 터널배수 시스템 폐색을 감소시키는 시스템을 구축하였다. 또한, PVDF 필름을 기존 배수재와 융합한 하이브리드 배수재와 역압전 효과를 일으킬 수 있는 구동장치로 배수재 유지관리 시스템을 개발하였다. 터널 배수관 유지관리 성능을 고찰하기 위하여 실내조건에서 오염퇴적물을 모사하고 진동조건에서 폐색저감 효율을 관찰하였다. 그 결과 개발된 PVDF 필름 구동 장치로 20분 내외의 진동에너지를 발생하여 씻겨나간 오염퇴적물의 잔류면적을 측정한 결과 74.62%의 오염퇴적물 제거 효과를 볼 수 있었다. 현장 적용성 평가를 위하여 PVDF 필름을 배수관에 부착하고 장기적으로 음압측정을 하여 실내실험으로부터의 측정 음압과 비교하여 현장실험의 대응율을 제시하였다. 현장실험은 터널 배수관으로부터 내부에 폐색이 주로 발생하는 구간인 종배수관과 횡배수관에 PVDF 필름을 부착하였고 터널현장 음압측정 실험으로부터 오염물퇴적 제거효율은 실내실험대비 현장 대응율은 90% 이상으로 확인됐다.

**Abstract** Typically, contaminated sediments cause clogging of the drain pipe, which increases the residual water pressure in the drain pipe; this study constructed a system for improving drainage efficiency of tunnels by reducing physical and chemical obstructions through ultrasonic energy generated by a PVDF film. The developed hybrid drainage system utilized a PVDF material film fused with an existing drainage tunnel and maintenance system resulting in the ability to initialize the reverse piezoelectric effect, which was evaluated through an on site application. In order to investigate the maintenance performance of the tunnel drainage system, contaminated sediments were simulated in a drainage pipe to test the effect of ultrasonic conditions on drainage efficiency in the laboratory. As a result of applying the developed portable equipment, the ultrasonic energy was generated for about 20 minutes resulting in a reduction of 74.62% of the contaminated sediments and improving drainage efficiency. From the tunnel, acoustic pressure measurements were taken to calculate the response rate while taking into account the laboratory results. In addition, PVDF film was attached to the transverse and longitudinal side of the drainage pipes where contaminated sediments occur most often in the field tunnel. these calculations show contaminant removal was 90% effective.

**Keywords** : PVDF Film, Tunnel Drainage, Contaminated Sediment, Ultrasound Energy, Maintenance

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(18SCIP-B066321-06)” 과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1A2B4013188).

\*Corresponding Author : Young-Uk Kim(Myongji Univ.)

Tel: +82-31-330-6417 email: yukim@mju.ac.kr

Received November 28, 2018

Revised January 9, 2019

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

## 1. 서론

터널 준공 후 배수시스템은 터널구조물 유지관리 시 가장 중점적인 요소 중 하나이다. 많은 터널 배수시스템의 노후화로 인하여 보수 및 보강과 유지관리에 막대한 예산이 소요된다[1]. 배수재 및 배수시스템에 관한 노후화 사례를 조사한 결과 대부분이 배수시스템의 물리적/화학적 폐색현상(이론/실험) 및 이에 따른 잔류수압으로 인한 배수관 균열 및 누수로 인한 위험이 있었다. 배수공 등 시스템의 막힘 억제에 관해 주로 로봇을 이용하거나 물 분사에 관한 기술이 적용이 주를 이루고 있다[2]. 이러한 대형장비, 로봇, 대용량의 물차 및 인력에 따른 유지관리는 경제적이지 못하고 배수 시스템에서 발생하는 막힘 현상이 크면 클수록 유지관리가 어려워지며 막힌 노폐물 제거 시에 배수관 파손의 위험이 많이 증가한다. 따라서 배수시스템 기능 및 유지관리 기술 개선에 관한 연구가 많이 필요한 실정이다.

선행 연구로는 배수관에 초음파를 흘려 미세한 진동을 유발하여 배수관 내벽에 붙어 있는 이물질질을 제거하고 이물질이 새롭게 생성되는 것을 방지해주는 장치를 개발하였다[3,4]. 자계마당의 원리를 활용하여 스케일의 주원인인 탄산칼슘 입자의 형태를 강한 집착력 성분을 가지고 있는 Calcite에서 집착력이 약한 Aragonite로 변화시켜 부착력을 약하게 하여 부유 상태로 흘러가게 하는 공법이 있다[5,6]. 하지만 현장에서 장치의 휴대성이나 다양한 터널 환경에서 효율적인 적용이 가능해지려면 더 많은 연구가 필요하다. Polyvinylidene fluoride (PVDF) 압전필름은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 압전 직접 효과와 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 역압전 효과가 있는 기능성 필름이다(이하 PVDF 필름). 유연하고 내구성이 강한 특성 때문에 센서나 액추에이터에 널리 사용되고 있다[7]. 신진화 등은 PVDF 필름과 배수관을 결합해 전기적 에너지를 진동에너지로 전환되는 특성을 이용하여 배수관 스케일 부착력을 감소시켰고 PVDF 필름과 앰프장치의 최적 효율을 나타내는 진동수와 적용시간을 제시하였다[8]. 하지만 실험은 주로 실내에서 진행되었기에 현장 적용에 대한 고찰이 더 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 PVDF 필름을 활용한 하이브리드 배수 시스템의 유지관리 성능을 확인하기 위하여 오염되적 물질을 모사하여 세척효율을 고찰하는 실험을 진행하였다.

또한, PVDF 필름의 진동에너지는 떨림으로 인한 음압과 밀접히 연관이 있다. 현장 조건에 한해 PVDF 필름을 현장 터널 배수관에 부착하고 장기적으로 음압측정을 하여 PVDF 필름의 내구성을 관찰하고 오염되적물의 폐색 저감 현장 대응율을 관찰하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

PVDF 필름의 진동 발생을 위하여 주파수 제어용 함수발생기와 집합형트랜지스터 (BJT: Bipolar Junction Transistors, 이하 BJT) 증폭기 방식을 이용하여 PVDF 필름을 vibration actuator로 사용하여 효과적으로 진동 에너지를 인가할 수 있었다. 장비의 실용성과 현장 적용을 위하여 Fig. 1과 같이 PVDF 필름의 압전특성에 필요한 기능들을 개량하여 함수발생기를 증폭기장치 내부에 소형화시켜 통합형 PVDF 트랜스듀서 장비를 제작하였다. 장비의 실용성을 위하여 DC12V/DC24V - AC220V~AC240V 인버터와 연결하여 차량용 배터리 구동이 가능하도록 하였다.

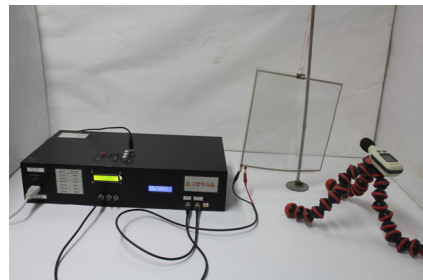


Fig. 1. Integrated PVDF transducer system

노후터널 현장 콘크리트 라이닝 부에 지면과 5° 각도로 설치된 배수공내에 백색침전물과 터널 주변의 토사성분이 혼합되어 배수공 막힘 현상이 생긴다. 초기에는 지하수 등 작은 충격에도 쉽게 분해되지만, 약 3년~10년 시간이 지나면 배수관 내부에 점점 쌓여 완전히 막히게 된다. 하지만 터널 건설 현장은 시공 중인 현장이고 현재 배수관 유입부 잔재물 확인이 어렵다. 이런 조건에 한해 PVDF 필름을 배수관에 부착하고 장기적으로 음압측정을 하여 PVDF 필름의 내구성을 관찰하였다. 현장에서 중배수관과 횡배수관에 다양한 진동수와 신호를 주어 음압을 측정하였고 실내실험과 현장에서의 음압 차이를 비

교하였다. 결과 값은 실내실험값 대비 현장 대응율을 간접 측정할 수 있었다.

연구에서는 프로세스 Fig. 2와 같이 실내실험과 현장 적용 평가로 나뉜다. 실내실험에서는 HDPE 관 내부에 PVDF 필름을 부착하였다. 또한 배수관 내 지하수 흐름에 의하여 부착된 오염물의 성분을 조사하였고 그에 대한 오염퇴적물을 모사하였다. 모사된 퇴적오염물은 일정한 시간 동안 양생을 거쳐 배수관 내부에 부착이 된다. 배수관 한 측에서 일정한 유속의 물로 20분 흘려 오염퇴적물이 씻겨 내려가는 효율을 고찰하였다.

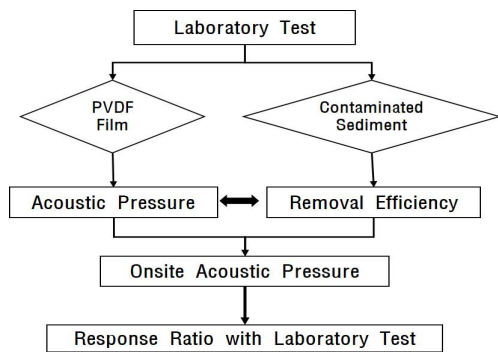


Fig. 2. Experiment Process

### 3. 실험 및 결과 분석

#### 3.1 실내 오염물 퇴적실험

아래 Fig. 3은 FVDF 필름 트랜스듀서 장비를 이용했을 때 오염퇴적물의 제거 효율을 측정할 실험이다. 터널 측방배수관의 경우 100mm 과형 HDPE 관을 사용한다. 따라서 검토를 위하여 현장조건에 맞춰 길이 2m인 HDPE 관을 5° 경사각으로 고정했다. HDPE 관 내부에 PVDF 필름을 부착하고 또한 배수관 내 지하수 흐름에 의하여 부착된 오염물의 성분을 조사하였고 그에 대한 폐색 모사를 하였다.

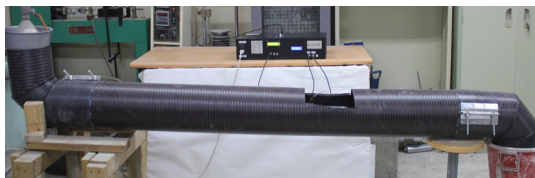


Fig. 3. Drainage maintenance system

우종태 등은 배수확인 공에 퇴적되어 쌓여있는 백색 침전물을 채취하여 화학시험연구원에 시험의뢰 하여 성분분석을 하였으며 시험기관의 성분분석으로부터 볼 때 그 결과는 Table 1과 같다[9]. 강열감량(Ignition Loss)은 시멘트를 950~1,050℃에서 강열 하였을 때의 감량을 말한다. 그 결과 산화칼슘 성분을 많이 함유하고 있으므로 시멘트 성분으로 판단되어, 시멘트의 원료인 석회석, 규석, 산화철 원료 석고 중에서도 석회석 성분과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Components analysis of contaminated sediment components (Unit %) [9]

Ingredient	Ignition Loss	SiO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
Sediment	43.4	0.51	0.17	0.41	55.1

터널현장에서 장시간 동안 형성되는 단단한 스케일뿐만 아니라 터널 암반 절리 및 간극사이로 이동하는 미세한 입자가 부직포의 간극을 매워 투수계수를 감소시킴과 동시에 이러한 토립자의 침전물들이 폐색효과를 일으킨다[10]. 이러한 오염퇴적물의 제거효율을 관찰하기 위하여 우선 실제적으로 사용되는 배수관과 이에 일어날 수 있는 오염 퇴적물을 세립분 모래, 탄산칼슘, 시멘트로 모사하였다. 기존연구에는 오염침전물이 배수관에 부착되어 세척이 용이하지 않으므로 탄산칼슘과 시멘트 실트 등 시료로 오염퇴적물을 모사하여 굳은 스케일의 부착력 감소에 대한 실험을 진행하였다. 연구결과 PVDF 필름 트랜스듀서의 스케일 전단저항 감소효율은 1kHz~5kHz 사이에서 최대 진동에너지 효과를 나타냈다. 적용시간은 20분 이상으로부터 전단저항 감소효율은 더 이상 현저하게 올라가지 않는다고 알려졌다[11]. 현장 적용성 평가(실험실 규모)를 위하여 우선 실제적으로 사용되는 배수관과 이에 일어날 수 있는 오염 퇴적물 중 세척 시 제거가 어려운 백태현상에 의한 침전물을 선정하고 이의 주성분인 세립분 모래, 탄산칼슘, 시멘트로 나타났으며 이를 모사하였다. 오염퇴적물 성분은 Table 2와 같이 가정하여 사용하였다.

Table 2. Simulation contaminated sediment in laboratory

CaCO <sub>3</sub>	Cement	Silt	Water
20%	10%	60%	(CaCO <sub>3</sub> +Cement)*50%
Cured	· Constant temperature 20°C · Cured time 8 hours		

지하수 흐름에 비교적 쉽게 탈착할 수 있도록 같은 면적에 따라 일정한 두께로 오염퇴적물은 균혀 모사하였으며, 퇴적물과 배수관 사이에 PVDF 필름을 위치하여 진동 여부에 따른 퇴적물 탈착 변화를 고찰하였다. 일정한 시간 동안 양생을 거쳐 퇴적오염물은 배수관 내부에 부착이 된다. 배수관 한 측에서 일정한 유속의 물로 20분 흘려 퇴적오염물이 씻겨 내려가는 효율을 고찰했다. 실험은 최적 효율을 나타내는 주파수 1.5kHz, 3kHz, 4kHz로 진행하였고 또 신호 타입별로 Sin/Sweep 출력을 인가하였다. Sin 타입은 연속적인 진동에너지가 Sin 파형에 따라 변하고 Sweep 타입은 일정한 시간 간격을 두면서 진동에너지를 가한다.

아래 Fig. 4에서와 같이 주파수별 타입별로 실험을 진행하였을 때 오염퇴적물 잔여량을 보여준다. 직관적으로도 진동을 가한 조건과 진동을 가하지 않은 조건에서 선명한 차이를 보였다. 진동을 가하지 않은 조건에서는 물이 흐르는 부분만 오염퇴적물이 씻겨나가지만 진동을 가한 경우 벽에 붙어 있는 퇴적물이 진동 때문에 떨어져 같이 씻겨나갔다. PVDF 필름 트랜스듀서 장비에 대한 성능실험을 좀 더 정량화하기 위하여 오염퇴적물 잔류량을 비교하였다. 잔류물 채취 시 말끔히 걷어내기 어려운 관계로 실험오차가 커지게 되며, 시험 시간도 오래 소요되어 면적 산정 방법을 사용하였다. 잔류면적 계산은 ImageJ (Image processing and Analysis in Java)툴을 이용하였다. 우선 오염퇴적물 사진으로부터 프로그램상 잔여된 오염퇴적물의 면적을 선을 따라 표시하면 잔여 면적이 계산된다. Table 3으로부터 주파수가 1.5kHz 일 때 Sin type 출력에서 오염퇴적물 제거효율은 10.52%, 주파수가 3kHz일 때 Sin type 출력에서 오염퇴적물 제거효율은 최대 74.62%, 주파수가 4kHz일 때 Sweep type 출력에서 오염퇴적물 제거효율은 최대 20.2%이다. 실험 결과로부터 보았을 때 PVDF 필름 소재 특성상 3kHz 주파수와 Sin type 출력에서 제일 큰 제거효율을 나타낸다.

Table 3. Contaminated sediments reduction efficiency result

Frequency (kHz)	Sin type (%)	Sweep Type (%)
1.5	10.52	5.6
3	74.62	37.36
4	20.20	59.31

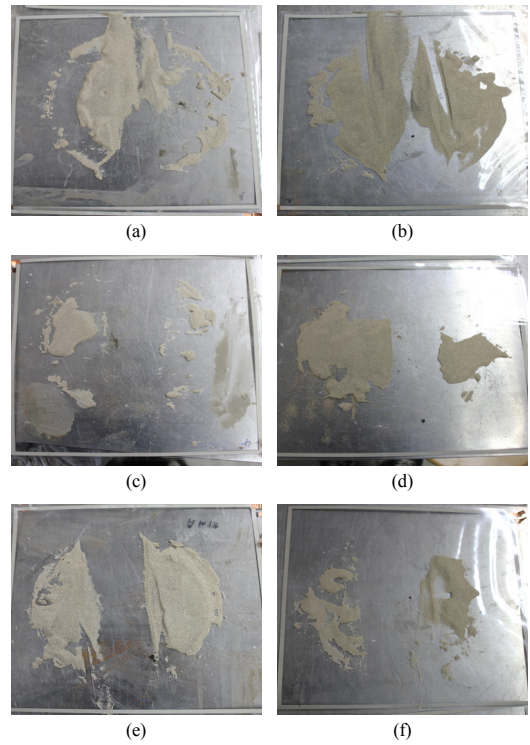


Fig. 4. Contaminated sediments reduction tests

- (a) 1.5kHz sin signal mode (b) 1.5kHz sweep signal mode (c) 3kHz sin signal mode (d) 3kHz sweep signal mode (e) 4kHz sin signal mode (f) 4kHz sweep signal mode

### 3.2 하이브리드 배수관 현장실험

압전성은 전기적 에너지와 기계적 에너지의 직접 상호 변환성을 말하는 것으로서 소재의 기능적 응용에 대한 특성 중의 하나이다. 기능적 응용의 효과는 주로 음압의 크기와 주파수 대역으로 표현할 수 있는 주입 에너지라고 할 수 있는데 그 중 공기 매질을 통하여 전달되는 에너지를 음압으로 간접 측정할 수 있다. PVDF 필름의 음압에 영향 주는 요소는 필름의 크기와 주파수 앰프의 성능 등이 될 수 있다. 여기서 dB단위의 음압레벨  $L_p$ 는 Eq. (1)로 정의한다.  $P$ 는  $\mu Pa$  단위의 측정값이고  $P_0$ 는 청력 임계값 레벨( $20 \times 10^{-6} Pa$ )이다[12].

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} dB \tag{1}$$

$$(P_0 = 20 \mu Pa = 20 \times 10^{-6} Pa)$$

오염퇴적물은 배수관 내부에 점점 쌓여 완전히 막히

게 되는데 약 3년~10년 시간이 경과된다. 하지만 기존 운영 중인 터널은 접근성 및 현장 적용성 평가가 매우 힘들어 새롭게 터널 건설 시공 중인 현장을 선정할 수밖에 없다. 따라서 이러한 현장은 현재 배수관 유입부 잔재물 확인이 어렵다. 이러한 현장조건을 고려하여 Fig. 5와 같이 PVDF 필름을 배수관에 부착하고 장기적으로 음압 측정을 하여 실내실험으로부터 측정 음압과 비교하여 현장실험의 대응율을 제시하였다. 터널 배수재 유지관리 시 배수관의 내부에 폐색이 주로 발생하는 위험성 구간과 배수관의 유지관리 편의성과 앰프 장비의 투입을 쉽게 하기 위해 종배수관과 횡배수관에 PVDF 필름을 부착하였다. 현장에서 많이 적용되고 있는 종배수관은  $\text{Ø}300 \times 4000\text{mm}$ 이고 횡배수관은  $\text{Ø}100 \times 800\text{mm}$ 이다. 이 사양에 근거하여 종배수관에 설치된 PVDF 필름의 길이와 너비는  $150\text{cm} \times 33.7\text{cm}$ , 횡배수관은 설치된 필름의 길이와 너비는  $16.3\text{cm} \times 13.1\text{cm}$ 이고 그 면적은 각각  $5055\text{cm}^2$ 과  $214\text{cm}^2$ 이다.

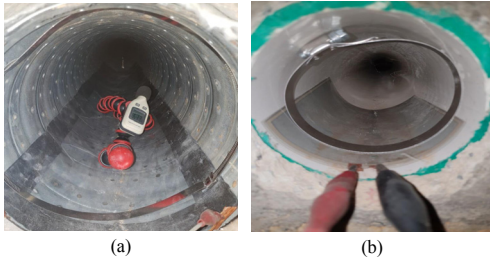


Fig. 5. Measurement of tunnel acoustic pressure  
(a) Longitudinal drainage (b) Transverse drainage

유입수가 흐르는 터널 배수관 현장에 6개월간 비치한 후 하이브리드 배수관에 다양한 진동수와 신호를 주어 음압을 측정하였다. 현장에서 적용 되는 종배수관과 횡배수관의 동일한 PVDF 필름을 실험실에서와 현장에서 각각 음압측정을 진행하여 PVDF 필름의 내구성 변화와 현장 대응율을 관찰하였다. 실내 실험결과는 Fig. 6과 Fig. 7로 나타냈고 현장 실험결과는 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 나타냈다. 현장실험에서의 음압은 플롯으로 실내실험에서의 평균 음압은 라인으로 표기하여 실내실험과 현장에서의 음압 차이를 비교하였다. 실험결과 인풋에너지 즉 장비의 출력이 같을 때 PVDF 필름에서 발생하는 진동에너지는 필름의 크기와 비례한다. 현장 종배수관에 설치된  $5055\text{cm}^2$  면적의 PVDF 필름에서 발생 된 최대

음압은 다음과 같다. Sin type 신호 출력 시 주파수 3kHz에서 최대음압은 0.17Pa이고, 실내에서 측정된 최대음압은 3kHz에서 0.18Pa로 현장 대응율은 94.4%로 나왔다. Sweep type 신호출력 시 주파수 4kHz에서 최대 음압은 0.19Pa이고, 실내에서 측정된 최대음압은 6kHz에서 0.28Pa로 현장 대응율은 67.9%로 나왔다. 횡배수관에 설치된  $214\text{cm}^2$  면적의 PVDF 필름에서 발생된 최대음압은 Sin type 9kHz 출력에서 28Pa이고, 실내에서 측정된 최대음압 35.8Pa로 현장 대응율은 78.2%를 만족하였다. 현장에서 Sweep type 5kHz 신호 출력 시 최대 음압은 20.95Pa이고 실내에서 측정된 최대음압 22.62Pa의 92.6%를 만족하였다. 따라서 현장대응율은 68%에서 최대 94.4%까지 만족하였다.

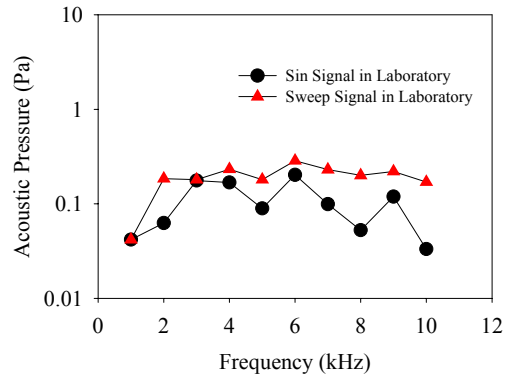


Fig. 6. Acoustic pressure measurement test result of longitudinal drainage in laboratory

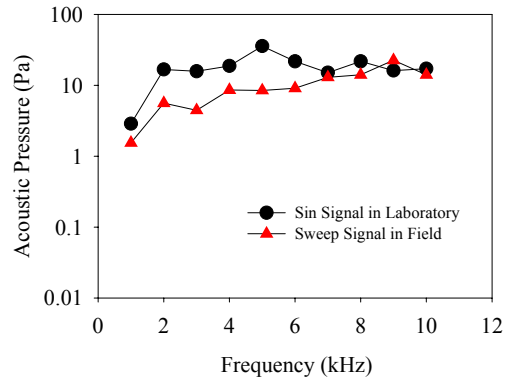


Fig. 7. Acoustic pressure measurement test result of transverse drainage in laboratory

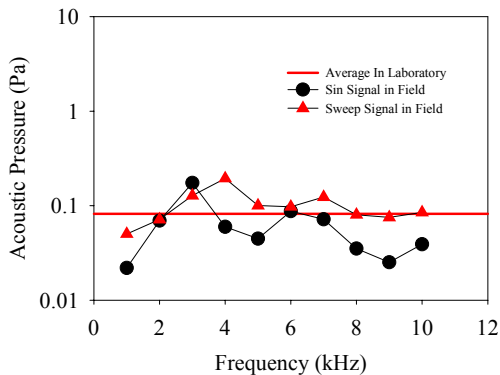


Fig. 8. Acoustic pressure measurement test result of longitudinal drainage on site

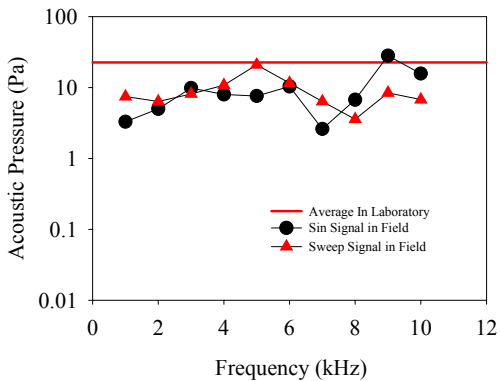


Fig. 9. Acoustic pressure measurement test result of transverse drainage on site

#### 4. 결론

본 연구에서는 PVDF 필름에 의해 발생하는 진동 에너지를 활용하여 물리/화학적 폐색에 의한 터널 배수 시스템 폐색을 감소시키는 유지관리 시스템을 구축하였다. 터널 배수관 유지관리 성능을 고찰하기 위하여 실내실험을 통하여 오염퇴적물의 폐색저감 효율을 관찰하였고 현장 터널에서 장기간 설치 후 음압측정을 통하여 실내실험 대비 현장 대응율을 고찰하였다.

PVDF 필름에서 발생하는 진동은 터널 배수관 오염 퇴적물의 점착력을 감소시킨다. 가장 효율적인 주파수를 적용하고 오염퇴적물의 제거율을 측정하였을 때 제거효율은 74.62%에 달했다. 실험 결과로부터 Sweep type은 Sin type보다 평균 제거효율이 더 높은 걸 관찰할 수 있

다. 이는 Sin type의 신호를 주었을 때 PVDF 필름 진동 작용으로 물이 흐르는 부분에서의 오염퇴적물이 효율적으로 씻겨나간다. 반면 Sweep 신호의 진동을 가한 경우 옆벽 넓은 범위에 분포하는 퇴적물까지 진동에 떨어져 나가면서 유지관리 효율증대 작용을 하였다.

현장실험의 음압측정 결과로부터 PVDF 필름은 터널 유입수 조건에서 장기간 노출되어도 훌륭한 내구성을 갖고 있다. 터널 배수관에 부착된 PVDF 필름에서 오염물 퇴적 제거효율은 같은 전기출력으로 구동 시 음압의 크기는 필름의 크기와 비례하였다. 현장실험 결과로부터 실내실험과 비교하였을 때 현장 대응율은 68%~94% 이상으로 효율이 큰 것으로 확인됐다.

#### References

- [1] I. Chu, S. H. Nam, S. I. Baek, H. S. Jung, B. S. Chun, "Bond Characteristics of Scale According to the Drainage Pipe's Material in Tunnel" Korean geotechnical society, Vol.12, No.11, pp. 51-57, 2011.
- [2] T. Gamisch and G. Girmscheid . "Future Trends in Construction and Maintenance Management of Drainage Systems in Tunnels" Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Bauplanung und Betrieb, pp. 2-5, 2005.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-005950259>
- [3] F. Nyffeler, P. Ruch and C. Beck, "Limiting the Clogging of Filters through Ultrasonic Agitation and Tangential Flow Promotes Rapid Concentration of Suspended Matter in Large Samples of Water" Marine Geology, Vol.84, No.1-2, pp. 119-126, 1988.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90130-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90130-2)
- [4] H. Li, X. Huai, J. Cai, S. Liang, "Experimental Research on Antiscale and Scale Removal by Ultrasonic Cavitation", Journal of Thermal Science, Vol.18, No.1, pp. 65-7, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11630-009-0065-x>
- [5] K. Higashitani, A. Kage, S. Katamura, K. Imai, S. Hatade, "Effects of a Magnetic Field on the Formation of CaCO<sub>3</sub> Particles", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.156, No.1, pp. 90-95, 1993.
- [6] R. Gabrielli, R. Jaouhari, G. Maurin, M. Keddad, "Magnetic Water Treatment for Scale Prevention" Water Research, Vol.35, No.13, pp. 3249-3259, 2001.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00010-0)
- [7] C. S. Lee, J. Y. Kim, D. E. Lee, J. Joo, B. G. Wagh, S. Han, Y. W. Beag, S. K. Koh, "Flexible and Transparent Organic Film Speaker by Using Highly Conducting PEDOT/PSS as Electrode." Synth. Met, Vol.139, No.2, pp. 457-61, 2003.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(03\)00199-1](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(03)00199-1)
- [8] Z. H. Xin, J. H. Moon, Y. G. Song, Y. U. Kim, "Enhancing Maintenance Performance of Tunnel

Drainage using Vibration from Polyvinylidene fluoride(PVDF) Film” Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol.16, No.1, pp. 822-826, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-016-2689-1>

- [9] J. T. Woo, S. G. Yoo, “A Study on Analysis of Influx Path and Ingredient of Sedimentation Substance in Tunnel Drainage System” Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.8, No.10, pp. 145-152, 2004.
- [10] G. Y. Im, G. M. Min, J. G. Oh, C. S. Yun, “Improvement of Existing Tunnel Drainage System”, The Magazine of the Korean Society of Civil Engineering, Vol.61, No.11, pp.34-69, 2013.
- [11] Z. H. Xin, J. H. Moon, Y. U. Kim, “Reduction of Adherent Forces of Sedimentous Contaminants in Tunnel Drainage using Vibrations from Flexible and Transparent Organic Films” KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.22, No.7, pp. 2619-2622, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0688-5>
- [12] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, “Fundamentals of Acoustics, Fourth Edition” New York: John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0471847892, 1999.

**김 영 욱(Young-Uk Kim)**

[종신회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : The Pennsylvania State University 토목환경공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

지반공학, 터널공학, 토질역학, 기초공학

**신 진 화(Zhen-Hua Xin)**

[준회원]



- 2013년 8월 : 대런민족대학(중국) 공정관리 (공학사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 (석박사통합과정)

<관심분야>

토질역학, 지반공학

**문 준 호(Jun Ho Moon)**

[정회원]



- 2013년 3월 : 명지대학교 토목환경 공학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 명지대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : 명지대학교 토목환경 공학과 (공학박사)

<관심분야>

토질역학, 지반공학