

# 긴급복구용 팽창재료의 온도에 따른 물리적 특성 및 장기 안전성 평가

## Evaluation of Physical Properties and Long-term Stability of Expansion Materials for Emergency Repair by Temperature

Jeongjun Park<sup>a,1</sup>, Kisung Kim<sup>b,2</sup>, Hyounhoi Kang<sup>b,2</sup>, Ju-Ho Kim<sup>b,2,\*</sup>, Gigwon Hong<sup>c,3</sup>

<sup>a</sup> Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

<sup>b</sup> UCI Tech Co. Ltd, 313 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

<sup>c</sup> Korea Engineering & Construction, 150 Jojeong-daero, Hanam-si, Gyeonggido, 12930, Korea

### ABSTRACT

In this study, the changes of the expansion and strength according to the temperature of the emergency repairing expansion material were examined by cup foaming test and uniaxial compressive strength test, and the accelerated compression creep test was carried out to confirm the long term stability. Ramp & Hold test and accelerated compressive creep test were performed to evaluate the creep performance. The short - term creep test was used to determine the initial creep strain of the expanding material. The isothermal method using time - To evaluate the long - term compressive creep performance.

### KEYWORDS

Expansion Material,  
Temperature,  
Long-term Stability,  
Creep Test,  
Emergency Recovery

본 연구에서는 긴급복구용 팽창재료의 온도에 따른 팽창량 및 강도의 변화를 컵발포 실험과 일축압축강도 실험을 통하여 물리적 특성을 확인하였고, 장기안전성을 확인하기 위하여 가속 압축 크리프 시험을 진행하였다. 크리프 성능을 평가하기 위하여 단기 크리프 시험과 가속 압축 크리프 실험을 실시하였으며, 단기크리프 실험은 팽창재료의 초기 크리프 변형률을 결정하고 시간-온도 중첩정리가 적용된 단계 등온법은 가속시험방법으로 장기 압축 크리프 성능을 평가하였다.

팽창재료,  
온도,  
장기안전성,  
크리프시험,  
긴급복구

© 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-32-438-9328. Fax. 82-32-435-4947.

Email. [engfine@daum.net](mailto:engfine@daum.net)

1 Tel. 82-32-835-4751. Email. [smearjun@hanmail.net](mailto:smearjun@hanmail.net)

2 Tel. 82-32-438-9328. Email. [engfine@daum.net](mailto:engfine@daum.net)

3 Tel. 82-31-699-0604. Email. [gigwon\\_hong@kecgroun.kr](mailto:gigwon_hong@kecgroun.kr)

### ARTICLE HISTORY

**Received** Feb. 19, 2018

**Revised** Feb. 20, 2018

**Accepted** Mar. 19, 2018

## 1. 서론

최근 4년간 우리나라의 지반함몰 발생건수는 2011년 573건에서 2015년 1,035건으로 증가하고 있으며, 이 중 약 88%가 서울시에서 발생하고 있다. 도심지의 지반함몰 주원인은 상·하수도 등 지하매설물 손상이 78%로 압도적으로 높게 나타났으며

이 외 굴착복구 미흡, 공사장 지하수 유출 등이 원인으로 나타나고 있다(Lee and Yoon, 2017).

현재 서울시에서는 공동관리 4단계로 나누어 관리하고 있으며 관리 등급은 공동의 두께, 폭 및 포장상태 등을 고려하여 관찰대상, 일반복구, 우선복구 및 긴급복구로 이루어져 있다. 2016년 공동탐사를 진행한 209개소의 공동의 폭, 연장, 깊이 및 공동토피, 아스콘 포장층 두께에 따라 공동 등급을 선정한 결과 긴급등급의 공동은 4.74%, 우선등급 공동은 6.60%로 나타났다(Lee et al., 2017).

지반함몰 발생시 일반적인 복구 방법으로는 흙메우기 공법과 그라우팅 공법이 적용되는데 흙메우기 공법은 공동주변의 교통을 통제 후 포장을 개착하여 양질의 토사를 메우고 다짐 및 재포장을 하는 공법이다. 그러나 교통통제 및 원지반 교란에 따른 지반강도 저하 등 단점을 가지고 있다. 그라우팅 공법은 비개착식 공법으로 시공성 및 지반 내 소규모 공동 및 간극을 충전 할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 공동내의 조건에 따라 재료 분리 및 유실의 가능성이 있고 높은 자중으로 지하시설물에 영향을 미칠 수 있는 단점이 있다(Han et al., 2017). 도심지에서 발생한 지반함몰을 신속하게 복구하기 위하여 비개착식 공법인 파우치형 충전재를 개발하기 위하여 초속경 시멘트와 벤토나이트를 이용한 공법이 연구 중에 있으며 현재 비개착공법식 복구방법에 대하여 활발한 연구가 진행 중에 있다(Yu et al., 2017).

최근 공동탐사 기술의 발전에 따라 지반함몰 발생이전에 탐사를 수행하여 공동의 등급을 분류, 복구를 진행하고 있다. 현재는 공동 복구를 위하여 개착식 공법이 이용되고 있으나, 교통통제, 지반강도 저하 등의 여러가지 문제점이 발생되어 다양한 비개착식 공법에 대하여 연구 및 개발이 진행되고 있다. 그러나 비개착식 공법에 사용되는 재료 및 성능 기준에 대한 명확한 자료가 부족하여 실제 복구 사용에 어려움이 있다. 본 연구에서는 긴급과 우선등급에 해당하는 공동에 대하여 비개착식 복구공법에 사용되는 팽창재료의 온도에 따른 팽창량과 압축강도의 변화를 측정하였으며, 장기안전성을 확인하기 위하여 가속크리프실험을 통하여 사용수명을 예측하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 팽창재료 고결 매카니즘

Fig. 1에 나타난 바와 같이 고결반응은 폴리올과 MDI계 이소시아네이트로 구성된 A용액과 B용액의 혼합 교반으로 발포반응과 가교반응으로 고결이 된다. 팽창재료는 폴리올 0.9~1.1, 이소시아네이트는 1.4~1.7의 중량비율로 일정한 시간동안 혼합한 재료가 온도에 따라 서로 다른 형태로 거동을 하며 팽창량 및 압축강도 또한 달라진다(Lee and Shin, 2009; Kim and Youn, 2009; Son et al., 2001).

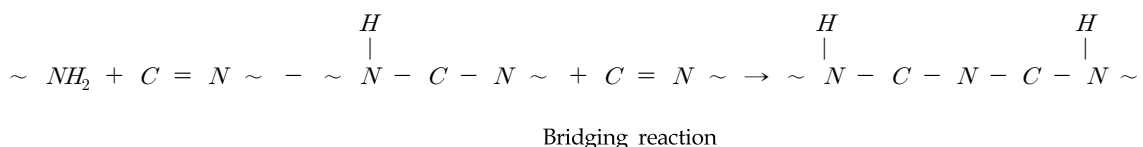
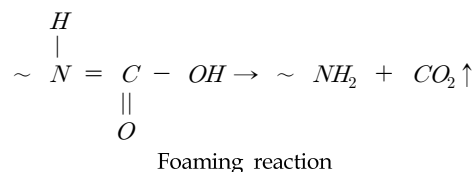


Fig. 1. Cementation of reaction formula

## 2.2 압축 크리프 하중 계산

### (1) 도로구조체 하중에 의한 영향

현재 서울시에서 발견되고 있는 긴급등급 공동(토피 20 cm 이내, 아스콘 포장층 10 cm 이내) 및 우선등급 공동(토피 20 cm~30 cm, 아스콘 포장층 10 cm~20 cm, 공동 폭 150 cm)의 발견위치는 포장층과 기층 아래의 보조기층에서 많이 발생하는 것으로 확인하였다(Lee et al., 2017).

Fig. 2에서와 같이 보조기층에서 공동을 발생되었을 때, 긴급복구 후 팽창재료에 가해지는 하중을 상부에 균일하게 분포한다고 가정을 하고 식 (1)을 이용하여 표현하였다.

$$W_m = \gamma_p H_p D_m + \gamma_b H_b D_m \quad (1)$$

$W_m$  : Earth load per unit length

$\gamma_p$  : Unit weight of pavement layer

$H_p$  : Height of pavement layer

$\gamma_b$  : Unit weight of base layer

$H_b$  : Height of base layer

$D_m$  : Unit area of expansion material

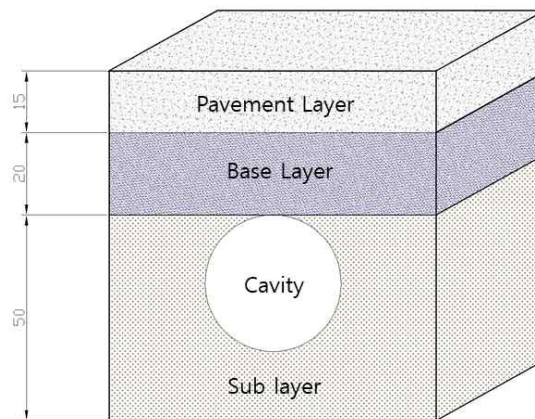


Fig. 2. Road section

### (2) 차량 하중에 의한 영향

Fig. 3에서와 같이 차량의 하중은 DB24의 차량의 바퀴에 전달되는 하중값을 선정하였다. 하중은 깊이가 깊어질수록 압력이 분산되어 분포하중으로 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_m = D \frac{nPI}{(L + a + 2htan\Phi)(S + 2htan\Phi)} \quad (2)$$

$W_m$  : Live load per unit length acting on the material

$n$  : Number of the vehicle wheel

$L$  : Length between axle

- $a$  : Width of the vehicle wheel
- $h$  : Backfill height
- $S$  : Contact width of the vehicle wheel
- $\Phi$  : Distribution angle

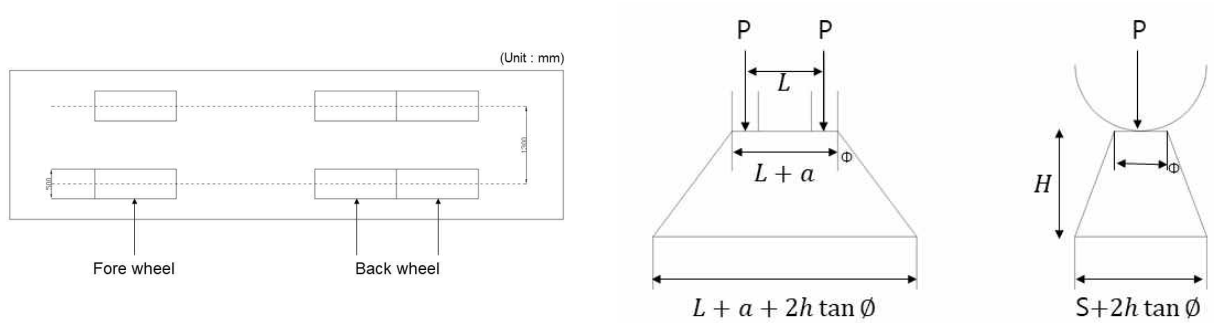


Fig. 3. Calculation of vehicle load

식 (2)을 통하여 보조기층에 공동이 발생시 시편에 전달되는 하중을 계산을 하였다. 도로 구조체의 하중인 포장층 0.36 ton, 기층 0.38 ton으로 총 1m<sup>2</sup> 당 0.74 ton의 하중을 받으며, 단기 차량하중 계산 시 띠하중을 적용하였을 때 1m<sup>2</sup>당 0.528 ton의 하중이 전달되는 것으로 계산되어 실험시편의 가속압축 크리프 실험의 하중값으로 12.4 kPa을 결정되었다.

### 3. 온도에 따른 팽창량 및 일축압축강도 실험

#### 3.1 실험내용

팽창재료는 주재와 경화제의 교반과정을 통하여 요소결합을 진행하면서 3차원의 망상구조를 형성하며 최적의 조건에서 약 1500%까지 팽창하게 된다(Kang et al., 2017). 이때 요소결합에서 발생하는 열은 발포 및 가교 반응을 촉진시키며 사용 온도에 따라 팽창재료의 팽창량 및 압축강도의 변화가 생기게 된다. 실험 계획은 Table 1과 같고, 주재와 경화제의 온도를 -20, -10, 0, 10, 20℃로 맞추기 위하여 온도챔버에 재료를 넣은 후 24시간 후에 재료의 온도가 설정한 온도가 되었을 때 온도챔버 안과 상온의 상태에서 재료를 교반하여 시편을 제작하였다(Fig. 4).

#### 3.2 실험방법

팽창 특성을 파악하기 위하여 일반적으로 사용 되는 컵발포실험(Cup foaming test)으로 재료의 온도가 설정값에 도달하였을 때 500ml 상면이 개방되어 있는 용기에 주재 15g과 경화제 15g을 넣어 교반시켜 팽창량을 확인하였다.

제작된 팽창재료의 강도는 흙의 일축강도 시험방법(KS F 2314)으로 실험을 진행하였으며, 시편의 크기는 50×50×50mm의 사각형 시편을 제작하여 압축강도를 측정하였다. 본 실험에서 사용된 팽창재료의 경우 일정한 파괴점이 없을 경우 시편의 압축력이 최대값의 2/3로 감소하거나 압축변형이 10%에 도달하면 압축을 종료하였다.



Fig. 4. Temperature chambers and expansion material

Table 1. Type of compressive strength and expansion experiment

Classification	Contents								
Expansion agent amount(g)	30								
External temperature(°C)					20				
Material temperature(°C)	-20	-10	0	10	20	10	0	-10	-20
Specimen type	A	B	C	D	E- i	E- ii	E- iii	E- iv	E- v

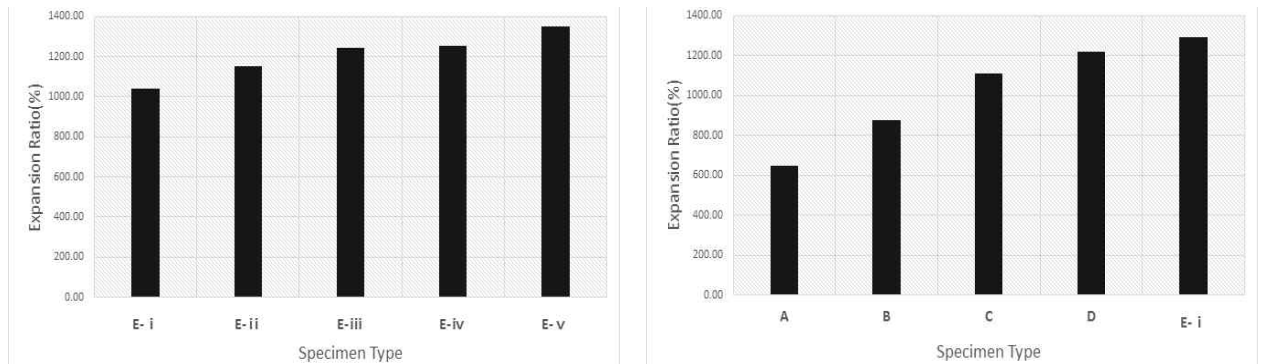
### 3.2 실험결과

#### (1) 팽창량 실험결과

Fig. 5에 나타난 바와 같이 상온에서 팽창재료의 온도를 변화시킨 후 교반 시 액체의 온도에 따라 팽창량을 측정하였을 때, E- i 는 1350%, E- ii 는 1253%, E- iii 는 1244%, E- iv 는 1150%, E- v 는 1041%로 변화되었으며, 온도챔버안에서 교반 시 온도에 따라 A는 646%, B는 879%, C는 1109%, D는 1220%, E- i 는 1350%의 팽창량을 확인하였다. 외부온도(온도챔버)에 따라 팽창량의 변화가 약 2배까지 차이나는 것을 확인하였으며 재료와 외부온도가 1°C씩 상승할 경우 팽창량은 24.19%씩 팽창량이 증가되는 것으로 추세선을 통하여 예측하였다. 팽창량의 적을수록 주재와 경화제의 가교반응이 적게 일어나 강도발현이 저하되었다. 본 실험결과를 토대로 강도가 저하될 것으로 예상되는 시편 A, B, C, D, E- i 에 대하여 일축압축강도를 평가하였다.

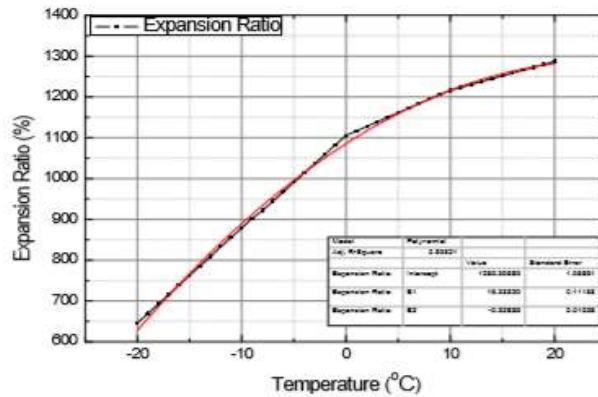
#### (2) 일축압축강도 실험결과

팽창량 실험을 통하여 강도저하가 발생될 것으로 예상된 시편 A, B, C, D, E- i 을 각 온도챔버의 설정온도에 따라 시편을 3개씩 제작하여 일축압축강도를 시행하였다. 공시체의 압력에 따른 변형결과는 Fig. 6에 나타내었다. 각 조건의 최종강도는 동일 조건의 3개의 시편의 평균값으로서 Table 2에 제시하였다. 실험 결과, 팽창량의 변화와 유사하게 시편 A와 시편 E- i 의 일축압축강도 차이는 약 1.98배 차이는 것을 확인하였다. 현재 국내의 유동화토에 대한 기준은 없지만, 일본의 유동화처리 토 품질기준의 소규모 공동 충전의 품질규정인 일축압축 강도 0.3 MPa 이상인 시편은 D와 E- i 로 각각 0.349 MPa, 0.397 MPa로 공동복구 시 사용되는 채움재와 비슷한 강도를 발현하는 것을 확인하였다.



a) Normal temperature condition

b) Chambers temperature condition



c) Expansion amount variation with temperature

Fig. 5 Expansion amount experiment result

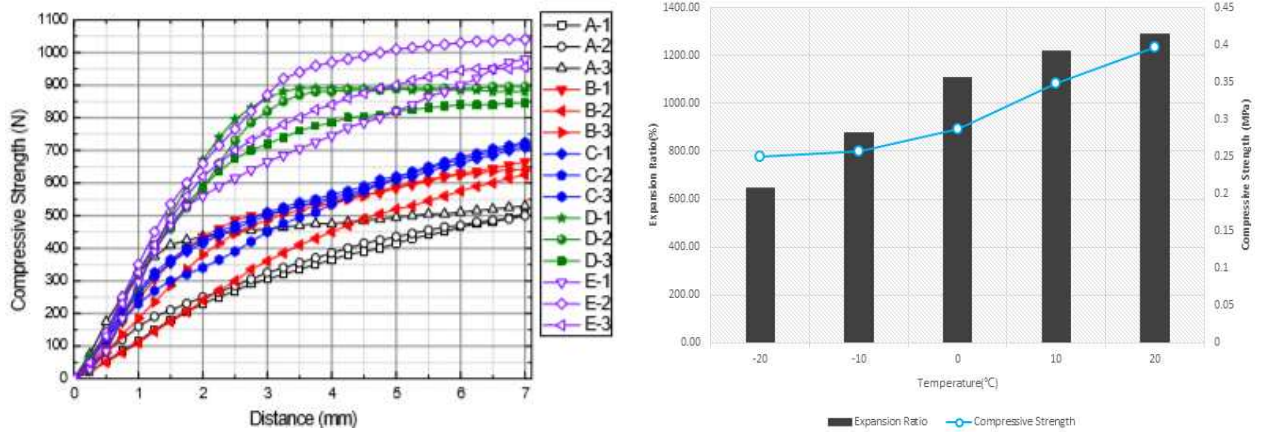


Fig. 6 Compressive strength experiment result

Table 2. Experiment result

Classification	Contents														
	A			B			C			D			E- i		
Specimen type															
Compressive strength(MPa)	0.202	0.2	0.212	0.266	0.25	0.256	0.284	0.288	0.29	0.352	0.358	0.338	0.392	0.416	0.382
Average strength(MPa)	0.205			0.257			0.287			0.349			0.397		


## 4. 가속 압축 크리프 실험

### 4.1 실험내용

#### (1) 팽창재료

본 실험에 사용된 시편은 상온에서 주재와 경화제의 교반하여 반응시킨 시편으로 시험실 표준상태인 KS M ISO 291, ASTM D618에 규정된 (23±2)℃, (50±10)% R.H.에서 48시간 이상 경화 후 실험에 사용하였다(Table. 3).

Table 3. Specimen size

Specimen	Expanded materials
Specimen photo	
Horizontal	50.0mm
Vertical	50.0mm
Height	60.0mm

#### (2) 실험 장비

Fig. 7에서와 같이 팽창재료의 압축 크리프 성능을 평가하기 위해 ASTM D7361에 따라 가속 압축크리프 실험을 진행하였다. 사용한 크리프 시험기는 만능재료시험기인 Instron사의 모델명 5982을 사용하였으며 실험속도는 1 mm/min으로 진행하였고, 규정된 응력에서 크로스헤드 변위에 따른 압축 변형률을 측정하였다.

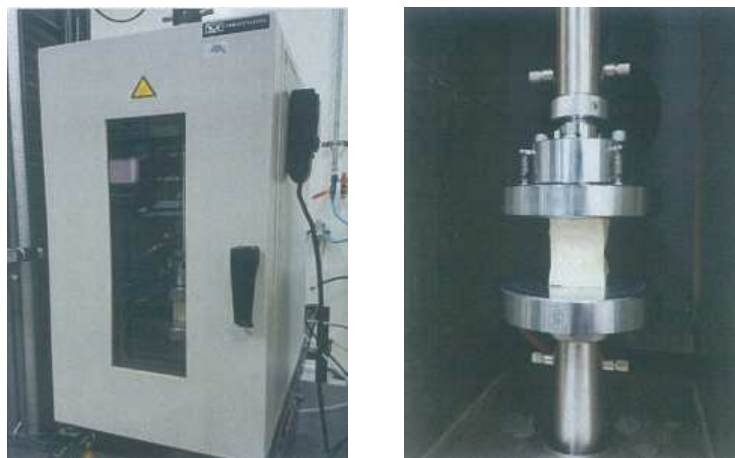


Fig. 7. Accelerated compression creep tester

#### (3) 가속 압축 크리프 실험 실험조건

팽창재료의 가속 압축 크리프 실험조건은 Table 4에 제시하였다. 즉, 상승온도, 온도스텝, 등온유지시간은 팽창재료의 전이온도를 고려하여, 융점이하의 온도에서 시험온도 범위에 전이온도가 포함되지 않도록 설계되었으며, 총 시험 시간은 최

소 60,000초로 25년 이상의 수명예측이 가능한 범위에서 설계하였다. 가속 압축 크리프 실험은 크리프 응력을 가한 상태로 20℃를 기준으로 7℃씩 온도를 순차적으로 가하면서 크리프 변형률을 측정하였다. 이때 각 온도에서 12,000초 동안 유지한 후 다음 단계의 온도로 상승하였다. 규정된 응력과 온도에서 시간에 따른 시편의 변형을 분당 2회 측정하여 연속 기록하였다. 이와 같은 시험을 통해 얻은 크리프 데이터로부터 압축 크리프 마스터 커브를 구하였다.

Table 4. Accelerated compressive creep test conditions of expansion material

Standard temperature (°C)	Heating temperature (°C)	Final temperature (°C)	Step	Holding time (sec)	Total test time (sec)
20	7	55	6	12,000	72,000

4.2 실험결과

(1) 단기 크리프(R&H) 실험결과

팽창재료의 초기 크리프 변형률을 구하여 크리프 마스터 커브의 초기치로 적용하기 위해 단기 크리프 시험을 수행하였다. 크리프 응력인 12.4 kPa을 적용하여 단기 크리프 시험을 1,000초 동안 실시하였고, Table 5와 Fig. 8에 실험결과와 시간에 따른 변형률 곡선을 나타내었다.

(2) 가속 압축 크리프 실험결과

Table 6은 팽창재료의 기준온도에서 압축 크리프 성능을 평가결과이며 25년 예측수명에 2.513%의 변형률이 발생할 것으로 나타났다.

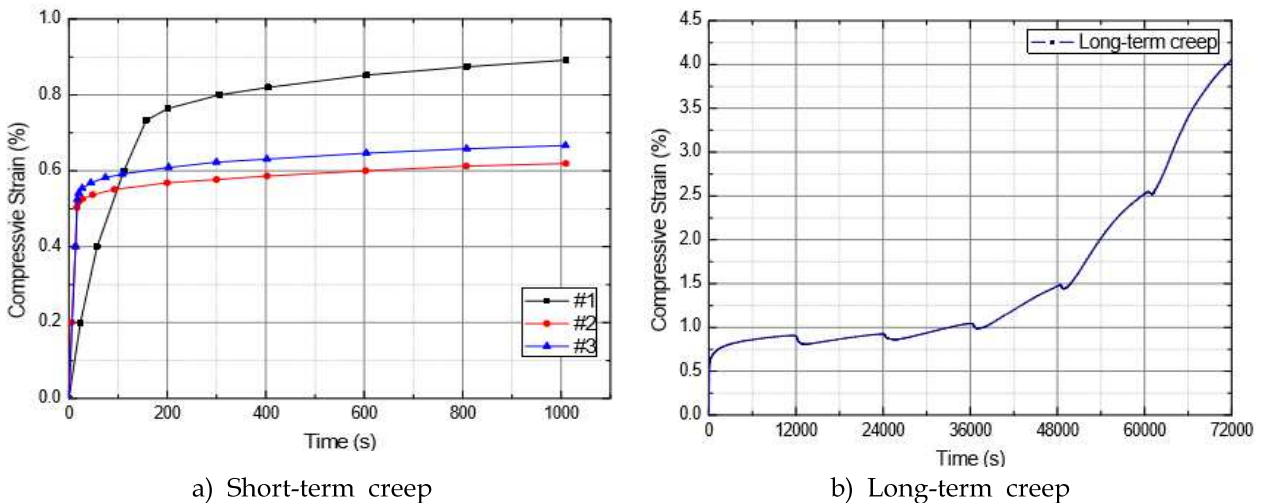


Fig. 8. Creep strain curve of expansion material

Table 5. Short-term creep test result of expansion material

Stress(kPa)	Number of tests	Short-term creep strain(%)	Average(%)
12.4	1	0.617	0.723
	2	0.663	
	3	0.888	



Table 6. Accelerated compressive creep test results of expansion material

Standard temperature (°C)	Stress (kPa)	Fixed time (h)	Fixed time (log(h))	Long-term creep strain (%)
20.0	12.4	100,000	5	5.206

#### 4. 결론

본 연구에서는 긴급복구용 팽창재료의 온도에 따른 물리적 특성변화와 공동 복구 후 지중에서 팽창재료의 장기안전성을 평가하였다.

(1) 팽창재료의 온도에 따라 팽창량의 변화는 미미한 것으로 나타났으나 팽창재료 및 교반 시 외부온도에 따라 팽창량 및 압축강도의 변화가 약 2배정도로 나타났다. 이는 교반 시 주재와 경화제의 화학반응으로 인한 열이 발생하면서 발포와 가교반응이 진행되는데 외부의 온도에 영향을 받아 경화가 덜 일어난 것으로 판단된다. 하지만 10°C 이상의 온도에서는 0.3MPa 이상의 압축강도를 발현하였으며 이는 공동복구 시 사용되는 채움재 기준강도인 0.3MPa에 적합한 것으로 판단된다.

(2) 상온상태에서 제작된 시편의 경우, 지중에서 시편에 가해지는 응력을 계산하여 가속 압축 크리프 실험을 통하여 25년 크리프 변형률을 확인하였다. 초기 크리프 변형률은 0.723%로 미미한 변화율을 보였으며 장기 크리프 실험을 통하여 25년 후에 약 2.513%의 변형이 생기는 것으로 나타났다. 이는 1.51mm의 변형이 생기는 것으로 보조기층에 위치한 팽창재료의 안전성에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

위의 결론을 바탕으로 보조기층에서 공동이 발생했을 경우, 공동복구용 재료로써 사용이 가능할 것으로 판단되나 영하의 기온에서 사용 시 히팅기를 이용하여 재료의 온도를 높여 사용하여야 최적의 팽창량 및 압축강도를 발현할 것으로 판단되며 이러한 결과에 따라 현장적용성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(지반함몰발생 및 피해 저감을 위한 지반 안전성 평가 및 굴착·보강 기술개발, 17SCIP-B130949-03)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] Han, J.G., Ryu, Y.S., Kim, D.W., Park, J.J. and Hong, G.G. (2017). "A study on expansion and strength characteristics of material for emergency restoration in ground cavity." *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 131-138.
- [2] Kang, H.H., Kim, K.S., Kim, J.H. and Park, J.J. (2017). "Evaluation of strength characteristics according to expansion amount of ground reinforced expanded polyol." *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 13, No. 1, pp. 35-42.
- [3] Kim, H.S. and Youn, J.W. (2009). "A study on foaming characteristics of polyurethane depending on environmental temperature and blowing agent content." *Transactions of Materials Processing*, Vol. 18, No. 3, pp. 256-261.
- [4] Lee, J.D. and Shin, E.C., (2009). "Behavior of rapidly expansion materials for maintenance railroad bed subjected to cyclic loading." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, No. 2, pp. 45-50.

- [5] Lee, K.C., Kim, D.W. and Park, J.J. (2017). "Study on management system of ground sinking based on underground cavity grade." *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 23-33.
- [6] Lee, S.M. and Yoon, H.M. (2017). "A study for improvement of policy on ground subsidence prevention in urban areas." *Seoul Studies*, Vol. 18, No. 1, pp. 27-42.
- [7] Son, Y.J., Kim, Y.H., Kim, S.B., Lee, Y.B., Choi, S.H., Choe, K.H. and Kim, W.N. (2001). "Effect of the polyols and blowing agents on properties of rigid polyurethane foam," *Journal of the Korean Institute of gas*, Vol. 5, No. 4, pp. 79-84.
- [8] Yu, N.J., Choi, J.H. and Lee, K.I. (2017). "Fundamental study on the development of filling materials for trenchless emergency restoration of ground cavity," *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 97-107.