

# 자기치유 콘크리트의 균열치유 성능평가를 위한 개선된 산소확산 시험방법 제안

## Development of Oxygen Diffusion Test Method for Crack Width Evaluation of Self-Healing Concrete

이도근<sup>1</sup> · 신경준<sup>2\*</sup>Do-Keun Lee<sup>1</sup> · Kyung-Joon Shin<sup>2\*</sup>

(Received August 18, 2021 / Revised September 17, 2021 / Accepted September 20, 2021)

Self-healing concrete is in the spotlight in that it can effectively extend the lifespan of concrete structures by healing cracks in the structure by themselves without additional repairing or retrofitting actions. Currently, self-healing concrete is a field that is being actively studied around the world, but since most studies focus on the improvement of healing performance, there is a lack of methods to rationally evaluate the self-healing performance of concrete. Although the gas diffusion test method has been developed for the use in the performance evaluation of self-healing concrete, it has revealed that for gas diffusion through the matrix affect the crack diffusion coefficients depending on the environmental conditions such as the saturation of the specimen, the temperature, and humidity during the experiment. Therefore, in this study, the method has been proposed to eliminate the influence of the matrix diffusion when calculating the crack diffusion coefficient. In addition, a pre-conditioning process was introduced to shorten the experimental time. As a result, the crack width could be estimated with an error level of less than 3% in the test time of about 20 minutes.

**키워드** : 산소 확산, 균열, 확산계수**Keywords** : Oxygen diffusion, Crack, Diffusion coefficient

### 1. 서론

현재 인프라의 노후화가 진행됨에 따라 세계 각국의 사회기반 시설물의 유지보수 비용은 꾸준히 증가하고 있다(ASCE 2021; Okoyama et al. 1996). 우리나라의 경우 80~90년대 집중적으로 시설물이 시공되었음을 감안하면, 공용 30년 이상의 기반시설물이 전체 인프라 대비 높은 비중을 차지하고 있을 것으로 보인다(KALIS 2010). 일반적인 콘크리트 시설물은 노화가 진행될수록 사용성과 내구성은 감소하며, 수반되는 보수비용이 증가한다. 뿐만 아니라 지하구조물과 같이 인공적으로 보수가 어려운 경우에는 직접적인 보수가 어려울 수 있다. 따라서 인위적인 보수 없이도 콘크리트 구조물의 내구성을 증가시킬 수 있는 기술이 각광받고 있으며, 특히 구조물이 스스로 균열을 치유하는 자기 치유 기술은 전 세계적으로 활발히 연구가 수행 되고 있다(Qian et al. 2021;

Van Tittelboom and De Belie 2013). 자기치유 콘크리트는 구조물의 기대수명을 연장시킬 수 있고, 경제적, 사회적, 환경적 비용을 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있다고 평가받는다(Huang 2014; Zhang et al. 2020).

대부분의 자기치유와 관련된 연구는 자기치유 매커니즘의 분석과 자기치유 능력의 향상에 초점을 맞추고 있다(Huang et al. 2016). 하지만 이러한 자기치유 성능의 개선을 평가할 수 있는 성능평가를 위한 표준화된 방법은 미비하며, 콘크리트에 적용되던 기존의 방법들을 응용하여 미세구조 분석, 투수실험, 이온확산 실험 등이 자기 치유 콘크리트의 성능평가를 위해 활용되고 있다(de Rooij et al. 2013). 그러나, 각 연구자마다 실험방법이 상이하여 결과 간의 직접적인 비교가 어려운 실정이다(Lee et al. 2019).

현재 치유성능 평가를 위해 가장 널리 활용되고 있는 방법은 현미경관찰과 투수실험이다(Edvardsen 1999). 콘크리트에 발생

\* Corresponding author E-mail: kjshin@cnu.ac.kr

<sup>1</sup>충남대학교 토목공학과 박사후 연구원 (Department of Civil Engineering, Chungnam University, Daejeon, 304-764, Korea)<sup>2</sup>충남대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Chungnam University, Daejeon, 304-764, Korea)

한 균열은 비균질한 특성을 가지므로 동일 시편일지라도 관찰 위치마다 다른 균열폭이 관찰된다. 따라서 현미경 관찰과 같은 시각적인 관찰 방법은 측정위치에 따른 편차를 포함하며, 시편 전체의 치유훈성을 분석하기에는 한계가 있다(Lee et al, 2019). 따라서 시편 전체의 평균적인 치유율을 산정하기 위한 방법으로 투수실험 방법이 널리 활용되고 있다. 하지만 균열 내부의 치유 생성물의 용출과 투수 시험과정에서 이물질 유입의 가능성이 존재하며, 유체의 점성으로 인한 효과를 고려할 필요가 있다(Edvardsen 1999; Shin et al, 2016). 이러한 투수실험의 단점을 보완하기 위해 기체 확산실험이 제안된 바가 있다(Lee et al, 2019). 제안된 실험방법은 균열을 통과하는 기체의 확산만을 고려하였다. 그러나, 추가 연구 결과에 따르면 시멘트계 매질을 통과하는 기체의 확산이 균열확산 계수 산정에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 균열폭 추정 과정에서 오차를 유발하였다. 이러한 오차는 주변 환경에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 기존에는 시편을 용기에 부착하도록 실험방법을 제시하였으나, 한번 부착된 시편은 투수실험과 역학 실험 등 다른 실험과의 연계가 어렵다는 단점이 나타났다.

따라서 기체확산실험의 정확도를 향상시키기 위해서는 매질을 통과하는 기체로 인한 간섭을 최소화하여 순수 균열부위만을 확산하는 기체의 양을 산정하여야 한다. 본 연구에서는 단계적 확산계수 측정을 통해 매질을 통한 기체 확산을 배제할 수 있는 방법을 제시하였다. 아울러 투수실험과 같은 다른 역학적인 실험과 연계가 가능하도록 시편의 기하학적인 형태를 변동시키지 않는 방식으로 기존의 실험방법을 보완하였다. 그리고 실험시간을 최소화하기 위해 사전 안정화 작업을 추가하였으며 실제의 균열폭과 추정된 균열폭을 비교하여 제안된 기체확산실험의 타당성을 검증하였다.

## 2. 균열면에서의 기체 확산

### 2.1 콘크리트 매질의 기체 확산

비균열 콘크리트를 대상으로한 기체확산 실험이 수행된 바가 있다(Houaria et al, 2017). 해당 연구에서는 시편의 포화도에 따라 확산속도가 변화하는 것을 관찰하였고, 상대습도 55~100%에서 확산계수가 크게 감소한다고 보고하였다. 따라서 시편의 포화도를 증가시킨다면 매질을 통한 기체의 확산을 최대한 억제하여 균열확산 계수 산정의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다. 그러나, 시편 포화도를 높은 상태로 유지하여 실험을 하기 위해서는 수증양생 직후에 실험을 수행하거나, 일정 수준의 포화도에 도달하기 위한 전처리 시간이 필요하다. 하지만 수증양생 직후에는 실험의 수행

이 어려우며, 안정화 기간 동안 시편의 수화와 치유가 진행될 가능성이 있다. 따라서 자기치유 콘크리트의 균열폭 및 치유율을 평가하고자 하는 목적에서는 안정화 기간으로 인한 간섭을 최소화하여야 하며, 시편 포화도와 같은 주변 환경 조건에 상관없이 기체확산 실험으로 균열폭의 평가가 가능한 방법이 필요하다.

### 2.2 균열폭 추정을 위한 관계식 구성

균열폭 예측을 위해 균열폭에 따른 기체의 확산특성이 반영된 지표가 필요하다. 단위 면적당 기체의 확산량은 확산단면의 기하학적인 형상에 상관없이 일정한 상수로 유지되는 특성이 있다. 따라서 확산계수를 통해 균열폭을 추정하기 위해서는 균열폭과 확산 계수가 상관관계를 가지도록 설정하여야 한다. 기체확산실험을 제안하였던 기존의 연구(Lee et al, 2019)에서와 동일하게 이상기체 상태방정식과 픽의 법칙을 활용하여 다음과 같이 관계식을 설정하였다.

$$K_c = \frac{V_v d}{L_c t} \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) \tag{1}$$

$K_c$ 는 시편의 균열확산계수이며,  $V_v$ 는 용기의 부피,  $d$ 는 시편의 두께,  $L_c$ 는 균열의 길이,  $t$ 는 실험에 적용된 단위시간,  $C_0$  및  $C$ 는 초기 및 단위시간 후의 용기내부의 산소농도를 의미한다.

균열폭 평가의 목적에 따라서 식 (1)은 다음과 같이 균열폭에 대한 식으로 정리할 수 있다.

$$w = \alpha K_c \tag{2}$$

여기서  $\alpha$ 는  $w$ 에 대한  $K_c$ 의 비례계수이다.

### 2.3 균열폭 평가를 위한 기체확산 실험 방법

Fig. 1에 기체 확산실험의 과정을 간략하게 나타내었다. 필름을 활용하여 특정 두께를 가지는 시편을 제작하고, 밀폐용기에 진공 그리스를 활용하여 일시적으로 부착을 한다. 밀폐용기는 주입구와 배출구를 두어 질소를 주입할 수 있도록 구성되어 있으며, 질소를 충분히 주입 후 주입구와 배출구를 닫으면 용기내부와 대기중의 산소농도차에 의하여 대기중의 산소가 균열을 통해 용기 내부로 확산하게 된다. 이 때 밀폐용기내에 설치된 0.01%의 해상도인 산소 센서로 실시간으로 데이터를 취득하여 용기내부의 산소농도의 변화를 측정한다. 무선으로 데이터를 취득한 방식(Lee et al, 2019)

과 달리 유선으로 데이터를 취득하여 와이파이 및 블루투스 기기 간의 혼선으로 인한 노이즈를 최소화 하였다. 밀폐용기는 내경 10cm, 높이 8cm로 부피 500ml를 가지는 아크릴 원통형 용기이다.

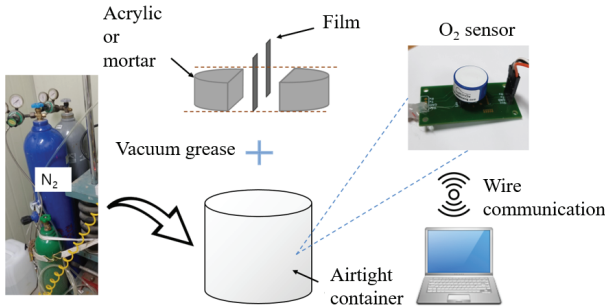


Fig. 1. Outline of gas diffusion test device and method

### 3. 매질의 기체확산을 고려한 균열폭 평가

#### 3.1 개요

시험시편의 매질을 통한 기체 확산 영향을 최소화 하기 위하여 1) 시편을 밀봉하여 매질을 통한 확산을 최소화하는 방법과 2) 균열의 개폐에 따른 확산계수 차이를 측정하여 순수 균열을 통과하는 산소량을 측정하는 방법을 도입하였다.

시편을 밀봉하여 매질확산을 최소화하는 방법은 균열부를 제외하고 외부대기와 시편의 접촉면을 비투과성 재료로 밀봉하여, 확산단면을 균열부위로 제한하는 방식이다. Fig. 2에서와 같이 기체 확산 실험은 시편의 하면과 접촉하고 있는 형태이며 용기에 질소를 주입 후 진행된다.

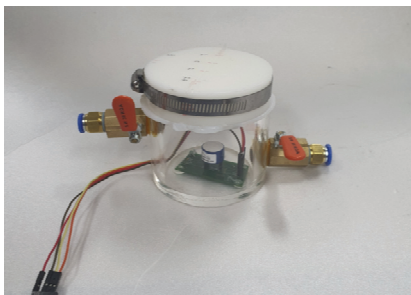


Fig. 2. Gas diffusion test device

시편의 측면과 상면, 상면의 균열부위를 알루미늄 테이프로 밀봉하면, 대기로부터 용기로 유입되는 산소를 완전히 차단하게 된

다(Fig. 2, Case B or C). 이 때 확산 단면은 알루미늄 테이프가 접촉되지 않은 부분인 균열면과 시편하면이다. 만약 실험 즉시 균열부의 알루미늄 테이프를 제거하면, 균열을 통과하는 산소량과 시편이 포함하고 있던 산소가 동시에 용기로 유입되므로, 균열폭이 과대평가 될 수 있다. 따라서 효과적으로 균열폭을 추정하기 위해서는 균열로만 산소의 유입이 이루어지는 환경을 설정하여야 한다. 질소주입 이 후 균열부의 테이프를 제거하지 않는다면 시편공극 내부의 산소는 알루미늄 테이프가 접촉되지 않은 부분인 균열면과 시편하면을 통해 용기로 확산하게 된다. 일정시간이 경과하면 시편공극 내 산소농도와 용기의 산소농도가 평형을 이루게 되며, 시편에서 용기로 확산하는 산소량을 배제할 수 있는 상태가 된다. 이 때 시편 상면 균열부의 알루미늄 테이프를 제거하면 외부의 산소가 균열을 통해 용기로 유입되며, 균열로만 유입되는 산소량을 산정 할 수 있다. 시간이 경과함에 따라 용기내부의 산소농도는 지속적으로 증가로 인해 용기에서 시편으로 산소의 재확산이 발생할수 있다. 하지만 알루미늄 테이프 탈착이후의 측정시간은 매우 짧고(10분 이내), 10분간의 용기 내부의 산소 농도변화가 크지 않기 때문에(5분, 0.5mm 균열기준 최대 0.2%이내 증가), 재확산하는 산소량은 미소하여, 결과에 간섭을 주지 않을 것으로 예상된다.

균열의 개폐에 따른 확산계수 차이를 측정하여 순수하게 균열을 통과하는 확산량을 측정하는 방법은 시편의 측면과 시편 상면의 균열부위에만 알루미늄 테이프를 부착하여 실험이 진행된다(Fig. 2, Case A). 시편을 용기에 부착 후 용기에 질소를 주입하면, 시간에 따라 용기내 산소농도가 증가하게 된다. 균열부를 알루미늄 테이프로 밀봉하였기 때문에 용기내의 산소농도 증가는 매질을 통과하는 산소에 기인한 것으로 가정할 수 있다. 이 후 균열부에 부착된 알루미늄 테이프를 제거하면, 매질과 균열부위를 통해 유입되는 산소량이 동시에 산정되며, 테이프 제거 전에 산정된 매질을 통과하는 산소량을 차감하여 순수 균열을 통과하는 산소량을 측정할 수 있다.

본 장에서는 두 가지 기체확산 실험방법을 적용하여 균열폭을 추정하였고, 현미경 관찰을 통해 관찰된 균열폭과의 비교를 통해 제안된 실험법의 타당성을 검증하였다.

#### 3.2 실험 방법 및 변수

Fig. 3과 같이 3가지 종류의 밀폐도를 가지는 시편으로 기체확산 실험을 진행하였다. 한편, 쪼갬인장실험으로  $\phi 100 \times 25 \text{mm}$ 의 원주형 공시체에 균열을 유발하였으며, 특정 두께의 필름을 균열

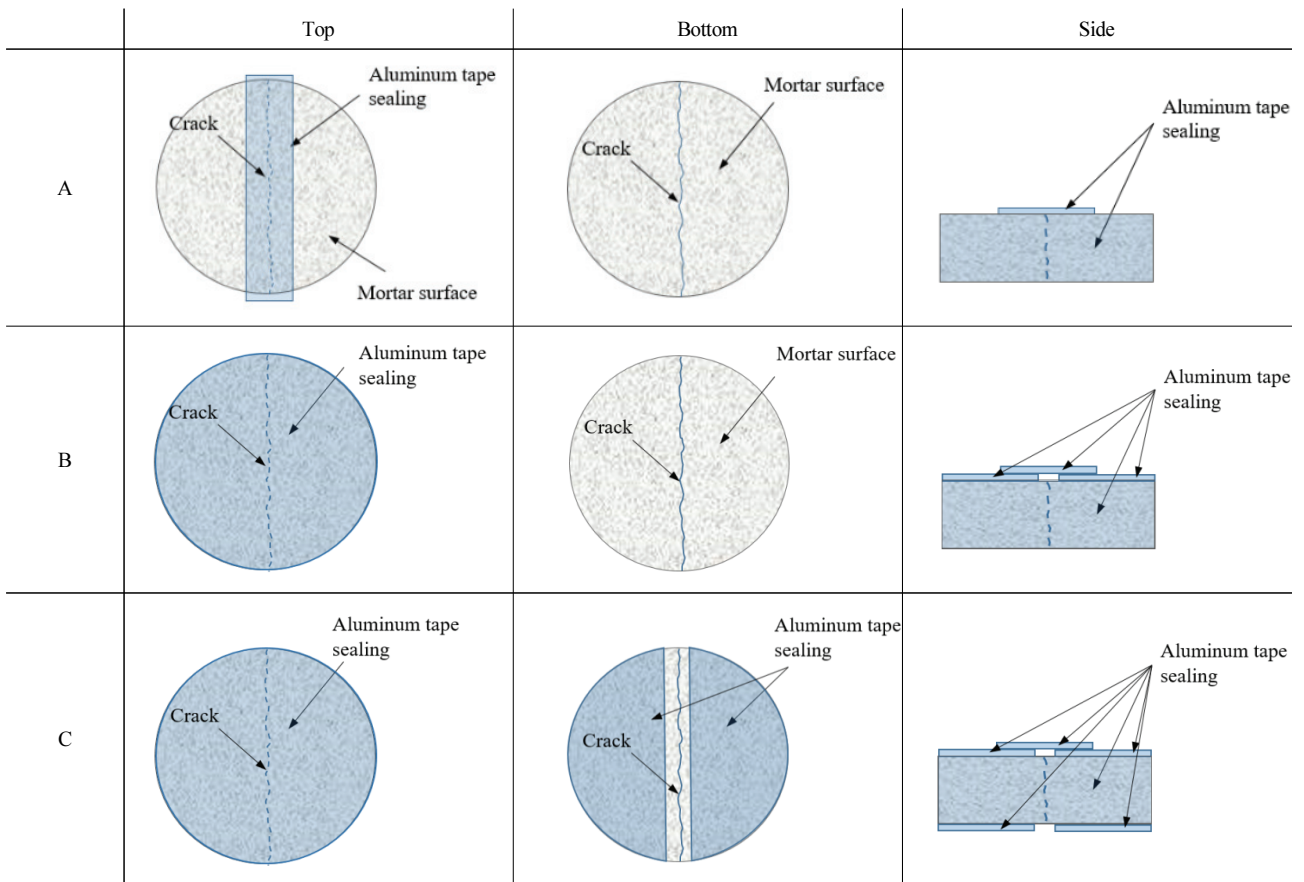


Fig. 3. Outline of gas diffusion test device and method

부에 삽입하여 균열을 가지는 시편을 제작하였다. 디지털 광학현미경으로 균열폭을 관찰하였으며, Fig. 4와 같이 균열의 3등분 지점에서 측정하였고, 시편의 상·하면 모두에서 측정하였다. 총 6개의 지점에서 측정된 균열폭의 산술평균으로 평균균열폭을 산정하였다. 모든 실험은 25°C, RH 60% 조건에서 진행되었고, 시편의 노출 상태와 균열폭의 상세를 Table 1에 나타내었다.

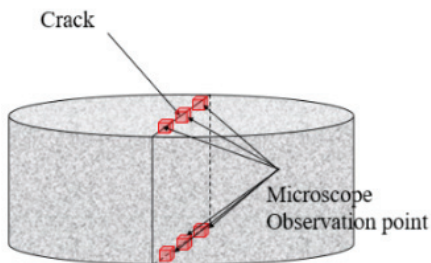


Fig. 4. Outline of gas diffusion test device and method

실험 진행시, 1초단위로 데이터를 취득하였고, 5분간의 농도변화율과 선형함수와의 결정계수가 0.98 이상이 기록되는 시점을 안정화 단계로 정의하였다. 안정화 단계에서 균열부위에 부착된 테이프를 탈착하여 균열을 통해 유입되는 산소의 양을 측정하였다.

Table 1. Crack width and sealing condition Information

Case	Surface condition					Crack width (μm)	Crack length (mm)	Thickness (mm)
	Specimen			Crack				
	Top	Side	Bottom	Top	Bottom			
A	Open	Sealed	Open	Sealed	Open	642	65	25
B	Sealed	Sealed	Open	Sealed	Open	642		
C	Sealed	Sealed	Sealed	Sealed	Open	370		

### 3.3 실험 결과

Fig. 5에 각 시험에 부착된 용기의 산소농도의 변화를 나타내었다.

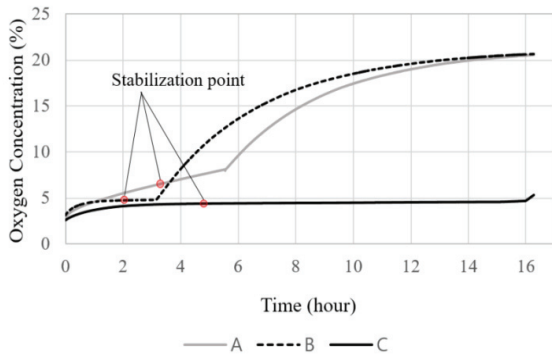


Fig. 5. Concentration change respect to time in vessel according to sealing condition

안정화에 도달하기까지의 시간은 B > A > C 순으로 나타났다. 알루미늄 테이프에 의해 대기에서 용기내부로 확산이 차단되는 case B 와 C에서는 알루미늄 테이프에 의해 공기의 유입이 차단되었지만 용기내의 농도가 증가하는 경향을 보인다. 이것은 시편내의 산소가 모세관 공극을 따라 용기로 산소가 확산되어 나타난 결과이다. 일정 시간 이후, 공극내의 산소농도와 용기의 산소농도의 차이가 작아지면 시편에서 용기로의 확산은 둔화하며, 용기내의 농도가 거의 변화하지 않는 안정화 단계에 진입한다. 안정화 속도는 case B가 case C보다 더 빠른 것으로 나타났으며, 확산단면의 크기에 기인하는 결과이다. case B는 균열면을 포함하여, 산소가 시편하면의 전체면에서 용기로 확산 이동이 이루어지는 반면, case C는 균열면을 통해서만 확산하게 된다.

한편 Fig. 5에서 기울기가 급변하는 형태를 보이고 있으며, 이것은 균열부위에 부착되어 있던 알루미늄 테이프를 탈착한 시점이다. 테이프의 탈착 전 농도변화는 매질을 통해 확산하는 산소량으로 가정하였으며, 탈착 후의 농도변화는 매질과 균열부에서 확산하는 산소량의 합산 값이 반영되어 있다. 그러므로 Fig. 6과 같이 알루미늄 테이프의 탈착 전후로 구간을 이분(Phase 1, 2)하여 식 (3)에 따라 균열로만 확산하는 산소의 양의 산정할 수 있다.

$$\Delta C_{total} - \Delta C_{specimen} = \Delta C_{crack} \quad (3)$$

식 (1~2)와 식 (3)를 활용하여 균열폭을 추정하였으며 현미경 관찰로 산정된 실제 균열폭과의 차이를 Table 2에 나타내었다.

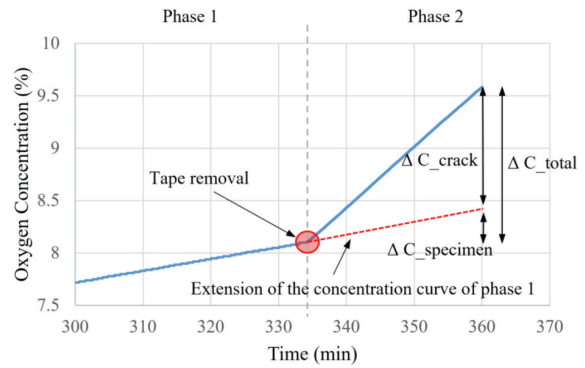


Fig. 6. Divided concentration change curve before and after tape detachment

Table 2. Estimation result of crack width of A-C specimen

Case	Crack width(μm)			
	Measured	Predicted	$ w_m - w_p $	$\frac{ w_m - w_p }{w_p}$
A	641	543	98	17.91%
B	641	627	14	2.02%
C	370	375	5	2.64%

case A에서는 약 18%의 오차를 나타내었다. case A는 균열부만 알루미늄 테이프로 밀봉한 시편으로, 균열을 직접 통과하는 기체는 차단하였지만, 테이프가 부착된 주변부를 통해 여전히 안정화단계에서 일정량의 산소가 균열로 유입된 결과로 추정된다. 시편내에서 산소의 확산은 한 방향으로만 이루어지지 않으며, Fig. 7과 같이 최단경로를 포함한 여러 경로를 따라 균열로 산소가 유입되는 것으로 추측된다. 따라서, Case A와 같이 시편을 노출시킨 상태에서 시험을 수행할 경우, 매질로 확산되는 산소량이 결과에 간섭을 준 것으로 판단된다.

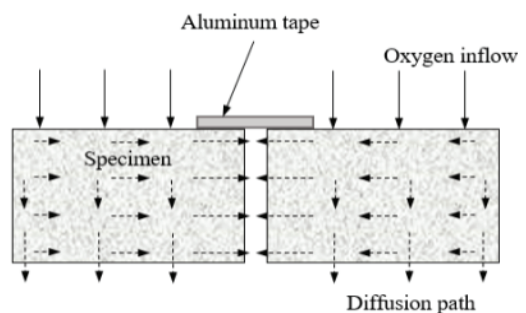


Fig. 7. Gas diffusion path in the specimen

따라서 균열부위만 밀봉한 방식은 균열부위로 유입되는 산소의 양과 매질을 통해 확산하는 산소의 양을 구분하기 어렵기 때문에 균열폭을 정확하게 예측하기가 어렵다.

case B는 윗면 전체를 밀봉한 조건이며, case C는 윗면과 아래면(균열제외)을 밀봉한 조건이다. case B와 C에서 실제균열폭과 예측균열폭의 오차는 3% 미만으로 산정되었다. Case C 방법이 가장 이상적이긴 하나, Case B와 같이 시편 상면만 완전히 막고 안정화를 진행하였을 경우에도 시편 상면을 통한 매질의 확산영향을 효과적 차단하여 상대적으로 정확한 균열폭 예측이 이루어졌음을 의미한다.

### 4. 전처리를 활용한 실험방법의 검증

#### 4.1 개요

기체확산 실험에 소요되는 시간이 길어질수록 정해진 시간 내에 실험 가능한 시편의 개수가 적어져 비효율성이 커지게 되며, 자기치유 성능평가를 위한 실험을 진행할 경우 실험의 지연시 치유 및 수화로 인한 간섭으로 결과에 영향을 줄 가능성이 있다. 따라서 본 장에서는 전처리 작업을 통해 본 실험시간을 최소화하는 방안을 제시하고자 하였다.

3장의 실험결과, 안정화의 속도는 확산단면의 크기에 지배적인 것으로 나타났다. case B와 C에서 균열폭 예측 정확도는 큰 차이가 없었으며, 시편의 안정화 속도에서 case B가 더 유리한 결과를 보였다. 따라서 case C의 조건하에서의 추가실험은 진행하지 않았고, case A, B에 대하여 사전 전처리 영향에 대한 추가 실험이 진행되었다.

#### 4.2 실험 방법 및 변수

안정화에 소요되는 시간은 실험환경과 시편의 재료 및 기하학적 특성에 영향을 받지만 3장에서 활용하였던 시편의 크기와 상태, 환경조건은 동일한 상태였기 때문에 case B의 안정화 소요 시간인 2시간을 사전 안정화에 필요한 최소 시간으로 설정하였다. 실험에 사용된 시편의 상세는 Table 3과 같다.

사전 안정화 과정은 알루미늄 테이프를 부착한 상태로 진행되었고, 질소를 가득채운 밀폐용기에 2시간 거치하였다. 테이프를 부착하지 않고 거치시킬 경우, 확산단면의 증가로 사전 안정화에 소요되는 시간은 단축될 것으로 보이나, 전처리 과정 이후 알루미늄 테이프를 부착하는 과정에서 시편에 산소가 흡착될 가능성이 있다. 따라서 전처리 작업 완료 즉시 실험이 가능하도록 알루미늄 테이프를 부착시킨 상태에서 전처리 과정이 진행되었다.

Table 3. Specimen information for stabilization test

Sealing area			Stabilization	Case	Crack width(μm)
Top	Side	Bottom			Measured
Sealed	Sealed	Open	Non-conditioning	D - 1	320
				D - 2	560
				D - 3	641
Sealed	Sealed	Open	Conditioning	E - 1	320
				E - 2	560
				E - 3	641
Non-sealed	Sealed	Open	Conditioning	F - 1	320
				F - 2	560
				F - 3	641

#### 4.3 실험 결과

Fig. 8은 각 시편의 실험결과로 용기내 산소농도의 변화를 나타낸 그래프이다. 사전 안정화를 하지 않고 실험한 실험 결과인 Fig. 8(a)와는 다르게, 전처리를 통해 안정화를 진행시킨 뒤 실험한 결과인 Fig. 8(b)에서는 알루미늄 테이프의 제거 전까지 기울기의 변화가 관찰되지 않았다. 이 후 알루미늄 테이프를 탈착하였으며, 5분간의 농도변화로 균열폭을 예측하였고, 결과를 Table 4에 나타내었다.

시편 상면을 개방한 채로 균열부위만을 알루미늄 테이프로 부분 밀봉해둔 case F에서는 오차가 크게 나타남과 동시에 오차의 편차도 크게 관찰되었다. 이것은 균열부위에 테이프를 접촉하였음에도 불구하고, 3장의 결과에서와 같이 테이프의 주변에서 균열부위로 최단경로를 따라 확산이 이루어졌기 때문이다.

Table 4. Estimation result of crack width of D-F series

Case	Crack width(μm)			
	Measured	Predicted	$ w_m - w_p $	$\frac{ w_m - w_p }{w_p/100}$
D - 1	320	341	21	6.31%
D - 2	560	578	18	3.14%
D - 3	641	627	14	2.02%
E - 1	320	318	2	0.45%
E - 2	560	560	0	0.17%
E - 3	641	662	21	3.39%
F - 1	320	84	216	280.18%
F - 2	560	417	143	34.21%
F - 3	641	562	89	13.97%



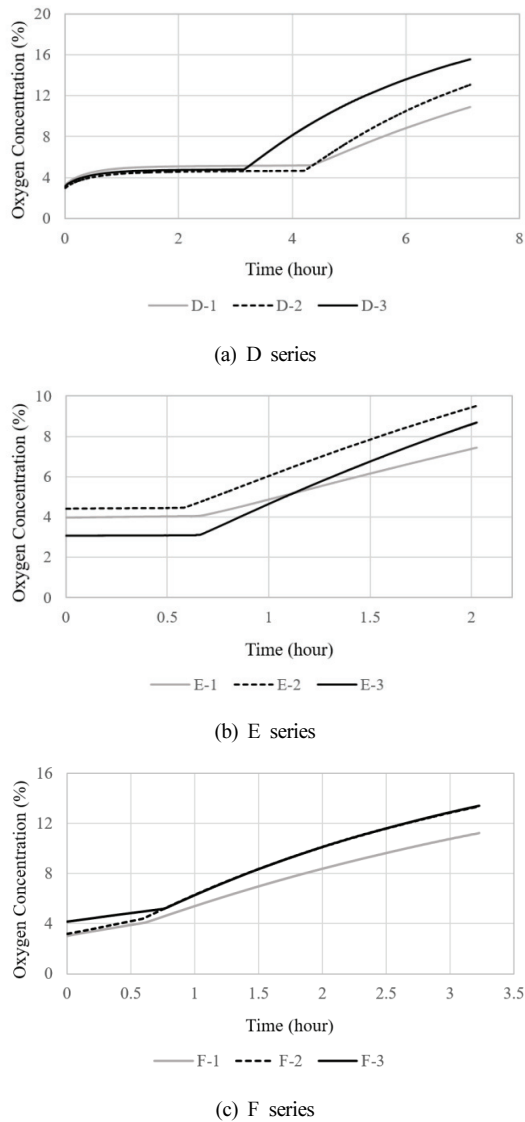


Fig. 8. Experimental results according to stabilization of D-F series

반면, 시편의 상면을 알루미늄 테이프를 접착한 경우에는 안정화와 관계없이 평균 2.58%의 오차를 나타내었고, 균열폭의 추정에 합리적으로 사용할 수 있다고 판단된다. 사전 안정화를 진행한 경우, 비안정화시편과 비교하여 정확도에서도 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 실험초기 농도변화에서 뚜렷한 비선형 구간이 관찰된 비안정화 시편과 달리 사전안정화가 진행된 시편에서는 비선형 구간이 관찰되지 않았다. 이는 개별 시편당 10분 이내로 실험진행이 가능함을 나타낸다. 하지만 시편의 재료적인 특성, 시편의 포화 상태 등에 따라 안정화에 소요되는 시간은 달라질 것이며, 최적 안정화 시간에 관해서는 추가적으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 모르타르 시편의 균열폭을 추정하기 위한 기체 확산실험 방법의 정확도를 향상시키고자 하였다. 개선된 실험 장치의 개발과 시편의 전처리 방법과 표면처리 방법을 제안하였고, 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

- 1) 제안된 실험에서는 대기압상태에서 농도차이에 의해서 확산이 진행되므로, 압력을 주기위한 추가의 장치를 필요로 하지 않는다. 따라서 농도와 압력으로 확산을 유도하는 방식에 비해 경제적으로 실험이 가능하다.
- 2) 시편과 용기마개가 일체화되어 있던 방식을 진공 그리스를 통해 시편과 용기를 일시 접합하는 방식으로 변경하였다. 따라서 실험체의 기하학적 형상을 변동시키지 않아 다른 역학적인 실험과의 연계가 가능할 것이라 예상한다.
- 3) 모르타르 시편에서 매질을 통한 산소의 확산을 관찰하였다. 매질을 통한 산소 확산을 고려하여, 균열 부위로만 확산하는 산소량을 관찰 가능한 방법을 제시하였다. 시편의 대기 노출 조건을 설정하였고, 실험중 알루미늄 테이프를 부착 및 탈착하는 방식을 적용하여, 최대 6%이내의 오차 수준으로 균열폭의 추정이 가능함을 보였다.
- 4) 실험 시간을 단축하기 위해 사전 안정화 작업을 수행하였고, 균열폭의 예측에서 높은 정확도를 가지는 것을 관찰하였다. 비안정화 시편에 비해 실험 시간을 크게 단축하였으며(2시간 → 10분) 균열폭을 통한 자기치유 성능평가에 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(21SCIP-C159066-02)에 의해 수행되었습니다.

## References

Abbas, A., Carcasses, M., Ollivier, J.P. (1999). Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation, *Materials and structures*, **32(1)**, 3-8.

- ASCE (2021). 2021 Report Card for America's Infrastructure, American Society of Civil Engineering, Report, Available at: <http://www.asce.org/reportcard/>.
- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, *ACI Mater. J.*, **96**, 448-454.
- Houaria, M.B.A., Abdelkader, M., Marta, C., Abdelhafid, K. (2017). Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature, *Energy Procedia*, **139**, 725-730.
- Huang, H. (2014). Thermodynamics of Autogenous Self-Healing in Cementitious Materials.
- Huang, H., Ye, G., Qian, C., Schlangen, E. (2016). Self-healing in cementitious materials: materials, methods and service conditions, *Materials & Design*, **92**, 499-511.
- Lee, D.K., Lim, M.H., Shin, K.J., Lee, K.M. (2019). Crack width estimation of mortar specimen using gas diffusion experiment, *Materials*, **12(18)**, 3003.
- Rooij, M.D., Tittelboom, K.V., Belie, N.D., Schlangen, E. (2013). Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials – State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC, Springer, Netherlands.
- Okoyama, K., Sato, H., Ogihara, K., Toriumi, R. (1996). Development of A Bridge Management System In JAPAN, *Bridge Management 3*, E & FN SPON, 580-586.
- Qian, C., Zheng, T., Zhang, X., Su, Y. (2021). Application of microbial self-healing concrete: case study, *Construction and Building Materials*, **290**, 123226.
- Shin, K.J., Bae, W.H., Kim, S.W., Lee, K.M. (2016). Validation of permeability test for crack width assessment of concrete, healCON, TU Delft, Netherlands, **96**, 448-454.
- KALIS (2010). 2010 Survey on the Safety and Maintenance of Facility Managers, Report, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials—a review, *Materials*, **6(6)**, 2182-2217.
- Zhang, W., Zheng, Q., Ashour, A., Han, B. (2020). Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: a review, *Composites Part B: Engineering*, **189**, 107892.

### 자기치유 콘크리트의 균열치유 성능평가를 위한 개선된 산소확산 시험방법 제안

자기치유 콘크리트는 직접적인 보수보강 없이도 스스로 구조물의 균열을 치유하여 효율적으로 콘크리트 구조물의 수명연장이 가능하다는 측면에서 각광받고 있다. 현재 자기치유 콘크리트는 전 세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있는 분야이지만 대부분의 연구는 치유 성능의 향상에 초점을 맞추고 있기 때문에 객관적으로 치유성능을 평가하는 방법은 부족한 실정이다. 자기치유 콘크리트의 성능평가에 활용하기 위해 기체확산실험 방법이 개발된 바가 있지만, 시편의 포화도 및 실험시의 온습도 등과 같은 환경조건의 통제가 필요하다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기체 확산 실험시에 필요한 환경조건을 대폭 완화하여 적용성을 향상시키고자 하였다. 아울러 실험시간을 단축시키고자 사전 안정화 과정을 도입하였고, 약 20분이내의 실험시간에서 3%이내의 오차 수준으로 균열폭의 추정이 가능하였다.