

## 고 흡수성 폴리머를 혼입한 콘크리트의 기초 물성 및 염화물 침투 저항성 평가

이찬규<sup>1</sup>, 김일순<sup>2</sup>, 최소영<sup>3</sup>, 양은익<sup>4\*</sup>

### Evaluation of Fundamental Properties and Chloride Penetration Resistance of Concrete using Superabsorbent Polymers

Chan-Kyu Lee<sup>1</sup>, Il-Sun Kim<sup>2</sup>, So-Yeong Choi<sup>3</sup>, Eun-Ik Yang<sup>4\*</sup>

**Abstract** : Superabsorbent Polymer (SAP) expands inside concrete by absorbing water and contracts as it discharges water. Through this process, concrete can achieve the internal curing effect, but the space occupied by the expanded SAP remains as a void. In this study, the effects of SAP internal curing and voids were evaluated by evaluating the fundamental properties and chloride penetration resistance of SAP mixed concrete. Also, to evaluate the internal curing effect by SAP, the tests were carried out under water and sealed curing conditions, respectively. From the result, the compressive strength of water curing did not differ significantly according to the mixing ratio of SAP. In the case of sealed curing, however, the compressive strength tended to increase as the mixing ratio of SAP increased. The internal curing effect of sealed curing was considered to have influenced the increase in compressive strength. In the case of the chloride diffusion coefficient, the diffusion coefficient tended to decrease as the mixing ratio of SAP increased. In particular, as the sealed curing is applied, the chloride penetration resistance is further improved due to internal curing effect. If the curing conditions are different, it is considered inappropriate to estimate the chloride penetration resistance by the surface electrical resistivity.

**Keywords**: Chloride penetration resistance, Curing condition, Electrical resistivity, Fundamental properties, Superabsorbent polymers

## 1. 서 론

물은 콘크리트를 구성하는 중요한 재료 중 하나이며 콘크리트의 시공성과 강도에 큰 영향을 미친다. 특히, 콘크리트 내부의 물은 콘크리트의 수축 및 팽창, 균열 발생 및 장기 거동에 중요한 요소로 작용하며 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성과 밀접한 관련이 있다.

최근 국내·외에서 스마트 한 소재로 주목 받고 있는 고 흡수성 폴리머(Superabsorbent polymer, 이하 SAP)를 모르타르나 콘크리트에 이용한 연구가 진행되고 있다. SAP는 다량의 물을 흡수하여 내부에 저장할 수 있는 고분자 화합물로 자체 중량의 약 100~400배의 물을 흡수하고 다양한 크기와 형태로 제조되는 것으로 알려져 있다(Jensen and Hansen, 2001; Jensen, 2013). 콘크리트가 SAP와 혼합되면 SAP는 물을 흡수

하여 팽창하며 건조한 환경이 되면 물을 방출하면서 점차 수축한다. 이 과정을 통해 콘크리트는 내부에 지속적으로 수분이 공급되어 내부 양생 효과를 얻는다.

내부 양생은 흡수율이 높은 재료를 혼입하여 콘크리트 내부에 수분을 공급하는 방법으로 대표적인 내부 양생 재료로는 자연경량골재, 인공경량골재, SAP 등이 있다. 이러한 내부 양생 효과는 콘크리트의 수축 감소, 강도 향상 등 콘크리트 성능 및 내구성을 향상시킨다(Jensen and Hansen, 2002; Kim et al, 2018). 특히, 내부 양생은 콘크리트 내부에서의 자기건조(Self desiccation) 현상을 감소시켜 자기수축을 크게 저감시킬 수 있으며, 자기수축은 고강도 콘크리트에서 크게 발생한다. 따라서 SAP를 고강도 콘크리트에 혼입하여 그 특성을 평가한 연구(Justs et al, 2015; Ma et al, 2017; Kang et al, 2018; Ma et al, 2019; Liu et al, 2020)와 SAP를 혼입한 콘크리트의 자기수축에 대한 연구가 주로 진행되고 있다(Hasholt et al, 2012; Schröfl et al, 2012; Snoeck et al, 2015; Kang et al, 2016; Shen et al, 2016; Gutema et al, 2018; Liu et al, 2019a; Liu et al, 2019b; Shim et al, 2019; Yang et al, 2019; Yang and Wang, 2019; Zhong et al, 2019).

SAP는 콘크리트 내부에서 수분을 방출하면서 수축하게 되는데, 이 때 콘크리트는 내부 양생 효과를 얻을 수 있지만 팽창

<sup>1</sup>정회원, 바우컨설팅테크구조부, 사원

<sup>2</sup>정회원, 강릉원주대학교 토목공학과, 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 강릉원주대학교 방재연구소, 연구교수, 공학박사

<sup>4</sup>정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: eiyang@gwnu.ac.kr

Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National University, Jukheon-gil 7, Gangneung-si, Gangwon-do, 25457, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 5월 31일까지 학회에 보내주시면 2020년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

한 SAP가 차지하고 있던 공간은 공극으로 존재하게 된다. 이러한 공극은 콘크리트의 공극을 증가시키는 원인이 되고 크기에 따라 콘크리트의 내구성 및 강도에 영향을 줄 수 있다. 일반적인 콘크리트는 AE제 사용으로 연행공기를 생성할 수 있다. 그러나 AE제의 사용으로 인해 생성되는 공극은 운반 및 다짐, 잔골재 입도 등에 영향을 받으며, 과다 사용 시 콘크리트 강도를 감소시키는 단점이 있다. 반면, SAP의 혼입으로 인해 형성되는 공극은 간극 및 크기 등을 조절할 수 있고 내부 양생 효과로 인해 강도를 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 SAP를 혼입한 콘크리트는 SAP로 인해 형성된 공극과 내부 양생 효과로 인하여 콘크리트의 내구성 및 역학적 특성에 영향을 받게 되므로 이에 대한 연구가 필요하다.

한편, 콘크리트 배합 시 SAP를 혼입하면 배합수가 흡수되어 시공성이 저하되고 설계한 물-시멘트 비보다 실제 물-시멘트 비(유효 물-시멘트 비)는 감소하게 된다. 따라서 시공성 및 설계 물-시멘트 비를 확보하려면 SAP의 정확한 흡수율에 따른 추가 수량의 첨가를 고려하여야 한다. 그러나 SAP의 흡수율은 콘크리트 환경의 강알칼리성, 화학 혼화제 첨가 및 중량 물에 대한 압력 등에 따라 달라지기 때문에 정확하게 측정하기가 어렵다. 또한 기존연구결과에 따르면, 세계 각국의 12개 연구실에서 동일한 방법과 동일한 재료를 사용하여 수행한 SAP의 흡수율 측정 결과가 서로 다르게 나타났으며, 이는 SAP의 흡수율 측정이 부정확하다는 것을 나타내고 있다 (Mechtcherin et al, 2018).

따라서 본 연구에서는 추가 수량을 첨가하지 않고 SAP를 혼입한 콘크리트의 기초 물성, 강도 특성, 염화물 침투 저항성을 평가하여 SAP의 내부 양생과 공극에 의한 영향을 평가하였다. 또한 AE제를 사용한 콘크리트의 특성을 평가하여 SAP를 혼입한 경우와 비교하였으며, SAP에 의한 내부 양생 효과를 평가하기 위해 양생조건을 수중 양생과 봉합 양생으로 구분하여 실시하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험 계획

본 연구에서는 SAP의 혼입에 따른 콘크리트의 특성을 평가하기 위해 시공성, 압축강도, 염화물 침투 저항성을 측정하였다. 또한, 콘크리트의 내구성 평가에 사용되고 있는 비파괴 시험인 표면 전기저항을 측정하여 염화물 침투 저항성과의 상관관계를 분석하였다. 먼저, 물-시멘트 비 45%의 경우, SAP-A, B, C를 모두 사용하였으며, SAP의 혼입율은 0, 0.3, 0.6, 0.9%로 결정하였고, SAP를 혼입하지 않고 AE제를 혼입

한 변수를 추가하였다. 물-시멘트 비 35, 55%의 경우에는 SAP-B만 사용하였으며, 혼입율은 0, 0.3, 0.6%로 결정하였다. 이 때, 모든 물-시멘트 비의 SAP 혼입율 0%는 기준 배합(Ref.)으로 설정하였다.

또한, SAP의 내부 양생 효과에 의한 영향을 평가하기 위해 수중 양생과 봉합 양생을 실시하였다. 수중 양생은 탈형 즉시 항온수조(20±3℃, RH 100%)에 침지하여 외부로부터 수분공급이 원활하도록 하였으며, 봉합 양생의 경우에는 탈형과 동시에 비닐소개로 밀봉하고 항온 항습실(20±3℃, RH 60%)에 보관하여 외부와 수분이동이 차단되도록 하였다. 실험에 사용된 변수와 배합표를 각각 Table 1와 Table 2에 나타내었다.

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 고 흡수성 폴리머 (SAP)

본 연구에 사용된 SAP는 국내의 T사를 통해 유통되는 아크릴산(Acrylic acid)계 제품으로 입자 크기 순으로 SAP-A, SAP-B, SAP-C로 구분하였으며, SAP-A, B는 비정형, SAP-C는 비드형이다. SAP는 제조방법에 따라 형태가 결정되는데

Table 1 Test variables

Conditions	Variables
SAP Type	SAP-A, B, C
W/C (%)	35, 45, 55
SAP mixing ratio (C%)	0, 0.3, 0.6, 0.9
Specimen size (mm)	∅100×200
Curing condition (20℃)	Water and sealed
Curing days	7, 28

Table 2 Mix proportions of concrete

Type	W/C (%)	SAP (C%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				SAP (kg)	AE (C%)
			W	C	S	G		
SAP-A	45	0	189	421	729	928	0	-
		0.3					1.26	
		0.6					2.53	
		0.9					3.79	
SAP-B	35	0	185	533	661	912	0	-
		0.3					1.60	
		0.6					3.20	
		0.9					3.79	
SAP-B	45	0	189	421	729	928	0	-
		0.3					1.26	
		0.6					2.53	
		0.9					3.79	
SAP-C	55	0	192	350	786	923	0	-
		0.3					1.05	
		0.6					2.10	
		0.9					3.79	
SAP-C	45	0	189	421	729	928	0	-
		0.3					1.26	
		0.6					2.53	
		0.9					3.79	
AE	45	0	189	421	729	928	0	0.005

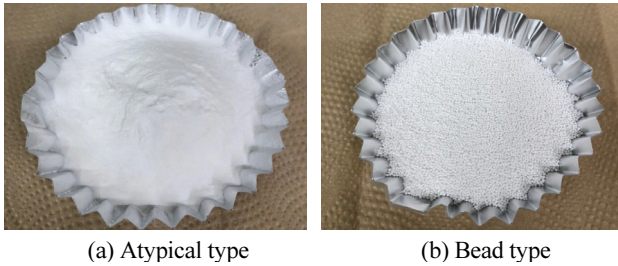
비정형의 경우 겔 중합법에 의해 큰 덩어리 형태로 제조되어 입도에 맞게 파쇄된 제품이며, 비드형의 경우 역상 현탁 중합법에 의해 구형으로 제조되어 입도에 맞게 사용하는 제품이다. 본 연구에 사용한 SAP를 형태에 따라 Fig. 1에 나타내었으며, 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다.

**Table 3** Physical properties of the SAP

Type	Shape	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )
SAP-A	Atypical	38~53
SAP-B	Atypical	38~100
SAP-C	Bead	600~1,200

**Table 4** Water absorptivity of the SAP

Type	Absorptivity (g/g)		
	pH 7	pH 11	pH 13
SAP-A	100.7	31.3	24.3
SAP-B	112.7	32.9	25.7
SAP-C	181.9	45.8	35.2



**Fig. 1** Superabsorbent polymer (SAP)

SAP는 형태와 입도에 따라 수분의 흡수시간과 흡수력에 차이가 있으며, SAP의 흡수력은 콘크리트의 특성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 기존 연구(Kim et al, 2019)를 통해 얻어진 SAP의 최대 수분 흡수력을 Table 4에 나타내었다. SAP의 최대 흡수력(포화상태) 도달 시간은 SAP-A, B의 경우 3분 이내이며, SAP-C는 약 3시간 이후이다.

### 2.2.2 시멘트 및 골재

본 연구에 사용된 굵은 골재는 최대 치수 19mm의 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 최대 치수가 5mm인 강모래를 사용하였다. 사용된 골재의 물리적 특성을 Table 5에 나타내었다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)를 사용하였으며, 시멘트의 물리적, 화학적 특성을 Table 6에 나타내었다.

## 2.3 실험 방법

### 2.3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

SAP를 혼입한 굳지 않은 콘크리트의 특성을 평가하기 위해 슬럼프와 공기량을 측정하였다. 기존 연구에 의하면(Kim et al, 2019), SAP-C는 3시간 이후에 포화상태에 도달하므로, 타설 후에도 지속적으로 수분을 흡수하여 시간이 경과할수록 슬럼프는 저하된다. 따라서 모든 배합의 슬럼프 측정은 SAP와 배합수가 접촉하고 6분이 경과하였을 때 측정하였다. 슬럼프와 공기량은 각각 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험방법)과 KS F 2421(압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법)에 따라 실시하였다.

**Table 5** Physical properties of the aggregate

Type	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Absorption (%)	F.M.
Sand	2.48	1.01	2.64
Coarse	2.82	1.35	6.86

**Table 6** Physical and chemical properties of the cement

Properties		Cement
Physical	Specific gravity	3.15
	Fineness ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	3,350
Chemical (%)	SiO <sub>2</sub>	21.7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.7
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2
	CaO	63.1
	MgO	2.8
	SO <sub>3</sub>	2.2
	LOI	2.89

### 2.3.2 압축강도

콘크리트의 압축강도의 측정은  $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$  크기의 실린더 공시체를 제작하여 각각의 양생 방법에 따라 재령 7일과 28일간 양생한 후 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 측정하였다. 압축강도 측정 장비는 만능재료 시험기(UTM)를 사용하였다.

### 2.3.3 염화물 침투 저항성 시험

본 연구에서는 SAP를 혼입한 콘크리트의 염화물 침투 저항성을 평가하기 위해 급속 염화물 침투시험과 염화물 침투 시험을 실시하였다. 급속 염화물 침투시험은 NT Build 492에 따라 수행하였으며,  $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$  크기의 콘크리트 시험체를 재령 28일간 양생한 후 두께 50mm로 절단하여 사용하였다. 시험체의 양극부에는 0.3N 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 음극부에는 3% 염화나트륨(NaCl) 수용액을 넣고 30V의 전압으로 8시간 동안 통전하였다.

염화물 침지 시험은 재령 28일간 양생한  $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$  크기의 시험체를 두께 60mm로 절단하여 사용하였고, 염소 이온의 1방향 침투를 위해 한 면을 제외한 다른 면은 모두 에폭시로 코팅하였다. 염화물 침지는 3% 염화나트륨(NaCl) 수용액에서 91일간 실시하였다. 급속 염화물 침투시험과 염화물 침지 시험 후 질산은 변색법으로 콘크리트의 염화물 침투 깊이를 측정하였다. 질산은 변색법은 콘크리트 시험체의 할렬면에 0.1N의 질산은( $\text{AgNO}_3$ ) 용액을 분무한 후 변색된 부분을 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하는 방법이다.

### 2.3.4 표면 전기저항 시험

콘크리트의 품질 관리 및 내구성 평가를 위해 비파괴 시험인 표면 전기저항 측정 기술이 사용되고 있다(Layssi et al, 2015). 표면 전기저항은 AASHTO TP 95에서 제시하는 방법인 Wenner의 4전극법(Four point method)으로 측정하였다. Wenner의 4전극법은 등 간격으로 구성된 4개의 전극을 통해 콘크리트 내부의 전위차를 측정하는 방식으로 각 양단의 외측 전극사이 전류(I)가 통전하면 이로 인해 발생하는 콘크리트 내부의 전위차(V)를 내측 전극으로 측정하는 방식이다(Fig. 2). 콘크리트의 표면 전기저항은 식(1)에 의해 결정된다.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} = \frac{1}{EC} \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 콘크리트의 표면 전기저항( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $a$ 는 전극사이의 간격(cm),  $V$ 는 응답전압(V),  $I$ 는 통전전류(A),  $EC$ 는 전기 전도도( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ )이다.

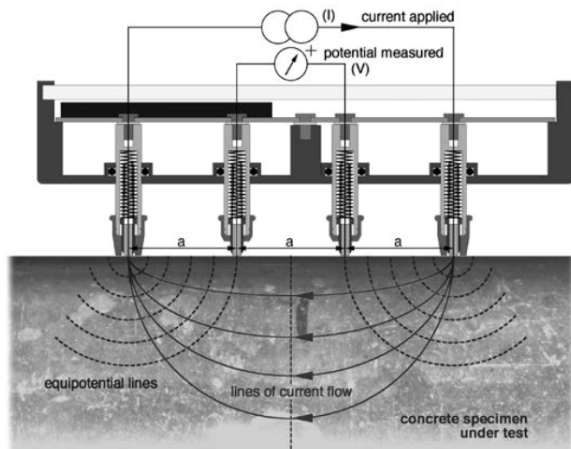


Fig. 2 Four-point method

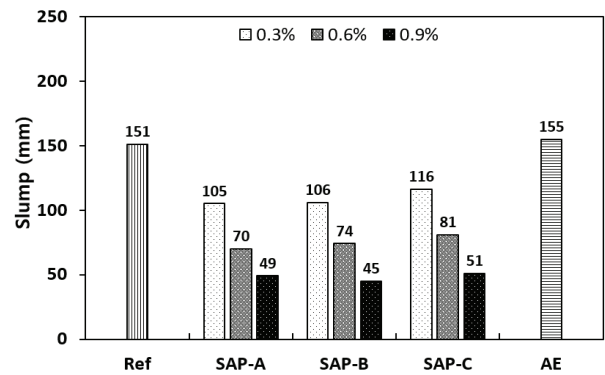
## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

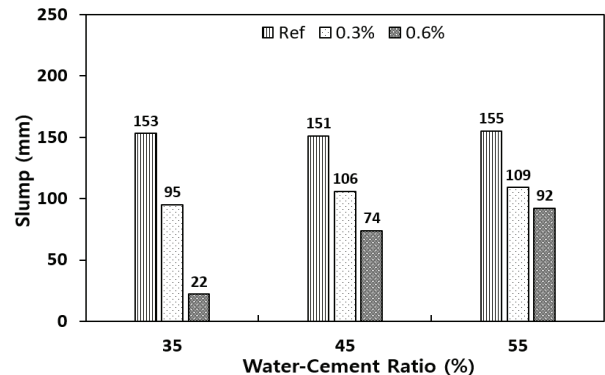
#### 3.1.1 슬럼프 측정 결과

Fig. 3에는 SAP를 혼입한 콘크리트의 슬럼프 측정결과를 SAP의 종류와 물-시멘트 비에 따라 나타내었다. 실험 결과, SAP의 혼입율이 증가할수록 슬럼프는 감소하는 경향을 나타냈으며, 물-시멘트 비 35%에서 가장 큰 슬럼프 감소율을 나타냈다. 앞서 기술했듯이, SAP는 수분을 흡수하는 특성이 있어 배합 시 배합수를 흡수하므로 슬럼프를 감소시키게 된다. 혼입율이 증가할수록 배합수를 더 빨리, 더 많이 흡수하게 되므로 슬럼프는 더욱 감소하게 된다. 또한, SAP의 혼입량은 시멘트 량에 대한 % 비율이기 때문에 상대적으로 낮은 물-시멘트 비의 SAP 혼입량이 많게 되고, 단위수량 또한 적기 때문에 낮은 물-시멘트 비에서 슬럼프 감소율은 커지게 된다. 기준 배합(Ref.) 대비 SAP를 혼입한 콘크리트의 슬럼프는 혼입량 증가에 따라 30~68%까지 감소하는 것으로 나타났으며, AE제를 혼입하면 공기연행에 의해 슬럼프는 소폭 상승하였다.

정리하면, SAP의 수분 흡수 특성에 따라 SAP를 혼입한 모든 배합에서 슬럼프가 감소하였으며, 혼입량의 증가에 따라 슬럼프 감소량이 증가하였다. SAP 혼입에 따른 시공성능 저



(a) Effect of SAP type (W/C 45%)



(b) Effect of W/C ratio (SAP-B)

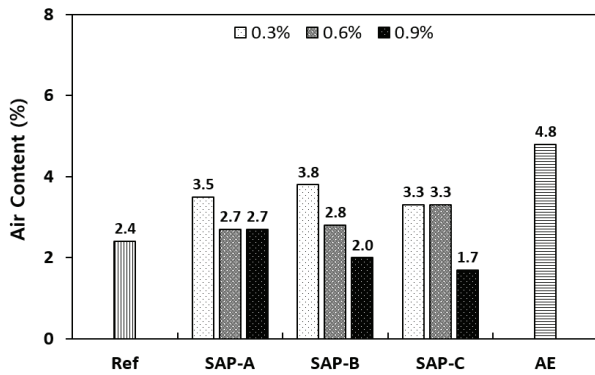
Fig. 3 Results of slump test

하를 보완하기 위해서는 SAP의 혼입량에 따른 추가수량의 첨가 및 화학 혼화제 사용 등이 필요할 것으로 판단된다.

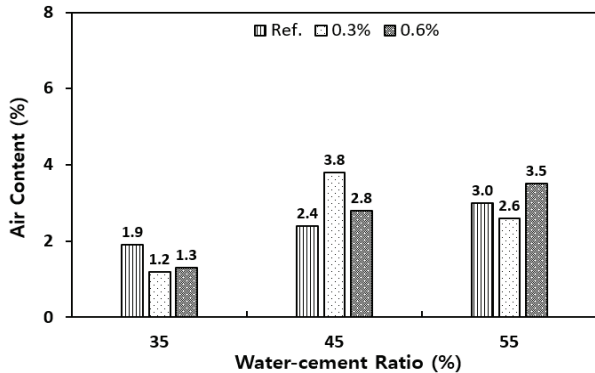
### 3.1.2 공기량 측정 결과

Fig. 4에는 SAP를 혼입한 콘크리트의 공기량 측정결과를 SAP의 종류와 물-시멘트 비에 따라 나타내었다. 실험 결과, SAP의 종류에 관계없이 혼입율이 증가할수록 공기량이 감소하는 경향을 나타냈으며(Fig. 4(a)), 물-시멘트 비에 따른 공기량(Fig. 4(b))은 일정한 경향을 나타내지 않았다. SAP의 혼입율이 증가하면 경화 콘크리트의 공기량은 증가하게 된다 (Riyazi et al, 2017). 수분을 흡수한 SAP이 팽창하여 콘크리트 내부의 공간을 차지하여 공극을 생성하기 때문이다. 그러나 공기량 측정 결과는 혼입율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 SAP 혼입에 따라 저하된 슬럼프에 의한 영향과 압력법에 따른 균질 않은 콘크리트 공기량 시험방법의 부정확성에 따른 결과로 판단된다.

보일의 법칙(Boyle's law)에 기초한 압력법의 원리는 펌프로 공기량 측정기의 공기실에 압력을 가하고 밸브를 열어줌과 동시에 공기실과 콘크리트 시료가 담긴 용기 내부의 압력 평형에 따른 압력감소를 측정하는 방식이다. 따라서 콘크리트 내부에 수분을 함유한 겔 형태의 SAP이 압력변화에 반응



(a) Effect of SAP type (W/C 45%)



(b) Effect of W/C ratio (SAP-B)

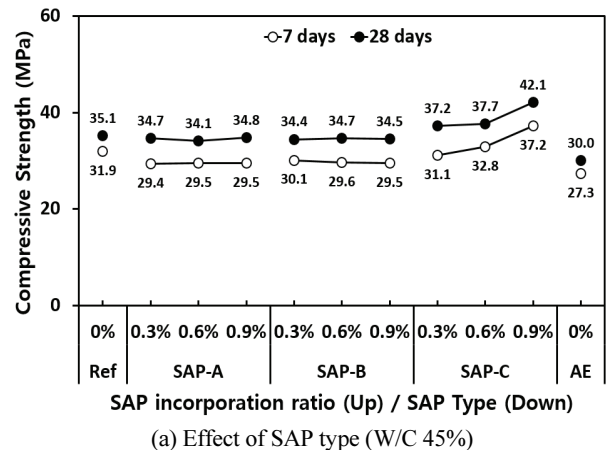
Fig. 4 Results of air contents test

하지 않으면 공기량이 정확히 측정되지 않을 수 있다. SAP를 혼입한 콘크리트의 공기량 측정은 SAP의 팽창체적을 고려하여 도출하거나 경화콘크리트의 화학분석을 통한 측정 등 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

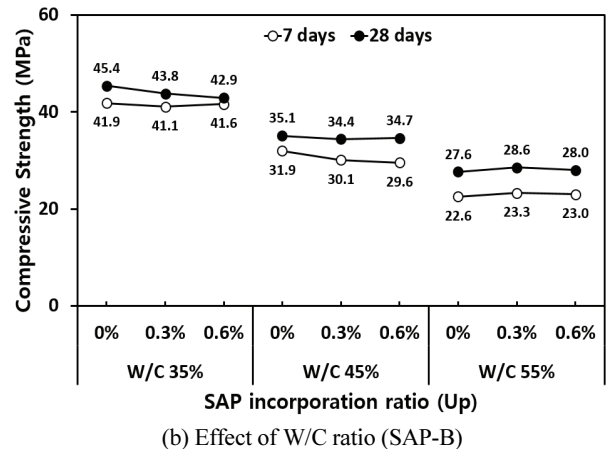
### 3.2 압축강도 측정 결과

콘크리트의 압축강도 측정 결과를 양생 조건에 따라 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 수중 양생을 실시한 콘크리트의 압축강도 결과(Fig. 5)를 보면, SAP-A, B를 혼입한 경우에는 혼입율에 따른 큰 차이가 없었다. 이는 수중 양생에 의해 콘크리트의 내·외부가 습윤하여 SAP에 의한 내부 양생 효과가 없었기 때문이다. 또한, SAP-A, B의 수분 흡수량이 낮아 유효 물-시멘트 비 감소에 따른 강도 증가와 SAP의 혼입으로 인한 공극 증가에 따른 강도 감소가 영향을 준 것으로 판단된다. 반면, SAP-C의 경우 혼입량 증가에 따라 강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 SAP-C의 높은 수분 흡수량 때문에 유효 물-시멘트 비가 감소하였고 SAP의 혼입으로 인한 공극의 증가보다 더 지배적으로 작용했기 때문으로 판단된다.

봉합 양생을 실시한 콘크리트의 압축강도 결과(Fig. 6)를



(a) Effect of SAP type (W/C 45%)



(b) Effect of W/C ratio (SAP-B)

Fig. 5 Results of compressive strength (Water curing)

보면, SAP의 혼입량 증가에 따라 압축강도가 대부분 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 SAP 혼입에 따른 유효 물-시멘트 비 감소와 내부 양생 효과가 강도 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한, SAP 혼입량 증가에 따른 압축강도는 물-시멘트 비가 낮을수록 급격한 강도 증가율을 나타내었고, 물-시멘트 비가 높아질수록 증가율이 완만해지는 결과를 나타내었다. SAP의 혼입량이 시멘트 량의 % 비율이므로 물-시멘트 비가 낮을수록 상대적으로 많은 양의 SAP이 혼입되어 나타난 결과로 판단된다. 동일한 물-시멘트 비 45%에서의 압축강도는 SAP-C > SAP-B > SAP-A 순으로 나타났으며, 이는 SAP의 흡수율이 높을수록 유효 물-시멘트 비 감소와 내부 양생 효과가 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

한편, SAP-A, B를 0.9% 혼입한 경우 봉합 양생 시험체가 수중 양생을 실시한 시험체보다 더 높은 강도를 나타내었다. 이는 SAP-A, B를 0.9% 이상 혼입하였을 때, 콘크리트 내부에서의 내부 양생 효과가 콘크리트 외부에서 수분이 공급되는 수중 양생보다 더 효과적으로 양생을 수행하여 강도 증진에 기여한 것으로 판단된다.

AE제를 사용한 경우에는 모두 기준 배합보다 압축강도가

작게 측정되었다. AE제를 사용하면 연행공기에 의해 시공성을 증진시키지만 공기량 증가로 인해 압축강도를 감소시키므로 SAP를 혼입한 경우가 강도 상승에는 더 효과가 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 염화물 침투 저항성

#### 3.3.1 염화물 확산 계수 측정 결과

본 연구에서는 SAP를 혼입한 콘크리트의 급속 염화물 침투시험을 실시하였으며, 염화물 침투 깊이를 산정하여 염화물 확산 계수를 계산하였다. 염화물 확산 계수 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

SAP의 종류에 따른 확산 계수 결과를 보면(Fig. 7(a)), 양생 조건에 관계없이 SAP의 혼입율이 증가하면 기준 배합보다 확산 계수가 감소하는 경향을 나타냈다. 특히, 봉합 양생은 SAP 혼입을 증가에 따라 수중 양생보다 급격한 감소율을 나타냈으며, SAP-A, B의 0.9% 혼입의 경우, 수중 양생보다 낮은 확산 계수를 나타내었다. SAP를 혼입하면 SAP의 내부 양생 효과로 인해 콘크리트 내부에 지속적으로 수분이 공급되고 수화 반응이 촉진되어 염화물 침투 저항성이 개선된 것으로

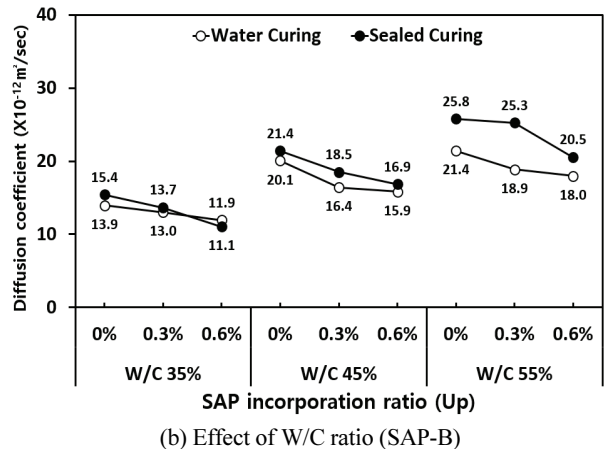
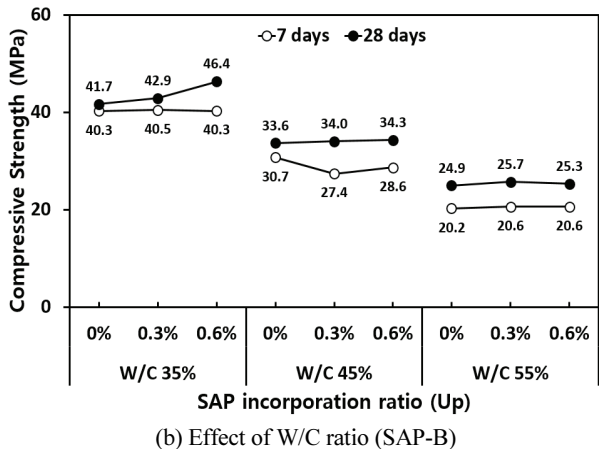
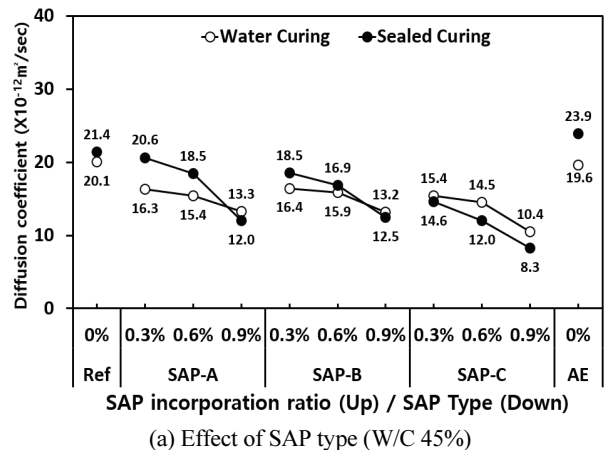
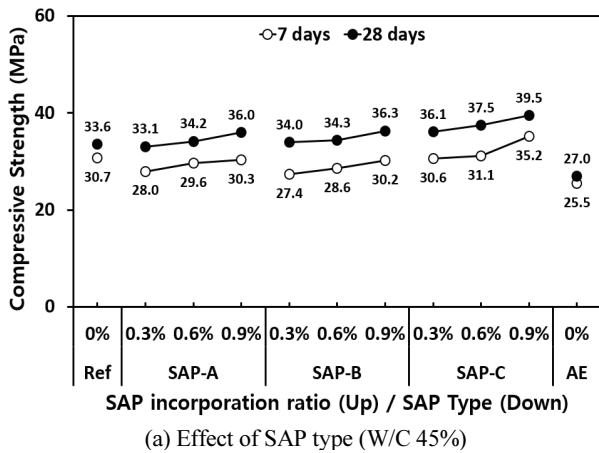


Fig. 6 Results of compressive strength (Sealed curing)

Fig. 7 Result of diffusion coefficient

로 판단된다. 이러한 개선 효과는 시험체 내·외부가 건조한 봉합 양생에서 더 크게 나타났다. SAP-C는 입자크기가 커서 수분 흡수 및 방출량이 많아 내부 양생에 필요한 수분을 충분히 공급할 수 있으므로 적은 양을 혼입(0.3%)하여도 수중 양생보다 봉합 양생의 염화물 침투 저항성이 증가하게 된다.

봉합 양생의 경우, 전처리 작업(24시간 수침)을 실시하지 않아 콘크리트 내부에서의 순간적인 흡수 작용이 결과에 포함될 수 있다. SAP-A, B 혼입율 0.3%의 경우 순간적인 흡수로 인해 수중양생보다 확산계수가 더 크게 나타났으나, 혼입율 0.9%인 경우는 내부 양생 효과가 증가하여 확산계수가 더 작게 측정되었다. 따라서 전처리 작업을 실시하여 측정할 경우, 봉합 양생의 염화물 침투 저항성은 더 증가할 것으로 판단된다.

물-시멘트 비에 따른 확산 계수 측정 결과를 보면(Fig. 7(b)), SAP 혼입량 증가에 따라 확산 계수가 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 물-시멘트 비 35%의 0.6% 혼입의 경우 봉합 양생이 수중 양생보다 낮은 확산 계수 값을 나타내었다. SAP의 혼입량은 시멘트 질량의 % 비율이기 때문에 낮은 물-시멘트 비에서는 SAP의 혼입량이 상대적으로 많아 높은 내부 양생 효과에 의해 염화물 침투 저항성이 개선된 것으로 판단된다. 따라서 물-시멘트 비 35%의 경우 0.6% (SAP-B), 물-시멘트 비 45%의 경우 0.9% 이상 (SAP-A, B) SAP를 혼입하였을 때, 봉합 양생이 수중 양생보다 염화물 침투 저항성이 우수하다.

정리하면, 콘크리트에 일정량 이상의 SAP를 혼입하면 내부 양생 효과에 의해 콘크리트 내부에서의 수화반응을 촉진시켜 염화물 침투 저항성을 개선시킴을 확인할 수 있었다. 다만 SAP의 입자 크기에 따라 적정 혼입율은 차이가 있었다. 따라서 수중 양생을 실시하기 어려운 경우 SAP를 적절히 혼입하면 내부 양생 효과에 의해 내구성을 개선시킬 수 있을 것으로 예상된다.

한편, 염화물 침투 시험과 다르게 전기적 장치를 이용하는 급속 염화물 침투시험은 콘크리트 구성 재료의 전도성에 따라 실험 결과에 영향을 줄 수 있다. 염화물 침투 시험을 통하여 얻은 침투깊이와 급속 염화물 침투시험을 통하여 얻은 확산 계수의 상관관계를 Fig. 8에 나타내었다. 결과를 보면, 염화물 침투 시험과 급속 염화물 침투시험의 결과는 높은 상관관계 ( $R^2=0.85$  이상)를 나타냈으며, 이는 콘크리트 내부의 SAP가 전기적 장치에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 따라서 SAP을 혼입한 콘크리트의 급속 염화물 침투시험과 침투 시험은 높은 상관성을 갖는 시험 방법인 것으로 판단된다.

### 3.3.2 표면 전기저항 측정 결과

본 연구에서는 표면 전기저항을 통해 SAP 혼입 콘크리트의 내구성을 간접적으로 평가하고자 하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 결과에 따르면 봉합 양생을 실시한 경우가 수중 양

생의 경우보다 표면 전기저항이 높게 측정되었다. 이는 양생 조건에 따른 콘크리트 내부 수분의 차이에 따른 것으로 수중 양생의 경우 콘크리트 내부의 수분이 전도체 역할을 하였기 때문에 저항이 낮게 측정된 것으로 판단된다. 또한 물-시멘트 비의 감소에 따라 표면 전기저항이 증가하였으며, 이는 물-시멘트 비가 감소하여 콘크리트가 더 밀실하게 되었기 때문인 것으로 판단된다.

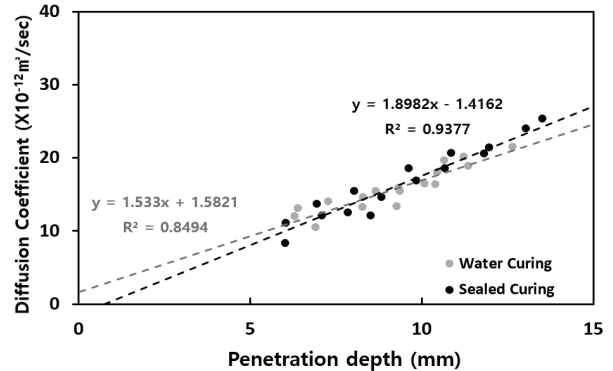


Fig. 8 Relationship between penetration depth and diffusion coefficient

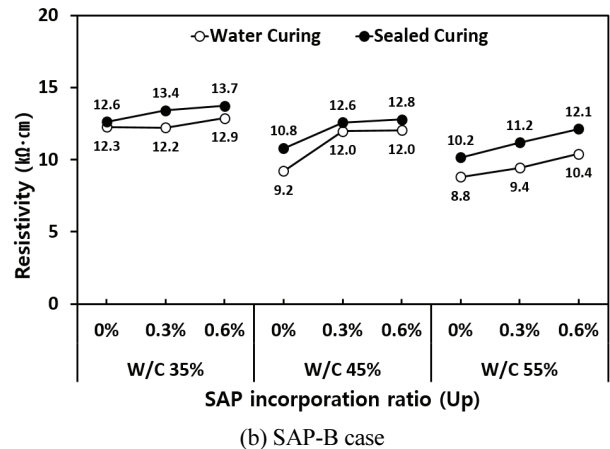
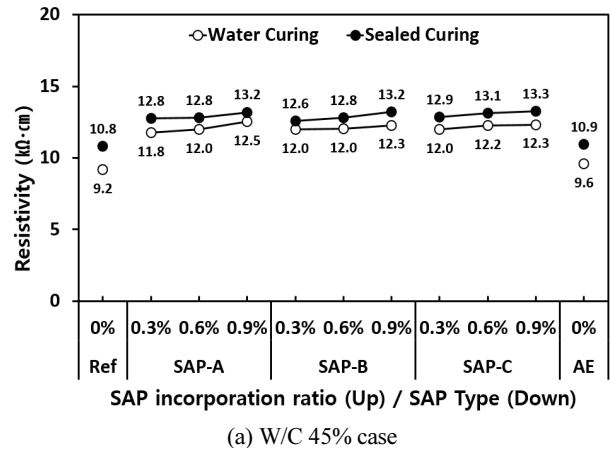


Fig. 9 Results of resistivity

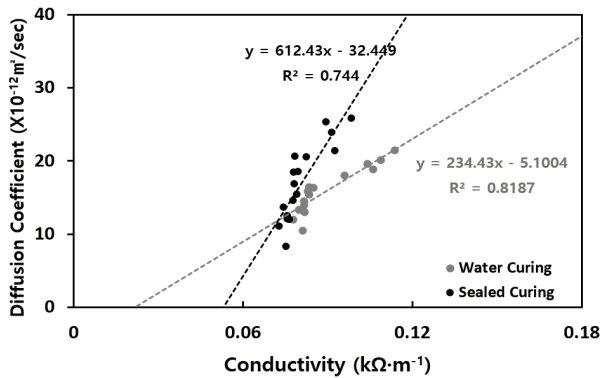


Fig. 10 Correlation between diffusion coefficient and electrical conductivity

기존 연구(Layssi et al, 2015)에서는 콘크리트 포화도의 변화는 공극 구조에서 수분의 양을 변화시켜 표면 전기저항에 영향을 미치므로 표면 건조 포화상태에서의 측정을 권고하고 있다. 그러나 본 연구에서는 SAP의 내부 양생 효과를 평가하기 위해 양생 조건을 다르게 하였으므로 표면 전기저항 결과를 통해 양생 조건을 비교하기에는 부적절한 것으로 판단된다. 향후 표면 전기저항에 대한 추가적인 연구를 통해 양생 조건별 상관관계를 분석하거나 동일한 조건에서의 비교·분석이 필요한 것으로 판단된다.

한편, 기존 연구(Layssi et al, 2015)에서는 전기 전도도와 급속 염화물 침투시험의 상관관계를 비교하였다. AASHTO TP 95에 의한 전기 전도도와 급속 염화물 침투시험으로부터 도출된 확산 계수 결과를 비교하였으며, 그 결과 결정 계수( $R^2$ )가 0.93으로 높은 상관관계를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 SAP를 혼입한 콘크리트의 양생조건에 따른 전기 전도도와 확산 계수의 상관관계를 비교해 보았으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 결과에 따르면 수중 양생 및 봉합 양생 콘크리트의 결정 계수( $R^2$ )는 각각 0.82, 0.74로 수중 양생이 더 높은 것으로 나타났다. 수중 양생이 봉합 양생에 비해 내부 수분의 변화가 적어 전기 전도도의 오차가 감소하여 결정 계수가 높게 측정된 것으로 판단된다.

표면 전기저항은 상대적으로 표면부의 밀실도와 미세구조 및 수분 포화도에 영향을 많이 받으며, 확산 계수는 전단면의 밀실도와 콘크리트의 미세구조, 수분 포화도 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 내·외부로 수분공급의 방식이 다른 두 양생법, 즉 내부수분 포화도에 대한 표면 전기저항과 확산 계수의 정량화된 비교·분석은 추가적인 검토가 필요하다.

## 4. 결론

추가 수량을 첨가하지 않고 SAP 혼입량과 양생조건에 따라 콘크리트를 제작하였으며, 이에 따른 특성 평가의 결론은 다음과 같다.

1. 수중 양생의 경우, SAP-A, B는 혼입율에 따라 압축강도의 큰 차이는 없었으며, SAP-C는 압축강도가 증가하였다. 이는 SAP의 종류에 따라 수분 흡수량의 차이로 인해 유효 물-시멘트 비 감소에 차이가 있었기 때문이다. SAP의 혼입으로 인한 유효 물-시멘트 비 감소가 공극의 증가보다 더 큰 영향으로 작용했기 때문인 것으로 판단된다.
2. 봉합 양생의 경우, SAP의 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 SAP 혼입에 따른 유효 물-시멘트 비 감소와 내부 양생 효과가 압축강도 증가에 영향을 준 것으로 판단된다.
3. 염화물 확산계수 측정 결과, SAP의 혼입을 증가에 따라 확산계수가 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 봉합 양생에서 확산계수는 더 크게 감소하였으며, 내부 양생 효과로 인해 수화 반응이 촉진되어 염화물 침투 저항성이 개선된 것으로 판단된다.
4. 슬럼프 측정결과, SAP의 종류에 상관없이 혼입율이 증가할수록 슬럼프는 감소하는 경향을 나타냈다. SAP 혼입에 따른 시공성을 보완하기 위해서는 화학 혼화제 사용, 정확한 추가 수량의 첨가 등이 필요한 것으로 판단된다.
5. 표면 전기저항 측정 결과, 콘크리트 내부의 수분 포화도 차이에 의해 봉합 양생이 수중 양생에 비해 더 높게 측정된 것으로 판단된다. 따라서 양생 조건이 다른 경우 표면 전기저항을 통해 결과를 비교하기에는 부적절한 것으로 판단되므로, 추가적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2019년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2018R1D1A1B07043400)

## References

1. Gutema, D.A. and Hong, K.N. (2018). Effect of absorption capacity of super absorbent polymer (SAP) in reducing autogenous shrinkage, *Proceedings of the Korea Institute for Structural*



- Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 22(2), 337-338.
2. Hasholt, M.T., Jensen, O.M., Kovler, K., and Zhutovsky, S. (2012). Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength? *Construction and Building Materials*, 31, 226-230.
  3. Jensen, O.M. (2013). Use of Superabsorbent Polymer in Concrete. *Concrete International*, 35, 48-52.
  4. Jensen, O.M., and Hansen, P.F. (2001). Water-entrained cement-based materials-I. Principles and theoretical background, *Cement and Concrete Research*, 31(4), 647-654.
  5. Jensen, O.M., and Hansen, P.F. (2002). Water-entrained cement-based materials-II. Experimental observations, *Cement and Concrete Research*, 32(6), 973-978.
  6. Justs, J., Wyrzykowski, M., Bajare, D., and Lura, P. (2015). Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 76, 82-90.
  7. Kang, S.H., Hong, S.G., and Moon, J.H. (2018). The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 172, 29-40.
  8. Kang, S.H., Moon, J.H., and Hong, S.G. (2016). Effect of Internal Curing by Super-Absorbent Polymer (SAP) on Hydration, Autogenous Shrinkage, Durability and Mechanical Characteristics of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(3), 317-328. (in Korean)
  9. Kim, I.S., Lee, C.K., Kim, S., Choi, H.E., Choi, S.Y., and Yang, E.I. (2019). Absorption Characteristics of Superabsorbent Polymer with Particle Types and Test Method, *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, Korea Concrete Institute, 31(1), 403-404. (in Korean).
  10. Kim, J.H., Cho, Y.K., and Lee, K.M. (2018). The Characteristics of Compressive Strength in Mortar with Internal Curing According to Curing Condition, *J. Rec. Const. Resources* 6(2), 87-93. (in Korean)
  11. Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A.R., and Salehi, M. (2015). "Electrical Resistivity of Concrete", *Concrete International*, 37, 41-46.
  12. Liu, J., Farzadnia, N., and Shi, C. (2020). Effects of superabsorbent polymer on interfacial transition zone and mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 231, 117-142.
  13. Liu, J., Farzadnia, N., Shi, C., and Ma, X. (2019a). Effects of superabsorbent polymer on shrinkage properties of ultra-high strength concrete under drying condition. *Construction and Building Materials*, 215, 799-811.
  14. Liu, J., Farzadnia, N., Shi, C., and Ma, X. (2019b). Shrinkage and strength development of UHSC incorporating a hybrid system of SAP and SRA. *Cement and Concrete Composites*, 97, 175-189.
  15. Ma, X., Liu, J., Wu, Z., and Shi, C. (2017). Effects of SAP on the properties and pore structure of high performance cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 131, 476-484.
  16. Ma, X., Yuan, Q., Liu, J., and Shi, C. (2019). Effect of water absorption of SAP on the rheological properties of cement-based materials with ultra-low w/b ratio. *Construction and Building Materials*, 195, 66-74.
  17. Mechtcherin, V., Snoeck, D., Schröfl, C., De Belie, N., Klemm, A.J., Ichimiya, K., Moon, J., Wyrzykowski, M., Lura, P., Toropovs, N., Assmann, A., Igarashi, S., De La Varga, I., Almeida, F.C.R., E7], K., Ribeiro, A.B., Custodio, J., Reinhardt, H.W., and Falikman, V. (2018). Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test, *Materials and Structures*, 2018, 51: 28, 1-16.
  18. Riyazi, S., Kevern, J.T., Mulheron, M. (2017). Super absorbent polymers (SAPs) as physical air entrainment in cement mortars, *Construction and Building Materials*, 147, 669-676.
  19. Schröfl, C., Mechtcherine, V., and Gorges, M. (2012). Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 42(6), 865-873.
  20. Shen, D., Wang, X., Cheng, D., Zhang, J., and Jiang, G. (2016). Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age. *Construction and Building Materials*, 106(1), 512-522.
  21. Shim, W.B., Hong, K.N., Batmunkh, G.O., and Yeon, Y.M. (2019). Evaluation of self shrinkage characteristics of concrete with super absorbent polymer, *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 23(2), 188. (in Korean)
  22. Snoeck, D., Jensen, O. M., and De Belie, N. (2015). The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 74, 59-67.
  23. Yang, J., Liu, L., Liao, Q., Wu, J., Li, J., and Zhang, L. (2019). Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar. *Construction and Building Materials*, 201, 401-407.
  24. Yang, J., and Wang, F. (2019). Influence of assumed absorption capacity of superabsorbent polymers on the microstructure and performance of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 204, 468-478.
  25. Zhong, P., Wyrzykowski, M., Toropovs, N., Li, L., Liu, J., and Lura, P. (2019). Internal curing with superabsorbent polymers of different chemical structures. *Cement and Concrete Research*, 123, 105789.

Received : 02/13/2020

Revised : 03/12/2020

Accepted : 03/30/2020

---

**요 지 :** 고 흡수성 폴리머(SAP)는 콘크리트 내부에서 물을 흡수하여 팽창하며 물을 방출하면서 수축한다. 이 과정을 통해 콘크리트는 내부 양생 효과를 얻을 수 있지만 팽창한 SAP가 차지하고 있던 공간은 공극으로 존재하게 된다. 따라서 본 연구에서는 SAP를 혼입한 콘크리트의 기초 물성 및 염화물 침투 저항성을 평가하여 SAP의 내부 양생과 공극에 의한 영향을 평가하였다. 또한 SAP에 의한 내부 양생 효과를 평가하기 위해 양생 조건을 수중 양생과 봉함 양생으로 구분하여 실시하였다. 실험 결과, 수중 양생의 압축강도는 혼입율에 따라 큰 차이가 없었으며, 봉함 양생의 경우에는 SAP의 혼입율이 증가함에 따라 압축 강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 봉함 양생의 경우 내부 양생 효과가 압축 강도 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. 염화물 확산계수 측정 결과, SAP의 혼입율 증가에 따라 확산계수가 감소하는 경향을 나타냈으며, 특히 봉함 양생은 내부 양생 효과로 인해 수화 반응이 촉진되어 염화물 침투 저항성이 더욱 개선된 것으로 판단된다. 양생 조건이 다른 경우 표면 전기저항을 이용해 염화물 침투 저항성을 평가하는 것은 부적절한 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 염화물 침투 저항성, 양생 조건, 전기저항, 기초물성, 고 흡수성 폴리머

---