

고 흡수성 폴리머를 혼입한 콘크리트의 압축 강도 및 동결융해 저항성 평가

김일순¹, 최소영², 양은익^{3*}

Evaluation of Compressive Strength and Freeze-thaw Resistance Properties of Concrete using Superabsorbent Polymer

Il-Sun Kim¹, So-Yeong Choi², Eun-Ik Yang^{3*}

Abstract : When the Superabsorbent Polymer (SAP) is added into concrete, the slump decreases rapidly, deteriorating the workability, the internal curing effect can be obtained through the water absorption and discharge process, and the internal voids of the concrete are increased. In this study, the effects of internal curing and voids were evaluated by evaluating the compressive strength, freeze-thaw resistance, and chloride penetration resistance of SAP-adding concrete that secured workability using a water reducing agent. Also, the internal curing effect of SAP was evaluated by dividing the curing conditions of concrete into water curing and sealed curing. From the result, as the SAP adding ratio increased, the amount of water reducing agent increased, and as for the compressive strength, the SAP adding ratio of 1.5% showed the greatest compressive strength. In particular, in the case of sealed curing showed higher compressive strength than the water curing. It is considered that the compressive strength increased due to the reduction of the effective water-cement ratio and the internal curing effect. Adding 1.0~1.5% of SAP improved the freeze-thaw resistance similar to the case of adding the AE agent, and the addition of more than 1.0% of SAP improved the chloride penetration resistance. The optimal adding ratio of SAP is 1.5%, and the adding ratio of 2.0% or more adversely affects the compressive strength and freeze-thaw resistance.

Keywords: Chloride penetration resistance, Compressive strength, Curing condition, Freeze-thaw resistance, Superabsorbent polymer

1. 서 론

콘크리트를 구성하는 배합 재료 중 물은 중요한 요소이며, 물-시멘트 비에 따라 콘크리트의 강도에 큰 영향을 미친다. 특히, 콘크리트 내부에 존재하는 물은 콘크리트의 내구성 및 역학적 특성에 영향을 미친다.

최근 국내·외에서 모르타르나 콘크리트에 고 흡수성 폴리머(Superabsorbent polymer, 이하 SAP)를 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).

SAP는 콘크리트에 혼입되어 콘크리트의 시공성 및 내구 특성을 변화시키게 된다. 먼저, SAP이 콘크리트의 배합수를

흡수하여 시공성이 저하되고, 혼입율이 증가할수록 시공성은 급격하게 감소하게 된다(Lee et al., 2020). 또한, SAP는 수분을 흡수하여 팽창한 상태로 내부에 존재하게 되고, 건조한 환경이 되면 수분을 방출하면서 수축하게 된다. 이 때, 방출된 수분은 콘크리트 내부에 수분을 공급하게 되고 내부 양생 효과를 얻는다. 콘크리트는 내부 양생 효과로 수축 감소, 강도 증가 등의 내구성을 개선시킨다(Jensen and Hansen, 2002; Kim et al., 2018). SAP에 의한 내부 양생은 자기수축을 크게 저감시킬 수 있어 고강도 콘크리트와 자기수축에 대한 연구가 주로 진행되고 있다(Hasholt et al., 2012; Schröfl et al., 2012; Justs et al., 2015; Snoeck et al., 2015; Kang et al., 2016; Shen et al., 2016; Ma et al., 2017; Gutema et al., 2018; Kang et al., 2018; Liu et al., 2019a; Liu et al., 2019b; Ma et al., 2019; Shim et al., 2019; Yang and Wang, 2019; Yang et al., 2019; Zhong et al., 2019; Liu et al., 2020).

콘크리트 내부에서 수분을 흡수한 SAP는 직경이 약 3배 정도 팽창하는 것으로 알려져 있으며(Mechtcherine, 2010), 경화 후 이 공간은 공극으로 작용하게 된다. 일반적인 콘크리트는 AE제 사용으로 인해 연행공기가 생성되며, 이 공극의 대표적인 역할은 동결융해 저항성을 증대시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 AE제의 사용은 공기량 증가로 인해 콘크리트의 강

¹정회원, 강릉원주대학교 토목공학과, 박사과정

²정회원, 강릉원주대학교 방재연구소, 연구교수, 공학박사

³정회원, 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 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2020년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

도를 감소시킬 수 있고, 공극의 크기 조절이 불가능하다는 단점이 있다. 반면, SAP의 혼입으로 형성되는 공극(이하 SAP 공극)은 공극의 크기를 조절할 수 있고 내부 양생 효과로 강도를 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. 또한, SAP 공극이 연행 공기와 유사한 역할을 하여 콘크리트의 동결융해 저항성을 개선시킬 가능성도 기대할 수 있다. 기존 연구에서 SAP를 혼입한 콘크리트의 표면 스케일링 시험 결과 동결 저항성이 개선된다고 보고되고 있다(Mönnig et al., 2007; Jensen, 2013; Laustsen et al., 2013; Hasholt et al., 2015). 그러나 급속 동결융해 저항성에 대한 연구는 진행되지 않았다. 정리하면, 콘크리트에 혼입된 SAP는 콘크리트의 시공성을 저하시키고, 내부 양생 효과로 자기수축을 저감시키며, SAP 공극으로 인해 급속 동결융해 저항성의 개선이 기대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 SAP의 혼입으로 인한 급격한 시공성 감소를 막기 위해 감수제를 사용하였고, SAP과 AE제를 각각 혼입한 콘크리트의 시공성 및 압축강도, 동결융해 저항성, 염화물 침투 저항성 평가를 실시하여 내부 양생 효과와 SAP 공극에 의한 영향을 평가하였다. 이 때, 내부 양생 효과를 평가하기 위한 양생 조건으로 수중 양생과 봉합 양생을 구분하여 실시하였다. 연구 진행 개요는 Fig. 1에 나타내었다.

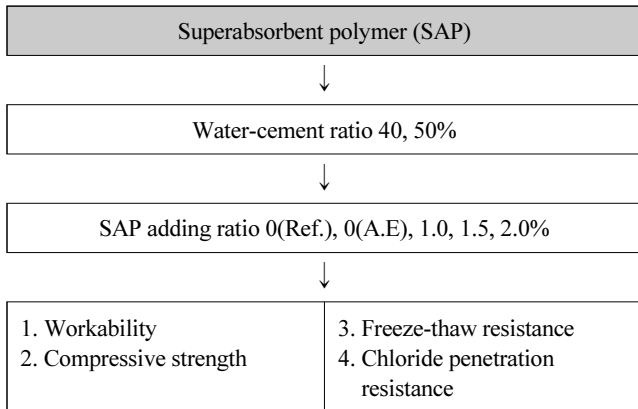


Fig. 1 Research Framework

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 연구에서는 SAP의 혼입에 따른 콘크리트의 특성을 평가하기 위해 슬럼프, 압축강도, 동결융해 저항성, 염화물 침투 저항성 시험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 SAP는 비정형(Atypical)이며, 사용된 물-시멘트 비는 40, 50%이다. 이전 연구(Lee et al., 2020)결과에 따르면, 물-시멘트 비 35, 45, 55%에서의 SAP 혼입율 0.9% 이하는 콘크리트의 내구성 개선에

큰 효과가 없었다. 따라서 본 연구에서는 SAP의 혼입율을 0(Ref.), 1.0, 1.5, 2.0%로 결정하였으며, SAP를 혼입하지 않고 AE제를 혼입한 변수를 추가하였다. 이 때, SAP를 혼입하지 않은 배합을 기준 배합(Ref.)으로 설정하였다.

콘크리트의 양생은 수중 양생과 봉합 양생으로 구분하여 실시하였으며, 봉합 양생은 SAP의 내부 양생 효과에 의한 영향을 평가하기 위해 실시하였다. 수중 양생은 탈형 후 항온수조(20±3℃, RH 100%)에 침지하여 수행하였으며, 봉합 양생은 탈형 후 비닐소재로 밀봉하고 항온 항습실(20±3℃, RH 60%)에 보관하여 외부와 수분이동이 최대한 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 비정형(Atypical)이다. SAP는 제조방법에 따라 형태가 결정되는데 비정형은 겔 중합법에 의해 큰 덩어리로 제조되어 파쇄한 후 원하는 입도에 맞게 사

Table 1 Test variables

Conditions	Variables
SAP Type	Atypical
W/C (%)	40, 50
SAP adding ratio (C×%)	0(Ref.), 0(A.E), 1.0, 1.5, 2.0
Specimen size (mm)	∅100×200
	∅100×50
Curing condition (20℃)	Water, sealed
Curing days	28 (Compressive strength)
	14 (Freeze-thaw resistance)
	28 (Chloride penetration resistance)

Table 2 Mix proportions of concrete

W/C (%)	SAP (C%)	Unit weight(kg/m ³)				SAP (kg)	A.E* (C%)	WRA* (C%)
		W	C	S	G			
40	0 (Ref.)					-	-	0.4
	0 (A.E)					-	0.005	0.4
	1.0	170	425	721	985	4.250	-	0.8
	1.5					6.375	-	1.0
50	2.0					8.500	-	3.0
	0 (Ref.)					-	-	0.3
	0 (A.E)					-	0.005	0.3
	1.0	173	346	781	983	3.460	-	0.7
	1.5					5.190	-	0.9
	2.0					6.920	-	2.0

* A.E : Air entraining agent, W.R.A : Water reducing agent

용하는 제품이다. 본 연구에 사용된 SAP는 입자 크기가 38~100 μm 이며, 사용된 SAP를 Fig. 2에 나타내었다.

SAP는 입도에 따라 수분의 흡수시간과 흡수력에 차이가 있으며, pH에 따라 흡수력은 달라진다. 이러한 SAP의 흡수력은 콘크리트의 시공성과 특성에 영향을 준다. 따라서 기존 연구(Kim et al., 2019)를 통해 얻어진 SAP의 최대 수분 흡수력을 Table 3에 나타내었으며, SAP의 최대 흡수력(포화상태) 도달 시간은 3분 이내이다.



Fig. 2 Superabsorbent polymer (Atypical)

Table 3 Water absorptivity of the SAP

Type	pH 7	pH 11	pH 13	C.F.W*
Absorptivity (g/g)	112.7	32.9	25.7	19.6

* C.F.W : Cement Filtered Water

Table 4 Physical and chemical properties of the cement

Properties		Cement
Physical	Specific gravity	3.15
	Fineness (cm^2/g)	3,350
Chemical (%)	SiO ₂	21.7
	Al ₂ O ₃	5.7
	Fe ₂ O ₃	3.2
	CaO	63.1
	MgO	2.8
	SO ₃	2.2
	LOI	-

Table 5 Physical properties of the aggregate

Type	Density (g/cm^3)	Absorption (%)	F.M.
Sand	2.60	1.01	2.48
Coarse	2.68	1.35	6.76

2.2.2 시멘트 및 골재

본 연구에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)를 사용하였으며, 시멘트의 물리적, 화학적 특성을 Table 4에 나타내었다. 굵은 골재는 최대 치수 19mm의 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 최대 치수가 5mm인 모래를 사용하였다. 사용된 골재의 물리적 특성을 Table 5에 나타내었다.

2.2.3 혼화제

본 연구에 사용된 혼화제는 국내 R사의 제품인 AE제와 감수제(W.R.A)를 사용하였으며, 감수제는 폴리카보산계를 사용하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 시공성 (슬럼프)

SAP를 혼입한 굳지 않은 콘크리트의 특성을 평가하기 위해 슬럼프를 측정하였다. 슬럼프는 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험방법) 기준에 따라 실시하였으며, SAP의 시간에 따른 흡수력에 대한 영향을 최소화하기 위해 슬럼프는 배합 후 동일한 시간에 측정하였다.

SAP를 사용하는 기존 연구(Kang et al., 2016; Shen et al., 2017; Liu et al., 2019b; Ma et al., 2019; Yang and Wang, 2019; Liu et al., 2020)에서는 대부분 SAP의 혼입율에 따른 흡수력 만큼 배합수를 추가하여 실험을 진행하고 있다. 그러나 본 연구에서는 시공성 확보를 위해 추가 배합수를 사용하지 않고 감수제를 사용하였다. 목표 슬럼프(120~180mm)를 설정하고 모든 배합이 목표 슬럼프에 도달하도록 SAP 혼입율에 따라 감수제 사용량을 증가시켰다.

2.3.2 압축강도

본 연구에서 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법) 기준에 따라 $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$ 크기의 실린더 시험체를 이용하여 측정하였다. 각각의 양생 방법(수중 & 봉함 양생)에 따라 재령 28일간 양생한 후 만능재료 시험기(UTM)를 사용하여 측정하였고, 시험체 3개의 평균 값을 사용하였다.

2.3.3 동결융해 저항성

본 연구에서는 SAP를 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성을 평가하였다. 동결융해 저항성 시험은 KS F 2456(급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법) 기준에 준하여 실시하였으며, $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$ 크기의 실린더 시험체를 각 양생 방법에 따라 재령 14일간 양생 후 수행하였다. 이 때, 동결융해 시험은 B방법(기중 급속 동결 후 수중 융해 시험방법)으로 수행하였다. 동결융해 작용을 받은 시험체의 질량 변화와 상대

동 탄성계수를 100, 200, 300 cycle 에 각각 측정하였다. 사용된 동 탄성계수 측정기를 Fig. 3에 나타내었다.

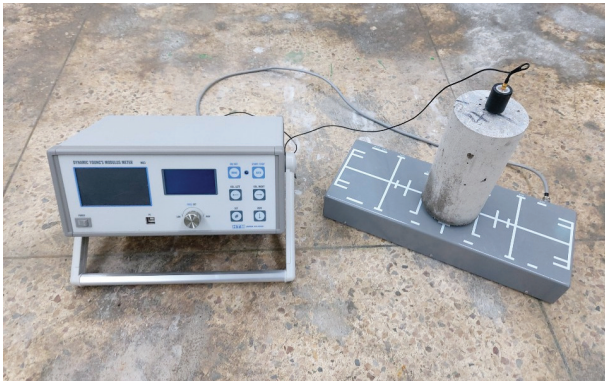


Fig. 3 Dynamic young's modulus meter

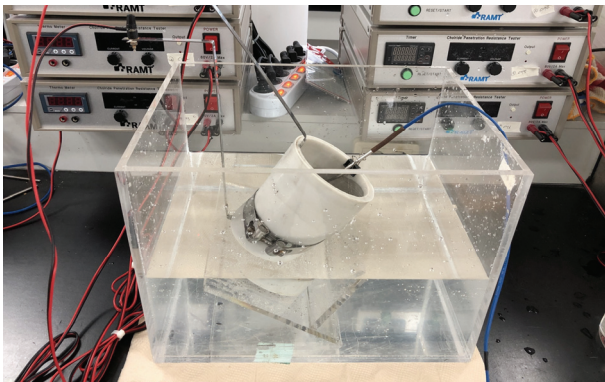


Fig. 4 Chloride penetration resistance test (NT-Build 492)

2.3.4 염화물 침투 저항성

본 연구에서는 SAP의 혼입율에 따른 염화물 침투 저항성을 평가하기 위해 급속 염화물 침투시험을 실시하였다. 급속 염화물 침투시험은 NT Build 492 기준에 따라 수행하였으며, $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 크기의 콘크리트 시험체를 각 양생 방법에 따라 재령 28일간 양생한 후 두께 $50 \pm 2 \text{mm}$ 크기로 절단하여 사용하였다. 이 때, 절단된 시험체는 내부 수분 상태에 따른 순간 흡수를 막기 위해 24시간 이상 수중 침지 후 염화물 침투 시험을 실시하였다. 시험체의 양극부(+)에는 0.3N 수산화나트륨 (NaOH) 수용액을, 음극부(-)에는 3% 염화나트륨 (NaCl) 수용액을 넣고 8시간 동안 30V의 전압을 가하였다. 급속 염화물 침투시험이 완료된 시험체는 할렬하여 질산은 변색법을 통해 염화물 침투 깊이를 측정하였고, NT Build 492에 제시된 염화물 확산계수 식을 이용하여 염화물 확산계수를 산정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 슬럼프 측정 결과

SAP를 혼입한 콘크리트의 슬럼프 측정결과를 물-시멘트 비와 SAP 혼입율에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 실험 결과, 모든 배합은 본 연구에서 설정한 목표 슬럼프(120~180mm)에 도달하였으며, 물-시멘트 비에 따라 유사한 슬럼프 값을 나타내었다. 이는 목표 슬럼프에 도달하도록 배합별로 감수제를 다르게 사용하였기에 당연한 결과이다. 이전 연구(Lee et al., 2020)에서 SAP의 혼입율이 증가할수록 슬럼프는 감소하였으며, SAP의 배합수 흡수로 인한 슬럼프 감소는 이미 널리 알려진 내용이다.

감수제 사용에 따른 슬럼프 값을 Table 6에 나타내었다. 본 연구에서는 SAP 혼입율이 증가할수록 감수제 사용량이 증가하였다. 유사한 슬럼프를 얻기 위한 감수제의 사용량은 SAP 혼입율 1.5%까지 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. SAP 혼입율이 0.1%씩 증가할 때마다 감수제 사용량은 0.04%씩 증가시켜야 된다. SAP의 혼입율이 2.0% 일 때, 목표 슬럼프 달성을 위한 감수제 사용량은 2.0~3.0%로 일반적인 감수제 사용량(1.0% 이하)을 초과한다. 특히, SAP 혼입율이 1.5%에서 2.0%로 증가할 때, 감수제 사용량은 급격하게 증가한다. 따라서 감수제를 사용하여 시공성을 확보하려면 SAP의 혼입율은 1.5%이하로 사용해야 할 것으로 판단된다.

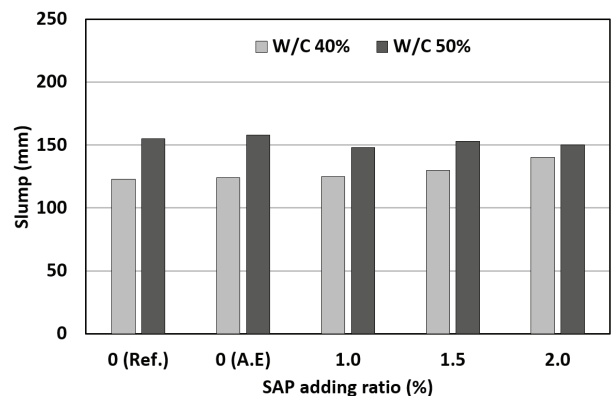


Fig. 5 Results of slump test

Table 6 Slump value according to adding of W.R.A

W/C (%)	Type	SAP (C%)				
		0 (Ref.)	0 (A.E.)	1.0	1.5	2.0
40	Slump (mm)	123	124	125	130	140
	W.R.A (C%)	0.4	0.4	0.8	1.0	3.0
50	Slump (mm)	155	158	148	153	150
	W.R.A (C%)	0.3	0.3	0.7	0.9	2.0

3.2 압축강도 측정 결과

SAP를 혼입한 콘크리트의 압축강도 측정 결과를 물-시멘트 비에 따라 Fig. 6에 나타내었다. 먼저, 물-시멘트 비 40%의 경우 (Fig. 6(a)), SAP의 혼입으로 인한 규칙적인 경향은 나타나지 않았다. 수중 양생의 경우, 기준 배합(Ref.)이 가장 큰 압축강도를 나타냈으며, SAP이 혼입된 경우에는 혼입율 1.5%가 가장 큰 압축강도를 나타냈다. 수중 양생은 콘크리트의 내·외부를 습윤상태로 유지시키므로 SAP의 건조에 의한 내부 양생 효과를 기대할 수 없다. 또한, SAP의 수분 흡수 특성으로 인한 유효 물-시멘트 비 감소에 따른 강도 증가와 SAP 공극 증가에 따른 강도 감소에 의해 압축강도가 영향을 받는다. 즉, SAP 혼입율 1.5%는 유효 물-시멘트 비 감소에 따른 강도 증가가 지배적으로 작용하여 압축강도가 가장 크게 나타난 것으로 판단할 수 있다. SAP 혼입율 2.0%는 1.5%보다 압축강도가 감소하였는데, 유효 물-시멘트 비보다 SAP 공극의 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다. 따라서 압축강도를 기준으로 한 수중 양생의 SAP 최대 혼입율은 1.5%로 판단할 수 있다.

봉합 양생의 경우(Fig. 6(a)), SAP 혼입율 1.5%가 가장 큰 압축강도를 나타냈으며, SAP를 1.0% 이상 혼입시에는 봉합 양생이 수중 양생보다 높은 압축강도를 나타냈다. 특히 SAP 혼입율 1.5%의 봉합 양생은 콘크리트 강도발현에 가장 유리한 양생 방법인 수중 양생의 기준 배합(Ref.)보다 압축강도보다 높게 측정되었는데, 이는 유효 물-시멘트 비 감소와 SAP의 내부 양생 효과에 의해 압축강도가 증가하였기 때문이다. 즉, 적당한 혼입율의 SAP는 내부 양생 효과로 수중 양생을 실시하지 않고도 압축강도를 증가시킬 수 있다. SAP 혼입율 2.0%의 경우 혼입율 1.5%보다 낮은 압축강도를 나타냈다. 혼입율이 증가하면 내부 양생 효과가 증가하지만 SAP 공극 또한 증가하게 되므로, SAP를 2.0% 이상 혼입하면 SAP 공극의 영향이 더 지배적으로 작용하여 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 봉합 양생의 경우, 압축강도 증가에 최적의 혼입율은 1.5%로 판단된다.

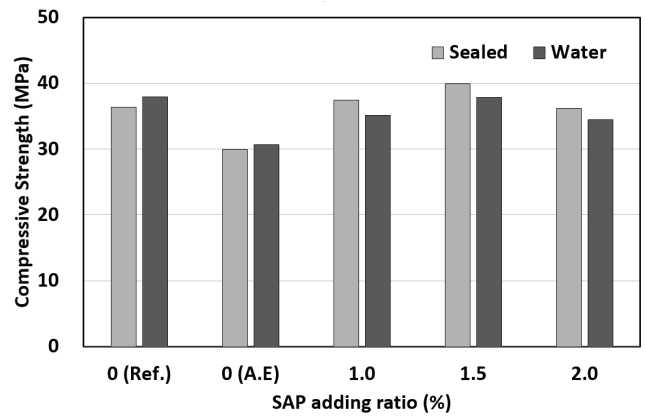
물-시멘트 비 50%의 경우(Fig. 6(b)), 양생 조건에 관계없이 기준 배합(Ref.)이 가장 큰 압축강도를 나타냈다. 먼저 수중 양생의 경우, SAP 혼입율 1.5%가 가장 큰 압축강도를 나타냈으나, 타 혼입율과의 차이는 크지 않았다. 수중 양생은 내부 양생 효과가 없고, 유효 물-시멘트 비와 SAP 공극에 의한 영향이 상쇄되어 압축강도에 영향을 준 것으로 판단된다.

봉합 양생의 경우(Fig. 6(b)), SAP 혼입율 1.5%가 가장 큰 압축강도를 나타냈으며, SAP를 1.5% 이상 혼입시에는 봉합 양생이 수중 양생보다 높은 압축강도를 나타냈다. 이는 유효 물-시멘트와 내부 양생 효과에 의해 압축강도가 증가한 것으로 판단된다. 또한, SAP 혼입율 2.0%의 경우 혼입율 1.5%보다 낮은 압축강도를 나타냈으며, 이는 물-시멘트 비 40%의 경우와 같

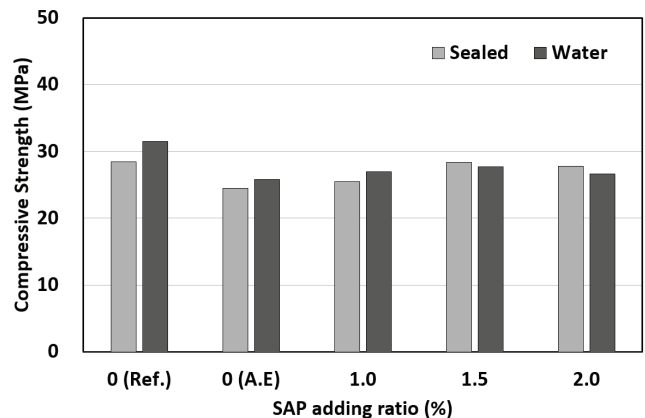
은 결과이다. 정리하면 물-시멘트 비 50%에서의 최적의 SAP 혼입율은 1.5%로 판단된다.

물-시멘트 비 40%와 50%의 압축강도는 유사한 경향을 나타냈으나, SAP에 의한 영향은 물-시멘트 비 40%에서 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 기존 연구(Jensen, 2013)에서 물-시멘트 비 45% 이상에서는 내부 양생 효과에 의한 영향이 미비하여 공극에 의한 콘크리트 강도 감소가 지배적이고, 물-시멘트 비 45% 이하에서 강도 증진을 기대할 수 있다고 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서도 물-시멘트 비 40%에서 SAP의 내부 양생 효과에 의한 강도 증가가 더 크게 나타났다.

AE제를 사용한 경우에는 물-시멘트 비에 관계없이 압축강도가 가장 작게 측정되었다. AE제를 사용하면 연행공기에 의해 시공성을 개선시킬 수 있지만 공기량 증가로 인해 압축강도를 감소시킬 수 있기 때문에 AE제 혼입으로 인해 압축강도가 감소한 것으로 판단된다.



(a) W/C 40% case



(b) W/C 50% case

Fig. 6 Results of compressive strength

3.3 동결융해 저항성 시험

3.3.1 질량 변화율

동결융해 시험에 의한 콘크리트 시험체의 질량 변화율을 양생 조건에 따라 Table 7~8에 나타내었다. 먼저, 수중 양생 콘크리트 시험체의 질량 변화율(Table 7)을 보면, 물-시멘트 비에 관계없이 동결융해 주기가 증가할수록 질량이 감소하였으며, 물-시멘트 비가 높을수록 질량이 더 크게 감소하는 경향을 나타냈다. 물-시멘트 비가 높으면 상대적으로 압축강도 및 내구성이 저하되어 동결융해에 의해 질량이 더 크게 감소하는 것으로 판단된다.

봉합 양생의 경우(Table 8), 물-시멘트 비에 관계없이 동결융해 저항성 시험 100 cycle 후에 질량이 증가하였다. 이는 봉합 양생으로 건조된 시험체가 동결융해 시험 중에 수분을 흡수하여 질량이 증가한 것으로 판단된다. 이 후 200 cycle 부터는 질량이 감소하였다. 양생 조건에 관계없이 물-시멘트 비가 높을수록 질량이 더 크게 감소하였는데, 콘크리트의 강도 및 수밀성 등이 낮아 질량 변화에 영향을 준 것으로 판단된다.

동결융해 시험에 의해 모든 배합에서 질량 변화가 발생하

였으나, 그 변화율은 1% 이내로 나타나 동결융해 시험에 의한 질량 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

3.3.2 상대 동 탄성계수

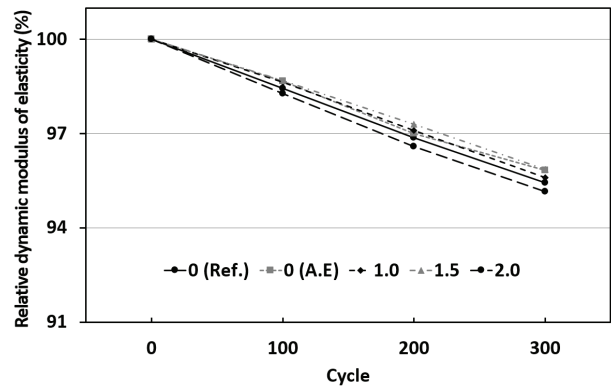
동결융해 시험에 의한 상대 동 탄성계수의 측정 결과를 물-시멘트 비에 따라 Fig. 7~8에 나타내었다. 상대 동 탄성계수는 물-시멘트 비에 관계없이 유사한 경향을 나타냈으며, 양생 조건에 관계없이 300 cycle 후의 상대 동 탄성계수는 모두 92% 이상으로 나타나 콘크리트의 내구성 지수는 양호한 것으로 나타났다. SAP 혼입율 1.0, 1.5%와 AE제를 혼입한 경우의 상대 동 탄성계수가 상대적으로 높게 나타났으며, 기준 배합(Ref.)과 SAP 혼입율 2.0%가 낮은 상대 동 탄성계수를 나타냈다. SAP를 1.0~1.5% 혼입하면 AE제를 혼입한 경우와 유사하게 동결융해 저항성을 개선시킬 수 있다. 사용된 SAP는 콘크리트 내부에서 공극을 형성하며, 이 공극이 연행공기 역할을 하여 동결융해 저항성을 개선시킨 것으로 판단된다. 다만, 2.0% 이상의 SAP 혼입은 과도한 감수제 사용으로 인한 시공성의 영향, 공극 증가에 의한 압축강도 감소 등의 영향을 받아 가장 낮은 상대 동 탄성계수를 나타낸 것으로 판단된다.

Table 7 Weight change ratio (Water curing, %)

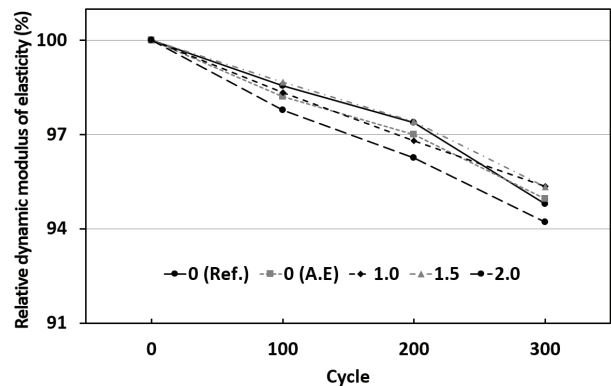
W/C (%)	SAP (C%)	Cycle			
		0	100	200	300
40	0 (Ref.)	100.0	99.8	99.7	99.6
	0 (A.E)	100.0	99.7	99.5	99.5
	1.0	100.0	99.7	99.6	99.5
	1.5	100.0	99.8	99.7	99.7
	2.0	100.0	99.6	99.5	99.4
50	0 (Ref.)	100.0	99.7	99.4	99.4
	0 (A.E)	100.0	99.7	99.4	99.3
	1.0	100.0	99.7	99.5	99.4
	1.5	100.0	99.7	99.5	99.4
	2.0	100.0	99.5	99.2	99.1

Table 8 Weight change ratio (Sealed curing, %)

W/C (%)	SAP (C%)	Cycle			
		0	100	200	300
40	0 (Ref.)	100.0	100.5	100.3	100.3
	0 (A.E)	100.0	100.4	100.3	100.3
	1.0	100.0	100.2	100.1	100.1
	1.5	100.0	100.3	100.2	100.1
	2.0	100.0	100.1	100.0	99.9
50	0 (Ref.)	100.0	100.7	100.5	100.4
	0 (A.E)	100.0	100.7	100.6	100.5
	1.0	100.0	100.8	100.7	100.6
	1.5	100.0	100.7	100.6	100.5
	2.0	100.0	100.3	100.2	100.1

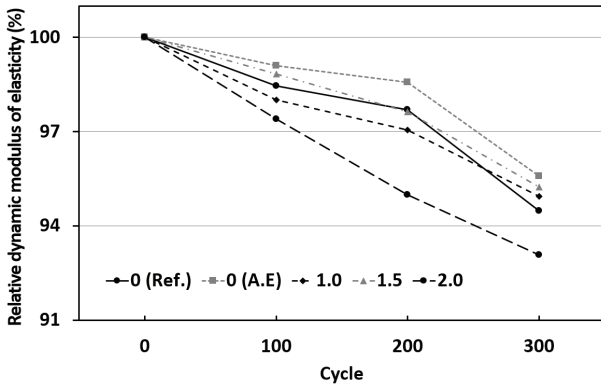


(a) Water curing

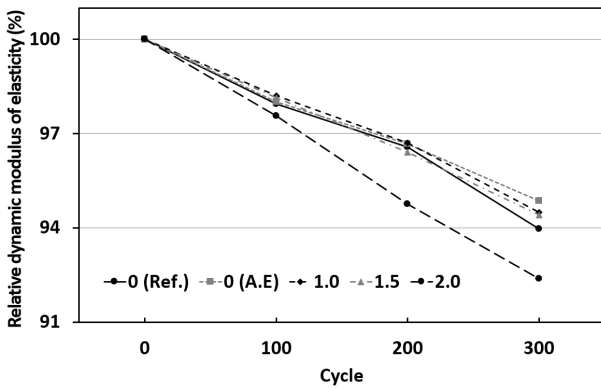


(b) Sealed curing

Fig. 7 Relative dynamic modulus of elasticity (W/C 40%)

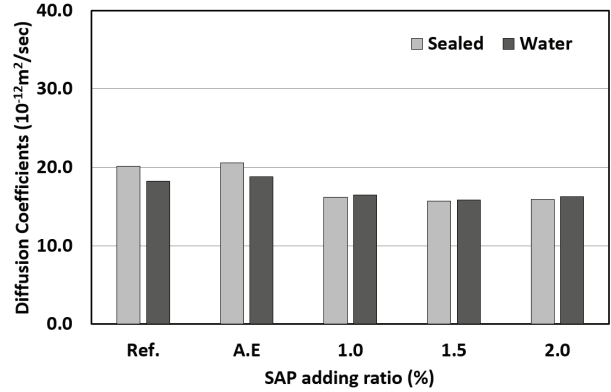


(a) Water curing

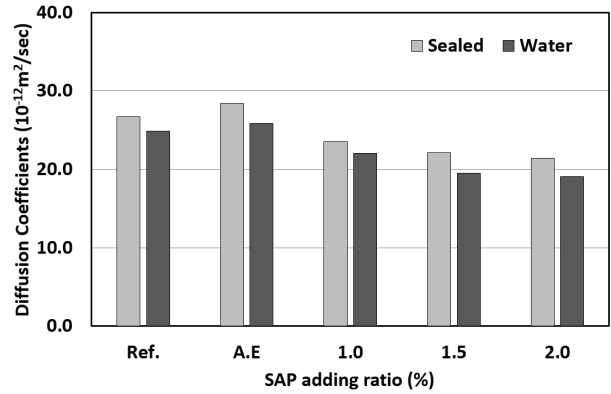


(b) Sealed curing

Fig. 8 Relative dynamic modulus of elasticity (W/C 50%)



(a) W/C 40% case



(b) W/C 50% case

Fig. 9 Results of diffusion coefficient

3.4 염화물 침투 저항성 시험

급속 염화물 침투 저항성 시험에 의해 산정된 염화물 확산 계수 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 염화물 확산 계수가 낮을수록 염화물 침투 저항성이 높다는 것을 의미한다. 먼저, 물-시멘트 비 40%의 경우(Fig. 9(a)) SAP이 혼입된 배합이 기준 배합(Ref.)보다 낮은 확산계수를 나타내었다. 또한, 봉함 양생이 수중 양생보다 낮은 확산계수를 나타내 SAP에 의한 내부 양생 효과가 크게 작용한 것으로 판단된다. SAP의 혼입은 내부 양생 효과로 콘크리트 내부 조직을 치밀화하고 수밀성을 개선시켜 염화물 침투 저항성을 증가시킨 것으로 판단된다. SAP 혼입으로 인한 내부 양생 효과는 압축강도 뿐만 아니라 염화물 침투 저항성에도 긍정적인 영향을 주는 것으로 판단된다.

물-시멘트 비 50%의 경우(Fig. 9(b)) SAP이 혼입된 배합이 기준 배합(Ref.)보다 낮은 확산계수를 나타내었다. SAP이 혼입된 배합은 SAP의 내부 양생 효과에 의해 염화물 침투 저항성이 개선된 것으로 판단된다. 물-시멘트 비 50%의 모든 배합은 수중 양생이 더 작은 확산계수를 나타내었다. SAP에 의한 내부 양생 효과는 크지 않아 물-시멘트 비 40%와 같은 봉함 양생에서의 염화물 침투 저항성 개선 효과는 나타나지 않았다.

4. 결론

감수제를 사용하여 시공성을 확보한 SAP 혼입 콘크리트를 제작하였으며, 이에 따른 콘크리트의 특성 평가의 결론은 다음과 같다.

1. SAP 혼입율이 증가할수록 시공성 확보를 위한 감수제 사용량은 증가하였으며, 시공성 확보가 가능한 SAP의 최대 혼입율은 1.5% 이하이다.
2. 수중 양생의 압축강도는 SAP 혼입율 1.5%가 가장 큰 압축강도를 나타냈다. 이는 유효 물-시멘트 비 감소에 의한 강도 증가가 SAP 공극 증가로 인한 강도 감소보다 지배적으로 작용하여 강도가 증가한 것으로 판단된다.
3. 봉함 양생의 압축강도는 SAP 혼입율 1.5%가 가장 큰 압축강도를 나타냈으며, 특히 1.5% 이상의 SAP 혼입은 수중 양생보다 큰 압축강도를 나타냈다. 이는 유효 물-시멘트 비 감소와 내부 양생 효과에 의해 압축강도가 증가한 것으로 판단된다.
4. 동결융해 저항성 측정 결과, SAP를 1.0~1.5% 혼입하면

AE제를 혼입한 경우와 유사하게 동결융해 저항성이 개선되었다. SAP이 콘크리트 내부에서 공극을 형성하고, 이 공극이 연행공기 역할을 하여 동결융해 저항성을 개선시킨 것으로 판단된다.

5. 염화물 침투 저항성 측정 결과, SAP이 혼입되면 기준 배합보다 확산계수가 감소하였다. SAP의 내부 양생 효과에 의해 내부 조직이 치밀화되어 염화물 침투 저항성이 개선되는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2018R1D1A1B07043400, NRF-2020R1A6A3A13076966)

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. and Laustsen, S. (2015). Superabsorbent polymers as a means of improving frost resistance of concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*, 4(1), 237-256.
3. 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.
4. Jensen, O.M. (2013). Use of Superabsorbent Polymer in Concrete - An overview of the possibilities offered by using these smart materials as concrete admixtures. *Concrete International*, 35, 48-52.
5. 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.
6. Jensen, O.M., and Hansen, P.F. (2002). Water-entrained cement-based materials-II. Experimental observations, *Cement and Concrete Research*, 32(6), 973-978.
7. 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.
8. 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.
9. 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)
10. 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)
11. 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)
12. Laustsen, S., Hasholt, M.T. and Jensen, O.M. (2013). Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete, *Materials and Structures*, 48(1-2), 357-368.
13. Lee, C.K., Kim, I.S., Choi, S.Y., and Yang, E.I. (2020). Evaluation of Fundamental Properties and Chloride Penetration Resistance of Concrete using Superabsorbent Polymers. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(2), 50-59. (in Korean)
14. 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, 117142.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Mechtcherine, V., Reinhardt, H.W. (2010). Application of superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction. *State of the Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*, 1-169.
20. Mönnig, S. and Lura, P. (2007). Superabsorbent Polymers-An additive to increase the freeze-thaw resistance of high strength concrete. *Advances in Construction Materials 2007*, 351-358.
21. 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.
22. Shen, D., Wang, M., Chen, Y., Wang, W., and Zhang, J. (2017). Prediction of internal relative humidity in concrete modified with superabsorbent polymers at early age. *Construction and Building Materials*, 149, 543-552.
23. 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.
24. 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)
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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, 105-789.

Received : 09/02/2020

Revised : 10/16/2020

Accepted : 10/16/2020

요 지 : 고 흡수성 폴리머(SAP)가 콘크리트에 혼입되면 슬럼프가 급격하게 감소하여 시공성이 저하되며, 수분 흡수 방출 과정으로 내부 양생 효과를 얻을 수 있고, 콘크리트의 내부 공극을 증가시킨다. 본 연구에서는 감수제를 사용하여 시공성을 확보한 SAP 혼입 콘크리트의 압축강도 및 동결융해 저항성, 염화물 침투 저항성을 평가하여 내부 양생과 공극의 영향을 평가하였다. 또한 콘크리트의 양생 조건을 수중 양생과 봉함 양생으로 구분하여 SAP의 내부 양생 효과를 평가하였다. 실험 결과, SAP 혼입율이 증가할수록 감수제 사용량은 증가하였으며, 압축강도는 SAP 혼입율 1.5%가 가장 큰 압축강도를 나타냈다. 특히, 봉함 양생의 경우 수중 양생보다 큰 압축강도를 나타냈으며, 유효 물-시멘트 비 감소와 내부 양생 효과에 의해 압축강도가 증가한 것으로 판단된다. SAP를 1.0~1.5% 혼입하면 AE제를 혼입한 경우와 유사하게 동결융해 저항성이 개선되었으며, SAP를 1.0% 이상 사용하면 염화물 침투 저항성이 개선되었다. 최적의 SAP 혼입율은 1.5%이며, 2.0% 이상의 혼입율은 압축강도 및 동결융해 저항성에 악영향을 준다.

핵심용어 : 염화물 침투 저항성, 압축강도, 양생 조건, 동결융해 저항성, 고 흡수성 폴리머
