

촉진 양생한 무기계 MiDF 콘크리트에서 실리카질 원료의 반응성에 관한 기초 연구

Fundamental Research on Reactivity of Silica Source in the Rapidly Cured Inorganic Micro-Defect-Free(MiDF) Concrete

최홍범¹ · 김진만^{2*}

Hong-Beom Choi¹ · Jin-Man Kim^{2*}

(Received May 31, 2019 / Revised June 28, 2019 / Accepted June 28, 2019)

In this paper, the reaction properties of silica source in the accelerated curing conditions using autoclave and the fundamental properties of inorganic Micro Defect Free(MiDF) concrete using silica source are studied. Studies show that Si ions elution rate from silica source in autoclave curing is higher in amorphous source. In tap water conditions, solids which is source after autoclaved curing show a higher mass reduction in amorphous materials, which is attributed to the higher elution rate of ion. In Ca(OH)₂ solution conditions, amorphous materials show higher mass increase, due to increase in C-S-H minerals. From experiment for influence on the properties of MiDF concrete by using nano silica materials, the specimen with silica fume shows an increase in compressive strength and a decrease in absorption depending on replacement rate up to 5.5%, while nano silica with amorphous phase and high-fineness shows a decrease in compressive strength and decrease in the water absorption. The specimen with nano silica increases the pore below 10,000nm, but reduces pore between 10,000 and 100,000nm. The above results show that the porosity and absorption rate of MiDF concrete can be reduced by using amorphous nano-size silica. However, to reduce the pore of 50 to 10,000nm, better dispersion of nano material in the cement matrix will be necessary. We will focus on the this item in the next research.

키워드 : MiDF 콘크리트, 나노 실리카, 실리카 폼, 공극

Keywords : Micro defect free concrete, Nano silica, Silica fume, Pore

1. 서론

경제성장에 따른 소비자의 욕구가 다양화됨에 따라 콘크리트 기술발전을 선도하였던 고강도콘크리트에도 강도뿐만 아니라 균열 저항성, 내구성, 폭발저항성 등의 다양한 기능을 요구하게 되었다. 이러한 다기능을 갖는 고강도 콘크리트는 구조물에만 한정되어 적용되는 것이 아니라 종래에는 사용되지 않았던 공예품, 가구, 인조 대리석 등의 다양한 용도로 적용되고 있다(Binici et al. 2005; Rodrigues et al. 2015; Chang et al. 2015).

이 중에서 인조대리석은 천연 대리석의 약한 내마모성 및 높은 단가를 개선하고, 다양한 무늬 구현이 가능한 유기계 결합재를 사

용하여 상용화 된 시장이었다(Ribeiro et al. 2017; Kim 2017). 그러나 유기계 결합재를 사용한 인조대리석은 내화성, 내화학적 및 내충격성이 좋지 않을 뿐만 아니라 가격이 높다는 단점을 가지고 있다. 이에 이러한 문제점을 개선할 목적으로 발전된 콘크리트 기술을 활용하고자 하는 연구가 진행되었다.

시멘트계 결합재를 사용한 무기계 인조대리석은 마감재로서 요구되는 표면특성 외에 압축강도에 있어서는 석재와 동등한 수준과 휨, 충격에서는 석재 보다 월등한 수준을 요구하기 때문에 결합이 최소화된 콘크리트가 필요하다. 콘크리트의 결합은 공극 형성과 매우 높은 상관성을 갖기 때문에 본 연구는 공극에 초점을 두었다.

* Corresponding author E-mail: jmkim@kongju.ac.kr

¹공주대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

²공주대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

콘크리트의 공극은 콘크리트 공학에서 활발하게 연구되고 있는 주제이다. 공극은 강도에 영향을 미칠 뿐만 아니라 물을 매개체로 내구성에 영향을 미치는 물질의 침입 통로로 활용되기도 한다. 또한 공극을 통한 오염 물질의 흡수는 쉽게 지워지지 않는 표면 얼룩을 남기게 된다. 그러므로 내구성과 표면특성을 개선하기 위해서는 콘크리트의 공극을 최소화하는 것은 매우 중요하다.

Birchall et al.(1981)은 콘크리트의 낮은 힘강도는 콘크리트가 가지는 공극 때문이며, 특히 100um 이상의 큰 기공을 제거한 MDF(Macro Defect Free) 시멘트는 높은 힘강도를 얻을 수 있다는 연구 결과를 보고하였다. 하지만 유기계 폴리머를 혼합한 MDF는 물과 접촉시의 급격한 강도 저하를 보이는 단점이 있으며 (Donatello et al. 2009; Drabik et al. 2001), 또한 내화학적 및 내열성에 취약한 특성을 보이게 된다. 그러므로 이러한 특성을 개선하기 위해서는 무기계 결합재를 기반으로 한 콘크리트의 연구가 필요할 것이다.

한편, 50nm 이상의 공극은 강도와 내구성에 악영향을 미치기 때문에 50nm-100um 사이의 공극을 줄이는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 100um 이상의 공극을 최소화한 MDF와 구분하기 위하여 50nm 이상의 공극이 최소화한 것을 MiDF(Micro Defect Free) 콘크리트로 명명하고 이를 위한 최적의 공학적 환경을 탐색하고자 하였다.

콘크리트의 공극을 감소하기 위한 방법으로 골재를 최밀입도로 만드는 것과 나노 사이즈의 분말을 혼합하여 공극을 채우고 반응성을 활성화 시키는 방법 등이 제안되고 있다(Rodrigues et al. 1998). 콘크리트에 활용되고 있는 나노 사이즈의 분말은 높은 실리카 함량을 가지는 재료가 대부분이다. 이러한 실리카 원료는 일반적인 상온 조건에서는 반응성 재료가 아닌 필러로서 활용되지만 고온 고압 조건에서는 반응재로서 활용할 수 있다. 다양한 실리카 원료는 산화물 함량 및 광물의 형태에 따라 반응성의 차이가 있을 것으로 판단되며, 최종적으로는 C-S-H 반응의 기여도가 중요하다. C-S-H계 광물은 시멘트의 Ca 및 Si 이온과 실리카 원료의 Si 이온 반응에 의해 만들어진 화합물이다. 이 때문에 특정 조건에서 이들 이온의 이온화 및 반응에 대한 연구는 매우 중요할 것이다 (Lothenbath and Nonat 2015).

본 연구는 우수한 구조적 성능과 마감 성능을 달성하기 위한 MiDF(Micro Defect Free) 콘크리트를 개발하기 위한 기초 연구이다. 공극이 최소화된 마이크로 조직을 만들기 위해 마이크로 및 나노 사이즈의 실리카 원료를 대상으로 고온·고압 조건에서의 반응 특성과 마이크로 조직을 분석·검토하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 사용 재료

실험에 사용된 재료는 결합재로는 'U'사의 백색 시멘트(이하 WC)이며, 분말도 3,400cm²/g이다. 실리카 원료는 저순도와 고순도의 실리카 파우더(이하 SP-L, SP-H), 결정질과 비결정질의 나노 실리카(이하 NA-C, NA-A) 그리고 실리카 폼(이하 SF)이 사용되었다. 재료의 화학 조성은 Table 1에 나타난 바와 같이 저순도 실리카 파우더가 SiO₂ 함량이 85.82%인 것을 제외하고, 모든 실리카 원료의 SiO₂ 함량이 97% 이상을 보였다. 재료의 분말도 및 평균 입경은 Table 2에 나타난 것과 같다.

Table 1. Chemical composition of materials

Type	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	etc.	Total
WC	74.78	15.25	1.75	3.12	3.95	0.25	0.13	0.77	100
SP-L	2.36	85.82	2.15	4.73	0.08	2.83	1.3	0.73	100
SP-H	0.11	97.56	0.14	0.11	1.52	0.05	0.32	0.19	100
NS-C	0.06	98.66	0.03	0.71	0.05	0.24	0.05	0.2	100
NS-A	0.01	99.72	-	0.01	0.01	0.02	-	0.23	100
SF	0.08	98.46	0.03	0.77	0.03	0.25	0.13	0.25	100

* WC : White Cement, SP-L : Low quality Silica Powder, SP-H : High quality Silica Powder, NS-C : Crystalline Nano Silica, NS-A : Amorphous Nano Silica, SF : Silica Fume

Table 2. Blaine of materials

	WC	SP-L	SP-H	NS-C	NS-A	SF
Blaine (cm ² /g)	3,400	3,000	6,000	800,000	2,000,000	200,000
Average size(nm)	7,500	12,000	8,500	80	10	150

2.2 실험 계획

본 연구에서는 실리카 원료의 고온 고압조건에서 반응특성에 대한 연구와 실리카원료를 사용한 콘크리트의 기초 특성에 대해 분석하고자 하였다. Table 3은 실리카 원료의 고온 고압조건에서의 반응 특성에 대한 실험 계획이며, 오토클레이브는 온도 180℃, 압력 10 atm에서 진행하였다. 오토클레이브 양생 시간은 10시간과 20시간으로 하였으며, 사용 용액은 상수(tap water)와 1몰의 Ca(OH)₂를 포함한 용액이다. 용액과 분말은 5:1 질량 비율로 혼합하였으며, 오토클레이브 양생의 온도 구배는 Fig. 1과 같다.

Table 4는 실리카 원료를 사용한 MiDF 콘크리트의 실험 계획이다. 백색 시멘트와 고순도 실리카 파우더를 혼합한 배합을 기준

Table 3. Experimental plan for silica source reaction in autoclave condition

Materials	Condition		Solution	Test items
	Temperature (°C)	Time (hour)		
WC SP-L SP-H NS-C NS-A SF	180	10	- Tap water - Ca(OH) ₂ -1mol	- Ion measurement - Weight change - Mineral analysis
		20		

- Solution : powder = 5 : 1

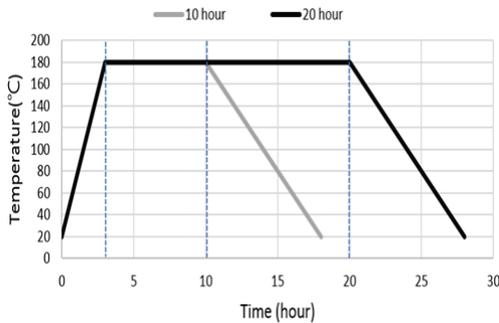


Fig. 1. Operation condition of autoclave

Table 4. Experimental plan for MiDF concrete

Materials	Replacement ratio(%)	Test items
SF	0, 1.5, 5.5%	- Compressive strength - Water absorption - Poro properties
NS-C	0(SF5.5%), 1, 3%	
NS-A	0(SF5.5%), 1, 3%	

Table 5. Mix design for MiDF concrete

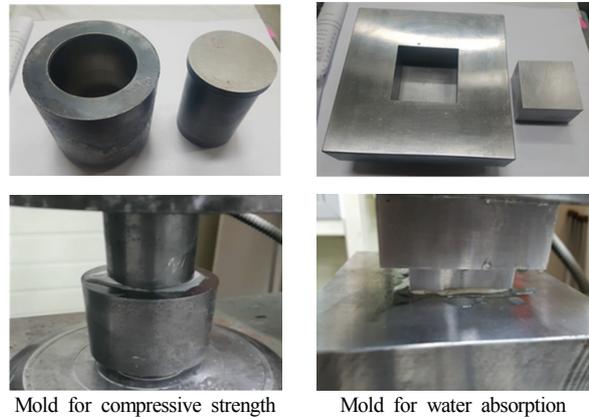
ID	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)								
		Water	Binder					aggregate		Total
			WC	SF	QP	NS-C	NS-S	Q2	Q3	
SF0	18.9	273	869	-	578	-	-	462	116	2,298
SF1.5		272	845	22	576	-	-	461	115	2,292
SF5.5		271	841	79	518	-	-	459	115	2,283
SF5.5+NS-C1		271	834	78	513	14	-	455	114	2,279
SF5.5+NS-C3		272	819	76	504	42	-	447	112	2,271
SF5.5+NS-A1		271	834	78	513	-	14	455	114	2,279
SF5.5+NS-A3		272	819	76	504	-	42	447	112	2,271

배합으로 설정하였고, 결정질, 비결정질 나노 실리카와 실리카 폼을 대체하여 실험을 진행하였다. 실험 배합은 Table 5와 같이 실리카 폼의 대체율은 0, 1.5, 5.5%로 CaO/SiO₂ 몰비를 고려하여 결정하였으며, 이 중 실리카 폼 5.5%를 대체한 배합을 기준으로 각각의 나노 실리카 1%와 3%를 첨가하여 실험하였다.

2.3 실험 방법

고온 고압조건에서의 오토클레이브 양생에서 실리카 원료의 반응 특성에 대한 연구는 양생 후에 각 재료의 고품물을 포함한 슬러리를 필터에 의해 분리하여 진행하였다. 이 중 용액에 대해서 이온 분석을 하였고, 고품물은 100±5°C에서 24시간 동안 항량이 될 때까지 건조한 후 질량 변화와 광물 분석을 하였다. 이온 분석은 유도 결합 플라즈마 분광분석기(ICP-OES/AES)에 의해 진행되었으며, 광물 분석은 XRD(X-ray Diffractometer)에 의해 진행하였다.

MiDF 콘크리트의 제조는 계량된 시료를 모르타르 믹서를 이용하여 5분 동안 믹싱을 한 후, Fig. 2에 나타난 압축강도 측정용 몰드(지름 50mm)와 흡수율 측정용 몰드(40 X 40mm)에 타설하여 만능 재료시험기에 의해 가압하였다. 이때의 가압력은 100MPa, 가압시간은 5분이며, 가압 중 가압용 몰드 사이로 탈수된 수분을 제거한 후 가압력을 제거하여 제조하였다. 이와 같이 제조된 공시체에 대해 압축강도는 KS F 2405에 의거하여 실험을 진행하였고, 흡수율은 시험체를 100±5°C에서 항량이 될 때까지 건조한 시험체와 다시 48시간 물에 침지한 시험체의 질량을 측정하여 계산하였다. 공극 특성은 MIP(Mercury intrusion porosimetry)에 의해 측정하였다.



Mold for compressive strength

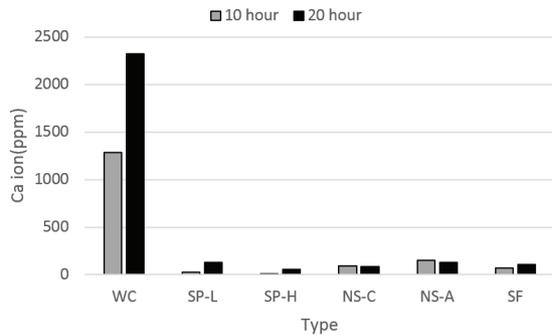
Mold for water absorption

Fig. 2. Mold for manufacture

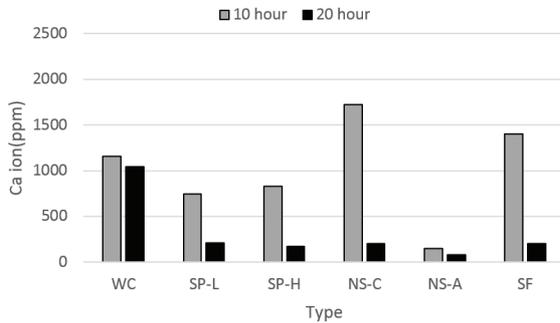
3. 고온·고압 조건에서의 실리카 원료 반응 특성

3.1 이온 용해 특성

이온용해 특성의 경우 고온·고압조건하에서 재료 자체의 반응 및 다른 재료와의 반응 특성을 확인하기 위해 실험항목으로 선정하였으며, 이에 상수 조건과 시멘트의 주요 생성물인 Ca(OH)₂ 조건에서의 특성에 대해 비교 검토하였다. 오토클레이브 양생조건에서



(a) Ca ion[tap water solution]

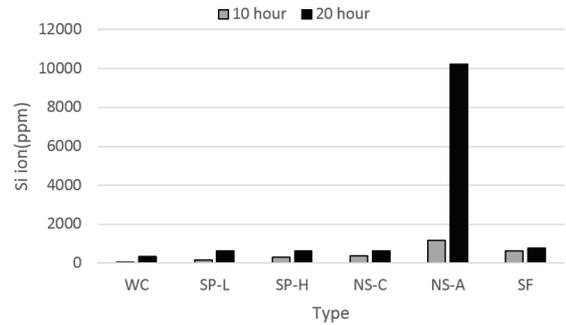


(b) Ca ion[Ca(OH)₂ solution]

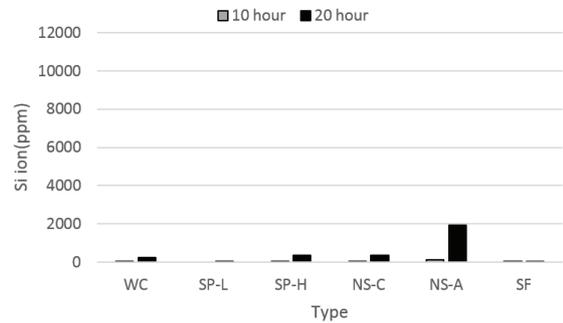
Fig. 3. Ca ion depending on curing time and solution

실리카 원료부터 용해된 Ca 이온 함량을 Fig. 3에 나타내었으며, Si 이온 함량을 Fig. 4에 나타내었다. 먼저 상수 조건에서의 Ca 이온 함량을 나타낸 Fig. 3(a)를 보면, 높은 CaO 함량을 가진 WC를 제외하고 모두 낮은 Ca 이온 함량을 나타내었다. 이때 WC의 Ca 이온 함량은 양생시간이 20시간으로 증가하였을 때 큰 증가를 보였다. Fig. 3(b)에 나타낸 Ca(OH)₂를 첨가한 용액의 경우 WC는 상수 조건보다 더 낮은 Ca 이온 함량을 보였으며, 양생시간이 20시간으로 증가함에 따라 더 낮게 나타났다. 이는 높은 pH를 가지는 Ca(OH)₂를 포함한 용액이 WC의 수화를 저해하였거나 C-S-H 광물로 전환되었기 때문으로 판단된다. 실리카 원료의 경우 10시간 양생에서 NS-A를 제외하고는 높은 Ca 이온 함량을 보였지만, 20시간 양생에서는 Ca 이온 함량이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실리카 원료가 Ca 이온과 반응하여 C-S-H를 생성하였기 때문으로 판단되며, 그중 NS-A의 고분말도 및 비정질을 갖는 Si 이온이 Ca 이온과의 반응성에 크게 기여하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 4(a)에 나타낸 상수 조건에서의 Si 이온 함량은 양생시간이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 그중 NS-A가 2시간 양생에서 10,000ppm 이상으로 가장 높은 Si 이온함량을 보였다. 이는 NS-A가 작은 입자크기와 비정질로 고온고압 조건에서 높은 용해도를 보였을 것이라 판단되며, 비정질의 특성을 보이는 SF가



(a) Si ion[tap water solution]



(b) Si ion[Ca(OH)₂ solution]

Fig. 4. Si ion depending on curing time and solution

NS-A 다음으로 타 실리카 원료에 비해 상대적으로 높은 Si 이온 함량을 보였다. Fig. 4(b)에 나타낸 Ca(OH)₂를 포함한 용액 조건에서 양생 시간이 경과함에 따라 Si 이온 함량이 다소 증가하는 경향을 보였으며, NS-A와 SF의 경우 상수 조건에 비해 Si 이온 함량이 낮게 나타났다. 하지만, 결정질 재료에서의 Si 이온 함량은 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 높은 반응성을 보이는 비결정질 재료의 경우 Ca(OH)₂로부터 용해된 Ca 이온과 반응하여 Si 이온이 소비되었지만, 결정질 재료는 비교적 용해된 Si 이온의 함량과 반응성이 낮기 때문에 Si 이온의 변화가 크지 않은 것으로 판단된다.

3.2 질량 변화

오토클레이브 양생 조건에서 양생에 따른 실리카 원료의 질량 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 Fig. 5(a)에 나타낸 상수 조건에서의 질량변화는 WC가 10시간과 20시간 모두에서 10% 이상의 질량 증가를 보였으며, 모든 실리카 원료는 다소 질량 감소를 보였다. 이는 WC의 경우 수경성 재료이기 때문에 물과 반응하여 다량의 수화물을 생성했기 때문에 질량이 증가한 것으로 판단되며, 실리카 원료의 경우 자체 수경성을 가지지 않고 일부의 이온이 용해되어 질량이 감소한 것으로 판단된다. 실리카 원료의 질량 감소는 SP-L, SP-H와 NS-C와 같은 결정질 재료에서는 크지 않았지만, 비정질

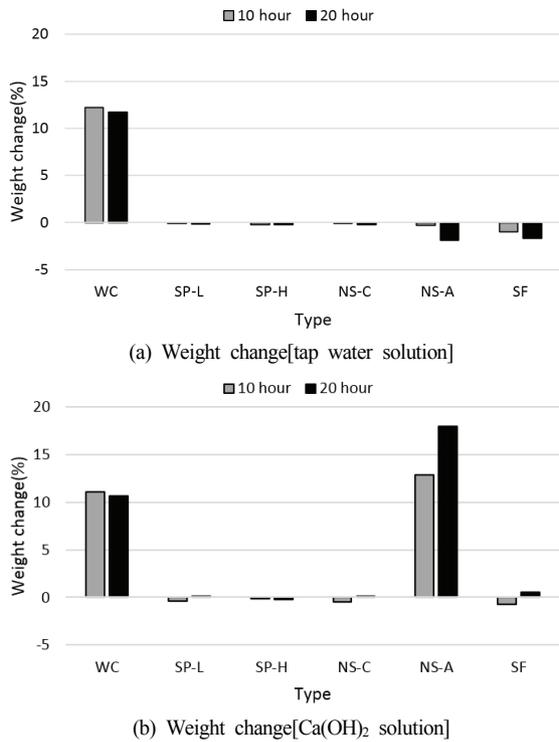


Fig. 5. Weight change depending on curing time and solution

재료인 NS-A와 SF에서는 상대적으로 큰 질량 감소를 보여, Fig 4의 Si 이온용출량과 동일한 패턴을 보인다.

Fig. 5(b)에 나타낸 Ca(OH)₂ 조건에서 WC는 상수 조건에 비해 다소 낮은 질량 증가를 보였으며, 이는 높은 pH 조건에서 반응성이 저하되었기 때문으로 판단된다. 실리카 원료는 결정질 재료가 1% 미만의 질량 변화로 그 차이가 크지 않았지만, 비결정질의 NS-A가 10% 이상의 높은 질량 변화를 보였다. 질량의 증가는 10시간보다 20시간 양생에서 증가하였으며, 이는 NS-A가 Ca(OH)₂와의 반응성이 높기 때문으로 판단된다.

3.3 광물 분석

상수 조건과 Ca(OH)₂를 포함한 용액 조건에서 오토클레이브 양생을 20시간 하였고, 이때의 건조 시료에 대한 광물 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 상수 조건의 광물 분석 결과로 실리카 원료에서의 변화는 나타나지 않았으며, WC에서만 Ca(OH)₂가 생성되었다. Fig. 6(b)는 Ca(OH)₂ 조건에서의 광물 분석 결과로 WC의 경우 Ca(OH)₂ 피크가 상수 조건에서보다 낮게 나타났으며, 이는 C-S-H로의 전환 또는 높은 pH에 의한 수화 반응성이 저하되었기 때문으로 판단된다. 실리카 원료 중 결정질 재료의 경우 SiO₂

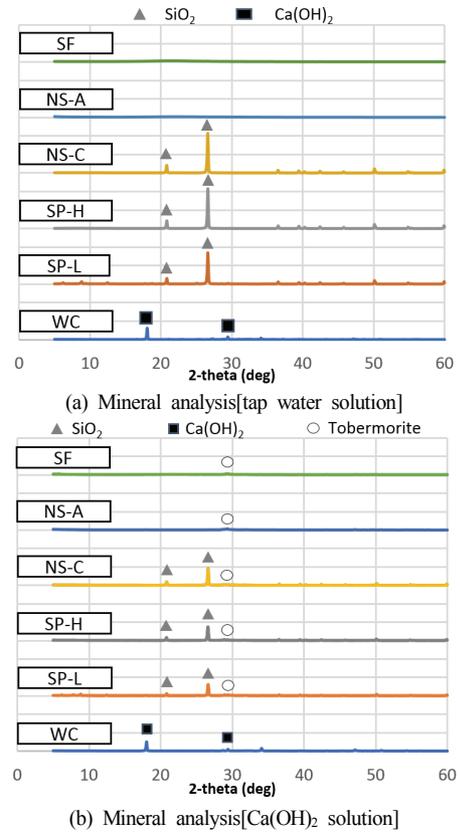


Fig. 6. Mineral analysis depending on solution

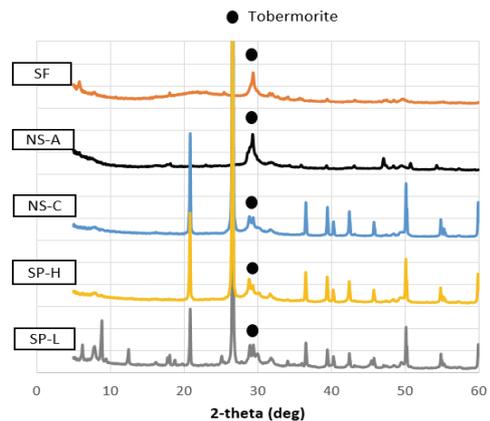


Fig. 7. Mineral analysis of silica source in Ca(OH)₂ solution

피크가 상수 조건보다 낮아졌으며, 토버모라이트(Tobermorite)의 피크가 생성되었다. 이러한 토버모라이트 피크는 비결정질 재료에서도 나타나고 있으며, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 결정질 원료에 비해 상대적으로 높은 피크를 보였다. 이는 비결정질 재료가 더 높은 반응성을 보이기 때문으로 판단된다.

4. MiDF 콘크리트의 기초 특성

4.1 압축강도 및 흡수율

Fig. 8은 나노 사이즈의 실리카 원료를 사용한 촉진 양생 MiDF 콘크리트의 압축강도 및 흡수율을 나타낸 그래프이다. SF는 대체율 5.5%까지는 압축강도가 증가하였지만, 나노 실리카를 추가한 배합은 압축강도의 증진을 보이지 못했다. 특히 NS-A 사용 시험체의 경우 첨가량이 증가할수록 큰 강도 저하를 보였다. 이는 NS-A가 반응성이 높다하더라도, Si 소스로서 SP 및 SF이 함께 사용될 경우에는 적정 사용량이 존재하며, 공극 충전을 위한 양으로서도 최적 사용량이 3% 미만의 사용조건에서 적합하다 판단된다. 또한 고분말도 재료로서 분산성에 대한 문제도 향후 고려되어야 할 것이다.

흡수율의 경우 SF 사용 시험체는 강도 증가와 함께 흡수율이 저하하는 것으로 나타났지만, NS-C 사용 시험체는 압축강도가 저하 하였음에도 0.4% 수준으로 큰 흡수율 변화를 보이지 않았다. 하지만 NS-A 사용 시험체의 압축강도는 큰 저하를 보였지만, NS-A 3% 대체 시험체는 흡수율 0.34%로 가장 낮게 나타났다. 이는 NS-A의 경우 입자 크기가 작고 높은 반응성을 보이는 재료이며, 이 때문에 낮은 분산성에도 흡수율에 기여할 수 있는 큰 공극의 제거에 영향을 미친 것으로 판단된다.

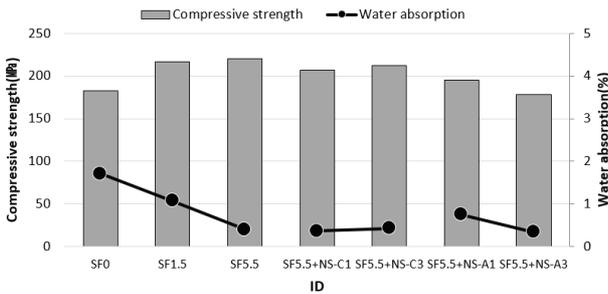


Fig. 8. Compressive strength and water absorption of MiDF concrete

4.2 공극 특성

실리카 품 및 나노 실리카를 사용한 촉진 양생 MiDF 콘크리트의 공극 분포를 Fig. 9에 나타내었으며, 누적 공극 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 공극 특성은 각 재료를 사용한 배합 중 흡수율이 낮은 SF5.5, SF5.5+NS-C3과 SF5.5+NS-A3만을 대상으로 하였다. 먼저 공극 분포의 경우 미세하지만 NS-A를 사용한 SF5.5+NS-A3 시험체가 10,000nm 이하에서 높게 나타났으며, 10,000nm 이상에서는 SF5.5 시험체가 높게 나타났다. 이러한 경향은 누적분포 그래

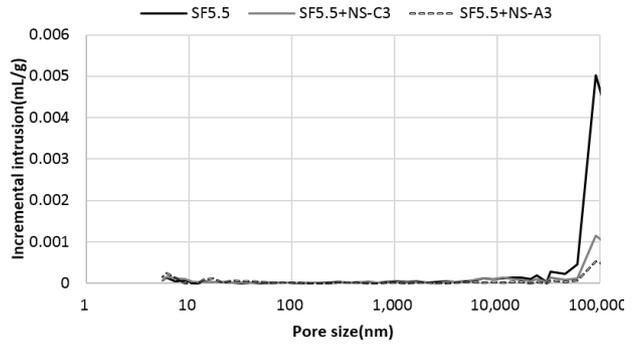


Fig. 9. Incremental intrusion pore distribution of MiDF concrete

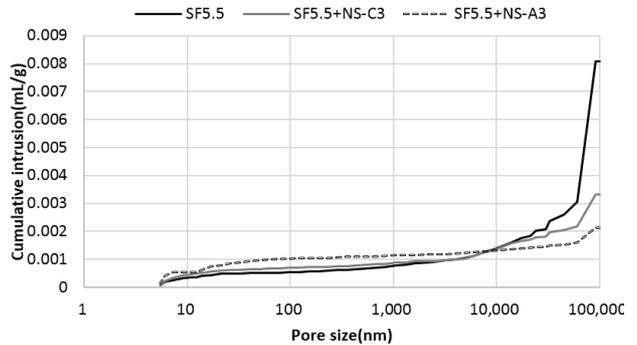


Fig. 10. Cumulative intrusion of MiDF concrete

프인 Fig. 10에서 뚜렷하게 나타나고 있으며, SF5.5+NS-A3 시험체 공극은 대부분 100nm 이하에 집중된 것으로 나타났다. SF5.5+NS-A3 시험체의 공극은 비교시험체 대비 100nm 이상에서 공극량의 증가가 크지 않았다. 이는 고분말도의 분말이 증가하면서 비교적 큰 공극은 없어지지만, 분산이 잘되지 않아 작은 공극은 오히려 증가하는 결과를 초래한 것으로 사료된다. 이후 나노 재료의 분산성 개선을 위한 연구가 지속될 필요성이 있다.

5. 결론

본 연구에서는 촉진 양생 조건에서 반응재로 활용될 수 있는 나노 사이즈의 실리카 원료의 특성 변화와 이를 사용한 MiDF 콘크리트의 기초 특성에 대해서 검토하였다. 본 연구의 범위 내에서 재료적 특성과 경화 콘크리트를 대상으로 한 실험적 검토를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실리카 원료의 상수 조건에서의 오토클레이브 양생하였을 때 Si 이온이 일부 용해되었으며, Si 이온은 실리카 원료의 순도보다는 비결정질 원료에서 더 높게 나타났다. 오토클레이브

양생 전 후의 질량 차이도 비결정질 원료에서 더 많은 질량 감소를 보였다.

- 2) 오토클레이브 양생 후 나타나는 고품물 내의 광물은 상수 조건에서는 큰 변화를 보이지 않았지만, Ca(OH)₂ 조건에서는 뚜렷한 SiO₂ 광물의 저하와 C-S-H 광물의 피크가 나타났다. C-S-H 광물의 피크는 비결정질 원료에서 더 뚜렷하게 나타났다.
- 3) 실리카 폼을 대체한 시험체의 경우 대체율 5.5%까지 압축강도의 증가와 흡수율의 저하를 보였지만, 고분말도의 나노 실리카를 사용한 시험체는 큰 압축강도 저하를 보였지만 3% 첨가시 흡수율은 오히려 저하하였다.
- 4) 나노 실리카를 첨가한 시험체에서 0~100nm 범위의 공극은 실리카 폼을 사용한 시험체 보다 많지만, 10~100um의 공극은 더 적게 나타났다.
- 5) 나노 사이즈의 실리카 원료는 고온 고압의 양생 조건에서 강도 증가 및 흡수율 저하에 기여할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 분말도가 높아 분산성이 저하하였기 때문에 공학적 특성치는 시험체 마다 상대적으로 큰 편차를 보이고 있다. 그러므로 추후 나노 재료의 분산성 개선에 관한 연구가 지속될 필요가 있는 것으로 판단된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제번호 20182010202100)을 받아 수행한 연구의 결과물입니다.

References

Binici, H., Aksogan, O., Shah, T. (2005). Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material, *Construction and Building Materials*, **19(4)**, 313–318.

Rodrigues, R., De Brito, J., Sardinha, M. (2015). Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge, *Construction and Building Materials*, **77**, 349–356.

Chang, Y.H., Huang, P.H., Wu, B.Y., Chang, S.W. (2015). A study on the color change benefits of sustainable green building materials, *Construction and Building Materials*, **83**, 1–6.

Ribeiro, C.E.G., Rodriguez, R.J.S., de Carvalho, E.A. (2017). Microstructure and mechanical properties of artificial marble, *Construction and Building Materials*, **149**, 149–155.

Kim, M.H. (2017). Preparation and Characterization of Chopped Carbon Fibers Reinforced Artificial Marble Composites for Heating Panel, Master's Thesis, Jeonju University, Korea.

Birchall, J.D., Howard, A.J., Kendall, K. (1981). Flexural strength and porosity of cements, *Nature*, **289(5796)**, 388.

Donatello, S., Tyrer, M., Cheeseman, C.R. (2009). Recent developments in macro-defect-free (MDF) cements, *Construction and Building Materials*, **23(5)**, 1761–1767.

Drabik, M., Mojumdar, S.C., Slade, R. (2002). Prospects of novel macro-defect-free cements for the new millennium, *Ceramics-Silikaty*, **46(2)**, 68–73.

Rodrigues, F.A., Joekes, I. (1998). Macro-defect free cements: a new approach, *Cement and concrete research*, **28(6)**, 877–885.

Lothenbach, B., Nonat, A. (2015). Calcium silicate hydrates: solid and liquid phase composition, *Cement and Concrete Research*, **78**, 57–70.

촉진 양생한 무기계 MiDF 콘크리트에서 실리카질 원료의 반응성에 관한 기초 연구

본 연구에서는 오토클레이브를 활용한 촉진양생 조건에서 실리카 원료의 반응 특성 및 이를 활용한 무기계 MiDF 콘크리트의 기초 특성을 검토하였다. 다양한 나노 물질의 반응성을 알아보기 위한 용출 특성 실험에서 오토클레이브 양생 시 Si 이온의 용출은 비결정질의 원료에서 더 높게 나타났다. 상수 분위기에서 오토클레이브 양생된 고형물은 비결정질 원료일수록 높은 질량 감소를 보였는데, 이는 이온의 용출량이 높기 때문으로 사료된다. Ca(OH)₂ 수용액 조건에서는 비결정질 원료가 많은 질량 증가를 보였는데, 이는 C-S-H의 생성에 기인한 것이다. 나노 실리카 재료가 MiDF의 특성에 미치는 실험에서 실리카 품은 대체율 5.5%까지 MiDF의 압축강도 증가와 흡수율 감소에 기여하였고, 비결정질의 고분말도 나노 실리카는 대체율이 증가함에 따라 압축강도는 저하하였지만 흡수율 감소에 기여하였다. 또한 나노 실리카를 첨가한 시험체는 기대와 달리 10,000nm 이하의 공극은 증가하였지만, 10,000~100,000nm 범위의 공극은 감소하는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 통해 비결정질의 나노 사이즈 실리카를 활용하여 MiDF 콘크리트의 공극 및 흡수율을 저감이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 목표로 하였던 50~10,000nm 사이의 공극을 줄이기 위해서는 시멘트 매트릭스에 나노 재료를 더욱 잘 분산시키는 것이 필요할 것이며, 이에 관한 연구가 지속될 필요가 있다.