

마그네시아 인산염 복합체의 강도 및 pH에 대한 인산염 종류의 영향

Effect of Phosphate Types on the Strength and pH of Magnesia-Phosphate Composites

이 경 호¹

양 근 혁^{2*}

Lee, Kyung-Ho¹

Yang, Keun-Hyeok^{2*}

Department of Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, 443-760, Korea¹

Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, 443-760, Korea²

Abstract

As an elementary investigation to develop vegetation concrete with a relatively low pH value, magnesia-phosphate composites (MPC) were examined according to the phosphate types including *Monoammonium*, *Monosodium*, *Monopotassium*, *Monocalcium*, *Diammonium*, *Disodium*, *Dipotassium*, and *Dicalcium phosphates*. All of the MPC binders, the ratio of magnesia to phosphate was fixed to be 7:3. MPC mortars activated with *Disodium*, *Dipotassium*, and *Dicalcium phosphates* showed no compressive strength gain, even at age of 28 days. Meanwhile, MPC mortars with *Monoammonium* and *Monosodium phosphates* developed 28-day compressive strength of more than 34MPa, and showed a relatively low pH value below 9.8. Hence, *Monoammonium* and *Monosodium phosphates* have potentials as an activator for producing MPC-based vegetation concrete.

Keywords : magnesia-phosphate composite, pH, compressive strength, vegetation concrete, MgO

1. 서 론

최근에는 미생물을 활용한 콘크리트 균열의 자기치유 연구 및 식생 콘크리트에 대한 기술이 차세대 건설유망 산업으로 관심을 받고 있다[1,2]. 콘크리트는 주 결합재로 시멘트를 사용하며, 시멘트의 주요 수화생성물인 수산화칼슘으로 인해 pH가 약 12~13 정도의 높은 알칼리성을 갖는다. 미생물 및 식물의 생장에 적합한 pH 범위는 약 5~9[3]이기 때문에 시멘트 콘크리트에서는 미생물 및 식물의 생장이 다소 어렵다. 따라서 콘크리트에 미생물 및 식물의 적용을 위해서는 콘크리트의 높은 pH를 저감시킬 필요가 있다.

미생물을 활용한 콘크리트 보수 및 식생 콘크리트를 위해

서 초기 높은 강도발현과 최대 pH 9수준의 낮은 알칼리성 콘크리트 개발을 위해서는 수산화칼슘을 수화생성물로 갖는 시멘트의 사용으로는 한계가 있다[4]. 이에 Iyengar[5]은 콘크리트의 생물학적 분해를 위해 신화마그네슘과 인산칼륨을 사용한 마그네시아-인산염 복합체(magnesium phosphate composite, MPC)를 제시하였으며, pH 6~9.5 수준의 미생물 생존이 가능한 환경을 조성하였다. 또한 Kang et al.[6] 및 Kang and Kim[7]은 인산염으로 인산암모늄 및 인산칼륨을 사용한 MPC 복합체의 압축강도 발현 특성에 대해 조사하였다. 마그네시아-인산염 복합체의 경우 인산염의 종류에 따라 서로 상이한 압축강도 발현 및 pH 특성을 나타내므로 인산염 종류 및 양이 마그네시아-인산염 복합체의 물리·역학적 및 화학적 특성에 미치는 영향은 중요하다. 하지만, 인산염의 종류에 대한 마그네시아-인산염 복합체의 물리·역학적 특성이나, 중성수준의 pH 특성을 활용하여 미생물 및 식생 콘크리트로서의 적용을 위한 연구는 상당히 미흡하다.

MPC는 중성 수준의 pH 특성으로 미생물을 활용한 콘크리트 보수재료 및 식생 콘크리트로서 활용성이 높은 재료이

Received : September 6, 2016

Revision received : September 29, 2016

Accepted : February 10, 2017

* Corresponding author : Yang, Keun-Hyeok

[Tel: 82-31-249-9703, E-mail: yangkh@kgu.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

다. 본 연구에서는 식생 및 미생물 성장환경 조성을 위해 낮은 pH 수준의 결합재 개발을 위해 인산염 종류에 따른 MPC의 기초 특성을 평가하였다. 총 8종의 서로 다른 인산염을 사용한 MPC를 제조하였으며, 초기 플로우, 재령별 압축강도 발현 및 pH 변화 특성을 평가하였다. 인산염 종류에 따른 MPC의 반응생성물은 X-ray 회절분석을 이용해 분석하였다.

2. 실험

2.1 마그네시아-인산염 복합체(MPC)의 반응

MPC는 산-염기 반응을 통해 경화하는 특성을 갖는다. 인산염은 물과 반응하여 인산이온(PO_4^{3-})으로 용해되며, 수용액의 pH를 낮춘다. 낮은 pH에서 MgO는 마그네슘 이온(Mg^{2+})로 용해되며, 인산염과 반응하여 MPC를 형성하게 된다. MgO와 인산염 사용한 MPC의 일반적인 화학적 반응식은 다음과 같다[8].



MgO-인산염의 반응을 통해 생성되는 광물은 인산염의 종류에 따라 스트루바이트(struvite)계 광물질을 생성하게 된다.

2.2 배합상세 및 양생

본 연구에서는 인산염의 종류에 따른 MPC의 경화특성, pH 및 반응생성물을 평가하기 위해 암모늄계, 나트륨계, 칼륨계 및 칼슘계 인산염을 사용하여 총 8배합의 모르타르 및 페이스트 시험체를 제작하였다. 모르타르 배합 및 페이스트 배합의 배합상세를 Table 1에 나타내었다. 압축강도는 $50 \times 50 \times 50$ mm 몰드를 이용하여 측정하였다. pH 및 반응생성물 평가를 위한 페이스트 시험체는 5mm 두께의 판형으로 제작하였다. MPC의 압축강도는 MgO와 인산염의 비율에 따라 다르게 나타난다. 따라서 모르타르 및 페이스트 배합 시 MgO-인산염 비는 압축강도를 고려하여 일반적으로 많이 사용되는 7:3의 비율로 설정 하였다. 인산염 종류에 대한 모르타르 및 페이스트의 역학적·화학적 특성평가를 위해 모든 배합에서 물-결합재비(W/B)는 30%로 고정하였으며, 모르타르의 경우 모래-결합재비(S/B)는 2:1로 고정하였다. 또한 MgO-인산염의 빠른 응결특성을 다소 지연시

키기 위해 모든 배합에서 붕산을 결합재 대비 4% 사용하였다. 제작된 모르타르 시험체는 재령 28일 까지 온도 $20 \pm 1^\circ C$ 및 상대습도 $60 \pm 5\%$ 의 항온·항습환경에서 양생을 실시하였다. 페이스트의 경우 건조수축에 의한 균열을 최소화하기 위하여 밀봉양생을 하였다.

Table 1. Detail of mixture

Specimens	Type of phosphate	Unit weight (kg/m^3)			H_3BO_3 (kg/m^3)	
		water	MgO	Phosphate		
1NH	$NH_4H_2PO_4$	208.9	487.5	208.9	1392.9	27.9
1Na	NaH_2PO_4	214.8	501.3	214.8	1432.3	28.6
1K	KH_2PO_4	214.7	500.9	214.7	1431.2	28.6
1Ca	CaH_2PO_4	213.6	498.4	213.6	1424.1	28.5
2NH	$(NH_4)_2HPO_4$	206.3	481.3	206.3	1375.1	27.5
2Na	Na_2HPO_4	207.5	484.2	207.5	1383.4	27.7
2K	K_2HPO_4	215.5	502.8	215.5	1436.6	28.7
2Ca	Ca_2HPO_4	218.7	510.3	218.7	1458.1	29.2

2.3 재료

MPC의 주 원료로 사용된 마그네시아(magnesia, MgO)는 $1,500^\circ C$ 이상 소성시킨 순도 98% 이상의 사소마그네시아(dead burned magnesia)로 비표면적은 $2,600 cm^2/g$ 이며 밀도는 $3.50 g/cm^3$ 이다. 일반적으로 인산염은 오소인산염(H_3PO_4)에서 수소원소가 양이온으로 치환된 원자 수에 따라 1차 인산염($M_1H_2PO_4$), 2차 인산염($M_2H_1PO_4$) 및 3차 인산염(M_3PO_4)으로 분류된다. 이중 본 연구에서 MgO와 산-염기반응을 위해 사용된 인산염은 암모늄, 나트륨, 칼륨 및 칼슘 이온이 치환된 인산염으로 1차 인산염계열과 2차 인산염계열의 총 8종류를 사용하였으며, 주요 특징을 Table 2에 나타내었다. 사용된 모든 인산염의 순도는 98% 이상이다. 모르타르 실험에 사용된 잔골재는 KS L ISO 679에서 요구하는 ISO 기준 모래를 사용하였다.

Table 2. Characteristic of various phosphates

Type of phosphate	Chemical formula	pH	Density (g/cm^3)
<i>Monoammonium phosphate</i>	$NH_4H_2PO_4$	4.35	1.80
<i>Monosodium phosphate</i>	NaH_2PO_4	3.94	2.36
<i>Monopotassium phosphate</i>	KH_2PO_4	4.96	2.34
<i>Monocalcium phosphate</i>	$Ca(H_2PO_4)_2$	2.74	2.22
<i>Diammonium phosphate</i>	$(NH_4)_2HPO_4$	8.43	1.62
<i>Disodium phosphate</i>	Na_2HPO_4	9.45	1.70
<i>Dipotassium phosphate</i>	K_2HPO_4	9.79	2.44
<i>Dicalcium phosphate</i>	$CaHPO_4$	5.26	2.93

2.4 측정상세

MPC 모르타르의 초기 유동성 측정을 위해 KS L 5111의 플로 테이블 및 플로우 틀을 사용하여 KS L 5105에 따라 플로우를 측정하였다. MPC의 압축강도를 측정하기 위해 500 kN 용량의 UTM(universal testing machine)을 사용하여 KS F 5105에 따라 측정하였다. MPC는 일반적으로 재령 초기에 압축강도 발현이 빠르다. 따라서 MPC 모르타르의 압축강도 발현은 재령 3시간, 12시간, 1일, 3일, 7일 및 28일에서 측정하였다. MPC의 pH는 유리전극 방식 pH meter를 사용하여 측정하였다. 시간경과에 따른 MPC의 pH 변화는 재령 0.5일, 1일, 3일, 7일 및 28일에서 평가하였다. pH 측정을 위해 채취한 시료는 가루로 분쇄한 후 증류수에 용해시켜 KS M 0011에 따라 pH를 측정하였다. 마그네시아-인산염 복합체의 최종 반응생성물을 평가하기 위해 EMPYREAN을 사용하여 재령 28일 시료의 X-ray diffraction(XRD) 패턴 분석을 실시하였다.

3. 실험 결과

3.1 플로우

MPC 모르타르의 플로우 측정결과를 Figure 1에 나타내었다. 인산염으로 1차 인산염계열을 사용한 경우 제 1 인산암모늄 및 제 1 인산나트륨을 사용한 MPC 모르타르의 플로우수는 250mm로 나타났다. 반죽상태는 다소 묽은 형태인 반면, 재료분리는 나타나지 않았다. 제 1 인산칼륨 및 제 1 인산칼슘을 사용한 MPC 모르타르는 각각 135mm 및 120mm의 낮은 플로우를 나타냈다. 제 2 인산암모늄 및 제 2 인산칼륨을 사용한 MPC 모르타르는 250mm 이상의 플로우를 나타내었다. 이들 모르타르들은 상당한 부배합에 해당하는 반죽질기를 보였지만, 재료분리는 나타나지 않았다.

제 2 인산나트륨 및 제 2 인산칼슘을 사용한 MPC 모르타르는 각각 187mm 및 125mm의 플로우를 보였다. 인산염에 양이온으로 암모늄이 치환된 경우 MPC의 플라우는 차수에 관계없이 높은 유동성을 나타내었으며, 양이온으로 칼슘이 치환된 경우 대체적으로 낮은 유동성을 나타내었다. 반면 그 이외의 양이온은 별다른 경향성을 나타내지 않았다.

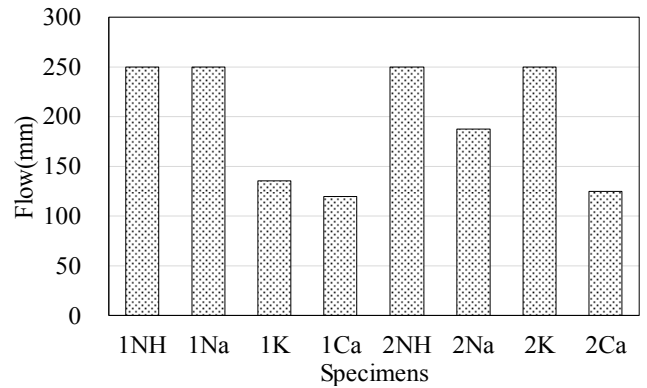


Figure 1. Flow of MPC mortars

3.2 압축강도

인산염 종류에 따른 MPC 모르타르의 재령별 압축강도를 Figure 2에 나타내었다. 재령 28일 기준 모르타르의 압축강도는 1NH가 48.4MPa로 가장 높게 나타났으며, 1K가 34.5MPa, 2NH가 27.1MPa, 1Na가 20.9MPa, 1Ca가 19.7MPa, 2K가 10.1MPa, 2Na가 4.7MPa, 2Ca가 0.7MPa의 순서로 높게 나타났다. MPC 모르타르의 재령 28일 압축강도는 인산염의 차수에 관계없이 인산암모늄, 인산칼륨, 인산나트륨, 인산칼슘의 순서로 압축강도가 높게 나타났다.

인산염으로 1차 인산염계열을 사용한 MPC 모르타르의 재령 28일 압축강도 범위는 19~48MPa이었으며, 2차 인산

Table 3. Summary of test results

Specimens	Flow(mm)	Compressive strength (MPa)						pH				
		3 hour	12 hour	1 day	3 day	7 day	28 day	12 hour	1 day	3 day	7 day	28 day
1NH	250	29.2	34.9	37.6	38.6	42.1	48.4	8.67	7.37	7.52	7.91	9.71
1Na	250	5.0	5.6	5.5	10.3	21.3	20.9	8.11	8.75	8.67	8.79	10.97
1K	135	1.5	15.9	20.2	20.9	28.2	34.5	8.82	8.48	8.43	8.58	9.82
1Ca	120	3.0	5.9	8.6	14.4	18.4	19.7	7.94	8.07	8.06	8.21	10.48
2NH	250	0.7	10.7	12.0	11.9	17.2	27.1	9.24	9.58	9.42	8.67	8.86
2Na	187	0.0	0.1	0.2	0.7	1.9	4.7	-	-	-	-	-
2K	250	0.4	0.3	0.3	0.3	1.0	10.7	-	-	-	-	-
2Ca	125	0.3	0.1	0.3	0.4	0.4	0.7	-	-	-	-	-

염계열이 사용된 MPC 모르타르의 재령 28일 압축강도 범위는 0~27MPa로 2차 인산염계열이 1차 인산염계열 대비 44~96% 낮게 나타났다. 특히 2차 인산염계열을 인산염으로 사용 시 인산암모늄을 제외한 인산나트륨, 인산칼륨 및 인산칼슘의 경우 재령 7일 및 28일의 압축강도의 평균은 각각 약 1.1MPa 및 5.4MPa로 인산나트륨, 인산칼륨 및 인산칼슘이 압축강도 발현에 미치는 영향성은 매우 낮았다.

제 1 인산암모늄 및 제 1 인산칼륨을 사용한 MPC 모르타르의 재령 1일(초기 재령)의 압축강도 발현율은 재령 28일 대비 각각 78% 및 59%로 초기재령의 압축강도 발현율은 높았다. 이후 재령 1일 이후 압축강도는 재령 28일 까지 다소 완만한 기울기로 증가하였다. 반면 제 1 인산나트륨 및 제 1 인산칼슘을 사용한 MPC 모르타르의 경우 재령 7일 까지 압축강도 발현율은 꾸준히 증가하였으며, 7일 이후 재령 28일 까지 압축강도 상승률은 평균 약 4%로 매우 낮았다. 제 2 인산암모늄을 사용한 MPC 모르타르의 압축강도는 재령 28일 대비 재령 1일에서 약 44% 수준으로 나타났지만 재령 3일까지 압축강도의 증가는 없었으며, 이후 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

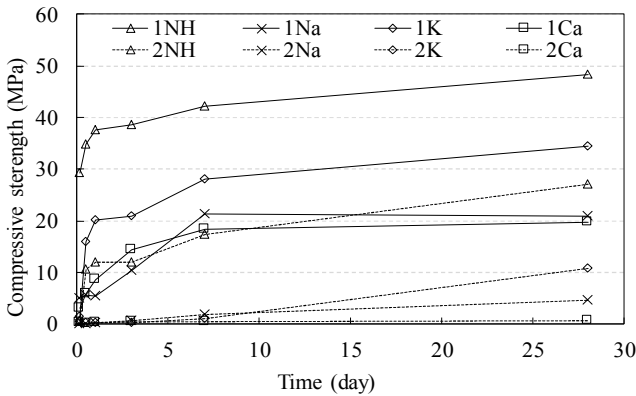


Figure 2. Compressive strength of MPC mortars

일반적으로 시멘트를 결합재로 사용한 콘크리트의 재령 1일(초기 압축강도)의 압축강도 발현율은(20℃ 양생) 재령 28일 대비 약 20% 이하 이다[10]. 반면 MPC 모르타르의 경우 압축강도 발현이 제 2 인산나트륨, 제 2 인산칼륨, 제 2 인산칼슘을 인산염으로 사용한 배합을 제외하고 모든 배합에서 최소 27% 이상의 압축강도가 발현이 되어 시멘트 콘크리트 대비 초기재령에서 압축강도 발현율이 높게 나타났다. 특히 제 1 인산암모늄의 압축강도 발현율은 재령 3시간에서

60%, 12시간에서 72%, 1일에서 78% 및 3일에서 80%로 가장 빠른 속도로 경화하였다. 지연제로서 붕산을 첨가하였음에도 MPC 모르타르의 강도발현은 시멘트 모르타르에 비해 상당히 빨랐다.

3.3 pH

인산염 종류에 따른 MPC 페이스트의 pH 변화를 Figure 3에 나타내었다. 인산염으로 2차 인산염계열의 인산나트륨, 인산칼륨 및 인산칼슘을 사용한 MPC 페이스트의 경우 상당히 낮은 강도를 고려하여 pH 측정을 하지 않았다. 이들을 제외한 MPC 페이스트의 재령 28일 pH는 평균 10.0을 나타내었다. MPC 페이스트의 재령 28일의 pH는 제 2 인산암모늄을 사용한 경우 8.86으로 가장 낮았으며, 1차 인산염계열을 사용한 경우 인산암모늄, 인산칼륨, 인산칼슘, 인산나트륨 순으로 낮게 나타났다.

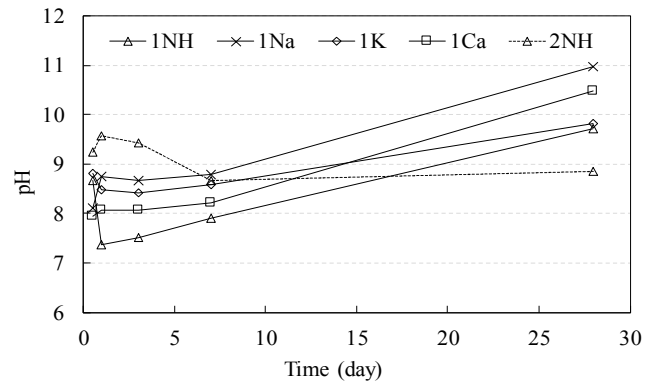


Figure 3. pH of MPC pastes

MPC 페이스트의 재령 초기 pH는 7~9 수준이었지만 재령 28일에 약 9~11 수준으로 상승하였다. 이론적으로 MgO과 인산염은 1:1의 몰비로 산-염기반응을 한다[11]. 하지만 MgO와 인산염의 반응은 매우 빠르게 이루어지며, 이로 인해 MgO 입자 표면에 빠른 속도로 반응생성물이 형성되어 MgO 내부는 미 반응 상태로 남게 된다. MgO 내부의 미 반응된 MgO의 양을 고려한다면 인산염을 완전히 소비하기 위해 이론적인 MgO 양보다 많은 양의 MgO가 필요하게 된다. 이를 고려하여 본 연구에서는 MgO:인산염 비율 7:3으로 설정하였으며, 재령의 증가에 따라 미 반응된 인산염 대비 MgO(pH=10.8)의 비율이 증가함에 따라 pH가 상승한 것으로 판단된다[12].

MPC 페이스트의 재령 28일 pH는 8.86~10.97의 범위

로 식물이 성장하기에는 다소 높은 수준이다. 따라서 MPC를 식생용 콘크리트의 결합재로 사용하기 위해서는 재령 28일 기준 pH가 9 이하인 제 1 인산암모늄, 제 1 인산칼륨 및 제 2 인산암모늄의 사용이 적합할 것으로 판단된다. 또한 산성 구성물질인 인산염의 비율을 높이면 더 낮은 수준의 pH 조성이 가능할 수 있다.

3.4 X-ray 회절분석(XRD)

인산염 종류에 따른 MPC 페이스트의 XRD 패턴 분석 결과를 Figure 4에 나타내었다. 인산염으로 2차 인산염계열의 인산나트륨, 인산칼륨 및 인산칼슘을 사용한 MPC 페이스트는 상당히 낮은 강도발현을 고려하여 XRD 패턴 분석을 실시하지 않았다. 모든 시험체는 $2\theta \approx 43.0, 62.4, 37.0, 74.8$ 의 동일한 위치에서 피크를 형성 하였는데 이는 미 반응 상태로 남아있는 MgO에 의한 것이다. 인산염으로 암모늄 계열을 사용한 MPC의 경우 차수에 관계없이 주요 반응생성물로 Struvite($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $2\theta \approx 20.8, 15.8, 30.6$)의 생성이 확인 되었다. 인산염으로 칼륨을 사용한 경우 주요 반응생성물은 Struvite-K($\text{KMgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $2\theta \approx 20.8, 27.3, 21.5$)로 확인되었으며, 암모늄으로 나트륨을 사용한 경우 주요 반응생성물은 Struvite-Na($\text{NaMgPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $2\theta \approx 12.8, 14.4, 7.9$)로 확인되었다. 인산염으로 칼슘을 사용한 경우 주요 반응생성물은 Monetite(CaHPO_4 , $2\theta \approx 26.5, 30.3, 33.2$)로 확인되었다. MgO와 암모늄, 칼륨, 나트륨 계열의 인산염이 반응한 경우 사용된 양이온에 따라 각각 Struvite, Struvite-K, Struvite-Na 등의 유사한 형태의 광물질이 생성된 반면, 칼슘계열을 인산염으로 사용한 경우 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 가 CaHPO_4 로 환원되어 Monetite 광물질이 생성된 것으로 판단된다.

XRD 분석결과 모든 MPC 시험체에서 MgO의 피크 강도는 매우 강하게 나타났는데, 이는 MgO-인산염 복합체 내부에 다량의 미반응 MgO가 존재한다는 것을 의미한다. MgO-인산염의 높은 반응속도도 인해 MgO 입자 표면에 반응생성물이 빠르게 형성되어 MgO 내부는 미반응 상태로 남아 위와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 높은 압축강도를 나타낸 제 1 인산암모늄, 제 2 인산암모늄 및 제 1 인산칼륨의 경우 반응생성물의 피크 강도가 강하게 나타난 반면, 상대적으로 낮은 압축강도를 나타낸 제 1 인산나트륨과 제 1 인산칼슘의 경우 반응생성물의 피크 강도는 약하게 형성되었다. 이는 암모늄과 칼륨의 사용 시 나트륨 및 칼슘을

사용할 경우 보다 결정성 반응생성물이 다량 생성된 것을 의미하며, 결과적으로 인산암모늄 및 인산칼륨을 사용한 마그네시아 모르타르의 압축강도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

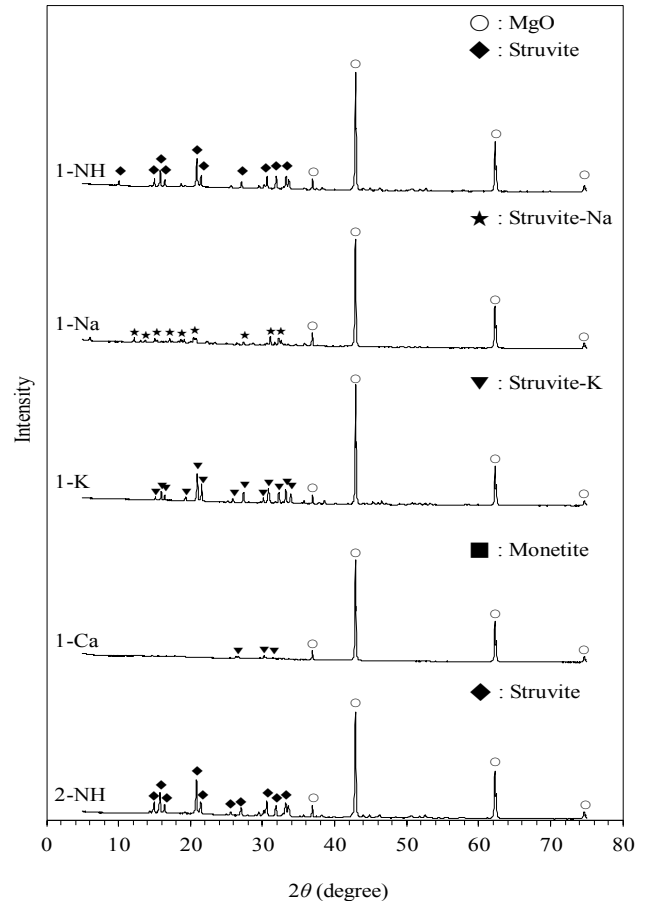


Figure 4. XRD pattern of MPC pastes

4. 결 론

본 연구에서는 미생물의 성장환경 조성을 위한 pH 저감형 결합재 개발의 기초연구로서 인산염의 종류에 따른 MPC의 물리적·화학적 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) MPC 모르타르의 플로우 는 인산염으로 암모늄을 사용한 경우에서 양이온 차수에 관계없이 가장 높았다.
- 2) 1차 인산염 계열을 사용한 경우 MPC 모르타르의 압축강도는 제 1 인산암모늄이 48.4MPa로 가장높게 나타났으며, 칼륨(34.5MPa), 나트륨(20.9MPa), 칼슘

(19.7MPa)의 순서로 높게 나타났다. 2차 인산염 계열을 사용한 MPC 모르타르의 경우 제 2 인산암모늄이 34.5MPa로 가장 높게 나타났으며, 암모늄을 제외한 다른 2 차 계열 인산염의 경우 압축강도는 10MPa 이하로 낮았다.

- 3) MPC의 재령 28일 pH는 9~11 수준으로 제 1 인산나트륨을 사용한 경우 11.0으로 가장 높은 반면, 제 2 인산암모늄을 사용한 경우 8.9로 가장 낮았다.
- 4) 암모늄, 칼륨, 나트륨 계열의 인산염을 사용한 MPC의 경우 반응생성물로 Struvite 유사계 광물질을 생성한 반면, 칼슘계열의 경우에는 Monetite의 생성이 확인되었다.

압축강도 및 pH를 고려하였을 때 제 1 인산암모늄, 제 1 인산칼륨 및 제 2 인산암모늄을 적용한 MPC의 적용이 실용적일 수 있는데, 이들을 적용한 콘크리트의 응결특성, 유동성, 역학적 특성 및 내구성에 대한 지속적인 실험연구가 필요하다.

요 약

본 연구는 식생 콘크리트 개발에 대한 기초적인 연구로 낮은 pH특성을 갖는 마그네시아-인산염 복합체(MPC)의 압축강도 및 pH 특성을 평가하였다. 주요 변수는 인산염 종류이며, 8종의 인산염(암모늄계, 나트륨계, 칼륨계, 칼슘계)을 사용하여 모르타르 및 페이스트를 제작하였다. 실험결과, 제 2 인산나트륨, 제 2 인산칼륨 및 제 2 인산칼슘의 경우 MPC 모르타르의 압축강도 발현에 대한 영향은 없었다. 제 1 인산암모늄, 제 1 인산칼륨을 적용한 MPC 모르타르의 경우 34MPa 이상의 압축강도가 발현되었으며, pH는 9.8이었다. 따라서 식생용 콘크리트의 결합재로 제 1 인산암모늄 및 제 1 인산칼륨인산염이 적용된 MPC가 가장 효과적일 것으로 기대된다.

키워드 : 마그네시아-인산염 복합체, pH, 압축강도, 식생 콘크리트, MgO

Acknowledgement

This research was supported by a grant(16CTAP-

C078666-01) from Infrastructure and Transportation Technology Promotion Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. Kim WJ, Kim ST, Park SJ, Ghim SY, Chun WY. A Study on the development of self-Healing smart concrete using microbial bio-mineralization. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2009 Aug;21(4):501-11.
2. Sierra-Beltran MG, Jonkers HM, Schlangen E. Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete Repair. *Construction and Building Materials*, 2014 Sep;67:344-52.
3. Brady NC, Weil RR. *Elements of the Nature and Properties of Soils*, 3rd ed, New Jersey: Prentice Hall; 2009. 576 p.
4. Lee KH, Yang KH. Evaluation of pH and compressive strength development of alpha-calcium sulfate hemihydrate-based binder. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2016 Feb;16(1):59-65.
5. Iyengar SR, Al-Tabbaa A. Developmental study of a low-pH magnesium phosphate cement for environmental applications. *Environmental Technology*, 2010 28(12):1387-401.
6. Kang IS, Ahn MY, Paik MS, Jung SJ. A study on field and hydration properties ultra rapid hardening mortar using magnesia-phosphate cement. *Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction)*, 2008 Feb;24(2):79-86.
7. Kang SP, Kim JH. Influence of mixing factors on the early-age properties of magnesium potassium phosphate cement mortar. *Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction)*, 2015 May;31(5):61-8.
8. Wagh AS. *Chemically bonded phosphate ceramics*, 1st ed, New Jersey: Elsevier; 2004. 283 p.
9. Yang Q, Zhu B, Zhang S, Wu X. Properties and applications of magnesia-phosphate cement mortar for rapid repair of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000 Nov;30(11):1807-13.
10. Neville AM. *Properties of concrete*, 5th ed, New Jersey: Prentice Hall; 2011. 846 p.
11. Kim DY. Physical and chemical characteristics of MgO based mortar for cultural heritage conservation [Master's thesis]. [Seoul (Korea)]: Seoul National University; 2014. 87 p.
12. Kang IS. A study on the basic properties of ultra rapid Hardening mortar using magnesia-phosphate cement [Master's thesis]. [Yongin (Korea)], Dankook University; 2008. 89 p.