

건축용 재료로서 이산화티탄의 활용성 검토에 관한 기초적 연구 - 수질정화특성을 중심으로 -

A Fundamental Study on the Application of High Quality of TiO₂ as Architectural materials - Properties of Water purification with as the central -

손길성* Son, Gil-Sung	허재원** Heo, Jae-Won	김호열*** Kim, Hyo-Youl	이종일**** Lee, Jong-IL	임남기**** Lim, Nam-Gi
------------------------------	------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-------------------------------

Abstract

Photocatalyst reaction has limit of its usage because application range mostly centered on atmosphere purification area. Thus, it is true that an alternative plans are necessary to increase usage of TiO₂ as photocatalyst material.

(1) The result of flow test according to TiO₂ replacement rate has shown that both of anatase type and rutile type over 12% deviated from desired flow, 110±5mm. Consequently, the range below 9% will be suitable when the anatase type TiO₂ is used for functional additives if workability is considered.

(2) After compressive strength test, replacement rate 6-9% is estimated as suitable range if TiO₂ is used as compressive strength material. Rutile type and anatase type are suitable for in early-age strength and long-age strength respectively.

(3) It was revealed that bending strength was dramatically decreased when replacement rate was increased. The main reason were the increase of TiO₂ doesn't influence hydration reaction and the decrease of bending strength.

(4) The result from the water purification properties test using ion-chromatography has shown that the condition with anatase type TiO₂ was normally better than rutile type on the same replacement rate.

키워드 : 이산화티탄, 모르타, 아나타제, 루틸, 수질정화특성

Keywords : TiO₂, Mortar, Anatase, Rutile, Properties of Water Purification

1. 서론

1.1 연구의 목적

산업의 발달 및 도시의 인구 밀집화로 인하여 자연환경의 파괴가 심화되고 있다. 최근 자연 환경에 대한 관심이 부각됨에 따라 건축재료와 공법의 발전방향이 생태계의 보전 및 자연환경의 훼손을 극소화하는 환경부하 저감형 및 환경 친화적 형태로 진행되고 있으며, 선진국을 중심으로 주요 건축 재료인 시멘트나 콘크리트에 다양한 기능을 부여하려는 시도가 이루어지고 있다. 특히 환경 친화적 재료인 광촉매를 이용한 환경정화에 대한 연구개발 및 실용화 방법이 많은 관심을 불러 일으키고 있다.

광촉매란 빛을 에너지원으로 하여 촉매 반응을 진행키는 물질을 말한다. 광촉매의 종류에는 여러 가지가 있으나 이 중 이

산화티탄은 파장 400nm이하의 자외선을 흡수하여 고에너지의 전자(e-)와 정공(h+)으로 분리되는데 이 전자와 정공은 표면 흡착산소 및 물과 반응하여 각각 수퍼옥사이드 음이온(O₂⁻)과 수산화 라디칼(OH)이라는 활성종을 형성한다. 이렇게 형성된 활성종의 강한 산화력으로 인하여 오염물질을 분해하고 살균 효과를 나타내며, 유해가스를 제거·흡수하는 작용을 한다.

위와 같은 이산화티탄을 모르타에 치환할 경우 우수한 성능을 갖는 모르타 제품의 제조가 가능하여 환경 정화재료로써 실용성이 높을 것으로 예상된다. 그러나 이를 위해서는 이산화티탄의 치환에 따른 모르타 물성변화에 대한 검토가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 이산화티탄의 치환에 따른 모르타의 물성을 검토하고 이의 기능성을 제고하기 위하여 수질 오염물질의 저감특성을 고찰하여, 이산화티탄을 사용한 기능성 모르타 개발에 관한 기초 자료를 제시하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

이산화티탄(TiO₂) 분말을 광촉매로 사용한 시멘트 모르타의 물성을 검토하기 위하여, 재료는 아나타제형과 루틸형 두가지

* 동명대학교 건축대학 석사과정

** 동명대학교 건축대학 박사과정

*** 김해대학 건축계열 전임강사, 공학박사

**** 동명대학교 건축대학 부교수, 공학박사

를 사용하였으며, 치환율은 0~15%의 범위에서 3% 단위로 변화하였다.

실험은 이산화티탄의 종류 및 치환율에 따른 모르터의 플로우, 압축강도 및 휨강도를 실시하였다.

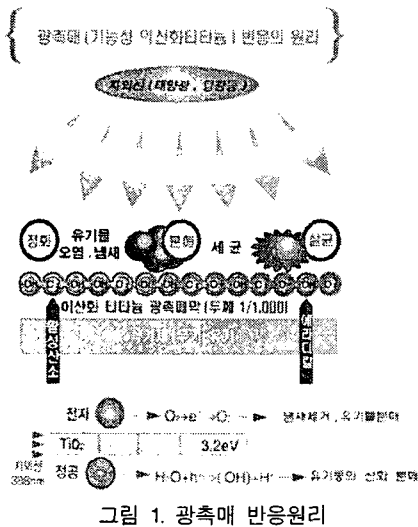
또한 광촉매재료로서 활용성 증대를 위한 수질정화 가능성 검토를 위하여 이온 크로마토그래피(Ion Chromatography) 시험 방법을 이용하여 시험용액의 불소, 잔류염소, 황산이온, 질산화질소 농도를 측정하였다.

이상의 시험결과를 비교·분석하여 모르터용 혼화재로서 이산화티탄 분말의 활용성을 고찰함과 동시에 수질정화 특성을 검토하는 것까지를 본 연구의 범위로 하였다.

1.3 광촉매

광촉매 이산화티탄은 물리·화학적으로 안정하며 우수한 내산성, 내알칼리성, 자외선 차단력, 분산내구성, 높은 반응성과 활성도 등의 많은 장점을 가지고 있다. 광촉매의 종류에는 ZnO, CdS, WO₃ 등도 있으나 이중 ZnO와 CdS는 촉매 자체가 빛에 의한 분해반응을 일으켜 유해한 Zn, Cd 이온을 발생시키며, WO₃는 특정물질에 대한 부분적 효율성만을 갖는 단점이 있다.

광촉매 반응 Mechanism은 이산화티탄 재료의 고유한 band gab energy(Eg)보다 큰 energy를 받게 되면, valence band(가전자대)의 전자(e⁻)가 excite 되어 conduction band(전도대)로 전이되고, valence band에는 정공(h⁺)이 생성되어 표면으로 이동 후 OH radical(•OH) 및 superoxide radical(O₂•⁻)이 생성되며 광촉매 반응원리는 그림 1과 같다.



2. 실험

2.1 실험개요

실험 인자 및 수준은 표 1과 같다.

표 1. 실험인자 및 수준

실험 인자	수준
TiO ₂ 종류	아나타제, 루틸
치환율(%)	0, 3, 6, 9, 12, 15

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

시멘트는 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 화학 조성 및 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2 시멘트의 화학조성 및 물리적 성질

화학 조성	화학성분 함량(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss
		21.95	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58
물리적 성질	비표면적 (cm ² /g)	비중	응결시간		압축강도(kgf/cm ²)			
			초결	종결	3일	7일	28일	
			3,112	3.14	4시간	6시간	198	272

2.2.2 잔골재

잔골재는 강원도 주문진읍 향호리산의 표준사를 사용하였으며, 중별 규격은 표 3과 같다.

표 3. 표준사의 중별 규격

항 목	입 도(표준사 위의 잔분 %)				
	850 μ m	600 μ m	300 μ m	이트랑	단위용적무게
인장강도시험용	1.0이하	95.0이상	-	0.4이하	1.53-1.60
압축강도시험용	-	1.0이하	95.0이상	0.4이하	

2.2.3 이산화티탄

아나타제형은 국내 N사, 루틸형은 국내 T사의 미분쇄 된 분말형 제품을 사용하였으며, 그 물리적 성질 및 화학적 성분은 표 4와 같다.

표 4. 이산화티탄의 물리적 성질 및 화학성분

구분	색상	물리적상태	TiO ₂ wt%	비중	pH	용해도
아나타제형	흰색	결정체	100	4.0	7.5	불용성
루틸형	흰색	결정체	96	4.0	7.3	불용성

2.3 모르터 배합

이산화티탄 분말을 사용한 모르터의 배합은 표 5와 같다.

표 5. 모르터 배합

배합비	W/B	치환율 (%)	Air (%)	배합량(kg/m ³)			
				B		S	W
				C	T		
1:2.45	48.5	0	4.5±1.5	760.0	0	1,862	368.6
		3		737.2	22.8	1,862	368.6
		6		714.4	45.6	1,862	368.6
		9		691.6	68.4	1,862	368.6
		12		668.8	91.2	1,862	368.6
		15		646.0	114	1,862	368.6

※ C : 시멘트, T : 이산화티탄 분말, S : 모래, W : 물, Air : 공기량

2.4 시험체 제작 및 시험방법

모르터의 혼합은 시멘트와 이산화티탄 분말을 1분간 건비빔한 후 잔골재를 투입하여 1분간 혼합하였으며, 물을 투입한 후 2분간 혼합하여 비비는 분할 투입 방법을 이용하여 모르터의 혼합을 완료하였다.

시험체는 혼합이 완료 후 모르터의 휨강도 공시체를 40×40

×160mm로 제작하였으며, 압축강도는 휨강도 시험 후 파편을 이용하였다.

양생은 모든 공시체를 양생실에서 24시간 양생한 후, 탈형하여 항온수조에서 20±3℃ 의 온도로 소요 재령인 3일, 7일, 28 일간 수중양생 하였다.

이산화티탄의 종류 및 치환율에 따른 모르터의 물성을 검토하기 위한 실험항목 및 적용규준은 표 6과 같다.

표 6. 실험항목 및 적용 규준

실험항목	적용 규준
플로우 시험	KS F 5111
압축강도 시험	KS F 2405
휨강도 시험	KS F 2408

수질정화 가능성 검토를 위한 시험체 제작 방법은 물성검토 시편제작 방법과 동일하게 제작하였으며 공시체 크기는 160×160×40mm로 제작하였다. 수질오염물질 저감시험은 일반 상수도 물에 시험체를 각 소요시간 별로 침지시킨 후 시험용액을 수집하여 이온크로마토그래피 시험방법을 이용하여 F, Cl, SO₄, NO₃의 증감을 측정하였으며, 분석기 및 수질정화 시험용 공시체 사진은 사진 1 및 2와 같다.

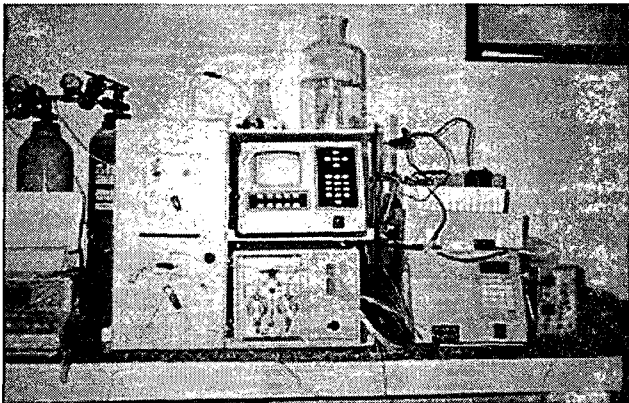


사진 1. 이온크로마토그래피 분석기

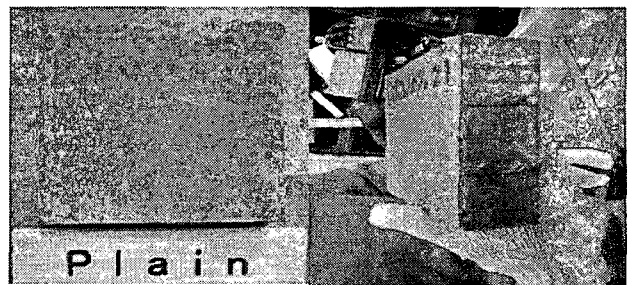


사진 2. 수질정화 시험용 공시체

3. 실험결과 및 분석

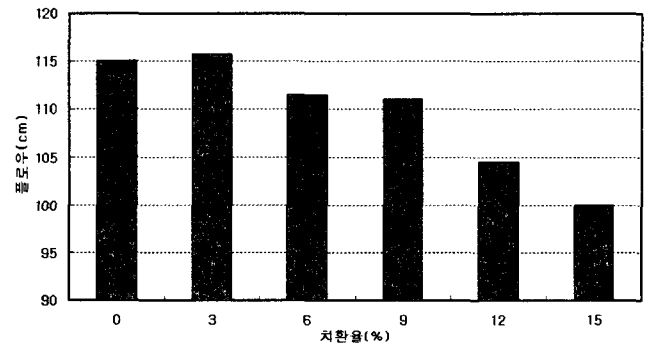
이산화티탄의 치환 및 첨가율에 따른 모르터의 플로우, 압축강도 및 휨강도를 측정된 시험결과는 표 7과 같다.

표 7. 실험결과

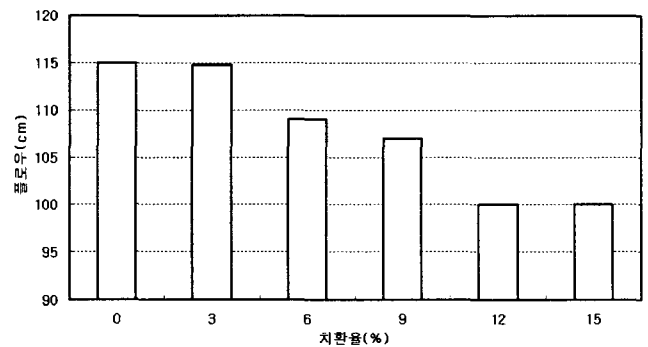
	치환율 (%)	플로우 (%)	압축강도(Mpa)			휨강도(Mpa)		
			3일	7일	28일	3일	7일	28일
Plain	-	115	24.09	27.97	38.97	4.06	6.42	7.81
	3	116	24.18	29.13	39.78	5.56	5.86	7.53
	6	112	24.53	30.01	42.32	5.01	5.87	7.29
	9	111	23.16	29.37	38.01	4.92	5.46	7.27
	12	105	22.36	28.76	37.98	4.18	4.98	7.08
아나타제	15	100	21.83	26.59	34.53	4.06	4.92	6.74
	3	114	22.39	26.34	38.91	4.82	5.24	6.85
	6	109	22.49	29.62	38.97	4.99	5.38	7.06
루틸	9	107	24.25	30.17	39.23	5.09	5.67	7.15
	12	100	22.55	28.49	39.04	4.71	5.53	6.80
	15	100	20.50	24.37	38.30	4.35	4.89	6.76

3.1 플로우

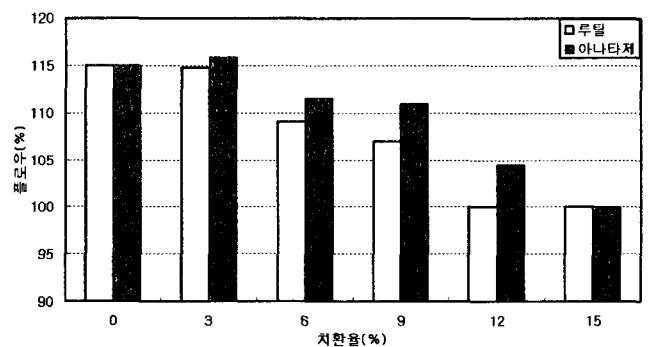
이산화티탄의 종류 및 치환율에 따른 플로우 시험결과는 그림 2와 같다.



(가) 아나타제 치환



(나) 루틸 치환



(다) 아나타제, 루틸 비교

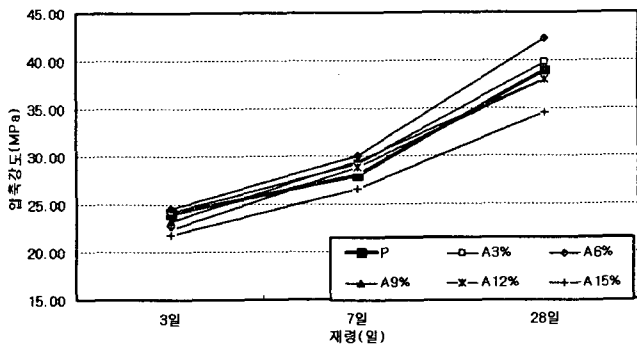
그림 2. 플로우

이산화티탄을 사용한 모르터의 플로우 시험결과, 치환율 3%에서는 아나타제형, 루틸형의 모든 조건에서 플레인 모르터의 플로우와 유사한 것으로 측정되었다. 그러나 치환율 6% 이상의 범위에서는 플로우가 감소하는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 아나타제형에 비하여 루틸형을 사용한 경우가 더욱 큰 것으로 나타났다. 그러나 치환율 9% 이내의 범위에서는 목표 플로우 값 범위인 110±5mm를 아나타제형과 루틸형 모든 조건에서 만족하는 것으로 측정되었다.

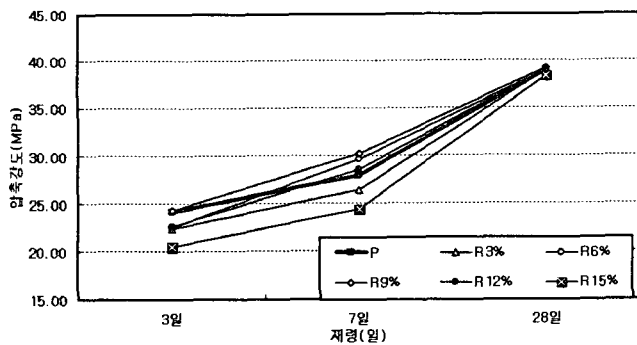
이산화티탄을 첨가함에 따라 모르터의 플로우가 감소하는 현상은 20,000cm²/g 이상의 고분말도 재료를 사용함에 따라 모르터의 점성이 증가하여 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 모르터의 유동성을 고려하여 이산화티탄 분말을 사용한다면 그 최대 치환율은 9% 이내가 되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 압축강도

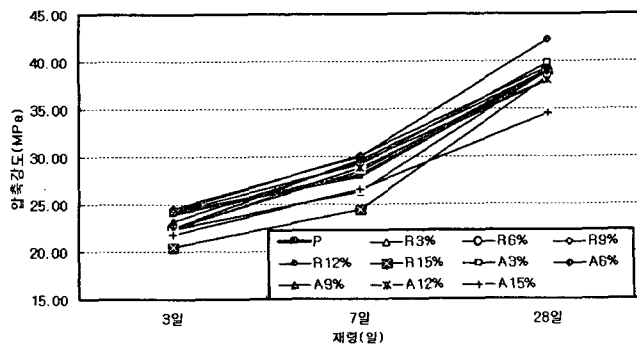
아나타제형 이산화티탄을 사용한 모르터의 치환율에 따른 압축강도 시험결과는 그림 3과 같다.



(가) 아나타제 치환



(나) 루틸 치환



(다) 아나타제, 루틸 비교
 그림 3. 압축강도

아나타제형 치환에 따른 압축강도 실험 결과 Plain과 유사한 강도발현 성상을 나타내었다. 또한 치환율 9%까지 Plain 대비 압축강도가 유사 또는 상회함을 보였으며, 치환율 6%의 재령 28일의 경우 8.6%의 압축강도 증진효과를 나타내었다.

이는 수화반응에는 영향을 미치지 못하나 분말도가 높은 티탄을 치환함으로써 미세공극 충전효과가 발휘되어 압축강도가 증진된 것으로 판단된다

루틸형 이산화티탄을 사용한 모르터의 치환율에 따른 압축강도 시험결과는 그림 3의 (나)와 같다.

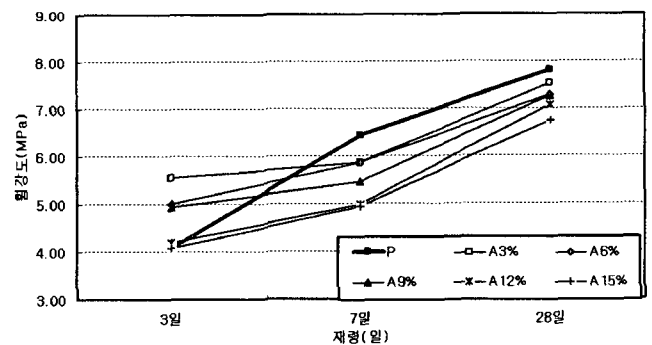
루틸형 치환에 따른 압축강도 실험 결과 재령 3, 7일의 초기 강도에서는 치환율 6% 재령 28일에서는 치환율 9%에서 최대 강도를 보였으며, Plain대비 치환율이 증가함에 따라 재령 3일의 초기강도는 감소하였으나, 재령 28일의 압축강도는 치환율과 관계없이 유사한 것으로 나타났다.

이산화티탄 치환율에 따른 압축강도 실험결과 압축강도 증진재로서 이산화티탄을 활용한다면 치환율 6%~9%범위가 적절할 것으로 판단되며, 초기강도에서는 루틸형, 장기 강도에서는 아나타제형이 유리한 것으로 나타났다.

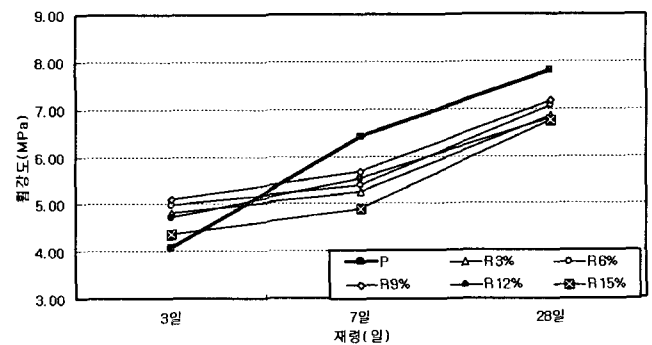
3.3 휨강도

아나타제형 이산화티탄의 치환율에 따른 휨강도 시험결과는 그림 4와 같다.

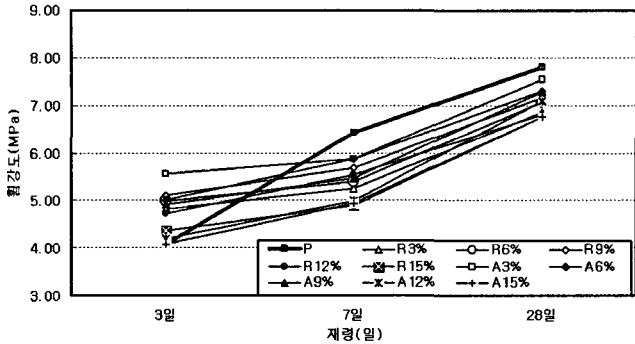
아나타제형 이산화티탄을 사용한 모르터의 휨강도는 재령 3일에서 3%, 6%, 9%를 제외한 모든 조건에서 플레인 모르터에 비하여 전 재령에서 낮은 것으로 측정되었다. 재령 3일에서 플레인 모르터에 비하여 휨강도가 다소 증가하는 현상은 이산화티탄 분말의 미세공극 충전효과에 의한 초기 압축강도가 증가함으로써 나타나는 현상으로 판단된다.



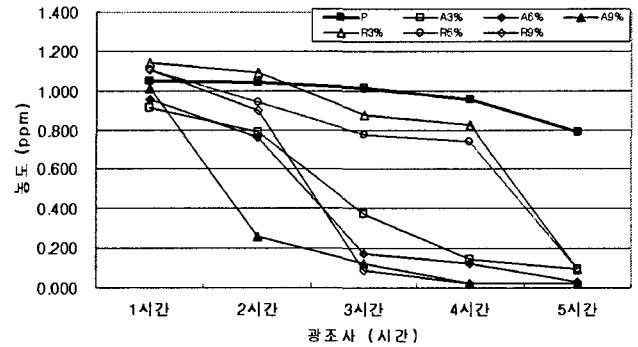
(가) 아나타제 치환



(나) 루틸 치환



(다) 아나타제, 루틸 비교
그림 4. 휨강도



(다) 불소(F) 제거특성(아나타제, 루틸)
그림 5. 불소(F) 제거특성

루틸형 이산화티탄의 치환율에 따른 휨강도 시험결과는 그림 4의 (나)와 같다.

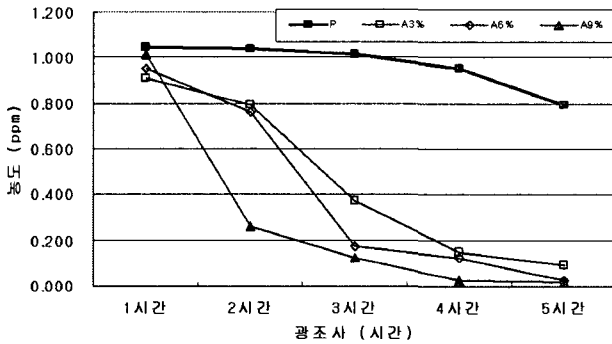
루틸형 이산화티탄을 사용한 모르타의 휨강도 시험결과는 아나타제형 이산화티탄을 사용한 모르타의 휨강도 발현특성과 유사한 것으로 나타났다.

따라서 이산화티탄은 아나타제형과 루틸형 모두에서 모르타의 휨강도를 저해하는 것으로 나타나 이를 시멘트 경화체의 결합재로서 활용할 때 이에 대한 적절한 조치가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

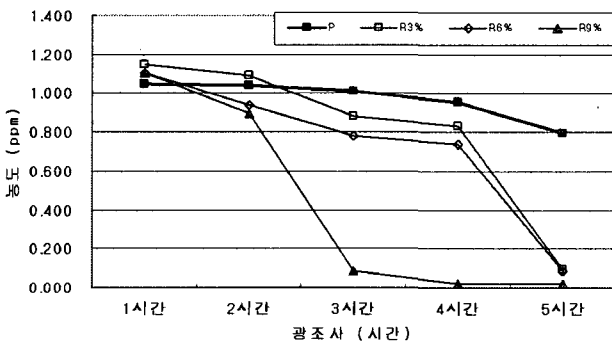
3.4 수질정화특성

3.4.1 불소 제거특성

이산화티탄을 광촉매로 사용한 수질정화 특성중 불소제거 특성은 그림 5와 같다.



(가) 불소(F) 제거특성(아나타제)



(나) 불소(F) 제거특성(루틸)

이산화티탄을 활용한 불소 제거특성 실험결과 아나타제형의 경우 광조사 1시간 이후부터 루틸형의 경우 광조사 2시간 이후부터 제거특성을 보였으며, 최대 제거율은 유사한 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 광조사 시간 5시간에서의 불소 농도는 아나타제형과 루틸형 이산화티탄의 효과가 유사하였으나, 치환율 6% 이내의 범위에서는 루틸형에 비하여 아나타제형 이산화티탄을 사용한 경우가 더욱 우수한 것으로 나타났다. 그러나 치환율 9%의 경우는 이산화티탄의 종류에 따른 차이는 적은 것으로 측정되었다.

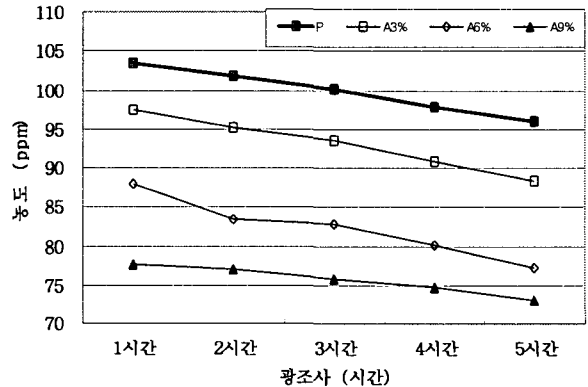
따라서 잔류 불소를 제거하기 위해서 이산화티탄을 사용하면 광조사 시간이 짧은 경우에는 아나타제형을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 9%이상 치환시에는 그 특성이 높아질 것으로 예상된다.

3.4.2 염소 제거특성

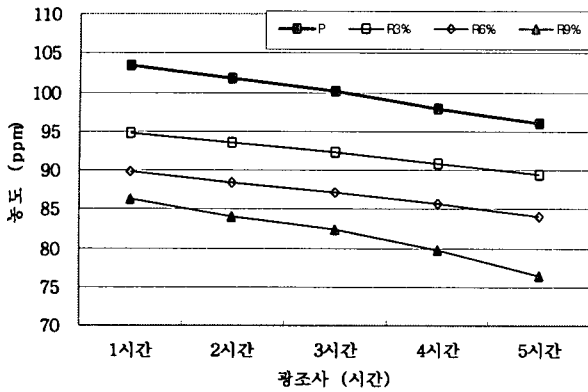
이산화티탄을 광촉매로 활용한 수질정화 특성 중 염소제거 특성은 그림 6과 같다.

이산화티탄을 활용한 잔류염소 제거특성 실험결과 1시간 이하의 범위에서 치환율에 따른 잔류염소의 제거성상이 현저한 것으로 보였으며, 루틸형에 비하여 아나타제형이 최대 11%이상 제거특성이 우수한 것으로 나타났다.

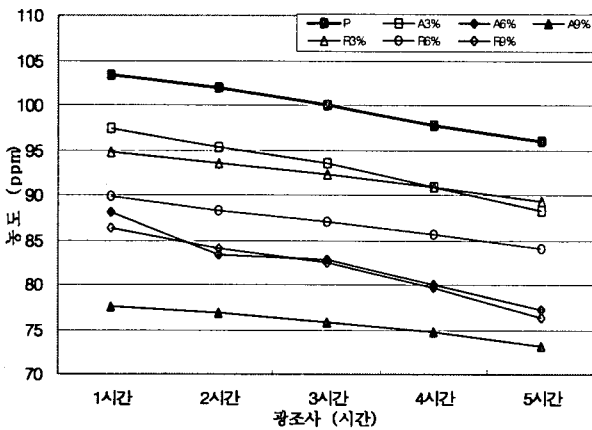
또한 1시간이후의 잔류염소 감소율이 Plain과 유사한 것으로 나타났다. 이는 시간 경과에 따른 자연적 감소에 기인한 것으로 판단된다.



(가) 잔류염소(C) 제거특성(아나타제)

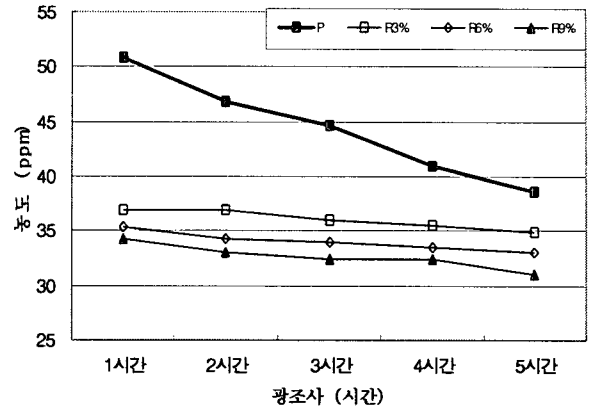


(나) 잔류염소(CI) 제거특성(루틸)

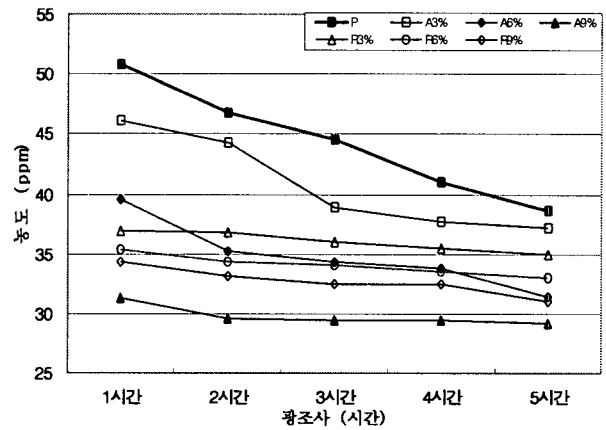


(다) 잔류염소(CI) 제거특성(아나타제, 루틸)

그림 6. 잔류염소(CI) 제거특성



(나) 황산이온(SO₄) 제거특성(루틸)



(다) 황산이온(SO₄) 제거특성(루틸)

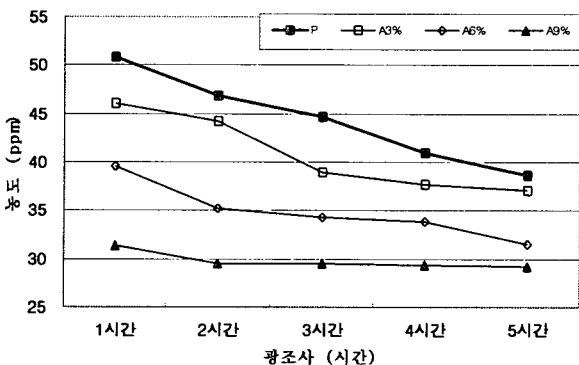
그림 7. 황산이온(SO₄) 제거특성

3.4.3 황산이온 제거특성

이산화티탄을 광촉매로 활용한 수질정화 실험결과 황산이온 제거 특성은 그림 7과 같다.

이산화티탄을 활용한 황산이온 제거 특성 실험결과 아나타제형이 치환율 증가에 따른 황산이온 감소량이 현저한 것으로 나타났다으며, 6%이상의 조건에서 광조사 시간 2시간 이후 루틸형 제거특성을 상회 하는 것으로 나타났다.

또한 루틸형의 경우 치환에 따른 황산이온감소량은 현저하였으나, 치환율 증가에 따른 감소특성은 크지 않은 것으로 나타났다.



(가) 황산이온(SO₄) 제거특성(아나타제)

3.4.4 질산화질소 제거특성

이산화티탄을 광촉매로 활용한 수질정화 실험결과 질산화질소 제거 특성은 그림 8과 같다.

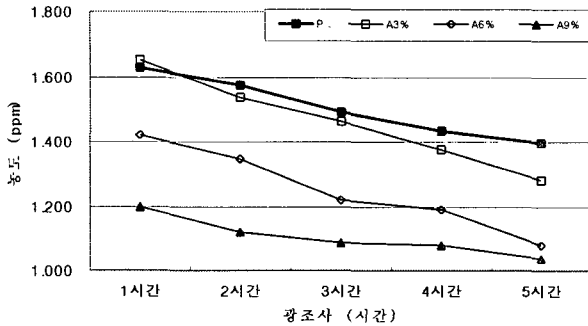
이산화티탄을 활용한 질산화질소 제거특성 실험결과 아나타제형의 경우 치환율 6%이상의 범위에서 질산화질소 제거효과가 현저한 것으로 나타났다.

루틸형의 경우 Plain과 대비할 때 질산화질소 제거특성이 광조사 1시간 이전의 조건에서는 현저한 것으로 나타났으나, 시간 경과에 따른 제거 특성은 큰 차가 없는 것으로 나타났다.

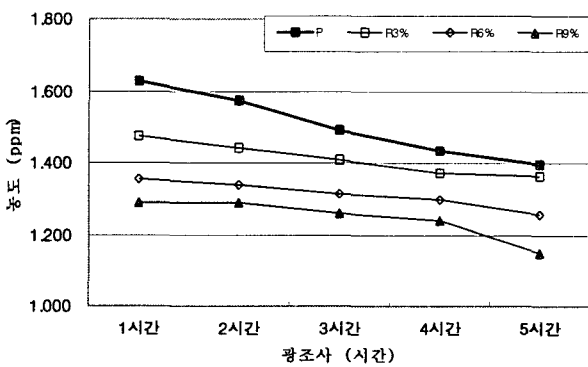
이상의 결과에서 이온크로마토그래피를 이용하여 광촉매 수질정화특성 실험결과 불소에서는 2시간 이후의 제거성능이 우수하였으며, 잔류염소, 황산이온 질산화 질소 제거특성 실험결과 치환율이 증가함에 따라 일정한 감소율을 보였으며, 치환율이 증가할수록 제거성능이 높아지는 것으로 나타났다.

또한 동일 치환율에서 루틸형에 비하여 아나타제형의 제거 특성이 전반적으로 우수한 것으로 나타났다.

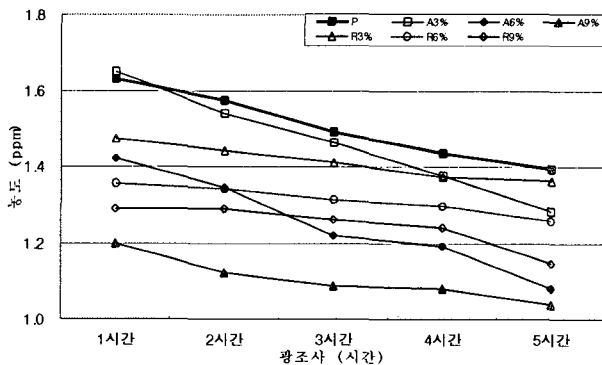
루틸형의 경우 반응성은 아나타제에 비하여 적은 것으로 나타났으나, 전반적으로 안정적인 반응성을 보였다. 이에 안정성 및 경제성을 감안하여 적절한 혼용도 가능할 것으로 판단된다.



(가) 질산화질소($\text{NO}_3\text{-N}$)제거특성(아나타제)



(나) 질산화질소($\text{NO}_3\text{-N}$)제거특성(루틸)



(다) 질산화질소($\text{NO}_3\text{-N}$)제거특성(아나타제, 루틸)

그림 8. 질산화질소($\text{NO}_3\text{-N}$)제거특성

4. 결 론

이산화티탄분말을 광촉매로 사용하여 제조한 모르터를 대상으로 콘크리트 적용성을 검토하고, 환경친화적 재료로서 활용 범위를 높이기 위한 방안으로 수질제거 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이산화티탄 치환율 9% 이내의 조건에서는 목표 플로우를 만족하는 것으로 나타나 모르터의 유동성을 확보하기 위한 이산화티탄의 최대 사용량은 9% 이내가 되어야 할 것으로 판단된다.
- 2) 아나타제 치환율 6%, 루틸 치환율 9% 이내의 조건에서 Plain보다 압축강도가 우수한 것으로 나타났으며, 이는 이

산화티탄 분말이 시멘트 경화체의 미세공극을 충전함으로써 나타나는 현상으로 판단된다.

- 3) 이산화티탄의 치환율이 증가함에 따라 휨강도는 감소하는 것으로 나타나 이산화티탄을 시멘트 경화체의 결합재로서 사용 시 휨강도에 대한 적절한 고려가 수반되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 불소, 잔류염소, 황산이온 및 질산화질소 항목에 관하여 이온크로마토그래피를 이용하여 광촉매 수질정화특성 실험결과 불소 및 황산이온 제거특성에서는 2시간 이후에서 잔류염소 및 질산화질소는 1시간 이전에서 제거성능을 발휘하는 것으로 나타나 수질정화제로서 활용성이 우수할 것으로 판단된다. 또한 동일 치환율에서 루틸형에 비하여 아나타제형의 제거특성이 전반적으로 우수한 것으로 나타났으나, 루틸형의 경우 전반적으로 안정적인 반응성을 보여 안정성 및 경제성을 감안하여 적절한 혼용도 가능할 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 플로우, 압축강도, 휨강도는 이산화티탄 적정 치환율 범위에서 유사하거나 향상됨을 알 수 있었으며, 치환율이 증가함에 따라 수질정화 특성이 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 이산화티탄을 치환함에 따라 휨강도 및 플로우가 감소하는 것으로 나타나 이에 대한 적절한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 이산화티탄은 혼화제로서 콘크리트에 적용하거나 수질정화 용도로 사용이 가능 할 것으로 판단되며, 이의 실용화를 위하여 다양한 조건의 제거특성에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한국기술산업연구원, "이산화티탄 광유도 반응성" 2005
2. 한국콘크리트학회, "특수콘크리트 공학", 2004
3. 기술 표준원, "광촉매의 기술 및 시장동향", 2003
4. 신화덕, 한국과학기술정보연구원, "질산, 아질산성질소에 의한 지하수오염의 최근 동향" 2003
5. 김화중 외 2인 경북대학교, "이산화티탄분말을 광촉매로 사용한 시멘트 모르타르의 질소산화물 제거특성에 관한 기초 연구", 2002
6. 엄태수, 원로과학기술인. "광촉매 제품개발", 2002
7. 박영서 외 2인, "광촉매의 국내외 산업동향 및 업체별 사업화 추진전략" 한국과학기술정보연구원, 2001.2
8. 정재동, 콘크리트 재료공학, 2002.
9. 김명호 외 1인, 창원대학교, "TiO₂의 광촉매 특성을 이용한 대기정화기술의 현황 1999
10. 임남기 외 5명, "건축재료실험", 기문당, 2003. 3호, 1988
11. O. Carp, C. L. Huisman, A. Reller, Photoinduced reactivity of titanium dioxide, Progress in Solid State Chemistry, Nov. 2004.
12. 主要プラントメカ 12社(2000), 都市ゴミ処理技術は今、-ゲイオキシン問題をクリア、依然 主流の、スト-カ爐、月刊廢棄物 2000, Vol. 26, No. 300, pp 2-15.