

화학혼화제의 성분함유율 변화에 따른 콘크리트의 특성분석

Analysis of concrete characteristic depending on chemical admixtures changing component content ratio

류 현 기*

Ryu, Hyun-Gi

Abstract

W/C and unit volume, which significantly affect quality of concrete related to strength and durability, are regulated at below 185kg/m³ for regular concrete generally used in standard specification for constructions. The aim of this research is to develop chemical admixture and find out its potential use by identifying characteristics of admixtures added to soft concrete and hardening concrete, of which content ratio of component for each type of admixtures is subject to change in accordance with unit volume within KS' allowable range. Sodium gluconate, polyoxyethylene nonylphenyl ether, poly carboxylic copolymer in slump, which is characteristic of soft concrete, are deemed highly sensitive while there is no air entrainment except for 10 ~ 70% in WB, WR component content ratio and NP. In hardening concrete, strength in general showed higher action in compressive strength and tensile strength than in plain strength. Use of proper AE agent and AE water reducing agent at the same time is deemed to be used as chemical admixtures capable of manufacturing high-quality, high-quantity concrete.

키 워 드 : 화학혼화제, 성분함유율, 단위수량, 콘크리트특성

Keywords : Chemical Admixtures, Quantity of Agent, Unit Volume, Concrete Characteristics

1. 서 론

최근 건설공사가 초고층화, 다양화, 특성화됨에 따라 콘크리트 성능에 대한 요구가 다양화되고 콘크리트 자체의 내구성 또는 요구 품질에 대한 신뢰도에 많은 문제점이 대두되고 있다.

국내의 콘크리트 제조업체에서는 요구품질을 충족키 위하여 혼화재료의 개발 등을 통해 요구품질의 제조 및 공사기간의 단축, 원가절감 등의 목적을 이루고자 많은 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 최근에는 콘크리트의 품질변화 및 향상을 도모하기 위해 각종 혼화제를 사용하고 있는데 사용량이 비교적 적고 그 자체의 용적이 콘크리트 배합량의 계산에서 무시되고 있고, 1) 화학반응에 의한 많은 변화와 제품의 품질사양의 검증 없이 사용되어져 굳지 않은 상태에서 재료분리, 성형성의 문제점과 강도저하 및 화학혼화제의 다량첨가 시 응결 지연과 경제성 저하라는 문제점 등이 제기되고 있다. 2)

강도 및 내구성과 관련한 콘크리트 품질을 결정하는데 많은 영향을 미치는 W/C 및 단위수량은 현행 건축공사 표준시방서에서 일반적으로 상용되는 보통콘크리트의 경우 단위수량을 185kg/m³ 이하로 규정하고 있다. 3) 그러나 레미콘생산 및 현장에서 가수로 인해 재료분리, 건조수축 및 내구성 저하 등의 품질결함이 발생한다. 현재 건설수주가 해외에서 활발히 진행되고 있는 요즘 우리나라와는 사용재료에 대한 물성도 다소 차이가 있고, 기후 및 기타 여러 가지 조건이 열악한 실정이기 때문에 현장에서의 콘크리트 품질 관리가 매우 중요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 KS의 허용한도 범위의 단위수량에 의거하여 기존의 유기산계 혼화제에 다른 성분의 화학 혼화제를 10~90%로 각각 20%의 차이를 두어 대체하여 첨가하였을 경우, 굳지 않은 상태와 경화 상태에서의 콘크리트 특성을 분석하여 화학혼화제의 성분 함유율 변화에 따른 콘크리트용 혼화제로써의 활용가능성여부를 검토하고자 함이 본 연구의 목적이다.

* 충주대학교 건축공학과 교수, 공학박사

“이 논문은 2008년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임”

1) 한국콘크리트학회, 콘크리트 혼화재료, pp11~17, 2001

2) 한천구의, 혼화제 과다 첨가에 따른 콘크리트의 물성변화, 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회, 2007

3) 대한건축학회, 건축공사 표준시방서, pp.240, 1999

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험 계획은 표 1과 같으며, 먼저 배합사항 중 W/C는 55% 1개 수준으로 한다. 보통콘크리트의 단위수량은 KS의 최대치인 185kg/m³를 기준으로 실험을 통해 얻어진 50mm슬럼프에 대해 1개 수준으로 한다. 화학 혼화제는 원료 성분인 유기산계 성분 Sodium gluconate (이하약자 S로 표기), Triethanolamine (이하약자 T로 표기), 멜라민계 성분 Melamine (이하약자 M으로 표기), 폴리옥시에틸렌 옥시프로필렌 노닐페놀계성분 Polyoxyethylene nonylphenyl ether (이하약자 NP로 표기), 폴리카본산계 성분 Poly Carboxylic copolymer (이하약자 WR, WB로 표기)를 사용하였다. 실험 계획에 의한 실험 요인 및 수준은 표1과 같고, 실험사항은 표 2와 같으며, 이에 따른 배합사항은 표3과 같이 실시토록 한다.

표 1. 실험요인 및 수준

실험요인		수준					
배합사항	W/C (%)	1	55%				
	슬럼프(mm)	1	50(단위수량 185kg/m ³ 기준)				
	화학혼화제 종류 (시멘트 중량의 대한 0.5% 고정)	Plain					
		S10*	S30*	S50*	S70*	S90*	
		M10	M30	M50	M70	M90	
		WB10	WB30	WB50	WB70	WB90	
		WR10	WR30	WR50	WR70	WR90	
		T10	T30	T50	T70	T90	
		NP10	NP30	NP50	NP70	NP90	

* 10, 30, 50, 70, 90 (유기산계 100%에 각각 화학혼화제 10, 30, 50, 70, 90%의 첨가율로 적용)

표 2. 실험사항

굳지 않은 콘크리트	경화 콘크리트
<ul style="list-style-type: none"> · 슬럼프 · 단위용적질량 · 공기량 	<ul style="list-style-type: none"> · 압축강도 (재령 3, 7, 28일) · 인장강도 (재령 3, 7, 28일)

표 3. 콘크리트 배합사항

W/C (%)	단위수량 (kg/m ³)	S/a (%)	ad/C (%)	용적배합(ℓ/m ³)			질량배합(kg/m ³)		
				C	S	G	C	S	G
55	185	47	0.5	107	312	351	336	794	949

2.2 사용재료

본 실험에서 사용한 재료로 시멘트는 국내산 S사의 보통 포

틀랜드시멘트를 사용하고, 잔골재는 충북 충주시 양성면 남한강 일원의 강모래, 굵은 골재는 최대치수 25mm의 부순 골재를 사용한다. 시멘트 및 골재의 물리적 성질은 표 4, 5와 같으며, 화학혼화제의 원료별 특성은 표 6와 같다.

표 4. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (g/cm ³)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,480	0.06	250	438	22.6	31.3	39.8

표 5. 골재의 물리적 성질

골재종류	밀도 (g/cm ³)	조립률 (F.M)	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m ³)	입형판정 실적율 (%)	0.08mm체 통과량 (%)
잔골재	2.55	2.87	2.15	1.68	63.0	3.24
굵은골재	2.69	6.89	0.48	1.47	61.2	-

표 6. 화학 혼화제의 원료별 특성

구분	Sodium Gluconate	Melamine	Triethanol-amine	Polyoxyethylene nonylphenyl ether	Poly Carboxylic copolymer	
특성					WR	WB
분자식	C4H11O7N _a	C3H6N6	C6H15NO3	RC6H4O {(C2H4OnH) n=10}	COOHCOO (CH2CHOR) nR	
비중 (g/cm ³)	1.174 ~ 1.180	1.240 ~ 1.246	1.115 ~ 1.118	1.050 ~ 1.060	1.096 ~ 1.110	1.091 ~ 1.110
PH	6.24 ~ 6.89	10.4 ~ 11.8	9.83	6.5 ~ 7.0	6.11 ~ 6.21	6.15 ~ 6.25
고형분 함량 (%)	33.0	40.0	30.1	0.04	40.22	40.13

2.3 실험 방법

본 연구의 실험방법으로는 굳지 않은 콘크리트 시험으로는 KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험방법, KS F 2409 굳지 않은 콘크리트의 단위 용적 질량 및 공기량 시험 방법, KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트 공기량 시험방법의 각각 KS의 해당 규정에 의거 실시한다.

경화 콘크리트의 실험에서는 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법, KS F 2423 콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험방법의 규정에 의거 실시한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험 결과

표 7은 화학혼화제의 성분함유율 변화에 따른 실험결과를 나타낸 표이다.

표 7. 실험 결과

구분 종류	굳지 않은 콘크리트			경화 콘크리트					
	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	단위용적 질량 (kg/m ³)	압축강도 (MPa)			인장강도 (MPa)		
				3일	7일	28일	3일	7일	28일
Plain	53	1.0	2348	15.2	18.9	24.0	1.62	2.1	2.68
S10	50	1.2	2358	17.9	23.8	28.0	2.22	2.47	3.08
S30	72	1.2	2348	15.8	23.9	25.2	1.8	2.25	3.0
S50	150	1.0	2365	18.9	22.4	28.1	1.75	2.23	3.0
S70	188	1.1	2367	15.2	22.9	34.0	1.5	2.1	2.9
S90	182	0.9	2363	14.9	24.0	27.1	1.5	2.7	3.52
M10	50	1.1	2365	19.0	23.9	27.5	1.5	2.5	3.4
M30	62	1.2	2363	19.2	20.2	32.0	1.6	2.8	2.9
M50	62	1.2	2367	20.0	25.1	33.0	2.0	2.75	3.6
M70	58	1.0	2360	18.2	20.4	23.6	1.7	2.0	2.83
M90	57	1.2	2362	18.8	22.4	28.5	1.5	2.25	2.9
WB10	56	1.4	2346	19.8	23.9	31.0	2.0	2.4	3.18
WB30	98	1.8	2338	17.7	22.7	24.7	1.62	1.67	2.27
WB50	198	2.5	2305	17.6	19.6	25.2	1.9	2.2	2.87
WB70	208	2.5	2330	17.3	20.1	24.7	1.9	2.4	3.1
WB90	226	1.8	2335	16.0	19.0	29.3	1.9	2.28	3.0
WR10	57	1.4	2335	18.0	18.7	28.0	2.3	2.38	2.5
WR30	88	1.5	2340	15.4	22.5	28.0	2.3	2.67	3.6
WR50	150	2.0	2324	17.9	18.6	25.4	1.6	1.95	2.6
WR70	178	2.0	2322	18.0	20.4	26.4	1.7	2.0	2.5
WR90	202	1.2	2358	18.3	22.2	29.0	1.6	2.43	3.13
T10	55	1.1	2362	14.5	19.9	28.0	2.0	2.08	2.25
T30	65	1.1	2358	16.4	17.1	18.3	1.78	2.5	3.38
T50	65	1.1	2362	15.7	20.2	24.0	1.25	2.0	2.5
T70	58	1.4	2355	15.9	25.6	25.3	2.0	2.38	3.0
T90	57	1.2	2362	16.4	17.0	26.0	1.5	2.1	2.8
NP10	65	1.1	2355	17.9	22.2	31.0	2.0	2.25	2.33
NP30	110	1.7	2338	13.9	22.1	28.2	1.84	2.12	2.8
NP50	128	2.1	2310	16.1	17.0	26.0	1.25	2.47	3.07
NP70	192	2.2	2315	18.9	28.4	28.3	2.02	2.1	2.62
NP90	192	2.2	2312	15.8	20.3	25.0	1.5	2.22	2.38

3.2 굳지 않은 콘크리트 특성

3.2.1 슬럼프

그림 1은 혼화제 종류별 성분함유율변화에 따른 슬럼프를 나타낸 그래프이다.

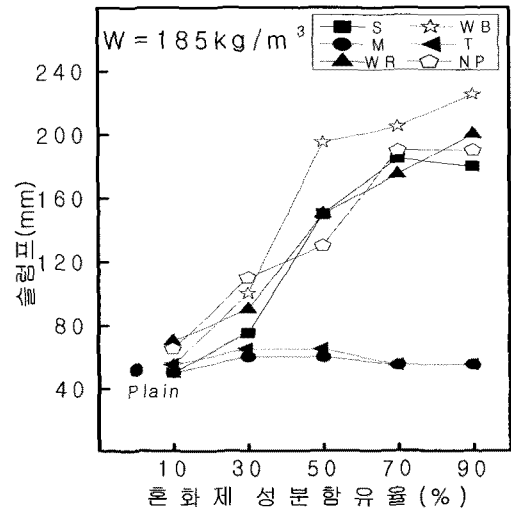


그림 1. 혼화제 종류별 성분함유율 변화에 따른 슬럼프

혼화제 성분 함유율이 증가함에 따라 S, WB, WR, NP의 혼화제에서 모두 슬럼프치가 증가하는 경향으로 나타났으며, 특히, WB혼화제에서 첨가량 50%이후부터는 200mm 이상의 가장 큰 슬럼프치를 나타내었다. 다음으로 NP, WR, S계의 혼화제에서도 첨가율이 증가할수록 급격히 슬럼프치 증가 경향으로 나타났다. 반면에, M과 T계의 혼화제에서는 성분함유율의 변화와 상관없이 50mm 내외 정도의 작은 슬럼프치를 나타내었다. 이는 M계와 T계의 혼화제를 제외하고 나머지 혼화제에서는 비이온 계면활성작용과 유지 및 분산작용으로 인하여 감수효과가 크게 나타난 것으로 판단된다.

3.2.2 공기량

그림 2는 혼화제 성분함유율변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다.

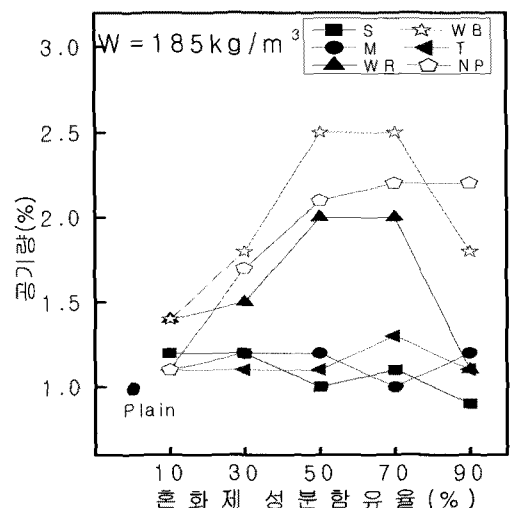


그림 2. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 공기량

NP계의 혼화제의 경우 성분 함유율이 증가함에 따라 Plain보다 약 0.4~1.3%정도 증가하는 경향이 나타났다. WB, WR계의 혼화제의 경우에는 70%까지 Plain보다 약 0.3~1.5%정도 증가하는 경향이 나타났으나, 그 이후로 함유율 90%일 때 급격히 감소하는 경향으로 나타났다. 그 외의 혼화제에서는 Plain보다 약간 상회하는 경향이 나타났으며, 성분 함유율과는 거의 무관한 것으로 나타났다. 전체적으로는 모든 혼화제에서 KS허용한도 범위인 4.5±1.5%에 벗어나는 공기량이 나타났다. 단, NP계의 혼화제에서만 성분 함유율이 증가할수록 공기연행 효과가 증가하는 경향으로 나타났는데 이는 용액에서 가수분해 되지 않은 불휘발성의 비이온 계면활성작용에 의한 요인으로 분석된다.

3.2.3 단위용적질량

그림 3은 혼화제 종류별 성분함유율에 따른 단위용적질량을 나타낸 그래프이다.

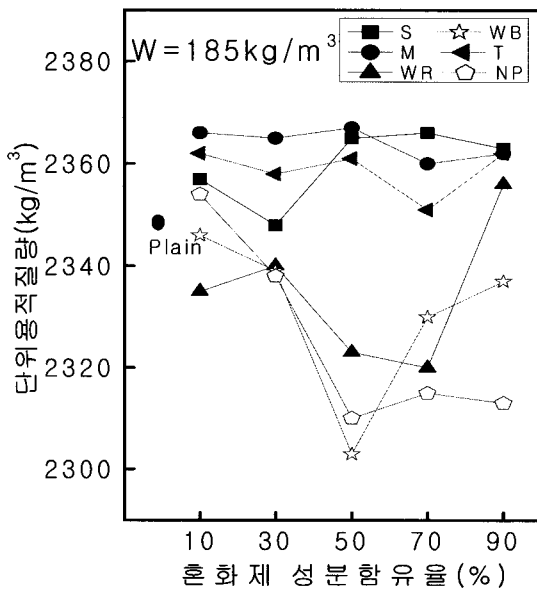


그림 3. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 단위용적질량

단위용적질량은 공기량과는 거의 반비례적인 경향을 나타내고 있기 때문에, 공기량이 다소 증가하는 혼화제에서는 단위용적 질량이 전반적으로 작게 나타나고 있다.

3.3 경화 콘크리트 특성

3.3.1 압축 및 인장강도

1) 압축강도

그림4, 5는 혼화제 성분함유율 변화에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다.

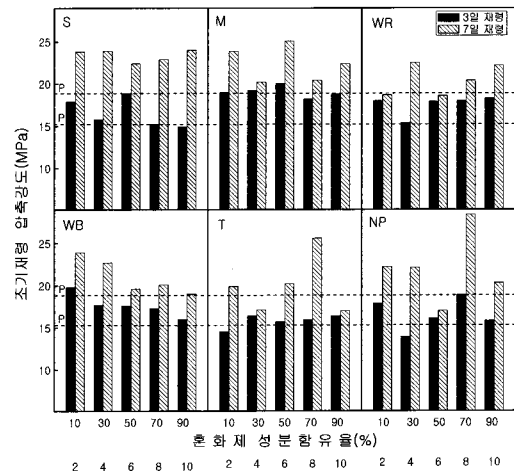


그림 4. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 조기재령 압축강도

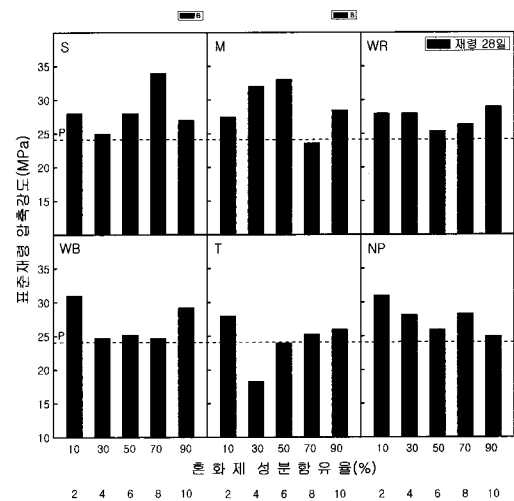


그림 5. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 표준재령 압축강도

조기재령 3일에서는 T에 10%, NP에 30%를 제외하고, 모든 혼화제 성분함유율에서 Plain보다 약 2~4.8 MPa 정도의 양호한 강도 발현을 나타내고 있으며, 재령 7일에서는 S, M, WB의 모든 함유율에서 약 3~8 MPa 정도 Plain의 강도값 이상의 양호한 경향을 나타내었다.

표준재령 28일에서는 S, M, WB, NP의 혼화제에서 약 2~10 MPa 정도의 Plain의 강도값 이상의 양호한 강도발현을 나타내고 있으며, M, T의 혼화제에서는 각각 1개씩의 함유율을 제외하고는 양호한 강도발현 경향을 나타내었다.

전반적으로 압축강도 발현요인은 S, M계의 혼화제에서는 비중이 매우 크고, 고품분의 함유량이 다량 함유되어 높은 압축 강도를 발휘하였고, NP, WR, WB는 화학혼화제의 폴리머 성분이 시멘트와 수화하면서 폴리머 화이버를 생성하여 압축 강도 발현에 양호하게 기여한 것으로 사료된다.

2) 인장강도

그림 6, 7은 혼화제 성분함유율 변화에 따른 인장강도를 나타낸 그래프이다.

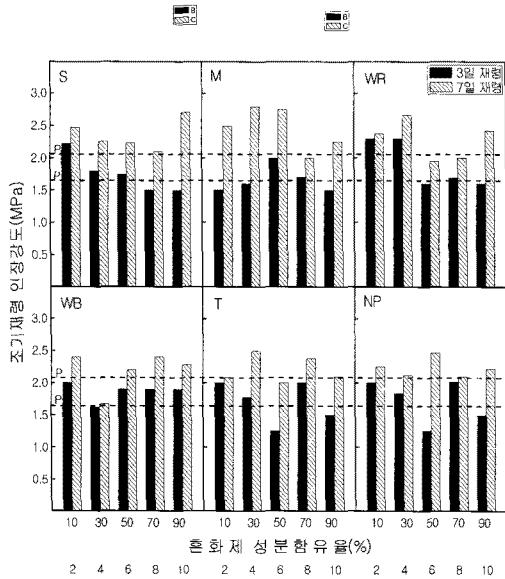


그림 6. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 조기재령 인장강도

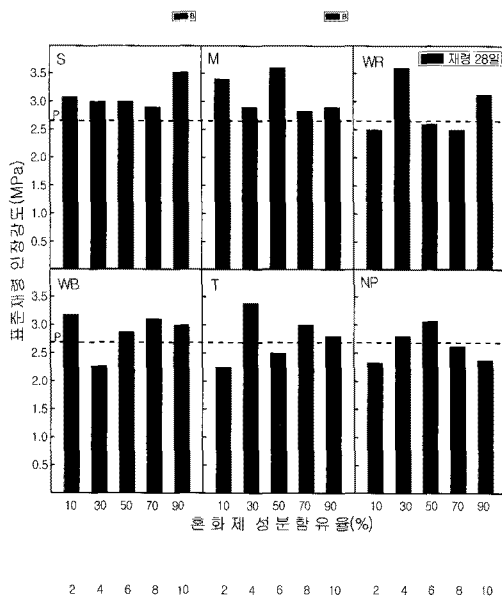


그림 7. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 표준재령 인장강도

조기재령 3일에서는 S계의 90%를 제외하고, WB계의 모든 혼화제에서 약 0.3~4.8Mpa정도 Plain보다 약간 큰 인장강도 증가를 나타냈으며, 전반적으로 T, NP계의 함유율 50%를 제외하고, Plain과 비슷한 인장강도를 보이고 있으며, 재령 7일에서는 WR계의 함유율 50, 70%, WB, T계의 함유율 30%를 제외하고, 모든 혼화제 성분 함유율에서 Plain보다 높은 인장강도 값을 나타내었다.

재령 28일에서는 S계에서 약 3.48MPa의 강도발현 최대치가 나타났고, WR, T, NP에서는 2~3개의 성분 첨가량에서만 Plain의 강도 값을 상회하는 경향을 나타내었는데, 인장강도의 발현요인 또한 화학혼화제의 비중 및 고형분 함유량의 과소에 따른 요인과 화이버의 생성요인 등이 강도 발현에 영향을 미친 것으로 사료된다.

3.3.2 압축 및 인장강도 발현율

1) 압축강도 발현율

그림 8, 9는 혼화제 성분 첨가량에 따른 Plain의 재령별 강도 값을 100%로 환산하여 압축강도 발현율을 3, 7일의 조기재령과 28일 표준재령으로 나타낸 그래프이다.

S, T, WR, WB, T, NP계의 혼화제 성분의 재령 3일 압축강도 발현율은 전반적으로 S계의 70~90%, T계의 10%, NP계의 20%를 제외한 나머지 혼화제 성분에서 Plain보다 증가하는 경향으로 나타났으며, 특히 M계의 혼화제에서 높은 압축강도 발현율이 나타났다.

재령 7일의 압축강도 발현율은 T계의 30, 90%를 제외하고, 모든 혼화제 성분에서 Plain보다 약 10%~50%의 양호한 압축강도 발현율이 나타났으며, 특히 NP계의 함유율 50%일 때 가장 큰 발현율이 나타났다.

표준재령 28일에서는 T계의 성분함유율 30%의 저조한 발현율을 제외하고, 모든 혼화제에서 Plain과 같거나 높게는 약 40%의 발현율까지 나타났음을 알 수 있다.

T계의 화학혼화제에서 강도 발현율이 다소 작은 요인은 비중이 다소 작고, 고형분 함량이 작은 것에 기인된 결과로 분석된다.

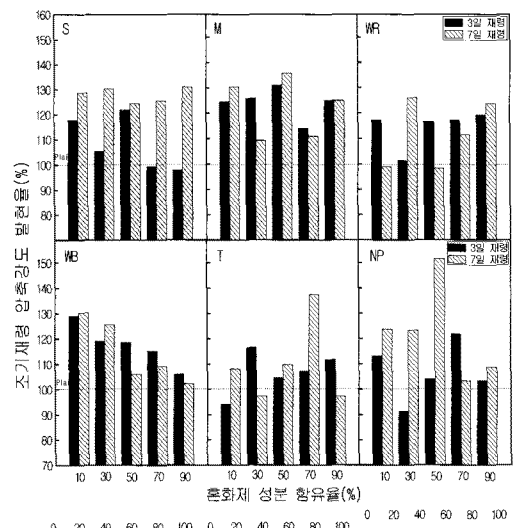


그림 8. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 압축강도 발현율(조기재령)

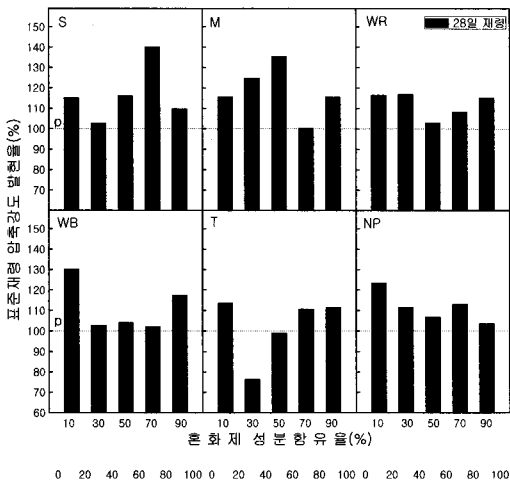


그림 9. 혼화제 성분첨가량 변화에 따른 압축강도 발현율(표준재령)

2) 인장강도 발현율

그림 10, 11은 혼화제 성분 첨가량에 따른 Plain의 재령별 강도 값을 100%로 환산하여 인장강도 발현율을 3, 7일의 조기재령과 28일 표준재령으로 나타낸 그래프이다.

조기재령 3일에서는 S, WR, WB계에서 양호한 인장강도 발현율을 나타내었고, S계의 성분함유율 10%, WR계의 성분 함유율 10~30% 일 때, Plain보다 약 38~42%정도 가장 큰 발현율을 나타내었으며, 재령 7일의 인장강도 발현율에서는 M계의 70%, WR의 50~70%, WB계의 30%, T계의 50%를 제외하고 plain보다 약 3~28%정도 발현율을 나타내었다.

표준재령 28일 발현율에서는 S계의 90%, M계의 10, 50%, WR계의 30%, T계의 30%일 때 plain보다 약 30%이상의 인장강도 발현율을 나타내었으며, WB계의 30%, T계의 10%, NP계의 10, 90%에서는 저조한 발현율이 나타났다.

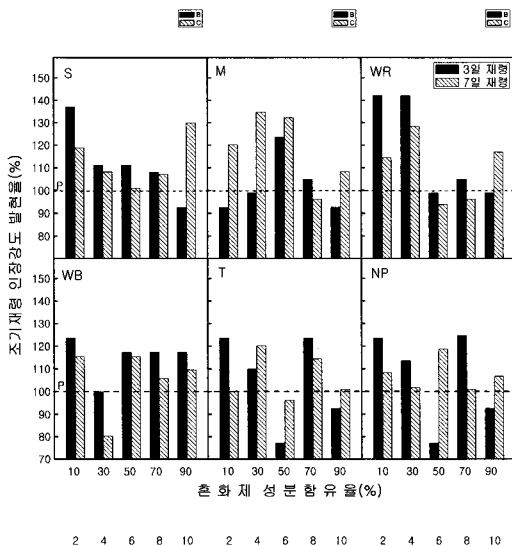


그림 10. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 인장강도 발현율(조기재령)

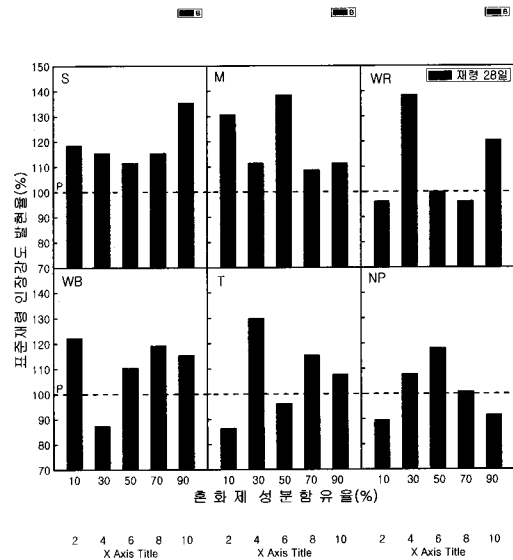


그림 11. 혼화제 성분함유율 변화에 따른 인장강도 발현율(조기재령)

4. 결 론

본 연구는 유기산계 화학혼화제에 다른 종류의 화학혼화제를 대체하여 첨가하였을 경우, 성분함유율 변화에 따른 콘크리트용 혼화제로써의 활용가능성 여부를 판단키 위한 실험으로써 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 굳지 않은 콘크리트의 특성으로 먼저 슬럼프는 혼화제 성분 함유율이 증가함에 따라 S, WB, WR, NP계의 혼화제에서 모두 슬럼프치가 증가하였으며, 반면, M, T계의 혼화제에서는 Plain과 유사한 경향으로 나타났다. 이는 Sodium gluconate계와 Polyoxyethylene nonylphenyl ether, Poly Carboxylic copolymer계의 성분이 비이온 계면활성작용과 유지 및 분산작용으로 인한 원인으로 판단된다.
- 2) 공기량은 모든 화학 혼화제 성분 함유율 변화에서 KS 허용한도범위인 4.5 ± 1.5 에 벗어나는 공기량을 나타내었으나, NP계의 경우에는 화학 혼화제의 성분 함유율 증가에 따라 공기량이 증가하는 경향으로 나타났는데, 이는 비이온 계면활성작용에 의한 요인으로 판단된다. 또한 단위용적 질량은 공기량과 반비례적인 경향을 나타내었다.
- 3) 경화 콘크리트의 특성으로 압축강도는 S, M, NP, WR, WB등의 화학 혼화제에서 양호한 압축강도 발현을 나타내었는데, 이는 비중이 크고 고흡분 함량이 다량 함유되어 있는 요인과 폴리머의 경우는 하이버의 생성에 의한

강도증진에 기여한 요인으로 분석된다.

- 4) 인장강도에서의 3일, 7일의 조기재령에는 S계의 90%, WR계의 50%, 70%, WB, T계의 30%를 제외하고 전반적으로 높은 인장강도를 나타내었으며, 28일의 표준재령에서는 S, M 의 화학혼화제의 모든 성분 함유율 변화에서 Plain보다 양호한 강도발현을 나타내었다.
- 5) 압축강도 발현율에서의 3일, 7일의 조기재령에서는 S계의 70~90%, T계의 10, 30, 90%, NP계의 20%를 제외하고 전반적으로 Plain보다 높은 압축강도 발현율을 나타내었으며, 28일 표준재령 발현율에서는 T계의 30%를 제외하고 모든 혼화제의 성분 함유율에서 Plain보다 높은 압축강도 발현율을 나타내었는데, T계의 혼화제는 비중이 다소 작고 고품분함량이 작은것에 기인된 결과로 분석된다.
- 6) 인장강도 발현율에서의 3일, 7일의 조기재령에서는 전반적으로 양호한 발현율을 나타내었으며, 특히 3일재령의 S계의 10%, WR계의 10~30% 일 때, Plain보다 약 40%이상의 가장 높은 인장강도 발현율을 나타내었다, 또한, 28일 표준재령 발현율에서는 S계, M계의 모든 성분함유율에서 Plain보다 높은 발현율을 나타내었다.

본 실험을 통하여 유동성 측면에서는 S, WB, WR, NP계의 혼화제에서 양호하고, 강도적인 측면에서는 S, M, NP, WB, WR순으로 양호한 강도 발현을 나타내고 있으며, 적절한 AE 공기연행제를 병용하여 사용하면 양질의 콘크리트를 제조 할 수 있는 화학혼화제로써의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 2008년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임을 밝혀드리며, 본 연구실험에 많은 도움을 주신 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 혼화재료, pp.11~17, 2001
2. 한천구의, 혼화제 과다 첨가에 따른 콘크리트의 물성변화, 한국 콘크리트학회, 봄 학술발표회, 2007
3. 대한건축학회, 건축공사 표준시방서, pp.240, 1999
4. 김병기, 김송호, 콘크리트용 화학 혼화제의 개발 및 연구의 최신 동향, 콘크리트학회지 2002.1
5. 정현수, 일반혼화제의 특성과 이용, 한국콘크리트학회 1991.9
6. 정재동, 콘크리트용 화학혼화제, 최근의 기술개발 동향, 콘크리트학회지 1998.2
7. 한천구, 콘크리트 특성과 배합설계, 기문당, 1998.7
8. Tarun R. Naik, Shiw S. sin호, Mathew P. Tharaniyil, and Robert B. Wendorf, Application of Foundry By-Product Materials in Manufacture of concrete and Masonry Product, ACI Materials Journal, January-February pp.44~51, 1996

(접수 2009. 2. 2, 심사 2009. 3. 31, 게재확정 2009. 4. 13)