

# 지하구조물의 열화방지를 위한 수밀성 콘크리트의 개발

## Development of Low Permeable Concrete for the Control of Deterioration in Underground Structures

백 상 현 <sup>*</sup>	박 성 수 <sup>**</sup>	박 종 유 <sup>***</sup>	백 원 준 <sup>****</sup>	엄 태 선 <sup>*****</sup>	최 룡 <sup>*****</sup>
Paik, S. H.	Park, S. S.	Park, J. Y.	Paik, W. J.	Um, T. S.	Choi, L.

In underground reinforced concrete structures, such as drainage structure, water and chloride ion penetrated into concrete through the cracks of concrete and its permeable property, cause the corrosion of reinforcing steel bar, which accelerates the expansive cracks and deterioration of concrete. It is necessary to control those deterioration of underground structure by improving its permeability and durability through the reasonable solutions in design, construction and materials.

In the present study, fly ash concrete, which has good material properties in long-term period, is compared and studied with plain concrete using ordinary portland cement in terms of fundamental mechanical properties, permeability, drying shrinkage and durability. Also, the mix design and its properties of low permeable concrete using fly ash are reviewed. From this study, fly ash concrete can control the penetration of water and chloride ion effectively by forming dense microstructure of concrete. Therefore, fly ash concrete may increase the long-term function, performance and serviceability of underground structures.

### 1. 서론

배수지 및 지하차수벽 등의 지하 RC구조물은 균열 및 수밀성 저하로 인하여 내부로 침투되는 수분 및 각종 염이온 등에 의해 철근이 부식되어 콘크리트의 팽창균열 및 열화를 가속화하게 된다. 특히, 배수지 구조물은 저수중인 상수원에 용해되어 있는 미량의 염소이온( $Cl^-$ )이 지속적으로 내부로 침투되므로 장기적인 열화가 쉬운 조건에 있다. 이러한 지하구조물의 장기 사용성을 증대시키기 위하여는 수밀화를 위한 설계, 시공 및 재료의 종합 대책을 수립함으로써 장기적 열화를 억제할 필요가 있다.

본 연구에서는 1종시멘트를 적용한 콘크리트와 장기 강도 및 수밀성이 우수한 것으로 알려진 fly ash 콘크리트의 기초물성, 수밀성 및 내구성을 비교, 평가하고 배합기술 및 특성을 검토함으로써, 지하구조물을 위한 고품질 수밀콘크리트의 제조조건을 마련하고자 하였다.

### 2. 배수지 구조물의 열화원인 및 제어 대책

배수지 구조물과 같은 지하구조물의 열화원인 및 제어 대책을 표 1에 정리하였는데, 이중 가장 중요한 대책은 콘크리트의 수밀화 및 수축균열의 제어이며, 이를 위하여는 수밀콘크리트의 재료, 시공 및 설계에 대한 종합적 대책이 필요하다.

- \* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 연구원
- \*\* 정회원, 서울시 대현산 배수지 공사 감리단 신우Eng., 단장
- \*\*\* 정회원, 서울시 대현산 배수지 공사 시공사 남광토건(주), 소장
- \*\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 레미콘팀 차장
- \*\*\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 책임연구원
- \*\*\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 소장

표 1 지하 RC 구조물의 열화 원인 및 대책

열화 원인	대책	
외적 환경 요인에 의한 열화	1) 수분 및 염소이온의 침투 2) 화학부기염에 의한 침식	- 콘크리트 조직 치밀화 · 수밀성, 내구성 재료 · 적합한 재료/실제/시공
침하 및 수축에 의한 균열	1) 소성수축/침하에 의한 균열 2) 건조수축에 의한 균열	- 배합설계/시공 - 저수축형 재료
수화열에 의한 균열	1) 열응력에 의한 균열	- 수화열 저감형 재료/시공

3. 콘크리트 시험용 원재료 기초 특성

3.1 원재료

3.1.1 사용 골재 및 혼화제-

표 2 잔골재 특성

특성 종류	잔 골 재 특 성(혼합사)					
	비중	흡수율(%)	단위용·중(kg/m <sup>3</sup> )	조립율	씻기손실량(%)	유기불순물
규 격	≥2.50	≤2.0	≥1,450	2.3~3.1	≤7.0	표준색
현 장	2.61	1.5	1,606	2.62	3.0	담황색

표 3 굵은골재 특성

특성 종류	굵 은 골 재 특 성						
	비중	흡수율(%)	단위용·중(kg/m <sup>3</sup> )	실적율(%)	조립율	파쇄율(%)	마모율(%)
규 격	>2.55	<2.0	>1,500	-	-	-	<40
현 장	2.62	0.9	1,718	65.6	6.86	26	30

표 4 혼화제 특성

제품	TYPE	감수효과	적정 첨가량	비 고
NM	AE감수제	10%	0.15%	
P78	고성능AE감수제	15~20%	0.5~1.0%	

3.1.2 시멘트 및 fly ash

표 5 시멘트 특성

1종 C/M	화 학 성 분 (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Ig-loss	
	20.7	5.9	3.2	63.1	3.2	0.09	0.84	1.6	1.2	
	물 리 특 성									
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	용 결			압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			수화열(Kcal/g/°C)			
	초결 m	종결 h:m	3일	7일	28일	7일	28일			
	3300	300	7:10	187	276		82.1	93.4		

표 6 fly ash 특성

fly ash	화 학 성 분 (%)									물 리 특 성	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Ig-loss	Blaine(cm <sup>2</sup> /g)	비중(tf/m <sup>3</sup> )
	53.08	29.02	4.06	4.65	1.19	0.45	1.00	1.42	3.90	4,276	2.31
1종 + F.A.25% (KS L 5405)	품 질 특 성										
	용 결			압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			단위수량비(%)		압축강도비(%)		
	초결 m	종결 h:m	3일	7일	28일	98		3d	7d		
	350	9:00	136	206				73	75		

#### 4. fly ash를 사용한 콘크리트의 특성 평가

##### 4.1 개요

본 연구에서는 지하 배수지구조물의 수밀화를 위한 재료적 대책으로써, 장기 수밀성이 유리한 fly ash 콘크리트의 특성을 평가하여 수밀콘크리트를 위한 적정 배합조건 및 시공 대책을 검토하고자 하였다. 여기서 fly ash 사용량을 20%이하 범위에서 검토하였는데, 이는 과량의 fly ash를 사용하면 초기강도의 과다한 저하로 공기 지연과 현장 양생조건의 변동에 따른 장기 물성의 저하가 야기될 수 있기 때문이다. 특히 국내외 시험결과에서는 20~30%까지의 사용량 범위에서는 수밀성-침투성-이 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 보고되고 있다.

배합시험을 통하여 선정된 fly ash 사용량별 콘크리트 배합조건은 표 7과 같다. 여기서, CTR-P 배합은 지하 배수지구조물에 적용되고 있는 25-240-15 레미콘의 시방 배합이다. 한편, fly ash 사용에 따른 잔골재율은 CTR-P의 굵은골재 용적을 제외한 모르터 용적과 동등한 용적을 차지하도록 수정하였는데, fly ash의 작은 비중 특성으로 인해 총바인더의 용적이 늘어나므로 잔골재율이 감소하게 된다.

표 7 fly ash 사용에 따른 콘크리트 특성평가를 위한 적용 배합

시험명	S/a (%)	W/C(B) (%)	사용재료량(kgf/m <sup>3</sup> )			AE감수제 (C <sup>wt</sup> %)	**AE제 (kg/m <sup>3</sup> )	S/L (cm)	Air (%)
			시멘트(바인더)		W				
			fly ash	총바인더					
CTR-P	44.8	50.9	0	375	191.0	0	15±2	4.5±1	
FA5-P	44.6	51.3	18.8	375	192.5	5.625			
FA10-P	44.4	51.7	37.5	375	194.0	11.25			
FA15-P	44.2	52.1	56.3	375	195.5	16.875			
FA20-P	44.0	52.3	75.0	375	196.0	22.5			

##### 4.2 fresh concrete의 특성

플라이애쉬 중의 미연탄분량은 굳지않은 콘크리트의 특성에 영향을 미치는데, 특히 미연탄소의 다공질이 AE제를 흡착하여 소요 공기량의 확보가 어렵다. 배합시험결과, fly ash의 사용량이 증가할수록 동일 공기량을 위한 AE제 소요량이 증가하였는데, fly ash 사용량이 5%씩 증가함에 따라 동일 공기량을 위한 AE제 소요량이 약 28%가량 추가로 소요되었다(그림 1).

fly ash는 구형(球形) 입자의 볼베어링 효과에 의해 Workability를 개선하여 요구 단위수량이 감소되는 것으로 알려져 있으나, 각 수준별 시험결과(그림 2), fly ash의 치환량 증가에 따라 단위수량은 다소 증가되는 것으로 나타났다. 이는 본 시험에 사용된 fly ash가 4,200cm<sup>2</sup>/g 가량의 높은 분말도이므로 이에 따른 요구수량 증가와 볼베어링 작용에 의한 감소효과가 서로 상쇄되기 때문으로 판단된다. 이러한 단위수량의 증가는 fly ash를 15% 사용하는 경우, 약 2% 증가하여 콘크리트의 수축을 크게 할 정도의 증가량은 아닌 것으로 판단된다.

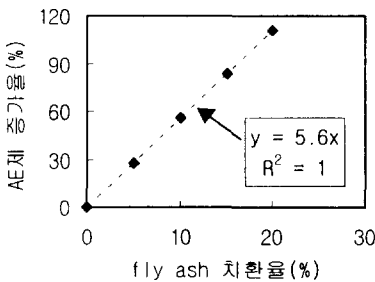


그림 1 수준별 요구 AE제량의 증가율

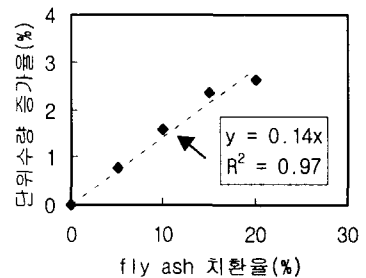


그림 2 수준별 단위수량의 증가율

### 4.3 강도 특성

fly ash의 사용량에 따른 압축강도를 각 재령별로 측정된 결과를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. fly ash 15% 사용시, 재령 3일에서 CTR-P의 압축강도에 대하여 약 80%까지 저하되었으나, 7일에서 약 85%까지 회복하였으며, 재령 28일에서는 90%까지 회복되었다. 이와같이 fly ash의 사용에 따라 초기 재령에서 저하된 강도는 재령이 경과하면서 더욱 증진되므로, 장기 재령에서의 제반 물성이 더욱 증진될 것으로 판단된다. 따라서, fly ash를 사용하는 콘크리트는 설계강도를 장기 재령에서 설계하면 내구성 및 경제성에 있어서 유리하게 된다.

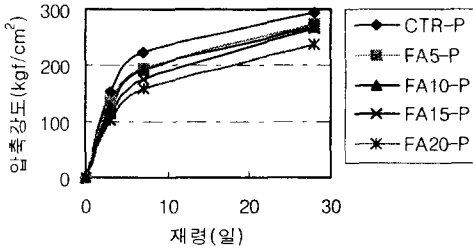


그림 3 재령경과에 따른 압축강도 발현

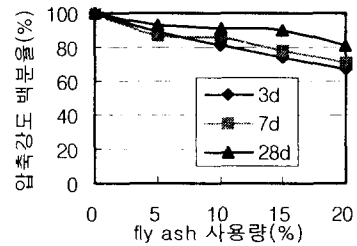


그림 4 fly ash 사용량에 강도 발현율

### 4.4 수밀성

#### 4.4.1 내투수성

수분 침투에 대한 저항성을 평가하기 위하여 정수압(200psi ; 약 14kg/cm<sup>2</sup>)에서 물의 누수량을 측정하는 투수시험을 수행하였는데, 그 결과를 그림 5에 나타내었다. CTR-P 시험에 대하여 fly ash를 20% 사용하는 경우, 투수계수가 약 50%가량 감소하여 fly ash를 10%이상 사용하면 투수저항성을 개선할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4.4.2 Cl<sup>-</sup> 투과성

염소이온은 철근을 둘러싸고 있는 부동태피막을 파괴함으로써 철근 부식을 가속화시켜 균열로 인한 구조물의 열화를 야기하므로, 콘크리트 조직의 수밀성을 증대시켜 염소이온의 침투를 억제할 필요가 있다. 따라서, 콘크리트 내부로 침투하는 염화물 이온의 양을 평가하는 것은 매우 중요하지만, 염화물 이온의 투과성을 측정하는 방법들은 수개월의 기간이 소요되며, 내부조직에 결합된 염화물의 양을 계산하기 힘들고, 조직이 치밀한 공시체에 대하여는 측정이 거의 불가능한 단점이 있다. 이러한 시험방법의 대안으로써 강제적 전위차에 의해 염화물을 투과시키는 급속염분 투과시험방법이 ASTM C 1202에서 제정되었다.

본 연구에서는 수밀성을 평가하기 위하여 ASTM C 1202에서 제정된 급속 염분 투과 시험방법에 의해 각 수준별 투과전하량을 측정하였는데(그림 6), fly ash 사용에 따라 초기재령의 수밀성은 증진되지 않았으나, 재령 28일 이후에서는 투과전하량이 감소하였다. 특히, 재령 56일의 시험결과, fly ash를 15% 이상 사용하면 그 침투량이 50%가량 감소되는 결과를 보여, 구조물의 장기적인 사용기간 동안의 염소이온 및 수분의 침투로 인한 구조물의 열화에 대한 억제 효과가 증대될 것으로 판단된다.

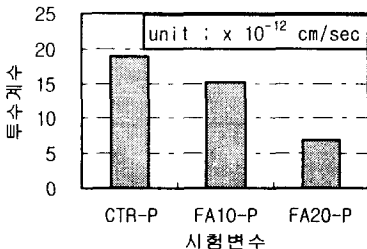


그림 5 수준별 투수계수(14일 양생)

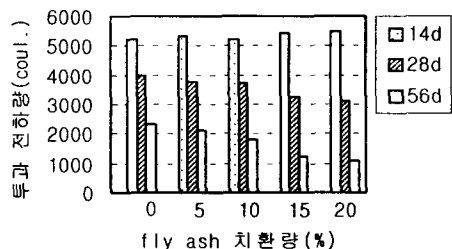


그림 6 fly ash 치환량에 따른 투과 전하량

#### 4.5 건조수축 특성

건조수축으로 인한 균열은 지하구조물의 누수 및 열화를 야기하는 주된 요인의 하나가 된다. 따라서, 본 연구에서는 fly ash의 사용에 따른 건조수축특성에 대한 시험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. fly ash 치환율 증가에 따라 기건 재령 1개월 이내에서는 다소 감소하는 경향을 보였으며, 2개월 이상의 장기재령에서는 거의 동등한 건조수축량을 보였다. 특히 재령 2주이내에는 수축량이 보다 크게 감소하였는데, 이는 수축에 있어서 초기재령의 페이스트 자체반응으로 인한 자기수축(autogeneous shrinkage)량이 fly ash 사용에 의하여 상대적으로 감소하기 때문이다. 또한, 재령이 경과할수록 수분증발 및 포졸란 반응에 의해 수축량이 초기재령에 비하여 상대적으로 많아지고 있으나 fly ash를 사용하지 않는 배합에 대하여는 거의 동등한 수축량을 나타내었다. fly ash를 20% 사용하는 배합의 경우, 재령 1주 경과까지 CTR-P 시편에 비하여 약 20%의 수축량 감소를 나타내었다. 이와같이 fly ash의 사용은 초기 수축을 지연시키므로 초기의 수축응력을 감소시켜 초기균열을 억제 혹은 지연하는데 있어서 유리하다.

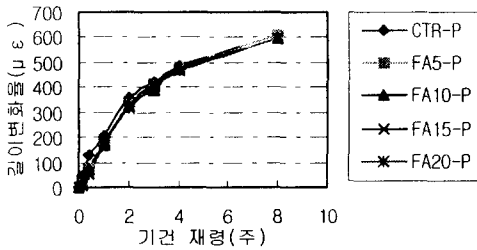


그림 7 재령경과에 따른 건조수축 특성

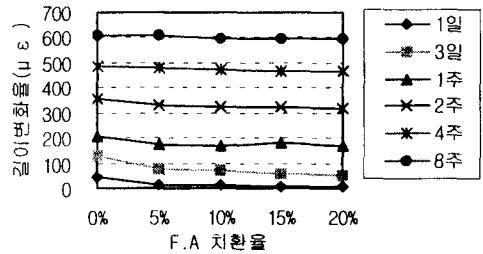


그림 8 fly ash 사용량에 따른 건조수축 특성

#### 4.6 내구성

##### 4.6.1 중성화 특성

속진 중성화 시험결과(그림 9), fly ash의 사용에 따라 중성화 깊이가 증가하였다. 이는 혼합시멘트가 포졸란 반응으로 수산화칼슘의 양이 줄어들어 알칼리성을 감소시키기 때문이다. CTR-P에 대하여 fly ash 10%이하에서는 중성화에 큰 변화를 보이지 않았으며, 15%이상 사용한 경우 초기 시험재령(2주이내)에서 1.5~2.5배, 이후 시험재령 4주까지 1.5배의 중성화 깊이를 나타내어 재령이 경과할수록 중성화 진행속도가 감소하는 것으로 나타났다.

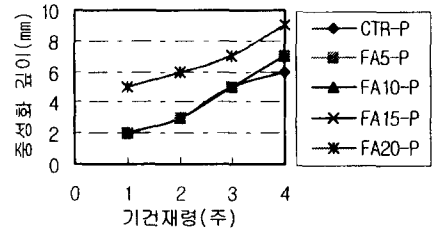


그림 9 수준별 속진 중성화 깊이

##### 4.6.2 내황산염 특성

fly ash 사용에 따른 황산염 저항성을 평가하기 위하여 fly ash 0, 10, 20% 수준의 공시체에 대하여 내황산염시험을 수행중이며, 그 결과를 향후 보고할 예정이다.

#### 5. 수밀콘크리트의 특성 및 제조기술(향후 계획)

본 장에서는 fly ash를 사용한 수밀콘크리트의 적용을 위한 제반 제조조건 및 특성을 보완하기 위하여 진행중인 내용을 정리하였다.

##### 5.1 고성능AE감수제의 적용성 검토 ; 경시변화 특성, 압축강도, 수밀성, 건조수축, 내구 특성

콘크리트 제조시 단위수량을 감소시키면 수밀성 및 내구성이 개선되고, 건조수축량을 줄일 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 일반 레미콘에 적용되고 있는 AE감수제와 감수효과 및 경시변화 특성이 양호한 고성능AE감수제의 적용 특성을 평가하고자 한다.

## 5.2 동일 기준강도에서의 시방배합 검토

28일 기준 설계강도에 대하여 fly ash 콘크리트의 강도는 일반 콘크리트의 강도보다 저하된다. 따라서, 동일 기준강도 조건에서는 fly ash의 사용시, 물-시멘트(바인더)비가 감소되어 수밀성 및 내구성이 보다 증대될 것이다. 이를 위한 시험계획은 다음과 같다.

- (1) fly ash 콘크리트의 배합설계(W/C 및 S/a 선정)
- (2) 동일 압축강도에서의 fly ash 콘크리트의 특성 ; 수밀성 및 내구성

## 6. 결론

본 연구에서는 지하구조물, 특히 배수지 구조물 등의 장기적 열화를 야기하는 제반 인자 및 제어 대책에 대하여 검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 배수지 구조물의 열화를 억제하기 위하여는 재료, 시공 및 설계에 대한 종합적 접근 및 대책이 필요하며, 이 중 가장 중요한 재료적 대책은 콘크리트의 수밀화 및 수축균열의 제어이다.
- 2) fly ash를 사용한 콘크리트는 초기 강도가 저하되므로 타설 초기에 적절한 양생이 필요하며, 재령이 경과할수록 강도 발현이 커지므로 콘크리트의 제반 장기물성이 양호해질 것으로 판단된다.
- 3) 급속 염분 투과시험 및 내투수성 시험 결과, fly ash를 15% 이상 적용한 콘크리트는 장기재령에서 우수한 침투 저항성을 나타내어 우수한 수밀성을 확보할 수 있다.
- 4) fly ash를 사용하는 경우, 건조수축량이 증가되지는 않았으며, 특히 초기 수축이 상대적으로 감소되어 구조물의 초기 균열을 지연 혹은 감소시킬 수 있다.
- 5) 동일 강도조건에서의 fly ash 콘크리트에 대한 수밀성 평가가 수행중인데, 설계강도를 만족하는 fly ash 콘크리트는 물-시멘트(바인더)비가 감소되므로 수밀성, 내구성이 증대될 것이며, 한편 혼화제의 적절한 사용으로 단위수량을 감소시키면 수밀콘크리트의 제조에 있어 유리하게 된다.
- 6) fly ash 콘크리트는 장기 수밀성이 우수하므로 지하 RC구조물의 균열, 누수로 인한 구조물의 장기 열화가 억제되어 구조물의 사용성 및 내구년한을 증가시킬 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 村田二郎, "콘크리트의 수밀성 연구", 토목학회논문집, 77, 31P., 1961
2. OHTSUKI, M., "Characteristics of Fly Ash", 시멘트콘크리트, NO.443, PP.43~49., 1984. 1.
3. ITOH, Y. ; AOKAGE, H., "Study on the Leakage of Water through crack of Concrete under High Water Pressure", 콘크리트공학년차논문보고집, 13(1), 447~450., 1991.
4. KOSHIKAWA, S. ; ITO, Y., "Study on Behavior of Fresh Concrete and Compaction Characteristics", FRESH 콘크리트의 거동과 시공논문집, PP.19~24., 1989. 4.