

공학석사 학위논문

플라이애쉬를 혼입한 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 연구

지도교수 김 명 식

이 논문을



제출함

2002년 2월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

최 병 우

최병우의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 15일

주 심 공학박사 이 환 우



위 원 공학박사 손 인 식



위 원 공학박사 김 명 식



<목 차>

1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구범위 및 방법	4
2. 문헌 고찰	6
2.1 수중불분리성 혼화제와 유동화제	6
2.2 수중불분리성 혼화제의 작용효과	10
2.3 수중불분리성 콘크리트의 국내 연구 동향	11
2.4 플라이애쉬	13
2.4.1 플라이애쉬의 성질	13
2.4.2 플라이애쉬가 콘크리트의 성질에 미치는 영향 ..	14
2.5 해수	17
3. 실험계획 및 방법	19
3.1 실험파라미터	19
3.2 실험방법	20
3.2.1 수중불분리성 콘크리트의 제작	20
3.2.2 압축강도측정용 공시체제작 및 양생	20
3.2.3 굳지않은 콘크리트시험	20

3.2.4 경화된 콘크리트시험	22
3.3 사용재료	22
3.3.1 시멘트	22
3.3.2 골재	22
3.3.3 혼화재료	23
3.3.4 실험수	23
3.4 배합설계	24
4. 실험결과 및 고찰	27
4.1 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 특성	27
4.1.1 재료분리저항성	27
4.1.2 유동성	29
4.1.3 공기량	30
4.2 경화된 수중불분리성 콘크리트의 특성	32
4.2.1 압축강도	34
5. 결 론	38
참 고 문 헌	40

The Characteristic of Properties of Antiwashout Underwater Concrete with Variation of Fly Ash

Byung Woo, Choi

*Department of Civil Engineering,
Graduate School of Industry
Pukyong National University*

ABSTRACT

In recently, through the development of antiwashout admixture, it's possible to construct in underwater with the concrete which is improved segregation resistance of material, filling and self-leveling. It is generally to use this method with Europe and Japan as the centeal figure, and also the construction case is reported in Korea.

There's some advantages to add the fly ash in plain concrete. The objective of this study is to find the characteristics of fresh underwater antiwashout concrete which is followed by the blend rate of flu ash.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 부산의 수영만에 건설되는 광안대교, 영종도 신공항을 잇는 연육교, 서해안 고속도로상의 신설교량 및 한강상의 교량 보수·보강공사 등과 같은 대형 수중콘크리트 구조물에 수중불분리성 콘크리트를 적용하는 사례가 점차 증대하고 있는 추세이다.

그러나 과거의 수중콘크리트 공사는 적당한 물막이를 하여 물을 정지시킨 후 주로 트래미, 콘크리트 펌프, 밀열림상자 또는 밀열림포대, 프리팩트콘크리트 등과 같은 공법이 사용되어 왔다. 그러나 콘크리트를 수중에서 타설시 발생하는 문제점으로는 시멘트 유실에 의해 수질을 오염시키며, 수중에서 재료분리가 발생하여 콘크리트 품질의 균일성 저하, 철근과의 부착성 저하 및 이음부의 신뢰성 저하 등의 문제점과 다짐 없이 타설되는 수중콘크리트의 수밀성과 내구성에 대한 신뢰성 확보문제 등을 들 수 있다. 그래서 많은 사람들이 수중콘크리트의 치기 방법의 개선과 시공기계개발에 대한 연구가 꾸준히 계속되었다.

그러나, 이러한 방법의 개선만으로는 시멘트가 유실되어 콘크리트 품질이 불균일하게 되고 강도와 수밀성이 저하되는 문제점은 피할 수 없었다. 하지만 최근에 독일에서 수중불분리성 혼화제를 개발하게 되어 이러한 문제점들을 해소 할 수 있게 되었다. 수중불분리성 혼화제를 첨가한 수중불분리성 콘크리트는 수중에서 낙하시켜도 재료분리를 일으키지 않으므로 양질의 콘크리트를 제작할 수 있다.

수중불분리성 혼화제는 1974년 독일에서 개발되어 1977년 본격적으로 수중공사에 사용하게 되었다. 또한 일본을 비롯한 콘크리트 기술 선

진국에서는 수중공사에 일반화되어 있는 공법으로, 수중에서 분리저항성을 갖는 수중불분리성 혼화제를 활용하여 수중에 타설된 콘크리트의 재료분리를 방지함으로써 시멘트 유실량을 최소화 하여 시공수역의 수질오염을 줄이고, 유동성과 시공성을 부여함으로써 수중구조물의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

그런데 우리나라는 수중불분리성 혼화제를 활용한 수중불분리성 콘크리트의 개발된 역사가 비교적 짧은 탓으로 현장에 적용된 시공실적이 적어 신뢰성에 대한 의문을 제기하는 등의 문제점이 지적되고 있다.

그래서 수중불분리성 콘크리트의 제물성을 향상·개선시키기 위하여 산업부산물인 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트에 착안하게 되었다.

플라이애쉬는 화력발전소 등에서 미분탄을 연소할 때 생기는 폐가스 속에 포함되어 있는 석탄재의 미립자를 집진기에 의하여 포집하여 정제한 것이다. 고로슬래그 미분말은 선철을 제련할 때 고로에서 생성되는 용융슬래그를 급냉시킨 유리질의 고로슬래그를 미분쇄한 것이다.

이들 자체는 수경성은 없으나 포졸란 반응과 잠재수경성에 의해 시멘트와 혼합하여 사용하게 되면 시멘트의 초기수화반응을 지연 및 감소시키는 역할을 한다. 또한 초기재령의 강도발현은 작으나 시멘트 수화물인 수산화칼슘 등과 상온에서 반응하여 장기재령의 강도증진이 클 뿐만 아니라 수밀성, 내해수성의 향상 등 콘크리트의 품질을 개선하는 여러 장점을 지니고 있는 재료이다. 아울러 산업부산물을 재활용함으로써 환경보호, 에너지 절약 등의 효과를 갖고 있다.

우리나라는 경제발전과 더불어 건설분야의 급속한 성장으로 강자갈 및 강모래가 거의 고갈되어 부순자갈, 부순모래, 바다모래 등의 대체골재의 사용이 증가하고 있고, 특히 삼면이 바다에 접하고 있어 대체골재로서 바다모래의 사용이 불가피한 실정이며, 일반콘크리트공사에서는

바다모래를 충분히 세척하여 사용하면 큰 문제점이 없는 것으로 보고 되고 있으나, 수중불분리성 콘크리트에 대해서는 연구실적이 아직 부족하다. 본 연구에서는 바다모래를 상용수로 제염하여 사용하기로 한다.

따라서, 본 연구에서는 수중불분리성 콘크리트 제작시 플라이애쉬의 첨가량의 변화에 따른 특성을 알아보기 위하여 치환율을 10, 15, 20, 25, 30, 35%로 변화시켜 제작된 수중불분리성 콘크리트의 굳기전 특성과 경화후의 특성에 대하여 알아보고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서는 국내 S사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트, 경남 진해 용원 석산에서 생산되는 최대치수 25mm의 부순자갈, 전남 진도 앞바다에서 채취한 바다모래, 국내 A사에서 생산되는 혼화제(수중불분리성 혼화제, 유동화제)를 사용한다.

설계기준강도 240kgf/cm^2 , 물-시멘트비 50%, 슬럼프플로우 $50 \pm 5\text{cm}$, 공기량 4%이하, 단위수량 220kg/m^3 로 고정하고 잔골재율은 40%, 플라이애쉬는 단위시멘트량에 10, 15, 20, 25, 30, 35%로 치환하였고, 수중불분리성 혼화제는 단위수량에 1.2%, 유동화제는 단위시멘트량에 1.5%로 하여 제작된 수중불분리성 콘크리트의 각종 특성의 변화를 파악하기 위해 다음과 같은 순서 및 방법에 의하여 연구를 수행하고자 한다.

- ① 문헌고찰을 통하여 수중불분리성 콘크리트의 특성을 살펴본다.
- ② 본 연구에 필요한 사용재료를 결정하고, 각 재료의 물성을 파악한다.
- ③ 본 연구의 설계조건을 기준으로 배합설계를 실시하여 기준시방배합표를 작성한다.
- ④ 플라이애쉬의 치환율은 단위시멘트량에 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%로 하였다.
- ⑤ 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 특성을 파악하기 위해 작성된 시방배합표를 기준으로 하여 재료분리저항성(pH 및 현탁물질량),

유동성(슬럼프플로우), 공기량을 측정하고 압축강도측정용 공시체를 각각 담수와 해수에서 제작·양생한다.

- ⑥ 경화된 수중불분리성 콘크리트의 특성을 파악하기 위해 담수와 해수에서 제작·양생된 수중불분리성 콘크리트의 단위중량과 압축강도를 재령 7일, 28일, 56일에 측정하여 비교·분석한다.

2. 문헌 고찰

2.1 수중불분리성 혼화제와 유동화제

수중불분리성 혼화제는 시멘트 수용액에 용해되어 콘크리트의 점성과 보수성을 증대시킴으로서 수중에 칠 때 물의 씻김작용에 의한 재료 분리를 방지하는 특성을 가지고 있고, 수중불분리성 혼화제의 주성분은 수용성 고분자로 되어 있으며, 크게 구분하면 셀룰로오스계와 아크릴계 두 종류며, 요즘은 주로 셀룰로오스계가 주종을 이루는 추세이다.

수중불분리성 혼화제의 주성분에 따른 분류는 표 2.1과 같고, 품질에 대해서는 1999년 한국콘크리트학회에서 규정한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질기준(KCI-AD-102)」이 있으며, 여기에 규정된 품질 기준은 표 2.2와 같다.

표 2.1 수중불분리성 혼화제의 주성분

종 류	화 학 명
셀룰로오스계	메틸셀룰로오스(MC)
	하이드록시에틸셀룰로스(HMC)
	하이드록시프로필셀룰로스(HPC)
	하이드록시에틸미틸셀룰로스(HEMC)
	하이드록시프로필메틸셀룰로스(HPMC)
	하이드록시에틸에틸셀룰로스(HEEC)
아크릴계	폴리아크릴아미드
	폴리아크릴아미드와 아크릴산 소다와의 공중합물
	폴리아릴아미드 부분가수분해물

표 2.2 수중불분리성 혼화제를 첨가한 콘크리트의 품질기준

항목			기준값
블리딩률 (%)			0.1 이하
응결시간 (시간)		초결	5 이상
		종결	30 이하
압축강도	수중제작 공시체에 의한 압축강도 (kgf/cm ²)	재령 7일	130 이상
		재령 28일	230 이상
	공기중제작 공시체의 압축강도에 대한 수중제작공시체의 압축강도비 (%)	재령 7일	60 이상
		재령 28일	70 이상
휨강도	공기중제작 공시체의 휨강도에 대한 수중제작 공시체의 휨강도비 (%)	재령 7일	50 이상
		재령 28일	60 이상
수중낙하시험	현탁물질량 (mg/ℓ)		150 이하
	pH		12.0 이하

1) 기본조성

수중불분리성 혼화제중 셀룰로스계와 아크릴계의 화학구성식 형상은 그림 2.1, 그림 2.2와 같다.

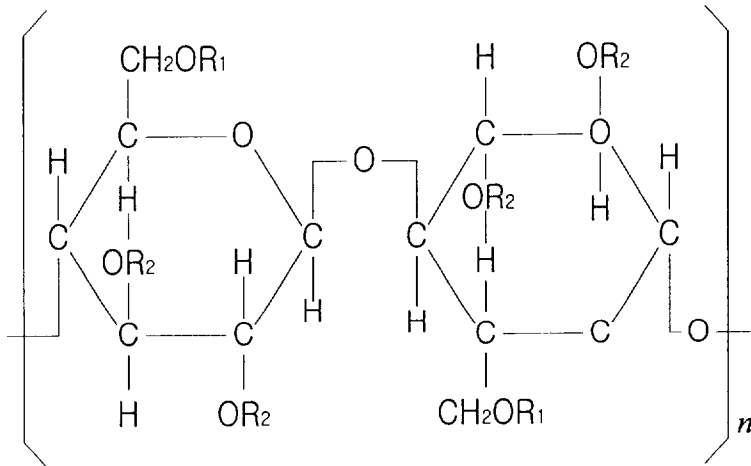


그림 2.1 셀룰로스계 수중불분리성 혼화제의 화학구성식

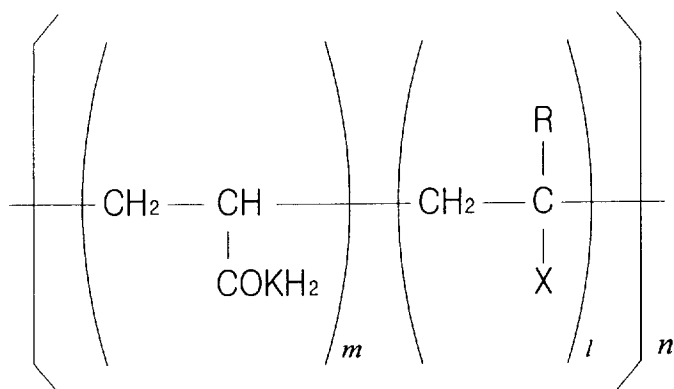


그림 2.2 아크릴계 수중불분리성 혼화제의 화학구성식

2) 화학적 안정성

수중불분리성 혼화제는 알칼리에 대하여 안정하여 시멘트 등과 반응할 때 이상생성물을 형성하지 않으며, 수중불분리성 혼화제의 수용액 점도는 넓은 범위의 pH영역(pH 3~12)에서 비교적 안정적이다.

3) 열적 안전성

수중불분리성 혼화제의 열분해온도(탄화온도)는 약 250~300℃의 열에 대하여 안정한 물질이다.

4) 유동화제와의 조화

수중불분리성 콘크리트를 제조함에 있어서 작업성 확보를 위해서는 유동화제의 사용이 필수적이고 보조성분으로 사용되는 유동화제의 종류에 따라 유동효과, 공기량, 응결시간 등에 대한 효과정도에 영향을 미친다. 예를 들면 셀룰로오스계 수중불분리성 혼화제와 나프탈렌설폰산염계 유동화제를 사용하면 첨가량에 따라서는 그들의 상호작용에 의해 점도가 상승하여 유동성의 저하를 초래할 가능성이 있다. 표 2.3는 수중불분리성 혼화제와 유동화제의 상호 적합성을 고려한 일반적인 조합을 나타내었다.

표 2.3 수중불분리성 혼화제와 유동화제의 일반적인 조합

수중불분리성 혼화제	유동화제
셀룰로오스계	멜라민설펜산염계(트리아진계)
아크릴계	나프탈렌설펜산염계 멜라민설펜산염계(트리아진계) 폴리칼본산염계

수중불분리성 혼화제를 첨가하면 콘크리트의 점성이 증가하기 때문에 물의 씻김작용에 대한 분리저항성이 커지는 대신 시공성이 저하하므로, 소요의 시공성을 확보하기 위해서 단위수량을 어느 한도 이하로 하고, AE감수제 또는 유동화제를 사용하는 것이 일반적이므로, 본 연구에서는 유동화제를 사용한다.

유동화제는 사용방법에 따라 고성능감수제와 유동화제로 구별되는데, 고성능감수제는 뛰어난 시멘트 분산효과를 이용하여 보통콘크리트와 동일한 작업성능을 가지면서 W/C저감과 고강도화를 주목적으로 하는 경우에는 고성능감수제라 부르고, 동일한 W/C의 콘크리트에 첨가하여 콘크리트의 품질은 변동 없이 작업성만을 크게 향상시킨 콘크리트를 제조할 경우에 유동화제라 부른다.

유동화제의 기본적인 성능은 고성능감수제와 마찬가지로 시멘트 입자의 분산성능이 뛰어나 감수성능이 우수하며 아울러 응결지연 및 과도한 공기연행, 강도저하 등의 나쁜 영향 없이 단위수량을 대폭 감소시킬 수 있다. 이러한 유동화제에는 크게 주성분에 따라 폴리알킬아릴 설펜산염계, 멜라민포르말린수지 설펜산염계, 방향족다환축합물 설펜산염계 등으로 분류할 수 있고, 유동화제의 성능에 따라 표준형과 지연형으로 분류할 수 있다.

2.2 수중불분리성 혼화제의 작용효과

셀룰로오스계 및 아크릴계 모두 유기고분자이며, 수용성 및 고점성이라는 공통적인 특징을 가지고 있다. 이 수용성고분자가 경화전 모르터 및 콘크리트에 미치는 주된 효과는 재료분리 방지 효과, 블리딩 억제 효과, 셀프레벨링 효과가 있다.

수용성고분자인 수중불분리성 혼화제는 수소결합에 의해 혼합수의 일부 즉 결합수를 수중불분리성 혼화제의 주위로 잡아당기는 형태로 혼합수내에 분자분산한다. 나머지 자유수는 분자분산한 고분자의 망상조직 내로 갇힌 상태가 되어 자유로운 유동을 할 수 없으므로 그 결과 수용액의 항복치가 높게 된다. 물은 연속층으로 되어있는 시멘트 입자와 골재는 항복치 높은 고점성 물에 감싸여진 상태로 있어 외부의 물과 접촉해도 분리되지 않아 수중분리 저항성을 갖는다.

물은 시멘트입자 간격에 의해 형성되는 모세관을 유동할 수 없을 정도로 항복치가 높기 때문에 콘크리트는 블리딩이 생기지 않는다. 또한, 블리딩이 생기지 않기 때문에 골재간의 윤활액 역할을 함으로 콘크리트는 높은 유동성을 갖는다. 그림 2.3에 그 작용을 나타내었다.

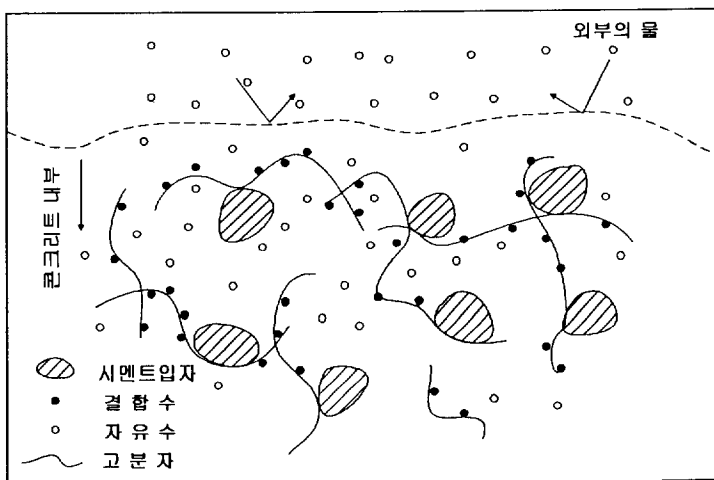


그림 2.3 수중불분리성 혼화제의 작용

2.3 수중불분리성 콘크리트의 국내 연구 동향

수중불분리성 혼화제를 사용한 수중불분리성 콘크리트는 1974년 서독에서 개발되어 1977년 이후 본격적으로 수중공사에 사용하였다.

1979년 일본에 수중불분리성 혼화제가 도입되어 1981년 공개실험을 통해서 수중공사에 사용되었다. 또한, 일본의 독자적인 기술개발 결과 關西國際空港의 下部工事와 本四連絡橋 明石海峽大橋의 主塔基礎 등 대형구조물 및 해수중의 댐, 등대하부공, 방파제 등 각종 중요 해양구조물에 널리 이용되었고, 최근에는 각각의 Water-front에 있어서의 공사에서도 기금까지의 수중콘크리트를 대신하여 사용되어지고 있다.

1986년 (財)漁港漁村建設研究所・沿岸開發技術研究 센터에서 “수중불분리성 콘크리트 매뉴얼”이 간행되어 1989년에 개정판도 발간하였으며, 1991년에는 일본토목학회에서 “수중불분리성 콘크리트의 설계시공·지침(안)”이 발행되기도 하였다.

우리나라에는 수중불분리성 혼화제가 1984년에 처음 도입되어 1994년까지 수중콘크리트 공사에 약 30,000m³의 시공실적이 있는 것으로 알려져 있다.

예를 들면 1985년 부산 승정대 공사에 30m³이 최초로 적용된 이후 점점 대규모 공사에 사용 또는 적용실적이 있으며, 서울 양화대교와 한남대교 등의 한강교량 보수공사 및 인천 제2국제공항 연육교, 부산 광안대교, 삼천포대교 등과 같이 국내에서 수중불분리성 콘크리트의 현장 시공실적이 크게 증가하고 있는 추세에 있다.

국내 수중불분리성 혼화제의 사용현황을 표 2.4에 나타내었다.

표 2.4 국내 수증불분리성 혼화제의 사용현황

발 주 처	현 장 명
익산지방국토관리청	부산-익산간 동진교
광양제철	광양항 슬래브 원료부두 1기현장
여수항 건설사업소	구항물양장 부두현장
부산지방국토관리청	창선-삼천포 연육교
한국도로공사	한림-웅포 도로현장
제주 항만청	용수리 등대공사
서울시 안전관리본부	양화대교 성능개선공사
서울시 지하철공사	당산철교 교체공사
부산 항만청	부신 등대공사
부산 광역시	부산 광안대교
한국도로공사	서해안 고속도로 13공구

2.4 플라이애쉬

2.4.1 플라이애쉬의 성질

1) 화학성분, 물리적 성질 및 화학적 반응성

플라이애쉬는 비균등질의 유리질과 결정상으로 구성되어 있으나 그 조성광물의 화학성분 및 분포는 원탄 및 연소조건 등의 영향을 받아 매우 폭이 넓고 다양하다. 유연탄, 반역청탄, 갈탄 및 이들을 혼합한 석탄을 연료로 사용하는 북미의 발전소로부터 발생한 플라이애쉬의 통상적인 화학성분을 보면, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO 및 SO_3 를 포함한다.

이들 성분 중 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 성분비가 각각 25~60%, 5~25%, 10~30%로서 전 성분의 거의 많은 부분을 차지한다. 이들 3성분의 합이 70% 이상일 경우, 그 플라이애쉬는 Class F로 분류한다. 이와는 다르게 상대적으로 이들 세 가지 성분의 합이 적고(50% 이상), CaO 로 나타나는 칼슘혼합물의 양이 많은 플라이애쉬를 Class C로 분류한다.

2) 물리적 성질

플라이애쉬 입자의 형상, 분말도, 입경분포 및 비중은 굳지않은 콘크리트의 물성 및 경화한 콘크리트의 강도발현에 영향을 준다.

(1)입형

플라이애쉬 입자의 크기와 형상은 원료의 균일성, 분쇄정도, 연소환경, 연소의 균일성, 기계식 분리장치, 백 필터, 전기식 집진장치와 같은 집진장치의 종류 등에 따라 달라진다. 플라이애쉬 입자의 모양은 입자의 크기와 관계가 있으며, 대부분 유리질의 구형형태이고 속이 채워져

있는 것, 비어있는 것, 생선알과 같은 모양으로 작은 플라이애쉬 입자를 포함하고 있는 것 등 다양하다. 또한 이 중에는 투명한 것, 광택이 없이 불투명한 것, 약간 다공질인 것, 다공성이 심한 것, 그리고 둥근 모양, 가늘고 긴 모양 등이 있다.

(2) 분말도

플라이애쉬 입자의 크기는 포집에 사용한 집진장치의 종류와 성능에 따라 달라진다. 최근에 건설된 발전소에서는 전기식 집진장치나 백 필터를 사용하며 이러한 장치를 이용하여 포집한 플라이애쉬의 입자는 종래의 집진장치에 의한 것보다 미세한 입자까지 포함하는 좀 더 폭넓은 입경분포를 가진다.

(3) 비중

플라이애쉬의 비중은 화학성분 중에 철분이 많을 경우 높게 나타나며 탄소함유량이 많을 경우 낮은 경향을 보인다. 우리나라 산업규격에서는 플라이애쉬의 비중을 1.95이상으로 정하고 있다. Class F의 비중은 2.10~2.49, Class C의 비중은 2.31~2.86의 범위로 나타나고 있다. 플라이애쉬 비중의 범위는 최대 1.95~3.00 정도이며, 보통 2.20~2.80 정도인 것으로 알려져 있다. 그러나 Class C 플라이애쉬는 Class F 플라이애쉬에 비해 미세한 입자가 좀더 많이 포함되어 있으며 속이 비어있는 중공입자의 양이 적은 까닭에 상대적으로 높은 비중을 나타낸다고 한다.

2.4.2 플라이애쉬가 콘크리트의 성질에 미치는 영향

1) 굳지않은 콘크리트

(1) 워커빌리티

일반적으로 둥근 모양의 플라이애쉬 입자는 시멘트 풀의 유동성을 개선시켜 소요의 슬럼프를 확보하기 위한 콘크리트의 단위수량을 감소시킨다. 이것은 상대적으로 콘크리트 중의 결합재량이 많은 부배합의 효과를 가져옴으로써 성형상 및 재료분리 저항성을 비롯한 굳지않은 콘크리트의 성질을 개선한다. 그러나 탄소량이 많은 플라이애쉬는 거친 입자의 함유비율이 높아서 일반적으로 단위수량을 증가시키는 경우가 많다.

(2) 블리딩

플라이애쉬의 사용에 따른 미분말 용적의 증가는 콘크리트 내부에서의 수분의 이동을 감소시키며 워커빌리티 확보에 필요한 수량을 줄임으로써 공기의 연행여부에 관계없이 콘크리트의 블리딩을 억제한다.

(3) 응결

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트에 있어서 콘크리트의 응결에 미치는 요인으로는

- ① 콘크리트의 온도와 콘크리트 주변의 온도
 - ② 시멘트의 종류, 양 및 분말도
 - ③ 단위수량
 - ④ 수용성 알칼리의 존재여부와 양
 - ⑤ 응결조절제를 비롯한 다른 혼화재료의 사용여부
 - ⑥ 플라이애쉬의 종류, 양, 분말도 및 조성
- 등을 들 수 있다.

(4) 피니셔빌리티

플라이애쉬 콘크리트는 응결시간이 늦기 때문에 마무리 작업시간을 늦출 필요가 있다. 마무리 작업을 서두를 경우, 표면의 바로 아래 부분의 상승수를 덮어 약점이 되는 면을 만들 수 있다. 습도가 낮거나 증발속도가 큰 환경하에서 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 응결시간의 지연은 콘크리트 표면의 수분의 증발로 인한 플라스틱 수축균열의 발생을 증가시키므로 이에 대한 대책을 마련해 둘 필요가 있다.

2) 경화한 콘크리트

(1) 압축강도

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 재령에 따른 강도와 강도발현속도는 주로 플라이애쉬를 혼합할 경우, 콘크리트의 휨강도의 개선에 효과가 있었다는 보고도 있으나, 플라이애쉬 사용에 따른 압축강도와 인장강도 사이의 특별한 상관성은 존재하지 않는 것으로 알려져 있다.

(2) 온도상승

시멘트는 물과 반응할 때 수화열을 발생하며 이 열은 콘크리트의 초기강도 발현과 용적변화에 중요한 영향을 미친다. 이 열의 대부분은 시멘트 조성광물 중의 C_3S 와 C_3A 의 초기수화단계에서 발생된다. 수화속도와 발열속도는 시멘트량과 시멘트의 종류, 구조물의 크기, 치기방법, 치기시의 콘크리트 온도와 양생온도 등에 따라 달라진다. 특히 서중에 단위시멘트량이 큰 매시브한 콘크리트를 칠 경우, 수화열에 의해 발생하는 구조물에서의 열변형은 무시할 수 없을 만큼 크다.

(3) 탄성계수

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 탄성계수는 보통콘크리트에 비해 초기재령에서는 약간 낮으나 장기재령에서는 약간 높다. 탄성계수에 미치는 플라이애쉬의 영향이 강도에 미치는 영향 만큼은 크지 않으나, 플라이애쉬보다는 시멘트와 골재의 특성이 오히려 큰 영향을 미친다고 한다.

2.5 해수

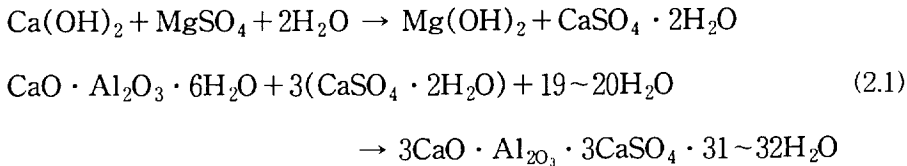
해수는 채취장소에 따라 다소 차이가 있으나 일반적인 물리·화학적 성질을 정리하면 표 2.5와 같다.

표 2.5 해수의 물리·화학적 특성

비중 (t/m ³)	pH	염분함유량(%)			
1.024 ~ 1.030	7.5 ~ 8.4	2.8 ~ 4.2	NaCl	75~80	
			MgCl ₂	10~11	
			Chemical compound of Br & I	Little	
			Sulfate	10~11	MgSO ₄ 50
					CaSO ₄ , K ₂ SO ₄ 50

콘크리트는 해수의 물리·화학적 작용을 받아 시간과 함께 열화를 일으키게 되는데, 해수의 물리적인 작용으로서는 파랑, 공동, 온도, 습도변화, 표사, 그리고 표류고형물의 충돌 등이 있다. 파랑이나 고형물의 충돌은 콘크리트 표층부의 파손을 촉진하고, 건전한 콘크리트에서도 표사 등에 의한 지속적인 마모작용을 받아서 현저하게 손실되는 일이 있다.

화학적 작용으로서는 시멘트 속의 유리석회나 수화생성물인 수산화칼슘이 해수에 대해 가용성이기 때문에 해수중에 용출되는 것에 의해 서서히 콘크리트 경화체 조직의 틈이 만들어지고 다공질화 되지만, 수산화칼슘의 용출즉시 강도저하나 질량감소가 일어나는 것이 아니라, 오랜 세월동안에 서서히 철근에 대한 방청기능을 저하시키는 등의 영향을 미친다. 그러나 해수의 염류중에 5%정도 포함되어 있는 황산마그네슘은 식 (2.1)과 같이 시멘트 속의 C_2S 및 C_3S 의 수화생성물인 수산화칼슘과 반응하고, 나아가 시멘트성분의 C_3A 의 수화생성물과 반응하여 에트링자이트(ettringite)가 생성된다. 이렇게 생성된 에트링자이트 결정은 용적이 증가하게 되고, 결국 콘크리트는 표층에서부터 팽창압에 의해 서서히 파괴된다.



해수중 염분의 약 90%를 차지하고 있는 염화물은 식 (2.2)와 같이 수산화칼슘과 반응하여 해수에 대해 가용성인 염화칼슘을 생성하고 콘크리트를 다공질화하지만, 일반적으로 그 반응은 완만하다.



3. 실험계획 및 방법

3.1 실험파라미터

본 연구에서는 설계기준강도 240kgf/cm^2 , 물-시멘트비 50%, 슬럼프플로우 $50\pm 5\text{cm}$, 공기량 4%이하, 단위수량 220kg/m^3 로 고정하고 잔골재율은 40%, 플라이애쉬는 단위시멘트량에 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%로 치환하였고, 수중불분리성 혼화제는 단위수량에 1.2%, 유동화제는 단위시멘트량에 1.5%로 하여 제작된 수중불분리성 콘크리트의 실험파라미터를 표 3.1에 나타냈다.

표 3.1 실험파라미터

Symbol	플라이애쉬 치환율(%)
ST	0
AF10	10
AF15	15
AF20	20
AF25	25
AF30	30
AF35	35

3.2 실험방법

3.2.1 수중불분리성 콘크리트의 제작

콘크리트의 제작은 혼합용적(Mixing capacity) 60ℓ 인 강제식 믹서를 사용한다. 먼저 잔골재, 굵은골재, 시멘트, 수중불분리성 혼화제를 투입하고 30초간 견비빔시간을 실시한 후 배합수를 투입한 뒤 60초간 1차 혼합비빔을 실시한 뒤에 최종적으로 유동화제를 투입하여 90초간 2차 혼합비빔을 실시하여 수중불분리성 콘크리트를 제작한다.

3.2.2 압축강도측정용 공시체제작 및 양생

압축강도측정용 공시체의 제작에는 몰드($\phi 10 \times 20$)를 사용하고, 한국 콘크리트학회규준에 따라 수조속에 몰드를 거치하여 몰드의 상단에서 10cm위까지 물을 채우고, 비벼진 콘크리트를 핸드스쿠프(Hand scoup)를 이용하여 10등분 이상 분할한 양만큼, 수면에서 조용히 수중낙하시켜 봉우리 모양이 되도록 한 다음 몰드를 수조에서 꺼내어 5~10분 정도 정치시킨다. 몰드상면은 흙손으로 캡핑할 양만큼 남겨두고 마감한 다음, 캡핑 후 탈형강도에 이르렀을 때 탈형하여 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 담수와 해수에서 양생한다.

3.2.3 굳지않은 콘크리트시험

1) 재료분리저항성시험

재료분리저항성시험은 대한토목학회에서 규정한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준」의 「수중낙하시험 방법」에 준하여 실시하고, 시험방법은 1000cc 비이커(외경 110mm, 높이 150mm)에 800cc의 증류수

를 채우고 500g의 콘크리트를 10등분 이상 되게 수면에서 수중으로 조용히 분할 투입한 다음, 비이커에 600cc의 현탁용액을 채취하여 각 혼화재료의 첨가량에 따른 수중불분리성 콘크리트의 현탁액의 pH와 현탁물질량을 측정한다. 또한 본 연구에서는 실제 시공현장을 감안해서 같은 방법으로 담수와 해수에서도 시험한다.

2) 유동성시험

유동성을 파악하기 위해서 대한토목학회에서 제시한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준」의 「수중불분리성 콘크리트의 슬럼프 플로우 시험방법」에 준하여 실시하고, 「KS F 2402 콘크리트 슬럼프 시험」에 준하는 슬럼프콘과 다짐봉을 사용하여 슬럼프플로우를 측정한다. 슬럼프플로우 측정은 슬럼프콘을 제거하고 정치표준시간 5분 경과 후 콘크리트가 퍼진 직경이 최대인 방향과 그것의 직각방향에서 0.5 cm까지 측정하여 그 평균값을 슬럼프플로우로 한다.

3) 공기량시험

콘크리트에 과다한 공기량은 강도저하에 지대한 영향을 미치므로, 굳지않은 콘크리트의 공기함유량은 「KS F 2421 굳지않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험(공기실압력방법)」에 준하여 워싱턴 에어 미터를 사용하여 측정한다.

3.2.4 경화된 콘크리트시험

본 연구에서는 경화된 콘크리트의 성질을 평가하기 위하여 압축강도시험을 실시하였다. 압축강도시험방법은 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도시험방법」에 준하여 실시하며, 압축강도시험은 담수와 해수에서 각각 제작·양생된 공시체를 재령 7일, 28일, 56일에 측정하였다.

3.3 사용재료

3.3.1 시멘트

본 연구에서는 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 물리·화학적 특성은 표 3.2와 같다.

표 3.2 시멘트의 물리·화학적 특성

비중	강열감량 (%)	불용잔분 (%)	화학성분 (%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.14	0.5~1.3	0.2~0.9	21.0~22.5	4.5~6.0	2.5~3.5	63.0~66.0	0.9~3.3	1.0~2.0

3.3.2 골재

본 연구에서 사용한 굵은골재는 경남 용원 석산에서 생산한 최대치수 25mm의 부순자갈을 사용하였고, 잔골재는 전남 진도 앞바다에서 채취한 해사를 상용수로 제염하여 사용하였으며, 사용골재의 물리적 특성은 표 3.3과 같다.

표 3.3 골재의 물리적 특성

종류	항목	G_{max}	비중	흡수율 (%)	조립율	단위중량 (kg/m^3)	조개껍질 함유량 (%)	염화물함유량 ($\times 10^{-3}$)	
								NaCl	Cl^-
	잔골재	-	2.62	1.8	2.75	1569	7.2	2.6	2.0
	굵은골재	25	2.62	1.16	6.83	1583	-	-	-

3.3.3 혼화재료

본 연구에서는 국내 A사에서 생산되는 셀룰로오즈 에테르계의 수중 불분리성 혼화제와, 멜라민계의 유동화제를 사용하였으며, 각각의 물리·화학적 특성은 표 3.4와 같다.

표 3.4 혼화제재료의 물리·화학적 특성

종류	항목	주성분	pH	비중	성상
	수중불분리성 혼화제(AWA)	셀룰로오즈 에테르계	7.1	1.07	분말
	유동화제(SP)	멜라민계	12.0	1.23	액상

3.3.4 실험수

본 연구에서는 제작환경에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성을 파악하기 위해서 담수, 해수를 사용하였는데, 담수는 상용수로 사용되는 수도수를 사용하며, 해수는 부산광안대교 건설현장부근의 천연해수를 채취하여 사용한다. 실험수들의 pH와 염화물을 측정한 결과는 표 3.5와 같다.

표 3.5 실험수의 pH와 염화물

	담수	해수
pH	8.426	8.097
염화물(%)	-	3.21 ~ 3.40

3.4 배합설계

본 연구에서는 배합설계를 수행하기 위해 본교 건설재료실험실의 「W/C변화에 따른 수중불분리 콘크리트의 기초특성에 관한 실험적 연구」에서 도출된 배합강도와 시멘트-물비와의 관계식을 이용하여 다음과 같은 순서와 방법으로 배합설계를 실시하였다.

① 배합강도(f_{cr})를 240kgf/cm^2 으로 한다.

② W/C 계산

$$f_{cr} = -353 + 295 C/W \text{에서}$$

$$W/C = \frac{295}{353 + f_{cr}} = \frac{295}{353 + 240} = 0.5$$

$$\approx 50\% < 65\% \text{ ----- O.K}$$

③ 단위수량(W) 결정

슬럼프플로우는 50cm, $G_{\max}$ 25mm일 때, 단위수량은 220 kg/m^3 이다.

④ 단위시멘트량(C) 결정

$$C = 220 \div 0.50 = 440 (\text{kg/m}^3)$$

⑤ 골재량 결정

굵은골재가 부순자갈이고, 최대치수(G_{max})가 25mm일 때 굵은골재 절대용적(V_G)은 $364 \ell / m^3$ 이다.

본 연구에서는 잔골재율(s/a) 40%를 표준으로 한다. 따라서, 골재의 전용적 및 각 골재의 단위량은 다음과 같다.

$$V_{(G+S)} = 1000 - (220 + \frac{440}{3.14} + 40) \\ = 599.9 (\ell / m^3)$$

$$V_S = V_{(G+S)} \times s/a = 599.9 \times 0.4 = 240 (\ell / m^3)$$

$$S = 240 \times 2.58 = 619 (kg/m^3)$$

$$V_G = V_{(G+S)} - V_S = 599.9 - 240 = 359.9 (\ell / m^3)$$

$$G = 359.9 \times 2.69 = 968 (kg/m^3)$$

설계기준강도를 $240kgf/cm^2$, 슬럼프플로우 $50 \pm 5cm$, 공기량 4%이하, 단위수량을 $220kg/m^3$ 로 고정시키고 W/C 50%, s/a 40%때를 기준으로 하여 배합설계를 수행한 결과 표 3.6과 같은 기준시방배합표를 얻을 수 있었다.

표 3.6 기준시방배합표

f_{ck} (kgf/cm^2)	W/C (%)	Slump flow (cm)	Air content (%)	G_{max} (mm)	s/a (%)	Unit weight (kg/m^3)						
						W	C	S	Fly ash	G	AWA	SP
240	50	50 ± 5	4.0 이하	25	40	220	440	619	0	968	2.64	8.80

⑥ 기준시방배합표의 배합사항을 기준으로 실험조건인 플라이애쉬의 치환율에 따른 배합표를 작성하면 표 3.7과 같다.

표 3.7 수중불분리성 콘크리트의 배합표

Symbol	Unit weight(kg/m ³)						
	W	C	S	Fly ash	G	Admixture	
						AWA	SP
ST	220	440	619	0	968	2.64	6.6
AF 10	220	396	619	44	968	2.64	6.6
AF 15	220	374	619	66	968	2.64	6.6
AF 20	220	352	619	88	968	2.64	6.6
AF 25	220	330	619	110	968	2.64	6.6
AF 30	220	308	619	132	968	2.64	6.6
AF 35	220	286	619	154	968	2.64	6.6

4. 실험결과 및 고찰

4.1 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 특성

표 4.1은 플라이애쉬를 10, 15, 20, 25, 30, 35%로 치환한 굳지않은 수중 불분리성 콘크리트의 재료분리저항성을 파악하기 위해 현탁액의 pH와 현탁물질량을, 유동성을 파악하기 위해 슬럼프 플로우시험을, 충전성, 공기량 특성을 파악하기 위해 워싱턴에어미터로 공기량을 측정한 결과이다.

표 4.1 굳지않은 콘크리트의 결과

Symbol	pH			Suspension(mg/ ℓ)			Slump flow (cm)	Air content (%)
	담수	중류수	해수	담수	중류수	해수		
ST	11.45	11.47	9.35	30.24	27.35	22.29	46	3.4
AF10	11.33	11.47	9.30	72.17	36.75	28.80	46	3.7
AF15	11.28	11.45	9.28	90.24	45.42	32.41	47	3.7
AF20	11.26	11.40	9.04	100.36	44.70	33.86	47	3.8
AF25	10.97	11.39	8.67	107.59	56.99	36.02	48	3.9
AF30	10.83	11.39	8.55	118.45	82.29	36.75	50	3.9
AF35	10.71	11.35	8.36	124.94	99.64	38.19	48	4.2

4.1.1 재료분리저항성

그림 4.1과 그림 4.2는 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 재료분리저항성을 파악하기 위해 현탁액의 pH와 현탁물질량을 측정한 결과이다.

그림 4.1과 그림 4.2에서 실험조건에 관계없이 현탁액의 pH와 현탁물질량은 모두 대한토목학회에서 규정한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준」의 기준치인 12이하, 150(mg/ℓ)이하를 만족하는 것으로 나타났으며, 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 pH는 감소하고 현탁물질량은 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이것은 치환율이 증가함에 따라서 시멘트보다 pH가 낮은 플라이애쉬의 유실량이 많아지기 때문인 것으로 사료된다.

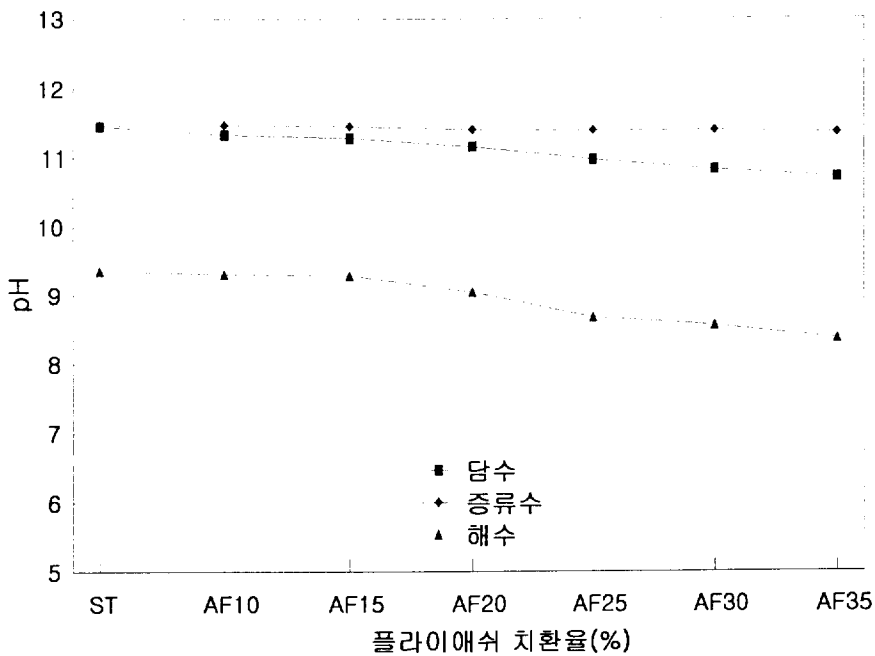


그림 4.1 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 pH

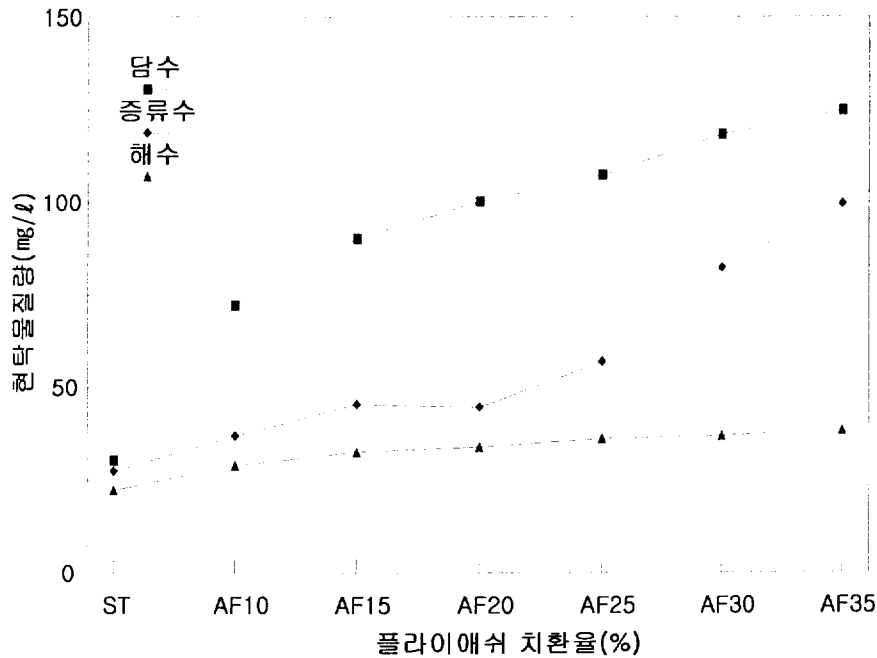


그림 4.2 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 현탁물질량

4.1.2 유동성

그림 4.3은 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 유동성을 파악하기 위해 슬럼프플로우를 측정한 결과이다.

결과를 살펴보면, 슬럼프플로우는 본 연구에서 요구한 $50 \pm 5\text{cm}$ 를 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라서 슬럼프플로우는 점차 증가하다가 치환율이 30%를 넘는 경우에는 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

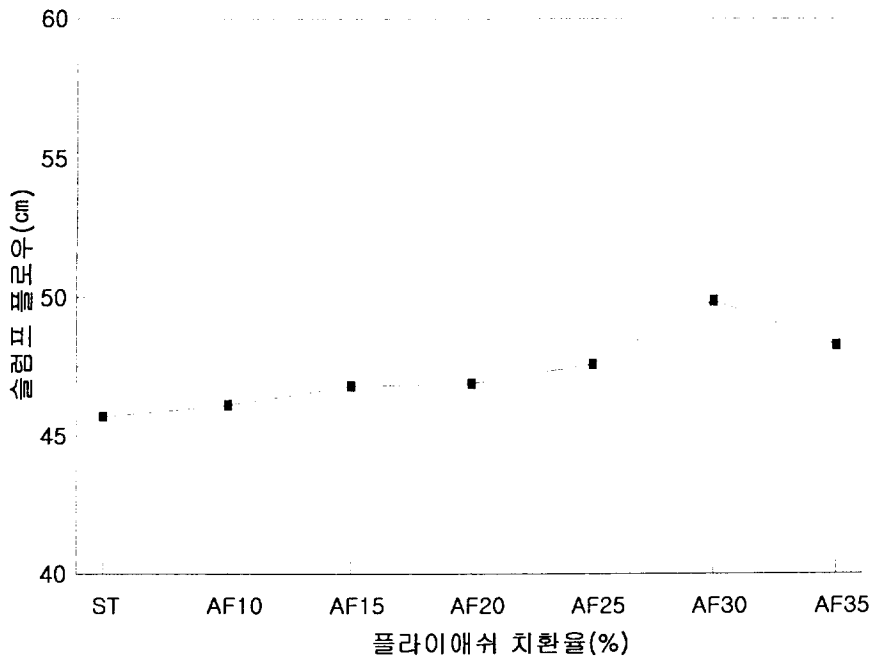


그림 4.3 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 슬럼프 플로우

4.1.3 공기량

그림 4.4는 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 공기량을 측정한 결과이다.

결과를 살펴보면, 치환율이 35%일 경우를 제외하고는 배합설계기준을 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라서 공기량도 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 AE제를 사용한 콘크리트에서는 플라이애쉬가 AE제와 흡착하는 성질이 있기 때문에 공기량이 감소하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 수중불분리성 혼화제의 강력한 점성작용으로 인하여 오히려 갇힌 공기량을 증가시키는 작용을 하는 것으로 나타났다.

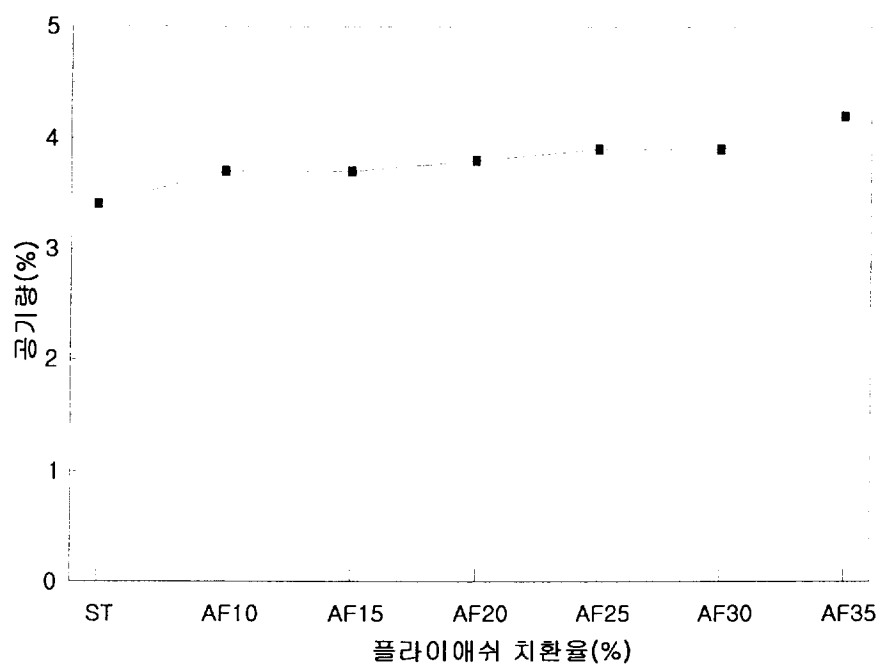


그림 4.4 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 공기량

4.2 경화된 수중불분리성 콘크리트의 특성

표 4.2 ~ 표 4.4는 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 재령 7일, 28일, 56일에 경화된 수중불분리성 콘크리트의 압축강도를 측정한 결과이다. 여기서, 담수에서 제작·양생한 경우는 F, 해수에서 제작·양생한 경우는 S로 표기하였다.

표 4.2 경화된 콘크리트의 압축강도(재령7일)

Symbol	압축강도(kgf/cm ²)	Symbol	압축강도(kgf/cm ²)
	담 수		해 수
ST	183	ST	188
AFF10	166	AFS10	158
AFF15	156	AFS15	152
AFF20	213	AFS20	201
AFF25	149	AFS25	140
AFF30	148	AFS30	128
AFF35	101	AFS35	100

표 4.3 경화된 콘크리트의 압축강도(재령28일)

Symbol	압축강도(kgf/cm ²)	Symbol	압축강도(kgf/cm ²)
	담 수		해 수
ST	266	ST	259
AFF10	239	AFS10	235
AFF15	233	AFS15	218
AFF20	266	AFS20	198
AFF25	182	AFS25	153
AFF30	169	AFS30	149
AFF35	136	AFS35	124

표 4.4 경화된 콘크리트의 압축강도(재령56일)

Symbol	압축강도(kgf/cm ²)	Symbol	압축강도(kgf/cm ²)
	담 수		해 수
ST	296	ST	265
AFF10	260	AFS10	256
AFF15	248	AFS15	244
AFF20	242	AFS20	240
AFF25	221	AFS25	218
AFF30	199	AFS30	192
AFF35	187	AFS35	182

4.2.1 압축강도

그림 4.5 ~ 그림 4.7은 플라이애쉬 치환율의 변화에 따라서 담수와 해수에서 각각 제작·양생한 재령 7일, 28일, 56일의 수중불분리성 콘크리트의 압축강도를 측정한 결과이다.

그림 4.5는 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 재령 7일 압축강도를 나타낸 그림으로서 치환율이 증가함에 따라서 점차적으로 압축강도가 감소하는 경향을 나타내고 있으나 치환율이 20%에서만 담수와 해수에서 양생한 경우 모두 플라이애쉬를 첨가하지 않은 경우보다 압축강도가 높은 것으로 나타났다. 이것으로 보아 초기재령에서의 최적 치환율은 20%임을 알 수 있다.

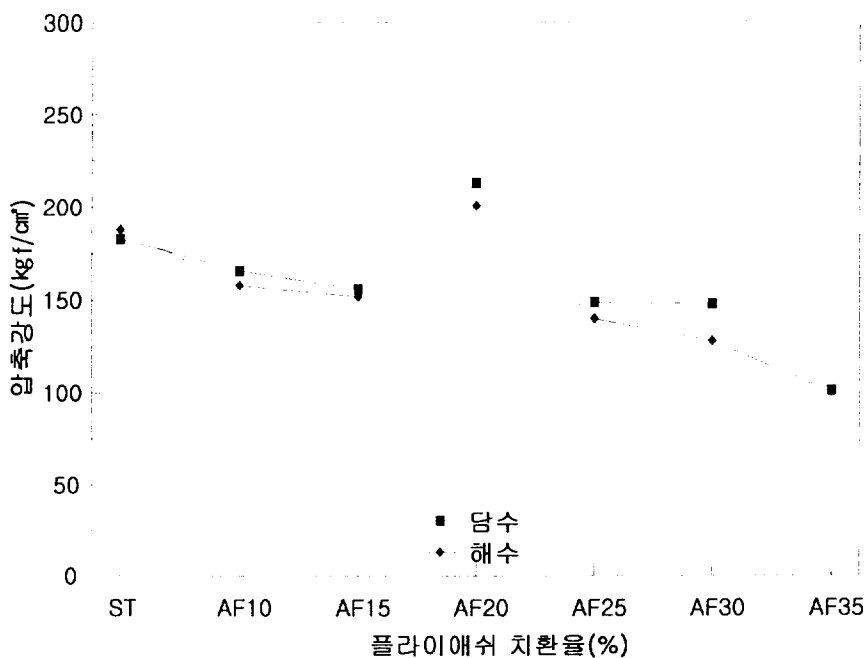


그림 4.5 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 압축강도(재령 7일)

그림 4.6은 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 재령 28일의 압축강도를 나타낸 그림으로서, 해수에서 양생한 경우에는 치환율이 증가함에 따라서 압축강도는 점점 감소하는 것으로 나타났으나, 담수에서 양생한 경우에는 치환율이 20%일 경우에는 플라이애쉬를 첨가하지 않은 경우와 비슷한 압축강도를 나타내었다.

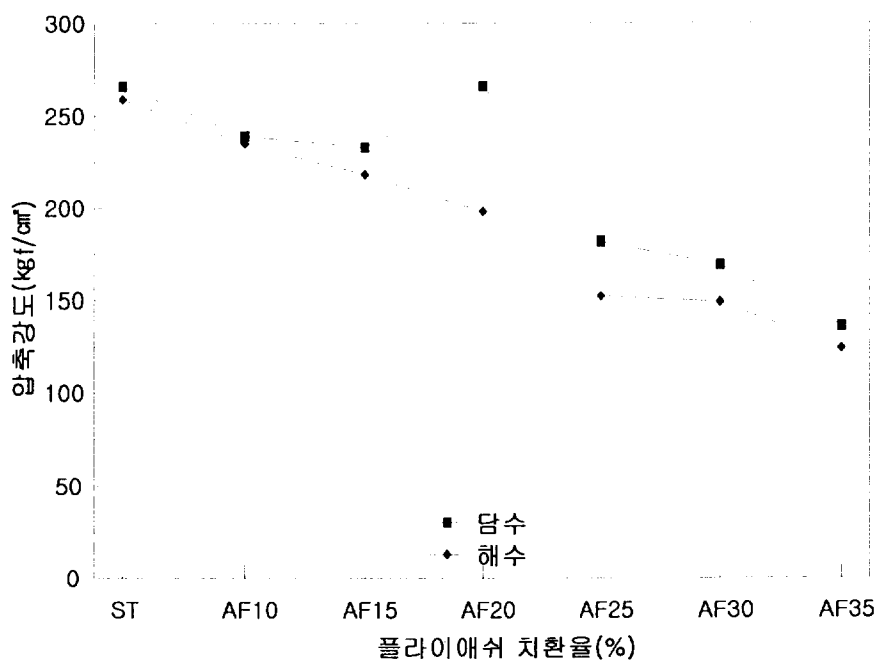


그림 4.6 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 압축강도(재령 28일)

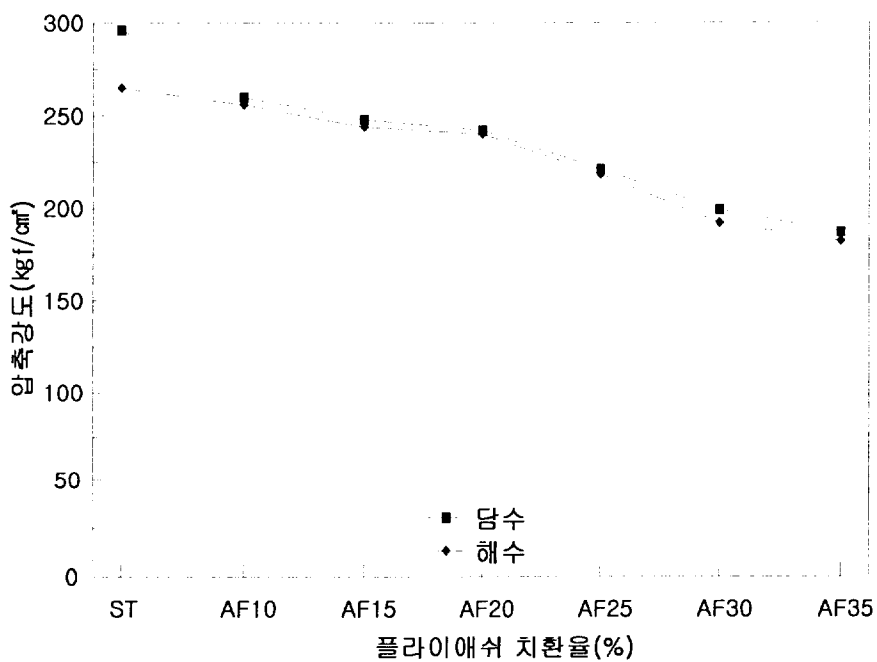


그림 4.7 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 압축강도(재령 56일)

그림 4.7은 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 재령 56일의 압축강도의 변화를 나타낸 그림으로서, 치환율이 증가함에 따라서 압축강도는 점점 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 해수보다 담수에서 양생한 경우에 압축강도가 더 큰 것으로 나타났다. 치환율이 20%이상이 되었을 때에는 설계기준강도를 만족하지 못하고 있다.

따라서, 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 수중불분리성 콘크리트의 압축강도는 플라이애쉬를 치환율에 관계없이 담수와 해수에서 제작·양생한 공시체의 압축강도가 모두 설계기준강도인 240kgf/cm^2 을 만족하는 경우는 재령 28일 경우에는 치환율이 20%이고 담수에서 양생한 경우에서만이고, 재령 56일 경우에는 치환율이 20%이고 담수와 해수에서 양생한 경우 모두 만족하고 있다. 따라서, 플라이애쉬를 첨가한 수중불분리성 콘크리트는 최소한 56일 정도는 양생을 해야함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 플라이애쉬를 치환율을 변화시킨 수중불분리성 콘크리트에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 재료분리저항성을 나타내는 pH와 현탁물질량은 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 pH는 감소하고 현탁물질량은 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이것은 치환율이 증가함에 따라서 시멘트보다 pH가 낮은 플라이애쉬의 유실량이 많아지기 때문인 것으로 사료된다.

(2) 슬럼프플로우는 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라서 슬럼프플로우는 점차 증가하다가 치환율이 30%를 넘는 경우에는 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 공기량은 치환율이 35%일 경우를 제외하고는 배합설계기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 일반적으로 AE제를 사용한 콘크리트에서는 플라이애쉬가 AE제와 흡착하는 성질이 있기 때문에 공기량이 감소하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 수중불분리성 혼화제의 강력한 점성작용으로 인하여 오히려 갇힌 공기량을 증가시키는 작용을 하는 것으로 나타났다.

하지만, 본 연구에서는 AE제를 사용하지 않고 플라이애쉬 치환율을 증가시킨 결과 공기량이 증가하는 것으로 나타났다.

(4) 압축강도 측면을 살펴보면, 플라이애쉬 치환율에 관계없이 담수와 해수에서 제작·양생한 공시체의 압축강도가 모두 설계기준강도인 240kgf/cm^2 을 만족하는 경우는 재령 28일 경우에는 치환율이

20%이고 담수에서 양생한 경우에서만이고, 재령 56일 경우에는 치환율이 20%이하이고 담수와 해수에서 양생한 경우이다. 따라서, 플라이애쉬를 첨가한 수중불분리성 콘크리트는 최소한 56일 정도는 양생을 해야함을 알 수 있었다.

(5) 본 연구결과 플라이애쉬 치환율의 변화에 따른 수중불분리성 콘크리트의 각종 특성을 종합적으로 판단해 보았을 때 최적 치환율은 20%인으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김명식, “수중비분리콘크리트의 특성에 대한 기초적 연구”, 한국농공학회지, 제38권, 제6호, pp. 75-82, 1996.
2. 김명식 외 3인, “W/C변화에 따른 수중불분리 콘크리트의 기초 특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 21-30, 1999. 8.
3. 백동일, “해사를 사용한 수중불분리콘크리트의 특성에 관한 기초적 연구, 부경대학교 산업대학원, 1998. 2.
4. 어영선, “수중불분리콘크리트의 최적 물-시멘트비에 관한 실험적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1998. 8.
5. 최의식, “해사를 사용한 수중불분리콘크리트의 강도발현에 관한 기초적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1998. 8.
6. 김광민, “해사 혼합률 변화에 따른 수중불분리콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1999. 2.
7. 김기동, “수중불분리콘크리트의 부착강도특성에 관한 기초적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1999. 8.
8. 이상명, “제작환경에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, 부경대학교 일반대학원, 2000. 3.
9. 윤재범, “배합조건과 양생수에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 연구”, 부경대학교 일반대학원, 2000. 3.
10. 권중현, “플라이애쉬를 혼입한 해수중 불분리성콘크리트의 특성”, 경상대학교 토목공학과, 1999.8
11. 이승한, “플라이애쉬 및 고로슬래그를 사용한 고성능콘크리트

- 의 특성”, 한국콘크리트학회 1998년도 가을 학술발표회 논문집, 제10권 2호, pp.275~280, 1998.11
12. 문한영, “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질기준”, 대한토목학회지, 제45권, 제3호, pp. 71-77, 1997.1.
 13. 대한토목학회, “콘크리트용 유동화제 품질기준”, 대한토목학회지, 제45권 제3호, pp. 93-97, 1997.3.
 14. 한국콘크리트학회, “최신콘크리트공학” pp. 109-170, 1997. 10.
 15. 대한건축학회, “고강도-고성능 콘크리트 제조·시공 및 설계”, 1996. 4.
 16. 문한영 외 3인, “고로슬래그미분말을 활용한 수중불분리성 콘크리트”, 한국콘크리트학회 1998년도 가을 학술발표회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 83-86, 1998.
 17. 中川良隆, “水中コンクリート”, 日本土木學會論文集, Vol.31, No.3, pp.67-72, 1993. 3.
 18. 財團法人沿岸開發技術研究センターほか, 水中不分離性コンクリート・マニュアル(設計・施工), 山海堂, pp.41-52, 1990.
 19. 關博, “日本土木學會, 水中不分離性 コンクリート設計施工指針(案) のアウトラインセメント・コソクリート”, No.541, pp.49-95, 1992.
 20. Takeshi Ohtomo, Yasunori Matsuoka, Yoshitaka Nakagawa, and Jun Nakahira "Influence of Materials on the Action of Admixtures in Antiwashout Underwater Concrete", ACI Materials Journal, Vol.92, No.3, pp.315-320, May-June 1995.
 21. Ksmal Henri Khayat, "Effects of Antiwashout Admixtures

- on Fresh Concrete Properties", ACI Materials Journal, Vol.92, No.2, pp.164-171, March-April 1995.
22. Nobuaki Otsuki, Makoto Hisada, Shigeyoshi Nagataki, and Toshiro Kamada, "An Experimental Study on the Fluidity of Antiwashout Underwater Concrete", ACI Materials Journal, Vol.93, No.1, pp.20-25, January-February 1996.
23. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서 해설집", 기문당, pp.466~480, 2000. 5.s

감 사 의 글

어제보다 나은 오늘, 오늘 보다 나은 내일을 위하여 그동안 일구어온 조그마한 결실을 수확하려 합니다. 지나온 날들 되돌아 후회없길 바라며 하루하루에 임하였건만 좀더 열심히 하지 못한 내 자신이 또다른 후회를 남기며 내일을 기약하려 합니다.

먼저, 본 논문이 완성되기까지 아버지와 같은 사랑으로 가르치고 깨우쳐 주신 김명식 교수님의 은혜에 고개 숙여 감사드립니다. 또한 미흡한 저의 논문을 다듬고 교정하여 주신 이환우 교수님, 손인식 교수님, 그리고 그동안 인생의 바른 길을 일러주신 김종수 교수님, 김상용 교수님, 이동욱 교수님, 장희석 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 정진호 교수님, 이종섭 교수님, 국승규 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님께 감사의 말씀을 이 한편의 논문으로 드립니다.

아울러, 본 논문이 완성되도록 힘든 실험을 도와준 대학원생 정병훈, 정해동, 박세인군 또한, 건설재료실험실 동아리 여러분들의 노고에 정말 감사 드립니다. 생업과 학업의 병행에도 꾸짖음 없이 항상 격려하여 주신 우정종 과장님, 남주용 계장님, 조병렬님, 그리고, 직장 선후배 여러분께 감사드리며....

자식의 앞날을 기원하며 가슴 조이시던 어머니, 장인어른, 장모님과 가족여러분 모두에게도 고마움을 전합니다.

어려운 생활가운데서도 학업에 전념 할 수 있도록 항상 따뜻한 내조를 아끼지 않은 사랑스러운 나의 아내 박정화와 함께 오늘의 이 영광을 영원히 하고 싶고, 마지막으로 저에게 사랑과 미련을 남기시고 돌아가신 아버님의 영전 앞에 이 논문을 바칩니다.

여러분의 은혜에 어긋나지 않고 후회 없는 내일이 될 수 있도록 오늘도 열심히 하겠습니다.