

압축강도에 따른 수중불분리 콘크리트의 배합설계에 관한 연구

A Study on the Mix Design of Antiwashout Underwater Concrete According to Compressive Strength

조영국
JO, Young-Kug

Abstract

At present, the antiwashout underwater concretes are used as popular construction materials in European countries, the United States and Japan. The water-soluble polymers in the antiwashout underwater concretes provide excellent segregation or washout resistance, self-compaction and self-leveling property to the concretes.

The purpose of this study is to recommend to optimum mix proportions of antiwashout underwater concretes according to compressive strength of 300kgf/cm² to 500kgf/cm². The antiwashout underwater concretes are prepared with various unit cement content, unit water content, sand-aggregate ratio, unit antiwashout agent and superplasticizer content. And they are tested for flowability, and compressive strength.

From the test results, it is possible to recommend the optimum mix proportions of antiwashout underwater concretes according to compressive strengths within the range of 300kgf/cm² to 500kgf/cm².

키워드 : 수중불분리 콘크리트, 압축강도, 잔골재율, 물시멘트비, 자기 충전성

keywords : Antiwashout underwater concrete, Compressive strength, Sand-aggregate ratio, Water-cement ratio, Self-compaction

1. 서론

수중에 타설하는 소위 수중불분리 콘크리트(Anti-washout Underwater Concrete)는 콘크리트 분야에서는 신소재로 분류되는 것으로 수중 콘크리트 공사에서 콘크리트의 재료분리가 일어나지 않고 유동성을 좋게 하여 수중공사를 효과적으로 시공할 수 있도록 제조된 콘크리트를 말한다. 그러나 최근까지만 하여도 부득이한 경우를 제외하고는 수중콘크리트의 사용이 억제되었는데 이는 지상에 타설되는 콘크리트와 같은 역학적 성질 및 내구성의 품질을 보장할 수 없기 때문이었다. 그러나 점차 증대되어 가는 사회간접자본 시설과 수중에 존재하는 노후화된 많은 콘크리트 구조물의 보수, 보강의 차원에서 더욱더 수중 콘크리트의 개발은 필요하다고 할 수 있다.

이러한 수중불분리 콘크리트에 대한 연구가 외국에 있어서는 심도 깊은 많은 연구가 시도되어 직접 현장에 적용시키고 있다¹⁻³. 그러나 우리 나라에서는 연구가 1990년대 후반에서야 실험실 단위의 연구가 진행되고 있다⁴⁻⁵.

본 연구에서는 수중불분리 콘크리트의 특수성을 고려하여 각종 압축강도별 콘크리트의 최적배합을 제시함으로써 현장에서 콘크리트의 품질관리 뿐만 아니라 직접 현장에 적용시킬 수 있는 배합설계를 실시하고자 하였다.

본 연구는 청운대학교 2003년도 학술연구 조성비의 지원에 의한 결과임.

2. 실험계획

본 연구는 고성능 수중불분리 콘크리트의 개발을 위한 것으로 작업성을 위한 수중불분리 콘크리트의 물시멘트비의 성상을 파악하고, 경제성에 커다란 영향을 미칠 수 있는 수중불분리 콘크리트의 혼화제의 종류와 첨가량, 단위시멘트량에 따른 성상, 역학적성질에 영향을 미칠 수 있는 수중불분리 콘크리트의 잔골재율에 따른 성상등을 실험을 통하여 규명한다.

각 실험 내용을 평가하기 위한 실험항목으로는 아직 굳지 않은 콘크리트의 성질에 대해서는 유동성, 수중불분리 저항성(pH), 응결성, 충전성등을 파악하며, 경화된 콘크리트로서 갖추어야 될 각종 성능에 대한 평가를 실시하며, 성능과 경제성에서 밸런스를 이룰 수 있는 최적의 수중불분리 콘크리트 배합을 압축강도에 따라 설계한다.

2.1 사용재료

1) 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 H사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시멘트의 물리적 성질 및 화학적 성질은 표 1 및 표 2와 같다.

* 청운대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2) 골재

본 연구에서 사용한 굵은골재는 25mm 이하의 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 2.5mm 이하의 강모래를 사용하였다.

표 1. 시멘트의 일반적 성질

비중	분말도 (cm ³ /g)	안정도 (%)	응결시간		압축강도 (kgf/cm ²)		
			길모아		3일	7일	28일
			초결(분)	종결(분)			
3.15	3,200	양호	200	280	214	265	371

표 2. 시멘트의 화학성분

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig. loss(%)
22.36	6.01	3.07	60.44	3.75	2.6	0.76

3) 수중불분리 혼화제

현재 시중에서 가장 널리 사용되고 있는 J사와 S사의 히드록시 프로필 메틸셀룰로오스(HPMC) 수중불분리 혼화제를 사용하였다.

4) 고유동화제

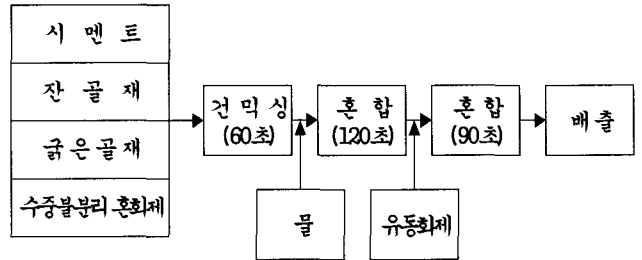
고성능 유동화제로서는 멜라민 설폰산염계를 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합

본 연구에서는 고성능 수중불분리 콘크리트의 28일 압축강도를 300kgf/cm² 이상의 고강도를 목표로 하여, 그림 1과 같은 배합순서로 하여, 표 3의 배합표에 의해 수중불분리 콘크리트를 제작하였다. 예비실험을 통하여 약 100여 배합으로 수중불

분리 콘크리트로서의 기본성상에 대한 예비실험을 실시한 후, 표 3과 같은 배합으로 압축하여 실험하였다. 압축강도 공시체(∅10x20cm)는 기중과 수중으로 분리하여 제작하였다. 수중에서 제작후 15분에 수중에서 꺼내어 기중에서 제작한 공시체와 같이 기중양생(20℃, 50%R.H.)을 실시하였다.

(방법1)



(방법2)

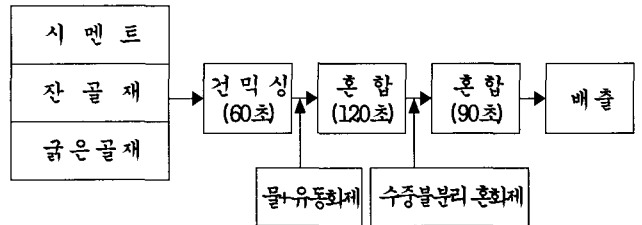


그림 1. 수중불분리 콘크리트의 배합순서

2.3 실험방법

1) 공시체 제작

시험 공시체 제작은 기중과 수중에서 각각 제작하였으며 수중 공시체의 제작은 ∅10x20cm의 몰드를 상면으로부터 10cm까지 물을 채운다. 수면에서 자유낙하 시킨 다음, 15분 방치후 물속에서 꺼내어 표면을 마무리하여, 20±3℃에서 보

표 3. 수중불분리 콘크리트용 배합설계

배합 No.	W/C (%)	잔골재율	단위량(kg/m ³)					고성능유동화제
			배합수	시멘트	굵은골재	잔골재	불분리혼화제	
1	38	40	220	579	890	585	4.6	11.6
2	38	40	220	521	890	585	4.6	11.6
3	39	40	196	500	976	646	4.6	10.0
4	38	40	205	540	941	623	4.3	10.8
5	38	40	220	579	890	585	2.9	11.6
6	38	40	220	579	890	585	4.6	11.6
7	38	40	171	450	1048	693	4.6	10.0
8	38	40	220	579	890	585	4.0	11.6
9	38	40	220	579	890	585	2.9	11.6
10	38	40	220	579	890	585	2.9	11.6
11	38	40	152	400	1094	724	4.6	11.6
12	38	40	220	579	890	585	2.9	11.6
13	42	40	243	579	868	574	4.6	11.6
14	45	40	260	579	841	557	4.6	11.6
15	38	42	220	579	876	579	4.6	11.6

배합 No.	W/C (%)	잔골재율	단위량(kg/m ³)					고성능유동화제
			배합수	시멘트	굵은골재	잔골재	불분리혼화제	
16	38	38	220	579	936	569	4.6	11.6
17	42	42	243	579	840	604	4.6	11.6
18	45	42	261	579	814	585	4.6	11.6
19	42	38	243	579	898	546	4.6	11.6
20	45	38	261	579	870	529	4.6	11.6
21	38	40	220	579	890	585	4.6	8.7
22	38	40	171	450	1048	693	4.6	14.5
23	38	38	220	579	936	569	2.9	11.6
24	38	42	220	579	898	546	2.9	11.6
25	40	40	232	579	890	585	2.9	11.6
26	38	40	220	579	890	585	2.9	8.9
27	38	40	220	579	890	585	2.9	5.8
28	38	40	220	579	890	585	1.7	11.6
29	38	40	260	579	890	585	3.5	11.6
30	38	40	220	579	890	585	2.9	11.6

관후 캐핑을 실시하였다. 양생은 소정의 기간까지 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 수조에서 양생하였다.

2) 슬럼프플로우

슬럼프플로우 시험은 KS F 2402 (포틀랜드 시멘트 슬럼프 시험 방법)에 의하여 수중불분리 콘크리트의 슬럼프 실험을 실시한 후, 5분 후에 유동이 멈춘 콘크리트에 대하여 슬럼프 플로우 값을 측정하였다.

3) 수중불분리성

수중에 타설된 콘크리트의 수중불분리도를 측정하기 위하여 1000ml 비이커에 증류수를 800ml 넣고 수중불분리 혼화제가 첨가된 콘크리트를 500g을 10등분하여 20~30초 이내에 자유낙하 시켰다. 3분간 방치 후 진공흡입장치를 사용하여 600ml를 채취한 후 사진 1의 pH 및 탁도시험기를 사용하여 pH와 탁도를 측정하였다. 또한 사진 2와 같이 매스실린더를 이용하여 육안으로 관찰하였다.

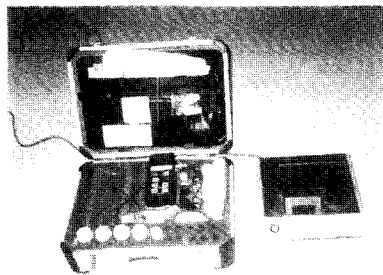


사진 1. pH 및 탁도시험기

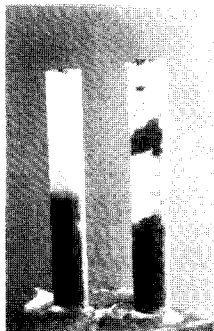


사진 2. 불분리성 관찰

4) 충전성

수중에서 거푸집내 충전성을 고려하여 그림 2와 같은 투명 아크릴 측정장치(240x240x500mm)를 사용하여 용기내에 물을 채운 다음 수중불분리 콘크리트를 수중에 자유낙하시켜 A실에 50cm 높이까지 채운 다음 가운데 판을 들어올려 5분경과 후, A실과 B실의 차이를 충전성으로 하였다. 또한 육안으로 충전성 정도를 관찰하였다.

5) 콘크리트의 응결

수중불분리 콘크리트는 사용 혼화제에 의해 수화가 지연되는 경향이 있다. 이러한 응결지연은 콘크리트의 시공성이 문

제가 발생하므로 응결시간에 다른 혼화제의 혼입량도 조절할 필요가 있다. 수중불분리 콘크리트의 응결시험은 KSF 2436 (관입 저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법)에 준하여 관입저항침으로 측정하였다.

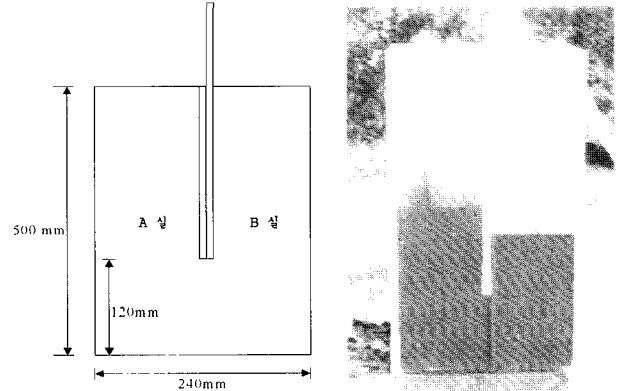


그림 2. 충전성 실험용 측정장치

6) 압축강도

압축강도시험은 기중과 수중에서 각각 제작한 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 공시체에 대하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 준하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동성에 영향을 미치는 배합조건

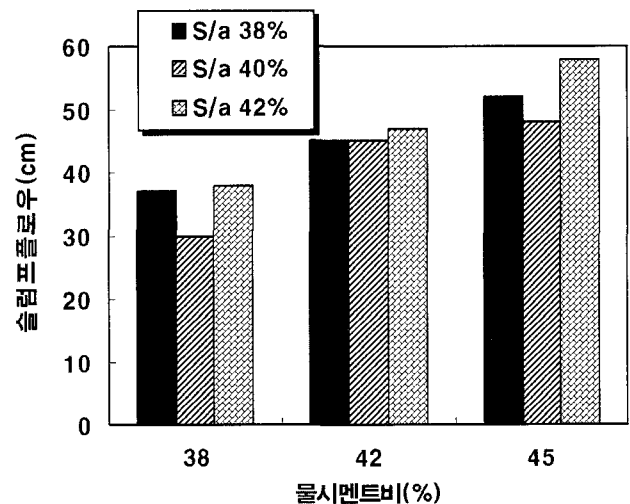


그림 3. 물시멘트비와 슬럼프플로우와의 관계

수중불분리 콘크리트의 유동성에 영향을 미치는 요인에 대한 실험고찰 내용을 그림 3, 그림 4, 그림 5 및 그림 6에 나타냈다. 물시멘트비의 증가에 따른 슬럼프 플로우는 크게 나타났으나 잔골재율의 변화에 따라서는 현격한 차이를 발견할 수 없었다. 또한 수중불분리 혼화제의 혼입량의 증가에 따라 슬럼프 플로우가 현저히 저감되었으며, 이에 따른 유동화제의

첨가에 의해 유동성을 확보할 수 있었다. 유동화제의 첨가에 따라 슬럼프 플로우는 비례관계로 커졌으며, 상호 상관성을 뚜렷하게 나타냈다. 또한 분리저감제의 혼입에 의한 슬럼프플로우도 상관관계를 가지고 있으나, 제품의 제조 회사에 따라 차이가 있었다. 본 실험에서는 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 요인을 적절한 배합관리로 경제성과 성능면에서 밸런스를 이룰 수 있는 배합설계를 유도할 수 있었다.

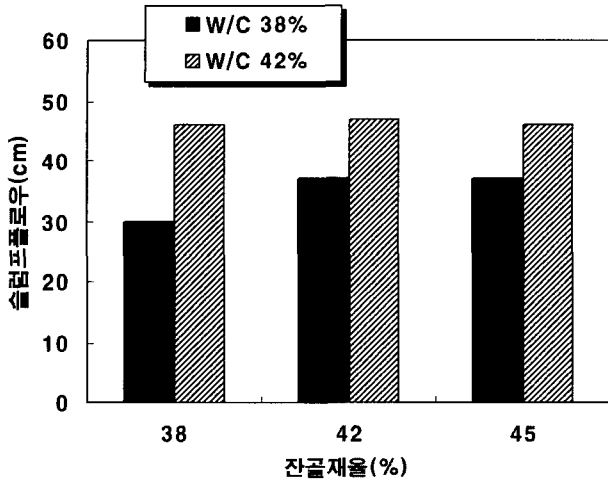


그림 4. 잔골재율과 슬럼프플로우와의 관계

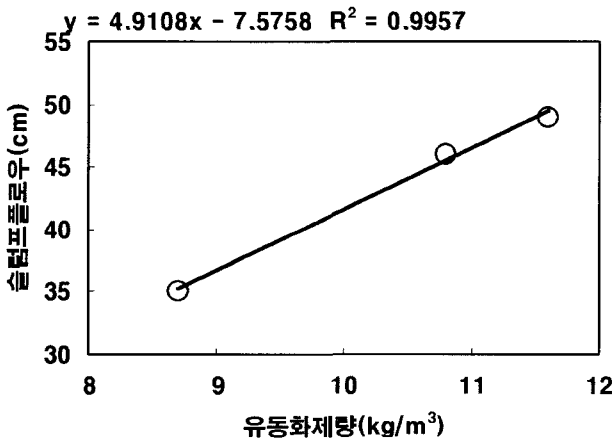


그림 5. 유동화제량과 슬럼프플로우와의 관계

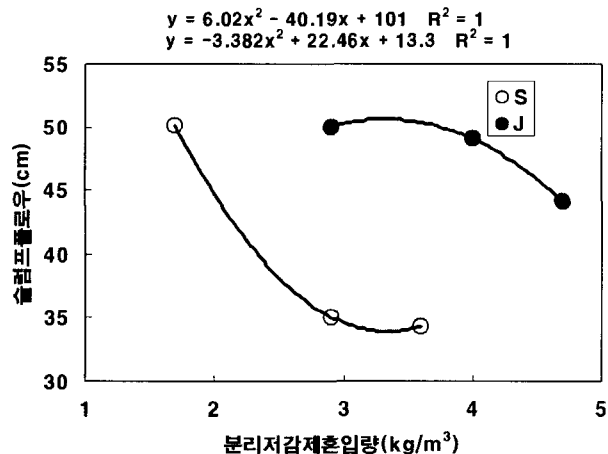


그림 6. 분리저감제량과 슬럼프플로우와의 관계

3.2 수중불분리 콘크리트의 충전성

본 연구에서 수중불분리 콘크리트의 충전성은 그림 1에서 설명한 실험용 기구를 사용하여 실시하였다. 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 보통 수중불분리성 콘크리트는 일반 시멘트 콘크리트와 비교하면 슬럼프가 25cm~27cm로 나타나 다짐을 하지 않아도 콘크리트 자체의 자중에 의해 수중에서 충전될 수 있는 성질을 가지고 있다. 이러한 성질을 가지지 못하면 수중 콘크리트 타설시 충진을 위한 다짐으로 시멘트 입자의 분리가 커 결국에는 강도와 내구성 면에서 열악한 콘크리트가 될 수 있다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 각종 배합조건에 따라 충전성의 차이가 크게 나타났다. 보통 충전높이차가 3~4cm 이하일 때, 충전성이 아주 좋게 나타났으며, 8cm 이상에서는 충전성의 부족으로 수중콘크리트 공시체 제작의 표면에 많은 공극이 나타났다.

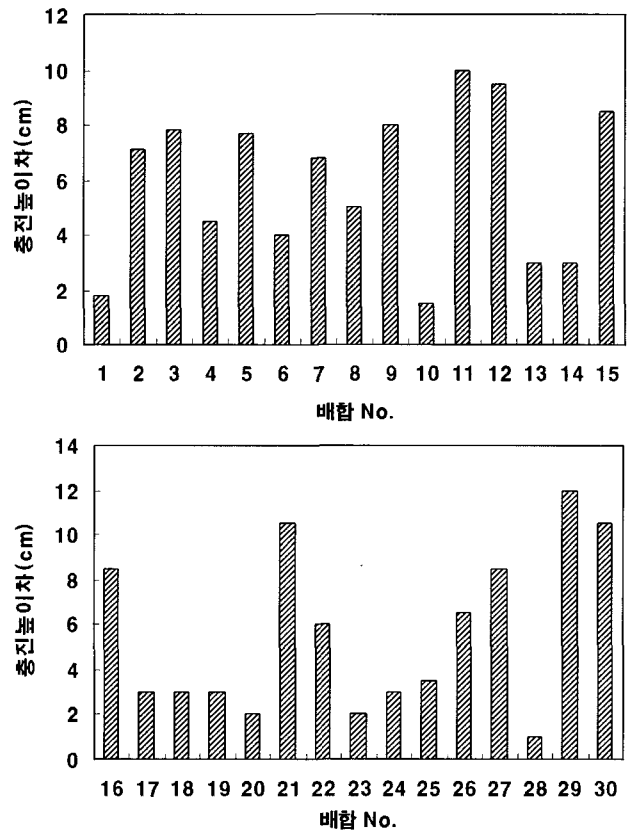


그림 7. 수중불분리 콘크리트의 충전 높이차

그러나 뒤에서 언급하고 있는 압축강도발현에는 충전높이차와의 뚜렷한 상관성은 발견할 수 없었다.

3.3 수중불분리 모르타르의 응결시간

수중불분리 콘크리트는 수중불분리 혼화제 및 유동화제를 혼입함에 따라 시멘트의 수화에 영향을 미칠 수 있다. 토목학회 기준에는 5시간 이상 30시간 이하로 하고 있다. 콘크리트의 응결시간이 너무 짧으면 시공성에 영향을 미치며 또한 너무 길면 강도발현에 의한 시공지연등의 문제를 초래할 수 있다. 수중불분리 콘크리트의 혼화제중 증점제로 사용되는 셀

물로오스 에테르계는 자체가 가지고 있는 OH기(수산기)로 인하여 콘크리트의 응결을 지연시킨다고 보고가 있고 또한 제조회사별로 사용하는 셀룰로오스 에테르계의 중합도 및 분자량이 틀리므로 응결시간이 각기 다르고 경화촉진제의 종류에 따라서 경화특성이 각기 다르다. 따라서 해양공사에서는 해수의 온도를 고려하여 경화특성을 파악하는 것이 중요하다.

본 실험에서는 수중불분리 혼화제의 종류 및 양에 따른 응결시간을 측정하기 위하여 시멘트 모르타르를 사용하여 실시하였다. 본 실험에서 응결시간 측정용 배합표는 표 4와 같으며 측정결과는 그림 8에 나타났다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 응결시간은 배합조건 및 제품회사에 따라 달랐다. 본 실험은 혼화제의 사용성을 예비실험한 것으로서, 실험결과에 따라 K사의 제품은 제외하고 본 연구를 실시하였다.

표 4. 응결시간 측정을 위한 예비 배합

배합 No.	사용량 (g)					제품사
	시멘트	잔골재	물	불분리 혼화제	유동화제	
1	600	600	228	4.8	12	J 사
2				4.2		
3				3.6		
4				4.8		S 사
5				4.2		
6				3.6		
7				4.8		K 사
8				3.6		

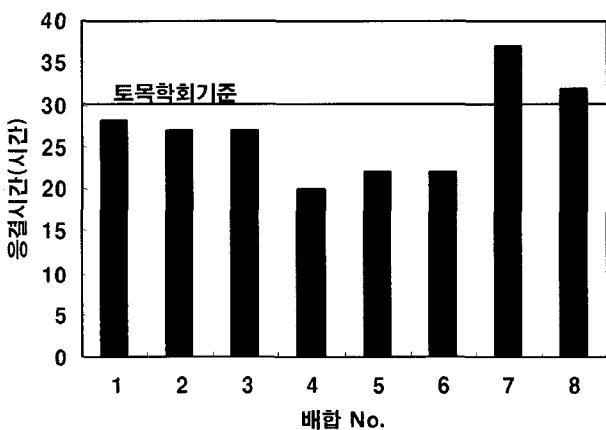


그림 8. 배합에 따른 응결시간

3.4 수중불분리 콘크리트의 pH

그림 9는 수중불분리 콘크리트의 분리저항성을 파악하기 위하여 실시한 것으로서 각종 배합에 따른 pH를 측정된 결과이다. 보통 시멘트 콘크리트의 pH는 12.5~13.0로 강 알칼리성이다. 수중불분리 콘크리트의 제작시 수중불분리 혼화제를 첨가함에 따라 시멘트가 물에 의한 분리의 정도가 적게 나타나는데, 보통 pH를 측정해 봄으로서 시멘트 분리의 정도를 비교 검토할 수 있다. 토목학회 규준안에서는 pH를 12.0이하

로 규정하고 있다. 본 연구결과 모든 배합에서 pH가 12.0 보다는 적게 나타났으나 근사치를 보이고 있다. 수중불분리 콘크리트의 pH는 수중불분리 혼화제의 첨가량이 증가할 수록 낮게 나타나는데, 이는 수중에서의 시멘트 입자의 물에 의한 분리가 적기 때문이다. 따라서 현장배합시 pH 측정은 슬럼프 플로우 시험, 충전성 시험, 탁도시험 등과 함께 검토되면 보다 더 품질확보 및 관리차원에서 유리할 것으로 사료된다.

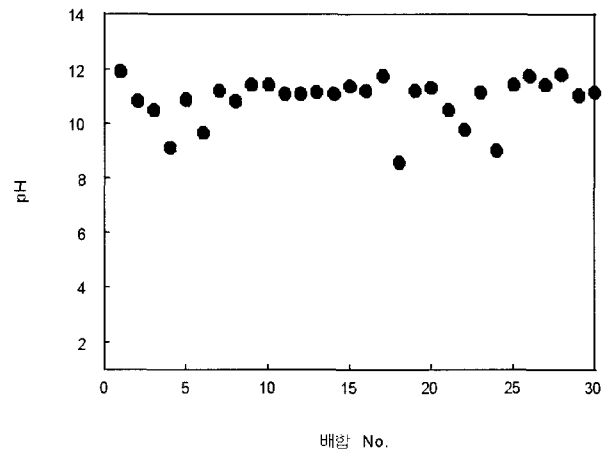


그림 9. 배합조건에 따른 수중불분리 콘크리트의 pH

3.5 압축강도에 영향을 미치는 배합조건

1) 단위시멘트량

본 연구에서는 수중불분리 콘크리트의 배합에서 No.3, 4, 6, 7, 및 No. 11번과 같이 물시멘트비를 고정하고 단위 시멘트량을 400kg/m³, 450kg/m³, 500kg/m³, 540kg/m³ 및 579kg/m³로 변화시켜 이때의 압축강도를 실험 고찰하였다. 그 결과를 그림 10에 나타냈다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 단위시멘트량을 증가시키면 수중불분리 콘크리트의 압축강도는 증가하는 경향을 보였으며, 기중과 수중의 타설조건에 관계없이 단위시멘트량과 압축강도와는 일정한 함수관계를 나타내고 있다. 본 연구에서 수중불분리 콘크리트의 강도를 300kgf/cm² 이상으로 발현시키기 위해서는 단위시멘트량이 450kg/m³ 이상으로 해야함을 알 수 있었다.

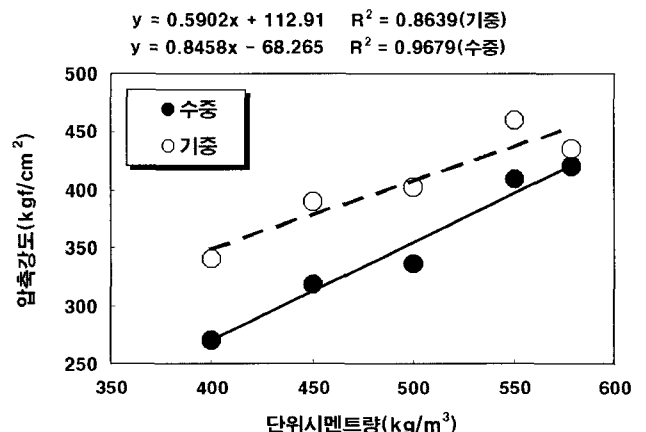


그림 10. 단위시멘트량과 압축강도와의 관계

2) 잔골재율

본 연구에서는 수중불분리 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 잔골재율에 대하여 실험을 실시하였다. 그림 11과 그림 12는 물시멘트비를 38%와 42%로 고정시키고 잔골재율을 38%, 40% 및 42%로 변화시킨 수중불분리 콘크리트의 잔골재율과 압축강도와의 관계를 나타내고 있다. 물시멘트비가 30%에서는 잔골재율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하였으나, 물시멘트비가 다소 높은 42%에서는 잔골재율이 증가함에 따라 압축강도가 비례적으로 감소하는 경향을 보여, 잔골재율이 압축강도에 영향을 미치는 것은 물시멘트비와 커다란 상관성이 있다고 볼 수 있다.

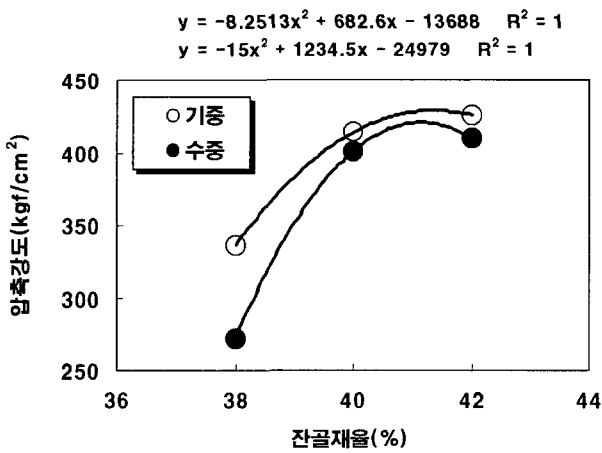


그림 11. S/a와 압축강도와의 관계(W/C:38%)

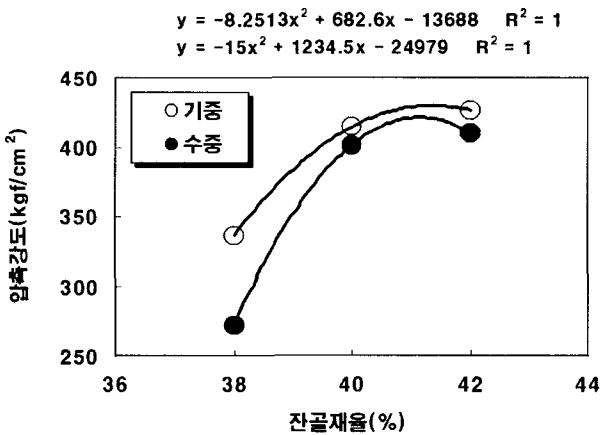


그림 12. S/a와 압축강도와의 관계(W/C:42%)

3) 물시멘트비

본 연구에서 수중불분리 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 물시멘트비에 대하여 고찰하였다. 잔골재율을 38% 및 42%로 고정하고, 물시멘트비를 38%, 42% 및 45%로 변화시켰다. 그 결과를 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 기중 및 수중에서 제작된 공시체의 압축강도는 물시멘트비의 증가에 따라 일정한 함수관계로 감소하는 경향을 보이고 있다. 물시멘트비 45%에서도 압축강도가 300kgf/cm²이상의 높은 강도를 나타냈다.

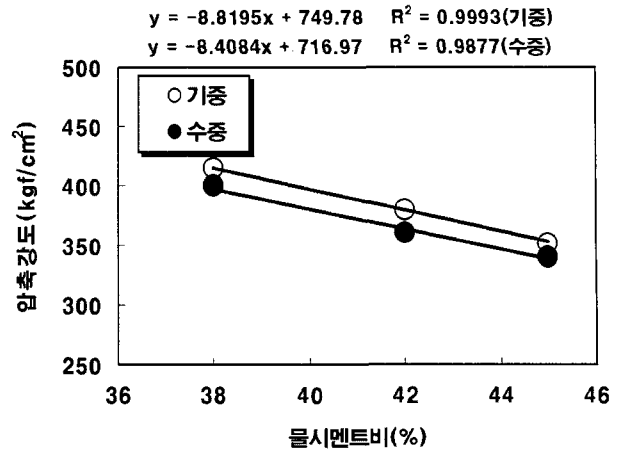


그림 13. W/C와 압축강도와의 관계(S/a:38%)

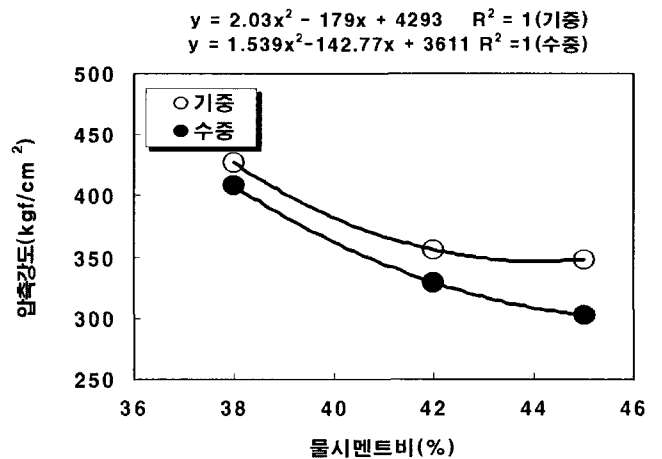
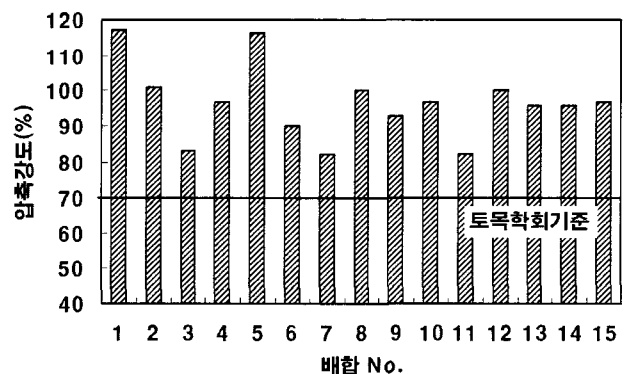


그림 14. W/C와 압축강도와의 관계(S/a:42%)

4) 압축강도비

그림 15는 기중에서 타설한 공시체에 대한 수중에서 타설한 공시체의 압축강도비를 나타내고 있다. 각종 배합조건에 따라 압축강도비는 다르나, 모든 배합조건에서 토목학회 기준의 기중 콘크리트의 압축강도에 대한 수중불분리 콘크리트의 압축강도비 70%를 모두 상회하였으며, 일부 배합에서는 기중에서 제작한 공시체 보다 높은 강도를 나타내고 있다.



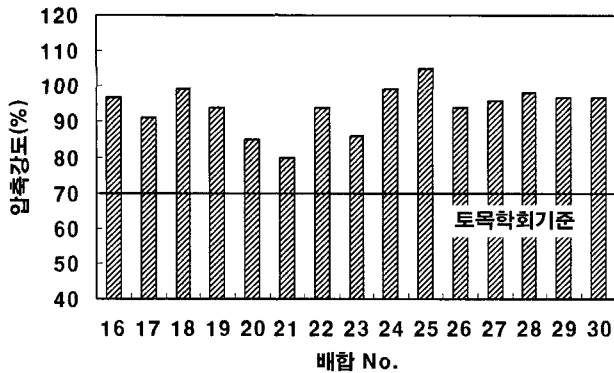


그림 15. 기중과 수중에서 제작한 공시체의 압축강도비

수중불분리 콘크리트는 수중에서 타설하기 때문에 기중에서와 같이 다짐이나 진동을 실시하지 않고 순수한 자중에 의한 충전으로 공시체가 제작된다. 따라서 표면에서는 많은 공극을 발견할 수 있었으며, 무엇보다도 유동성이 좋은 콘크리트 일수록 충전성이 양호하게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 고성능 수중불분리 콘크리트를 개발하기 위하여 실시된 것으로서, 수중불분리 콘크리트의 설계기준강도를 300kgf/cm² 이상으로 하여 각종 배합조건에 따른 수중불분리 콘크리트의 성능 확보를 목표로 하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구를 통하여 수중불분리 콘크리트의 압축강도별 배합은 다음 결과를 참조할 수 있다.

압축강도 (kgf/cm ²)	배합 No.	W/C (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m ³)					
				수량	시멘트	굵은골재	잔골재	불분리혼화제	유동화제
300~350	3	39	40	196	500	976	646	4.6	10.0
	14	45	40	260	579	841	557	4.6	11.6
	21	38	40	220	579	890	585	4.6	8.7
351~400	13	42	40	243	579	868	574	4.6	11.6
	27	38	40	220	579	890	585	2.9	5.8
	28	38	40	220	579	890	585	1.7	11.6
401~450	5	38	40	220	579	890	585	2.9	11.6
	22	38	40	171	450	1048	693	4.6	14.5
	24	38.7	42	220	579	898	846	2.9	11.6
451~500	8	38	40	220	579	890	585	4.0	11.6
	10	38	40	220	579	890	585	2.9	11.6

- 2) 수중불분리 콘크리트는 유동성은 물시멘트비와 잔골재율 및 불분리 혼화제량에 따라 영향을 미침을 알 수 있었다.
- 3) 수중불분리 콘크리트의 압축강도는 물시멘트비, 잔골재율, 유동화제 혼입량, 수중불분리 혼화제 혼입량에 의해 커다란 영향을 받으므로, 최적의 배합을 선택하여야 한다.

- 4) 수중불분리성, 충전성 및 응결시간도 사용 혼화제의 종류에 따라 차이가 컸으며, 제조회사에 따라서도 영향이 있으므로 선택이 중요하다.
- 5) 이상의 연구결과, 수중불분리 콘크리트의 성능에는 많은 요인이 영향을 미침을 알 수 있었으며, 시공성과 압축강도를 고려한 최적배합을 설계할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 山口ほか ; 水中コンクリート(ケイクリート)の開発とその適用 `橋梁` Vol.21. No.2, 1985.
- 芳賀ほか; 分離低減剤を用いた水中コンクリートに関する研究 `第6回コンクリート工學年次講演會論文集, 1984
- K.H.khayat, Effects of Antiwashout Admixtures on Fresh Concrete Properties, ACI Structural Journal, March-April. pp.164-170, 1995
- 오상근, 조인성, 수중불분리 혼화제, 한국콘크리트학회지, 제8권 2호, pp.41-48, 1996
- 이병덕 외2인, 양생온도에 따른 수중불분리성 콘크리트의 물리·역학적 특성, 한국콘크리트학회 1997년 봄 학술발표대회 논문집, pp.301-307, 19973.