

저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 물성

The Application of Super-flowing Concrete Using Low Heat Cement

	노재호*	한정호*
	Noh, Jae Ho	Han, Chung Ho
송용순*	최이현**	천재원***
Song, Yong Soon	Choi, I Hyoun	Cheon, Jae Hyoun

Abstract

The properties of super-flowing concrete with low heat cement were experimentally investigated and compared with ordinary 25-240-15 concrete with type V cement. The cement content of super-flowing concrete with the low heat cement was 400 kg/m³. However the hydration heat of super-flowing concrete is relatively lower than that of the ordinary concrete with type V cement. Also the ability to resist chloride ion penetration of super-flowing concrete with low heat cement is 5 times better than that of the ordinary concrete.

1. 서론

건설현장에서 콘크리트의 시공불량 문제를 해결하기 위하여 사용되는 초유동 콘크리트는 결합재량의 증가에 따른 수화발열량의 증대로 매스 콘크리트의 수화열 문제를 악화시킬 수 있다. 동양시멘트에서 개발된 혼합시멘트계 저발열 시멘트는⁽¹⁾ 유동성능이 우수하고 비중이 낮아 동일한 시멘트량에서 페이스트의 체적을 증가시키므로 초유동 콘크리트 제조에 적합한 장점 이외에도 시멘트의 수화발열량이 낮아 매스 콘크리트용 시멘트로 매우 유리한 조건을 가지고 있다.

서해대교 현장의 사장교 주탑 기초부분은 매스 콘크리트로 대형 구조물이고 밀집된 철근 배근 형태로 인하여 콘크리트의 다짐이 어렵고 1회에 타설되는 콘크리트량이 다량이므로 초유동 콘크리트의 적용이 필요한 현장이다. 이에 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트를 서해대교 주탑 기초부분에 타

* 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구실선임연구원

** 정회원, 한국도로공사 서해대교사업소 품질관리부장

*** 정회원, 대림산업 서해대교현장 품질관리실장

설할 경우를 대상으로 실내 실험 및 현장 레미콘 제조를 실시하여 다짐 불필요 성능 및 강도 발현 성능을 확인하였으며 해양구조물인 점을 고려하여 염소이온 침투실험 및 내화학적 실험을 실시하였다.

2. 연구내용 및 사용재료

2.1 연구내용

5종 시멘트를 사용한 25-240-15의 콘크리트를 시공하고 있는 서해대교 현장의 사장교 주탑 기초부는 대형 매스 콘크리트 구조물이므로 수화열응력에 의한 온도균열 방지를 위하여 파이프 쿨링을 실시하고 있다. 저발열 시멘트를 사용하여 초유동 콘크리트를 제조할 경우, 다른 결합재에 비해 상대적으로 적은 단위시멘트량으로 초유동 콘크리트의 제조가 가능하며 수화열 저감 효과로 파이프 쿨링을 생략할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이에 실내에서 서해대교 주탑기초부에 사용되는 골재를 이용하여 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트 배합실험을 실시하였다. 물시멘트비 및 단위시멘트량, 세골재율, 화학혼화제 첨가량 등은 시멘트 페이스트의 레올로지가 적절한 점도와 항복치를 갖도록 페이스트 실험과 콘크리트 실험을 통하여 조정하였다.

실내에서 실시된 배합설계에 따라 결정된 배합을 기초로 서해대교 대림산업 현장의 실기 배치 플랜트에서 레미콘을 제조하여 초유동 콘크리트의 다짐 불필요 성능을 확인하고 공시체를 제작하여 강도 발현 성능을 측정하고 해수 저항성 확인 실험을 실시하였으며 모의부재에 타설하여 수화열 특성을 파악하였다.

2.2 사용재료

실험에 사용된 각 재료의 물성은 표 1 및 표 2와 같다. 시멘트의 누적수화발열량은 미소수화열량계를 이용하여 23℃ 환경에서 측정하였다.

표 1 시멘트 물리성능

시멘트 종류	23℃에서의 누적수화발열량 (cal/g/72hours)	비중	블레인 (cm ² /g)	응결(시:분)		압축강도(kgf/cm ²)		
				초결	종결	3일	7일	28일
저발열	45	2.78	4,080	5:35	8:35	90	165	363
5종	66	3.17	3,190	5:05	8:10	201	274	375

표 2 사용 재료 물성

재 료	물 성
굵은골재	19mm 및 25mm 채석, 비중 2.59
잔골재	공주 하천사, 비중 2.59, 흡수율 2.61%
고성능감수제	나프탈렌술폰산염계

3. 저발열 시멘트를 사용한 초유동 레미콘 제조 및 모의부재 타설

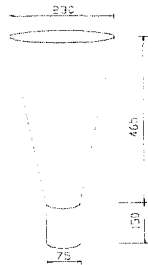
3.1 실내배합실험 및 배합설계

초유동 콘크리트의 다짐 불필요 성능은 슬럼프 플로우 시험과 그림 1에 나타낸 ○형 깔때기 시험, 철근 배근 박스 시험, 철근 배근 L형 시험 등을 통하여 확인하였다.

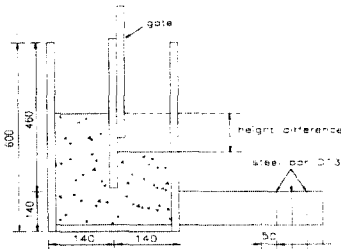
초유동 콘크리트의 작업성은 슬럼프 플로우 시험 결과가 60 ± 10 cm, ○형 깔때기 통과속도 20초 정도 이내, 철근 배근 박스 시험후의 양쪽 높이차이가 10cm 이내가 되도록 하고 L형 배근 박스 채움 시험시 내부가 전체적으로 잘 채워지도록 하여 채움성을 확인하였다.

콘크리트 시험시의 물시멘트비는 약 33~52%의 범위, 고성능감수제 첨가량은 시멘트량에 대해 중량비로 1.5~2.1% 범위에서 변화시켜 예비실험을 수행하였으며 잔골재율은 콘크리트가 유동시 굵은 골재가 서로 응집현상을 일으키지 않도록 결정하였다.

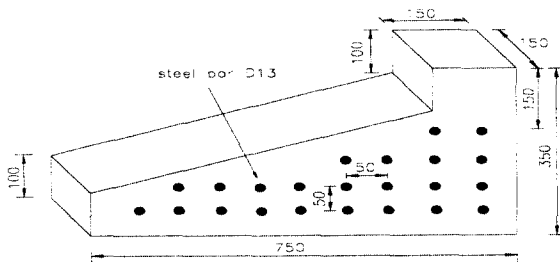
실내실험을 통하여 결정된 저발열 시멘트를 이용한 초유동 콘크리트의 배합과 5종시멘트를 이용한 일반콘크리트 배합은 표 3과 같다. 결정된 초유동 콘크리트의 실내에서의 고성능감수제 첨가량은 약 1.8% 정도가 적합하였으나 현장에서의 믹서의 성능 및 혼합시간 등에 따라 현장 상황을 고려하여 시멘트 중량의 2.1%로 결정되었다.



(a) ○형 깔때기 시험기



(b) 철근 배근 박스 채움성 시험기



(c) 철근 배근 L형 채움성 시험기

그림 1 유동성 및 채움성 평가 실험 장치 (치수 단위 : mm)

표 3 콘크리트 배합

시멘트 종류	굵은골재 최대크기 (mm)	W/C (%)	S/A (%)	단위수량 (kg/m^3)	시멘트 (kg/m^3)	잔골재 (kg/m^3)	굵은골재 (kg/m^3)	고성능감수제 (kg/m^3)
저발열	19	45	53	180	400	872	788	8.4
5종	25	51	46	175	346	756	1002	1.04*

*AE감수제 사용

표 4 시간 경과에 따른 작업성 변화

시간	믹싱후	30분	60분
슬럼프 플로우(cm)	60.5	60.0	59.5

3.2 초유동 레미콘 제조 및 유동성능

표 3의 배합에 따라 서해대교 대림산업 현장의 배처 플랜트에서 레미콘을 제조하였다. 운반 및 대기 시간 경과에 따른 작업성 유지 성능을 확인하기 위하여 제조된 초유동 레미콘의 시간 경과에 따른 슬럼프 플로우 변화를 측정하였으며 그 결과는 다음 표 4와 같다.

레미콘의 시간 경과에 따른 유동성 변화를 측정후, 경화 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위한 공시체를 제작하고 수화열 특성을 비교 파악하기 위하여 1m×1m×1m 크기의 모의부재에 콘크리트를 타설하여 내부 온도 변화를 측정하였다.

또한 서해대교 주탑 기초부는 해양으로부터의 화학적 침식작용을 받는 해중부에 속하므로 주로 해수 성분의 경화체 침투에 대한 검토가 필요하다. 이에 현장 레미콘으로 제조한 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트에 대하여 염소이온침투 저항성, 내약품성, 동결융해저항성 등의 내구성능 관련 시험을 기존의 5종시멘트를 사용한 일반 콘크리트와 비교하기 위한 공시체를 표 5와 같이 제작하였다.

표 5 콘크리트의 물성시험 항목

항 목		측정재령 및 양생방법
압축강도 (KS F 2405)		3, 7, 28, 56, 91일(공시체 제조하여 2일간 기건양생후, 수중양생 실시)
내약품성 실험	MgSO ₄	(1) 중량변화율 : 침지후 1주 간격 (2) 압축강도 : 56, 91일(28일 수중양생후, 각 용액에 침지)
	H ₂ SO ₄	
	2배 농도 인공해수	
염소이온 침투실험 (ASTM C 1202-91)		(1) 28일간 수중양생후 측정 (2) 28일 수중양생후, 28일간 인공해수중에서 양생후 측정
동결융해실험 (KS F 2456)		10, 20, 30, 50, 70, 90, 120, 150, 180, 210 사이클 (28일간 수중양생후, 2배 인공해수중에서 동결융해실험)

3.3 현장 타설 모의부재의 내부 온도 측정결과

본 현장실험에서는 부재 크기 1m×1m×1m의 모의부재에 5종 시멘트의 기존 배합의 콘크리트와 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트를 현장 배처 플랜트에서 제조하여 타설하고, 모의부재 중앙부의 상단에서 5cm, 중앙부, 하단에서 5cm 위치에 수화열 센서를 매립하고 수화열발생량에 따른 모의부재 콘크리트의 온도 변화를 측정하고자 하였다.

모의부재에 실기 배처 플랜트에서 제조된 레미콘을 타설시, 초유동 콘크리트와 5종 시멘트 사용 일반 레미콘 모두 별도의 다짐을 실시하지 않았다. 사진 1에 나타난 바와 같이 거푸집을 제거한 후에 모의부재의 표면을 관찰한 결과, 25-240-15 레미콘이 타설된 모의부재는 표면에 공극이 많고 부분적으로 자갈이 보이는 형상을 나타냈으나 초유동 레미콘이 타설된 모의부재의 표면은 매끈하여 다짐을 실

시하지 않고도 우수한 채움성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

모의부재 콘크리트 내부의 온도(수화열) 측정결과를 그림 2에 나타내었다. 5종 시멘트를 사용한 25-240-15 레미콘의 타설시 초기온도는 약 19℃ 정도였으며 약 1일 이후에서 모의부재 중심부의 최대온도는 약 43℃ 정도로 상승하였다. 저발열 시멘트를 사용한 초유동 레미콘의 타설시 초기온도는 약 18℃ 정도였으며 2일 후에 모의부재 내부 중심부의 최고 온도는 약 26℃를 나타내었다.

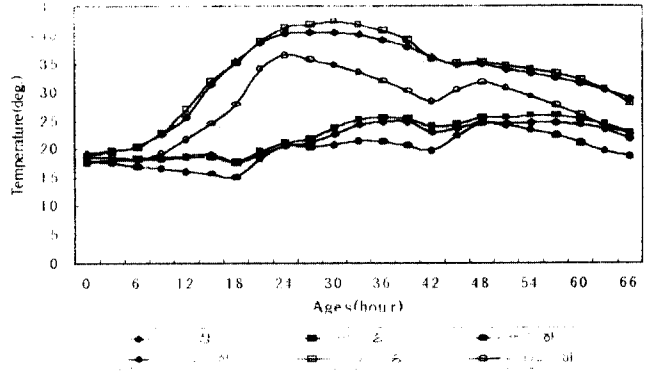
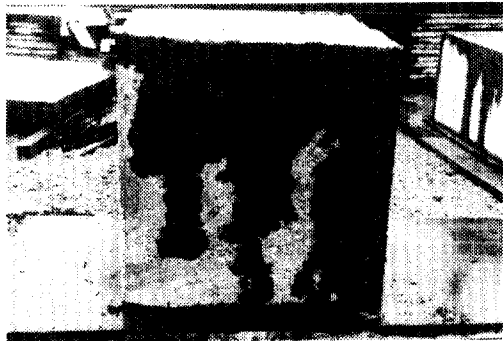
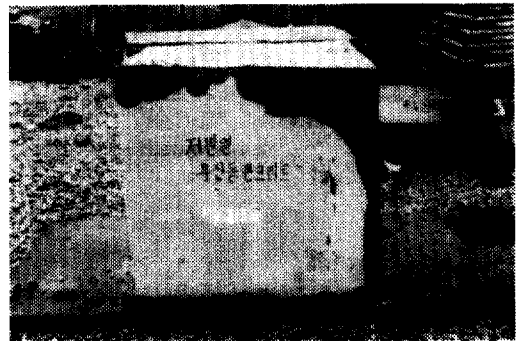


그림 2 모의부재 콘크리트 내부의 온도 변화 측정 결과

저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트는 5종 시멘트를 사용한 기존의 25-240-15 콘크리트에 비해 단위시멘트량이 54 kg/m³ 증가하였으나 5종 시멘트를 사용한 콘크리트보다 시멘트 수화열에 의한 콘크리트 모의부재 중심부의 온도 상승량이 약 16℃ 정도 저감되는 효과를 나타내었다. 따라서 주탑기 초부에 기존의 5종 시멘트를 사용한 25-240-15 콘크리트 대신에 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트를 시공할 경우, 파이프 쿨링의 생략이 가능하다고 판단된다.



(가) 25-240-15 콘크리트 모의 부재



(나) 초유동 콘크리트 모의 부재

사진 1 모의부재 거푸집 해체후의 사진

3. 4 압축강도 특성

경화 콘크리트의 압축강도 발현율은 표 6과 같다. 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 압축강도 발현율은 5종 시멘트를 사용한 콘크리트보다 초기강도 발현율은 느리나 28일 이후의 압축강도 발현율은 거의 동등하였다.

표 6 콘크리트의 압축강도

종 류 \ 재 령	3일	7일	28일	56일	91일
초유동 콘크리트	76	130	321	404	430
25-240-15	138	213	315	423	435

4. 초유동 콘크리트 내구성능

4.1 염소이온 침투 저항성

해수의 염분 농도는 장소와 시기에 따라 다소 변동하여 바깥 바다에는 3.3~3.7%의 범위이며 강물의 영향을 받는 해안부에서는 그보다 약간 작은 값을 나타낸다. 해수 성분 중에서 Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등의 주요 성분이 99.9%를 차지하며, 또한 NaCl 이 80% 이상을 점한다. 해수 성분의 시멘트 경화체 중에서의 침투속도는 $Cl^- > SO_4^{2-} > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 의 순이며 시멘트 경화체에 강한 영향을 미치는 이온은 Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 등이다.⁽²⁾

ASTM C 1202⁽³⁾에 따라 실시한 콘크리트 염소이온 침투성능을 확인하기 위한 전기적 방법에 의한 촉진시험 결과를 표 7에 나타내었다. 5종 시멘트를 사용한 콘크리트보다 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트가 약 1/6 정도의 통과전하량을 나타내어 저발열 시멘트 중의 혼합재의 염소이온 흡착 효과와 치밀한 미세구조 형성 효과로 염소이온이 침투하는 경로를 차단시키기 때문으로 판단된다.

표 7 염소 이온 침투성능 촉진시험결과

콘크리트 종류	25-240-15		초유동 콘크리트	
	28일	56일	28일	56일
침투전하량(coulombs)	6,101	5,666	1,160	779
ASTM 규정에 따른 염소이온 투과성 판정 결과	높음 (4,000 이상)	높음 (4,000 이상)	낮음 (1,000~2,000)	매우 낮음 (100~1,000)

표 8 ASTM D 1141의 인공해수 조성(단위: g/l)

NaCl	MgCl ₂ · 6H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr
24.53	5.20	4.09	1.16	0.695	0.201	0.101

4.2 내약품성

콘크리트의 내화학성에 관한 JIS(원안)법에서의 일반적인 표준시험액과 pH조정액을 참조하여 황산 5%, 황산마그네슘 10% 용액과 2배 농도 인공해수 용액에 콘크리트를 침지하였다. 인공해수용액은 표 8과 같이 ASTM D 1141⁽⁴⁾에 따라 제조하였다.

내약품성에 대한 물성 변화를 파악하기 위하여 콘크리트 공시체의 질량, 외관, 압축강도 변화를 측정하여 침지전의 초기치에 대한 변화율로 나타내었다.

저발열 시멘트를 이용한 초유동 콘크리트와 5종 시멘트를 이용한 일반콘크리트를 황산 5% 용액 및 황산염 10% 용액에 침지시킨후, 10주까지의 중량변화율 및 침지후 재령 28, 62일 압축강도를 측정한 결과는 각각 그림 3 및 표 9와 같다.

황산용액에 침지시킨 재령 62일에서 5종 시멘트를 사용한 콘크리트는 약 15%의 중량감소율을 보였으나, 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우는 중량이 거의 감소되지 않았다. 이는 5종 시멘트를 사용한 콘크리트는 수화물중 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 칼슘실리케이트 수화물(CSH)이 황산(H_2SO_4)과 반응하여 생성된 이수석고($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)가 물에 의해 쉽게 용해되어 붕괴되기 때문인⁽⁵⁾ 것으로 판단된다.

표 9 수중 및 화학용액에 침지한 콘크리트 압축강도

재령 및 양생조건	콘크리트 종류		
	초유동 콘크리트	25-240-15	
56일	수중	404(100)	423(100)
	2배 인공해수	377(93)	385(91)
	H ₂ SO ₄	330(82)	325(77)
	MgSO ₄	376(93)	421(99)
91일	수중	430(100)*	435(100)
	2배 인공해수	374(87)	378(87)
	H ₂ SO ₄	340(79)	231(53)
	MgSO ₄	354(82)	389(89)

* ()는 수중양생을 100%로 할 때 각 화학용액에 침지하여 측정된 강도 백분율임.

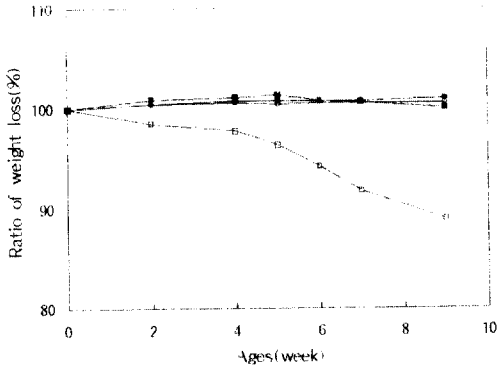


그림 3 화학용액 침지후 콘크리트의 중량변화율

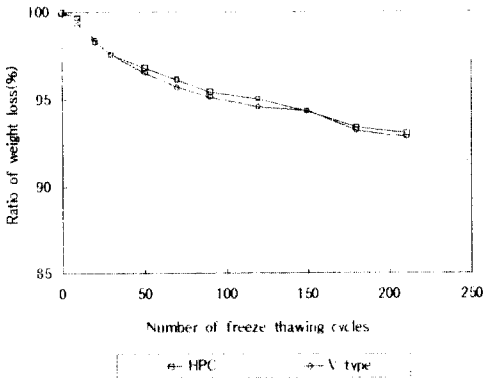


그림 4 동결융해 사이클별 콘크리트의 중량변화율

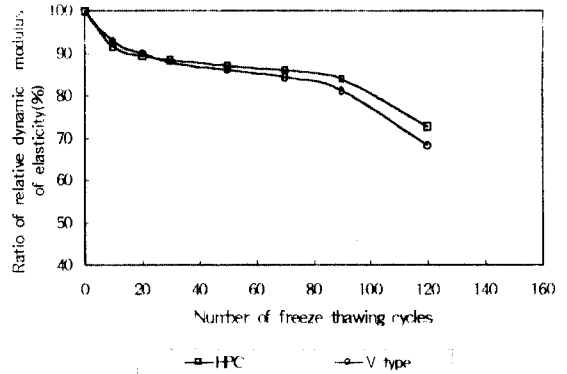


그림 5 동결융해 사이클별 콘크리트의 상대동탄성계수

황산염에 침지한 초유동 및 5종 콘크리트는 콘크리트의 세공 및 표면에서 반응생성물의 결정화가 침적되어 중량이 약간 증가하고 있으나 압축강도는 내부의 열화에 의해 저하하고 있다.

재령 56, 91일의 수중양생 압축강도를 100으로 할 때 황산 및 황산염, 인공해수에 침지시킨 공시체의 압축강도를 비교한 결과는 모든 시멘트가 약품의 침식에 의해 강도가 저하하는 경향을 나타내었다.

4.3 동결융해 저항성

2배 농도의 인공해수를 사용하여 동결융해실험한 결과는 그림 4 및 그림 5와 같다. 5종시멘트 사용 25-240-15 및 저발열 시멘트 사용 초유동 콘크리트의 양쪽 모두가 큰 차이는 없었으며 상대동탄성계수는 120사이클에서 종료되었다.

5. 결론

서해대교 주탑기초부의 초유동 콘크리트의 시공을 위하여 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트

의 제조를 실내실험을 통하여 실시하고 그 결과를 기초로 현장에서 실기 배치 플랜트를 이용하여 초유동 레미콘을 제조하고 그 유동성능 및 수화열 저감 성능을 모의부재에 타설하여 확인하였으며 기존의 5종시멘트를 사용한 25-240-15 레미콘과 비교하기 위한 염소이온 침투시험, 내화학적 시험과 동결융해저항성 실험 등을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 저발열 시멘트를 사용하여 단위시멘트량 약 400 kg/m^3 으로 실기 배치 플랜트에서 제조된 초유동 콘크리트를 다짐 없이 모의부재에 타설한 결과, 골재 분리 없이 거푸집 내부를 밀실하게 충전하였으며 블리딩이나 레이턴스 등이 발생하지 않았다.
- 2) 모의부재 내부의 온도는 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트가 5종시멘트를 사용한 기존의 배합보다 약 16°C 정도 저감되어 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트로 주탑 기초부분을 타설할 경우는 파이프 쿨링의 생략이 가능한 것으로 사료된다.
- 3) 저발열 시멘트를 사용하여 제조된 초유동 콘크리트의 수중양생 공시체의 초기의 압축강도 발현율은 5종시멘트를 사용한 25-240-15 레미콘에 비하여 상대적으로 느리나 28일 이후의 압축강도 발현율은 거의 동일하다.
- 4) 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 염소 이온의 침투에 대한 저항성이 5종시멘트를 사용한 25-240-15 콘크리트보다 약 5배 이상 증가하였다.
- 5) 5종시멘트를 사용한 일반 콘크리트와 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 내약품성 실험 결과는 거의 동등한 결과를 나타내었다.
- 6) 2배 농도의 인공해수 침지하에서의 동결융해실험한 결과는 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트와 5종시멘트를 사용한 일반 콘크리트 모두 거의 동등한 결과를 나타내었다.

이상의 결과에서 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트를 서해대교 주탑기초부에 적용할 경우, 유동성 개선에 의한 다짐 작업의 생략 효과와 함께 수화열 저감 효과에 따른 파이프 쿨의 생략이 가능하다고 판단된다. 또한 장기적 효과로 염소 이온의 침투에 대한 저항성 증가효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

끝으로 본 연구에 많은 도움을 주신 서해대교 현장 도로공사 및 대림산업 관계자 여러분과 동양중앙연구소 실험실의 김기철, 이범석씨께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 노재호, 박연동, 송용순, 김훈, 강석화, "저발열 시멘트 및 콘크리트의 특성," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제8권 2호(통권 제15집), 1996, pp. 345-351
2. 牛山宏隆, "港湾工事に用いるセメント," セメント・コンクリート, No. 594, 1996年 8月, pp. 80-83.
3. ASTM C 1202-91 "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"
4. ASTM D 1141-86 "Standard Specification Substitute Ocean Water"
5. 近田孝夫, "耐酸性とセメント," セメント・コンクリート, No. 594, 1996年 8月, pp. 56-59.