

고성능 콘크리트의 표면기포 저감에 관한 연구

A Study on the Surface Air-Void Reduction of High Performance Concrete

박 상 준*

Park, Sang-Joon

Abstract

In this study, reduction methods of surface air void were examined for high performance concrete having high viscosity. The effects of assumed influencing factors such as form types, form-coating materials, tamping equipments and methods were examined based on the tests on mock-up specimens made of high performance concrete. The test results can be summarized as follows: As for form types, the most favorable results were obtained when coated plywood form was used with panel-shape tamping equipments at the contact region with concrete, the second and the third being the water/air-permeable sheets and steel with coated plywood, respectively. As for tamping equipments, a vibrator with 6.5cm diameter was most effective. Finally, the shorter the tamping intervals, the better the reduction effect of surface air void. As a conclusion, an improved method was proposed to reduce surface air void and it was verified with the test result that only four air voids as large as 5~10mm are found in the are of 1m².

키워드 : 고성능 콘크리트, 갇힌공기, 거푸집 재료, 다짐장비, 다짐방법

Keywords : High Performance Concrete, Entrapped Air, Form Material, Tamping Equipment, Tamping Method

1. 서 론

최근 국내의 건설환경은 각종 구조물이 점차 대형화 및 복합화 됨에 따라 고성능의 각종 건설기술이 절실히 요구되고 있다. 그럼에도 불구하고, 관련분야의 노동력 및 숙련공 부족, 그리고 3D 기피현상은 점차로 심화되고 있는 실정이다. 이러한 이유로, 최근에는 고유동, 고강도, 그리고 고내구성의 고성능 콘크리트를 적용하는 사례가 크게 확대되고 있는데, 이러한 고성능 콘크리트는 일반콘크리트에 비해 제조단가측면에서 다소 고가라는 점, 원재료의 품질특성에 따라 품질변차가 크다는 점, 높은 점성에 기인하여 시공 및 마감이 다소 어렵다는 점, 그리고 구조물의 표면에 다량의 갇힌공기(entrapped air)를 포함하게 되는 사례가 있어, 미관상이나 내구성 측면에서 불리하게 되는 등의 특징¹⁾이 있다.

일반적으로 고성능 콘크리트의 유동특성은 주로 슬럼프나 슬럼프 플로우 시험에 대응하는 항복 값과 재료분리저항성에 대응하는 소성점도를 이용하여 평가하게 된다²⁾. 즉, 다량의 결합재와 고성능 감수제를 사용하게 되는 고성능 콘크리트의 경우 겉보기 항복 값은 적게 되나, 상대적으로 소성점도가 매우 크게 되는 특성을 가지고 있어, 갇힌공기 등의 영향으로 콘크리트의 노출면이 불량하게 되는 문제점을 갖고 있는데, 이는

특별한 마감이 고려되지 않은 각종 노출 콘크리트 구조물에 있어 미관상 측면뿐만 아니라 사용성과 내구성 측면^{3),4)}에서도 매우 중요한 관리항목이라 할 수 있다.

따라서 본고에서는 물-결합재비 0.325, 플라이애시 치환율 20%, 그리고 실리카폼 치환율이 3%인 1개 수준의 고강도, 고성능 콘크리트를 대상으로 하고, 여기에 거푸집 및 박리제의 종류, 그리고 다짐장비 및 방법 등의 각종 시공여건이 고성능 콘크리트를 적용한 구조물의 표면기포 저감특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였는데, 그 결과를 소개하고자 한다.

2. 콘크리트의 표면기포

일반적으로 콘크리트의 표면에 발생하는 기포는 구조물의 외관을 손상시킬 뿐만 아니라 표면이 포러스 한 상태로 되어 표층부의 강도가 저하하게 되고, 아울러 염화물 저항성이라든지, 탄산화 같은 내구성 측면에서의 성능도 현저히 저하된다고 보고⁵⁾되고 있다. (그림 1 참조, N:일반거푸집, A,B,C : 투수·흡수거푸집을 적용하여 표면기포를 억제한 경우) 더욱이, 고품질의 고강도·고유동·고내구 성능을 발휘하면서 높은 점성을 갖는 고성능 콘크리트의 경우는 그림 2에서와 같이 구조물의 단면이 적고, 타설속도가 빠를수록 기포발생이 크게 증가

* 정회원, (주)대우건설 기술연구원 건축연구팀, 선임연구원

하는 것으로 보고⁶⁾되고 있어, 이를 저감할 수 있는 노력이 요구되고 있다. 그럼에도 불구하고, 지금까지 적용된 국내의 각종 고성능 콘크리트는 이와 관련하여 별도의 품질관리를 적용하지 않고 있었으나, 최근 국내의 대표적인 토목구조물이라 할 수 있는 부산~거제간 연결도로 민자 투자 사업의 경우에 있어서는 특기시방서^{4),7)} 상의 내용으로 아래와 같이 관리하도록 하는 등 고성능 콘크리트의 표면기포와 관련하여 품질관리사례를 제시되고 있다.

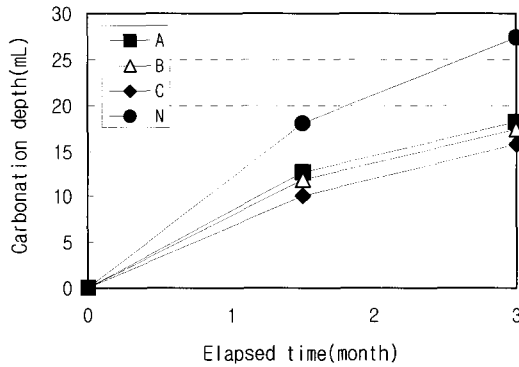


그림 1. 촉진탄산화 시험결과⁵⁾

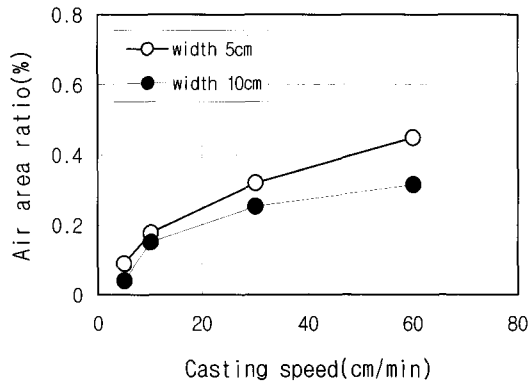


그림 2. 타설속도와 기포 면적율간의 상호관계⁶⁾

- 육안관찰시 콘크리트 표면기포의 최대 허용크기는 10mm.
- 1m²의 콘크리트에 있어 5mm~10mm 크기의 기포는 50개 이하, 0.01m²의 범위에서는 그와 같은 기포가 10개 이하.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구의 실험요인 및 수준은 표 1과 같다. 먼저, 콘크리트의 배합사항으로 물-결합재비는 0.325의 1개 수준, 그리고 단위수량은 137kg/m³, 무기질 혼화재로 플라이애시와 실리카 폼은 전체 결합재에 대하여 각각 20%와 3%를 치환하여 사용하는 것으로 하였으며, 콘크리트의 목표 슬럼프 플로는

600±10mm, 목표 공기량은 3.0%로 계획하였다.

고성능 콘크리트의 표면기포 저감방안 도출을 위한 거푸집의 종류로는 철과 코팅합판(A, B), 그리고 코팅합판에 투수/투기성 시트를 부착한 경우에 대하여 검토하는 것으로 하였는데, 여기서 코팅합판 B의 경우는 현장에서 제작한 별도의 다짐 도구를 콘크리트와 거푸집이 접촉하는 부위에 추가적으로 적용하는 것으로 하였다.

다짐방법으로서 먼저, 다짐장비는 지름이 각각 4.5cm, 6.5cm인 경우와 고주파 바이브레이터를 대상으로 하는 3수준으로 하였고, 다짐간격은 Ø6.5cm인 1개 수준의 바이브레이터에 대하여, 다짐간격을 20cm~40cm까지 10cm단위로 변화시키는 총 6수준에 대하여 검토하는 것으로 계획하였다. 박리제 종류로는 주요 용제가 각각 수성과 유성인 경우를 대상으로 하였다.

평가항목으로는 표 1에서와 각 재령별 압축강도와 염화물 확산특성에 대하여 검토하였는데, 이때 시험체는 코어 시험체를 대상으로 하였으며, 콘크리트 블록(모의부재)의 표면기포 크기 및 개수는 재령 7일에 측정하는 것으로 계획하였다.

표 1. 실험요인 및 수준

요 인		수 준
배합사항		1 W/B 0.325, FA 20%, SF 3%
거푸집 종류		4 · 철재 · 코팅합판(A) · 투수/투기성 시트 · 코팅합판(B)
다짐방법	장비 (20cm 간격)	6 Ø4.5cm, Ø6.5cm, 고주파 20cm, 30cm, 40cm
	간격 (Ø6.5cm장비)	
박리제 종류		2 수성, 유성
평가항목		3 · 코어 압축강도(1,3,7,14,28일) · 코어 염화물 확산계수(3,7,21,28일) · 표면기포크기 및 개수(7일)

3.2 사용재료

사용재료로서 먼저, 시멘트는 국내산 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 중국산 강모래를, 그리고 굵은 골재는 25mm 쇄석을 사용하였다. 혼화재료로서 고성능 감수제는 국내산 폴리카르본산계를 사용하였으며, 본 연구에서 사용한 재료의 물리·화학적 특성은 Table 2~5와 같다.

표 2. 시멘트의 물리적 특성

밀도	분말도 (cm ² /g)	안정성 (%)	응결시간 (분)		압축강도 (MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,222	0.05	235	370	19.5	29.3	39.7

표 3. 무기질 혼화제의 물리 화학적 특성

기호	밀도	분말도 (cm ² /g)	화학조성 (%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
FA	2.15	3,593	56.4	23.7	9.0	2.5	1.3	1.1
MSF	2.20	260,000	95.0	0.26	0.13	0.19	0.45	0.23

표 4. 골재의 물리적 특성

구분	밀도	조립율	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m ³)	0.08mm 체 통과량(%)
잔골재	2.57	2.7	1.83	1,470	1.8
굵은골재	2.65	6.9	0.62	1,577	0.3

표 5. 화학혼화제의 물리적 특성

구분	주요성분	형태	색상	밀도(20℃)
고성능 감수제	폴리카르본산계	액상	연황색	1.20±0.02

3.3 시험방법

실험사항으로 압축강도는 KS F 2405에 따라 실시하였으며, 염화물 확산시험은 그림 3에서와 같이 NT Build 492⁸⁾의 시험방법에 따라 실시하였다.

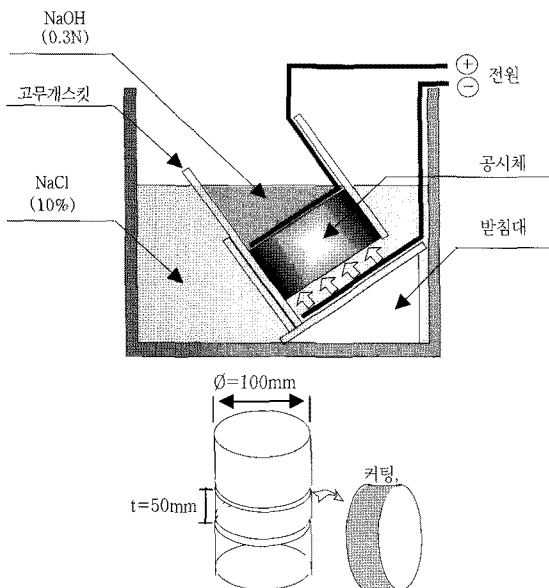


그림 3. 염화물 확산 시험방법 (NT Build 492)⁸⁾

거푸집 재질에 따른 콘크리트 표면 개선효과에 대해서는 그림 4와 같이 1.2m × 1.2m × 1.2m 크기의 모의부재를 대상으로 하여 3면이 각각 상이한 재질을 갖도록 거푸집을 제작하였으며, 동일한 형태의 모의부재 3개를 제작하였다. 여기서, 거푸집 종류로 코팅합판의 경우는 2case에 대하여 검토하였는데, 코팅합판(B)에 대해서는 일반적으로 적용하는 다짐장비 외에 그림 5와

같은 별도의 다짐도구를 제작하여 거푸집 표면에 추가적으로 적용하였다.

한편, 다짐장비에 따른 콘크리트의 표면기포 저감효과에 대해서는 그림 6과 같이 직경 4.5cm와 6.5cm 바이브레이터, 그리고 고주파 바이브레이터 등 3종류에 대하여 검토하였으며, 다짐방법은 20cm간격으로 동일하게 적용하였다.



그림 4. 콘크리트의 표면개선효과 검토를 위한 거푸집 종류

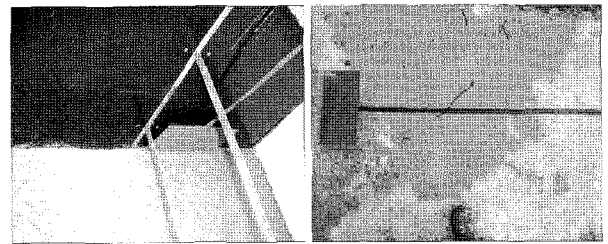


그림 5. 거푸집 표면 다짐용 도구

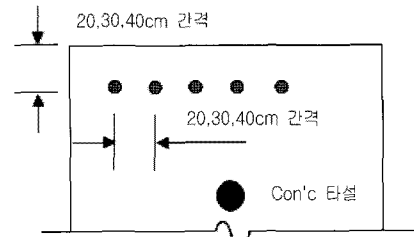


그림 6. 바이브레이터의 다짐간격

한편, 바이브레이터의 다짐간격에 따른 특성에 대해서는 직경 6.5cm인 다짐장비만을 사용하여, 다짐간격을 40cm와 30cm로 한 경우 그리고, 20cm로 시공하는 방안에 대하여 검토하였으며, 추가적으로 거푸집 면에 밀착시켜 다진 경우에 대해서도 검토하였다.

4. 실험결과 및 분석

먼저, 콘크리트의 표면 마감특성 개선을 목적으로 적용한 콘크리트의 배합사항은 아래 표 6과 같고, 이에 따른 압축강도와 염화물 확산특성은 그림 7과 같다. 즉 재령 28일의 압축강도는 약 65MPa 정도, 그리고 동일재령의 염화물 확산계수는 약 $6.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 정도인 것으로 평가되었다.

표 6. 콘크리트의 배합사항

W/B (%)	S/A (%)	단위재료량 (kg/m ³)						
		W	C	FA	SF	S	G	SP
32.5	41.0	137	325	84	13	712	1081	6.75

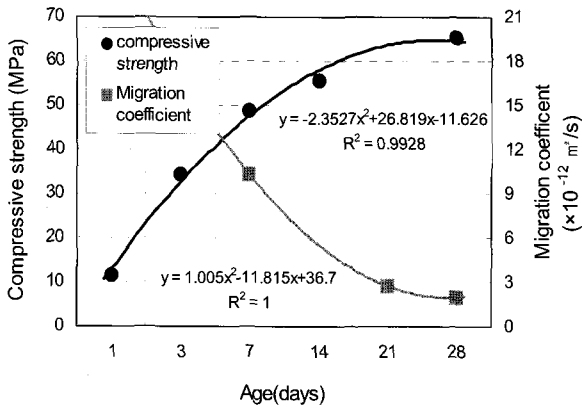
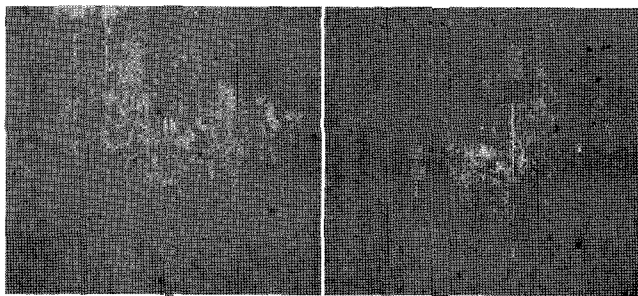


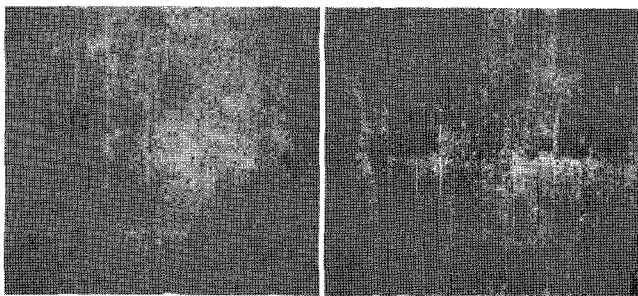
그림 7. 압축강도 및 염화물 확산특성

4.1 거푸집 종류

그림 8은 거푸집 종류 변화에 따른 고성능 콘크리트의 표면마감성상을 나타낸 것이다. 즉, 가장 일반적인 거푸집 재질이라 할 수 있는 철재와 코팅합판(A)의 경우는 기존 고강도, 고유동, 그리고 고내구성 콘크리트 수준의 표면기포를 포함하는 것으로 나타난 반면, 코팅합판과 콘크리트가 접하게 되는 부분에 대하여 그림 5에서와 같은 판상의 다짐도구를 현장에서 임의 제작하여



(a) 철재 (b) 코팅합판(A)



(c) 투수·투기성 시트 (d) 코팅합판(B)

그림 8. 거푸집 종류에 따른 표면개선 방안 검토결과

적용한 코팅합판(B)의 경우가 가장 양호한 표면성상을 나타내는 것으로 평가되었다. 그리고 그 다음이 투수·투기성 시트를 적용한 경우인 것으로 평가되었다. 이는 각각 투수·투기성 시트의 흡수특성과 함께 현장에서 제작한 다짐도구의 경우는 바이브레이터를 이용한 다짐작업에도 불구하고, 고성능 콘크리트의 높은 점성에 기인하여, 상부로 이동하지 못하고 있던 다수의 갇힌공기를 제거해주는 효과⁹⁾ 등에 기인한 결과로 분석된다.

4.2 다짐장비의 종류 및 간격

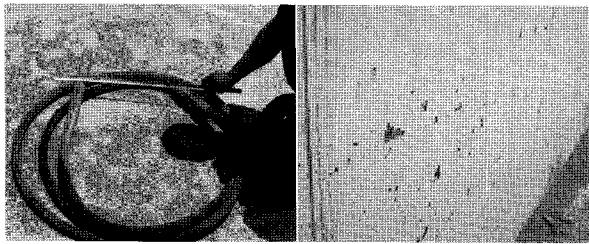
그림 9는 다짐장비의 종류에 따른 고성능 콘크리트의 표면기포 저감효과를 나타낸 것이다. 전반적으로 다짐장비에 따라 고성능 콘크리트의 표면기포 저감효과가 크게 상이한 것으로 나타났는데, 세부적으로는 비교적 큰 직경의 6.5cm 바이브레이터가 가장 효과적이고, 그 다음이 고주파 바이브레이터 그리고, 직경이 4.5cm인 바이브레이터 순인 것으로 나타났다. 이는 다짐장비의 성능과 함께 현장 운용의 용이성 등이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 분석된다. 즉, 본 연구범위에서는 다짐성능이 가장 우수한 것으로 예상되었던 고주파 바이브레이터 보다 상대적으로 큰 직경인 6.5cm 바이브레이터를 적용한 경우가 고성능 콘크리트의 표면기포 제거성능이 가장 우수한 것으로 평가되었는데, 이는 상대적으로 직경이 클수록 더욱 큰 진동가속도를 일으키는 기진부(起振部)를 내장하고 있어 진동폭이 증가하는 것과 함께 바이브레이터의 직경이 크므로 실제 다짐간격이 적게 되는 효과 등이 복합하여 나타난 결과로 분석된다. 아울러 작업원의 숙련도에 따라 적절히 운용할 수 있는 장비선택¹⁾도 매우 중요하다는 것을 의미하는 것이다.

그림 10은 선행연구에서 가장 효과적인 것으로 평가된 직경 6.5cm의 다짐장비만을 사용하여 다짐간격에 따른 콘크리트의 표면기포 저감효과를 나타낸 것이다. 즉, 다짐간격을 40cm와 30cm로 한 경우 그리고, 20cm를 적용하였는데, 여기서 다짐간격 20cm의 경우는 추가적으로, 거푸집 면에 밀착시켜 다지는 경우에 대해서도 검토하였다.

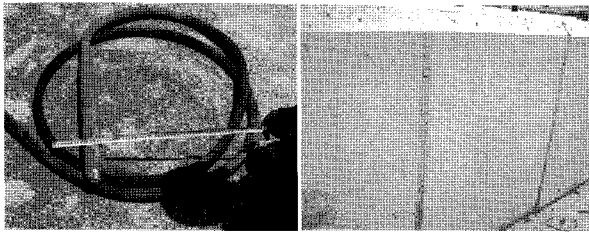
검토결과, 전반적으로 다짐간격이 적을수록 콘크리트의 표면이 크게 개선되는 것으로 평가되었는데, 본 연구범위에서는 다짐간격을 20cm로 시공하면서 거푸집 면에 밀착시켜 다진 경우가 고성능 콘크리트의 표면기포 저감에 가장 유리한 것으로 평가되었다. 즉, 고성능 콘크리트의 표면기포를 저감하기 위해서는 콘크리트의 균질성을 저하시키지 않는 범위 내에서 즉, 재료분리가 없는 범위 내에서 가능한 좁은 간격으로 다짐하는 것과 함께 일부는 거푸집과 밀착시켜 다짐하는 것도 효과적인 방안이라는 것을 알 수 있었다.

그림 11은 박리제 종류 변화에 따른 콘크리트의 표면기포저감 특성을 나타낸 것이다. 즉, 박리제 종류 변화에 따른 특성에 있어서는 주목할 만한 수준의 개선효과는 없는 것으로 평가되었다.

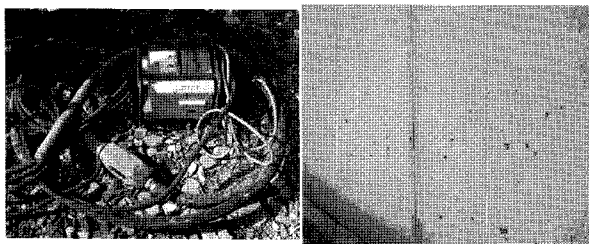
이상을 종합하여 고성능 콘크리트의 표면기포를 저감할 수



(a) Ø4.5cm 다짐장비

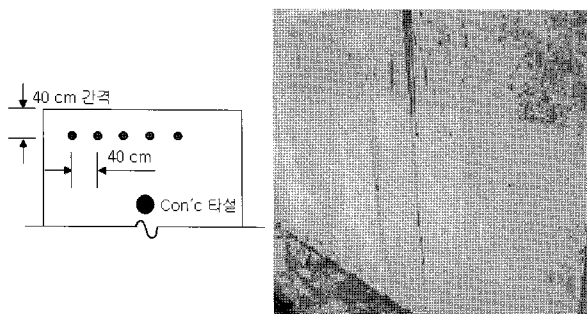


(b) Ø6.5cm 다짐장비

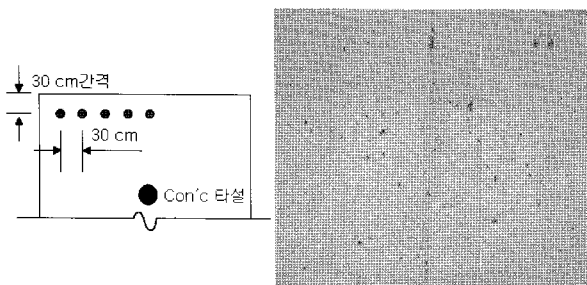


(c) Ø20cm 다짐장비

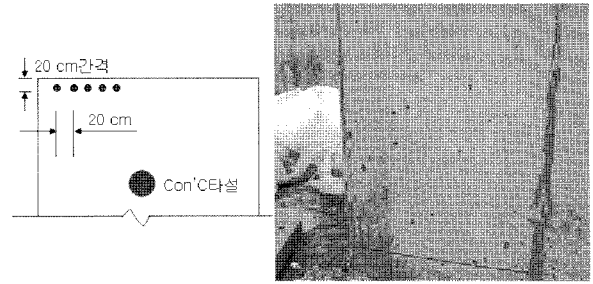
그림 9. 다짐장비 종류에 따른 표면개선 방안 검토결과



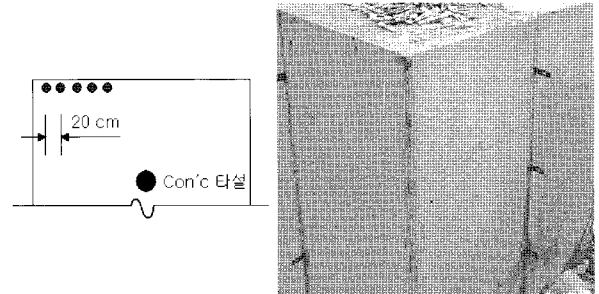
(a) 40cm 간격으로 거푸집에 이격다짐



(b) 30cm 간격으로 거푸집에 이격다짐



(c) Ø 20cm 간격으로 거푸집에 이격다짐



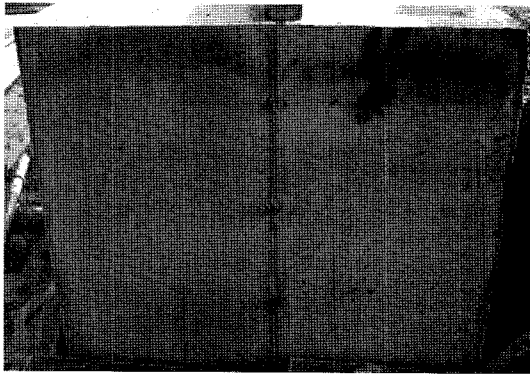
(d) Ø 20cm 간격으로 거푸집에 밀착다짐

그림 10. 다짐방법에 따른 표면개선 특성

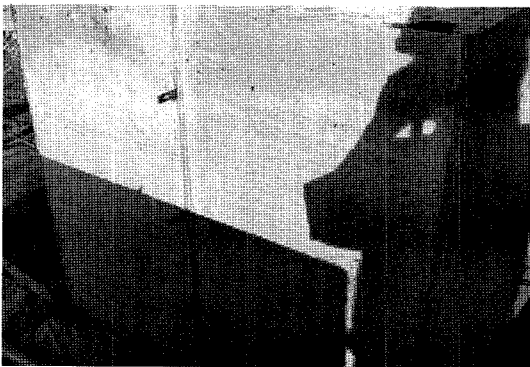
있는 방안에 대하여 정리하면 표 7과 같다. 즉, 고성능 콘크리트를 대상으로 기존 시공법이라 할 수 있는 코팅합판(A)에 직경 4.5cm의 바이브레이터를 사용하고, 40cm 간격으로 다짐한 콘크리트와 본고에서 도출한 개선방안을 비교한 결과, 기존 시공법의 경우는 10mm 이상 크기의 기포가 7EA/m², 그리고 5~10mm 크기의 기포가 93EA/m²인 것으로 조사된 반면, 본 연구의 개선방안을 적용한 경우에 있어서는 5~10mm 크기의 기포 4EA/m²만이 조사됨으로서 우수한 표면기포 저감효과가 있는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 부산~거제간 연결도로 민자 투자사업의 품질관리규준⁷⁾을 충분히 만족하는 수준인 것이다.

그러나 앞서도 언급한 바와 같이, 본 연구의 경우는 지금까지 고성능 콘크리트의 표면기포저감과 관련하여 국내의 별도 품질관리규준이나 사례가 거의 없었기 때문에, 토목구조물인 부산~거제간 연결도로 민자 투자사업에 적용하고 있는 품질관리규준과 함께, 이에 적용되고 있는 고강도, 고유동, 그리고 고내구성의 콘크리트에 한정하여 비교 검토한 것이다.

따라서 향후, 다양한 요구성능의 각종 건축구조물에 적용되는 고성능 콘크리트의 노출면을 목표 품질수준까지 개선하기 위해서는 적용대상인 콘크리트뿐만 아니라 대상구조물의 특성이나 현장여건 등을 고려한 종합적인 검토가 필요할 것으로 판단되는데, 그 내용^{1),6)}을 간략히 정리하면 아래와 같다.



(a) 유성 박리제



(b) 수성 박리제

그림 11. 박리제 종류에 따른 표면개선 특성

표 7. 고성능 콘크리트의 표면 개선방안 검토결과

방안	방법	평가결과		
		Excellent	Ordinary	Poor
거푸집	철판		○	
	코팅합판		○	
	투수·통기성 시트		○	
	코팅합판 + 판형 다짐도구	○		
다짐 장비	Ø 4.5cm 바이브레이터		○	
	Ø 6.5cm 바이브레이터	○		
	고주파 바이브레이터		○	
다짐 방법	40cm 간격 + 이격 다짐			○
	30cm 간격 + 이격 다짐			○
	20cm 간격 + 이격 다짐		○	
	20cm + 거푸집 밀착다짐	○		
박리제	유성		○	
	수성		○	

- 표면마감개선을 위한 최적의 마감시기와 응결시간과의 상호관계 검토
- 구조물의 형상이 경사면을 갖는 경우에 대한 검토
- 새로운 개념의 표면기포저감용 혼화제 또는 박리제 개발
- 타설속도와 슬럼프 플로우와의 상호관계 검토
- 마감표면의 정량적 평가방법 등

5. 결 론

일반콘크리트와 달리 높은 점성을 갖는 고성능 콘크리트의 경우는 콘크리트 노출면에 다소의 갇힌공기를 포함하는 특징을 갖고 있는데, 이는 구조물의 미관상 측면뿐만 아니라 사용성과 내구성 측면에서도 매우 불리하게 되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 모의부재를 대상으로 거푸집 및 박리제 종류 그리고, 다짐장비 및 방법 등이 구조물의 표면기포 저감 특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였는데 그 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 표면기포 저감을 목적으로 적용한 고성능 콘크리트의 압축강도는 재령 28일에 약 65MPa 정도이고, 동일재령의 염화물 확산계수는 약 $6.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 정도인 것으로 평가되었다.
- (2) 거푸집 종류 변화에 따른 고성능 콘크리트의 표면기포 저감효과는 거푸집으로 코팅합판을 사용하고, 여기에 판상의 다짐도구를 콘크리트와 접촉하는 부위에 적용한 경우가 가장 양호한 것으로 평가되었으며, 그 다음이 투수·투기성 시트를 적용한 경우, 그리고 철재와 코팅합판(A) 순인 것으로 평가되었다.
- (3) 다짐장비에 따른 고성능 콘크리트의 표면기포 저감효과는 직경이 큰 Ø6.5cm 바이브레이터가 가장 효과적이고, 그 다음이 고주파 바이브레이터 그리고, 직경이 4.5cm인 바이브레이터 순인 것으로 나타났다.
- (4) 다짐간격에 따른 콘크리트의 표면기포 저감효과는 다짐간격이 적을수록 콘크리트의 표면기포저감효과가 우수한 것으로 평가되었는데, 본 연구범위에서는 다짐 간격을 20cm로 시공하면서 거푸집 면에 밀착시켜 다짐 경우가 콘크리트의 갇힌공기 저감에 가장 효과적인 것으로 평가되었다.
- (5) 이상을 종합하여 시험적용 한 결과, 기존 시공법의 경우 10mm 이상 크기의 기포가 $7\text{EA}/\text{m}^2$, 그리고 5~10mm 크기의 기포가 $93\text{EA}/\text{m}^2$ 인 것으로 조사된 반면, 본 연구의 개선방안을 적용한 결과, 5~10mm 크기의 기포 $4\text{EA}/\text{m}^2$ 만이 조사됨으로서 우수한 성능의 표면기포 저감방안임을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 박상준, 김영진, 임현철, 장현갑, 부산~거제간 연결도로 사업에 적용한 100년 수명 고내구성 콘크리트, 콘크리트학회지, 제17권 6호,(통권 89호), pp.62~71, 2005.11
2. 부산~거제간 연결도로 민자 투자 사업 실시설계 공사시방서 4단계, pp. I -44, 2005.
3. 유재강, 김영진, 정기성, 임현철, 한국콘크리트학회 봄 학술발표논문집, 제18권 1호(통권 제 34집), pp.614~617, 2006.05
4. 정기성, 유재강, 박상준, 김영진, 임현철, 고내구성 해양콘크리트의 표면마감성 개선사례, 한국콘크리트학회지, Vol.18,No.4, pp.63~67, 2006.7
5. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서 해설, 2003
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트 진단 및 유지관리, 기문당, 2003. 04
7. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 2005.
8. CEB-FIP, Duracrete Final Technical Report-Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures (Brite-EuRam Programme, project BE 96-3942).
9. Øresundsbro Konsortiet Vester SØgade Io, The Øresund Technical Publications, 2001.05
10. NT BUILD 492, Concrete, Mortar and Cement-Based repair materials; Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest.
11. 日本土木學會, 高流動コンクリートに關, する技術の現狀と課題, 技術シリーズ, pp.197~198, 1997.
12. 日本土木學會, 高流動コンクリートの材料調合製造施工指針(案)同解説, 1997.

(접수 2008. 9. 4, 심사 2008. 10. 8, 게재확정 2008. 10. 15)