

프리믹스 혼합시멘트가 콘크리트의 품질편차에 미치는 영향

조 성 현 (한일시멘트 테크니컬센터, 선임연구원, 공학박사)
 한 정 희 (한일시멘트 테크니컬센터, 건재연구팀장)
 김 정 환 (한일시멘트 테크니컬센터, 센터장, 공학박사)

1. 서 론

최근 국내의 건설현황을 살펴보면 구조물들은 초고층화 및 대형화되는 추세이며, 또한 해양환경 같이 특수 환경에 있는 구조물들의 건설도 증가하는 추세이다. 이러한 초고층 및 대형화된 콘크리트 구조물 또는 특수 환경에 있는 콘크리트 구조물을 실현하기 위해서는 고강도 및 초고강도, 고유동, 저발열, 고내구성 등의 다양한 성능을 가지는 고성능 콘크리트가 필수적이다.

위와 같이 다양한 요구 성능에 대응하는 고성능 콘크리트를 제조하기 위해서는 보통 포틀랜드 시멘트만 가지고는 해결하기 어렵고, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 흙, 석회석 미분말 등과 같이 다양한 광물질 혼화재들을 적정량 비율로 혼합하여 사용하는 것은 필요하다. 이러한 혼화재료들은 대부분 산업부산물이기 때문에 콘크리트용 혼화재료로 재활용하는 것은 지구환경 보전과 자원의 유효이용이라는 관점에서 정부의 미래 비전인 저탄소 녹색성장과 같은 기조라고 볼 수 있겠다.

그러나 고성능 콘크리트 제조시 이들 광물질 혼화재료들을 사용하기 위해서는 레미콘 공장에 추가 사

일로 설치가 필요하다. 또한 이들 재료들을 각각 개별 투입하여 고성능 콘크리트를 생산할 경우 낮은 물-결합재비와 높은 단위결합재로 인한 콘크리트의 점성 증가로 혼화재료들이 균질하게 분산되지 않을 수 있으며, 이로 인해 콘크리트의 품질편차가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 콘크리트에 요구되는 성능에 따라 보통 포틀랜드 시멘트에 각각의 무기질 혼화재들을 일정비율로 미리 혼합한 프리믹스(Premixed) 혼합시멘트에 대한 연구 및 적용이 활발히 진행되고 있다.

따라서 본고에서는 고성능 콘크리트 제조시 프리믹스 혼합시멘트의 필요성과 콘크리트의 품질편차에 미치는 영향을 검토함으로써 향후 혼합시멘트의 활성화를 위한 참고자료를 제시하고자 한다.

2. 혼합시멘트의 필요성

가. 혼합시멘트 개요

콘크리트 제조시 사용하는 포틀랜드 시멘트의 일부 성질을 개선할 목적으로 혼합하는 재료를 통상

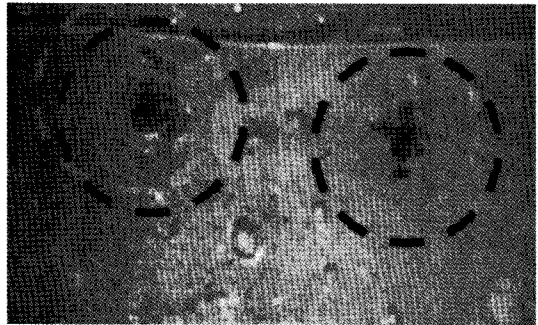
혼화재료라고 하며, 이러한 혼화재료를 일정한 비율로 포틀랜드 시멘트 혹은 포틀랜드 시멘트 클링커와 혼합하여 만든 시멘트를 이른바 혼합시멘트(Blended Cement)라 한다.

현재 국내의 경우 KS에 규격화되어 있는 혼합시멘트로는 고로 슬래그 시멘트, 플라이애시 시멘트 그리고 포틀랜드 포졸란 시멘트 등이 있고, 비록 비KS제품이기는 하지만, 매스콘크리트 구조물이나 해양 구조물 등에 많이 사용되고 있는 3성분계 또는 4성분계 혼합시멘트 등이 있다. 유럽에서는 각종 혼화재료의 사용이 적극 장려되어 보통 포틀랜드 시멘트에 각종 혼화재료들을 비율별로 혼합시킨 혼합시멘트가 약 162종류 정도 규격화되어 활용되고 있다. 일본의 경우는 혼합시멘트가 전체 시멘트 사용량의 약 20% 가량을 차지하고 있다.

나. 고성능 콘크리트 제조시 문제점

고성능 콘크리트를 제조하기 위해서는 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 흙, 석회석 미분말 등 광물질 혼화재료들의 사용이 필요하다. 또한 경우에 따라서는 소량의 특수첨가제 및 섬유 등이 사용되는 경우도 있다.

요구 성능에 따라 다르겠지만 고성능 콘크리트를 제조할 때에는 2~3종류의 광물질 혼화재료들의 사용이 필요하기 때문에 레미콘 공장에서는 이들 혼화재 사용 수만큼의 저장 사일로를 확보해야 한다. 만약 레미콘 공장에 사일로는 부족할 경우에는 추가적인 사일로 설치 및 추가 사일로 설치에 따른 공장부지 확보 등이 필요하다. 특히 소량의 특수 첨가제나 섬유 등을 투입할 경우에는 인력투입에 의존해야만 한다. 또한 이들 콘크리트는 대부분 낮은 물-결합재비, 높은 단위결합재량 상태에서 제조되기 때문에 콘크리트의 점성이 높아지고, 비빔시간이 길어진다. 일반적으로 보통 콘크리트는 레미콘 공장에서 제조시 비빔시간이 약 35초 정도인 것에 비해 고성능 콘크리트는 약 2~5분 정도 필요하다.



〈그림-1〉 고성능 콘크리트 제조시 실리카 흙의 뭉침 현상

따라서 고성능 콘크리트 제조시 광물질 혼화재료를 각각 투입하여 콘크리트를 제조할 경우 높은 점성으로 인해 각 재료들이 균질하게 혼합되지 않을 가능성이 높다. 그 대표적인 사례가 〈그림-1〉에서 보는 바와 같이 초미립자인 실리카 흙을 사용하여 고성능 콘크리트를 제조할 때 발생하는 실리카 흙의 뭉침 현상이다.

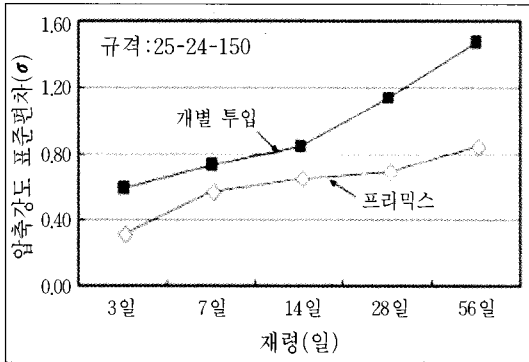
이와 같이 콘크리트의 혼합이 균질하지 않을 경우에는 콘크리트에 요구되는 강도, 내구성 등과 같은 주요 성능들의 품질편차에 크게 영향을 줄 수 있다.

다. 혼합시멘트의 장점

(1) 품질적 측면

고성능 콘크리트 제조시 광물질 혼화재료들을 각각 투입할 경우에는 위에서 살펴본 바와 같이 여러 가지 문제점들이 발생할 수 있다. 그중에서도 콘크리트의 요구 성능의 편차 발생이 가장 큰 문제가 될 수 있다. 그러므로 고성능 콘크리트 제조시에는 보통 포틀랜드 시멘트와 필요한 광물질 혼화재료들을 적정한 비율로 미리 혼합한 프리믹스 혼합시멘트를 사용하는 것이 여러가지 측면에서 유리할 수 있다.

첫째 다양한 광물질 혼화재의 사용에 따른 저장 사일로의 추가 설치가 필요없다. 고성능 콘크리트의 요구 성능에 따라 보통 포틀랜드 시멘트와 광물질 혼화재를 적정 비율로 미리 혼합하기 때문에 추가적인 사일로를 설치하지 않고, 기존 레미콘사가 보유



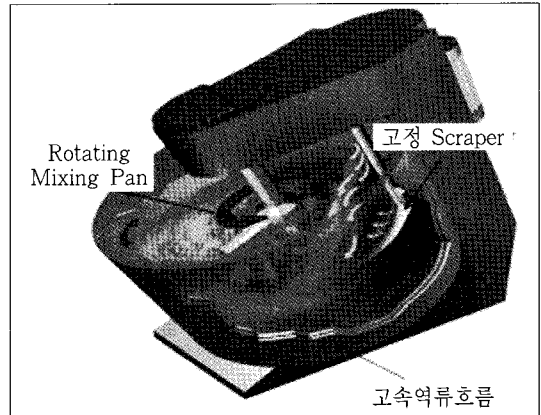
〈그림-2〉 개별 투입과 프리믹스 방식의 압축강도 편차

하고 있는 사일로면 충분할 것이다.

둘째 콘크리트 비빔시간이 단축되고, 콘크리트의 유동성이 개선될 수 있다. 최근 고성능 콘크리트에 대한 관심이 증가됨에 따라 고성능 콘크리트 제조시 광물질 혼화재의 투입방법에 따른 연구들이 진행되고 있다. 연구결과에 따르면 콘크리트 제조시 혼화재의 개별 투입방식 보다는 프리믹스 방식이 페이스트 또는 콘크리트의 비빔시간이 단축되고, 유동성이 개선된다고 보고되고 있다.

셋째 콘크리트의 요구 성능에 대한 품질편차를 감소시킬 수 있다. 〈그림-2〉는 일반 콘크리트 배합조건에서 플라이애시 20%와 시멘트 80%를 미리 혼합한 프리믹스 시멘트를 사용한 경우와 각각 투입한 경우의 각 재령별 압축강도의 편차를 나타낸 것이다. 플라이애시와 시멘트를 미리 혼합한 프리믹스 시멘트를 사용한 경우가 프리믹스하지 않고 각각 개별 투입한 경우보다 압축강도 편차가 작은 것을 알 수 있다. 특히 물-결합재비 및 높은 단위결합재를 사용하는 고성능 콘크리트의 경우에는 높은 점성으로 보다 더 불균질한 혼합이 될 확률이 높으며, 이로 인한 강도의 편차 경향은 더 클 것으로 예측된다.

넷째 소비자의 요구에 따라 안료, 증점제, 팽창제, 섬유 등 소량의 재료도 프리믹스가 가능하다. 〈그림-3〉과 같이 고효율 믹서를 사용할 경우 초미립자인 실리카 흄이나 소량의 특수첨가제 등을 균일하게 혼합시킬 수 있다.



〈그림-3〉 프리믹스 혼합시멘트 혼합용 믹서

(2) 사회환경적 측면

① 에너지 절감

혼합시멘트에 사용되는 혼화재료들은 대부분 산업부산물로서 자원의 효율적 활용 측면에서 큰 역할을 한다. 또한 2차적인 혼합만을 하면 되므로 시멘트를 생산하는데 소비되는 에너지를 절감할 수 있다.

② 환경보존

시멘트 산업은 소성 공정에서 화석원료의 사용과 석회석의 탈탄산 반응으로 온실가스의 주범인 다량의 CO₂를 발생시키게 된다. 통상적으로 시멘트 1톤을 생산하는데 약 1.3톤의 석회석 자원과 1톤의 CO₂ 가스를 배출해 다른 산업에 비하여 CO₂가스 배출이 많은 산업이다.

1997년 일본 교토에서 합의된 지구온난화 방지 국제회의에서 참가국은 2010년 이후 지구온난화 가스 배출량을 1990년 수준에서 유지할 것으로 협약하였다. 선진국의 경우 2008년부터 5년에 걸쳐 1990년 대비 평균 5.2%를 감축할 것을 의무화하고 있어 이를 실행하기 위해서는 시멘트 생산량을 어림잡아 절반으로 감축해야 하며 국내의 시멘트 산업도 이에 대한 대책이 필요한 실정이다.

그러나 선진국에 비하여 사회기반 시설이 부족하고 적어도 연 6~7% 수준의 고성장이 필요한 경제 구조를 갖고 있는 우리나라는 현재 수준의 시멘트

〈표-1〉 시멘트 종류별 CO₂ 배출 원단위

(단위 : g/kg)

| 구 분 | 포틀랜드시멘트 | 고로슬래그시멘트 B종 | 플라이애쉬시멘트 B종 |
|--------------------|---------|-------------|-------------|
| 석회석 탈탄산 기원 | 448.9 | 268.5 | 374.6 |
| 화석연료 연소 기원 | 297.7 | 191.5 | 245.1 |
| (화석기원) 폐기물 등 연소 기원 | 36.2 | 21.6 | 29.5 |
| 소각불요에 의한 삭감 | ▲36.2 | ▲21.6 | ▲29.5 |
| 합 계 | 746.6 | 460.0 | 619.7 |

생산량 유지가 불가피할 것으로 보이며 이에 대한 대책이 필요하다.

따라서 시멘트 산업의 CO₂ 감축 방안으로 산업부 산물을 시멘트의 혼화재료로 사용한 혼합시멘트의 활성화 방안이 대두되고 있다. 〈표-1〉에 나타난 바와 같이 고로슬래그 미분말이나 플라이애시를 사용하여 혼합시멘트를 제조할 경우 CO₂ 배출을 감축시킬 수 있을 것으로 예상된다.

굳지 않은 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 공기량, 슬럼프 및 슬럼프 플로우를 측정하였으며, 경화 후 콘크리트의 품질편차를 검토하기 위하여 재령 28일에서의 압축강도 시험 및 염화물 확산시험을 실시하였다. 또한 측정된 데이터에 대하여 평균, 표준편차 및 정규분포 곡선을 구하여 보통강도와 고강도 영역에서의 혼합시멘트 사용 여부에 따른 품질편차를 검토하였다.

3. 혼합시멘트를 사용한 콘크리트의 품질편차 검토

가. 실험계획

프리믹스 혼합시멘트를 사용한 콘크리트와 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 광물질 혼화재료를 각각 개별로 투입하여 제조한 콘크리트의 강도 및 염화물 확산계수 편차를 검토하기 위한 실험계획을 〈표-2〉에 나타내었다. 콘크리트 배합강도는 보통강도 영역과 고강도 영역으로 나누어 2수준으로 하였다.

나. 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 광물질 혼화재료는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 물리·화학적 성질은 〈표-3〉과 같다.

잔골재는 조립을 2.70, 표건밀도 2.59, 흡수율 1.57%인 강모래를 사용하였다. 보통강도 콘크리트 제조에 사용한 굵은 골재는 조립을 7.06, 흡수율 0.40%인 25mm 부순자갈을, 고강도 콘크리트 제조에 사용한 굵은 골재는 조립을 6.82, 흡수율 0.78%

〈표-2〉 실험계획

| 구 분 | W/B (%) | S/a (%) | G _{max} (mm) | 목표 슬럼프 (mm) | 단위재료량 (kg/m ³) | | | | | | | | 실험 항목 |
|------|---------------|---------|-----------------------|-------------|----------------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|------|--------------------------|
| | | | | | W | C | FA | BS | S | G | AD | | |
| 보통강도 | 개별투입 혼합시멘트 | 42.7 | 46.2 | 25 | 180 ± 25 (슬럼프) | 172 | 161 | 81 | 161 | 787 | 934 | 3.22 | • 공기량 • 슬럼프 및 슬럼프 플로우 |
| | | | | | | | | | | | | | |

〈표-3〉 사용재료의 물리·화학적 특성

| 종 류 | 실험항목 | 비 중 | 분말도 (cm ² /g) | 강열 감량 | 화 학 조 성 (%) | | | | | |
|------------|------|------|-----------------------------|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
| | | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| 1종 포틀랜드시멘트 | | 3.15 | 3,492 | 2.18 | 21.16 | 4.65 | 3.14 | 62.79 | 2.81 | 2.13 |
| 고로슬래그미분말 | | 2.94 | 4,174 | 0.35 | 28.14 | 15.87 | 1.06 | 45.95 | 4.98 | 2.12 |
| 플라이애시 | | 2.11 | 3,990 | 3.04 | 50.72 | 20.73 | 6.37 | 3.61 | 1.08 | 0.54 |

인 20mm 부순자갈을 사용하였다.

화학혼화제로는 비중 1.2인 나프탈란계 표준형 AE감수제를 사용하였다.

다. 실험방법

본 연구에 적용한 혼합시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그미분말 및 플라이애시를 사용한 3성분계 혼합시멘트를 적용하였으며 구성비는 다음 〈표-4〉와 같다.

프리믹스 혼합시멘트 제조는 실험실 분체혼합용 고속믹서를 사용하였으며, 혼합시간은 150초로 하여 균질하게 혼합되도록 하였다. 콘크리트 배합은 Two-Shaft Twin 믹서를 사용하였으며 보통강도의 배합시간은 90초, 고강도의 배합시간은 240초로 하였다.

굳지 않은 콘크리트 시험에서는 공기량과 슬럼프 및 슬럼프 플로우 시험을 실시하였다. 공시체 제작은 압축강도 시험용 30개, 염화물 확산계수 시험용 15개를 제작하여 재령 28일까지 20±2°C 수중양생을 실시하였다. 압축강도 시험은 28일 재령에서 각각 30개의 공시체에 대하여 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법」에 의거 실시하였다. 염화물 확산시험은 재령 28일에 각각 15개의 공시체에 대하여 유럽의 시험규준인 「NT Build 492 Chloride Migration Coefficient from non-Steady State

Migration Experiments」에 준하여 실시하였다.

라. 실험결과 및 고찰

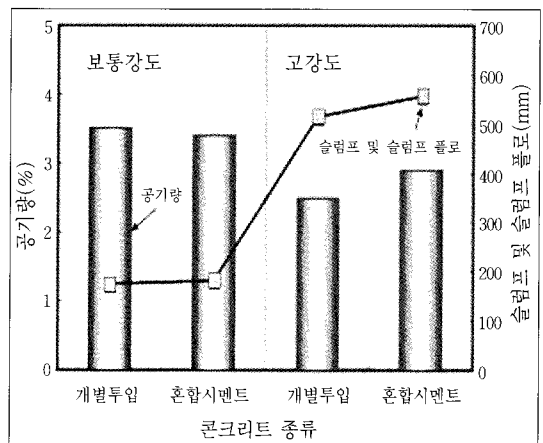
(1) 공기량, 슬럼프 및 슬럼프 플로

〈그림-4〉는 공기량, 슬럼프 및 슬럼프 플로 측정 결과를 나타낸 것이다. 공기량 측정결과 보통강도는 개별투입이 3.4%, 혼합시멘트가 3.5%로 나타났으며, 고강도는 개별투입이 2.5%, 혼합시멘트가 2.9%로 나타나 개별투입과 혼합시멘트에 따른 큰 영향은 없는 것으로 나타났다.

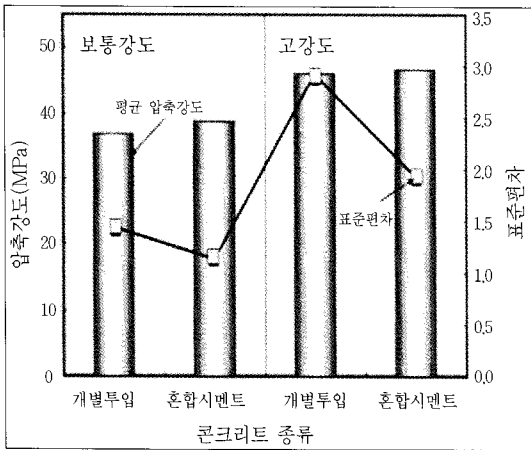
슬럼프 실험결과 보통강도는 개별투입이 175mm, 혼합시멘트가 180mm로 나타났으며, 고강도는 슬럼프 플로우 시험결과 개별투입이 515mm, 혼합시멘트가 555mm로 나타나 목표 슬럼프 및 슬럼프 플로에 모두 만족하는 것으로 나타났다. 또한 고강도 배합에서 혼화재료의 개별투입보다 미리 프리믹스

〈표-4〉 혼합시멘트 구성 비율

| 1종 포틀랜드 시멘트 | 고로슬래그 미분말 | 플라이애시 |
|-------------|-----------|-------|
| 40% | 40% | 20% |



〈그림-4〉 공기량, 슬럼프 및 슬럼프 플로



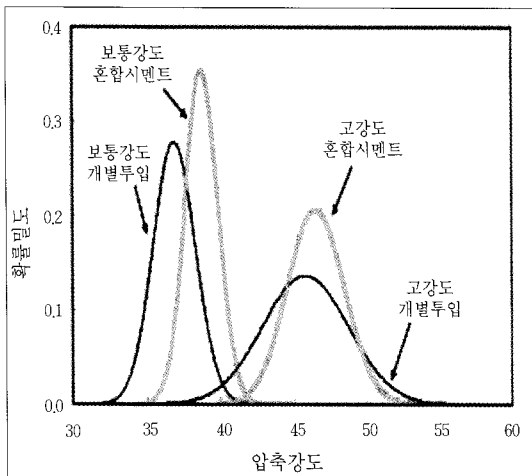
〈그림-5〉 평균 압축강도와 표준편차

한 혼합시멘트를 사용하는 것이 다소 유동성이 향상되었다.

(2) 압축강도

〈그림-5〉는 재령 28일에서의 평균 압축강도 및 표준편차를 나타낸 것이며, 〈그림-6〉은 압축강도의 정규분포곡선을 나타낸 것이다.

보통강도의 압축강도 평균값은 개별투입이 36.9MPa, 혼합시멘트가 38.7MPa로 나타나 혼합시멘트가 약 4.6% 높게 나타났다. 고강도는 개별투입이



〈그림-6〉 압축강도 정규분포곡선

45.9MPa, 혼합시멘트가 46.5MPa로 나타나 혼합시멘트가 약 1.3% 높게 나타났다.

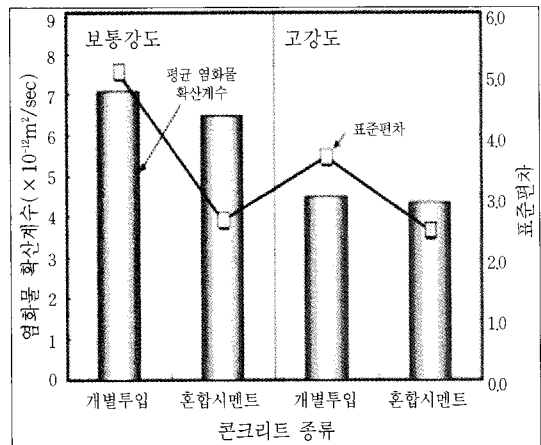
표준편차의 경우 보통강도에서 개별투입이 1.435, 혼합시멘트가 1.139로 나타나 혼합시멘트가 약 21% 낮게 나타났다. 고강도에서는 개별투입이 2.918, 혼합시멘트가 1.931로 나타나 혼합시멘트가 약 34% 낮게 나타났다. 따라서 〈그림-6〉에서 보는 바와 같이 고강도 영역으로 갈수록 압축강도의 변동폭이 크기 때문에 고강도 콘크리트 제조시 프리믹스 혼합시멘트를 사용하는 것이 바람직하다.

(3) 염화물 확산계수

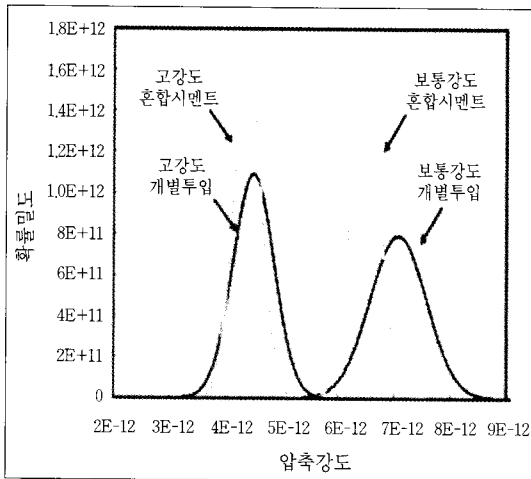
〈그림-7〉은 재령 28일에서의 평균 염화물 확산계수 및 표준편차를 나타낸 것이며, 〈그림-8〉은 염화물 확산계수의 정규분포곡선을 나타낸 것이다.

보통강도의 염화물 확산계수 평균값은 개별투입이 $7.07 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, 혼합시멘트가 $6.48 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 나타나 혼합시멘트가 약 8.3% 낮게 나타났으며, 고강도는 개별투입이 $4.49 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, 혼합시멘트가 $4.37 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 나타나 혼합시멘트가 약 2.7% 낮게 나타났다.

표준편차는 보통강도에서 개별투입이 5.04×10^{-13} , 혼합시멘트가 2.60×10^{-13} 로 나타나 혼합시멘트가 약 48% 낮게 나타났다. 고강도는 개별투입이 3.65



〈그림-7〉 평균 염화물 확산계수와 표준편차



〈그림-8〉 염화를 확산계수의 정규분포곡선

$\times 10^{-13}$, 혼합시멘트가 2.48×10^{-13} 으로 나타나 혼합시멘트가 약 33% 낮게 나타났다.

그러므로 〈그림-7〉에서 보는 바와 같이 염화물 확산계수는 압축강도와 달리 보통강도에서 품질변동이 크게 발생하기 때문에 보통강도에서는 내구성 확보차원에서 프리믹스 혼합시멘트를 사용하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

콘크리트 구조물은 고층화, 대형화됨에 따라 장수명화를 요구하게 된다. 따라서 콘크리트의 장수명화를 위해서는 고강도, 고유동, 고내구성, 저발열성 등의 복합적인 성능을 가지는 고성능 콘크리트가 필수적이다.

고성능 콘크리트의 제조를 위해서는 실리카흙, 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등 광물질 혼화재료들의 사용이 또한 필수적이라고 할 수 있다.

위에서 살펴보았듯이 이들 혼화재료들을 사용하기 위해서는 미리 프리믹스한 혼합시멘트를 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 물론 레미콘 공장에서 고성능 콘크리트 제조시 혼화재료들을 각각 투입하는 것이 프리믹스한 혼합시멘트를 사용하는 것보다 경제적인 수 있다. 그러나 장기적인 관점에서는 프리믹스 혼합시멘트를 사용하는 것이 콘크리트의 품질변동을 줄일 수 있으며, 콘크리트의 품질변동을 줄이는 것은 결과적으로 콘크리트 구조물의 내구수명 향상에도 도움이 될 것이다. ▲

시사 용어 해설

▶ 거시 마케팅(Macro-Marketing)

마케팅에 관한 연구는 두가지의 방법에 의하여 접근될 수 있다. 하나는 미시 마케팅적 접근이고 다른 하나는 거시 마케팅적 접근이다. 거시 마케팅은 어떻게 마케팅 활동이 사회에 영향을 미치는가. 어떻게 사회가 미시 마케팅 활동에 영향을 미치는가. 그리고 어떻게 마케팅 활동이 전체로서 가능한가에 대해 관심을 두고 있다. 거시 마케팅 연구는 경쟁 구조나 정부 규제가 어떻게 기업이나 소비자 대중의 행동 그리고 고객의 요구에 부응하기 위한 마케팅 활동의 효율성에 영향을 미치는가에 주요 초점을 두고 있다. 즉 미시 마케팅은 개별기업 수준에서의 활동에 관련되는 반면 거시 마케팅은 기업들의 총체적인 행동에서 나타나는 인과관계의 동태적인면에 관련된다.