

고성능 감수제와 방동제를 사용한 콘크리트의 초기 동해 저항성능

Frost Resistance of Concrete with Antifreezers and Superplasticizers at Early age

박 찬 규*

한 광 재**

Park, Chan Kyu

Han, Kwang Jae

ABSTRACT

In this paper, the effects of type and content of antifreezer on the frost resistance of concrete at early age were investigated. For this purpose, 4 types of antifreezer and 2 types of superplasticizer were selected, and based on the strength recovery ratio, the frost resistance of concrete was estimated. The optimum concrete mixes were also produced when the curing temperatures were -5 and -10°C .

1. 서론

0°C 이하의 기온에서 콘크리트 물성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 콘크리트내의 얼음 결정체이다. 즉 콘크리트가 동결하면 골재와 시멘트 페이스트의 조직이 빙결로 파괴되어 미세한 균열이 발생하고 여기에 동결융해가 반복되면 체적팽창으로 인해 파괴에 이르게 된다. 기존의 실험에 의하면 굳지않은 콘크리트 내의 물은 수 시간 내에 상당한 양이 어는 것으로 알려져 있다. 따라서 영하의 조건에서 막 타설된 콘크리트가 양생 보호 없이 외기온도에 노출된 경우에는 콘크리트에 중대한 결함을 야기할 수 있다. 일반적으로 콘크리트의 초기동해에 영향을 주는 요인으로는 1) 타설 후 콘크리트가 동결하기까지 경과시간이 짧은 경우, 2) 콘크리트의 동결시간이 긴 경우, 3) 콘크리트의 강도가 작은 경우, 4) 콘크리트의 동결융해가 반복된 경우, 5) W/C비가 큰 경우, 6) 적절한 공기 연행제를 사용하지 않은 경우 등이다. 이러한 여러 가지 조건의 정도에 따라서 피해정도가 크고 회복력도 작아진다.

이와 같은 여러 가지 조건 하에서 콘크리트의 내동해성을 개선하는 방법 중에서 대표적인 것으로는 첫 번째, 조강형 시멘트를 사용하여 콘크리트의 초기 압축강도발현을 증진시켜 초기 내동해성을 증가시키는 방법, 두 번째는 콘크리트 모세공극 내의 자유수 동결을 방지하는 방동제를 첨가하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 주어진 영하 온도에서 초기(특히 초결 이전) 동해를 입지 않는 방동콘크리트를 제조함에 있어서 방동제의 종류에 따른 방동성능 및 방동제의 최적 첨가량 등에 대하여 연구하였다.

* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원

** 이건설업주식회사 이사

2. 방동 콘크리트의 방동 성능 평가

영하의 온도에서 콘크리트를 시공함에 있어서 초기 양생조건에 따라 방동콘크리트와 내한콘크리트로 나눌 수 있다. 이 두 가지 콘크리트의 개념은 영하에서 양생되는 콘크리트가 동해를 입지 않고 또한 안정적으로 강도발현을 도모하고자 하는 것은 동일하나 그림 1에 나타낸 바와 같이 콘크리트를 생산하고 타설한 후의 양생조건에 따라 달라진다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 내한콘크리트는 타설 후에 곧바로 영하의 외기온도에 콘크리트를 양생시키지 않고 영상의 조건에서 1일 정도 양생을 실시하는데 이 때의 온도는 약 5℃ 정도이다. 이러한 방법은 일본에서 많이 실시하는 방법으로서 1일 정도 영상에서 양생을 실시한 후 주어진 영하의 온도에서 콘크리트를 양생시킨다.

방동콘크리트와 내한콘크리트와 비교해 볼 때 영하의 조건에 노출시키는 시간이 22~23시간 정도 빠르는데 이는 한중콘크리트의 배합설계에 있어서 큰 차이를 나타낸다. 내한콘크리트인 경우는 초결 및 중결이 지난 이후에 콘크리트가 영하의 온도에 노출되고, 방동콘크리트인 경우에는 콘크리트 타설 후 곧바로 영하의 외기온도에 노출되므로 최소한 초결 이전에 콘크리트가 부분적으로 동결할 가능성이 매우 높다. 따라서 방동콘크리트의 경우는 내한콘크리트인 경우보다 방동제의 사용량이 증가하고 방동제의 방동성능 또한 우수해야 한다.

콘크리트의 방동성능은 콘크리트 제조 후 영하의 외기온도에 노출되는 시간에 큰 영향을 받는다. 즉 그림 2에 나타낸 바와 같이 영상의 온도에서 콘크리트를 제조한 후 영하에 노출되는 시점 T1이 길어질수록 콘크리트의 방동성능은 증가한다. 따라서 그림 2의 T1이 길어지면 길어질수록 한중콘크리트의 개념은 방동콘크리트에서 내한콘크리트 개념으로 변화되어가며, 내한콘크리트의 개념은 결국 없어지게 된다. 즉 T1이 상당히 길면 상온에서 타설하게 되는 일반콘크리트와 동일하게 된다. 이러한 상온 타설된 콘크리트의 경우에는 동결융해에 대한 내구성만 확보하면 된다.

따라서 콘크리트 제조 후 영하의 외기온도에 노출시키는 시간 T1이 짧아질수록 콘크리트의 방동성능이 떨어지며, T1이 수 시간인 경우에는 초기 동해를 입지 않는 완벽한 방동콘크리트로 배합설계를 실시해야 한다. 이러한 방동콘크리트의 배합설계 방법은 앞에서 언급한 바와 같이 시멘트형과 방동제형 방동콘크리트가 있다. 따라서 채택된 배합설계방법으로 제조된 콘크리트가 초기에 동해에 저항성능이 있는지에 대해서는 압축강도 실험으로 평가할 수 있으며, 그 평가 방법은 그림 2의 온도이력곡선에 근거하여 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Strength\ Ratio\ (\%) = \frac{f_c(T3)}{f_c'(T3 - T2)} \times 100 \geq 90 \sim 100 \quad (1)$$

여기서 $f_c(T3)$ 는 주어진 영하의 온도에서 T2 시간만큼 양생시킨 콘크리트의 T3에서의 압축강도이고 $f_c'(T3 - T2)$ 는 T3 - T2 재령만큼 상온 또는 표준양생 시킨 콘크리트의 압축강도이다. 즉 콘크리트가

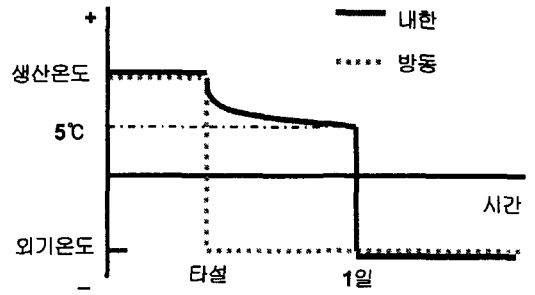


그림 3 방동 콘크리트와 내한 콘크리트의 개념 차이

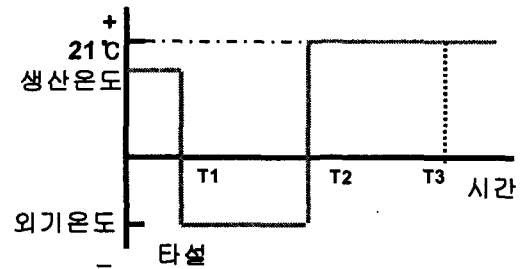


그림 4 콘크리트의 온도이력

초기동해를 입지 않았다면, 식 (1)의 압축강도 회복율은 항상 90~100% 이상을 나타내는데, 일반적으로 콘크리트가 초기에 심각하게 동해를 입었다면, 이 값은 40~60%의 값을 나타낸다.

3. 방동제를 사용한 방동 콘크리트의 특성

3.1 방동제 종류에 따른 방동성능 실험

국내에서 유통되는 방동제 중 방동성능이 가장 우수한 제품을 찾아내기 위한 실험을 수행하였는데, 실험의 간편성을 위하여 모르타르를 사용하였다. 즉 주어진 콘크리트 배합비에서 굵은골재를 제외한 나머지 사용재료만을 이용하여 모르타르를 제조하고 이에 대하여 방동성능을 평가하는 방법을 사용하였다. 그리고 냉동온도는 -5°C 및 -10°C 로 하였다.

시멘트는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 석회석 미분말은 Y사의 제품으로서 비중은 2.70, 비표면적은 약 $8,500\text{cm}^2/\text{g}$ 정도인 제품을 사용하였다. 굵은골재는 최대골재크기 25mm인 쇄석으로서 비중은 2.67로 가정하였다. 잔골재는 세척사로서 비중은 2.60, 흡수율은 1.0%이다. 또한 표 1에 나타낸 바와 같이 방동제는 4종류를 사용하였으며, 고성능 감수제는 SP4를 사용하였다.

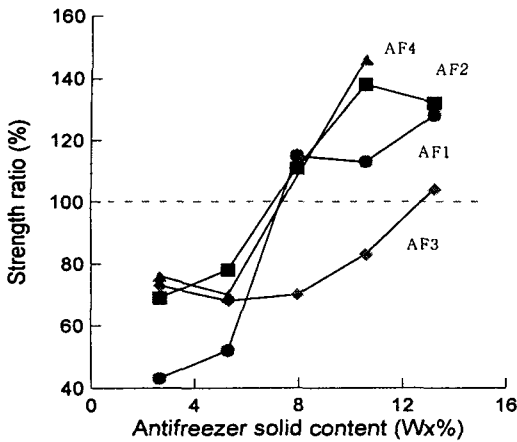
표 1 방동제와 고성능 감수제의 종류

| 종류 | 구분 | 주요 성분 |
|---------|-----|--|
| 방동제 | AF1 | 질산염 나트륨 계통(Sodium nitrite-nitrate) |
| | AF2 | 2종류의 무기질산염 복합물(Sodium nitrite-nitrate+Calcium nitrite-nitrate) |
| | AF3 | 질산염 칼슘계통(Calcium nitrite-nitrate) |
| | AF4 | 질산염 나트륨계통(sodium nitrite-nitrate)+무기침가제(Potash) |
| 고성능 감수제 | SP4 | 나프탈렌 술폰산 포름알데히드 축합물(Sulfonated naphthalene formaldehyde condensate)+Polymethacrylic acid, sodium salt |
| | SP5 | 나프탈렌 술폰산 포름알데히드 축합물(Sulfonated naphthalene formaldehyde condensate)+acrylic acid-malic anhydride copolymer |

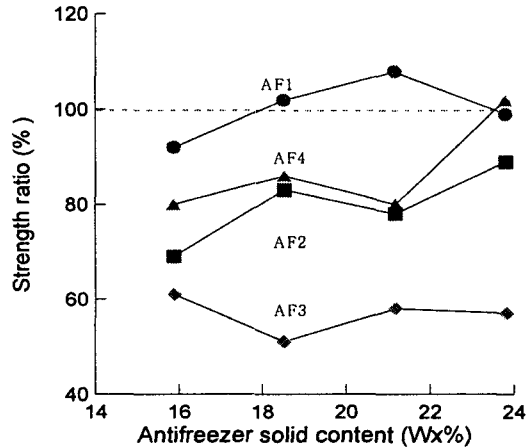
콘크리트 배합비는 콘크리트 배합비에 있어서 단위수량은 $165\text{kg}/\text{m}^3$, 제 1종 시멘트는 $412.5\text{kg}/\text{m}^3$, 석회석 미분말은 $72.8\text{kg}/\text{m}^3$, S/a는 44%로 선정하였다.

모르타르 믹서기를 이용하여 모르타르를 제조한 후 플로우 값을 측정하였다. 플로우 값은 고성능 감수제의 양이 1% 이상이 소용되는 17cm 정도로 설정하였다. 그리고 공시체를 제작한 후 1시간 뒤에 비닐로 감싸준 후 각각 영하 5°C 와 영하 10°C 로 온도가 설정된 항온항습기에 거치시켰다. 그리고 3일 동안 각각의 영하의 온도에서 양생을 실시하였다. 상온양생인 경우는 기중에서 1일을 거치시킨 후 수중양생을 실시하였다.

그림 3은 각각 영하의 온도에서 양생을 시킨 공시체에 대하여 식 (1)에 근거한 강도 회복율을 방동제의 양과 방동제의 종류별로 나타낸 것이다. 그림 3 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 -5°C 에서는 방동제 AF3를 제외한 나머지 3종류의 방동제가 비슷한 방동제의 사용량에서 동해를 입지 않는 것으로 나타났다. 그런데 방동제 AF3의 경우에는 이보다 2배 이상 사용되어야 동해를 입지 않는 것으로 나타났다. 또한 그림 3 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 -10°C 에서는 각 방동제의 방동성능이 각각 다르게 나타났는데, 방동제 AF1의 경우가 가장 방동성능이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 AF1을 사용하여 콘크리트에서의 방동성능을 파악하기로 결정하였다.



(a) -5°C의 경우



(b) -10°C의 경우

그림 3 방동제의 사용량과 종류에 따른 모르타르 강도 회복율

3.2 방동성능의 상온양생시간 의존성

앞의 2절에서 고찰한 내용인 방동콘크리트의 방동성능이 얼마만큼 초기 상온양생시간의 영향을 받는지에 대하여 본 연구에서는 실험적으로 규명하고자 하였다. 실험조건은 다음과 같다.

콘크리트 배합비에 있어서 단위수량은 165kg/m³, 제 1종 시멘트는 412.5kg/m³, 방동제 AF1은 단위수량의 19.9% 그리고 고성능 감수제는 SP4 1.0%를 사용하였다. 그리고 콘크리트를 제조한 후 시간 t를 변수로 0.5, 1.5, 3.5, 6시간이 경과한 후에 영하 -10°C에서 3일 동안 양생시키고, 그 이후 표준 수증양생을 실시하여 강도 회복율을 측정하였다.

이에 대한 실험결과가 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 콘크리트의 방동성능은 초기 양생시간에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 콘크리트를 제조한 후 30분에 영하에 노출시킨 경우가 가장 방동 성능이 떨어지는 것으로 나타났는데, 그 이유는 이 시간까지 시멘트는 거의 수화반응을 못하기 때문이다. 그리고 그 이후에는 콘크리트의 방동성능이 향상되어 일정하게 유지되다가 3.5 시간 이후에는 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 초기에 상온에서의 존치기간이 길수록 사용되는 방동제의 양이 줄어들 수 있음이 이 결과는 시사하고 있다.

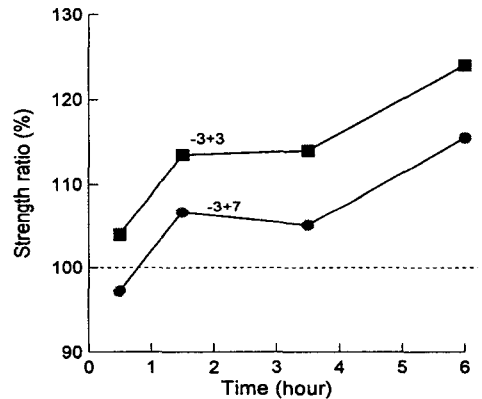


그림 4 방동성능의 상온양생시간 의존성

3.3 방동제와 고성능 감수제와의 적합성

앞의 표 1에 나타난 2종류의 고성능 감수제는 건설현장에서 사용되고 있는 것 들이다. 이러한 2종류의 고성능 감수제와 방동제 AF1과의 적합성에 관한 비교 실험이 수행되었는데, 콘크리트 배합비에 있어서 단위수량은 165kg/m³, 제 1종 시멘트는 412.5kg/m³, 석회석 미분말은 72.8kg/m³, 방동제 AF1은 단위수량의 19.9% 그리고 고성능 감수제는 1.4%를 사용하였다. 이 실험에서 각각의 고성능 감수제를 사용한 콘

크리트를 표준양생 시킨 뒤 압축강도 발현율과 방동성능(강도 회복율)을 평가하였다.

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 고성능 감수제와 방동제의 조합에 의해서 콘크리트의 압축강도가 차이가 나는 것으로 나타났다. 방동제 AF1에 대해서 고성능 감수제 SP5를 사용한 경우가 SP4를 사용한 경우보다 콘크리트의 압축강도가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 고성능 감수제 SP5를 사용한 콘크리트는 SP4를 사용한 콘크리트보다 동일한 방동제 사용량에서 방동성능이 더 좋은 것으로 파악되었다. 따라서 방동제와 고성능 감수제를 동시에 사용하는 경우에는 이들의 적합성을 사전에 충분히 검토하는 것이 바람직하다고 판단된다.

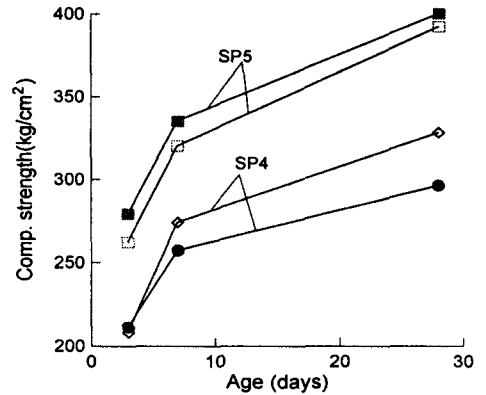


그림 5 감수제 종류에 따른 압축강도 발현율

3.4 방동제(AF1)의 최적 첨가량 결정 및 확인 시험

3.4.1 최적 첨가량 결정을 위한 실험계획 및 방법

-5℃와 -10℃에서 초기 동해를 입지 않는 방동제 AF1의 단위수량에 대한 최적 첨가량을 결정하기 위하여 물-시멘트비와 방동제의 양을 변수로 실험을 실시하였다. 이 때 단위수량은 170kg/m³, 결합재량은 420kg/m³으로 고정시켰다. 그리고 W/C(1종 시멘트)는 50, 45, 40% 3수준을 선택하였으며, 방동제의 사용량은 양생온도가 -5℃인 경우에는 (방동제의 공형분량)/단위수량이 6.9, 7.9 및 8.9% 3수준을 선택하였으며, 초기 양생온도가 -10℃인 경우에는 18.5, 20 및 21.5% 3수준을 선택하였다.

사용재료 중에서 혼화재료로서 플라이애쉬를 사용하였는데, 보령산으로 비중은 2.2, 비표면적은 3,452 cm²/g 및 강열감량은 5.02%였다.

실험 방법으로서 콘크리트 믹싱이 끝난 후 슬럼프 시험과 공기량 시험을 비빔 후 60분까지 실시하였으며, 압축강도 시험용 $\psi 10 \times 20$ cm 공시체를 제작하였다. 콘크리트의 방동성능을 확인하기 위하여 -5℃와 -10℃로 조정되어 있는 항온항습기에 공시체를 성형 후 곧 바로 넣었다. 그리고 항온항습기에서 양생되고 있는 공시체를 1시간 후에 비닐로 감싸주었으며, 재령 3일까지 영하의 온도에서 양생시킨 후 1일을 기중에서 양생시킨 다음 표준수중양생을 실시하였다. 표준양생인 경우에는 공시체를 제조한 후 1일을 기중에서 양생시킨 다음 표준수중양생을 실시하였다.

압축강도 시험은 표준양생인 경우 3일, 7일 및 28일에서 실시하였으며, 영하에서 양생된 공시체는 각각 재령 6일과 재령 10일에서 압축강도 시험을 실시하였다.

3.4.2 최적첨가량 결정

제 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 방동제는 AF1 그리고 고성능 감수제는 SP5를 사용하였을 때, 위에서 언급된 방법으로 최적의 방동제 사용량을 결정한 결과, 방동제의 최적 첨가량(고형분량)은 단위수량에 대비해서 -5℃에서는 7.9%, -10℃에서는 20%가 적절한 것으로 나타났다.

3.4.3 최적첨가량에 대한 확인 실험

앞의 실험에서 도출된 방동제의 단위수량에 대한 비와 고성능 감수제 첨가량 및 단위수량에 대하여 방동제 AF1의 방동성능 확인시험을 실시하였다. 사용재료는 위에서 언급한 재료와 동일하며, 잔골재는 2종류로 세척사와 강사를 사용하였는데, 강사인 경우는 비중 2.60, 흡수율 0.8%이다. 세척사의 경우에는 W/C비가 50%와 40%인 경우에 적용하였고 세척사의 경우에는 W/C비 3수준에 모두 적용하였다. 실험방법은 3.4.1절과 동일하다.

이에 대한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다. 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 방동제 AF1과 고성능 감수제 SP5를 사용한 경우에 대하여 방동제 최적첨가량 확인에 대한 실험을 수행한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 잔골재의 종류에 따른 방동성능의 차이는 크게 나타나지 않아 압축강도 복원율은 평균값을 사용하였다.

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 영하의 양생온도에 관계없이 방동 콘크리트의 강도 복원율은 총재령 6일에서는 100%를 초과하는 것으로 나타났지만, 총 재령 10일에서는 100%보다 약간 낮은 것으로 나타났다. 특히 W/C비가 50%인 경우에 더욱 현저한 것으로 나타났다. 그러나 W/C비가 45, 40%인 경우에는 거의 비슷한 경향을 나타내어, 가능한 방동콘크리트를 제조할 때에는 W/C비를 45% 이하로 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

위에서 결정된 최적 방동제량을 사용한 결과 콘크리트의 동해를 방지할 수 있었다. 그러나 위에서도 언급한 바와 같이 영하의 온도에서 양생된 공시체를 표준양생을 실시하였을 때 표준양생 재령이 같은 콘크리트보다 압축강도가 약간 적게 나타나는 것에 대하여 보다 더 연구가 되어가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

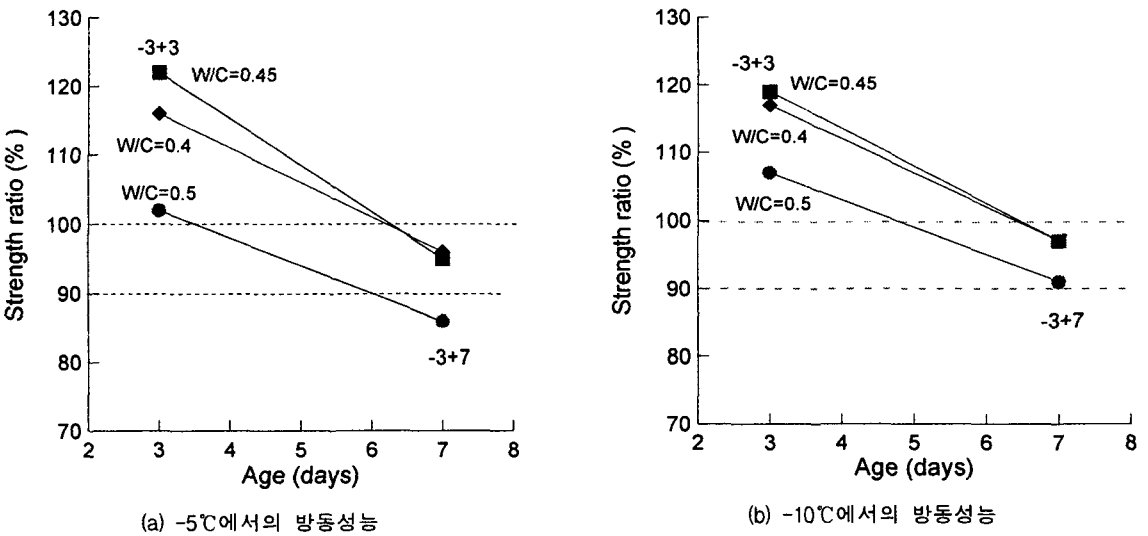


그림 6 방동제의 최적 첨가량에 대한 확인 시험 결과

4. 결론

방동제를 사용한 콘크리트의 초기 방동 성능에 대한 실험 결과 다음과 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구의 범위 내에서 질산염 나트륨 계열의 방동제가 가장 성능이 우수한 것으로 나타났다.
- 2) 질산염 나트륨 계열의 방동제는 고성능 감수제 종류에 따라 콘크리트의 압축강도 발현율에 영향을 미치는 것으로 나타나 방동 콘크리트 제조 시 사전에 이를 충분히 검토하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 나프탈렌 술폰산 포름알데히드 축합물+acrylic acid-malic anhydride copolymer의 고성능 감수제를 사용한 경우에 -5°C에서 초기 동해를 입지 않는 최적의 질산염 나트륨 계열의 방동제량은 단위수량 대비 고형분량이 7.9%, -10°C에서는 20%인 것으로 나타났다.