

특 집

|| 온도조건 하의 콘크리트 기술 ||

양생온도에 따른 콘크리트 특성 - Properties of Concrete to Curing Temperature -



고경택*
Koh, Kyoung Taek



정해문**
Cheong, Hai Moon



윤기원***
Yoon, Gi Won



이장화****
Lee, Jang Hwa

1. 서 론

콘크리트는 소요의 품질을 확보하기 위해 타설 후 일정기간 동안 콘크리트 주위의 온도 및 습도를 적절한 범위로 유지시키고, 유해한 작용의 영향을 받지 않도록 충분히 양생하여야 한다. 콘크리트의 수화반응 속도는 양생온도에 따라 크게 달라지므로 시공 중에 온도를 고려하여 적절한 양생방법을 강구해야 한다. 한편 최근에는 국내에서도 경제성 및 내구성을 등을 고려하여 플라이 애쉬, 고로슬래그 미분말 등 혼화재 사용이 급격히 증가하고 있으며, 향후에도 다양한 혼화재가 더욱 폭넓게 사용될 것이다. 이런 혼화재는 양생온도에 상당히 민감하여 경우에 따라서 응결 및 경화가 지연되어 동결기에 초기동해를 받기 쉬워 소요의 품질을 확보하지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

본고에서는 양생온도가 콘크리트 특성에 미치는 영향을 알아보고, 특히 최근 많이 사용되는 고로슬래그 미분말, 플라이 애쉬 등의 혼화재를 사용한 콘크리트 특성에 양생온도가 미치는 영향에 대해 주로 기술하였다.

2. 양생온도에 따른 응결 특성

고로슬래그 미분말과 같은 혼화재를 사용한 콘크리트의 응결특성은 일반 콘크리트보다 온도의 영향을 크게 받기 때문에 주의할 필요가 있다. <그림 1>은 고로슬래그 미분말(분말도 6,000

cm²/g, 치환율 60%)를 혼합한 고유동 콘크리트의 응결시간에 환경온도가 미치는 영향이다. 온도 20°C의 초결, 종결에 비해 온도 10°C에서 초결은 6시간 50분, 종결은 8시간 50분, 온도 5.6°C에서 초결은 14시간 30분, 종결은 20시간 20분 정도 응결시간이 지연되고 있음을 알 수 있다. 이처럼 고유동 콘크리트와 같이 혼화재를 사용하거나 고성능 감수제를 비교적 다량으로 사용한 경우에 응결시간이 지연되는 경향이 있고, 특히 저온환경 하에서는 응결이 상당히 지연되어 초기동해를 받을 우려가 있기 때문에 주의 할 필요가 있다.

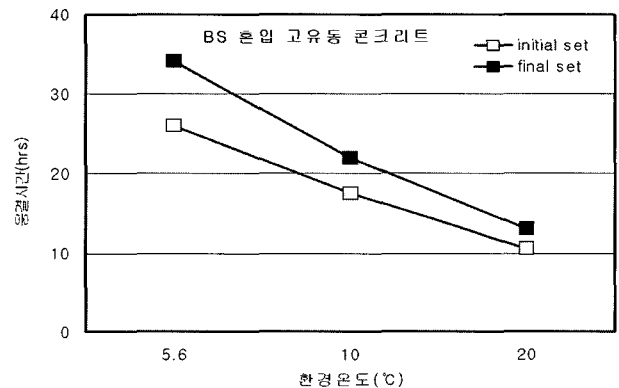


그림 1. 온도가 응결시간에 미치는 영향

3. 양생온도에 따른 콘크리트 강도

3.1 일반 콘크리트

콘크리트의 강도발현은 양생온도의 영향이 상당히 크며, 이것

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
 ** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
 *** 정회원, 주성대학교 건축공학과 부교수
 **** 정회원, 한국건설기술연구원 기획조정실 실장

은 시멘트 종류, 배합 및 양생조건 등에 따라 다르게 나타난다. <그림 2>와 <그림 3>은 양생온도가 콘크리트 압축강도에 미치는 영향을 분석한 것이다. <그림 2>는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 23°C로 양생한 콘크리트의 압축강도를 기준으로 양생온도별 콘크리트의 압축강도비를 나타낸 것이고, <그림 3>은 양생온도에 따른 재령 1일, 7일, 28일에서의 압축강도 결과이다. 콘크리트의 양생온도가 높으면 초기강도는 증가하지만, 장기재령에서 강도에 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이처럼 고온양생이 장기강도에 나쁜 영향을 주는 이유는 여러 가지 원인이 있겠지만, 고온의 촉진반응에 의해 생성된 조직이 두꺼운 수화물로써 시멘트 입자를 빠르게 감싸 입자 내부의 수화가 저지된다는

견해와 고온에 의해 내부 수화물이 현저하게 치밀화하여 이후의 수화반응 속도를 저해시킨다는 견해가 있다.

<그림 4>는 양생온도가 중용열 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향이다. 중용열 시멘트를 사용한 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 달리 양생온도가 높을수록 압축강도가 높고, 4°C와 같이 저온에서 양생을 실시한 콘크리트는 압축강도가 저하되고 있다. 이처럼 사용하는 시멘트에 따라 양생온도에 따른 압축강도 발현이 다르므로 이에 대해 주의할 필요가 있다.

3.2 혼화재 사용 콘크리트

3.2.1 고로슬래그 미분말

<그림 5>는 고로슬래그 미분말(BS)을 55% 치환한 콘크리트와 OPC를 사용한 콘크리트의 압축강도비를 양생온도별로 나타낸 것으로써 OPC 콘크리트의 경우에 비하여 BS 콘크리트의 경우 양생온도에 따른 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 즉, 20°C에서 수중양생을 실시한 BS를 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 저온양생에서 강도가 낮은 것으로 나타났고, 고온양생에서 강도가 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

<그림 6>은 BS의 치환율에 따른 양생온도별 압축강도를 나타낸 것이고, <그림 7>은 BS의 분말도에 따른 양생온도별 압축강

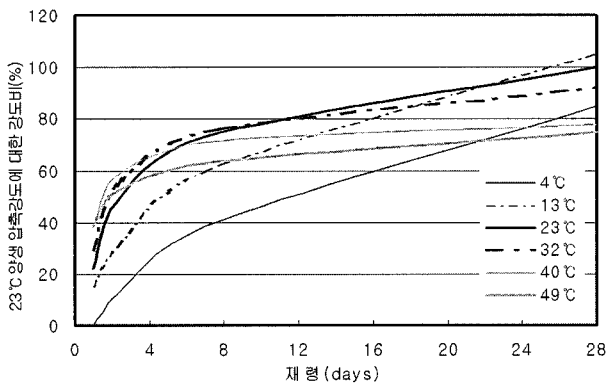


그림 2. 양생온도가 압축강도에 미치는 영향

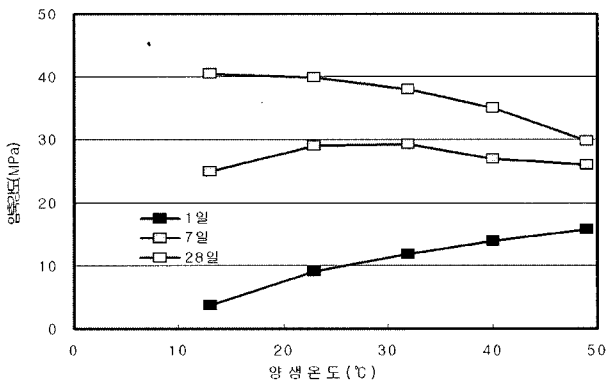


그림 3. 양생온도와 압축강도의 관계

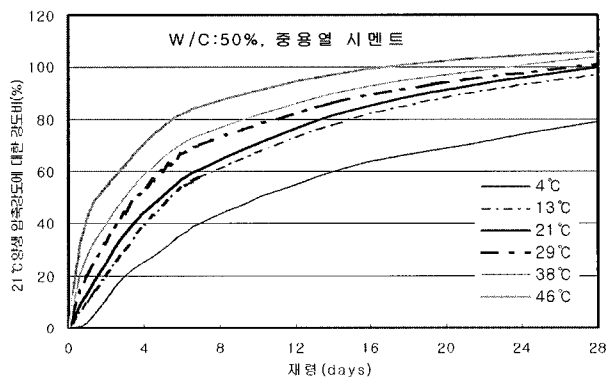


그림 4. 양생온도가 압축강도에 미치는 영향(중용열 시멘트)

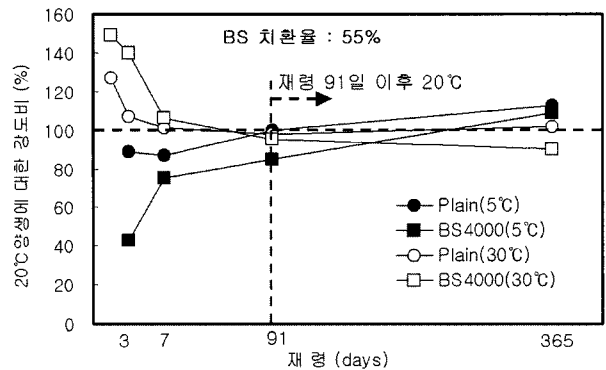


그림 5. 양생온도가 BS 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향

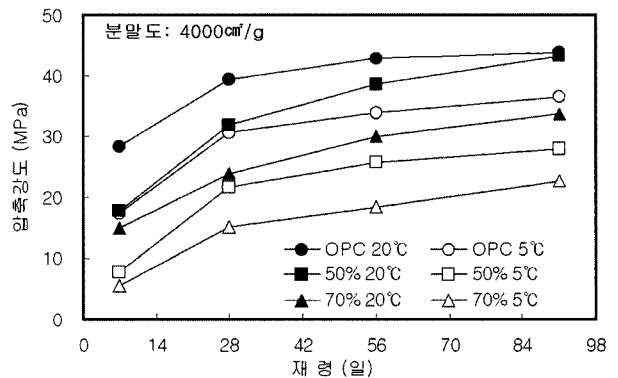


그림 6. 양생온도와 BS 치환율이 압축강도에 미치는 영향

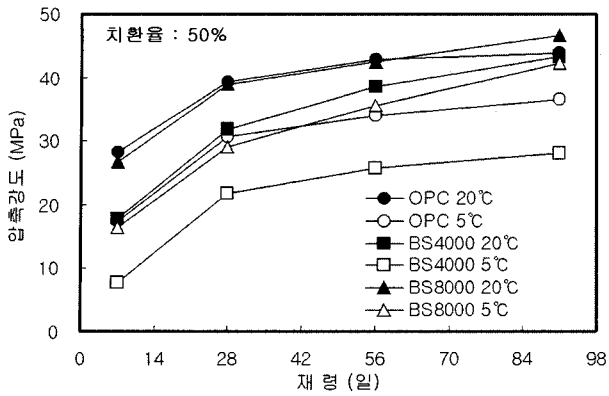


그림 7. 양생온도와 BS 분말도가 압축강도에 미치는 영향

도를 나타낸 그래프이다. 분석결과 BS의 분말도 및 치환율에 따른 압축강도의 증진경향은 BS의 분말도와 치환율에 따라 다르게 나타나는데, 즉, 분말도가 낮을수록, 치환율이 높을수록 온도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 BS를 50% 이상으로 치환한 콘크리트에 대해 5°C와 같이 저온양생을 실시한 경우에는 91일 재령이 경과하더라도 20°C에서 표준양생을 실시한 경우의 강도보다 증가되지 않는 것으로 나타났다.

〈그림 8〉은 한중 콘크리트에서 BS를 사용한 콘크리트의 초기 강도를 확보하기 위해 재령 초기에 실시한 급열양생(30°C)이 압축강도 발현에 미치는 영향을 검토한 사례이다. 분말도 4,000 cm²/g의 BS를 70% 치환한 BS4000/70은 5°C에서 저온양생

을 실시하면 압축강도가 크게 저하되나, 급열양생을 초기에 실시하면 초기강도가 크게 개선되고 장기강도도 5°C로 계속 양생을 실시한 경우보다 높게 나타나고 있다. 이에 반해 분말도 6,000 cm²/g과 8,000 cm²/g인 경우에는 급열양생을 실시하더라도 초기강도가 별로 개선되지 않으며 장기강도 발현에도 좋지 않은 영향을 미치고 있다. 따라서 BS를 혼입한 콘크리트를 한중 콘크리트에 적용할 경우, BS의 분말도와 치환율을 고려하여 초기강도를 확보하기 위한 급열양생의 실시여부와 적당한 급열양생의 일수를 결정할 필요가 있다.

동절기에 콘크리트를 타설하더라도 재령이 경과함에 따라 외기온이 점차 상승하는 경우가 있다. 〈그림 9〉는 이처럼 외기온이 상승하는 경우를 고려하여 저온양생을 실시한 BS 콘크리트의 압축강도가 어느 정도 회복되는지 검토한 사례이다. 저온에서 밀봉양생(sealed curing)을 실시한 BS 혼입 콘크리트는 온도가 상승함에 따라 물-결합재비와 온도상승 시기에 상관없이 강도가 상당히 회복되고 있으며, 특히 물-결합재비가 낮은 35% 배합에서 현저히 나타나고 있다. 그리고 기건양생을 실시한 경우에는 온도가 상승하더라도 압축강도의 회복은 거의 없었다. 따라서 BS를 혼입한 콘크리트는 동절기에 타설할 경우 초기동해를 받지 않는 범위에서 저온양생을 실시하더라도 막양생 등을 실시하여 수분의 증발을 방지하면 그 이후의 기온상승에 의해 콘크리트의 강도가 회복이 기대된다.

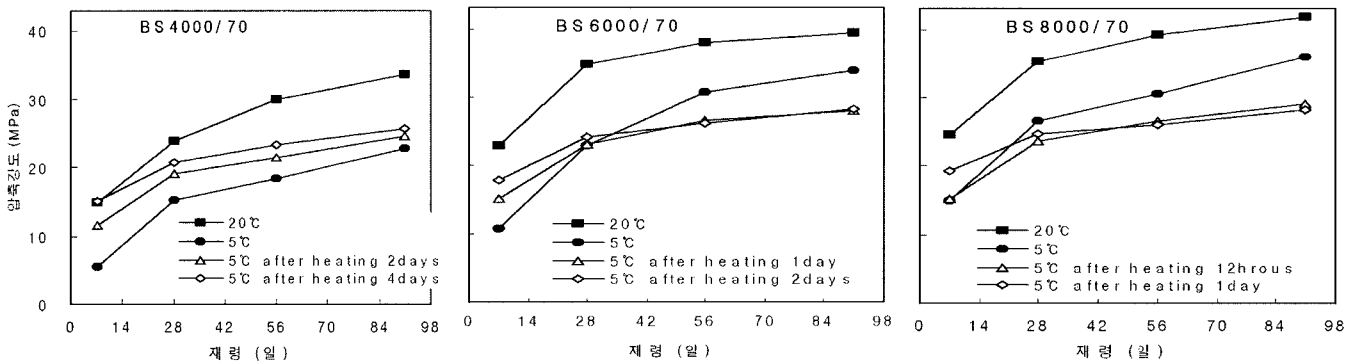


그림 8. 급열양생이 BS 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향

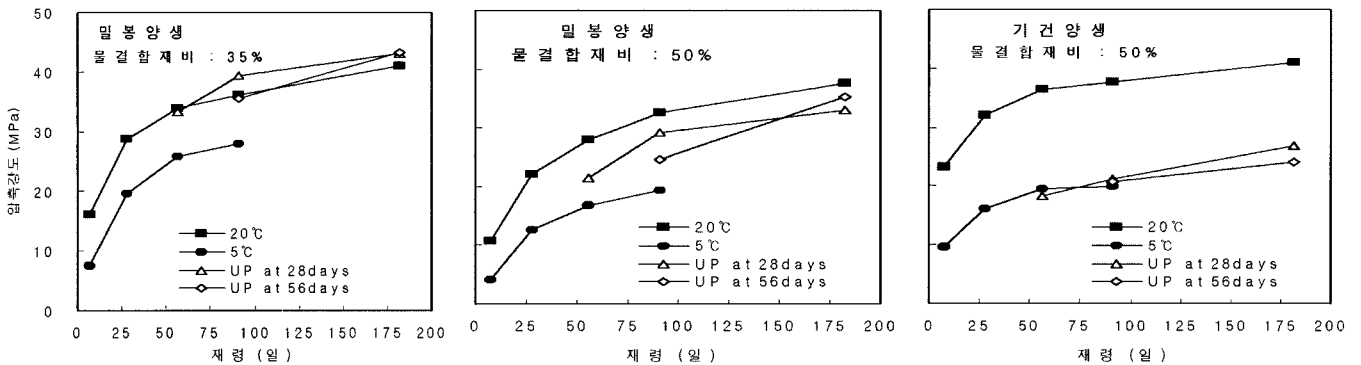


그림 9. 온도상승이 BS 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향

3.2.2 포졸란 혼화제

〈그림 10〉은 물-결합재비에 따른 양생온도가 플라이 애쉬(이하 FA) 혼입 콘크리트의 강도에 미치는 영향이다. FA 혼입 콘크리트는 강도발현이 지연되고, FA의 혼입률이 증가할수록 저온에서 초기강도, 장기강도 모두 저하되는 것으로 나타났다. 또한 물-결합재비 50% 콘크리트에서 FA를 다량으로 사용한 경우에 초기강도가 저하되어 초기동해를 받을 위험성이 높기 때문에 주의할 필요가 있다.

〈그림 11〉은 실리카 폼(SF)를 혼입한 콘크리트의 압축강도에 양생온도가 미치는 영향이다. 여기서 재령 28일까지 각각 5, 20, 35°C에서 수중양생을 하고 그 이후는 20°C에서 수중양생을 실시한 결과이다. 5°C에서 양생을 실시한 SF 콘크리트는 강도발현이 지연되고, 포졸란 반응이 재령 28일까지 크게 기여하지 않으나 재령 28일 이후에 포졸란 반응이 활성화되어 강도가 증가하였다. 그리고 35°C에서 양생한 실시한 콘크리트는 20°C에서 양생을 실시한 콘크리트에 비해 강도가 빨리 발현되며, 장기강도도 20°C 양생과 거의 동등한 것으로 나타났다.

이상과 같이 플라이 애쉬, 실리카 폼 등 포졸란 혼화제를 사용한 콘크리트는 고로슬래그 미분말과 마찬가지로 온도에 상당히 민감하며, 특히 저온환경 하에서 초기강도가 지연되는 것으로 나타나 한중 콘크리트에 사용할 때 주의할 필요가 있다.

〈그림 12〉는 양생방법이 압축강도 180 MPa를 가지는 초고강

도 강섬유 보강 콘크리트의 강도에 미치는 영향이다. 이 콘크리트는 실리카 폼을 20% 정도로 사용하였고, 그 외에 5mm 이하의 잔골재, 10 μ m 정도의 충전제 등을 사용하였고 물-결합재비는 18%이다. 20°C에서 수중양생을 실시한 경우에는 초기강도 발현이 지연되나, 90°C의 고온양생은 재령초기부터 고강도를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 90°C의 고온양생을 실시함으로써 재령초기부터 반응성 분체의 수화를 촉진시켰기 때문이다.

3.2.3 석회석 미분말

〈그림 13〉은 양생온도가 석회석 미분말(이하 LS)를 시멘트에 대해 치환한 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. LS를 사용하지 않은 보통 콘크리트는 배합 중에서 가장 높은 강도를 나타내고 있지만, 20°C 양생와 5°C 양생에서 강도의 차이가 크게 발생하고 있다. 그러나 LS를 혼합한 콘크리트는 재령 7일만 제외하고 재령 14일 이후에는 20°C와 5°C에서 동등한 강도발현성을 나타내고 있다.

〈그림 14〉는 양생온도가 LS를 잔골재에 대해 치환한 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 보통 콘크리트에 비해 LS를 혼합한 콘크리트의 강도가 높고, LS 혼합 콘크리트는 양생온도 5°C와 20°C에서 강도 차이가 없는 것으로 나타났다. 이상과 같이 석회석 미분말은 저온의 영향을 받지 않고 강도발현성이 우수하므로 한중 콘크리트에 적용성이 높을 것으로 기대된다.

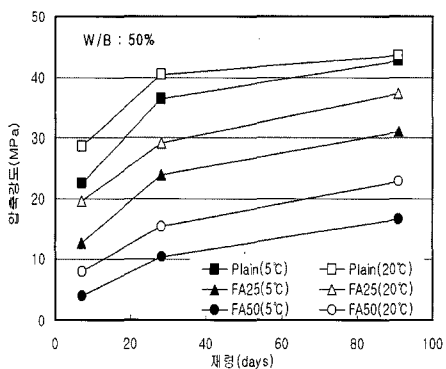


그림 10. 양생온도가 FA 혼입 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향

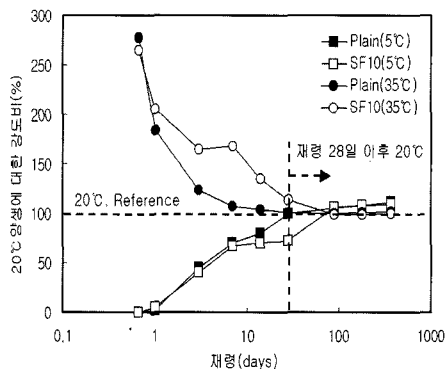
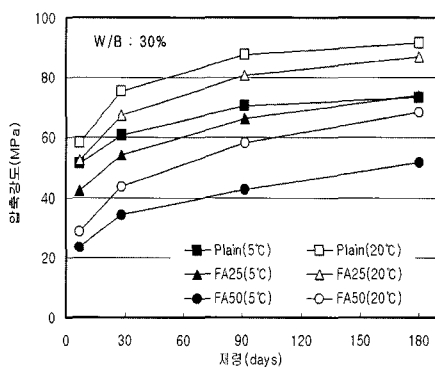


그림 11. 양생온도가 SF 혼입 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향

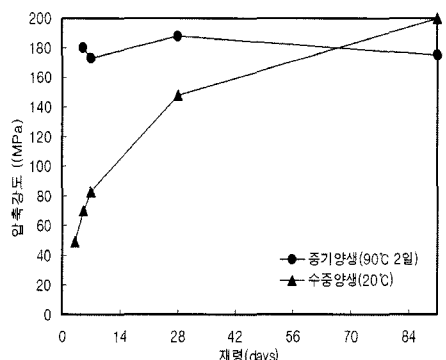


그림 12. 양생방법이 초고강도 콘크리트의 강도에 미치는 영향

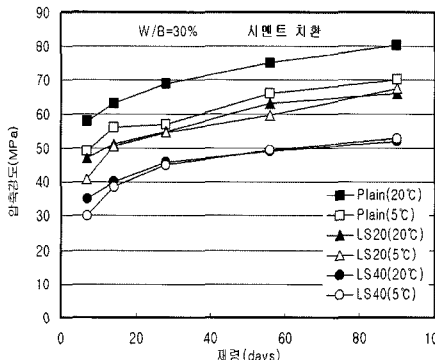


그림 13. 양생온도에 따른 LS 혼입 콘크리트의 강도(시멘트 치환)

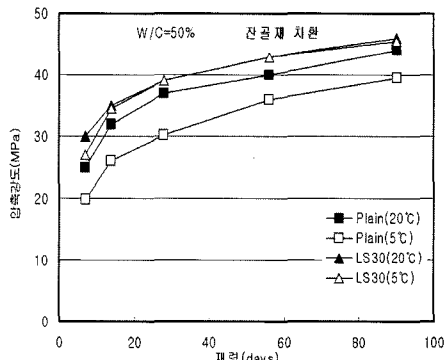


그림 14. 양생온도에 따른 LS 혼입 콘크리트의 강도(잔골재 치환)

4. 초기동해를 받은 고로슬래그 미분말 혼입 고유동 콘크리트의 특성에 미치는 양생의 영향

고유동 콘크리트는 소요의 유동성 및 재료분리 저항성을 확보하기 위해 BS, FA와 같은 혼화제와 고성능 감수제를 다량으로 사용하기 때문에 동결기에 응결 및 경화가 지연되어 초기동해를 받을 위험성이 있다. <그림 15>는 BS를 혼입한 고유동 콘크리트가 동결기에 초기동해를 받을 경우를 상정하여, 그 이후의 양생이 압축강도와 동결융해 저항성을 평가하는 시험개요이다. 한편, <표 1>은 동결이후의 양생조건이다.

표 1. 동결 이후의 양생조건

5S	sealed curing at 5°C for 7days, without freezing
F5S	sealed curing at 5°C for 7days, after freezing
F5W	water curing at 5°C for 5days, after freezing
F30S	sealed curing at 30°C for 3days and sealed curing at 5°C for 2days, after freezing
F30W	water curing at 30°C for 5days, after freezing

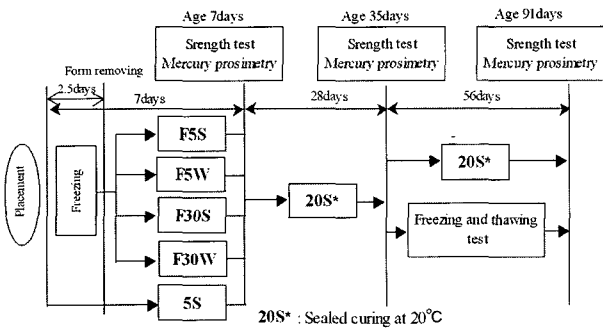


그림 15. 시험 흐름도

<그림 16>은 압축강도 결과를 나타낸 것이다. -10°C에서 12시간 동결을 받은 후 양생 조건이 압축강도에 미치는 영향을 나타내었다. 초기에 동결을 받은 후, 5°C에서 수중양생을 실시한 F5W는 재령초기에는 강도증진 효과가 없었지만, 재령이 경과함에 따라 수중양생을 실시한 효과가 크게 나타나 재령 91일에 있어서 압축강도는 동결을 받지 않은 5S의 압축강도까지 회복되었다. 동결 후 30°C에서 수중양생을 실시한 F30W는 초기강도가 크게 개선되는 동시에 장기강도도 동결을 받지 않은 5S와 거의 같다. 동결 후 30°C에서 밀봉양생을 실시한 F30S는 초기강도에는 효과가 있지만, 그 이후 재령에서는 강도발현이 한계점에 달하여 오히려 악영향을 주는 결과를 나타내었다.

<그림 17>은 동결을 받은 후의 각종 양생조건이 동결융해 저항성에 미치는 영향을 나타내었다. 초기에 동결을 받은 후 수중양생을 실시한 F5W, F30W는 모두가 F5S보다 동결융해 저항성이 개선되었지만, 동결을 받지 않은 5S까지는 회복되지 않은 결과를 나타내었다. 그리고 동결 후 30°C에서 밀봉양생을 실시한 F30S는 F5S와 비교하여 동일한 정도의 동결융해 저항

성 밖에 얻어지지 않았다.

<그림 18>은 세공분포의 결과를 나타낸 것이다. 초기동결을 받은 F5S는 동결을 받지 않은 5S에 비해 0.01 μm ~ 0.1 μm 부근의 세공량이 증가하며, 동결 후 수중양생을 실시한 F5W, F30W는 온도에 관계없이 0.01 μm ~ 0.1 μm 부근의 세공량이 감소하는 것으로 나타나, 동결 후 양생조건과 양생온도에 따라 경화체 조직이 변화됨을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 동결기에 동결을 받아 품질이 저하된 콘크리트는 동결 이후 양생온도와 양생조건에 따라서 강도와 내구성이 회복될 수 있으므로 이에 대한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

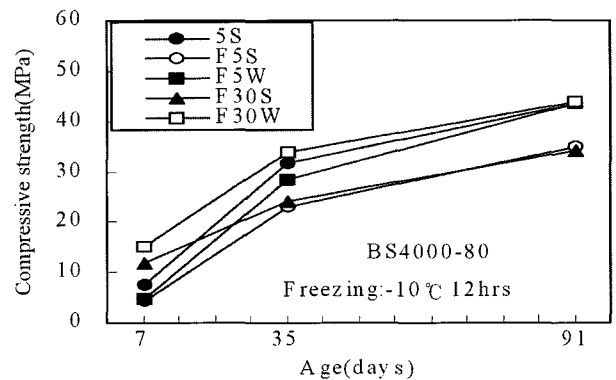


그림 16. 초기동결 후 양생조건이 압축강도에 미치는 영향

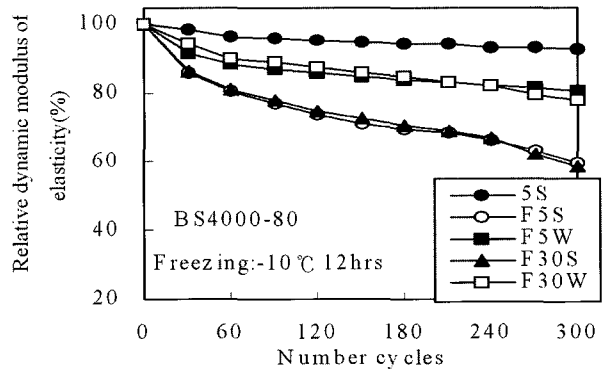


그림 17. 초기동결 후 양생조건이 동결융해 저항성에 미치는 영향

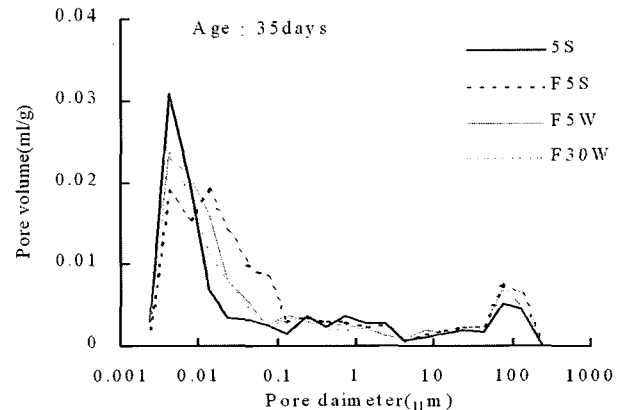


그림 18. 초기동결 후 양생조건이 세공분포에 미치는 영향

5. 양생온도에 따른 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 내동해성

〈그림 19〉는 수중양생 일수와 내구성 지수와의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과는 탈형 후 일정한 양생온도(20°C 또는 10°C)에서 일정기간(2, 5, 7일) 수중양생을 실시하고, 그 후 재령 14까지 기건양생을 실시하여 동결융해시험을 실시한 결과이다. BS 치환율 50%인 경우, 양생온도 10°C에서 수중양생기간이 2일은 내구성이 다소 저하되고, 수중양생 5일 이상 실시하면 내구성에 문제가 없는 것으로 분석된다. 〈그림 20〉은 동결융해 시험을 300사이클까지 실시한 후 공기제 질량변화율의 결과를 나타낸 것이다. 10°C에서 2일간 수중양생을 실시한 콘크리트는 표면열화가 상당히 발생하는 결과로 보아 내구성 지수의 결과와 마찬가지로 양생기간을 길게 실시할 필요가 있다.

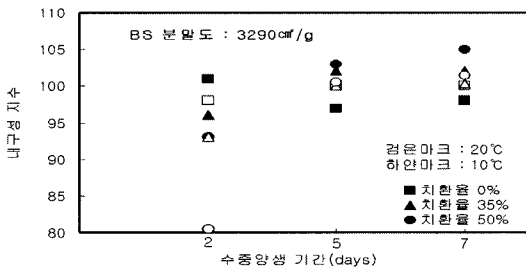


그림 19. 내구성 지수와 수중양생 기간의 관계

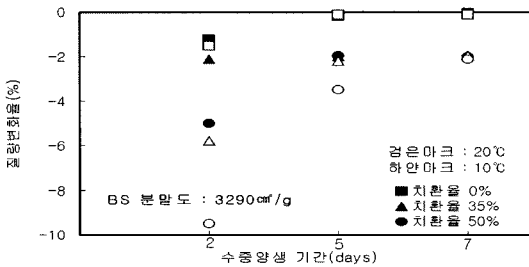


그림 20. 질량변화율과 수중양생 기간의 관계

6. 양생온도에 따른 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 건조수축

〈그림 21〉에 탈형 직후 및 4주간의 수중양생을 5°C, 20°C에서 실시한 경우에 대하여 상대습도 70%의 실내에 노출된 경우의 건조수축시험 결과이다. 20°C에서 수중양생한 경우에는 BS 혼입 콘크리트는 OPC 콘크리트와 동등한 값을 나타내었고, 탈형 직후부터 노출된 경우에 BS 콘크리트가 OPC 콘크리트에 비해 건조수축이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 5°C에서 수중양생한 경우에는 탈형 직후에 실내에 노출시킨 경우보다 건조수축률이 증가하였다. 이것은 저온인 경우에는 수화작용의 진행이 지연되기 때문에 수화작용에 관여하지 않은 자유수가 건조하기 때문으로 분석된다. 이상과 같이 BS 콘크리트는 양생의 영향을 많이 받기 때문에 충분한 양생을 실시할 필요가 있다.

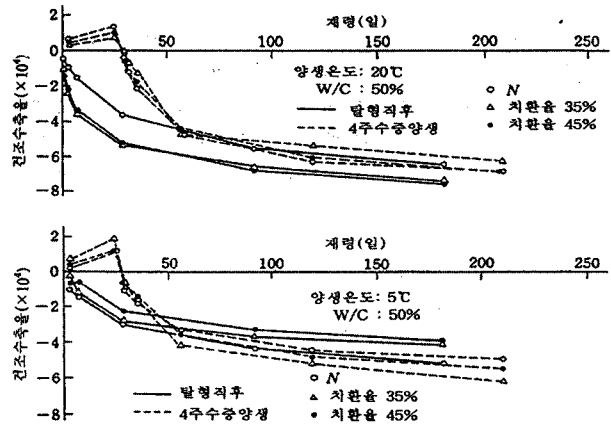


그림 21. 건조재령과 건조수축과의 관계

7. 결 론

본고에서는 양생온도가 광물질 혼화재를 사용한 콘크리트의 강도, 동결융해 저항성 등에 미치는 영향에 대해 주로 기술하였다. 향후 고로슬래그, 플라이 애쉬 등은 경제성 및 콘크리트의 내구성 측면에서 계속 사용이 증가할 것으로 기대되나, 본고에서 기술한 바와 같이 이런 혼화재를 사용한 콘크리트의 품질을 확보하기 위해서는 양생온도 등을 충분히 고려하여 시공할 필요가 있고, 이에 대한 검토가 국내에서도 산, 학, 연 등 관련 업계에서 활발히 진행되어야 할 것이다. □

참고문헌

1. ACI 308, "Standard practice for curing concrete," 2003.
2. 한국콘크리트학회, "고로슬래그 콘크리트", POSCO Forum 발표집, 1999.
3. 高京澤, "初期凍害を受けた高流動コンクリートの品質低下とその対策に関する基礎的研究", 東北大學校博士學位論文, 1999.
4. Miura, T. and Iwaki, I., "Strength development of concrete incorporating high levels of ground granulated blast-furnace slag at low temperatures," ACI Materials Journal, Vol.94, No.1, 2000, pp.66~70.
5. 岩城一郎, 三浦尚, "寒冷地における高爐スラグ微粉末混和コンクリートの強度發現性に関する基礎的研究", 土木學會論文集, No.655, Vol.48, 2000, pp.97~106.
6. 岩城一郎, 三浦尚, "低溫環境下における石灰石微粉末を添加したコンクリートの強度發現性に関する基礎的研究", 土木學會論文集, No.655, Vol.48, 2000, pp.83~96.
7. Malhotra V.M., "Supplementary cementing materials for concrete," CANMENT, 1987.
8. 한국건설기술연구원, "콘크리트 교량의 내구성 향상 기술 개발", 2003.
9. 日本土木學會小委員會, "高爐スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針", コンクリートライブラリー-86, 1998.