

촉진열화 및 장기폭로시험에 의한 고성능 PC패널의 내구성능 및 열화특성 Characterization of Durability of PC panel by Accelerating Test in Deterioration Chamber and Long-Term Field Exposure Test

마상준¹⁾, Sang-Joon Ma, 장필성²⁾, Pil-Sung Jang, 최재석³⁾, Jae-Suk Choi, 주정민⁴⁾, Jung-Min Ju

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Disaster & Environment Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 한국건자재시험연구원 연구원, Researcher, Reliability Assessment Center, Korea Institute of Construction Materials

³⁾ 한국건자재시험연구원 책임연구원, Research Fellow, Reliability Assessment Center, Korea Institute of Construction Materials

⁴⁾ (주)태명실업 이사, Technological Development dept./director, Taemyung Industrial Co.,Ltd.

SYNOPSIS : In this paper, The evaluation of durability of the PC Panel lining for tunnel structure was examined through the rapid test by carbonation and freezing and thawing. Also for the purpose of improvement of durability. Namely, the durable characteristics of PC Panel lining by carbonation and freezing and thawing, was evaluated by rapid test and long-term field exposure test and main influence factors were derived. As a result of test, Correlation of accelerating test in deterioration chamber and long-term field exposure test, it will be expected that the proposed correlation well to the prediction of life expectancy of structure and is contributed greatly in the future.

Key words : PC Panel, Acceleration test, Long-term field exposure, Correlation, Durability

1. 서 론

국외에서 다양한 공법으로 적용되고 있는 PCL 공법은 고품질 및 무균열의 터널 라이닝 공법으로서 터널 공기의 단축, 라이닝 보수·보강 공사비의 절감, 라이닝 미관상 효과 및 확실한 품질관리 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 PCL 공법은 암질이 좋고 절리간격이 넓어 변형이 적은 양호한 암반지역에 적용되어야 하고, 장기안정성 평가를 위한 철저한 지반조사 수행, 확실한 여굴 관리, 지보재(락볼트 및 슛크리트)의 단·장기 내구성 확보 및 새로운 유지관리 시스템(현장골재 관리, 설계 배합의 향상 등)의 도입 등의 문제가 선결되어야 한다. 따라서 현 국내 터널 시공현황에서는 PCL 공법과 같은 고품질 라이닝 공법을 적용하기 위해서는 고품질 PC패널의 물성 확보가 가장 우선시 되는 항목이다.

국내 터널의 콘크리트 라이닝은 차량에서 발생하는 매연 및 지하수의 접촉 등과 같이 매우 극심한 콘크리트 열화 환경에 노출될 수 있는 가능성이 매우 크다. 하지만 콘크리트 라이닝이 치밀하지 못하거나 내구성이 약해질 경우 보수 보강 비용의 증대뿐만 아니라 터널에 진입하는 차량에도 위험을 초래할 수 있다. 이러한 이유로 국내 시공 현장에서는 터널 라이닝의 내구성에 관한 관심이 증대되고 있는바, 본 연구에서는 국내 공장 생산 제품인 프리캐스트 콘크리트 라이닝의 열화 특성을 파악하여 고내구성 콘크리트 라이닝 개발의 기초적인 데이터를 확보하였다. 콘크리트 라이닝의 내구성능 저하에 따른 구조물의 수명예측을 위해 촉진 열화시험 및 장기폭로시험을 실시하였으며, 촉진열화 된 시편의 열화정도와

장기옥외폭로 시킨 시편의 열화정도를 비교하는 방법으로 촉진열화시험과 장기옥외폭로시험 간의 상관성 분석을 실시하였다.

2. 시험방법

2.1 시험개요

고성능 PC 패널의 장기폭로에 의한 열화정도를 측정하고자 혼화재 종류별 공시체를 제작하여 총 30개월을 계획으로 한국건자재시험연구원 서산옥외폭로시험장에서 장기 폭로시험을 실시하였다. 폭로 시작시점부터 자외선, 일사량, 비레염분, 산성우, 풍향, 풍속 등 콘크리트에 직·간접적으로 영향을 미칠 수 있는 환경 인자를 분석한 뒤 광물질 혼화재료 별 장기내구 특성의 상관관계를 분석하였으며, 동시에 실내 촉진시험도 실시하여 장기폭로 시험에 의한 열화정도 값과 비교 평가하였다. 평가항목으로는 장기재령에 의한 압축강도 변화 성상, 동결융해저항성 평가를 위한 상대동탄성계수, 중성화저항성 평가를 위한 중성화 깊이 측정을 실시하였다. 그림1은 서산옥외폭로시험장에 옥외폭로중인 공시체를 모습이며, 그림 2, 3은 폭로시험기간중의 대표적인 기후데이터를 나타낸 것이다.



그림 1. 옥외폭로중인 공시체

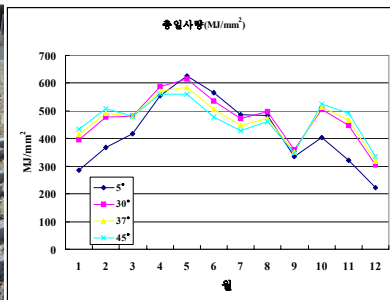


그림 2. 총일사량(2007년)

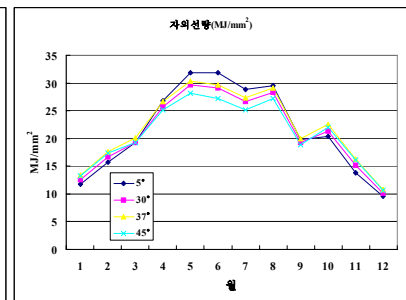


그림 3. 총자외선량(2007년)

2.2 실험재료

2.2.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 프리캐스트 공장에서 사용 중인 국내 S사의 제 3종 포틀랜드 시멘트(조강시멘트)를 사용하였다. 조강시멘트의 물리·화학적 특성을 표와 같다.

물리적 특성	분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	응결시간 (길모어시험)		압축강도(MPa)			
			초결(분)	종결 (시간:분)	1일	3일	7일	28일
	4,716	0.05	230	5:40	18.5	28.8	39.2	49.9
화학적 특성	강열감량(%)		MgO(%)		SO ₃ (%)		C ₃ A(%)	
	1.4		2.6		3.7		9	

2.2.2 실리카흙

본 연구에 사용된 실리카흙의 화학성분은 표에 나타나 있다. 품질규격으로 ASTM C 1240에 나타난 SiO₂의 함량 85% 이상을 만족하고 있다.

항목	비중	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O	lg.loss
측정값	2.2	90.16	0.77	1.72	1.38	1.61	2.29

2.2.3 플라이애시

본 실험에서 사용된 플라이애시는 한국전력공사 자회사인 보령지역의 한국중부화력발전소에서 생산된 것으로 비표면적이 1.029m²/g, 평균입자의 크기는 37.54 μ m 로서 물리·화학적 특성은 표와 같다.

물리적 특성	비 중	분말도 (cm ² /g)	단위수량비 (%)	압축강도의 비	강열감량 (%)	습 분 (%)
	2.19	3,172	100	94	4.5	0.2
화학적 특성	SiO ₂ (%)		Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	기 타 (%)	
	57.7		25.8	3.7	12.8	

2.2.4 고로슬래그

본 실험에서 사용한 고로슬래그 미분말은 광양 제철소에서 선철공정 중 부산물로서 발생된 것으로 부산물 4,200cm²/g의 고로슬래그 3종 미분말을 사용하였다.

화 학 성 분 (%)							물리적 성질	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	강열감량	Blain (cm ² /g)	비 중
34.81	16.19	0.47	41.25	8.05	0.16	-0.85	4,000	2.92

2.2.5 철 미분말(SPA)

본 실험에서는 Steel Powder(철미분말)를 탄산화방지제로서 적용하였다. 그 이유는 철미분말이 시간이 지남에 따라 부식이 발생하게 되고 2배 이상의 팽창이 발생되므로, 적정량의 혼입을 통해 철미분말 자체의 강성을 활용한 강도증진과 부식팽창으로 인한 공극 충전작용으로 대기중 CO₂의 내부 침입을 차단하는 탄산화방지 목적으로 사용하였다. 본 실험에 사용된 철미분말은 SPA(입도 100 Mesh이하)를 사용하였으며, SPA는 비표면적 0.1461m²/g, 입자평균지름이 87.27µm의 특성을 가지고 있다.

2.3 배합설계 및 시험항목

바인더로는 조강시멘트를 사용하였고 혼화제는 실리카흙, 플라이애시, 고로슬래그, Steel Powder를 사용하였다. 또한, 유동화제를 사용하여 유동성을 증진하여 슬럼프값을 결정하였으며 혼화재료에 따른 배합은 표와 같다.

기호	공기량 (%)	S/a (%)	W/C (%)	SF (%)	FA (%)	BFS (%)	SP (%)	중량 배합 (kg/m ³)							
								C	W	S	G	SF	FA	BFS	SP
제 3 종 포틀랜드 시멘트(조강시멘트) 사용															
P	2	39.4	34.3					437.3	150.0	694.0	1084.0				7.00
SF-5				5.0			415.5	694.0		21.9					
FA-20					20.0		349.9	694.0		87.5					
BFS-30						30.0	312.7	694.0				124.6			
SPA-4							4.0	437.3					27.8		

2.3.1 압축강도시험

장개재령(30개월)동안 서해안 기후에 노출된 공시체의 열화정도를 알아보고자 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 각 재령별로 압축강도를 측정하였다.

2.3.2 동결융해저항성 시험

본 시험의 목적은 KS에 준하여 실시한 동결융해 시험 결과를 30개월간 옥외폭로시킨 공시체의 시험결과 값과 비교, 국내 서해안 특성을 반영한 실제 구조물의 동결융해저항성능을 실내시험으로도 가늠할 수 있는 기초 데이터를 확보하기 위함이다. 동결융해저항성시험은 국내의 현장 및 기상 조건을 고려하여 KS F 2456(급속동결에 대한 콘크리트의 저항시험방법)에 규정되어 있는 기중동결 수중융해의 B 방법에 따라서 시험하였다.

2.3.3 중성화저항성 시험

총 30개월 동안 서해안 서산옥외폭로시험장에 옥외폭로된 공시체는 대기중의 자외선 및 CO₂ 환경에 장기간 노출되어 공시체 표면이 중성화가 진행되었다. 전 장에서 평가한 재령에 따른 중성화 침투깊이의 값과 비교하기 위하여, 본 시험에서는 KS F 2584(콘크리트의 촉진탄산화 시험방법)에 준하여 촉진중성화 시험을 실시하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 압축강도

초기 증기양생 후 압축강도 결과를 살펴보면 Plain 배합, 실리카흙 배합, 스틸파우더 배합이 우수한 초기 강도 발현을 나타내었다. 이는 초기 증기양생에 있어 강도증진에 참여한 바인더의 량에 의한 것으로 판단되며, 기타 광물질 혼화재인 슬래그 및 플라이 애시는 1일 증기 양생시 초기강도 발현에 참여하지 못하여 상대적으로 작게 나타난 것으로 사료된다. 장기재령으로 갈수록 초기 28일 강도와 격차는 조금씩 줄어드는 경향을 보였으며, 장기재령 720일까지 지속적으로 강도 발현이 미소하게 모든 배합에서 증가하였다. 본 연구에서는 재령 900일까지의 장기내구특성의 지표로 압축강도를 측정하였다. 바인더 종류별, 혼화재 종류별 결과는 매우 미소하지만 차이가 있었으며, 장기 옥외 폭로시킨 공시체의 장기재령 압축강도 분석결과 콘크리트의 열화정도보다 수화반응의 진행정도가 더 커 압축강도가 증가되는 경향을 나타내었다. 지속적인 보완 시험을 통해 재령 3년 이상의 공시체의 평가를 통하여 본 시험 데이터의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다고 사료되나, 900일까지의 장기옥외 폭로시험 결과도 연구의 목적으로 충분히 의미를 지니는 것으로 판단되어 다른 내구성 시험 항목과 연계하여 장기내구특성을 평가 하였다.

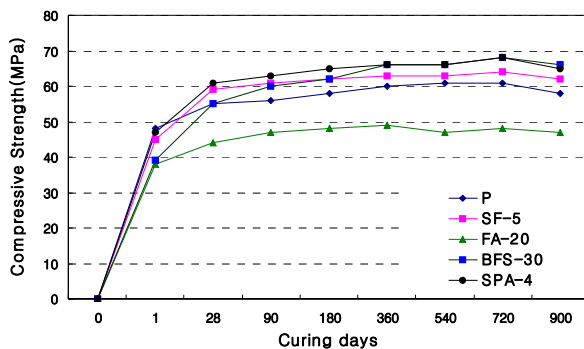


그림 4. 장기 재령 압축강도 시험 결과

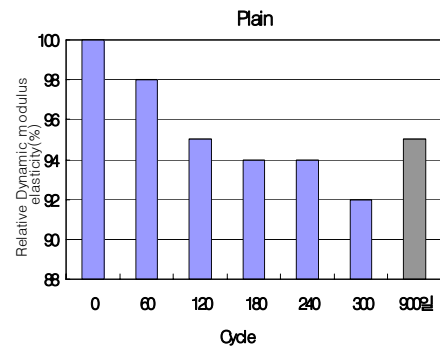


그림 5. 상대동탄성계수 측정 결과(Plain)

3.2 동결융해 저항성

그림 5는 각 혼화 재료별로 동결융해시험기를 이용하여 얻어진 값과 자연 옥외 폭로시킨(900일)값의 상대동탄성 계수 값을 비교한 그래프이다. 그림 5의 Plain을 살펴보면 동결융해시험기를 이용한 결과 값과 서해안 서산 옥외폭로시험장에서 30개월에 걸쳐 자연 열화 시킨 결과를 비교하여 보면 120Cycle 정도의 값과 비슷하였다. 30개월 동안의 영하일수는 총 200여일에 달하지만 지속적으로 영하의 값을 유지한 날도 있으므로 실내축진 결과와 비슷한 결과를 나타내었다고 사료된다. Plain 배합을 기준으로 하여 분석한 결과 SF-5 배합은 180Cycle에 해당하여 Plain배합 보다 다소 동결융해 저항성이 우수한 결과로 나타났다.

FA-20의 경우 120~180Cycle의 값과 비슷한 결과를 나타내었으며, 고로슬래그 혼입배합인 BFS-30은 60~120Cycle의 값을 나타내어 상대적으로 Plain 대비 비슷한 내동결융해 성능을 발휘하였다.

촉진동결융해시험 및 옥외폭로시험의 상관성 분석 결과 혼화재별로 Cycle 수가 다르긴 하였지만 대체적으로 30개월동안 옥외폭로된 공시체는 120~180Cycle의 상대동탄성계수 값과 비슷한 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 서산 옥외폭로시험장의 환경에 의한 것으로 국내 전체를 대표하기는 어려우나 서해

안 기후의 대표적인 사례를 마련하였다는 것에 의미를 둘 수 있다.

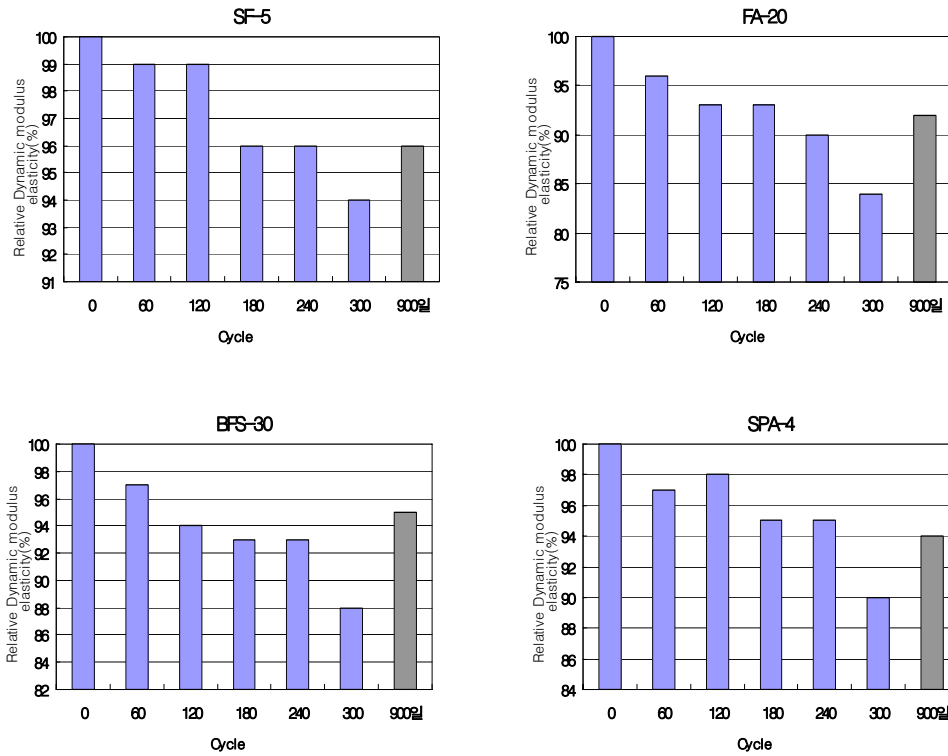
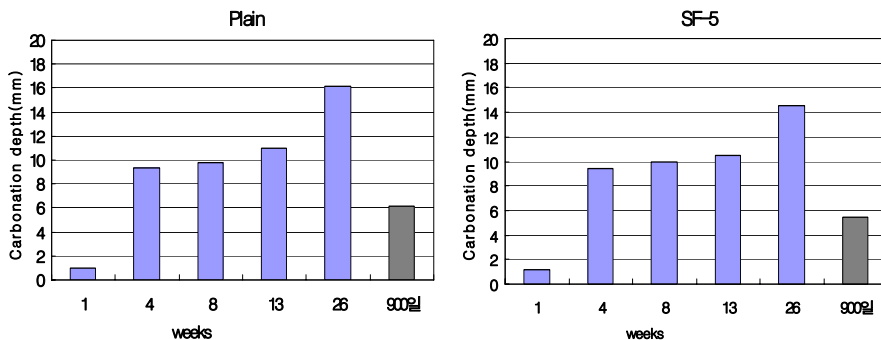


그림 5. 촉진열화 및 옥외폭로 상관성 분석(상대동탄성계수)

3.3 중성화 시험

그림 6은 촉진탄산화 챔버내에서 인위적으로 중성화 시킨 결과와 30개월 동안 옥외폭로시킨 공시체의 중성화 침투 깊이를 나타낸 것이다. 그림 6의 Plain을 살펴보면 옥외폭로 30개월의 중성화 침투 깊이는 6.1mm로서 중성화 챔버의 3주 정도에 해당하는 수치임을 알 수 있다. 중성화 챔버를 이용하여 얻어진 데이터가 선형적으로 증가하는 경향을 보이지 않기 때문에 900일 측정 데이터와의 분석에 한계가 있지만 대체적으로 모든 배합에서 2~3주에 해당하는 중성화 침투 깊이를 보여 신뢰성 있는 데이터임을 확인하였다. 이 데이터를 지속적으로 획득한다면, 일반적으로 사용되는 배합 및 광물질 혼화재가 혼입된 배합을 실내에서 중성화 챔버를 사용하여 촉진 시험을 실시한 다음 본 데이터와 비교 분석하여 임의의 재령에서의 중성화 깊이 정도를 예측할 수 있을 것이라 판단된다.



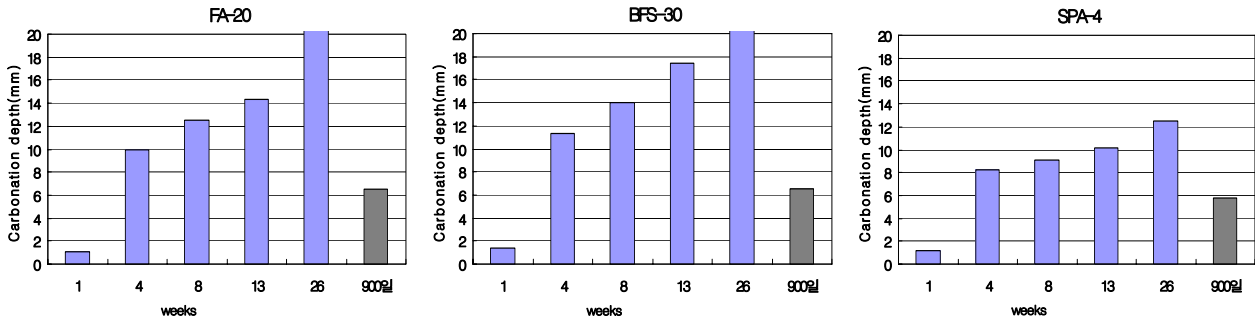


그림 6. 촉진열화 및 옥외폭로 상관성 분석(중성화시험)

4. 결 론

증기양생을 실시한 후 대기중 양생을 시킨 고품질의 PC패널의 장기내구성능 평가를 수행하였다. 장기 폭로시험에 의해 얻어진 데이터를 실내 촉진 시험의 데이터와 비교 분석하여 상관성을 도출하였으며, 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 장기 옥외 폭로시킨 공시체의 장기재령 압축강도 분석결과 콘크리트의 열화정도보다 수화반응의 진행정도가 더 커 압축강도가 증가되는 경향을 나타내었으며, 재령 720일 정도에는 바인더 종류 및 혼화재의 종류에 관계없이 압축강도 증가율이 미소하게 작아지는 경향을 보였다.
- 2) 900일 정도의 옥외폭로시험결과 동결융해 작용에 따른 상대 동탄성계수의 저하정도가 작아지고 있으며 모든 배합에서 92%이상을 나타내어 국내 터널 내부의 환경을 감안하여 볼 때 모든 배합이 동결융해에 의한 내구성 저하는 문제 되지 않을 것이라 판단된다.
- 3) 총 30개월동안 배합별로 중성화 침투 깊이가 5.5~6.5mm를 나타내어 피복두께를 50mm로 할 경우 중성화 침투 속도를 선형적으로 해석한다면 25년 정도면 자연적으로 철근위치 까지 중성화가 진행되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 장기 옥외폭로된 PC패널의 혼화재료별 열화 특성을 평가하였다. 시험결과, 압축강도 및 동결융해 저항성능은 지속적인 데이터의 축적으로 어느 정도 예측이 가능할 것으로 판단되며, 본 연구에서 얻어진 데이터를 바탕으로 추후 지속적인 연구를 수행하여 상관성 분석을 실시할 계획이다.

중성화 저항성은 콘크리트 피복 두께에 따라 중성화 침투 속도가 변하며 또한 대기중 CO₂의 농도 뿐만 아니라 온습도의 영향을 많이 받는 항목으로서 단독 열화시험에 의한 수명 예측은 매우 부적절한 방법이라 판단되어 추후 보완시험으로서 온습도 및 CO₂농도가 조절되는 복합열화시험에 의해 세밀한 분석을 실시할 계획이다.

참고문헌

1. 대한토목학회(1997), “NATM 터널용 프리캐스트 콘크리트 라이닝의 개발 연구”
2. 박기근(1995), “콘크리트의 내구성과 중성화”, 콘크리트학회지, 제7권 2호
3. 이리형·윤상천(1994), “프리캐스트 공법의 시공 및 품질관리”, 콘크리트학회지 제6권 5호
4. L. Ying-yu, W. Qui-dong(1987), "The Mechanism Carbonation of Mortars and the Dependence of Carbonation on Pore Structure", Proceedings of Katharine and Bryant Marther International Conference on Concrete Durability, ACI SP 100-98, pp.1915~1943