

## 폐석회석을 재활용한 다공성 유리섬유보강 폴리머콘크리트 개발

### Development of the Porous Glass Fiber Reinforced Polymer Concrete by Using Recycled Limestone Wastes



지효선(Hyo-Seon Ji) 부회장 | 대원대학교 철도건설공학과 | 부교수 | hsjj@mail.daewon.ac.kr

#### 1. 서론

제천, 단양, 영월 지역의 석회석 채굴과정에서 발생하는 폐석회석의 양이 방대하고, 시멘트 산업의 발전과 더불어 폐석회석의 양이 지속적으로 증가되고 있는 현실을 감안하여 지금까지 매립에만 대부분의 의존한 처리방법을 벗어나 고부가가치이며, 환경 친화적인 건설재료자원으로 재활용하기 위해 다공성 콘크리트를 개발하여 활용 가능성을 보였다. 지금까지의 수역 개발은 치수·이수기능을 중요시 하였지만, 앞으로는 자연생태계에 대하여 고려해야 하며 수역 환경에 대한 복원기술의 개발이 중요한 과제라고 할 수 있다. 이를 해결하기 위한 한 방안으로 환경친화 콘크리트를 들 수 있는데 이는 자연환경의 부하저감과 아울러 생태계와의 조화 또는 공존, 공생에 기여하는 콘크리트를 말하여 에코콘크리트(Eco-Concrete)라고도 한다. 에코콘크리트에는 사용 목적에 따라 환경부하저감형과 생물대응형으로 구분되는데 이 중에서 생물대응형 에코콘크리트는 식생 콘크리트와 수질정화 콘크리트로 세분화되는데 이러한 에코콘크리트로서 다공성 콘크리트를 말할 수 있

다. 최근 들어 환경 친화적인 재료로서 다공성 콘크리트에 대한 관심이 높아지고 있다. 다공성 콘크리트는 콘크리트 속에 연속공극을 확보하여 투수성, 투기성, 흡음성, 단열성 등 일반 콘크리트와는 다른 기능을 갖고 있다. 따라서, 본 논문에서는 폐석회석을 재활용하여 환경 친화적이면서 강도를 증진시킨 다공성 폴리머(Polymer)콘크리트를 개발하였으며, 이에 대한 강도, 내구성 등과 같은 물리·역학적 특성과 배합 및 제조특성을 실험을 통하여 규명하였다. 다공성 폴리머 콘크리트는 바인더를 고분자 재료인 폴리머를 사용하여 만든 것이다. 일반 시멘트는 경화가 늦고, 건조수축이 크며, 인장이나 휨강도가 작고 수밀성이 떨어지며, 내약품성이 약한점 등 여러 가지 본질적인 결함을 가지고 있다. 이러한 시멘트 콘크리트의 결함을 보완하기 위한 재료의 하나로서 고분자 재료인 폴리머가 이용되고 있는데, 이는 강도가 크고 경량이며 내부식성이 좋은 재료로서 최근에 각종 산업분야에서 많이 적용되고 있다. 특히 폴리머와 골재를 결합시킨 폴리머 콘크리트는 용도에 따라 경화시간 및 가사시간을 제어할 수 있고 조기에 고강도 발현이 가능하며, 수밀성, 접착성, 내마모성, 내약품성 그리고 동결융해에 대한 저항성 등이

일반 시멘트 콘크리트보다 우수하다는 장점을 가지고 있다. 또한 다공성 폴리머 콘크리트는 방수성 및 친수성을 가진 환경 친화적인 건설재료로 적용 가능함을 제시하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험개요

다공성 폴리머 콘크리트는 단위 체적당 비용절감이나, 성능향상을 위해 바인더(binder)인 액상 폴리머와 골재의 효율적인 배합이 폴리머 콘크리트의 제조에 있어서 대단히 중요하다. 폴리머 콘크리트의 워커빌리티(workability)는 주로 바인더의 주성분인 액상폴리머의 점도 및 바인더량에 큰 영향을 받는다. 주로 열경화성 수지를 바인더로 사용한 경우 액상 폴리머의 고점도로 인하여 시멘트 콘크리트에 비하여 워커빌리티(workability)가 현저히 떨어진다. 그리고 액상 폴리머는 그 자체만으로 경화하지 않기 때문에, 혼합할 때 적당한 경화제 경화촉진제 등을 첨가시켜 사용한다. 그리고 중량효과를 목적으로 충전재를 사용하는데 충전재는 골재 입자사이를 치밀하게 채워주고 폴리머의 사용량을 줄여주며 강도의 증진을 가져오는 효과가 있다. 충전재로는 입경 1~30 μm 정도의 중질탄산칼슘, 실리카, 플라이 애쉬 등이 이용되며, 함수율은 0.5% 이하이어야 한다. 현재는 폴리머의 흡수가 작은 중질탄산칼슘이 많이 사용되고 있다. 골재는 반드시 건조시켜 함수율을 0.5% 이하로 해야 한다.

### 2.2 사용재료

#### 1) 불포화 폴리에스테르 수지

폴리에스테르 수지는 취급이 쉽고 경화성이 뛰어나고, 상온에서 자유롭게 경화시킬수 있으며, 특히 뛰어난 내약품성을 지니고 있다. 본 실험에 사용한 불포화폴리에스테르 수지는 코발트계 경화 촉진제가 첨가되어 있는 S사의 제품으로서 성분은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. 불포화폴리에스테르(UP)의 화학성분 및 물리적 특성

Specific gravity (25℃)	Viscosity (mPas)	Acid Value (mg KOH/g)	Styrene content (%)	Non Volatile Materials (%)
1.13	1,300	5	37	63

#### 2) 골재

잔골재는 사용하지 않았으며 굵은골재는 지역내 석회석 채굴과정서 발생하는 13mm인 폐석회석(이하 WLS로 약함)을 사용하였다. 실험에 앞서 골재의 수분은 함수율이 0.1% 이하가 되도록 건조로에서 24시간 건조시킨 후 냉각시켜 사용하였으며 일반 부순 돌 골재와의 물리적 성질 값을 Table 2와 같이 비교하여 나타내었다.

Table 2. 골재의 물리적 성질

Items Type	G <sub>max</sub> (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Percentage of solids (%)
G	13	2.65	0.78	1,549	56.6
WLS	13	2.69	0.51	1,438	45.3

#### 3) 충전재

충전재는 골재입자 사이를 치밀하게 채워주고 수지의 사용량을 줄여주며 강도의 증진을 가져오는 효과가 있다. 충전재로 지역내 발생하는 저품위 중질탄산칼슘을 사용하였으며 수분은 0.1%이하가 되도록 24시간 건조시켜 사용하였다. 이의 화학성분은 Table 3과 같다.

Table 3. 충전재의 화학적 성분

구분	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	lg.-loss	Blaine(m <sup>2</sup> /g)
중질탄산칼슘	12.21	1.30	3.33	44.43	1.33	0.10	0.87	0.08	36.41	3,800

4) 수축저감제

폴리에스테르 수지와와의 반응을 고려해 Na 계로 치환한 벤토나이트를 사용하였다.

5) 경화제

사용한 경화제로 메틸에틸케톤퍼옥사이드(MEKPO)를 수지의 중량에 0.6% 첨가하여 경화반응하였다.

6) 첨가제

본 실험에서 강도를 증진시키고자 3mm의 흡 유리섬유를 사용하였다. 이의 물리적 성질은 Table 4와 같다.

Table 4. 유리섬유의 물리적 성질

구분	비중	영률(Gpa)	인장강도(Mpa)	파괴변형률(%)	포아송비
Glass Fiber	1.85	39.3	965	4.8	0.2

2.3 실험방법

1) 배합, 공시체 제작 및 양생

폴리머콘크리트 배합설계는 워커빌리티(workability), 가사시간 그리고 강도를 고려하여서 배합하였으며 그 배합비율은 Table 5와 같다.

다공성 폴리머 콘크리트는 일반적으로 높은 점성과 빠른 경화반응에 의해 불균일한 배합이 되지 않도록 하기 위해서는 기계비빔이 유리하다. 골재와 충전재를 강제 믹서 속에서 충분히 섞은 후 소정량의 폴리머 결합재에 경화제, 경화촉진제 등을 첨가해서 잘 혼합한 후 믹서속에 넣고 계속적으로 작동시킨다. 본 연구의 다공성 폴리머콘크리트 혼합에는 용량 50 L의 강제식 믹서를 사용하였으며, 폴리머콘크리트 혼합량은 30 L, 믹싱방법은 골재+충전재(2분

Table 5. 폐석회석을 재활용한 다공성 폴리머 콘크리트의 배합비

NO	UP (wt. x %)	Filler (UP x %)	Proportions(wt. %)						
			UP (wt. x %)	촉진제 (UP x %)	경화제 (UP x %)	저수축제 (UP x %)	WLS (wt. x %)	G/F (UP x %)	중질 탄산칼슘 (UP x %)
1	3	0	3.0	0.40	1.0	0.40	97	1.9	0
2		5	2.9	0.40	1.0	0.40	97	1.9	5.0
3		10	2.7	0.40	1.0	0.40	97	1.9	10.0
4		15	2.5	0.40	1.0	0.40	97	1.9	15.0
5		20	2.4	0.40	1.0	0.40	97	1.9	20.0
6		50	1.5	0.40	1.0	0.40	97	1.9	50.0
7	5	0	5.0	0.40	1.0	0.40	97	1.9	0
8		5	4.7	0.40	1.0	0.40	97	1.9	5.0
9		10	4.5	0.40	1.0	0.40	97	1.9	10.0
10		15	4.3	0.40	1.0	0.40	97	1.9	15.0
11		20	4.0	0.40	1.0	0.40	97	1.9	20.0
12		50	2.5	0.40	1.0	0.40	97	1.9	50.0

간 믹싱)→수지 투입(90초간 믹싱)→경화제 투입(2분간 믹싱)의 순서로 하였다. 관련된 실험모습은 Photo. 1-3 과 같다.



Photo. 1. 골재와 충전재의 건비빔 작업모습



Photo. 2. 믹싱기에 수지 투입



Photo. 3. 수지와 경화제의 혼합 모습



Photo. 4. 폴리머콘크리트 오븐양생

공시체 제작은 KS F 2419(폴리에스테르 레진 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법)에 준하여 공시체를 제작하였으며,  $\phi 10 \times 20$ cm 원주형 공시체에 2.5kg의 다짐봉으로 25cm 일정높이 25회 3층 다짐을 실시하였으며, Photo 4와 같이 1일간 오븐양생(20℃, 80% R.H.), 26일간 상온양생하였다. 휨강도는 15×15×55 cm 공시체에 2.5kg의 다짐봉으로 25cm 일정높이 50회 3층 다짐을 실시하여 압축강도 측정 공시체와 동일하게 양생하였다.

## 2) 강도시험

KS F 2481(폴리에스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 압축강도, 휨강도를 실시하였다. KS F 2405의 압축강도 시험방법과 KS F 2407에 준하여 휨강도를 측정하였다. Photo. 5는 압축강도를 측정하는 모습이다. 시험은 재령 4, 7, 28일에 실시하였으며, 3회 반복 시험한 것의 평균값을 실험 결과치로 측정하였다.



Photo. 5. 폴리머콘크리트 강도

3) 투수시험

압축강도용 공시체의 중앙부위를 절단한 ø10×10 cm의 원주형 공시체를 이용하여 수두차(水頭差)는 15cm로 한 KS F 2322 흙의 정수위 투수시험방법에 의하여 재령 28일에 측정하였다.

투수계수는 식 (1)과 같은 Darcy식에 의하여 계산하였다.

$$K(cm/sec) = \frac{\Delta h \times Q}{A \times t \times l} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, K: 투수계수, Δh: 수두, l : 시료의 길이, t : 시간(5sec),

A: 시료의 단면적( $\frac{\pi d^2}{4}$ ), Q(cm): 시간에 배수된 수량

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축, 휨강도

다공성 폴리머 콘크리트에서 압축강도는 110~178 kg/cm<sup>2</sup>이며, 휨강도는 54~98kg/cm<sup>2</sup> 으로 나타났다. Fig.1, 2에 나타났듯이 UP에 의한 강도발현에 있어서 재령 4일이 7일과 비교하여 89%수준이고 재령 7일이 28일과 비교하였을 때 거의 차이가 없음을 고려할 때, 대체적으로 초기의 강도발현이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 수지(UP)의 사용량과 압축강도의 관계에서 다공성 폴리머콘크리트의 압축강도는 수지 사용량의 증가에 따라 증가하고 있다. 충전재의 첨가 유무에 따라 강도차이가 많이 나타났다. 일반 다공성 시멘트 콘크리트보다 압축강도에서는 165%, 휨강도에서는 163% 정도 크게 나타났다. 시멘트 콘크리트와 달리 폴리머콘크리트는 경화시간을 줄일 수 있으므로 액상폴리머 중량대비 경화제의 양을 0.5~1.0% 범위에서 조절하여 구조물을 타설 성형할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 1, 2는 각각 중량대비 불포화에스테르(UP)의 3, 5%를 결합재로 하였을 때 충전재(중질탄산칼슘) 혼입량에 대한 양생기간별 압축강도를

나타낸 것이다. Fig. 1, 2에서 나타났듯이 충전재는 UP의 3, 5% 경우 모두 폴리머 양의 15%에서 압축강도가 가장 높게 나타나고 있어 충전재 배합비율을 15%로 하는 것이 매우 유리한 배합으로 판단된다. 이것은 다공성 폴리머 콘크리트 내부의 공극이 형성되도록 배합비를 조정하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 또한 충전재는 지역내에서 발생하는 저품위 중질탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)으로서 충전재의 증가에 의한 배합의 점도는 급격히 증가하였는데, 강도면에서는 충전재의 양이 15%일 때 가장 높게 나타났다.

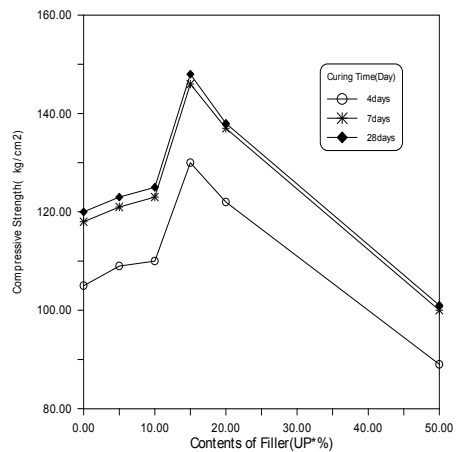


Fig. 1. 다공성폴리머콘크리트 강도와 충전재의 혼입율관계(3wt.%)

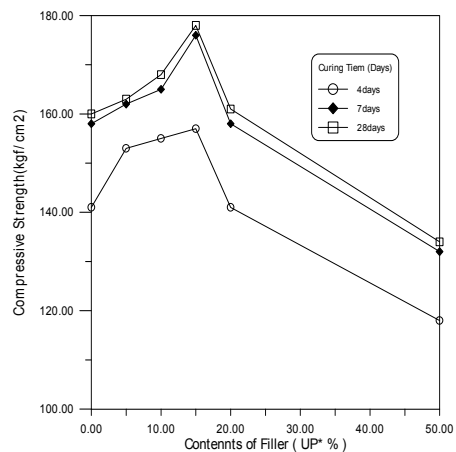


Fig. 2. 다공성폴리머콘크리트 강도와 충전재의 혼입율관계(5wt.%)

15% 이상을 사용시는 충전재 증가에 의한 성형성 저하 및 강도를 지배하는 수지량이 상대적으로 부족해 결합재로서의 충분한 역할을 감당하지 못한 것으로 생각된다.

### 3.2 투수계수

투수계수에 있어서도  $1.0 \times 10^{-1}$  cm/sec의 투수계수 값을 요구하는데 모든 배합에서 이 수준을 만족하였다. 본 실험을 통하여 제작된 다공성 폴리머콘크리트의 투수 성능이 매우 양호한 것으로 나타났다. 따라서, 다공성 폴리머콘크리트는 요구되는 강도를 만족하면서 내식성 및 투수성을 요하는 수로 건설구조물에 상당히 유용하게 사용될 수 있을 것이라 기대된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 폐석회석을 재활용하여 다공성 폴리머콘크리트 제조 기술로서, 압축강도, 휨강도 및 투수계수 등 물리적 특성을 실험적으로 규명하였다. 다공성 폴리머 콘크리트에서 압축강도는  $110 \sim 178$  kg/cm<sup>2</sup>이며, 휨강도는  $54 \sim 98$  kg/cm<sup>2</sup> 으로 나타났다. 충전재의 첨가 유무에 따라 강도차이가 많이 나타났다. 충전재는 폴리머 양의 15%정도가 매우 유리한 배합으로 나타났다. 이것은 다공성 폴리머 콘크리트 내부의 공극이 형성되도록 배합비를 조정하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 일반 다공성 시멘트 콘크리트보다 압축강도에서는 165%, 휨강도에서는 163% 정도 크게 나타났다. 그리고 투수계수에 있어서도  $1.0 \times 10^{-1}$  cm/sec의 투수계수 값을 요구하는데 모든 배합에서 이 수준을 만족하였다. 시멘트 콘크리트와 달리 폴리머콘크리트는 경화시간을 줄일 수 있으므로 액상 폴리머 중량대비 경화제의 양을 0.5~1.0% 범위에서 조절하여 구조물을 타설 성형할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 충전재는 UP의 3, 5% 경우 모두 폴리머 양의 15%에서 압축강도가 가장 높게 나타나고

있어 충전재 배합비율을 15%로 하는 것이 매우 유리한 배합으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 폐석회석을 재활용한 폴리머 콘크리트는 주로 내방식성, 친수성 구조물에 적용될 것으로 기대되며, 본 개발 구조모델은 방수성이 매우 뛰어난 폴리머를 사용한 것으로서 내구성, 내화학성 등이 우수한 모델로서 공기단축 및 시공성이 우수하여 그 적용범위가 확대될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. H.S. Ji, K.B. Lee, S.J. Jun, I.H. Jo, "Development of Porous Concrete by Using Recycled Limestone Wastes", The Japan/Korea International Symposium on Resources Recycling and Material Science, 2003, pp. 89-94.
2. 지효선, "폐석회석을 재활용한 다공성 에코콘크리트 제품 개발과 현장적용", 석회석 관련 연구 사례 발표회, 2002, pp.61~90, 대원과학대학.
3. 박승범, 조영수, 김정환, "플라이애시와 실리카흙을 혼입한 포러스콘크리트의 물리, 역학적 특성 및 적용에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집 제 22권 제6-A 호, 2002, pp. 1391~1400.
4. 지효선, "폐석회석을 활용한 포장용 투수성 콘크리트 개발", 시멘트 관련기술개발 사업 연구 발표 세미나, 2001, pp. 33~47, 대원과학대학.
5. 지효선, "폐석회석을 활용한 투수콘크리트 개발", 시멘트 관련 기술개발사업 연구발표 세미나, 2000, pp. 24~45, 대원과학대학.
6. 채창후, 정문영, 이형우, "투수콘크리트의 물리적 특성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집 제11권 1호, 1999, pp. 166~171.
7. 문한영, 김성수, 정호섭, "투수성 콘크리트포장의 실용화를 위한 실험적 연구", 한국콘크리트학회지 제10권 3호, 1998, pp. 165~173.
8. 성찬용, "고성능 경량 폴리머콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구", 한국농공학회지, 37(3.4), 1995, pp. 72-81.