

폴리머침투제의 개발과 폴리머침투콘크리트의 특성에 관한 연구

Development of Polymer Impregnants and Properties of Polymer Impregnated Concrete

邊根周* · 李相旻**

Byun, Keun Joo · Lee, Sang Min

Abstract

Polymer-Impregnated Concrete(PIC) is a composite material of concrete and polymer. PIC has superior properties compared to conventional cement concrete, such as strength, stiffness, toughness, durability, water-proofing, chemical resistance. However, the usage of PIC has been limited to repairing materials and non-structural applications due to the lack of the design criteria and the analytical model to determine structural behavior. The objective of this study is experimentally to develop the optimum mixing proportions of polymer impregnants and the stress-strain responses, the strength characteristics, the fatigue and creep behaviors, and the durabilities of MMA(methyl methacrylate)- based PIC.

요 지

폴리머침투콘크리트는 무기계 시멘트와 유기계 폴리머를 결합시킨 신소재 콘크리트이다. 폴리머침투콘크리트는 기존 시멘트콘크리트에 비하여 각종 역학적 특성과 내구성이 크게 개선되는 것으로 알려져 있으나, 지금까지는 국부적 강도증진과 보수재의 차원에 머무르고 있는 실정이다. 향후, 각종 고성능 프리캐스트부재의 제조에 폴리머침투콘크리트를 보다 적극적으로 적용하기 위해서는 고분자모노머의 개발과 폴리머침투콘크리트의 재료특성에 대한 체계적인 정립이 필요하며, 본 연구에서는 이를 위하여 실험결과를 토대로 MMA계의 침투제를 개발하고 폴리머침투콘크리트의 재료특성을 구명한다.

1. 서 론

고분자 폴리머를 이용하여 시멘트콘크리트의 재료특성을 개선시킨 복합재료를 콘크리트·폴리머 복합체(Concrete · Polymer Composites)라고 정의한

다. 콘크리트의 구성성분을 결합재(matrix), 충전재(filler) 및 보강재(fiber)로 세분할 때, 콘크리트·폴리머 복합체는 종래 시멘트콘크리트의 결합재인 시멘트풀의 전부 또는 일부를 고분자 폴리머로 대체 하므로써 결합재의 강성과 충전재와의 부착특성을 크게 개선시킨 신소재 콘크리트이다.⁽¹⁾ 콘크리트·폴리머 복합체는 제조원리에 따라서 폴리머시멘트 콘크리트(PCC : Polymer Cement Concrete 또는

* 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Polymer Modified Concrete), 폴리머침투콘크리트 (PIC : Polymer Impregnated Concrete) 및 폴리머 콘크리트(PC : Polymer Concrete 또는 Resin Concrete)의 3분야로 분류된다. 폴리머침투콘크리트(폴리머침투콘크리트라고도 함)는 경화된 시멘트콘크리트의 표면으로부터 고분자침투제를 침투시킨 후 소정의 중합과정을 거쳐 제조되며, 폴리머시멘트콘크리트는 시멘트풀의 일부를 폴리머로 대체하여 생성되는 것이며, 폴리머콘크리트(수지콘크리트라고도 함)는 시멘트풀의 전량을 폴리머로 대체한 콘크리트이다. 이중 폴리머침투콘크리트는 폴리머시멘트콘크리트나 폴리머콘크리트에 비하여 강도특성과 내구성이 가장 우수한 것으로 평가되고 있다.⁽²⁾ 폴리머침투콘크리트는 1960년대 중반 고성능 프리캐스트부재의 제조와 담수화시설에 이용하고자 개발되기 시작하였으나 1966년부터 미국 Brookhaven National Laboratory와 Bureau of Reclamation의 합동연구가 수행됨으로서 이 분야에 대한 연구가 본격적으로 시작되었고, 이후 많은 연구자들에 의하여 고분자모노머의 선정기준, 침투제의 구성, 배합, 제조공정, 물성 및 응용방안이 정립되어 왔다.^(3,4) 폴리머침투제에 사용되는 고분자모노머는 점도가 낮고 상온에서 열적 안정성의 확보가 용이하면서도 콘크리트의 재료특성을 개선시킬 수 있는 것이어야 하는데 지금까지는 methyl methacrylate(MMA), methacrylate(MA), butylacrylate(BA), styrene(ST), polyester (PE) 등이 효율적인 것으로 알려져 있다. 이들 고분자모노머들은 중합반응 후 폴리머의 결정조직, 분자결합력, 결합구조 등의 자기 독특한 고유물성을 갖고 있지만 상호반응성이 우수하므로 이들을 혼합하여 공중합시킬 경우 폴리머침투콘크리트에 다양한 물성부여가 가능하다는 장점이 있다. 일반적으로 폴리머침투콘크리트의 재료특성은 고강도와 내구성으로 평가되고 있으며, 1980년대 까지는 각종 콘크리트구조물의 강도증진, 내구성 확보, 라이닝재 및 덧씌우기재료의 활용을 위한 연구가 진행되었고, 최근에는 교량상판, 콘크리트 포장체, 방사성폐기물 저장용기, 흡판, 기계기초, 관암거, 영구거푸집, 샌드위치 패널 등과 같은 고부가가치의 프리캐스트부재에 적용하기 위한 제조이론, 제조공정, 제조장비의 개발을 위한 연구가 진행되고 있다.^(5,6) 그러나, 아직도 폴리머침투콘크리트의 역학적 특성이나 설계

기준이 확립되어 있지 않기 때문에 응용에 제한을 받고 있는 실정이다. 이러한 연구배경과 본 연구자의 연구경험을 토대로 본 연구에서는 콘크리트구조물의 강도 및 물성, 각종 프리캐스트부재의 제조를 위한 MMA계 폴리머침투제의 구성, 최적배합, 제조이론, 제조공정을 개발하고, 개발된 폴리머침투제를 이용한 폴리머침투콘크리트의 역학적 특성, 장기거동, 피로거동 및 내구성 등의 재료특성을 제시하는데 연구의 목적이 있다. 본 연구는 크게 세 부분으로 구성되며, 첫 단계에서는 고분자모노머로 결정성 폴리머인 MMA를 선정하여 개시제와 촉진제의 첨가율 변화 및 중합온도에 따른 침투성 및 중합반응성을 평가하므로써 폴리머침투제의 최적구성 및 제조공정을 개발한다. 두번째 단계에서는 개발된 폴리머침투제의 최적구성과 제조공정을 적용하여 폴리머침투콘크리트를 제조하고, 폴리머침투콘크리트의 압축강도, 할렬인장강도, 휨강도, 응력-변형률 관계, 탄성계수 및 이축압축거동을 평가한다. 세번째 단계에서는 폴리머침투콘크리트의 피로거동, 장기거동 및 내구성을 평가한다.

2. 폴리머침투제의 개발

2.1 폴리머침투제의 구성

2.1.1 고분자재료의 화학적 특성

분자량이 10,000 이상인 재료를 고분자(macromolecule)라고 부르며, 구조적으로는 탄소(C), 산소(O), 수소원소(H)와 치환기(R)가 기본단위를 이루어 반복연결됨으로써 장대분자를 형성하고 있다. 고분자재료는 반응계의 분자구조 배열, 규칙성, 결정성 및 열적특성에 따라서 그림 1에 나타난 바와 같이 열가소성(thermoplastics), 열경화성(thermosets), 가교고무(crosslinking rubbers)로 분류된다. 이중 열경화성 고분자는 에폭시와 같이 고분자모노머가 폴리머반응시 화학적 변화를 수반하면서 연화하여 망상구조체를 형성하기 때문에 경화 후 불용불용의 성질을 갖게 되는 고분자이며, 열가소성 고분자는 아크릴수지, 폴리에틸렌수지, 폴리스타이렌수지, 염화비닐수지 및 나이론수지 등과 같이 가열하면 용융되나 냉각하면 고화되는 고분자로서 반응고리의 구성에 따라서 결정성(crystalline)과 비결정성(amorphous)으로 구분된다. 일반적으로 결정성 고분자폴

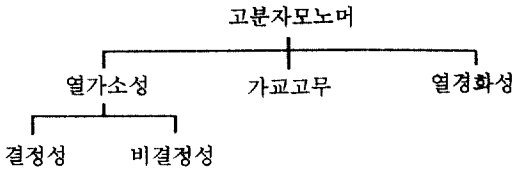


그림 1. 고분자재료의 분류

리머는 강성이 크고 취성을 보이는 반면, 비결정성 고분자폴리머는 연성이 크기 때문에 콘크리트구조물의 강도와 연성증진을 위하여 열가소성 고분자재의 결정성재료를 비결정성재료를 혼합한 공중합체 (co-polymer)를 사용하기도 하지만, 본 연구에서는 열가소성 고분자재료 중 강도증진에 가장 효율적인 고분자재료로 평가되고 있는 MMA를 침투제의 개발에 채택하기로 한다.

2.1.2 폴리머침투제의 선정

중합전 상태의 고분자모노머(monomer)를 폴리머 중합반응시킬 때 반응성 및 열적·화학적 안정성을 향상시키고 균질한 중합도(degree of polymerization)를 확보하기 위하여 폴리머침투제에는 고분자모노머에 소량의 개시제(initiator) 및 촉진제(accelerator)를 첨가한다. 본 연구에서는 콘크리트구조의 강도증진용 폴리머침투제를 개발하기 위하여 주재료로서 결정성 아크릴수지인 methylmethacrylate [$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3$: MMA]를 선정하였으며, 반응 개시제로는 과산화물계의 benzoyl peroxide (BPO)와 질소화합물계의 azobis iso-butyronitrile (AIBN)이 주로 사용되나 상대적으로 반응개시온도가 낮은 AIBN을 선정하였다. AIBN은 불안정 화학구조를 갖고 있어 고분자모노머를 만나면 분자구조가 2개의 자유기로 분해되고 이때 자유기에 존재하는 부대전자가 중합반응을 유도하게 된다. 촉진제는 고분자모노머의 중합반응에 필요한 활성화 에너지를 공급하기 위하여 첨가하는 발열촉매로서 dimethylaniline(DMA)를 사용하였다.

2.2 고분자모노머의 중합이론

액체상태의 고분자모노머가 화학작용에 의하여 고형상태로 변화하는 화학반응 즉, 모노머가 폴리머로 변화하는 반응을 중합(polymerization)이라 한다. 고분자모노머의 중합반응은 반응특성에 따라서

축합중합, 자유라디칼중합 및 이온중합으로 구분된다. 이중 자유라디칼중합(free radical polymerization)은 고분자모노머의 활성전자(active electron)를 중심으로 진행되며, 불포화결합($\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{N}$)을 갖는 비닐계 고분자모노머와 같이 쉽게 개환되는 고분자재료에서 주로 발생한다. 자유라디칼중합은 연쇄반응으로 진행되는데 통상 개시반응, 성장반응 및 종결반응으로 세분되며, 자유라디칼의 성장반응시 중합율이 20-50%에 도달하게 되면 중합체의 분자량과 함께 반응계의 점도가 급격히 증가하여 자유라디칼의 확산속도가 저하되는 겔효과(gel effect)를 수반한다. 따라서, 자유라디칼의 성장반응속도와 고분자모노머의 중합도는 폴리머침투콘크리트의 균질한 재료특성 확보에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 개시제와 촉진제를 이용한 고분자모노머의 연쇄이동반응으로 반응계의 분자량을 낮추고, 가열로 인한 온도상승으로 반응계의 점도를 낮추어 줌으로서 겔효과를 약화시킬 수 있는 열촉매중합법을 적용하였다.

2.3 MMA계 침투제의 개발

MMA계 폴리머침투제의 최적배합을 결정하기 위하여 개시제와 촉진제 첨가율 및 가열온도를 변화시키면서 침투제의 중합속도와 침투성을 분석한다.

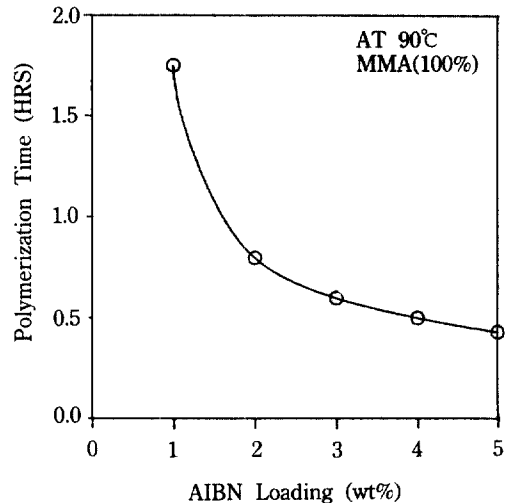


그림 2. 개시제 첨가율이 중합시간에 미치는 영향 (AIBN의 경우)

2.3.1 개시제 첨가율의 영향

그림 2는 MMA계 침투제의 중합시간에 미치는 AIBN 첨가율의 영향을 도시한 것이다. 분석결과, 개시제의 첨가율이 증가할 수록 고분자모노머의 분해속도가 빨라지기 때문에 중합시간이 크게 단축되었으나 개시제의 첨가율이 3 wt% 이상이 되면 반응계의 점도증가에 따른 자유라디칼의 확산속도 저하로 중합속도의 증가율이 감소되는 것으로 분석된다.

따라서, 본 연구에서는 개시제로 분해개시온도가 상대적으로 낮은 질소화합물계의 AIBN을 선정하였으며, 첨가율은 2 wt%로 결정하였다.

2.3.2 촉진제 첨가율의 영향

그림 3은 촉진제 첨가율이 MMA의 중합시간에 미치는 영향을 도시한 것이다. 중합실험을 위하여 개시제로는 AIBN(2 wt%)를 사용하였다. 분석결과, DMA의 첨가율이 1 wt% 일 경우에는 중합시간이 단축되었으나, 1 wt% 이상에서는 촉진제의 첨가율이 증가할 수록 중합시간이 지연되었다. 이로부터 촉진제의 발열반응은 고분자모노머의 겔반응을 수반함을 알 수 있으며, DMA의 최적첨가율은 1 wt%인 것으로 평가된다.

2.3.3 가열온도의 영향

MMA의 중합시간에 미치는 가열온도의 영향은 그림 4에 도시한 바와 같다. 그림 4에서 보는 바와

같이 동일한 배합조건인 경우에도 가열온도에 따라서 중합시간이 변화하며, 80-90°C의 가열온도에서는 촉진제를 첨가하지 않아도 30분 이내에 중합반응이 발생됨을 알 수 있다. 그러나, 시공성을 고려할 때 콘크리트구조물의 온도를 90°C 이상으로 상승시키는 데는 많은 노력이 필요하므로 촉진제를 첨가하여 반응온도를 낮추는 것이 효율적인 것으로 사료된다. 실험결과에 의하면, 촉진제로 1 wt%의 DMA를 첨가하면 45-50°C의 가열온도에서도 40-60분 이내에 중합반응이 발생한다.

2.3.4 침투제의 침투성 평가

폴리머침투콘크리트는 경화된 콘크리트의 공극 내에 폴리머침투제를 침투시켜 제조되므로 폴리머 침투콘크리트의 물성은 폴리머침투제의 침투깊이와 침투량에 따라 크게 변화한다. 침투이론에 의하면 폴리머침투제의 침투깊이는 침투제의 점도와 침투시간의 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, 표 1에 제시된 바와 같이 본 연구에서 선정한 MMA계 침투제는 다른 고분자재료에 비하여 점도가 낮으므로 침투성이 우수한 것으로 판단된다. 그림 5는 본 연구에서 W/C=40-60% 콘크리트에 대하여 수행한 실험자료를 도시한 것으로 이를 회귀분석하면 MMA계 침투제의 침투시간(t)에 따른 침투깊이(h)의 평가식은 식 (1)로 표현된다. 식 (1)의 침투상수 1.5는 BNL에서 제시한 이론침투상수 1.4-1.8의 범위 내에

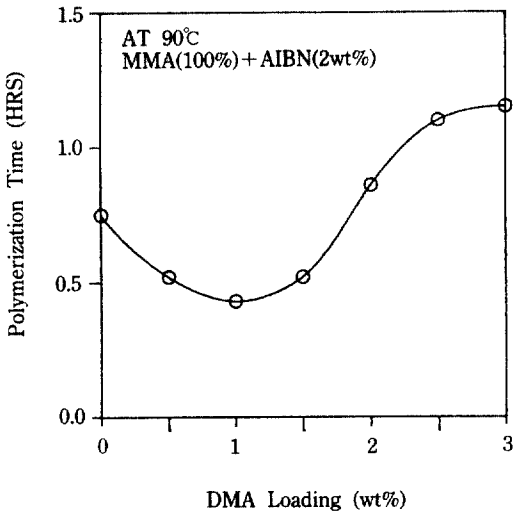


그림 3. 촉진제 첨가율이 중합시간에 미치는 영향 (DMA의 경우)

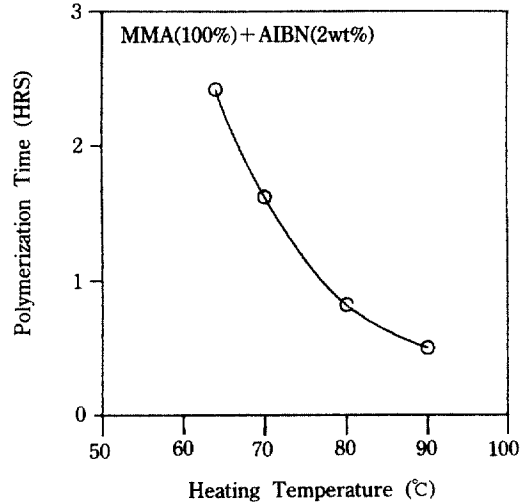


그림 4. 가열온도가 중합시간에 미치는 영향(고온열풍)

표 1. 고분자모노머의 점도

고분자재료	점도 (cp)	밀도 (g/cc)	비등점 (°C)
· MMA(100%)	0.55	0.940	101.1
· BA(100%)	0.80	0.894	147.2
· MMA(50%) + BA(50%)	0.68	0.917	-
· Styrene	0.71	0.900	145.0

표 2. MMA계 침투제의 최적구성

모노머	개시제	촉진제
100 wt% MMA	2 wt% AIBN	1 wt% DMA

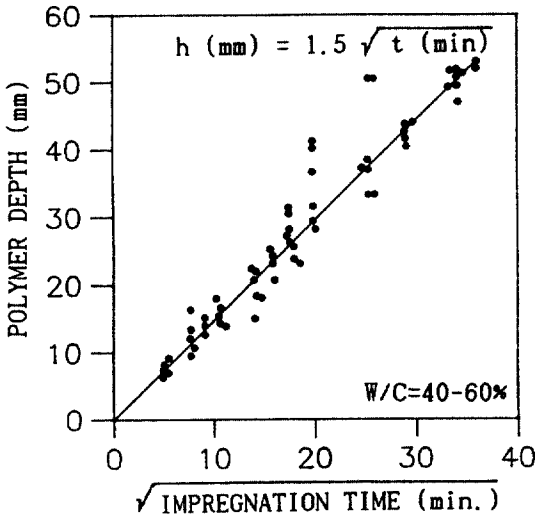


그림 5. 침투시간에 따른 침투깊이의 변화(함침기법, W/C=40-60%)

있는 값으로,⁽⁸⁾ W/C=40-60%의 완전 건조된 콘크리트에 적용 가능한 것으로 평가된다.

$$h(\text{mm}) = 1.5\sqrt{t} \text{ (min)} \quad (1)$$

2.3.5 폴리머침투제의 최적구성

본 연구에서 수행한 폴리머침투제의 침투성 및 중합시간 평가를 토대로 MMA계 고분자모노머를 중심으로 하는 콘크리트구조물의 강도증진용 폴리머침투제의 최적구성을 제시하면 표 2와 같다.

2.4 폴리머침투콘크리트의 제조공정

폴리머침투콘크리트의 제조공정은 건조(drying), 침투(impregnation), 중합(polymerization)의 3단계로 나뉘어지며, 각 공정에서는 콘크리트의 공극율과 함수율, 폴리머침투제의 물성, 목표침투깊이, 대상구조의 형상과 면적 등을 고려하여야 한다. 일반적으로 폴리머침투제를 경화된 콘크리트의 표면에서 내부로 침투시키는 침투기법에는 진공기법(Vacuum Technique), 압력기법(Pressure-mat Technique), 함침기법(Surface-drying and Monomer-ponding Technique), 그루빙기법(Surface-grooving and Monomer-ponding Technique), 살포기법(Spray Technique) 등이 있다. 중합기법은 중합에너지의 도입방법에 따라서 방사중합법, 열촉매중합법, 방사촉매중합법 등으로 분류되며 열촉매중합법의 경우, 열원의 도입방법으로 고온증기(hot steam), 고온열풍(hot air) 및 고온열수(hot water) 적용방법이 개발되어 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 본 연구에서는 현장의 시공성을 위하여 많은 시험 과정을 거쳐 개발된 그림 6의 함침기법을 적용하기로 하였다.

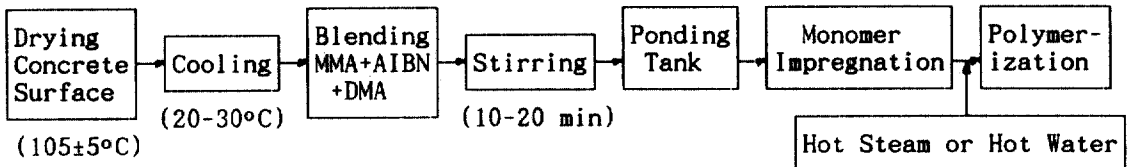


그림 6. 폴리머침투콘크리트의 제조공정(함침기법)

3. 폴리머침투콘크리트의 재료특성

3.1 시편제작 및 실험방법

3.1.1 배합설계 및 시편의 형상

시편제작을 위하여 비중 3.15의 보통포틀랜드시멘트와 최대골재치수 $G_{max}=10$ mm의 쇄석과 강모래를 사용하였다. 실험시편의 배합설계 예는 표 3과 같으며, 토목구조물의 일반적인 사용범위를 고려하여 슬럼프를 7.5 ± 1 cm로 고정시킨 상태에서 W/C 비를 40%, 50%, 60%로 변화시켰다. 시편의 제작과정은 KS F 2403을 따랐으며, 콘크리트의 타설 후 봉형진동기로 다짐하여 실험실시 전까지 습윤양생을 실시하였다. 본 연구의 수행을 위하여 표 4와 같이 90개의 $\phi 15 \times 30$ cm 원주형 시편(일축압축강도, 할렬인장강도), 80개의 $15 \times 15 \times 55$ cm 보시편(휨강도, 휨피로거동, 휨크리프거동), 28개의 $7.6 \times 7.6 \times 41$ cm 보 시편(동결융해저항) 및 60개의 $20 \times 20 \times 5$ cm(이축압축강도) 및 10개의 $40 \times 40 \times 10$ cm(흡수량시험) 평판 시편을 제작하였다.

표 3. 실험시편의 배합설계 예




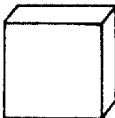
W/C (%)	단위재료량 (kg/m ³)			
	W	C	S	G
40	195.2	488	896	827
50	244.0	400	878	809
60	292.8	342	808	746

($G_{max}=10$ mm, 슬럼프 7.5 cm, s/a=52%)

3.1.2 실험방법 및 실험장치

폴리머침투콘크리트의 일축압축강도 및 할렬인장강도실험은 KS F 2405 및 2423에 준하여 200 ton 용량의 만능시험기로 측정하였으며, 이축압축실험은 80 ton 용량의 하중재하장치를 별도로 제작하여 기존 만능시험기와 함께 사용하였다. 휨강도 및 휨피로실험은 KS F 2408에 준하여 50 ton 용량의 만능피로시험기(Instron 모델 1333)를 사용하였고, 동결융해실험은 KS F 2437과 2456에 따라 급속동결융해시험기(Soiltest 모델 CT-100)와 동탄성계수측정기(Marui 모델 MIN-1101)를 사용하였다. 휨크리프실험은 중력식 휨크리프시험기(Marui 모델 C-92)와 전자식 변위측정기(Ono sokki 모델 GS-503)를 이용하였다. 또한, 응력-변형률 관계를 도출하기 위하여 변형률게이지(Kyowa KC-70-A1-11)와 정적변형률 측정기(Kyowa 모델 UCAM-5A)를 사용하였다. 그림 7은 이축압축시험에 사용한 하중재하장치와 변형률게이지의 부착위치를 도시한 것으로, 하중재하판은 평판형태의 특수강으로 제작하였고, 그리스(grease)를 이용하여 시편과 재하판의 측면마찰이 최소화되도록 하였다. 이축압축실험시 1축응력과 2축응력의 응력비(σ_1/σ_2)를 0, 0.2, 0.5, 1.0의 4경우로 변화시키면서 폴리머침투콘크리트와 보통콘크리트에 대하여 각각 응력-변형률관계, 파괴하중 및 극한거동을 평가하였다.

표 4. 시편형상 및 시편수

구분	원주형 시편	보 시편	보 시편	평판 시편
시편수	90	80	28	70
시편크기	$\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$	$15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 55\text{cm}$	$7.6\text{cm} \times 7.6\text{cm} \times 41\text{cm}$	$20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 5\text{cm}$ $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 10\text{cm}$
시편형상				

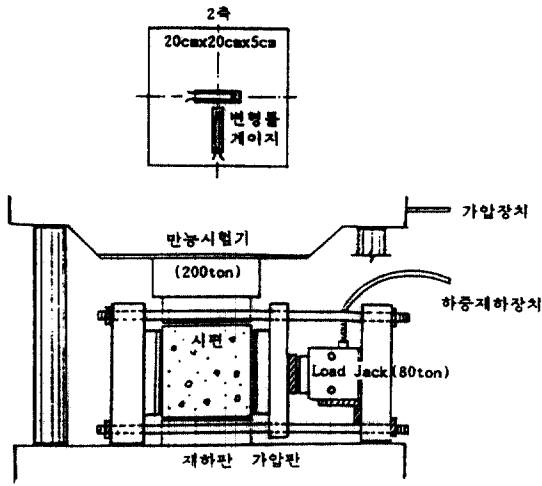


그림 7. 이축압축 시험장치

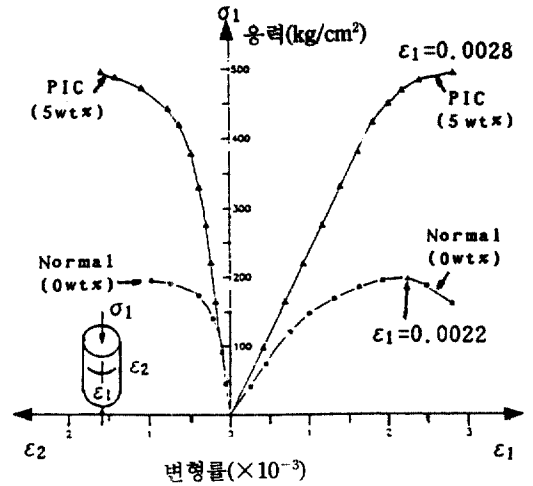


그림 8. MMA 침투콘크리트의 일축압축 응력-변형률 관계

3.2 응력-변형률관계

그림 8은 MMA를 5% 함유한 폴리머침투콘크리트의 일축압축시험으로부터 도출한 응력-변형률곡선이다. 분석결과 콘크리트의 내부공극에 MMA를 완전침투 시키는 경우, 응력-변형률곡선이 파괴강도의 75%까지 선형을 나타냈으며, 극한변형률도 0.0028-0.0029로 보통콘크리트의 0.0022에 비하여 최대 31% 증가하는 것으로 나타났다. 이로부터 폴리머침투제는 콘크리트의 강도와 연성을 크게 증진시키는 것으로 평가되며, 그림 8로부터 탄성구간에서의 포아슨비(ν)를 분석하면 보통콘크리트의 경우 $\nu=0.21$, 폴리머침투콘크리트는 극한응력의 82%까지 $\nu=0.28$ 을 나타냄을 알 수 있다.

3.3 탄성계수

폴리머침투콘크리트의 탄성계수는 폴리머 침투율에 따라 변화한다. 지금까지 복합재료이론을 토대로 폴리머침투콘크리트의 탄성계수를 평가하기 위한 수많은 근사공식이 제안되고 있으나, 복합재료이론은 완전탄성재료로 가정하여 유도된 이론일 뿐만 아니라 구성재료의 물성 및 체적비의 엄밀한 평가가 곤란한 경우에는 적용에 한계를 갖는다.^(10,11) 그림 9는 실험으로부터 도출한 MMA침투율에 따른 폴리머침투콘크리트의 탄성계수 변화를 도시한 것이다. 그림 9에 의하면 MMA의 침투율이 낮은 경우에는 탄성계수의 증가율이 현저하였으나, 침투율이

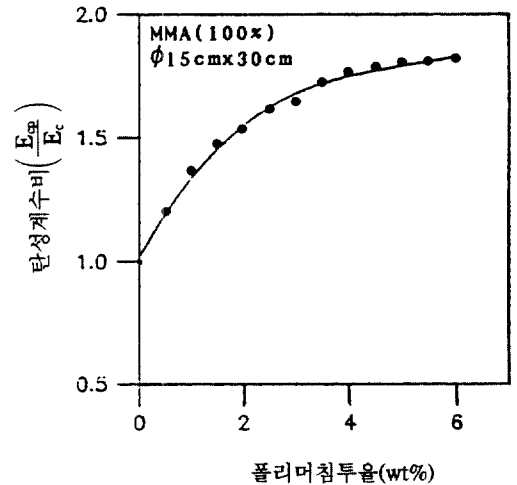


그림 9. 폴리머침투율에 따른 MMA침투 콘크리트의 탄성계수 변화

점차 증가하여 5.5% 수준에 이르게 되면 탄성계수가 큰 증가를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 강성저하의 주요원인이 되는 내부 미세균열이 낮은 폴리머침투율에서도 크게 보강되어 탄성계수의 초기 증가율에 영향을 미치지 때문인 것으로 평가된다. 그림 10과 식 (2)는 완전침투조건으로 평가되는 폴리머침투율 5.5%를 기준으로 탄성계수와 압축강도의 상관관계를 분석한 것이다. MMA 침투콘크리트는 시멘트콘크리트에 비하여 탄성계수와

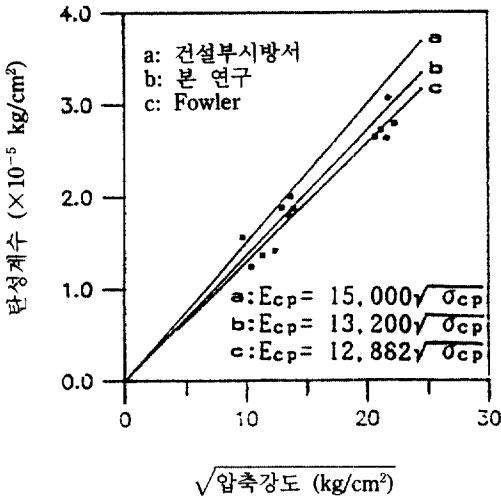


그림 10. MMA 침투콘크리트의 탄성계수 평가공식의 비교

√압축강도의 기울기가 완만하므로 콘크리트표준시험방서의 탄성계수 평가공식을 이용하면 폴리머침투콘크리트의 탄성계수가 과대평가되고, 본 연구의 값이 Fowler 공식값⁽¹²⁾과 유사하므로 본 연구에서 도출한 식 (2)의 폴리머침투콘크리트 탄성계수(E_{cp}) 실험식을 제안한다.

$$E_{cp} = 13,200 \sqrt{\sigma_{cp}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2)$$

3.4 일축압축강도

3.4.1 기존 시멘트콘크리트의 W/C비의 영향

폴리머 침투전 보통콘크리트의 배합조건이 폴리머 침투콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 W/C비가 40, 50, 60%인 원주형시편에 MMA 침투율을 변화시키면서 열축매중합법으로 폴리머침투콘크리트를 제작한 후, 폴리머침투율의 변화에 따른 압축강도의 변화를 분석하였다. 분석결과는 그림 11과 같으며, 폴리머침투율이 증가할수록 압축강도가 크게 증가하였으나, 내부공극을 폴리머로 완전히 충전시키면($P=5.5\%$) 배합비에 관계없이 거의 일정한 강도가 유지되는 것으로 나타났다. 이로부터 폴리머침투체의 강도증진효과는 보통콘크리트의 강도가 낮고 W/C비가 높을수록 더욱 증대되는 것으로 판단된다.

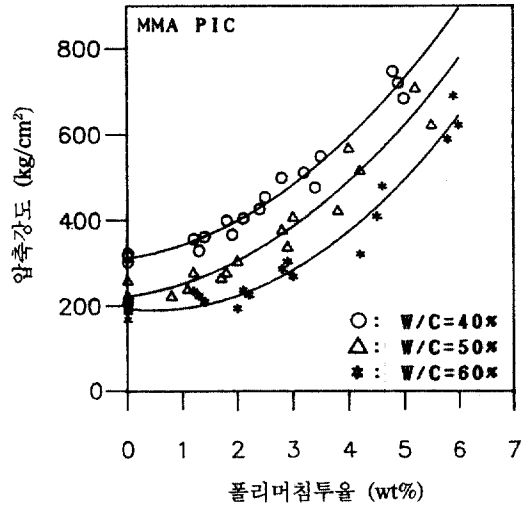


그림 11. 기존 보통콘크리트의 W/C비가 압축강도에 미치는 영향

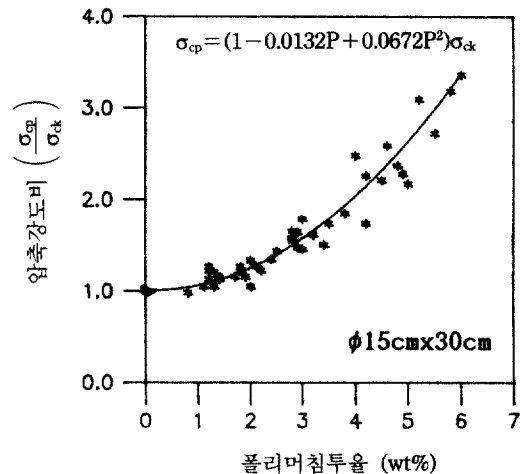


그림 12. 폴리머침투율에 따른 MMA 침투콘크리트의 압축강도 변화

3.4.2 폴리머침투율이 미치는 영향

폴리머침투율은 폴리머 중합반응 후, 침투전 보통콘크리트의 중량에 대한 폴리머침투콘크리트의 중량증가율로 정의되며, 그림 11을 이용하여 기존 보통콘크리트의 W/C비와 무관하게 폴리머침투율에 따른 압축강도의 변화를 회귀분석하면 식 (3) 및 그림 12와 같다. 그림 12에 의하면 폴리머침투율이 증가함에 따라 압축강도의 개선율이 크게 증가되는 것으로 평가된다.

$$\sigma_{cp} = (1.0 - 0.0132 P + 0.0672 P^2) \sigma_{ck} \quad (3)$$

여기서, σ_{cp} 와 σ_{ck} 는 폴리머침투콘크리트 및 보통 콘크리트의 압축강도, P는 폴리머침투율(wt%)이다.

3.5 활렬인장강도

시멘트콘크리트는 결합재의 조직구조가 시멘트의 수화반응을 통하여 형성되기 때문에 압축강도에 비하여 인장강도가 상대적으로 낮은 단점을 갖는다. 따라서, 콘크리트의 인장강도가 개선되면 균열저항 능력, 파괴에너지 흡수능력 및 파괴인성이 크게 향상됨은 물론 구조물의 내하력 및 사용성을 증대시키므로 인장강도는 신소재의 개발에 있어 매우 중요한 역학적 특성이다.^(13,14) 본 연구에서 도출한 MMA침투율-활렬인장강도의 관계, 압축강도-활렬인장강도의 관계는 표 5, 그림 13, 14 및 식 (4)에

표 5. MMA 침투율에 따른 강도특성

침투율 P(wt%)	압축강도		인장강도		σ_t/σ_c
	σ_{cp}	σ_{cp}/σ_{ck}	σ_{tp}	σ_{tp}/σ_{tc}	
0.0	219	1.0	18.0	1.0	0.082
2.5	301	1.37	27.5	1.53	0.091
3.8	422	1.93	35.6	1.98	0.084
5.5	650	2.97	46.8	2.60	0.072

(W/C=50%, G_{max} =10 mm, Slump=7.5 cm)

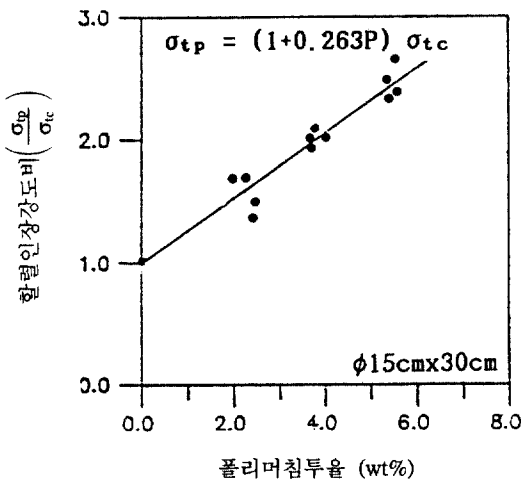


그림 13. 폴리머침투율에 따른 MMA침투 콘크리트의 활렬인장강도 변화

제시된 바와 같다. 실험결과에 의하면 폴리머침투 콘크리트의 활렬인장강도는 폴리머침투율이 증가함에 따라 선형 증가하였으며, 폴리머침투콘크리트의 압축강도와 비교할 때, 8.4% 내외의 강도비를 갖는 것으로 평가된다.

$$\sigma_{tp} = (1 + 0.263 P) \sigma_{tc}$$

$$\text{또는, } \sigma_{tp} = 0.084 \sigma_{cp} \quad (4)$$

여기서, P는 폴리머침투율(wt%), σ_{tp} 와 σ_{tc} 는 MMA 침투콘크리트와 보통콘크리트의 인장강도(kg/cm²), σ_{cp} 는 MMA 침투콘크리트의 압축강도(kg/cm²)이다 (σ_{ck} =219 kg/cm², σ_{tc} =18 kg/cm²).

3.6 휨강도

콘크리트의 휨강도는 직접인장강도나 활렬인장강도에 비하여 20-50% 정도 큰 값을 갖는 것으로 알려져 있는데, 이는 콘크리트 시편에 발생하는 응력 분포가 상이하기 때문이다. 본 연구에서는 W/C=50%인 15×15×55 cm의 보시편을 사용하여 3등분재하법으로 휨강도 실험을 실시하였으며, 실험결과 및 실험으로부터 도출된 폴리머침투콘크리트의 휨강도의 평가공식은 표 6, 그림 15, 16 및 식 (5)와 같다. 식 (5)에서 폴리머침투콘크리트의 휨인장강도와 압축강도의 제곱근과의 비례상수 3.79는 보통콘크리트의 2.01에 비하여 1.89배 증가된 값이다.

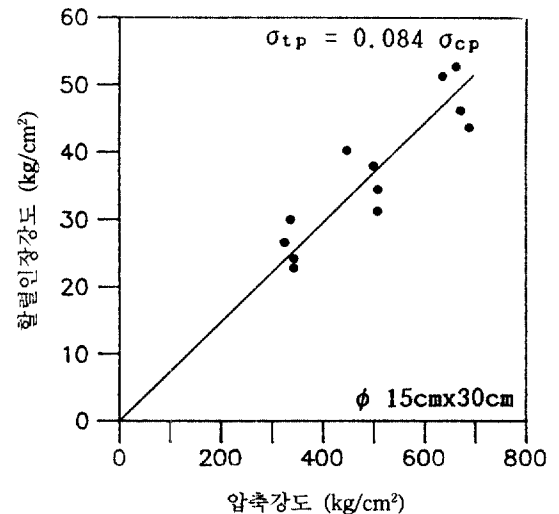


그림 14. MMA 침투콘크리트의 활렬인장 강도와 압축강도의 관계

표 6 MMA침투율에 따른 휨강도특성

침투율 P(wt%)	폴리머침투 콘크리트(σ_{rp})	보통콘크리트 (σ_{rc})	σ_{rp}/σ_{rc}
0.0	29.8	29.8	1.0
2.10	57.2	-	1.92
3.95	78.4	-	2.63
5.02	92.5	-	3.10

(W/C=50%, $G_{max}=10\text{ mm}$, 단위: kg/cm^2)

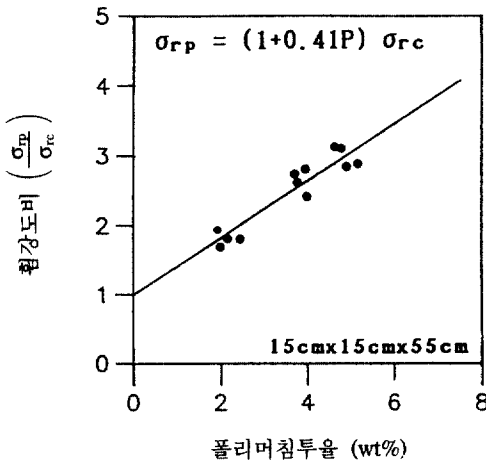


그림 15. 폴리머침투율에 따른 MMA침투 콘크리트의 휨강도 변화

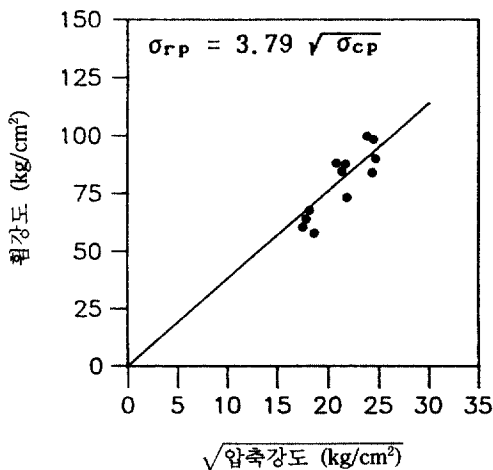


그림 16. MMA 침투콘크리트의 휨강도와 압축강도의 관계

$$\sigma_{rp} = (1 + 0.41 P) \sigma_{rc}$$

$$\text{또는, } \sigma_{rp} = 3.79 \sqrt{\sigma_{cp}} \quad (5)$$

여기서, σ_{rp} 와 σ_{rc} 는 MMA 침투콘크리트와 보통 콘크리트의 휨강도(kg/cm^2)이다($\sigma_{ck}=219\text{ kg}/\text{cm}^2$).

3.7 폴리머침투콘크리트의 이축압축거동

표 7과 그림 17은 이축압축실험으로부터 도출한 폴리머침투콘크리트 및 보통콘크리트의 이축응력비에 따른 1축 압축강도의 변화를 분석한 것이다. 분석결과에 의하면 응력비 $\sigma_1/\sigma_2=0.5$ 에서 폴리머침투 콘크리트와 보통콘크리트의 1축 압축강도와 극한변형률의 증가가 가장 현저하였다. 특히 폴리머침 투

표 7. 이축압축실험결과 분석

구 분	σ_1/σ_2	극한응력 (kg/cm^2)	극 한 응력비	ϵ_{ult} ($\times 10^{-6}$)
폴리 머 침 투 (PIC)	0.0	469.3	1.0	2,880
	0.2	601.5	1.282	2,800
	0.5	657.7	1.401	3,160
	1.0	610.7	1.301	2,590
보 통 콘 크 리 트 (NOR)	0.0	209.0	1.0	2,200
	0.2	248.3	1.188	2,460
	0.5	258.3	1.236	2,730
	1.0	246.0	1.177	2,600

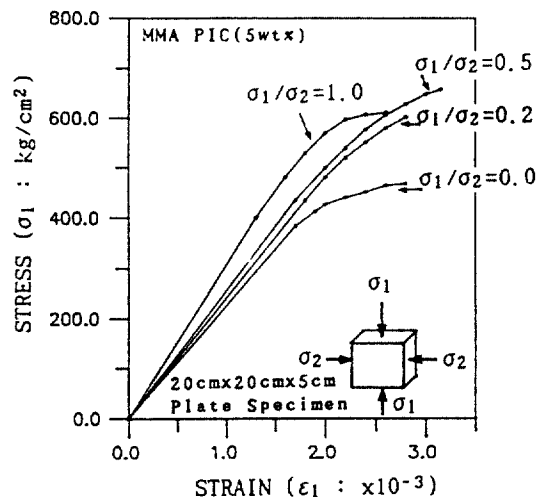


그림 17. MMA 침투콘크리트의 이축응력비에 따른 응력-변형률 관계

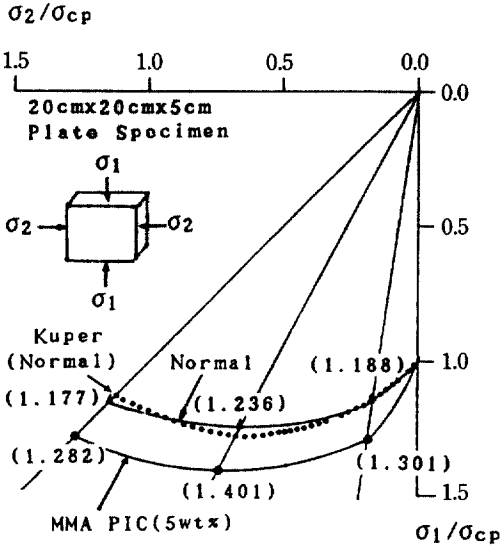


그림 18. MMA 침투콘크리트의 이축압축 파괴포락선

콘크리트의 경우 응력비가 0.5-1.0일 때, 최대 30-40%의 강도증가를 나타내었는데 이는 결합재-골재간의 계면부착강도 증가에 기인되는 것으로 평가된다. 그림 18은 폴리머침투콘크리트의 이축압축 파괴포락선을 도시한 것으로 폴리머의 침투로 콘크리트의 하중저항능력이 크게 개선되었음을 알 수 있다. 또한, 보통콘크리트에 대한 본 실험의 이축압축거동은 Kuper 등의 실험결과와 비교적 유사한 거동을 보이고 있는 것으로 분석되며,^(15,16) 이축실험시 재하판과 시편의 접촉면에서 발생하는 측면구속응력의 제어방법이 중요한 영향인자인 것으로 판단된다. 본 연구의 이축실험으로부터 재하판과 시편의 접촉면에 그리스를 사용하면 하중재하시 발생하는 측면구속이 크게 감소되는 것으로 판단된다.

3.8 폴리머침투콘크리트의 피로거동

정적강도 이하의 반복하중에 의하여 발생하는 내부구조의 점진적 열화현상을 피로(fatigue)라고 정의한다. 본 연구에서는 폴리머침투콘크리트의 휨피로거동을 평가하기 위하여 실험조건으로 작용하중의 진동수는 480 cpm, 최대응력수준은 휨강도의 70%, 80%, 90%의 3종류, 최소응력수준은 사하중의 영향을 고려하여 휨강도의 10%를 선정하였다. 휨피로 실험을 회귀분석하여 도출한 응력수준-피로수명 상

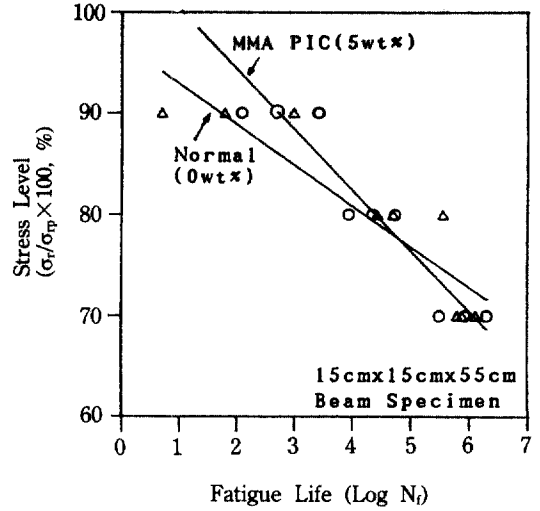


그림 19. 폴리머침투콘크리트의 피로특성(S-N 곡선)

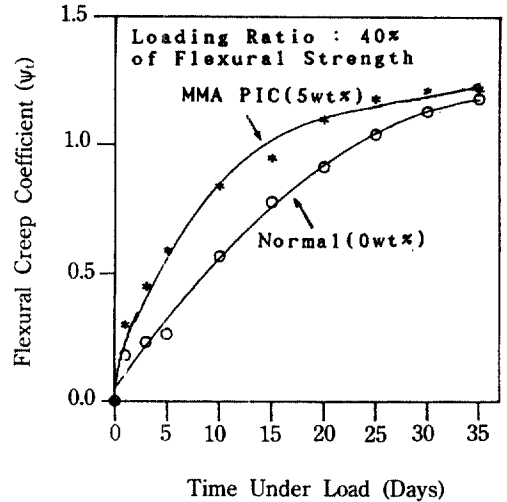


그림 20. 폴리머침투콘크리트의 휨크리프 특성

관관계(S-N곡선)는 그림 19와 같다. 분석결과, 휨강도에 대한 작용하중의 응력비로 표시한 응력수준이 80% 이상인 경우, 폴리머침투콘크리트의 피로수명이 보통콘크리트에 비하여 크게 증가하는 경향을 나타내었는데 실제로는 표 6에 제시된 바와 같이 폴리머침투콘크리트의 휨강도가 보통콘크리트에 비하여 매우 높기 때문에 동일 재하조건에서는 당연히 폴리머침투콘크리트의 피로수명이 길게 된다.

3.9 폴리머침투콘크리트의 장기거동

장기지속하중에 의하여 발생하는 콘크리트의 크리프변형은 경화시멘트풀의 불안정한 미세공극이 시멘트풀과 골재 사이의 부착을 서서히 파괴시키기 때문에 발생한다. 그러나, 폴리머침투콘크리트는 내부 결합재의 강성과 부착강도가 크게 증가하기 때문에 동일하중하에서는 보통콘크리트의 10-20% 범위에서 크리프변형을 일으키는 것으로 알려져 있다. 그림 20은 휨크리프 실험결과를 도시한 것으로 휨강도에 대한 장기지속하중의 비를 동일하게 할 경우, 폴리머침투콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 초기 휨크리프변형은 크지만 하중재하 후 15-20일이 경과하면서부터 안정된 변형거동을 나타내는 것으로 평가된다. 그림 20은 15×15×55 cm 보시편에 휨강도의 40%를 장기재하한 실험결과를 도시한 것이며, 폴리머침투콘크리트의 초기 크리프변형을 평가하기 위하여 재하시간을 35일로 제한하였다. 휨크리프계수는 탄성처짐에 대한 순수 휨크리프처짐의 비로 정의하였다. 휨크리프처짐은 3등분점 하중을 받는 보시편의 중간점 좌우에 다이알게이지를 부착하여 측정하였으며, 순수 휨크리프처짐은 실험시 동일조건의 보시편에 대하여 측정된 건조수축변형을 고려하여 산정하였다.

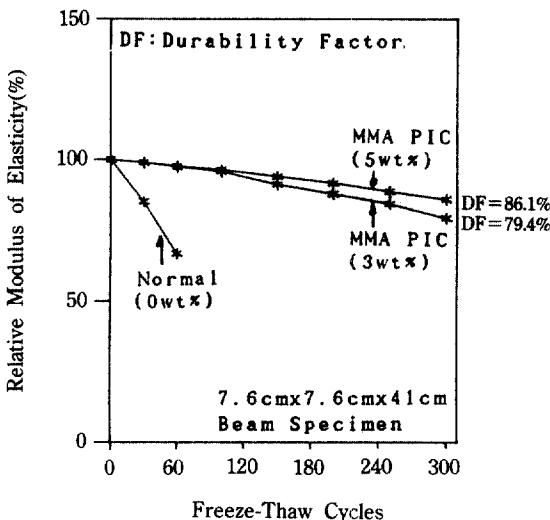


그림 21. 폴리머침투콘크리트의 동결융해 저항성

3.10 폴리머침투콘크리트내구성

3.10.1 폴리머침투콘크리트의 동결융해저항

폴리머침투콘크리트의 내구성을 평가하기 위하여 KS F 2456에서 규정하고 있는 급속동결융해 시중량변화를 측정하였다. 그림 21은 동일 콘크리트 시편에 대한 폴리머침투콘크리트와 보통콘크리트의 동결융해 실험자료 중 상대동탄성계수의 변화만을 도시한 것이며, 보통시멘트콘크리트는 60회에서 파괴되어 동탄성계수의 측정이 불가능하였으나 MMA 침투콘크리트는 300회에서도 86%의 매우 양호한 상대동탄성계수를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 폴리머의 침투로 콘크리트의 내구성이 크게 향상되는 것으로 평가되며, 이는 폴리머입자가 공극을 채우고 있어 수분의 침투가 불가능해지기 때문인 것으로 판단된다.⁽¹⁷⁾

3.10.2 폴리머침투콘크리트의 흡수량 평가

폴리머침투콘크리트의 내부공극의 변화 및 방수 효과를 평가하기 위하여 흡수량실험을 실시하였다. 본 실험을 위하여 최대직경 10 cm의 삼각형 유리 용기를 별도로 제작하였으며, W/C=55%인 40×40×10 cm 슬래브시편 표면에 완전 부착하여 1일 간격으로 7일 동안 흡수량의 변화를 측정하였다. 흡수량 분석결과, 그림 22에 나타난 바와 같이 폴리머침투콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 표면으로부터 수분의 침투가 불가능하기 때문에 방수효과 및 내구성이 크게 향상되는 것으로 평가된다.

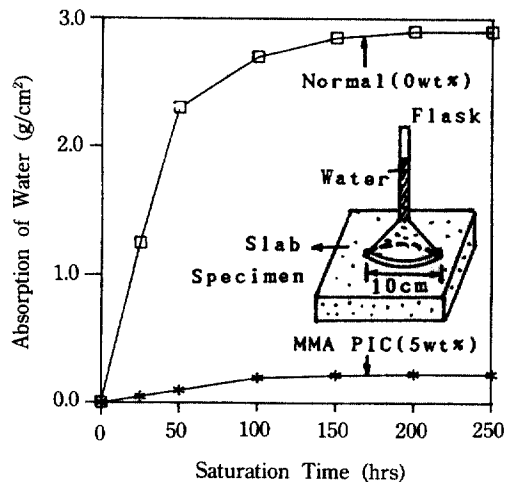


그림 22. 폴리머침투콘크리트의 흡수량

4. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 콘크리트구조물의 강도 및 물성 증진을 위하여 개발한 폴리머침투제는 MMA계 고분자모노머, 개시제 및 촉진제로 구성된다. 개발된 MMA계 폴리머침투제는 침투성, 중합반응성 및 열적 안정성이 매우 우수한 것으로 평가되며, 개시제로는 2 wt% AIBN, 촉진제로는 1 wt% DMA가 최적구성비인 것으로 판단된다.

(2) 일축 및 이축압축강도, 할렬인장강도 및 휨강도 실험결과, 폴리머침투콘크리트의 강도 및 역학적 특성은 폴리머침투율이 증가할수록 크게 증가하였으며, 특히 MMA 침투율이 5~5.5 wt%인 경우, 일축압축용력-변형률곡선이 극한강도의 75%까지 선형을 나타내었으며, 보통콘크리트에 비해 압축강도는 3.2배, 극한변형률은 1.27배, 탄성계수는 1.8배, 할렬인장강도 및 휨강도는 2.6~3.2배 증가하였다. 이축압축거동의 경우, 용력비 $\sigma_1/\sigma_2=0.5-1.0$ 에서 일축압축강도에 비하여 30-40% 정도 1축압축강도가 증가하였으며, 극한변형률도 최대 0.00316을 나타내었으므로 MMA 침투콘크리트의 경우 강도와 연성이 크게 향상되는 것으로 평가된다.

(3) 보통콘크리트에 비하여 MMA 침투콘크리트의 휨크리프 및 휨피로거동이 개선된다 고는 할 수 없으나, 동일 재하조건일 때는 MMA 침투콘크리트의 강도증진으로 거동이 개선될 수 있으며, MMA 침투콘크리트의 내구성과 수밀성이 크게 증진될 수 있음이 구명되었다.

(4) 이상의 연구결과로 부터 본 연구에서 개발된 폴리머침투콘크리트는 교량상판, 콘크리트 포장체, 건물 등의 구조재료 및 기존구조의 강도증진재료로 사용할 수 있고, 각종 콘크리트 공장제품 및 프리캐스트 부재의 제조에 적용될 수 있으며, 방수 및 내구성 증진용으로 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 말씀

본 연구는 1989년도 한국과학재단 목적기초연구의 지원으로 수행되었으며, 본 연구를 지원해 주신 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다(총괄과제번호 : 89-04-05).

참 고 문 헌

1. Manning, D.G. and Hope, B.B., "The Role of the Polymer-Impregnated Paste and Mortar," *Proceedings of the First International Congress on Polymer Concretes*, ICPC, The Construction Press Ltd, 1975, pp.37-42.
2. Steinberg, M., "Concrete Polymer Materials and Its Worldwide Development," *Polymers in Concrete*, ACI Publication SP-40, 1973, pp.1-13.
3. Dikeou, J., Cowan, W., DePuy, G., et al., *Concrete-Polymer Materials*, Fourth Topical Report, BNL 50328, REC-ERC 72-1, 1972, pp.1-114.
4. 大濱嘉彦, "콘크리트-폴리머-複合體의 利用と 研究・開發動向", *콘크리트 工學*, Vol.28, No.4, 1990, pp.5-17.
5. Manson, J.A., Chen, W.F., et al, *Use of Polymers in Highway Concrete*, *Transportation Research Board*, NCHRP Report 190, 1978, pp.3-77.
6. Clifton, J.R., Fearn, J.E., and Anderson, E.D., *Polymer Impregnated Hardened Cement Pastes and Mortars*, NBS-BSS 83, National Bureau of Standards, 1976, pp.1-16.
7. Dahl-Jorgensen, E., Chen, W.F., Manson, J.A., Liu, Y.N., and Vanderhoff J.W., "Polymer-Impregnated Concrete: Laboratory Studies", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.101, No.TE1, 1975, pp.29-45.
8. Byun, K.J., Choi, H.S., and Lee, S.M., "Development of Surface Impregnants and Polymer-Impregnation Techniques for Highway Concrete", *Proceedings of 6th International Congress on Polymers in Concrete*, ICPC, China, 1990, pp.765-772.
9. 변근주, 김영진, 이상민, 김정훈, "폴리머를 이용한 콘크리트구조물의 강도증진", *한국콘크리트학회 학술발표회 논문집*, Vol.3, No.2, 한국콘크리트학회, 1991, pp.158-161.
10. Phinyawat, P., Flexural Behavior of Reinforced Polymer-Impregnated Beam, *Ph.D. Thesis*, The University of Texas at Austin, 1977, pp.1-249.
11. Manning, D.G. and Hope, B.B., "The Effect of Porosity on the Compressive Strength and Elastic Modulus of Polymer Impregnated Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.1, No.6, 1971, pp. 631-644.
12. Yimprasert, P., Fowler, D.W., and Paul, D.R., *Durability, Strength, and Method of Application of Polymer-Impregnated Concrete for Slabs*, Research Report 114-4, Center for Highway Research, The

University of Texas at Austin, 1976, pp.1-198.

13. Kawakami, M., Tokuda, H., et al., "Tensile-Splitting stress Distribution of Partially Polymer-Impregnated Concrete Cylinders", *Polymer Concrete: Uses, Materials, and Properties*, ACI Publication SP-89, 1985, pp.177-206.
14. Auskern, A.B. and Horn, W.H., "Some Properties of Polymer-Impregnated Cements and Concretes", *Journal of American Ceramic Society*, Vol.54, No.1, 1971, pp.282-285.
15. Kupfer, H. and Hilsdorf, H.K., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses", *ACI Journal*, Vol. 66, No.8, 1969, pp.656-666.
16. 변근주, 이상민, 노병철, 이용진, "일축 및 이축압축을 받는 폴리머침투콘크리트의 응력-변형률 특성", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol.3, No.2, 한국콘크리트학회, 1991, pp.93-98.
17. Kirtania, K.R. and Maiti, S., "Polymer Impregnated Concrete: Part 3 Effect of Corrosive Environment on Strength and Durability Properties", *Polymer Materials Division, Journal of Material Science*, Vol.21, Indian Institute of Technology, 1986, pp.341-345.

(接受 : 1991. 10. 29)