

폴리머 침투콘크리트 보의 거동

Behavior of Polymer-Impregnated Concrete Beams

변근주*, 이상민**, 유동우**, 이용진***
Byun, Keun-Joo Lee, Sang-Min Yoo, Dong-Woo Lee, Yong-Jin

ABSTRACT

Polymer-Impregnated Concrete(PIC) is a new polymer-concrete composite material which consists of basic cement concrete and polymer. The mechanical properties and behavior of PIC depend on the type of polymers and the impregnation techniques. In general, the polymer impregnation can improve the strength, durability and ductility of normal concrete.

The objective of this study is to develop the analytical procedure for analyzing the structural responses of polymer-impregnated concrete beams with different polymer loading by using finite element method on the basis of experimental results.

1. 서론

최근, 건설재료의 생산 및 구조물의 시공 기술이 크게 발달함에 따라 기존 콘크리트의 역학적 특성을 크게 개선시킨 신소재 고성능 콘크리트(High Performance Concrete)에 대한 관심이 증가하고 있다. 신소재 콘크리트 중 고분자재료를 사용하는 폴리머콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 강도특성 및 내구성이 대폭 향상되므로 구조용 재료 뿐만 아니라 비구조용 재료로 활용이 기대되는 건설재료이다. 폴리머를 이용한 콘크리트는 최근, 초고강도 프리캐스트 구조부재(영구거푸집, 샌드위치 패널, 방사성폐기물저장용기, 흡관, 관암거 및 송전전주 등)와 도로, 교량 및 활주로의 덧씌우기재, 수공구조(파이프, 저수탱크, 댐의 여수로 등), 항만구조를 비롯한 콘크리트구조물의 강도증진 및 각종 보수재료로 활용되고 있다.

폴리머콘크리트는 일반적으로 모노머, 폴리머 등을 시멘트와 혼합하여 콘크리트를 만든 후 양생과정에서 폴리머 피막을 형성하도록 한 폴리머시멘트콘크리트, 기존 콘크리트 표면에 모노머를 침투시켜 중합시킨 폴리머 침투(또는 함침)콘크리트, 시멘트풀의 일부 또는 전부를 폴리머로 치환하여 폴리머가 직접 골재의 결합재 역할을 하도록 한 폴리머콘크리트로 구분된다. 그러나, 폴리머침투제를 콘크리트 부재에 침투하였을 경우, 폴리머 침투깊이에 따라 재료특성과 부재의 거동이 보통콘크리트의 경우와는 상이하므로, 본 연구에서는 부분 및 완전 폴리머침투콘크리트 휨부재의 거동을 실험적으로 평가하고 실험결과를 토대로 해석 모형과 해석프로그램을 개발하는데 연구의 목적을 둔다.

2. 폴리머침투콘크리트의 내부결합구조

시멘트콘크리트의 내부공극에 존재하는 폴리머 입자는 수화결합구조가 아닌 화학결합구조를 갖고 있기 때문에 시멘트풀의 강성과 골재와 시멘트풀의 부착강도를 증대시키는 역할을 한다. 또한, 골재와 시멘트풀

* 연세대학교 토목공학과 교수

** 연세대학교대학원 토목공학과 박사과정

*** 연세대학교대학원 토목공학과 공학석사

의 경계면에 존재하는 초기결합과 결합재와 골재의 강성차이를 최소화시키므로 각종 역학적 특성이 개선되는 것으로 평가되고 있다. 폴리머침투콘크리트에 사용되는 고분자 재료는 아크릴계수지인 MethylMethacrylate (MMA), Buthylacrylate(BA), Styrene(ST)등이 효율적인 것으로 알려져 있으나, MMA와 ST는 강성증진, BA는 연성증진에 기여함이 상이하다. 폴리머침투제의 침투깊이는 점성 유체의 침투이론인 Washburn의 동적모세관 흐름법칙에 의하여 이론적으로 추정 가능하며, 대기침투의 경우 고분자재료의 점성과 침투시간이 주요 영향인자인 것으로 평가된다. 그림 1은 폴리머침투콘크리트의 내부 조직구조를 도시한 것이다.

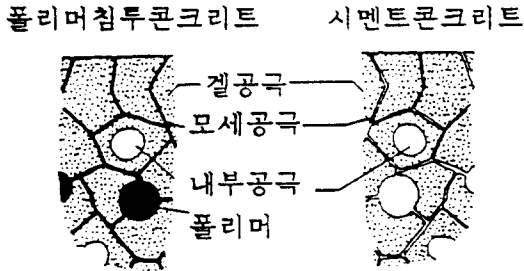


그림 1 폴리머침투콘크리트의 내부조직

3. 실험방법

3.1 시편제작

(1) 사용재료, 배합설계 및 시편의 형상
시편제작에 사용된 시멘트는 비중 3.15의 보통포틀랜드시멘트이며, 굵은골재는 최대치수 10mm인 골재번호 #8의 혼합골재이다. 폴리머침투제에 사용된 단량체는 결정성 아크릴수지인 공업용 MMA ($CH_2=C(CH_3)COOCH_3$)로 점도 0.55cp, 밀도 0.94g/cc인 고분자재료이다. 반응 개시제로는 질소화합물계의 Azobisisobutyronitrile (AIBN)을 사용하였다. 시편의 제작과정은 KSF 2401 및 2405 규정을 따랐다. 폴리머의 조성 및 경화콘크리트의 물성이 일축 압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 슬럼프를 7.5 ± 1 cm로 고정시키고 W/C를 40%, 50%, 60%로 변화시키면서 ϕ 15cmx30cm

원주형시편을 제작하였으며, 휨실험을 하기 위하여 20 개의 15cmx15cmx55cm의 휨시편을 제작하였다.

실험시편의 배합설계 예는 표 1에 제시된 바와 같다.

표 1 실험시편의 배합설계 예

W/C(%)	C(kg/m ³)	S(kg/m ³)	G(kg/m ³)
50	400	878	809

(G_{max}=10mm, 슬럼프 7.5cm, s/a=52%)

(2) 폴리머침투제의 침투 및 중합공정

침투기법으로는 함침기법(Surface-drying and Monomer-ponding Technique)을 적용하였다. 이 기법은 시편을 증량평형이 될 때까지 건조시킨 후, 함침용수조를 이용하여 콘크리트의 모세공극으로 침투제를 완전 침투시키는 방법이다. 폴리머침투깊이(cm)는 단량체의 종류 및 경화 콘크리트의 물성에 따라 상이하나, 일반적으로 MMA의 경우 $0.15\sqrt{\text{함침시간(분)}}$ 으로 추정된다. 중합공정은 열촉매중합법을 적용하였으며, 전기건조로 내에서 80-100°C의 열을 가하여 중합 개시제에 의한 단량체의 자유라디칼 연쇄중합반응을 유도하였다. 그림 2는 함침기법에 의한 폴리머침투콘크리트의 제조공정을 체계적으로 나타낸 것이며, 그림 3은 실험에 사용된 폴리머침투제의 함침수조를 도시한 것이다.

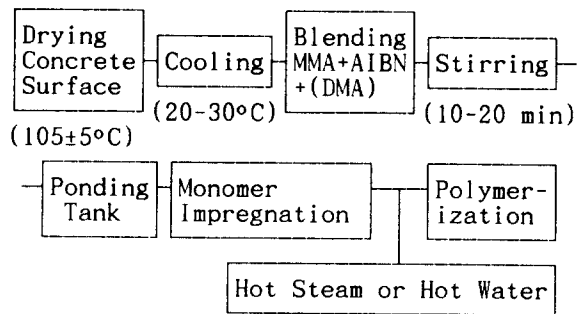


그림 2 함침기법에 의한 폴리머침투 콘크리트의 제조과정

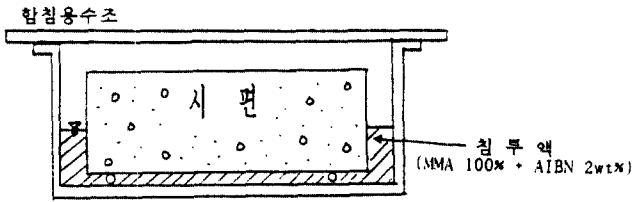
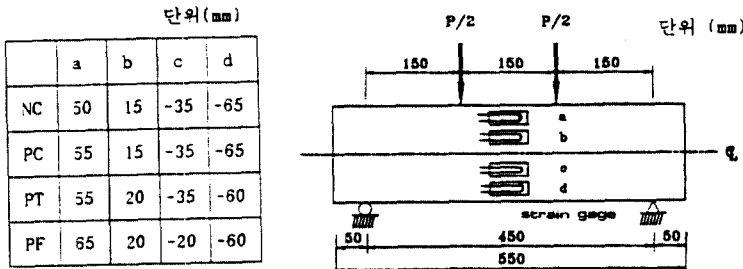


그림 3 함침수조

3.2 하중재하장치

폴리머침투콘크리트 원주형공시체의 일축압축강도 및 할렬인장강도시험은 200ton의 하중재하능력을 가진 만능시험기를 이용하여 하였으며, 모형보의 단조재하실험은 변위제어가 가능한 피로시험기(Instron 모델 1333)를 사용하여 3등분재하법(4-point bending)으로 하중을 재하하였다. 그림 4는 힘시험편에 부착한 변형률게이지의 부착 위치를 나타낸 것이다.



- * NC : 보통콘크리트
- * PC : 압축부폴리머침투콘크리트
- * PT : 인장부폴리머침투콘크리트
- * PF : 완전폴리머침투콘크리트

그림 4 변형률게이지의 부착위치

4. 폴리머침투콘크리트의 유한요소해석을 위한 대상구조 및 해석조건

유한요소해석에 사용된 모형은 지간의 1/3 지점에 하중이 가해지는 단순지지된 보이다. 표 2는 폴리머침투콘크리트 및 보통콘크리트 보의 유한요소해석에 사용된 재료특성을 나타낸 것이며, 그림 5는 모형보의 절점 및 요소번호를 나타낸 것이다.

표 2 수치해석을 위한 모형보의 재료특성

구분	폴리머 침투콘크리트	보통콘크리트
단면	15cm x 15cm	15cm x 15cm
지간	45 cm	45 cm
*폴리머 침투율(P)	4.58 %	0 %
압축강도	469.3 kg/cm ²	210 kg/cm ²
인장강도	82.1 kg/cm ²	29.0 kg/cm ²
탄성계수	285956.0 (kg/cm ²)	217370.7 (kg/cm ²)
압축 변형률	0.0028	0.0022
인장 변형률	287.3 x 10 ⁻⁶	133.4 x 10 ⁻⁶
포아손비	0.30	0.17

$$* P(\%) = \frac{W_p - W_n}{W_n} \times 100$$

여기서,

- Wp : 폴리머침투후콘크리트의 건조중량
- Wn : 폴리머침투전콘크리트의 건조중량

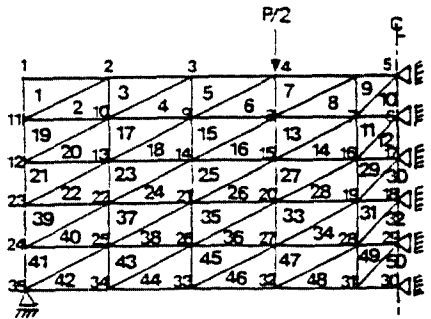


그림 5 모형보의 절점번호 및 요소번호

5. 실험결과 및 분석

5.1 구성재료의 압축강도 및 휨강도

표 3 및 4는 폴리머침투콘크리트와 보통콘크리트에 대한 강도실험 결과이다.

표 3 폴리머침투콘크리트
및 보통콘크리트 강도실험결과
(단위:kg/cm²)

	폴리머침투 콘크리트(σ_{pic})	보통콘크리트 (σ_{nor})
압축 강도	466	220
	484	215
	475	209
평균치	475	214
$\sigma_{pic}/\sigma_{nor}$	2.22	

표 4 폴리머침투콘크리트 및
보통콘크리트보의 실험강도

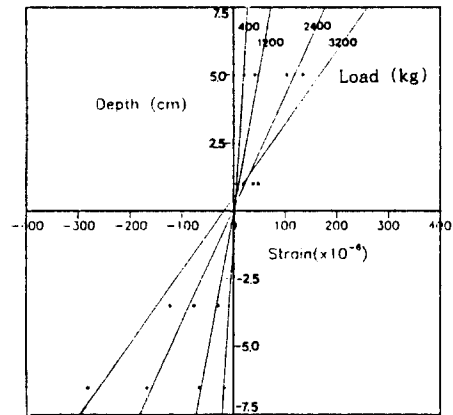
시 편	번호	극한하중 (kg)	계산응력 (kg/cm ²)
Control Concrete (NC)	# 1	3450.7	46.01
	# 2	3401.0	45.35
	# 3	3455.3	46.07
하중평균 (kg)		3435.6	
응력평균(kg/cm ²)		45.81	
PIC (PF)	#PF1	6900.0	92.0
	#PF2	7010.5	93.47
	#PF3	6950.4	92.67
하중평균 (kg)		6953.6	
응력평균(kg/cm ²)		92.71	
PIC (PC)	#PC1	3500.0	46.67
	#PC2	3204.2	42.72
	#PC3	3894.4	51.92
하중평균 (kg)		3532.9	
응력평균(kg/cm ²)		47.10	
PIC (PT)	#PT1	7583.3	101.11
	#PT2	7437.5	99.17
	#PT3	7553.5	100.71
하중평균 (kg)		7524.8	
응력평균(kg/cm ²)		100.33	

- * NC : 보통콘크리트
- * PF : 완전침투 폴리머 콘크리트
- * PC : 압축부 침투폴리머 콘크리트
- * PT : 인장부 침투폴리머 콘크리트

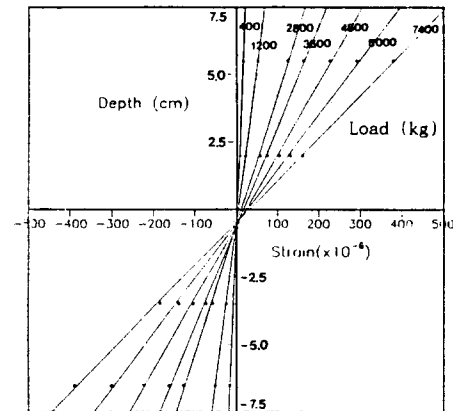
표 3에서 폴리머침투콘크리트가 보통콘크리트에 비해 강도가 약 2배정도 증가됨을 알 수 있다. 또한, 표 4의 휨실험 결과에 의하면 폴리머침투콘크리트 휨시편이 보통콘크리트 휨시편에 비해 강도와 연성이 증가함을 알 수 있다.

5.2 폴리머침투콘크리트 휨부재의 변형률 변화도

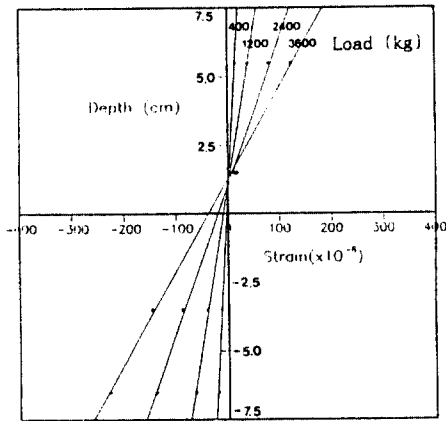
그림 6은 부분 폴리머침투콘크리트 보에서 실측된 하중단계별 중립축의 변화를 도시한 것이다.



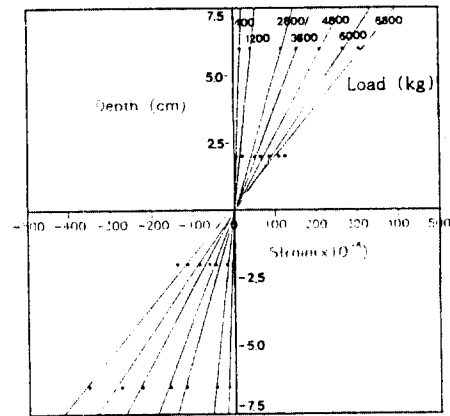
(a) 보통콘크리트의 중립축변화



(b) 폴리머콘크리트의 중립축변화
(인장부침투)



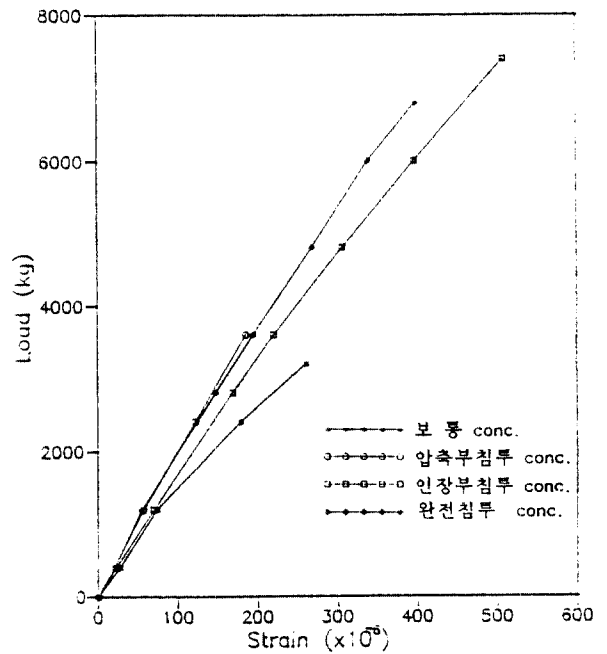
(c) 폴리머콘크리트의 중립축변화 (압축부침투)



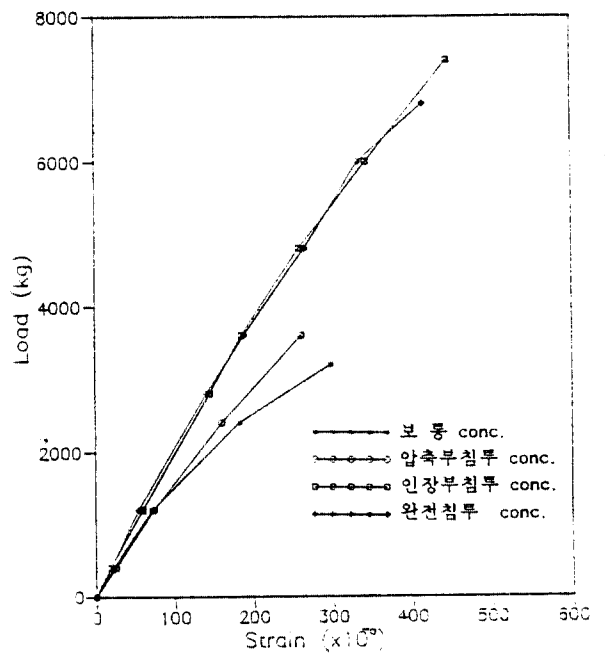
(d) 폴리머콘크리트의 중립축변화 (완전침투)

그림 6 각시편의 중립축 변화도

그림 6에 의하면 부분적으로 폴리머를 침투시키더라도 콘크리트의 강성차이가 발생하여 중립축의 변화가 발생함을 알 수 있다. 특히, 하중증가에 따른 중립축의 이동이 폴리머침투콘크리트 보의 경우보다 보통 콘크리트 보에서 더욱 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 하중조건하에서 보통콘크리트의 변형률이 폴리머침투콘크리트의 변형률 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 7은 모형보의 하중-압축연단 변형률 및 하중-인장연단 변형률 관계를 나타낸 것이다.



(a) 하중-압축연단 변형률도



(b) 하중-인장연단 변형률도

그림 8 하중-변형률 관계도

그림 8 에서와 같이 폴리머침투콘크리트 보의 인장 및 압축변형률이 보통콘크리트 보의 경우보다 증가함을 알 수 있으며, 인

장부침투폴리머콘크리트 보가 완전폴리머침투콘크리트 보의 경우보다 인장 및 압축변형률이 증가함을 알 수 있다. 이는 동일한 응력을 받는 경우 폴리머가 침투되지 않은 부분의 압축과 인장변형률이 폴리머침투부의 압축 및 인장변형률보다 크음을 보여주며, 이것으로 부터 폴리머침투콘크리트는 보통콘크리트에 비해 강성이 크고 취성재료임을 의미한다. 또한 압축부침투폴리머콘크리트의 압축변형률은 파괴하중까지 폴리머침투콘크리트의 거동을 나타내며, 인장변형률은 보통콘크리트의 거동과 유사한 경향을 보인다.

5.3 수치해석 및 실험결과의 비교분석

그림 9, 10, 11, 및 12는 정적하중을 받는 보통콘크리트 및 폴리머침투콘크리트 보의 중앙부변위를 실측하고, 그 평균치를 본 연구의 해석결과와 비교한 것이다.

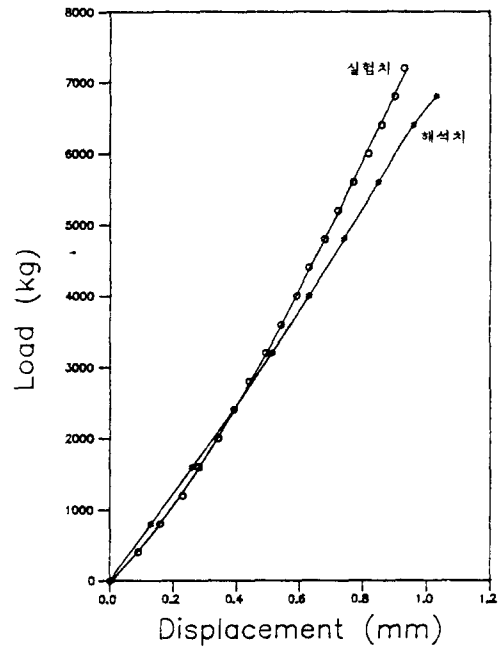


그림 10 폴리머침투콘크리트 보의 중앙부에서의 실측 및 해석결과(인장부침투)

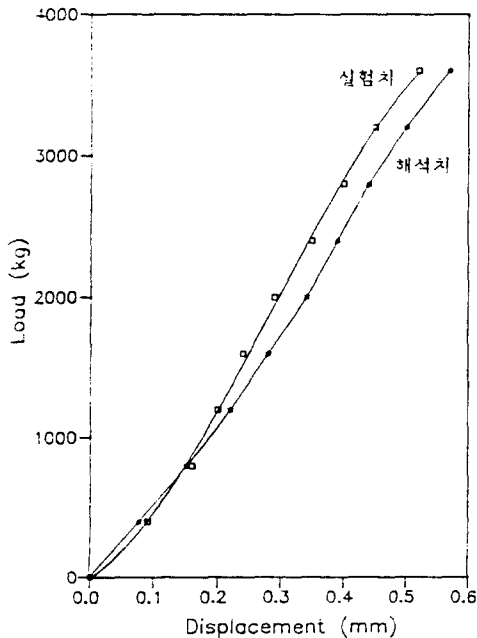


그림 9 보통콘크리트 보의 중앙부에서의 실측 및 해석결과

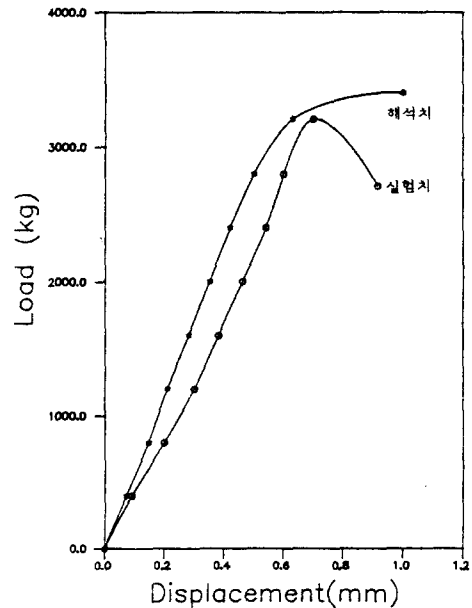


그림 11 폴리머침투콘크리트 보의 중앙부에서의 실측 및 해석결과(압축부침투)

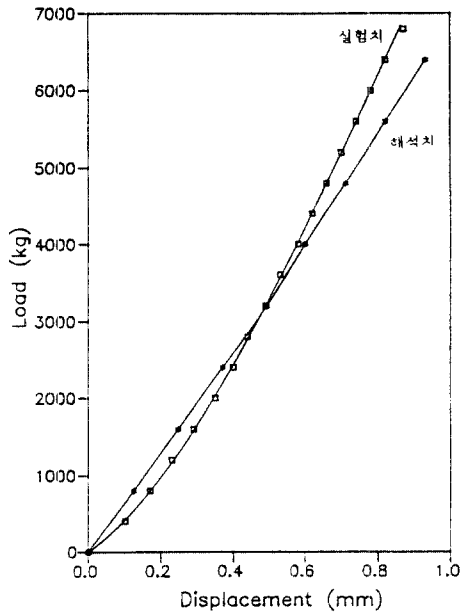


그림 12 폴리머침투콘크리트 보의 중앙부에서의 실측 및 해석결과(완전침투)

그림에서 알 수 있듯이 본 연구의 해석결과는 실험결과의 파괴하중상태에 이르는 실측변위거동을 비교적 잘 따르고 있음을 보여주나, 해석치에 비해 실측치가 비선형성을 보이는 것은 해석과정상 인장응력을 선형으로 간주하고, 포아슨 비의 변화영향을 고려하지 않은데 있다고 분석된다. 또한, 폴리머침투콘크리트의 강도에 큰 영향을 끼치는 폴리머침투분포형상이 해석과정시 고려되지 못하는 것도 해석치와 실험치의 차이를 나타낸다고 분석된다. 그리고, 본 연구의 실험을 통해 압축부폴리머침투콘크리트의 경우 최대하중의 18.18% 낮은 2711.3 kg에서 파괴가 발생하므로 하중의 하강곡선을 얻을 수 있었으나, 해석치는 중분하중의 영향으로 극한하중 이후, 하강부의 인장연화거동의 평가를 수행하지 못하였다.

6. 결론

본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 인장부 및 완전폴리머침투콘크리트가 보통콘크리트에 비해 압축강도와 휨강도가

약 2배정도 증가하고, 압축 및 인장변형률이 크게 증가함을 알 수 있다.

(2) 인장부폴리머침투콘크리트 보와 완전폴리머침투콘크리트 보의 휨거동은 유사한 경향을 보이며, 파괴하중 및 처짐이 보통콘크리트 보에 비해 크게 증가함을 알 수 있다.

(3) 각 시편의 중립축의 위치가 보통콘크리트 및 폴리머완전침투 보는 중앙에서부터 중립축이 형성되어 변형이 발생됨을 알 수 있으며, 압축 및 인장부에 폴리머를 침투시킨 경우는 각각 중립축이 폴리머침투부 쪽으로 이동하여 변형이 발생됨을 알 수 있었다. 따라서 이결과로부터 폴리머침투시 합성단면이론이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

(4) 폴리머침투콘크리트 보의 실험결과를 동일조건하에서 본 연구의 모형보실험결과와 비교하여 본 연구의 비선형해석 알고리즘과 해석프로그램의 타당성을 검증하였다. 즉 본 연구의 해석 프로그램을 이용하여 단조하중을 받는 폴리머침투콘크리트 보의 부재강도 및 재하단계별 변형과 강성도 변화를 비교적 정확하게 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Dikeou, J., Cowan, W., DePuy, G., et al., Concrete-Polymer Materials, Fourth Topical Report, BNL 50328, REC-ERC 72-1, 1972, pp.1-114.
- (2) 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, ICPIC, China, 1990, pp.765-772.
- (3) Phinyawat, P., "Flexural Behavior of Reinforced Polymer-Impregnated Beam", Ph. D. dissertation, The University of Texas at Austin, Dec., 1977, p.249.