

RC 구조물 보강을 위한 고성능 폴리우레아의 개발 및 적용성 평가

Development and Applicability Evaluation of High Performance Poly-urea for RC Construction Reinforcement

김성배* · 김장호** · 최홍식*** · 허 권****

Kim, Sung Bae · Kim, Jang-Ho Jay · Choi, Hong-Shick · Heo, Gweon

Abstract

Generally, poly-urea is widely used as waterproof coating material due to its superior adhesiveness, elongation capacity, and permeability resistance. In addition, it can be quickly and easily applied on structure surfaces using spray application. Since it hardens in about 30 seconds after application, its construction efficiency is very high and its usage as a special functional material is also excellent. However, currently, poly-urea is mostly used as waterproof coating material and the researches on its usage as a retrofitting material is lacking at best. Therefore, basic studies on the use of poly-urea as a general structural retrofitting material are needed urgently. The objective of this study is to develop most optimum poly-urea composition for structure retrofitting purpose. Moreover, the structural strengthening capacity of the developed poly-urea is evaluated through flexural capacity experiments on RC beams and RC slabs. From the results of the flexural test of poly-urea strengthened RC beam and slab specimens, the poly-urea and concrete specimen showed monolithic behavior where ductility and ultimate strength of the poly-urea strengthened specimen showed slight increase. However, the doubly reinforced specimens with FRP sheet and poly-urea showed lower capacity than that of the specimen reinforced only with FRP sheet.

Keywords : poly-urea, RC beam, slab, flexural capacity, FRP sheet

요 지

일반적으로 폴리우레아는 부착성능, 신장률, 투수 저항성이 매우 높아서 구조물의 방수 코팅재료로 많이 사용되고 있다. 또한, 스프레이건을 이용하여 쉽고 빠르게 작업이 가능하며, 약 30초 이내에 경화가 되기 때문에 시공성도 매우 뛰어나 우수한 기능성 재료로 각광받고 있다. 그러나, 건설산업에서 폴리우레아는 대부분이 방수코팅재료로 사용되고 있으며, 구조물의 성능을 향상시키는 보강재로 사용하기 위한 연구는 전무하다. 따라서, 본 연구는 폴리우레아를 일반 구조물의 보강재로 사용하기 위한 기초적인 연구로 폴리우레아의 구성성분의 변화에 따른 영향을 파악하고자 한다. 또한, 개발된 폴리우레아의 구조 보강성능을 확인하기 위하여, RC 보와 슬래브를 제작하여 휨 성능 실험을 수행하였다. 실험 결과, 폴리우레아는 콘크리트 시험체와 일체거동을 보이며, 연성과 강성이 상승하는 것으로 나타났다. 그러나, 섬유시트와 폴리우레아로 2중 보강한 시편은 오히려 섬유시트만으로 보강한 시편보다 낮은 성능을 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 폴리우레아, RC 보, 슬래브, 휨 성능, 섬유시트

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물은 요구 성능이나 손상형태에 따라 아주 다양한 보수방법이 존재한다. 특히, FRP를 활용한 보수보강 공법에 적용되는 FRP는 부식 저항성이 뛰어나며, 높은 절연성, 피로저항성을 유지하고 콘크리트의 연성증진에 있어 타 재료에 비해 우수하여 많이 각광받고 있다(ACI Committee 440, 2006; ACI Committee 440, 1996, Santoh,

1993). FRP를 이용한 보강공법은 에폭시 등의 접착제를 사용하여 보강재를 모재와 일체화시킴으로써 강도 및 강성을 증진시키는 공법적 특성을 지니고 있어 제반 구성요소(바탕 처리재, 프라이머, 함침제, 접착제)와 콘크리트 모재와의 부착성능에 따라 보강공법의 성능이 결정되며, 표면처리나 프라이머, 접착제 등의 공정이 복잡하고 건조시간이 길어 시공성이 떨어지게 된다. 이러한 접착제는 불필요한 계면을 만들고, 시간의 경과에 따라 열화, 탈락 등의 문제가 발생하여

*정회원 · 연세대학교 토목공학과 BK 박사후 연구원 · 공학박사 (E-mail : sztk77@yonsei.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 · 공학박사 (E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr)

***정회원 · 충청대학 건설교통과 교수 · 공학박사 (E-mail : choih@ok.ac.kr)

****충청대학 실용소재과 교수 · 공학박사 (E-mail : hero@ok.ac.kr)

보수보강 성능을 저하시킨다. 따라서, 이러한 문제를 근본적으로 해결할 수 있도록 구조물과 보수재료에 존재하는 계면을 제거하고 일체거동을 유도할 수 있는 획기적인 재료가 필요하다.

폴리우레아(poly-urea)는 우레탄 계열의 고분자 화합물로서, 광범위한 물성의 조절이 가능할 뿐 아니라(Hepburn, 1992; 이선숙 등, 2006), 뛰어난 계면접착성과 기계적 물성 등으로 인해 접착제, 코팅제 등을 포함한 각종 바인더형 복합재료로 폭넓게 사용되고 있으며, 철, 나무, 유리, 스티로폼, 콘크리트, 종이, 섬유 등 고체를 유지하는 모든 형태의 표면에 도포가 가능한 재료이다(Vertel, 1993; 김선미 등, 2005). 최근에는 폴리우레아가 가진 내강도성과 뛰어난 유연성 때문에 평판 디스플레이용 바인더재료와 같은 미세전자소자 등으로 그 적용분야가 확대되고 있다. 그러나 건설 분야에서는 대부분 지하 콘크리트 구조물의 방수코팅제로 제한적으로 사용되고 있다(오상근 등, 2002). 일각에서는 폴리우레아의 높은 연성과 부착성능으로 인하여 폭발이나 충격에 대해 효과적으로 저항하여 구조물과 인명피해를 최소화 할 수 있으며, 콘크리트 구조물의 보강에 FRP보다 우수한 성능을 발휘한다는 연구결과가 보고된바 있다(Davidson *et al.*, 2004; Buchan *et al.*, 2007). 따라서, 급속시공이 가능하면서도 2차적인 계면을 생성시키지 않는 고인성·고부착성 보강재료로 사용할 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 고성능 폴리우레아를 일반 구조물의 보수·보강재료로 사용하기 위한 기초적인 연구로 폴리우레아의 기본 구성물질의 변화에 따른 영향을 파악하고 폴리우레아를 RC 보와 슬래브에 적용하여 보강성능을 확인하고자 한다.

2. 고성능 폴리우레아의 개발

고인성, 고연성, 고부착력을 갖는 폴리우레아에 관한 연구에서는 부착성능을 강화시키면서 고강도의 피막제를 유지하기 위한 것으로 표면 처리된 시험체 표면에 폴리우레아가 미세한 틈새까지 확산되어 부착되도록 반응시간을 조절할 수 있도록 재료를 구성하였다. 폴리우레아는 열경화성 수지이므로 온도의 조절로 반응시간을 조절할 수 있을 것으로 예상할 수도 있지만 온도의 조절에 의해서는 표면 처리된 시험체 표면의 미세부분까지 동시에 경화를 유도할 수 없어서 경화된 후 부착 강도가 많이 저하되는 요인이 됨을 관찰할 수 있다. 일반적으로 폴리우레아의 제조에 사용되는 주체와 경화제는 그 종류가 매우 다양하고 주체와 경화제가 균일하게 혼합된 상태라고 하더라도 미시적 관점에서 균일한 반응이 진행되는 것은 매우 어려운 것으로 보였다. 따라서 본 연구에서는 기존의 폴리우레아에 비하여 초기 반응성은 다소 떨어지지만 중합 반응 시 합성 중합반응이 거의 동시에 진행되면서 미세한 부분의 미세기포가 형성되지 않도록 물질을 구성하였다.

2.1 구성 성분과 반응 메커니즘

본 연구에서는 균일한 반응성을 갖도록 하기위해 반응 단계를 2단계로 진행하며 반응하는 동안 용매는 사용하지 않는다. 반응시키는 방법은 주체(prepolymer)와 경화제(시슬화

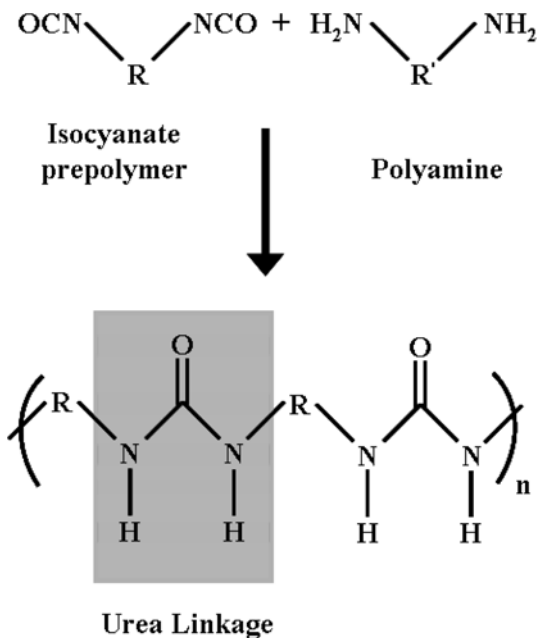


Fig. 1 Reaction mechanism of poly-urea

장자)를 60~90°C로 가열한 상태에서 고압분사장치를 이용하여 각각 분사하여 혼합되도록 한다. 표면처리된 피사체는 수분이나 이물질이 제거되어 있어야하며 표면에 분사하여 코팅한다. 이때 이들 코팅제가 응고되어 형태를 갖추는데 약 5~30초 사이에 이루어지며 이들 물질이 충분히 반응하여 거의 완전한 반응물을 형성하는 데는 상온에서 약 1~10일 정도 소요된다. 폴리우레아의 화학반응은 Fig. 1과 같고, 이때 사용되는 주체와 경화제에 대해서는 다음과 같이 제조된다.

주체(prepolymer)는 이소시아네이트(isocyanate)와 다이올(diols)의 반응으로 형성되며, 이소시아네이트는 지방족 디이소시아네이트(diisocyanate)나 방향족 디이소시아네이트 모두 사용될 수 있다. 본 연구에 기본적으로 사용되는 디이소시아네이트는 메틸렌 디페닐 디이소시아네이트(methylene diphenyl diisocyanate, MDI)이다. MDI를 사용하면 톨루엔 디이소시아네이트(toluen diisocyanate, TDI)를 사용할 때에 비하여 반응성도 크고 합성된 폴리우레아의 품질이 대단히 양호하게 된다. 앞에서 언급하였지만 지방족 디이소시아네이트와 방향족 디이소시아네이트를 혼합하여 사용할 수 있고 혼합되어 사용된 경우 혼합 양에 따라 차이는 있으나 황변 현상이 방향족 디이소시아네이트만 사용할 때보다 발생하는 경우가 적다. 따라서 지방족 디이소시아네이트가 실외의 구조물에 도포 재료로 사용될 때는 방향족 디이소시아네이트보다 더 많이 사용될 수 있다. 방향족 디이소시아네이트만을 사용할 때는 빛에 대한 안정성을 높이기 위하여 가수분해 반응 억제제나 열분해 반응 억제제 또는 자외선 차단제 등을 사용하여야 한다. 결과적으로 방향족 및 지방족 디이소시아네이트가 각각 단독으로 사용되거나 또는 2가지 이상 혼합되어 사용될 수도 있으나 이들 물질이 본 연구의 주체(prepolymer)로 사용된다.

본 연구에 사용된 경화제는 아민 화합물로 폴리옥시프로필렌디아민(polyoxypropylenediamine)과 폴리에테르트리아민(polyethertriamine), 디에틸레이트 톨루엔트리아민(diethylated-toluenetriamines, DETDA), 그리고 2차 아민(secondary amine)

의 혼합물을 사용하여 구성하였다.

본 연구에 사용된 방향족 2차 아민은 반응 속도가 1차 아민에 비하여 느려 부착 강도 증진에 탁월한 효과가 있으며 소포제의 사용 없이도 고강도의 부착력을 발휘할 것으로 기대된다. 또한 폴리머 형성 과정에서 미세한 공극을 감소시키고 부착 표면에 대한 부착력을 증가시키기 위하여 소포제의 성질을 갖는 물질을 혼용하여 사용한다. 이때 사용되는 양은 일반적으로 중량비의 2% 미만으로 제한하는데, 사용되는 소포제의 양이 증가할수록 부착 강도가 급격히 떨어지기 때문이다. 한편 주제의 형성 과정에서 프리폴리머의 점도가 높아질 수 있고 반응이 쉽게 진행되어 안정성이 떨어질 수 있으므로 안정제를 주제에 혼합하여 사용한다. 또한 빛에 대한 안정성을 높이기 위해 기본적으로 경화제에 UV 차단제(UV sorbent)와 무기질 안료(pigment)를 혼합 사용하도록 구성하였다.

2.2 사전배합실험

본 연구에서는 폴리우레아의 성능을 확인하기 위하여 Table 1에 나타낸 것과 같은 구성물을 가지고 주제(prepolymer)와 경화제(hardener)의 구성성분의 조성비를 변화시켜 가면서 구성성분이 폴리우레아의 성능에 미치는 영향을 확인하여 보았다. 먼저 주제의 합성은 MDI를 70%, 폴리옥시프로필렌 글리콜을 20%, 안정제 및 점도 강하제로 사용되는 프로필렌 카보네이트(propylenecarbonate)를 10% 사용하여 합성하였다. 경화제는 폴리옥시프로필렌디아민 40%, DETDA 10%, 2차 아민 2%, 폴리프로필렌 글리콜 2%, 무기질 안료 2% 이내,

Table 1. Composite of prepolymer and hardener

Material	Component	Weight (%)
Prepolymer	Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) 70%	70
	Polyoxypropylene glycol 20%	20
	Propylenecarbonate 10%	10
Hardener	Polyoxypropylenediamine	30~40
	Polyethertriamine	10~20
	Diethylated-toluenetriamines(DETDA)	5
	Secondary amine	20~30
	Propylene glycol	2
	Pigment	2
	UV sorbent	under 2
	γ -glycidoxypolytrimethoxysilane	1

Table 2. Determination procedures of optimum mix proportion

Case	without γ -glycidoxypolytrimethoxysilane					with γ -glycidoxypolytrimethoxysilane				
	Drying time (sec)	Adhesive strength (MPa)	Shore hardness (D)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Drying time (sec)	Adhesive strength (MPa)	Shore hardness (D)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1	5	8.3	67	22	221	10	13.8	67	24	288
2	10	8.3	67	25	221	15	13.8	67	25	221
3	40	9.0	67	24	221	40	13.8	68	26	200
4	30	9.0	65	23	310	30	13.8	65	24	310
5	20	8.3	70	26	265	20	13.8	70	28	265

UV 흡착제 2%미만으로 혼합하여 폴리우레아를 제조하였다.

실험 결과, 일정 수준의 부착력과 인장강도가 확보되나 건조 시간이 5초로 매우 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다. 2단계에서는 경화제는 고정시키고 주제의 디이소시아네이트를 지방족 디이소시아네이트 40%와 MDI를 30%로 혼합한 결과 경화시간이 10초로 늦어지는 것을 알 수 있었다. 그러나 신장률이 낮게 형성되는 것을 알 수 있다. 3단계에서는 1단계의 배합에서 2차 아민의 혼합량을 30%로 증가시키고 폴리옥시프로필렌디아민을 30%로 감소하여 실험하였다. 건조경화 시간이 40초로 매우 느리게 반응하는 것을 알 수 있으며, 부착강도가 증가하였다. 4단계에서는 3단계와 거의 동일하나 폴리에테르트리아민을 고분자량으로 사용하였다. 건조시간은 부착강도가 발현하기 적절한 30초 내외로 형성되었으며, 신장률이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 5단계에서는 3단계 배합에서 폴리에테르트리아민을 고분자량 10%와 저분자량 20%로 혼합하여 사용한 결과, 건조시간이 빨라져 부착강도가 저하되었다. 따라서, 부착강도가 유지되며 건조시간이 빠르게 진행되는 4단계의 배합이 가장 높은 성능을 보이는 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발하고자 하는 폴리우레아는 반응 속도에 대한 요소가 매우 중요하다. 이러한 이유는 피착체에 폴리우레아가 피착될 때 반응 속도에 따라 부착력의 차이가 많이 발생하는데 반응 속도가 빠르게 되면 피착체의 공극에 충분히 채워지기 전에 반응이 종결되어 공극이 기포로 존재할 가능성이 있다. 즉, 충분히 고반되어 반응이 진행되는 동안 서서히 공극을 채워줄 수 있도록 반응 속도가 조절되어야 최대의 부착력을 가질 수 있는 것이다. 이러한 공극의 생성을 최대한 억제하기 위하여 본 연구에서는 실란계 소포제(γ -glycidoxypolytrimethoxysilane)를 1%사용하였다. Table 2의 실험결과에서와 같이 소포제를 사용하였을 경우, 사용하지 않은 경우에 비해 60%이상의 부착력이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 개발하는 폴리우레아는 소포제를 혼합하여 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

3. 고인성 폴리우레아의 구조성능시험

본 연구에서는 고인성의 폴리우레아를 콘크리트 구조물의 보강재료로 사용하기 위한 성능 검증을 실시하기 위하여, 보와 슬래브를 대상으로 휨 성능 실험을 실시하였다.

3.1 실험계획

본 연구에서는 고성능 폴리우레아의 보강성능에 따른 거동

Table 3. Composition of test specimens

Type	Series	Specimen	Retrofitted materials		Retrofitted procedure
			Fiber sheet	Poly-urea	
Beam	PU	Control	-	-	Concrete
		PU		5 mm	ConcretePoly-urea 5 mm
	FRP	FRP	Carbon fiber sheet 1 layer	-	ConcreteCarbon fiber sheet
		FRP+PU		3 mm	ConcreteCarbon fiber sheetPoly-urea 5 mm
Slab	PU	Control	-	-	Concrete
		PU3		3 mm	ConcretePoly-urea 3 mm
		PU5		5 mm	ConcretePoly-urea 5 mm
	GF	GF	Glass fiber sheet 1 layer	-	ConcreteGlass fiber sheet
		GFP+PU3		3 mm	ConcreteGlass fiber sheetPoly-urea 3 mm
		GF+PU5		5 mm	ConcreteGlass fiber sheetPoly-urea 5 mm
	CF	CF	Carbon fiber sheet 1 layer	-	ConcreteCarbon fiber sheet
		CF+PU3		3 mm	ConcreteCarbon fiber sheetPoly-urea 3 mm
		CF+PU5		5 mm	ConcreteCarbon fiber sheetPoly-urea 5 mm

Table 4. Material properties of retrofitted materials

Materials	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)	Thermal expansion coefficient (1/°C)
Poly-urea	20	0.06	310	$10\sim 20 \times 10^{-6}$
Carbon fiber sheet	876	72.4	1.2	8.6×10^{-6}
Glass fiber sheet	560	25.2	1.9	6.6×10^{-6}

Table 5. Dimension of specimens

Type	Dimension	Compressive strength (MPa)	Reinforcement			Spacing of stirrup (mm)
	H×B×L(mm)		Tension	Compression	Stirrup	
Beam	250×150×2200	50	HD22	HD16	HD10	100
Slab	150×1000×2000	40	HD13	HD13	-	-

을 파악하기 위하여 Table 3과 같이 시험체를 계획하였다. 시험체는 보와 슬래브를 대상으로 하였으며, 보 시험체는 총 4개, 슬래브 시험체는 총 9개로 제작하였다. 기준이 되는 무보강 시험체(Control)와 시험체 하부에 폴리아우레아를 두께(3 mm, 5 mm)에 따라 분사 도포한 시험체(PU), 섬유시트(Carbon fiber sheet, Glass fiber sheet)를 전단면에 부착한 시험체, 그리고 섬유시트와 폴리아우레아를 같이 적용한 시험체로 구성하였으며, 실험에 사용된 보강재료의 기본 물성은

Table 4에 나타내었다.

3.2 시험체 제작 및 실험방법

본 연구에 사용된 RC 보는 주철근으로 D22 철근을 사용하였으며, 전단보강철근은 D10 철근을 100 mm 간격으로 배근하여 제작하였다. RC 슬래브는 상하부 모두 HD13 철근을 사용하여 제작하였다. RC 시험체의 단면형상 및 배근형태는 Fig. 2와 Table 5에 나타내었다. 구조성능 실험은 2

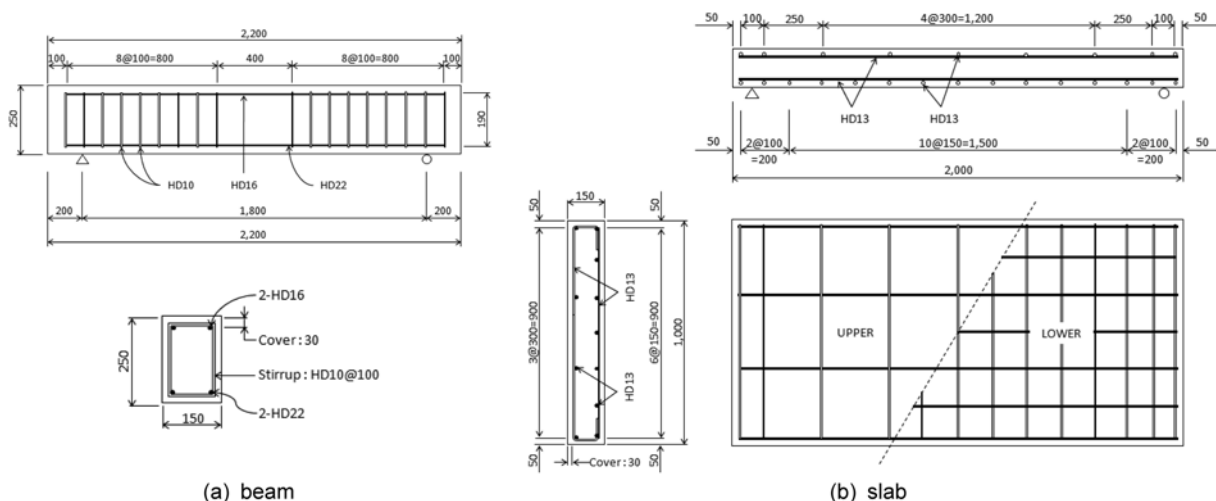


Fig. 2 Dimension and details of test specimen

000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 3점 휨 실험을 하였으며, 슬래브는 휨 성능을 평가하기 위해 선하중을 재하하였다. 하중은 보의 중앙점에서 0.02 mm/sec의 속도로 변위제어를 실시하여 구조물이 파괴될 때까지 실험을 수행하였다. 시험체의 거동을 확인하기 위하여 보 중앙 최대 모멘트 지점인 중앙부 하부의 인장철근에 철근용 변형률 게이지를 부착하였고, 콘크리트의 응력을 측정하기 위하여 콘크리트 상부에 콘크리트용 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 또한, 시험체의 하부에 부착한 섬유시트와 폴리우레아의 변형률은 복합 변형률 게이지를 부착하여 측정하였으며, LVDT를 사용하여 중앙점에서의 처짐을 측정하였다.

3.3 폴리우레아의 도포

폴리우레아는 주재와 경화제를 60~90°C로 가열한 상태에서 고압분사장치(스프레이건)를 이용하여 각각 분사도포하여 혼합되도록 하며, 폴리우레아의 경화 시간은 전·후의 짧은 시간 내에 경화가 되어 탄성피막체를 형성하게 된다. 그러나 숙련된 기술자에 의해서만 도포가 가능하며 일정한 두께로 도포하기가 매우 어려운 단점이 있다. Fig. 3은 숙련된 기술자에 의해 콘크리트 시편에 폴리우레아를 분사하는 장면이며, Fig. 4는 섬유시트와 폴리우레아로 보강되는 구조물의 보강재 구성을 보여주고 있다.

3.4 RC 보 시험체의 결과 및 분석

3.4.1 하중-변위 관계

Fig. 5의 RC 보에 대한 하중-변위 관계로 부터 기준시험체(Control)의 극한강도는 149.6 kN으로 가장 낮은 휨 강도를 보이고 있다. 폴리우레아로 보강된 시편(PU)은 기준시험체와 비교하여 극한강도와 파괴강도가 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나, 최대 변위는 기준시험체와 PU 시험체가 각각 53.11 mm와 61.42 mm로 PU 시험체의 변위가 더 크게 발생하여 연성증가에 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 섬유시트로 보강한 시편(FRP)은 기준시험체에 비해 최대 112%의 강성증가를 보이고 있다. 그러나, 초기균열 강도는 30 kN 전·후로, 초기균열 강도에 대한 섬유시트와 PU의 보강효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 섬유시트와 폴리우레아로 보강된 콘크리트의 하중-변위 관계 특성은 초기균열

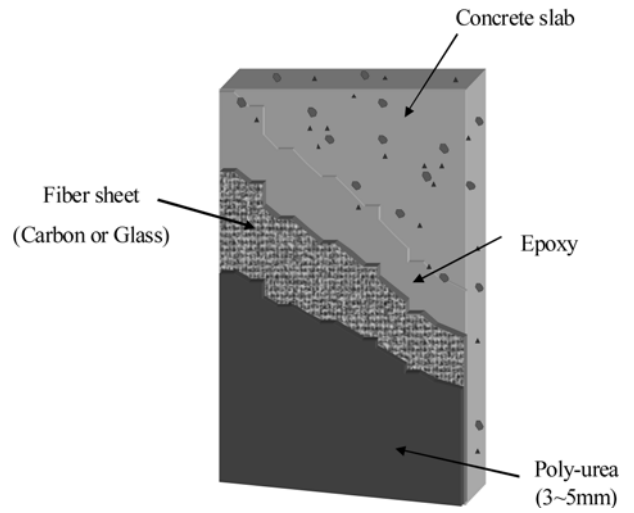


Fig. 4 Composite retrofitted with fiber sheet and poly-urea

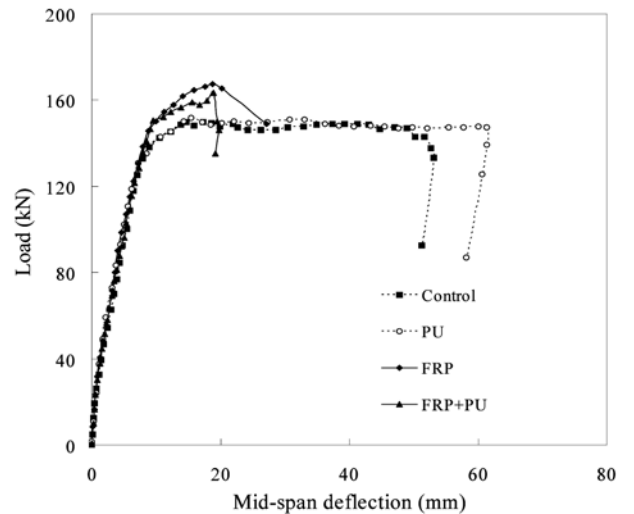


Fig. 5 Load-deflection of beam test

이 발생하기 전까지는 무보강 시편인 기준시험체와 거의 유사한 거동을 보이고 있다. 인장철근의 항복 이후에는 탄소섬유시트로 보강된 시편이 기준시험체나 PU 시편보다 강성이 증가하였으며 극한상태에 도달 할수록 이러한 경향은 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나, Fig. 4와 같이 섬유시트와 PU를 조합하여 보강한 시편(FRP+PU)은 항복이후 오히려 강성이 저하되는 것으로 나타났다. RC 보의 시험결과는 Table 6에

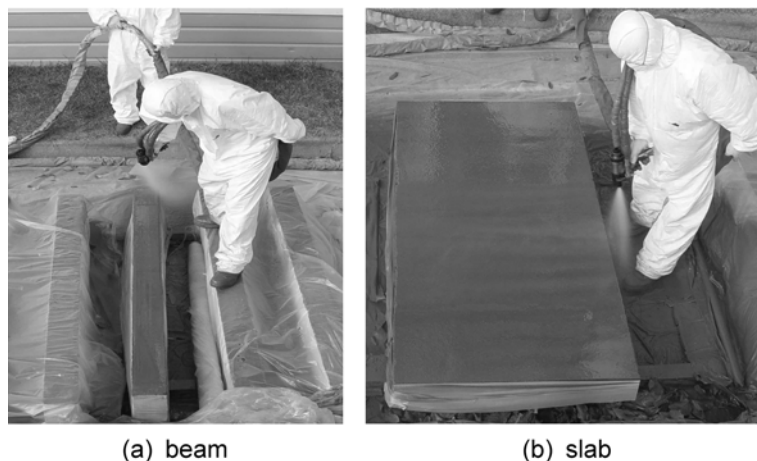
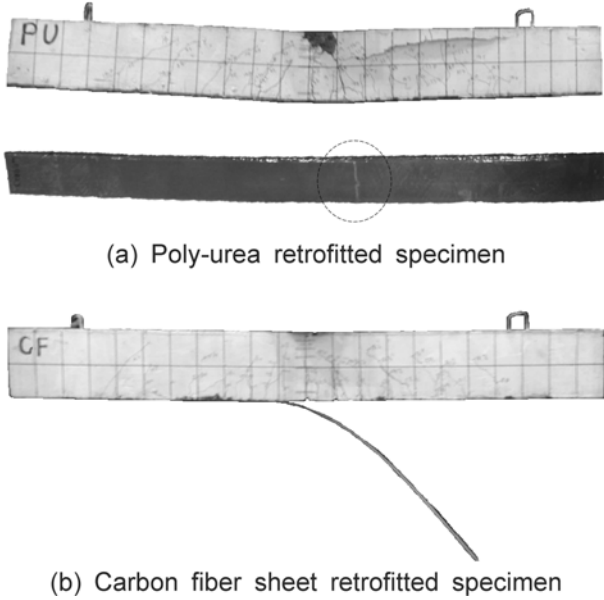


Fig. 3 Application of poly-urea on specimens by a skilled laborer

Table 6. Summary of beam test results

Type	Specimen	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	Δ_{max} (mm)	Failure mode
Beam	Control	24.0	0.67	125.2	7.14	149.6	14.82	53.11	Flexural
	PU	26.2	0.71	127.0	6.96	151.2	15.49	61.42	Flexural
	FRP	32.8	0.90	147.0	9.18	167.6	19.1	29.68	FRP debonding
	FRP+PU	30.0	0.84	147.2	9.14	163.4	18.9	19.73	FRP debonding



(a) Poly-urea retrofitted specimen

(b) Carbon fiber sheet retrofitted specimen

Fig. 6 Failure mode of beam specimens

정리하여 나타내었다.

3.4.2 파괴형상

기준시험체(Control)는 Fig. 5에서와 같이 가력 시 인장철근의 항복에 의한 전형적인 인장파괴로 철근의 항복이후 하중이 점점 증가하여 극한하중에 도달한 후에 휨 인장 균열에 의한 파괴가 발생하였다. PU 시험은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 기준시험체에 비해 상대적으로 변위가 증가되었으나 기준시험체와 거의 유사한 거동을 나타내며 인장파괴가 발생하였다. PU시험은 Fig. 6(a)에 나타난 것과 같이 파괴시까지 폴리우레아와 콘크리트계면에서의 박리현상은 나타나지 않아 일체거동을 하는 것으로 나타났으며, 하부 균열이 발생하는 위치에서 폴리우레아가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 폴리우레아 보강에 의한 강성 증가 효과는 없는 것으로 나타났다. 섬유시트로 보강한 FRP 시험은 인장철근이 부담하는 하중을 섬유시트가 부담하여 받기 때문에 다소 큰 강성을 나타내며 높은 극한 하중에 도달하였으나, Fig. 6(b)와 같이 극한하중에 도달한 이후 섬유시트와 콘크리트 사이에서 섬유시트가 떨어지는 부차파괴가 발생하였다. 섬유시트로 보강한 시험 위에 폴리우레아를 도포한 (FRP+PU) 시험은 섬유시트만으로 보강한 FRP 시험보다 전체적으로 낮은 성능을 나타내었다. 섬유시트 위에 도포된 폴리우레아가 섬유시트와의 상호작용으로 성능을 증대시킬 것으로 기대하였으나, 오히려 섬유시트의 변형을 억제시키며 응력을 집중시키는 것으로 나타나, FRP 시험보다 조기에 계면부착파괴가 발생하였다.

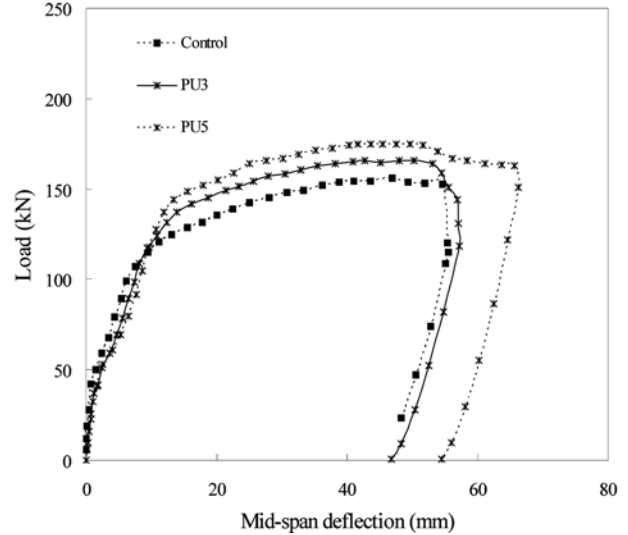


Fig. 7 Load-deflection of slab strengthened with PU

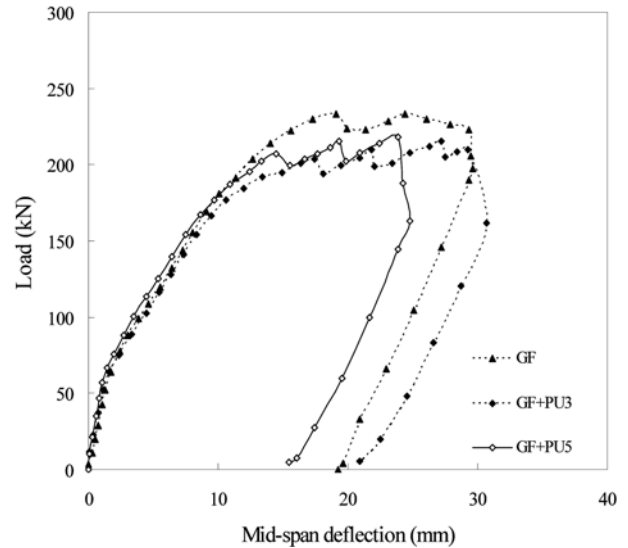


Fig. 8 Load-deflection of slab strengthened with GFRP

3.5 슬래브 시험체의 결과 및 분석

3.5.1 하중-변위 관계

슬래브 시험체의 하중-변위 관계는 Figs. 7~9에 보강재별로 구분하여 나타내었으며, 실험 결과는 Table 7에 정리하였다. 보강재를 사용하지 않은 기준시험체는 최대 극한 강도가 155.8 kN으로 RC 보 실험에서의 마찬가지로 가장 낮은 휨 성능을 나타내었다. 폴리우레아를 3 mm 두께로 도포한 PU3 시험체는 극한강도가 165.8 kN으로 기준시험체에 비해 약 106% 증가하였으며, 5 mm 두께로 도포한 PU5 시험체는 약 112% 가량 극한강도가 증가하였다. 뿐만 아니라 폴리우레아의 두께가 증가할수록 중앙점에서의 최대 변위도 증

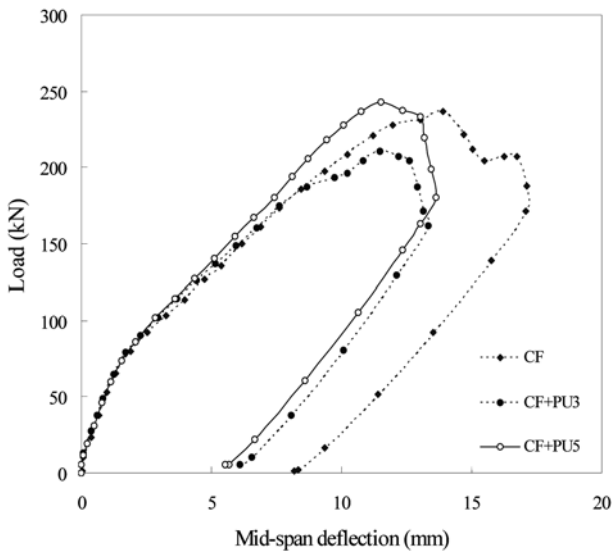
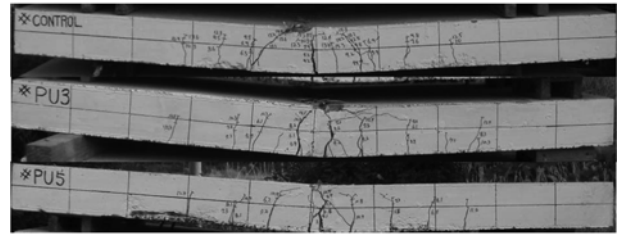


Fig. 9 Load-deflection of slab strengthened with CFRP

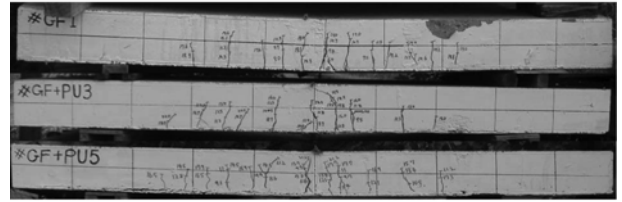
가하는 것으로 나타나 강성과 연성이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 신장률이 높은 폴리우레아가 콘크리트에 발생하는 집중응력을 분산시켜 주기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 8은 유리섬유시트와 폴리우레아를 적용한 슬래브 시험체의 하중-변위 관계 그래프이다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 유리섬유시트만으로 보강한 시험체가 가장 높은 극한강도를 보이고 있으며, 폴리우레아와 함께 적용한 시험체는 보강두께에 상관없이 극한강도를 저하시키는 것으로 나타났다. 탄소섬유시트로 보강한 시험체에 대한 결과인 Fig. 9에서는 폴리우레아의 두께를 3 mm로 보강한 시험체(CF+PU3)가 가장 낮은 극한강도를 나타내었으며, 5 mm로 보강한 시험체(CF+PU5)가 가장 높은 극한강도를 나타내었다. 그러나, 탄소섬유시트만으로 보강한 시험체에 비해 큰 강도증가를 보이지는 않았다. Figs. 7~9의 결과로부터 폴리우레아는 콘크리트에 직접적으로 보강할 경우 강성과 연성이 증가되는 반면, 유리섬유시트나 탄소섬유시트와 같은 섬유와 복합적으로 적용할 경우 보강효과가 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 폴리우레아가 섬유시트의 변형을 억제하고 콘크리트에 작용하는 응력을 집중시키기 때문인 것으로 판단된다.

3.5.2 파괴형상

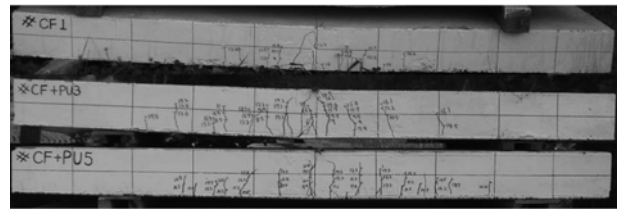
Fig. 10에 슬래브 시험체의 파괴형상과 균열도를 나타내었



(a) PU series



(b) GF series



(c) CF series

Fig. 10 Failure mode of slab specimens

다. 기준시편은 철근의 항복에 의한 휨 파괴 거동을 나타내었으며, 폴리우레아로 보강한 PU3와 PU5 시편도 기준시편체와 거의 유사한 휨 파괴 거동과 균열 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 폴리우레아는 높은 부착성능과 파단변형률이 310%에 이르는 고인성 재료이기 때문에 계면부착파괴나 폴리우레아의 파단에 의한 파괴가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

그러나, 섬유시트로 보강된 GF시리즈와 CF시리즈는 모두 섬유시트와 콘크리트의 탈락에 의한 계면 부착파괴가 발생하였으며, 섬유의 부착파괴 이전까지는 매우 안정적인 휨 균열이 발생한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 폴리우레아를 구조물의 보강재로 사용하기 위한 사전적인 연구로 기존 방수 코팅용으로 사용되는 폴리

Table 7. Summary of slab test results

Type	Specimen	Per (kN)	Δcr (mm)	Py (kN)	Δy (mm)	Pu (kN)	Δu (mm)	Δmax (mm)	Failure mode
Slab	Control	42.4	0.83	103.4	6.97	155.8	46.87	54.76	Flexural
	CF	50.4	0.92	216.6	11.12	236.2	13.91	17.16	FRP debonding
	GF	48.4	1.15	197.6	11.92	233.4	19.11	29.63	FRP debonding
	PU3	38.2	1.23	104.6	7.92	165.8	50.27	57.31	Flexural
	PU5	40.8	1.7	141.6	12.7	175.0	49.67	66.31	Flexural
	CF+PU3	47.2	0.81	186.2	8.54	210.8	11.46	13.33	FRP debonding
	CF+PU5	56.6	1.05	217.4	9.34	242.6	11.53	13.53	FRP debonding
	GF+PU3	53.8	1.17	170.8	9.92	215.2	27.17	30.69	FRP debonding
	GF+PU5	54.8	1.01	145.4	6.93	218.4	23.86	24.75	FRP debonding

우레아의 성능을 개선시켜 구조물에 적용하여 보강성능을 확
인한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구에서는 프리폴리머와 폴리아민의 구성성분의 변화
에 따른 영향을 파악하여 고성능 폴리우레아를 개발하였
다. 개발된 폴리우레아는 기존 폴리우레아보다 초기반응성
은 떨어지지만 중합반응이 거의 동시에 진행되도록 반응
속도를 조절하여 공극을 충분히 채워줄 수 있으며, 미세기
포가 형성되지 않아 피착제와의 부착성능을 향상시켰다.
2. 폴리우레아를 구조물의 보강재료로 사용하기 위한 성능검
증 시험을 실시한 결과, 보에서는 폴리우레아로 보강한 시
편의 보강효과는 거의 나타나지 않았다. 슬래브에서는 폴
리우레아의 두께에 비례하여 강도 증가를 보였으며, 최대
112%의 극한강도 증가를 보였다. 또한, 강도 증가와 함께
중앙점에서의 최대 변위도 함께 증가하는 것으로 나타났
다. 그러나, 폴리우레아와 섬유시트를 복합적으로 적용한
경우에는 섬유시트 위에 도포된 폴리우레아가 섬유시트의
인장변형을 억제시키고 응력을 집중시켜 오히려 섬유시트
의 성능을 감소시키는 것으로 나타났다.
3. 폴리우레아로 보강한 시편은 콘크리트 시편과 매우 안정
적으로 일체거동을 하여 계면부착과괴 없이 콘크리트 시
편과 유사한 휨 파괴 거동을 보였다. 이는 반응속도를 조
절하여 부착성능을 최대로 하였기 때문인 것으로 판단된
다. 섬유시트와 폴리우레아를 함께 적용한 경우에는 섬유
시트만으로 보강한 시편과 마찬가지로 섬유시트와 콘크리
트의 계면에서 섬유시트의 탈락에 의한 부착과괴가 발생
하였다. 그러나, 섬유시트에 의한 부착과괴가 발생하였을
때에도 섬유시트와 폴리우레아의 계면에서의 탈락현상은
보이지 않았다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단이 지원하는 “일반 콘크리트 구조
물 및 충격·폭발하중을 받는 구조물의 보수보강을 위한 고인

성, 고연성 폴리우레아의 개발(과제번호 R01-2008-000-
1117601)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사
드립니다.

참고문헌

김선미, 광노석, 양윤규, 임봉균, 박보영, 황택성(2005) 지방족 및
방향족 이소시아네이트를 이용한 폴리카프로락톤계 폴리우레
탄의 합성 및 물성 연구, *Polymer(Korea)*, Vol. 29, No. 3,
pp. 253-259.

오상근, 김수련, 이성일(2002) 뿔칠형 초속경화 폴리우레아수지
도막방수재의 성능평가에 관한 연구, *한국건축시공학회지*, 한
국건축시공학회, Vol. 2, No. 1, pp. 131-138.

이선숙, 이시호, 이대수(2006) 수산기말단 폴리부타디엔/폴리(프로
필렌 글리콜) 혼합물을 이용한 수분산 폴리우레탄의 제조와
물성, *Polymer(Korea)*, Vol. 30, No. 2, pp. 152-157.

ACI Committee 440 (1996) State-of-the-art report on fiber rein-
forced plastic reinforcement for concrete structure (ACI 440R-
96), *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich.

ACI Committee 440 (2006) Guide for the design and construction
of concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-06), *Ameri-
can Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich.

Buchan, P.A. and Chen, J.F. (2007) Blast resistance of FRP com-
posites and polymer strengthened concrete and masonry struc-
tures-A state-of-the-art review, *Composites Part B: Engineering*,
Vol. 38, No. 5-6, pp. 509-522.

Davidson, S., Porter, J.R., Dinan, R.J., Hammons, M.I., and Con-
nell, J.D. (2004) Explosive testing of polymer retrofit masonry
walls, *Journal of Performance of Constructed Facilities*,
ASCE, Vol. 18, No. 2, pp. 100-106.

Hepburn, C. (1992) *Polyurethane Elastomers*, 2nd edition, Elsevier
Applied Science, London.

Santoh, N. (1993) Carbon fiber composite cable, *Fiber-Reinforced-
Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proper-
ties and Applications*, Elsevier Science Publishers, Vol. 42, pp.
223-247.

Vertel, G. (1993) *Polyurethane*, 2nd edition, Hanser Publishers,
New York.

(접수일: 2009.8.10/심사일: 2009.9.14/심사완료일: 2010.1.20)