



디지털 이미지 분석을 통한 지속 하중과 온도의 복합 환경이 CFRP 쉬트와 콘크리트의 부착강도 및 크리프 거동에 미치는 영향 분석

정유석¹⁾ · 이재하²⁾ · 김우석^{3)*}

¹⁾충남대학교 건설방재연구소 ²⁾한국해양대학교 건설공학과 ³⁾충남대학교 토목공학과

Combined Effects of Sustained Load and Temperature on Pull-off Strength and Creep Response between CFRP Sheet and Concrete Using Digital Image Processing

Yo-Seok Jeong¹⁾, Jae-Ha Lee²⁾, and Woo-Seok Kim^{3)*}

¹⁾Research Institute for Construction Disaster Prevention, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Rep. of Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

ABSTRACT This paper aims at examining the effects of sustained load and elevated temperature on the time-dependent deformation of a carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets bonded to concrete as well as the pull-off strength of single-lap shear specimens after the sustained loading period using digital images. Elevated temperature during the sustained loading period resulted in increased slip of the CFRP composites, whereas increased curing time of the polymer resin prior to the sustained loading period resulted in reduced slip. Pull-off tests conducted after sustained loading period showed that the presence of sustained load resulted in increased pull-off strength and interfacial fracture energy. This beneficial effect decreased with increased creep duration. Based on analysis of digital images, results on strain distributions and fracture surfaces indicated that stress relaxation of the epoxy occurred in the 30 mm closest to the loaded end of the CFRP composites during sustained loading, which increased the pull-off strength provided the failure locus remained mostly in the concrete. For longer sustained loading duration, the failure mode of concrete-CFRP bond region can change from a cohesive failure in the concrete to an interfacial failure along the concrete/epoxy interface, which diminished part of the strength increase due to the stress relaxation of the adhesive.

Keywords : digital image processing, fiber reinforced polymer, pull-off testing, sustained load, temperature

1. 서 론

토목구조물의 다수를 차지하고 있는 콘크리트 구조물은 철근과 콘크리트 재료의 상호보완작용을 통해 우수한 내구 성능을 발휘하는 구조물이다. 그러나 공용연수가 증가할수록 콘크리트 구조물은 노후화가 진행되고 그로 인해 발생하는 열화는 구조물의 초기 물성을 상실케 한다. 따라서 구조물의 본래 성능으로 회복하기 위한 유지관리(보수·보강)를 실시해야 한다. FRP (Fiber-Reinforced Polymer) 쉬트를 활용한 외부 부착공법은 열화 된 콘크리트 보의 휨과 전단에 대한 보강기법으로 건설현장에서 신속한 보수·보강 기법으

로 널리 활용되고 있다. FRP 쉬트의 외부 부착을 통한 단기간의 보강 효과는 1990대 이후 다양한 연구를 통해 입증되었다.¹⁻⁵⁾

FRP의 인장 성능은 FRP 쉬트를 구성하는 섬유인 인장 특성에 좌우되며 FRP 쉬트를 구성하는 또 다른 재료인 레진 매트릭스는 섬유를 보호하고 구조물 하중을 전달한다. 섬유의 인장 성능을 발휘하기 위해서는 콘크리트 접촉면(계면)과 레진 매트릭스 간의 부착 성능이 매우 중요하다. 따라서 많은 연구들이 실험을 바탕으로 계면의 부착 강도 예측 모델 정립에 집중하였고,^{6,7)} 최근에는 다양한 극한 환경 노출에 따른 부착 거동을 규명하기 위한 연구도 진행되고 있다.⁸⁻¹³⁾ 레진 매트릭스는 유리전이온도(Glass transition temperature, T_g) 이상에서는 부착 성능이 저하되는 등 온도에 상당히 민감한 재료이다. 따라서 유리전이온도 이상을 포함한 다양한 온도 환경에서 부착 성능을 규명하려는 연구가 시도되었으

*Corresponding author E-mail : wooseok@cnu.ac.kr

Received March 17, 2016, Revised June 21, 2016,

Accepted August 18, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

며 이와 함께 지속 하중 까지 포함하는 복합 환경에 대한 계면의 부착 성능 변화에 대한 관심도 증가하고 있다.¹⁴⁻¹⁶⁾

Jia et al.¹⁴⁾은 FRP 슈트로 보강된 콘크리트 보에 4점 하중으로 부착강도의 24%를 지속 하중으로 가력 한 후 동결융해 조건에 노출 시켰다. 지속 하중 기간 종료 후 파괴 실험을 실시하였고 동결융해 조건에 노출시킨 실험체에서는 상당한 계면파괴에너지(Interfacial fracture energy) 저하가 관찰되었다. Diab and Wu¹⁵⁾는 양면전단실험체를 제작하여 부착강도의 35~68%를 지속 하중으로 가력한 후 항온·항습 조건에 지속적으로 노출시켰다. 지속 하중 기간 동안 실험체는 크리프 파괴(Creep failure)가 발생하였고 지속 하중의 크기가 증가할수록 크리프 파괴는 조기에 발생하는 것으로 관찰되었다. Gullapalli et al.¹⁶⁾는 일면전단실험체의 부착 강도에 대하여 온도(40°C)와 지속 하중(부착강도의 80%)의 영향을 연구하였다. 지속 하중 없이 온도만을 변수로 하였을 경우, 대조 실험체(23°C, 지속하중을 가력 하지 않음)와 부착강도를 비교한 결과 부착강도가 증가하였고 온도와 지속 하중의 복합 환경인 경우에는 부착강도가 저하되었다.

이처럼 상당한 연구¹⁴⁻¹⁹⁾들이 지속 하중과 온도 또는 복합 환경(지속하중+온도)에 대한 FRP 부착 실험체의 거동에 관해 이루어졌음에도 불구하고 아직까지 FRP 부착 실험체의 부착 성능 변화에 관해서는 명확한 정립은 없는 상태이다. 그리고 기존 연구들은 지속 하중(또는 지속 하중+온도) 이후 부착파괴에너지 또는 부착강도에 집중하여 계면의 부착 파괴 양상에 관해서는 등한시하였다. 따라서 이번 연구에서는 디지털 이미지 자료를 사용하여 계면의 파괴 면 분석을 실시하고 부착파괴에너지와 부착강도의 정량적 분석뿐만 아니라 계면의 부착면 파괴 양상의 정성적 접근을 통해 지속 하중과 온도의 복합 하중에 대한 FRP 부착 실험체의 거동을 분석하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험개요

본 연구에서는 변수(지속 하중과 온도)의 영향을 고찰하기 위하여 CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer) 슈트를 부착한 일면전단실험체를 제작 하였다. 실험은 지속하중을 가력 하는 지속하중실험과 지속하중실험 종료 후 변수의 영향을 평가하기 위한 계면전단강도 실험으로 총 2차에 걸쳐 진행되었다. 실험체 제작은 압축강도 34 MPa(28일 강도)의 콘크리트 블록(127×127×254 mm)을 사용하여 총 24(총 8개 종류의 실험체, 각 실험체별 3개)개를 제작하였다. 25 mm 폭의 CFRP 슈트를 레진 매트릭스(이하 에폭시)에 함침 시켜 콘크리트 블록에 부착하는 방식으로 제작하였으며, 실험에서 사용된 CFRP 슈트 및 에폭시의 재료 물성치는 Table 1에 정리하였다. 에폭시의 양생기간에 따른 영향을 고찰하기 위해 지속 하중을 가력하기 전까지 항온·항습실(상대습도 35%, 21°C)에서 7일 또는 90일 동안 에폭시 양생 후 지속 하중을

Table 1 Mechanical properties of CFRP and epoxy

Property	CFRP	Epoxy
Yield strength	-	54 MPa
Yield strain	-	2.5%
Tensile strength	3.8 GPa	55.2
Elastic modulus	227 GPa	3.3 GPa
Ultimate elongation	1.67%	3.5%
Poisson's ratio	-	0.4

All material properties are provided by the manufacturer

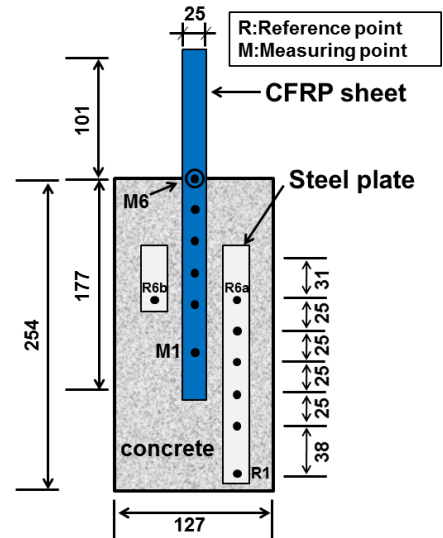


Fig. 1 Specimen details, dimensions in millimeters

Table 2 Test details

Specimen ID	Epoxy curing time (days)	Temp. during sustained loading or dwell (°C)	Sustained loading period (days)
TP-1-C	7	30	-
TP-1-SL			75
TP-2-C	7	21	-
TP-2-SL			31
TP-3-C	90	30	-
TP-3-SL			79
TP-4-C	90	21	-
TP-4-SL			153

도입하였다. 양생 후 CFRP 슈트의 평균 두께는 1.3 mm로 측정되었다. 실험 조건 및 실험체의 상세는 Fig. 1과 Table 2와 같다. 실험체에 대한 이해를 돕기 위해 실험체명에 관하여 설명을 간략하게 하고자 한다. 시험체명의 “C”는 대조실험체(Control specimen)로써 지속 하중을 가력 하지 않은 것 반면에 “SL”은 지속 하중(Sustained Load)을 가력 한 실험체이다. 대조 실험체는 지속 하중 기간 동안에도 지속 하중 실험

체와 마찬가지로 동일한 실험 조건(온도)에 지속 하중 없이 노출시켰다.

지속 하중 기간 동안의 CFRP의 변형을 측정하기 위해 2.54 μm 까지 인식이 가능한 DEMEC (Demountable mechanical) 게이지를 사용하였다. 측정을 위해 기준점(Reference point)과 측정점(Measuring point)에 DEMEC 포인트를 강재 플레이트 위에 부착하여 콘크리트 블록에 장착하였다. M6점의 경우 하중 편심에 의한 변형 발생 가능하므로 이를 측정값에 반영하기 위해 기준점을 두 개(R6a/R6b)로 하여 측정하였다. 그리고 본 논문에서는 의미 있는 변형을 보여준 M6점을 기준으로 지속 하중 기간 동안의 변형에 대해 기술하도록 하였다.

2.2 지속하중실험 및 계면전단강도실험

일면전단실험체에 지속 하중을 가력하기 위하여 Fig. 2와 같이 강재 프레임과 스프링을 사용하여 지속 하중을 도입하였다. 지속 하중의 크기는 TP-2실험체의 계면전단강도실험 평균부착파괴하중의 47%인 2.69 kN을 가력 하였다. 지속 하중 가력 후 일부 실험체(TP-2-SL/TP-4-SL)는 상대습도 35%, 21°C의 조건에 노출시켰고 나머지 실험체(TP-1-SL/TP-3-SL)는 상대습도 25%, 30°C의 조건에 노출시켰다(Fig. 2). 여기서 노출 온도 선정은 이 실험과 병행한 에폭시 물성치 실험 온도를 기준으로 하였다.²¹⁾ 에폭시 물성치 실험은 DSC (Digital Scanning Calorimetry)를 사용하여 에폭시의 열역학적 정보인 유리전이온도(T_g), “Physical aging” 및 “Kinetic aging”을 산정하였고 에폭시의 크리프 변형 거동 또한 규명하였다.^{20,21)}

지속 하중 제거 후, 계면전단강도실험을 실시하여 온도

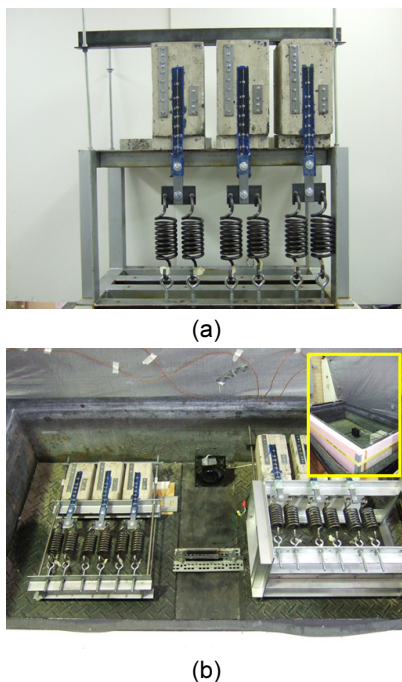


Fig. 2 Sustained loading tests at (a) 21°C and (b) 30°C

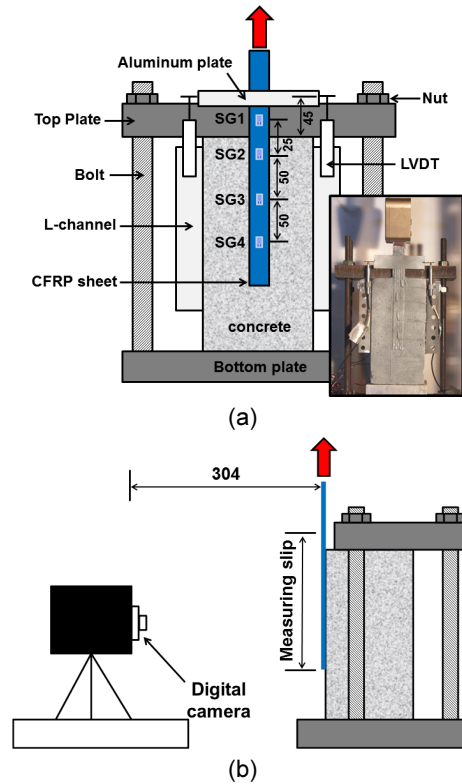


Fig. 3 Sustained loading tests at (a) 21°C and (b) 30°C, dimensions in millimeters

와 지속 하중의 영향을 평가하였다. Fig. 3은 계면전단 실험의 상세를 보여 주고 있다. 계면전단실험동안에 CFRP 쉬트와 콘크리트 사이의 슬립을 측정하기 위해서 LVDT를 사용하였고 실험체 별로 4개의 변형률 게이지를 Fig. 3(a)과 같이 CFRP 쉬트에 부착하였다. 실험동안에 DIC (Digital Image Correlation)기법^{22,23)}을 사용하여 CFRP 쉬트의 부착 부분의 전체 거동(슬립/변형률)을 측정하였다.

2.3 DIC(Digital Image Correlation) 기법

광학기기의 발전으로 인해 디지털 이미지를 활용한 변위 및 변형률 측정에 DIC (Digital Image Correlation)기법이 활용되고 있다.^{22,23)} 구조물의 변형을 계측하는 전통적인 방법에는 변형률 게이지를 사용하는 방법이 있다. 하지만 센서를 부착해야 하는 단점과 부착한 영역에서만 측정이 가능하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완한 새로운 측정 기법이 DIC 기법이다. DIC 기법은 구조물의 변형전과 변형 후의 디지털 영상을 비교하여 구조물 전체 변형을 계측하므로 구조물에 센서를 부착할 필요가 없고 계측 과정 또한 상대적으로 간단하다.

DIC 기법을 활용한 2차원 표면을 촬영하기 위한 디지털 카메라가 필요하여 변형 발생 전 표면에 흑백의 작은 반점 (Speckle pattern, 이하 스페클패턴)들을 페인트를 사용하여 구성해야 한다. 변형 전 구성된 스페클패턴을 하중에 따른 스페클패턴의 변화를 추적함으로써 변형을 측정하게 된다. DIC 기법의 기본적인 세팅은 Fig. 4와 같다. 본 연구에서는

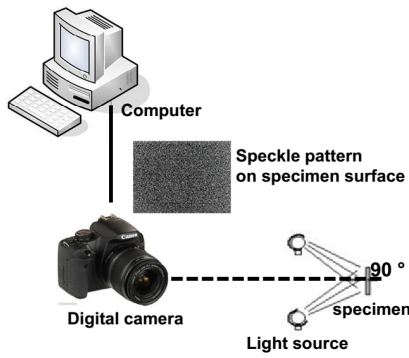


Fig. 4 Set-up for DIC method²⁴⁾

Canon 社의 EOS Rebel T1i 카메라를 사용하였으며 해상도는 픽셀당 0.04 mm이다.

2.4 디지털 이미지를 활용한 파괴면 분석

계면전단강도실험 종료 후, 모든 실험체를 대상으로 부착 파괴 면의 디지털 이미지를 분석하여 파괴 면 양상을 정성적/정량적으로 평가하였다. FRP 슈트 부착 콘크리트 구조물은 Fig. 5와 같이 3 개의 층(콘크리트, 에폭시, 그리고 FRP 슈트)으로 이상화할 수 있으며 외부 하중으로 인해 부착 파괴가 발생하게 되면 Fig. 5와 같은 세 가지 형태의 파괴양상을 보여지게 된다. 균열 진행이 콘크리트 내에서 발생하게 되면 콘크리트면내파괴(Cohesive failure in concrete, CC), 에폭시 내에서 발생하게 되면 에폭시면내파괴(Cohesive failure in epoxy, CE), 마지막으로 에폭시와 콘크리트 사이 계면에서 발생하게 되면 계면부착파괴(Interfacial failure, IF)이다.²⁵⁾

파괴 면 양상을 분석하기 위해 강도 실험 이후 모든 실험체 파괴 면을 디지털 이미지화하였다. 디지털 이미지를 포토샵(Photoshop) 프로그램을 사용하여 파괴면 분석을 다음과 같이 방식으로 수행하였다. Fig. 6은 파괴 면 분석의 과정을 도식화하였다.

STEP 1: 포토샵을 사용하여 6.25 mm 정사각형 셀 4×4 격자 패턴을 CFRP 슈트 쪽과 콘크리트 쪽 파괴면 전체에 형성.

STEP 2: 에폭시 면적만을 남긴 후 나머지 면적은 제거.

STEP 3: 격자마다 격자 넓이에 대한 남은 에폭시 면적 비율을 계산.

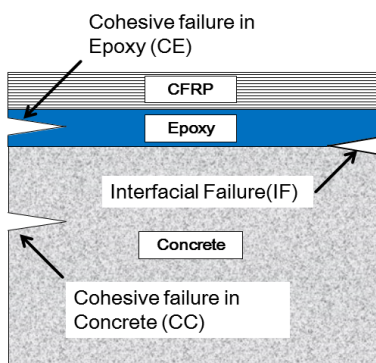


Fig. 5 Possible failure modes in a single-lap shear specimen

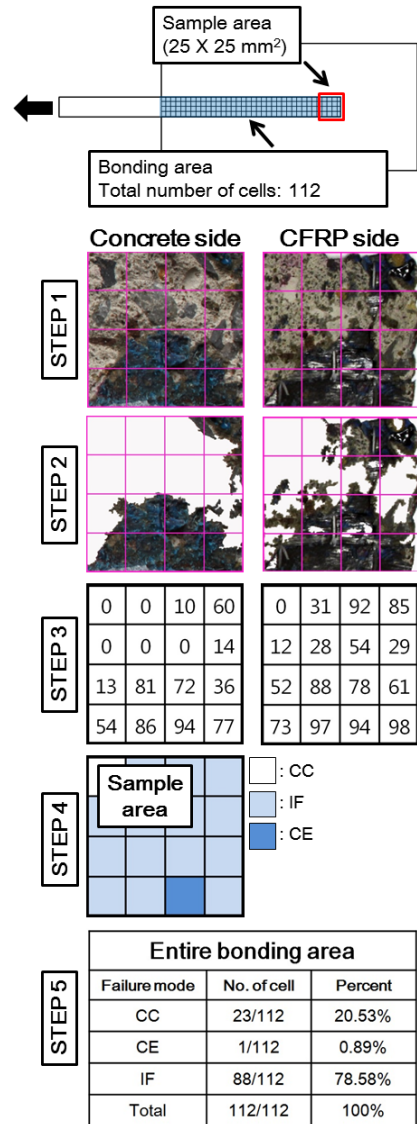


Fig. 6 Procedures of fracture surface analysis

STEP 4: 같은 위치 격자들 간의 에폭시 면적 비율을 비교하여 파괴 면 형태 결정.

STEP 5: 전체 파괴 면에 대해 파괴 면 형태별로 정량화.

파괴 모드는 다음과 같은 기준을 사용하여 결정하였다.

- 콘크리트면내파괴: 에폭시 면적 비율이 양쪽 모두 10% 이하인 경우.
- 에폭시면내파괴: 에폭시 면적 비율이 양쪽 모두 90% 이상인 경우.
- 계면부착파괴: 콘크리트면내파괴 및 에폭시면내파괴가 아닌 나머지 경우.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 지속하중실험 결과

Fig. 7은 지속 하중 기간 동안의 M6점의 처짐 변화를 보여주고 있다. Fig. 7에서 보여주는 처짐 변화는 실험체 종류별

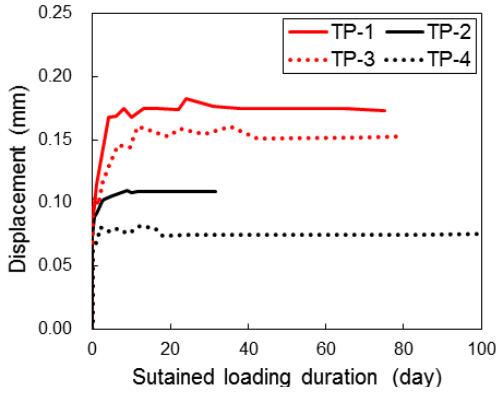


Fig. 7 Effect of temperature on displacement of CFRP sheet at measuring point M6 for different epoxy curing times

로 3개의 실험체를 평균한 값이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 7일간의 에폭시 양생기간을 거친 실험체(TP-1-SL/TP-2-SL)는 노출 온도 21°C보다 30°C에서 더 많은 변형을 보여 주었다(58% 증가). 그리고 90일 에폭시 양생 기간을 거친 실험체(TP-3-SL/TP-4-SL) 또한 30°C에서 112%의 더 많은 변형을 보여 주었다. 지속 하중을 가력 후 발생하는 즉시 변형 이후 점차 안정화되면서 일정한 값으로 수렴해 가는 경향이 모든 실험체에서 관찰되었다. 특히, 7일의 양생기간을 가지고 있는 실험체(TP-1-SL/TP-2-SL)의 경우, 30°C에 노출된 실험체(TP-1-SL)가 더 빠른 속도로 안정화되는 경향을 보여 주었다. 반면 90일의 양생기간을 거친 실험체(TP-3-SL/TP-4-SL)의 경우는 반대의 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 경향은 Jaipuria²⁰⁾가 동일한 에폭시에 실시한 크리프 실험에서도 동일하게 관찰되었다. 이는 에폭시의 크리프 변형 거동이 일면전단실험체의 크리프 변형 거동에 상당한 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2 계면전단강도실험 결과

지속 하중을 제거 후, 지속하중실험체에 대하여 계면전단 강도실험(이하 강도실험)을 실시하였으며 대조실험체 또한 동일하게 강도실험을 실시하였다. 이번 장에서는 강도실험 결과를 최대부착파괴하중, 계면파괴에너지, DIC 결과 및 부착 파괴면 분석결과를 중심으로 기술하도록 하겠다.

3.2.1 최대부착파괴하중(Peak loads)

Table 3은 실험체 그룹별 평균 최대부착파괴하중(부착 파괴 시)을 나타내고 있으며 지속 하중, 온도, 및 에폭시 양생 기간에 따른 효과를 백분율(%)로 보여주고 있다. Table 3의 백분율(%) 양(+)의 의미는 대상 변수에 의해 최대부착파괴 하중이 증가하였음을 나타내고 음(-)의 의미는 감소를 의미한다. Table 4에서도 계면파괴에너지에 대해 동일한 해석 및 적용이 가능하다.

온도와 에폭시 양생기간과 무관하게 모든 지속 하중 실험

Table 3 Bond test results, peak loads, P_{max}

Specimen ID	P_{max} (kN)	Effect (%) ⁽¹⁾		
		Sustained load	Higher temperature	Epoxy curing time
TP-1-C	(a)5.55		(a/c)+8	
TP-1-SL	(b)6.33	(b/a)+14	(b/d)+0	
TP-2-C	(c)5.14			
TP-2-SL	(d)6.32	(d/c)+23		
TP-3-C	(e)5.79		(e/g)-1	(e/a)+4
TP-3-SL	(f)6.51	(f/e)+12	(f/h)-1	(f/b)+3
TP-4-C	(g)5.86			(g/c)+14
TP-4-SL	(h)6.60	(h/g)+12		NA ⁽²⁾

⁽¹⁾b/a=(b-a)/a×100

⁽²⁾Comparison(h/d) was not made due to large difference in creep duration

Table 4 Bond test results, interfacial fracture energy, G_{II}

Specimen ID	G_{II} (N/m)	Effect (%) ⁽¹⁾		
		Sustained load	Higher temperature	Epoxy curing time
TP-1-C	(a)544			
TP-1-SL	NA ⁽²⁾			
TP-2-C	(b)545			
TP-2-SL	(c)639	(c/b) +17		
TP-3-C	(d)565		(d/e) -1	(d/a) +4
TP-3-SL	NA ⁽³⁾			
TP-4-C	(e)571			(e/b) +5
TP-4-SL	(f)646	(f/e) +13		

⁽¹⁾b/a=(b-a)/a×100

⁽²⁾NA:data are not processed because LVDT data are not available

⁽³⁾Data are not available due to testing error

체의 최대부착파괴하중이 대조실험군과 비교하여 증가하였다. 이러한 결과는 지속 하중이 일면전단실험체의 한에서는 최대부착파괴하중증가에 긍정적인 면을 보여 주고 있다고 판단된다. 가장 큰 증가를 보여주고 있는 지속 하중 실험체는 TP-2-SL(23% 증가)이며 이 실험체의 지속기간은 여타 실험체의 지속기간보다 가장 짧다(31일). 본 실험의 결과는 Mazzotti and Savoia²⁶⁾ 실험과 유사한 결과를 보여 주고 있다. Mazzotti and Savoia²⁶⁾ 실험은 양면전단실험체에 부착강도 50%를 지속하중으로 가력한 후 5년 동안 20°C의 실험실 환경 조건에 노출시킨 후 강도실험을 실시하였다. 강도실험 결과 최대부착파괴하중의 증가가 지속 하중 실험체에서 관찰되었으며 콘크리트 “Aging”효과에 의한 것으로 기술하였다. 본 실험에서는 DIC 기법을 활용하여 디지털 이미지를 분석하였으며 이를 통해 최대하중 증가 원인을 분석하였다. 관련된 자세한 내용은 3.3 절에 기술하였다.

Fig. 8은 지속 하중 기간에 대한 지속 하중 효과의 변화를

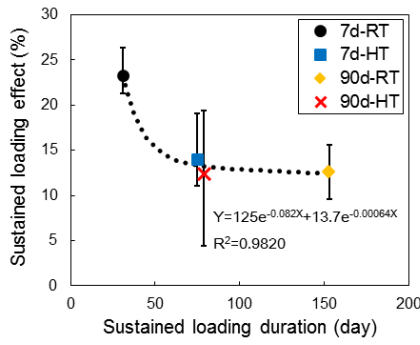


Fig. 8 Effect of sustained loading duration on peak loads

온도와 에폭시 양생기간의 효과에 상관없이 보여 주고 있다. 최대부착파괴하중에 대한 지속 하중의 효과는 지속 하중 기간이 증가함에 따라 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보여 주고 있으며 지속 하중 기간 75일 이후에는 대략적으로 12~14%정도 값으로 수렴하고 있다. 이는 최대부착파괴하중 증가 측면에서 지속 하중의 긍정적인 효과는 존재하나 지속하중기간이 증가함에 따라 그 효과는 감소하고 있다 (Fig. 8). 3.4절의 파괴 면 분석 결과를 바탕으로 추론해 보면 지속 하중 기간 증가로 인한 계면의 부착강도 저하로 인한 것으로 판단된다. 추후 최대부착파괴하중과 지속하중 및 지속하중기간의 상관관계에 관한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

온도 효과에 관해서 TP-1-C(7일 양생, 30°C 노출, 대조실험체)와 TP-3-C(7일 양생, 21°C 노출, 대조실험체)를 비교하였을 경우 8% 증가를 보여 주고 있다. 반면에 90일의 양생기간을 거친 경우는 온도에 대한 최대 하중 변화는 미미하였다. 그리고 최대부착파괴하중 증가에 한해서는 90일 에폭시 양생기간이 7일 에폭시 양생기간 보다 더 긍정적인 것으로 판단된다.

3.2.2 계면파괴에너지(Interfacial fracture energy, G_{II})

계면파괴에너지(Interfacial fracture energy)는 콘크리트와 FRP 슈트 간의 부착 파괴 시 필요한 에너지로 Bond-slip curve의 면적으로 산정된다. Bond-slip curve를 결정하는 주요 인자는 최대전단응력과 슬립량이며 곡선의 면적에 해당하는 계면파괴에너지는 경계면의 파괴 거동의 지배적인 영향인자로 판단된다. 강도실험을 통해 획득한 데이터를 Dai et al.^{27,28)}의 모델을 사용하여 계면파괴에너지를 산정하고자 한다. 계면파괴에너지의 산정 식인 식 (1)의 유도 과정은 Dai et al.^{27,28)}의 논문에 자세히 나와 있으며 본 논문에서는 계면파괴에너지 식만을 간략하게 소개하도록 하겠다.

$$G_{II} = \int_0^{\infty} \tau ds = \frac{1}{2} A^2 E_f t_f \quad (1)$$

여기서 국부계면전단응력 τ 는 국부변형률과 슬립으로 다음과 같이 표현이 된다.

$$\begin{aligned} \tau &= E_f t_f \frac{d\epsilon}{dx} = E_f t_f \frac{df(s)}{ds} f(s) \\ &= A^2 B E_f t_f e^{-Bs} (1 - e^{-Bs}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \epsilon = f(s) A (1 - e^{-Bs}) \quad (3)$$

여기서 A 는 CFRP 슈트의 최대 변형률과 관계된 인자로써 실험데이터의 curve-fitting으로 산정되며 전단실험체의 연성도(ductility index)와 관계된 B 또한 curve-fitting으로 산정된다. E_f 와 t_f 는 각각 CFRP 슈트의 탄성계수 및 두께이다. 식 (1)에 의해서 계면파괴에너지는 산정이 되며 Table 4과 같다.

계면파괴에너지는 544 와 646 N/m사이에서 분포하고 있으며 지속하중이 가력된 실험체의 계면파괴에너지가 대조 실험체보다 더 높게 나왔다. 이는 지속 하중이 최대부착파괴하중에서와 동일하게 계면파괴에너지 증가 측면에서도 긍정적인 효과를 보여주는 것으로 판단된다. 이는 계면파괴에너지와 최대부착파괴하중사이의 해석적인 관계식에서도 충분히 확인할 수 있다.^{27,28)}

$$P_{\max} = b_f E_f t_f A = b_f \sqrt{2 E_f t_f G_{II}} \quad (4)$$

여기서 b_f 는 CFRP 슈트의 폭이다. 온도에 대한 계면파괴에너지 증가는 의미 있는 값을 보여 주지 못하였으나 에폭시의 양생기간(7일/90일)은 계면파괴에너지에 대하여 의미 있는 변화를 보여 주었다(Table 4). 이는 충분한 양생기간을 거친 FRP 부착실험체는 계면파괴에너지 및 최대부착파괴하중 증가에 긍정적인 효과를 보여 줄 것이라 판단된다. Fig. 9는 해석적으로 산정된 최대부착파괴하중 값과 실험에서 측정된 최대부착파괴하중 값의 관계를 나타내며 상당한 일치율을 보여 주고 있다.

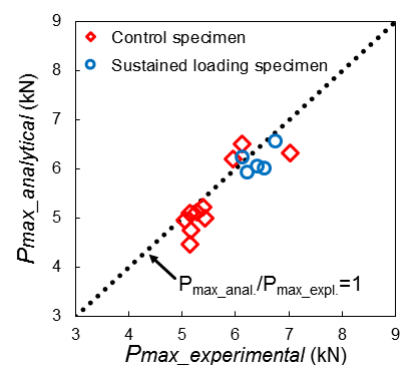


Fig. 9 Comparison between experimental and analytical peak loads

3.3 DIC (Digital Image Correlation)결과

Fig. 10은 하중에 따른 변형률 게이지 데이터와 DIC 기법으로 측정된 변형률을 보여 주고 있다. Fig. 10에서 DIC 결과로써 산정된 변형률은 CFRP 슈트의 폭 방향 변형률을 평균

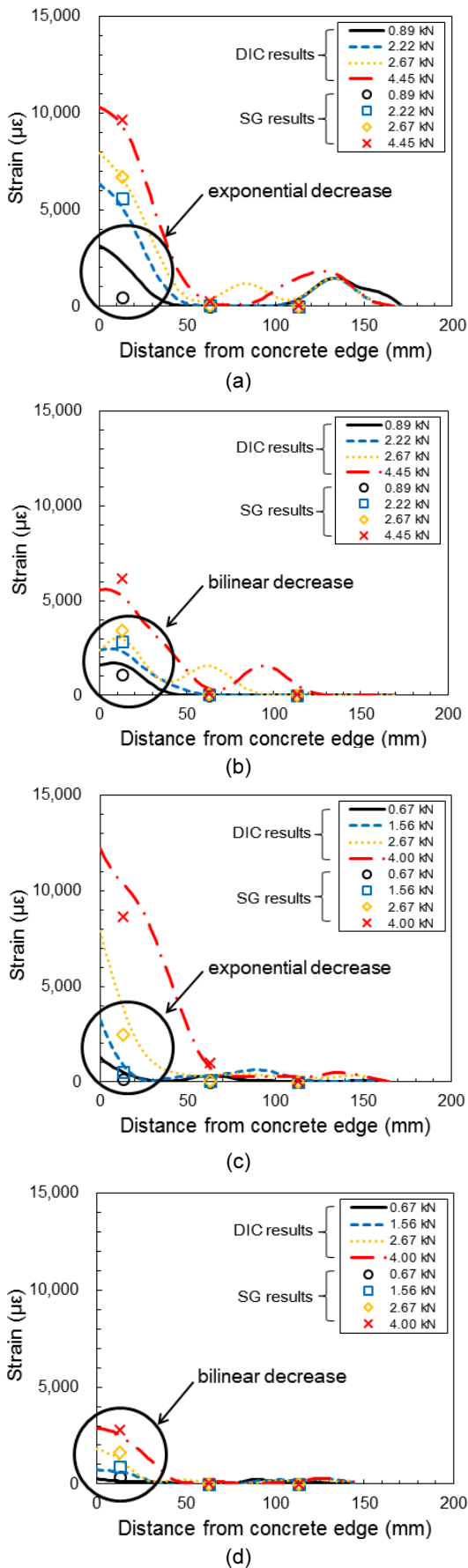


Fig. 10 Comparison of strain profile along the CFRP bonding area from DIC/strain gage results: (a) TP-2-C, (b) TP-2-SL, (c) TP-4-C, and (d) TP-4-SL

한 값을 길이 방향으로 나타낸 것이다.

지속 하중의 영향을 보기 위해 지속하중실험체와 대조실험체를 비교하였다. 대조실험체인 Fig. 10(a)와 (c)의 변형률 변화는 콘크리트 끝단에서 지수함수(Exponential) 곡선으로 감소하는 경향을 보여주며 2.67 kN(지속하중) 이하에서는 지수함수 곡선을 유지하면서 하중 증가에 따른 유효부착길이(Effective bonding length, Transfer zone)가 대략 50 mm까지 증가하고 있다. 2.67 kN 이상 하중에서는 콘크리트 끝단에서부터 변형률 기울기 감소를 보이면서 비부착 파괴가 시작되어 파괴가 발생하였다. 반면에 지속하중 실험체인 Fig. 10(b)와 (d)의 변형률은 콘크리트 끝단에서부터 쌍선형(Bilinear) 곡선으로 감소하는 경향을 보여 주었다. 2.67 kN 이하에서는 하중이 증가하면서 콘크리트 끝단에서부터 변형률의 기울기가 점차 작아지는 것이 관찰되었다. 이러한 쌍선형 곡선 형태의 변형률 분포는 지속 하중 기간 동안 발생하는 응력집중 완화현상에 기인한다고 판단된다. 지속 하중이 가력되면 콘크리트 끝단에서 대략적으로 30 mm 정도까지 응력집중이 발생하게 되고 에폭시의 점탄성(Viscoelasticity) 특징으로 인해 지속하중 기간 동안 지속적으로 응력완화가 발생하게 된다. 지속 하중을 제거하더라도 콘크리트 끝단에서 영구변형이 발생하며 이러한 변형으로 인해 Fig. 10(b)와 (d)와 같이 계면전단강도실험 동안에 쌍선형 곡선으로 변형률 분포가 발생하게 된다. Diab and Wu¹⁵⁾는 부착과피하중의 50%정도의 지속하중으로 가력 한 실험에서 70~80 mm의 응력완화 구간을 관찰 하였다. Mazzotti and Savoia²⁶⁾는 부착과피하중의 50% 정도의 지속 하중으로 가력 한 실험에서 10~15 mm의 응력완화 구간을 관찰하였으며 이러한 응력완화로 인해 지속 하중 실험체의 최대부착과피하중이 대조실험체보다 증가된 것으로 판단된다.

3.4 디지털 이미지를 사용한 파괴면 분석결과

파괴 면 분석 결과 대부분의 파괴 형태는 콘크리트면내파괴 및 계면부착과피가 주를 이루고 있으며 에폭시면내파괴

Table 5 Bond test results, percent of failure mode

Specimen ID	Failure mode (%)		
	CC ⁽¹⁾	CE ⁽²⁾	IF ⁽³⁾
TP-1-C	9	0	91
TP-1-SL	15	0	85
TP-2-C	5	0	95
TP-2-SL	26	0	74
TP-3-C	25	0	75
TP-3-SL	30	0	70
TP-4-C	12	0	88
TP-4-SL	10	0	90

⁽¹⁾CC: cohesive failure in concrete

⁽²⁾CE: cohesive failure in epoxy

⁽³⁾IF: interfacial failure

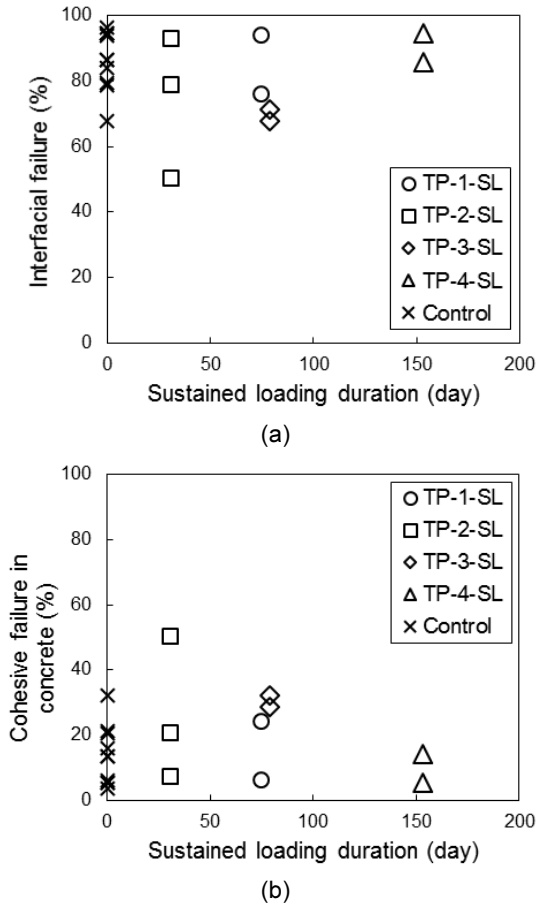


Fig. 11 Percent of failure modes for various sustained loading durations: (a) Interfacial failure and (b) cohesive failure in concrete

는 모든 실험체에서 1% 이내로 분석되었다(Table 5). Fig. 11은 지속 하중 기간에 따른 콘크리트면내파괴와 계면부착파괴 비율을 나타내고 있으며 에폭시 양생기간과 온도는 고려하지 않았다. Fig. 11에 따르면 지속 하중 기간이 증가함에 따라 콘크리트면내파괴에서 계면부착파괴의 전이가 발생하며 이는 지속 하중에 의한 부착강도 저하로 인해 발생한 것으로 판단된다. Fig. 8로 되돌아가 보면 지속 하중이 가려지고 지속하중으로 인해 지속하중 초기에 대조실험체보다 최대부착파괴하중이 증가하였고 지속 하중 기간이 증가하면서 그 효과는 감소하였다. 이러한 지속 하중의 최대부착파괴하중에 대한 긍정적인 효과 감소는 지속 하중으로 인한 부착강도 저하로 설명 될 수 있다. 즉, 지속 하중 기간 초기 응력완화로 인해 최대부착파괴하중 증가가 발생하였으나 지속 하중 기간이 증가하면서 발생하는 부착강도의 저하는 최대부착파괴하중 증가에 대한 응력완화의 긍정적인 측면을 점점 감소시켰다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFRP 슈트를 부착한 일면전단실험체의 거동에 관해 지속 하중과 온도의 영향을 분석하였다. 이를

위해 지속 하중 기간 동안의 거동을 분석하였으며 지속 하중 기간 이후의 계면전단강도실험을 통해 최대부착하중 및 부착파괴에너지 변화를 고찰하였다. 그리고 부착 파괴 후 파괴면 분석을 통하여 부착면 파괴양상을 정성적/정량적으로 분석하였다. 이 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 30°C에 노출된 지속 하중 실험체는 21°C에 노출된 실험체보다 더 많은 CFRP 슈트의 변화량을 보여 주었으며 변화의 경향은 에폭시의 크리프 실험과 동일한 양상을 보여 주고 있다. 이는 에폭시의 크리프 변형 거동이 일면전단실험체의 지속 하중 변형에 상당한 영향을 주는 것으로 판단된다.
- 2) 지속 하중 기간 종료 후 계면전단강도실험을 실시하였으며 지속 하중 실험체의 최대부착파괴하중이 대조실험체보다 증가하였다. 지속 하중이 최대부착파괴하중 증가 면에서는 긍정적인 효과를 보여 주었으나 지속 하중 기간이 증가하면서 그 효과는 감소하는 경향을 보여 주었다. 또한 에폭시 양생기간이 증가할수록 최대부착파괴하중 및 계면파괴에너지는 증가하였다.
- 3) DIC 기법을 통해 관찰된 CFRP 슈트 부착면의 변형률 분포는 지속하중실험체와 대조실험체 사이에 명확한 차이를 보여 주고 있다. 이러한 변형률 분포 변화는 지속 하중에 의한 응력완화 증거로서 콘크리트블록 끝단부터 주로 30 mm에서 발생하였다. 응력완화는 지속하중실험체의 최대부착파괴하중 및 계면파괴에너지 증가에 긍정적인 효과를 발생시켰다.
- 4) 디지털 이미지를 활용한 파괴면의 정성적/정량적 분석을 실시하였다. 지속 하중 기간이 증가 할수록 콘크리트면내파괴에서 계면파괴로의 전이가 발생하였으며 이는 지속 하중으로 인한 부착강도의 저하가 원인으로 판단된다. 지속하중 기간이 증가할수록 지속 하중의 최대부착파괴하중에 대한 증가 효과 감소는 부착강도 저하로 인한 파괴 양상의 전이로 설명할 수 있다.
- 5) 기존의 계면전단강도실험에서는 부착파괴에너지 또는 부착강도와 같은 정량적인 값들에만 집중하여 계면의 부착 파괴 양상에 관해서는 등한 시 한 면이 있다. DIC 기법 및 파괴면 분석에서 디지털 이미지 정보를 활용하여 일면전단실험체의 거동에 관해 정성적 접근을 시도하였으며 이를 통해 지속 하중의 효과로 인한 응력완화 현상 및 파괴 형태 전이 등을 관찰하였다.
- 6) 본 논문은 단일 에폭시와 변수에 대한 실험 결과만을 정리하였다. 하지만 여러 변수(예, 온도, 습도, 지속 하중 크기 및 기간, 에폭시 종류 등)에 따라 계면의 부착강도 및 크리프 거동이 달라질 가능성이 있으므로 변수에 따른 결과의 변동성을 고려하여야 한다. 추후 의미 있는 실험 데이터 축적을 통해 통계적 기법(예, 몬테카를로 시뮬레이션, Monte-Carlo simulation)을 활용하여 변수에 따른 거동의 변동성 예측이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.: 2015R1A6A3A01059409).

References

1. ACI 440.2R-08, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI, 2008.
2. Hong, H., and Shin, Y., "Structural Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded FRP Sheets", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.15, No.1, 2003, pp.78-86.
3. Park, J., Jung, W., You, Y., and Park, Y., "An Estimate of Flexural Strength for Reinforce Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.2, 2005, pp.213-220.
4. Sim, J., Oh, H., Moon, D., and Park, K., "Prediction of the Shear Strength of FRP Strengthened RC Beams (I)-Development and Evaluation of Shear strength model", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.3, 2005, pp.343-351.
5. You, Y., Choi, K., and Kim, K., "An Experimental Study to Prevent Debonding Failure of RC Beams Strengthened with GFRP Sheets", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.19, No.6, 2007, pp.677-684.
6. Chen, J., and Teng, J., "Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol.127, No.7, 2001, pp.784-791.
7. Toutanji, H., Saxena, P., Zhao, L., and Ooi, T., "Prediction of Interfacial Bond Failure of FRP-concrete Surface", *Journal of Composites for Construction*, Vol.11, No.4, 2007, pp.427-436.
8. Ouyang, Z., and Wan, B., "Experimental and Numerical Study of Moisture Effects on the Bond Fracture Energy of FRP/Concrete Joints", *Journal Reinforced Plastics and Composites*, Vol.27, No.2, 2008, pp.205-223.
9. Tuakta, C., and Buyukozturk, O., "Deterioration of FRP/Concrete Bond System Under Variable Moisture Conditions Quantified by Fracture Mechanics", *Composites Part B: Engineering*, Vol.42, No.2, 2011, pp.145-154.
10. Biscaia, H., Silva, M., and Chastre, C., "An Experimental Study of GFRP-to-concrete Interfaces Submitted to Humidity Cycles", *Composite Structures*, Vol.10, No.1, 2014, pp. 354-368.
11. Tartar, J., and Hamilton, H., "Bond Durability Factor for Externally Bonded CFRP Systems in Concrete", *Journal of Composites for Construction*, Vol.20, No.1, 2016.
12. Kim, S., Kim, K., Han, K., Song, S., and Park, S., "A Prediction of the Long-Term Deflection of RC Beams Externally Bonded with CFRP and GFRP", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.6, 2008, pp.765-771.
13. You, Y., Choi, K., and Kim, K., "Long-Term Behavior of CFRP Strips under Sustained Loads", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.2, 2009, pp.139-146.
14. Jia, J., Boothby, T., Bakis, C., and Brown, T., "Durability Evaluation of Glass Fiber Reinforced-polymer-concrete Bonded Interfaces", *Journal of Composites for Construction*, Vol.9, No.4, 2005, pp.348-359.
15. Diab, H., and Wu, Z., "Nonlinear Constitutive Model for Time-dependent Behavior of FRP-concrete Interface", *Composites Science and Technology*, Vol.67, No.11-12, 2007, pp.2323-2333.
16. Gullapalli, A., Lee, J., Lopez, M., and Bakis, C., "Sustained Loading and Temperature Response of Fiber-reinforced Polymer-concrete Bond", *Transportation Research Record*, Vol.2131, 2009, pp.155-162.
17. Ferrier, E., Michel, L., Jurkiewicz, B., and Hamelin, P., "Creep Behavior of Adhesives used for External FRP Strengthening of RC Structures", *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.2, 2011, pp.461-467.
18. Hamed, E., and Bradford, M., "Flexural Time-dependent Cracking and Post-cracking Behaviour of FRP Strengthened Concrete Beams", *International Journal of Solids and Structures*, Vol.49, No.13, 2012, pp.1595-1607.
19. Zhang, C., and Wang, J., "Interface Stress Redistribution in FRP-strengthened Reinforced Concrete Beams Using a Three-parameter Viscoelastic Foundation Model", *Composites Part B: Engineering*, Vol.43, No.9, 2012, pp.3009-3019.
20. Jaipuria, A., *Characterization and modeling of creep behavior in ambient temperature cured thermoset resin*, Master's dissertation, Pennsylvania State University, 2011.
21. Jaipuria, A., Bakis, C., and Lopez, M., "Cure Kinetics and Physical Aging of an Ambient-curing Epoxy Resin". In *Proc. of the 6th Intl. Conf on Composite FRP in Civil Engineering 2012*, CICE 2012, Rome, Italy.
22. Peters, W., and Ranson, W., "Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis", *Optical Engineering*, Vol.21, No.3, 1982, pp.427-431.
23. Lee, J., and Lopez, M., "Non-contact measuring techniques to characterize deformation on FRP Uwrap anchors", Proc. 10th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures 2011, FRPRCS-10, ACI, Tampa, FL, United States, pp.245-258.
24. Jeong, Y., *Effects of temperature and sustained loading on the response of FRP-strengthened concrete elements*, Doctoral Thesis, Pennsylvania State University, U.S., 2014.
25. Ruocci, G., Argoul, P., Benzarti, K., and Freddi, F., "An Improved Damage Modelling To Deal With The Variability Of Fracture Mechanisms In FRP Reinforced Concrete

- Structures”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol.45, 2013, pp.7-20.
26. Mazzotti, C., and Savoia, M., “Stress Redistribution Along the Interface Between Concrete and FRP Subject to Long-term Loading”, *Advances in Structural Engineering*, Vol.12, No.5, 2009, pp.651-661.
27. Dai, J., Ueda, T., and Sato, Y., “Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-concrete Interfaces With a Simple Method”, *Journal of Composites for Construction*, Vol.9, No.1, 2005, pp.52-62.
28. Dai, J., Gao, W., and Teng, J., “Bond-slip Model for FRP Laminates Externally Bonded to Concrete at Elevated Temperature”, *Journal of Composites for Construction*, Vol.17, No.2, 2013, pp.217-228.

요 약 본 연구에서는 디지털 이미지를 사용하여 DIC(Digital Image Correlation) 기법 및 부착파괴면 분석을 통해 부착파괴 에너지와 부착강도의 정량적 분석뿐만 아니라 계면의 부착 면 파괴 양상의 정성적 접근을 통해 지속 하중과 온도의 복합 하중에 대한 FRP 부착 실험체의 거동을 분석하였다. 이를 위해 CFRP 쉬트를 부착한 일면전단실험체를 제작하여 사용하였다. 일면전단 실험체의 지속 하중 기간의 거동은 에폭시 크리프의 영향을 상당히 받으며 지속 하중 기간 동안에 에폭시의 점탄성 특징으로 인해 응력완화가 발생하였다. 응력완화는 지속 하중 이후 실시한 계면전단실험에서 사용한 DIC 기법을 통해 관찰 하였으며 지속 하중 기간 동안의 응력완화로 인해 지속하중 실험체의 최대부착파괴하중 및 계면파괴에너지가 대조실험체보다 증가하였다. 모든 실험체의 부착 파괴 면을 디지털 이미지화하여 파괴 면의 양상을 정성적/정량적으로 분석 하였다. 디지털 이미지 분석 결과 지속 하중 기간 동안 파괴 형태가 콘크리트면내파괴에서 계면부착파괴 형태로 전이가 발생하였으며 이러한 전이로 인해 지속하중 기간이 증가할수록 지속하중의 최대부착파괴하중에 대한 긍정적인 효과 감소하였다.

핵심용어 : 디지털 이미지 분석, 섬유보강폴리머, 계면전단강도실험, 지속하중, 온도