

# 구조보강용 FRP 복합체의 동결융해 저항성 평가 연구

Freezing-Thawing Resistance of Fiber Reinforced Polymers in Strengthening RC Members

유 영 찬<sup>1)\*</sup>      최 기 선<sup>2)</sup>      김 금 환<sup>1)</sup>  
You, Young Chan      Choi, Ki Sun      Kim, Keung Hwan

## Abstract

The strengthening performance of FRPs(Fiber Reinforced Polymers) is directly affected by the environmental conditions such as freezing-thawing and moisture because FRPs are usually bonded on the concrete surface. It is, therefore, strongly required to evaluate a durability of bond between FRPs and concrete as well as FRP materials itself. The freezing-thawing resistance of FRPs is evaluated in this study with the variables of freezing-thawing conditions, types of FRP and freezing-thawing cycles. From the test results, it is found that tensile strength and pull-off strength of CFRP are not affected by the freezing-thawing. On the other hands, those of GFRP show a little degradation because of continuous water immersion during thawing process. But, cautions are needed on the bond durability between FRPs and concrete in case of continuous water supplying from adjacent to the concrete.

**Keywords** : Freezing-thawing, Durability, FRP composite, Tensile strength, Pull-off strength

## 1. 서 론

기존 콘크리트 구조물의 보강재로서 FRP 복합체는 소재 자체가 지니는 많은 장점으로 인하여 기존의 강판보강 공법 등의 전통적인 보강공법을 급속히 대체하고 있으며(김금환 등, 2001; 土木學會コンクリト委員會, 1999; Hollaway 등, 1999; Sika, 1999), 적용범위가 점차 확대되면서 최근에는 괄목할 만한 성장세를 보이고 있다. 이러한 FRP에 의한 보강공법은 통상적으로 FRP 복합체가 기존 구조물의 표면에 부착되어 보강성능이 발휘되는 외부 부착형으로 시공되는 것이 일반적이므로, FRP 보강 공법의 특성상 보강재가 외부환경에 노출되는 것이 불가피하게 되어 주변 환경으로부터 직접적인 영향을 피할 수 없게 된다. 따라서 FRP에 의한 보강공법에서는 구조물의 내구성 확보는 물론 보수·보강효과의 지속적인 확보를 위하여 재료 자체뿐만 아니라 콘크리트와 FRP 접착계면에서의 내구성에 대한 평가가 요구된다.

한편, FRP 복합재료의 내구성능은 선박·항공 및 레저 등의 기존 산업 분야에서의 적용을 통하여 어느 정도 검증이 되었다고 볼 수 있다. 그러나 건설·토목분야에서의 요구성능 및 적용환경에 대한 내구성능은 아직 충분히 검토되지 않은 것으로 보고되고 있다(ACI440, 2008; ISIS

2001). 즉, FRP를 이용한 보강공법에서는 FRP 복합체가 콘크리트 구조물에 부착·일체화되어 보강성능을 발휘하는 것을 특징으로 하고 있으므로, 각 개별재료에 대한 내구성뿐만 아니라 외부환경에 동일하게 노출되어 있는 콘크리트와의 접착성능에 대한 검토도 수행되어야 한다. 특히 동결융해 및 습기에 의한 영향은 FRP 복합체 자체 보다는 콘크리트에 영향을 주는 것으로 고려되고 있으므로 부착계면에서의 성능저하에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

이러한 분석에 따라 본 연구에서는 외부환경에 노출된 FRP 복합체의 동결융해 시험조건에서의 재료 내구성과 콘크리트와의 부착내구성을 평가하기 위한 일련의 실험을 통하여 FRP 복합체의 내구특성을 파악하고, FRP 복합체의 내구성 저하를 설계에 반영하기 위한 기본자료를 구축하고자 하였다(유영찬 등, 2006).

## 2. 시험항목 및 방법 고찰

### 2.1 시험항목 고찰

FRP 복합체는 섬유가 연속적으로 배치된 방향의 인장 강도로서 재료특성이 규정되므로, 동결융해 시험전의 인

1) 정회원, 한국건설기술연구원 건축구조·자원연구실 책임연구원  
2) 정회원, 한국건설기술연구원 건축구조·자원연구실 선임연구원

\* Corresponding author : yeyou@kict.re.kr 031-910-0364

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2010년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

강강도를 기준으로 시험 단계별 강도 유지율로서 재료특성에 대한 동결융해 저항성을 평가할 수 있다. 그러나 수분함량이 거의 없는 FRP 복합체의 특성상, 동결융해 반복에 의한 FRP 복합체의 재료강도 저하는 거의 관측되지 않을 것으로 예상된다. 한편, FRP 복합체는 콘크리트의 외부표면에 부착되어 보강성능이 발휘되는 공법상의 특징을 지니고 있으므로, 동결융해에 의해 콘크리트 표면의 성능저하가 발생될 수 있으며, 이로 인한 부착성능의 감소를 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 인장강도 시험 이외에 FRP 복합체와 콘크리트와의 계면 접착성능을 평가하기 위한 항목으로서 콘크리트에 대한 인발접착시험(pull-off test)을 선정하였다.

## 2.2 시험규격 고찰

FRP 복합체의 동결융해 저항성 평가를 위한 외국의 시험규격을 분석해 보면 Table 1에서 보는 바와 같이 대부분 「기건동결-기건융해」 시험조건에 의해 동결융해 저항성을 평가하도록 규정하고 있는 것으로 분석되었다. 이에 따라, FRP 복합체의 재료특성 자체에 대한 동결융해 저항성 평가는 KS F 2604 “건축용 외벽재료의 내동해성 시험 방법”에 준하여 실험을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 본 시험규격에서 규정하고 있는 「기건동결-기건융해」 시험조건을 만족할 수 있는 동결융해 시험기가 국내에는 거의 보급되어 있지 않아 시험자체가 불가능한 실정이다. 또한, 콘크리트에 대한 동결융해 저항성 시험규격인 KS F 2456 “급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험 방법”에서 규정하고 있는 「기건(수중)동결-수중융해」 시험조건은 건축용 외벽재료에 대한 시험조건인 「기건동결-기건융해」보다 더 가혹한 환경조건이 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 KS F 2456

에 준하여 FRP 복합체의 인장강도 및 콘크리트에 대한 부착성능 저항성을 평가하였다.

## 3. 실험

### 3.1 실험 개요

#### 3.1.1 실험 변수

FRP 복합체의 동결융해 저항성을 평가하기 위한 실험은 FRP 복합체의 인장강도와 콘크리트와의 인발접착강도에 대하여 동결융해 조건, FRP의 종류, 동결융해 사이클을 변수로 수행하였다. 즉, FRP 복합체의 인장강도 변화를 평가하기 위한 실험은 「기건동결-수중융해」 시험조건 하에서 탄소섬유쉬트와 유리섬유쉬트를 대상으로 5단계(0, 50, 100, 200, 300 사이클)의 동결융해 사이클마다 시료를 채취하여 인장강도를 평가하였다. 이에 대하여 콘크리트와의 접착성능을 평가하기 위한 실험은 KS F 2456에서 제시하는 「기건동결-수중융해」 법과 「수중동결-수중융해」 법에 대하여 콘크리트 강도, FRP 종류, 동결융해 사이클을 변수로 인발접착강도 시험을 수행하였다. 각각의 실험변수를 정리하여 나타내면 Table 2와 같다.

#### 3.1.2 동결융해 실험 방법

위에서 언급한 바와 같이 국내에서는 KS F 2604 “건축용 외벽재료의 내동해성 시험 방법”에서 규정하고 있는 「기건동결-기건융해」 시험조건을 만족할 수 있는 적합한 동결융해 시험기를 찾기 어렵기 때문에 본 연구에서는 KS F 2456에서 제시하고 있으며, 건설분야에서 가장 폭넓게 사용되고 있는 콘크리트 동결융해 시험기를 사용하여 시험을 실시하였다. 동결융해 시험기는 동결시의 시험조건에 따라서 다음의 두 가지를 사용하였다.

#### 1) 「수중동결-수중융해」 시험기

「수중동결-수중융해」 시험기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 스테인레스 수조내에 물을 채우고 3mm 이상 시험체를 침지시킨다. 송풍에 의해 기준 콘크리트 몰드의 내

Table 1 Standard test method for FRP freezing-thawing

Standard	Object	Condition		Temp.	Cycle	Remark
		Freeze	Thaw			
KS, (JIS A 1435)	Material	Water	Water	Min.: -20℃ Max: 10℃ (Center)	3~5 h. (80Min, 20Min) 3~6 h.	
		Air	Water			
		Air	Air			
Concrete	Water	Water	-18~4℃ (Center)	2~4 h.		
	Air	Water				
EN 13733	Bonding Material	Air	Air	-20~55℃ (Ambient)	-25℃ (333Min.) +55℃ (27Min) +55℃ (333Min) -25℃ (27Min.)	50Cycle (12h. 1cycle) Total 36,000
JSCE, 2003	Carbon Fiber	Air Air	Air Air	-20~30℃ (Surface)	-20℃ (50Min) -20℃ (Fix) +30 (10Min) +30 (10Min) (80/20Min)	300Cycle Total 30,000

Table 2 Test parameter for FRP freezing-thawing resistance

Object	Condition		fck (MPa)	FRP	Cycle	Remark
	Freeze	Thaw				
FRP	Air	Water	-	CFRP GFRP	0, 50, 100, 200, 300	Appearance Tensile Strength
Concrete Bonding	Air	Air	18	CFRP	0, 50, 100,	Appearance Bonding Strength
	Water	Water	30	GFRP	200, 300	



Fig. 1 Water-freezing and water-thawing test



Fig. 2 Air-freezing and water-thawing test

부 온도가  $-18^{\circ}\text{C}$ 가 될 때까지 동결되며  $-18^{\circ}\text{C}$ 에 도달하면 가열판으로  $4^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 융해시킨다. 동결융해 1 사이클 소요시간은 4시간 이하이며, 융해시간이 총시간의 25% 이상이 되도록 한다.

### 2) 「기건동결-수중융해」 시험기

「기건동결-수중융해」 시험기는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 챔버에 시험편을 거치하고 송풍에 의한 동결 후 급수에 의해 융해시킨다. 온도조건은 동일하며, 1사이클의 소요시간은 4시간 이하로 하고 융해시간이 총 시간의 20% 이상이 되도록 한다.

## 3.2 실험체 계획

### 3.2.1 FRP 복합체 인장강도 시험체

동결융해에 대한 FRP 복합체의 인장강도 저항성 평가를 위한 시험편은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 동결융해 과정에서 시험편 절단에 의한 노출면적을 최소화하기 위하여  $500 \times 250\text{mm}$  크기의 직사각형으로 제작한 후, 각 사이클의 동결융해가 종료된 후에  $250 \times 15\text{mm}$ 의 인장시험편 크기로 절단하여 인장시험을 실시하였다(ASTM D 3039; JIS K 7073; KS M 3381).

### 3.2.2 FRP 복합체의 콘크리트 인발접착강도

동결융해에 따른 FRP 복합체의 콘크리트 인발접착강도를 평가하기 위한 실험체는 Fig. 4에 나타난 바와 같이  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 콘크리트 블록에 대하여 4면을



Fig. 3 Test specimen for FRP freezing-thawing

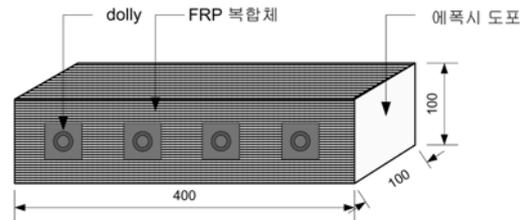


Fig. 4 Direct pull-out specimen

FRP 복합체 1매로 보강한 실험체를 계획하였다(KS F 2732). 여기서, 콘크리트 측면은 연속체 콘크리트에 FRP 복합체를 부착하는 조건을 상정하여 에폭시로 도포하여 마감하였다.

## 3.3 실험체 제작

### 3.3.1 사용 재료

재료시험에 사용된 FRP 복합체는 국내에서 상용화되고 있는 1방향 탄소섬유쉬트와 2방향 유리섬유쉬트를 대상으로 하였다. 인발접착강도 실험을 위한 콘크리트 몰드는 설계압축강도  $18\text{MPa}$  및  $30\text{MPa}$ 인 레디믹스트 콘크리트로 제작하여 콘크리트 강도의 변화에 따른 동결융해 저항성의 영향을 평가하였다. 실험에 사용된 FRP 복합체 및 각 재료의 시험 결과를 나타내면 Table 3 및 Table 4와 같다.

### 3.3.2 시험체 제작

FRP 복합체 및 콘크리트 접착성능 실험체의 제작은 각 제조사의 시방규준에 따라 제작하였다. 이와 같은 방법에

Table 3 Material properties of FRP

	Nominal Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)		Elastic Modulus (GPa)		Elongation (%)	
		Spec.	Test	Spec.	Test	Spec.	Test
CFRP	0.111	3,550	4,214	235	268	-	1.65
GFRP	0.80	560.0	761.5	25.2	32.7	2.2	2.52

Table 4 Material properties of concrete

Design Strength (MPa)	Comp. Strength (MPa)	Comp. Elastic Modulus (GPa)
18	16.4	19.2
30	26.8	24.6

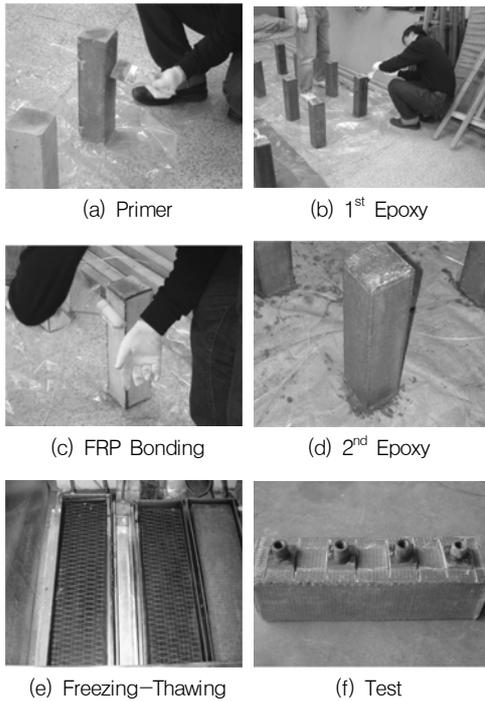


Fig. 5 Preparation of test specimens

의해 제작이 완료된 실험체는 각각 시험조건에 맞는 동결융해 시험기에 넣고 요구되는 사이클의 동결융해 과정을 거친 후에 인장시험과 인발접착강도 시험을 시행하였다. 콘크리트 인발접착강도 평가를 위한 실험체 제작과정을 나타내면 Fig. 5와 같다.

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 FRP 복합체의 인장강도

###### 4.1.1 탄소섬유쉬트 인장강도

「기건동결-수중융해」 시험조건에서 동결융해 사이클에 따른 탄소섬유쉬트의 인장강도 변화를 나타내면 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 동결융해 사이클이 진행됨에 따른 인장강도 및 변동계수의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 탄소섬유쉬트의 재료 인장강도는 동결융해에 의한 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

###### 4.1.2 유리섬유쉬트 인장강도

「기건동결-수중융해」 시험조건에 노출된 유리섬유쉬트의 인장강도 변화를 나타내면 Fig. 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 동결융해 실험진행시 200 사이클까지는 인장강도 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며, 300 사이클에서 인장강도가 약 10% 정도 감소된 것으로 나타났다.

이러한 300 사이클 시험시의 부분적인 강도저하 현상은 동결융해에 의한 영향이라기 보다는 수분환경에 지속

Table 5 Tensile strength of CFRP with test cycles

Cycle	Tensile Strength (MPa)	Standard Deviation (MPa)	X-3σ (MPa)	COV (%)
0	4,087	338	3,073	8.3
50	4,013	373	2,894	9.3
100	4,098	339	3,082	8.3
200	4,073	272	3,257	6.7
300	4,132	350	3,082	8.5

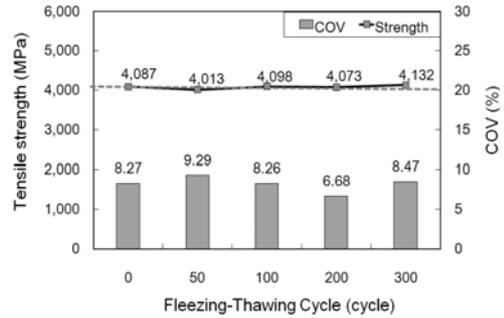


Fig. 6 Tensile strength of CFRP with test cycles

Table 6 Tensile strength of GFRP with test cycles

Cycle	Tensile Strength (MPa)	Standard Deviation (MPa)	X-3σ (MPa)	COV (%)
0	690	38.2	575	5.5
50	708	48.0	564	6.8
100	695	31.4	601	4.5
200	685	51.9	529	7.6
300	623	56.0	455	9.0

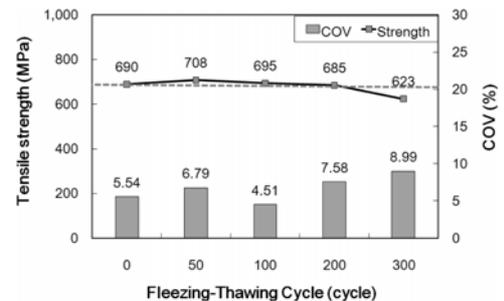
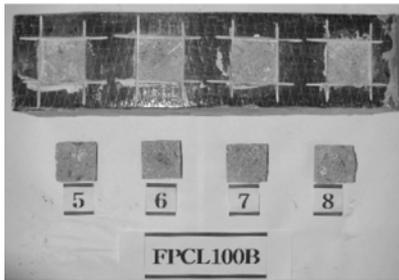


Fig. 7 Tensile strength of GFRP with test cycles

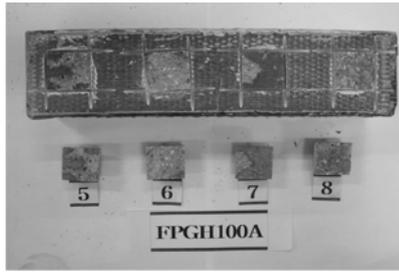
적으로 노출됨에 따라 발생하는 성능저하 이외에도 Table 6에서 보는 바와 같이 본 조건에서의 시험시 변동계수가 9.0% 정도로 증가된 것으로부터 유추할 때, 시험환경에 의한 영향이 좀 더 지배적이었던 것으로 판단된다. 따라서 유리섬유쉬트 복합체의 재료성능은 동결융해에 의한 영향이 10% 내외로 크지 않은 것으로 판단된다.

#### 4.2 콘크리트 인발접착강도

FRP 복합체와 콘크리트와의 계면 접착성능에 대한 동



(a) CFRP specimen



(b) GFRP specimen

Fig. 8 Final failure of test specimens

결융해 저항성을 평가하기 위하여 탄소섬유쉬트와 유리섬유쉬트를 부착한 콘크리트 시험체에 대하여 동결융해 사이클의 진행에 따른 인발접착강도 시험을 실시하였다. 또한, 동결융해에 따른 접착강도 시험시에는 접착성능에 영향을 미칠 것으로 판단되는 콘크리트 강도(저강도, 중강도)와 동결융해 조건(기건동결-수중융해, 수중동결-수중융해)에 대하여 5단계의 동결융해 사이클에 대하여 검토하였다.

#### 4.2.1 외관변화 및 파괴 양상

동결융해 실험의 최종 300 사이클 후 각 실험체에 대한 외관변화 및 인발접착강도 시험시의 파괴양상을 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 탄소섬유쉬트로 보강된 실험체에서는 외관상 특이한 변화가 관측되지 않았으며, 인발강도 시험시의 최종 파괴도 모두 콘크리트를 물고 떨어지는 가장 이상적인 파괴 모드를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이에 대하여 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이, 유리섬유쉬트로 보강한 실험체의 표면에는 부분적인 색깔변화 및 모서리 부분에서의 리칭(leaching) 현상이 관측되었으며, 인발강도 시험시의 최종파괴도 부분적으로 콘크리트와 유리섬유쉬트 계면에서 발생된 것으로 관측되어 부분적인 성능저하 현상이 나타난 것을 알 수 있다.

#### 4.2.2 인발접착강도

##### 1) 탄소섬유쉬트 보강 실험체

동결융해 사이클의 진행에 따른 탄소섬유쉬트로 보강된 콘크리트 실험체의 인발접착강도의 변화를 그림으로

Table 7 Direct pull-out strength of CFRP on concrete with respect to freezing-thawing cycles

Condition Cycle	Water-freezing Water-thawing (MPa)		Air-freezing Water-thawing (MPa)	
	Conc. 1 <sup>1</sup>	Conc. 2 <sup>2</sup>	Conc. 1 <sup>1</sup>	Conc. 2 <sup>2</sup>
0	2.82	2.65	2.8	2.65
50	2.76	2.67	2.77	2.58
100	2.83	2.40	3.03	2.91
200	2.62	2.52	2.22	2.24
300	2.64	2.22	3.03	2.45

1. Design compressive strength :  $f_{ck}=18\text{MPa}$

2. Design compressive strength :  $f_{ck}=30\text{MPa}$

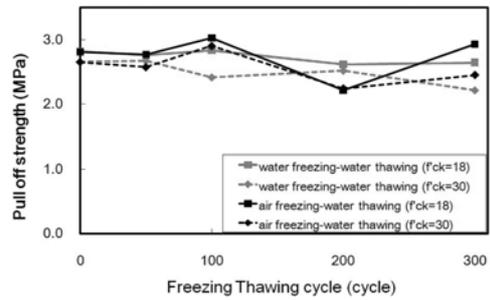


Fig. 9 Direct pull-out strength of CFRP on concrete with respect to freezing-thawing cycles

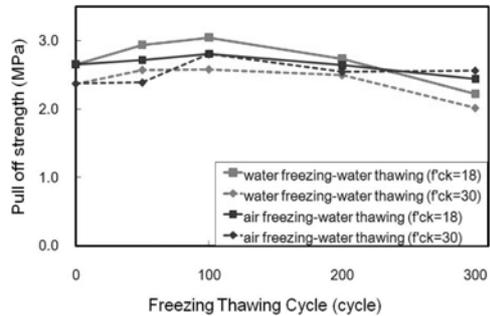


Fig. 10 Direct pull-out strength of GFRP on concrete with respect to freezing-thawing cycles

Table 8 Direct pull-out strength of GFRP on concrete with respect to freezing-thawing cycles

Condition Cycle	Water-freezing Water-thawing (MPa)		Air-freezing Water-thawing (MPa)	
	Conc. 1 <sup>1</sup>	Conc. 2 <sup>2</sup>	Conc. 1 <sup>1</sup>	Conc. 2 <sup>2</sup>
0	2.65	2.37	2.65	2.37
50	2.94	2.57	2.72	2.39
100	3.04	2.58	2.81	2.80
200	2.73	2.57	2.64	2.55
300	2.04	2.02	2.44	2.56

1. Design compressive strength :  $f_{ck}=18\text{MPa}$

2. Design compressive strength :  $f_{ck}=30\text{MPa}$

나타내면 Fig. 9와 같으며, 각 실험을 통하여 얻어진 부착강도 값을 도표로 나타내면 Table 7과 같다. Fig. 9에서

Table 9 Direct pull-out strength of CFRP on concrete after 300 ( $f_{ck}=18\text{MPa}$ , Water-freezing Water-thawing)

No.	Pull-off Load (N)	Bonding Area ( $\text{mm}^2$ )	Bonding Strength (MPa)	Failure
1	5,190	1,936	2.68	Conc. Failure
2	4,830	1,936	2.49	"
3	5,140	1,936	2.65	"
4	4,918	1,936	2.54	"
5	4,148	1,936	2.14	"
6	6,578	1,936	3.40	"
7	4,654	1,936	2.40	"
8	5,468	1,936	2.82	"
avg.	5,116		2.64	

Table 10 Direct pull-out strength of CFRP on concrete after 300 ( $f_{ck}=18\text{MPa}$ , Air-freezing Water-thawing)

No.	Pull-off Load (N)	Bonding Area ( $\text{mm}^2$ )	Bonding Strength (MPa)	Failure
1	4,292	1,936	2.22	Bond Failure
2	6,872	1,936	3.55	Conc. Failure
3	5,586	1,936	2.89	"
4	5,658	1,936	2.92	"
5	4,696	1,936	2.43	"
6	5,822	1,936	3.01	"
7	5,948	1,936	3.07	"
8	6,536	1,936	3.38	"
avg.	5,676		2.93	

보는 바와 같이 동결융해 사이클 진행에 따른 탄소섬유쉬트 보강된 콘크리트 실험체의 인발접착강도는 큰 변동이 없으나, 200 사이클에서의 「기건동결-수중융해」 실험조건에서만 다소 낮은 값을 나타내고 있어 실험편차가 있었던 것으로 판단된다.

#### 2) 유리섬유쉬트 보강 실험체

동결융해 사이클의 진행에 따른 유리섬유쉬트로 보강된 콘크리트 실험체의 인발접착강도의 변화를 나타내면 Fig. 10과 같으며, 각 실험을 통하여 얻어진 부착강도 값을 도표로 나타내면 Table 8과 같다. Fig 10에서 보는 바와 같이 동결융해 사이클 진행에 따른 유리섬유쉬트로 보강된 콘크리트 실험체의 인발접착강도는 100 사이클 이후 서서히 저하되다가 300 사이클 시험 후에는 약 10~15% 정도 강도가 감소된 것으로 나타났다. 이는 동결융해 저항성에 대한 인장강도 시험결과와 유사한 것으로 이에 대한 분석이 요구된다.

이와 같이 300 사이클 시험 후에 유리섬유쉬트 보강 실험체에서 관측되는 강도저하 현상을 분석하기 위하여 최종 300 사이클시의 세부 실험결과를 표로 나타내면 Table 9~12와 같다. Table 9~10에서 보는 바와 같이 탄소섬

Table 11 Direct pull-out strength of GFRP on concrete after 300 ( $f_{ck}=18\text{MPa}$ , Water-freezing Water-thawing)

No.	Pull-off Load (N)	Bonding Area ( $\text{mm}^2$ )	Bonding Strength (MPa)	Failure
1	2,800	1,936	1.45	Bond Failure
2	4,700	1,936	2.43	"
3	2,952	1,936	1.52	"
4	3,080	1,936	1.59	"
5	5,374	1,936	2.78	Conc. Failure
6	6,000	1,936	3.10	"
7	5,220	1,936	2.70	"
avg.	3,953		2.22	

Table 12 Direct pull-out strength of GFRP on concrete after 300 ( $f_{ck}=18\text{MPa}$ , Water-freezing Water-thawing)

No.	Pull-off Load (N)	Bonding Area ( $\text{mm}^2$ )	Bonding Strength (MPa)	Failure
1	3,626	1,936	1.87	Bond Failure
2	4,474	1,936	2.31	"
3	5,600	1,936	2.89	"
4	4,484	1,936	2.32	"
5	4,412	1,936	2.28	"
6	3,644	1,936	1.88	Conc. Failure
7	5,234	1,936	2.70	"
8	6,328	1,936	3.27	"
avg.	4,725		2.44	

유쉬트 보강 실험체는 모두 콘크리트 면에서 파괴가 관측된 반면, Table 11~12의 유리섬유쉬트 보강 실험체는 동결융해 시험조건에 관계없이 약 50% 정도의 시험체에서 부분적인 계면파괴가 관측되었으며, 이로 인하여 인발접착강도가 저하된 것으로 나타났다. 이와 같은 성능저하 현상은 수중융해 과정을 통하여 유리섬유복합체가 직접 물과 접촉됨에 따라 섬유 부분적인 리칭(leaching)현상 및 섬유와 수지계면에서 실란제 coupling agent의 부착력이 약해진 것에 기인하는 것으로 판단된다(CEB-FIP, 2001).

#### 4.3 관련 기준 검토

국내에는 아직 FRP 복합체에 의한 보강설계 관련 규준이 제정되어 있지 않으며, 선진 외국에서도 최근에 학회 및 전문위원회를 중심으로 규준(안)이 제안되고 있는 실정이다. 그 중에서 미국 ACI440 위원회에서는 FRP 복합체에 의한 콘크리트 구조물의 보강공사를 위한 설계·시공지침을 제안하고 있으며, 그 안에 FRP 복합체의 장기내구성을 고려한 환경감소계수 CE를 Table 13과 같이 제안하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 ACI440 위원회에서 제안한 환경감소계수 CE 값을 중심으로 본 연구의 실

Table 13 Environmental reduction factor (ACI440, 2R-08)

Condition	Fiber/resin type	Environmental reduction factor (CE)
Interior exposure	Carbon/epoxy	0.95
	Glass/epoxy	0.75
	Aramid/epoxy	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, etc)	Carbon/epoxy	0.85
	Glass/epoxy	0.65
	Aramid/epoxy	0.75
Aggressive environment	Carbon/epoxy	0.85
	Glass/epoxy	0.5
	Aramid/epoxy	0.7

험결과를 비교·검토하여 내구성 저하특성을 설계에 반영하기 위한 방안을 검토하였다.

#### 4.3.1 탄소섬유쉬트 복합체

에폭시를 결합제로 사용하는 탄소섬유복합체는 내구성이 매우 우수한 것으로 알려져 왔으며, 이에 따라 ACI440 위원회에서는 장기 내구성에 대한 환경감소계수로서 실내조건의 경우 0.95, 극심한 외부환경을 포함한 실외조건인 경우에도 0.85를 적용할 것을 제안하고 있다. 이에 대하여 동결융해 저항성 평가를 위한 본 실험결과에 의하면 KS F 2456에서 규정한 모든 실험조건 내에서 탄소섬유복합체의 인장강도는 물론 콘크리트에 대한 부착강도가 거의 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 현행 제안된 탄소섬유쉬트에 대한 환경감소계수는 적절히 안전측인 것으로 판단된다.

#### 4.3.2 유리섬유쉬트 복합체

유리섬유 자체는 알칼리에 취약하며, 열경화성 수지와 결합된 유리섬유에 수분이 침투하면 silane계 coupling agent의 부착력이 저하되어 역학적 성능이 저하되는 것으로 보고되고 있다. 특히, 유리섬유에 지속적으로 수분이 공급되면 리칭(leaching)현상에 의해 섬유강도 자체의 성능저하가 발생하는 것으로 보고되고 있다(CEB-FIP, 2001). 이에 따라 ACI440 위원회에서는 유리섬유복합체에 대한 장기 내구성에 대한 환경감소계수로서 0.75~0.5의 매우 낮은 값을 제안하고 있다.

이에 대하여 동결융해 저항성 평가를 통해 얻어진 본 실험결과에 의하면, 수중융해 과정을 통하여 유리섬유복합체에 수분공급이 지속적으로 이루어짐에 따라 최종 300 사이클 후의 실험에서 약 10~15% 정도의 강도저하가 발생된 것으로 나타났다. 이러한 강도저하 비율은 ACI 440에서 제안하고 있는 외부노출 환경에 대한 감소계수인 0.65에 비하여 상대적으로 작은 값으로, 현행 제안된 유리섬유쉬트에 대한 환경감소계수가 지나치게 안전측으로 설정된 것으로 판단된다.

한편, 본 연구의 FRP 복합체와 콘크리트의 부착성능에 대한 동결융해 저항성 실험은 연속체인 콘크리트에 FRP 복합체가 부착된 경우를 상정하여 실시된 것으로서, 하천 교량의 피어와 같이 구조체의 표면으로부터 지속적으로 동결수가 공급되는 경우에는 상이한 결과가 나타날 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 FRP 복합체로 보강된 콘크리트 구조물의 동결융해 저항성을 평가하기 위한 실험연구의 일환으로써, KS F 2456 시험규격에 의한 동결융해 시험을 통하여 각 사이클 별 FRP 복합체의 인장강도 및 콘크리트에 대한 인발접착강도의 변화를 측정하기 위한 실험을 실시하였다. 이상의 실험으로부터 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

#### 1) 탄소섬유쉬트 복합체

① KS F 2456 시험규격의 「기건동결-수중융해」 시험조건에 따라 실시된 동결융해 진행단계 별 탄소섬유쉬트 복합체의 인장강도는 최종 실험단계까지 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

② 탄소섬유쉬트 복합체와 콘크리트와의 계면부착성능에 대한 동결융해 저항성을 평가해 보면, 최종 실험단계에서의 외관변화, 사이클별 인발접착강도 및 파괴양상에 있어서 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서, 탄소섬유복합체의 동결융해 저항성은 매우 우수한 것으로 판단된다.

#### 2) 유리섬유쉬트 복합체

① 「기건동결-수중융해」 시험조건에 따라 실시된 유리섬유쉬트 복합체의 인장강도는 최종 실험단계에서 약 10% 정도의 강도저하가 발생된 것으로 나타났다. 이러한 유리섬유쉬트 복합체에서 관측된 부분적인 강도저하 현상은 융해과정에서 수분환경에 대한 지속적인 노출 및 시험편차 등의 외부환경 영향이 좀 더 지배적이었던 것으로 판단된다.

② 유리섬유쉬트 복합체와 콘크리트와의 계면부착성능에 대한 동결융해 저항성을 평가해 보면, 최종 실험단계에서 인발접착강도가 약 10~15% 내외로 저하되었으며, 파괴모드 측면에서도 계면에서의 부분적인 파괴가 나타난 것으로 관측되었다. 따라서, 유리섬유쉬트 복합체는 동결융해 저항성능이 부분적으로 저하되는 것으로 판단된다.

#### 3) 환경감소계수 CE

① 탄소섬유쉬트 복합체의 내구성 고려를 위해 현행 ACI440 위원회에서 제시하고 있는 환경감소계수 CE (0.9~0.85)는 본 실험의 동결융해 실험결과와 비교해 볼 때 적절히 안전측인 것으로 판단된다.

② 유리섬유시트 복합체의 동결융해 진행에 따른 인장강도 및 부착강도 저하율은 각각 10% 및 15% 정도로서, ACI 400위원회에서 제시하고 있는 환경감소계수 CE (0.75~0.5)는 본 연구의 실험결과와 비교해 볼 때 지나치게 안전측인 것으로 판단된다.

③ 본 실험결과는 연속체인 콘크리트에 FRP 복합체를 부착된 경우를 상정하여 실시된 것으로서, 지속적으로 동결수가 공급되는 경우에는 상이한 결과가 나타날 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 김공환 외, 건축구조물 보수보강 공법의 성능평가에 관한 연구, 건설교통부/한국건설기술연구원, 2001, pp.5-14.
2. 유영찬 외, 시설물 보강공법 성능인증을 위한 시험항목·방법 및 평가기준 설정 연구, 건설교통부/한국건설교통기술평가원, 2006, pp.488-501.
3. KS F 2456, “급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험 방법,” 한국산업규격, 2003.
4. KS F 2604, “건축용 외벽재료의 내동해성 시험 방법 (동결융해법),” 한국산업규격, 2003.
5. KS F 2732 “콘크리트 압축강도 추정을 위한 인발강도시험 방법” 한국산업규격, 2003.
6. KS M 3381, “유리섬유 강화 플라스틱의 인장시험 방법” 한국산업규격, 2004.
7. 土木學會コンクリト委員會, 連續纖維シートを用いたコンクリト構造物の補強設計指針, 日本土木學會, 2003, pp.103-105.
8. 土木學會コンクリト委員會, コンクリト構造物の補強指針(案), 日本土木學會, 1999.
9. JIS A 1435-1991, “建築用外壁材料の耐凍害性試験方法(凍結融解法)”, 1991.
10. JIS K 7073, “炭素纖維強化プラスチックの引張試験方法”, 1988
11. ACI 440.2R-08, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, ACI Committee 440, 2008, p.24.
12. ASTM D 3039, “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials”, 2000.
13. CEB-FIP, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Technical report, bulletin 14, 2001, p.111.
14. EN 13733, “Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of durability of structural bonding agents”, 2002.
15. Hollaway, L.C., and Leeming, M.B., “Strengthening of Reinforced Concrete Structures using Externally-bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering”. CRC Press, England, 1999, pp.327.
16. ISIS Canada., Strengthening reinforced concrete structures with externally-bonded fibre reinforced polymers, Design Manual, 2001.
17. Sika, “Sika CARBODUR Composite Strengthening Systems-Flexural Strengthening with Sika Wrap FRP Fabrics”, 1999.

(접수일자 : 2009년 8월 7일)  
(심사완료일자 : 2009년 12월 11일)

### 요 지

본 논문에서는 FRP 복합체로 보강된 콘크리트 구조물의 동결융해 저항성을 평가하기 위하여 동결융해 진행에 따른 FRP 복합체의 인장강도 및 콘크리트에 대한 인발접착강도의 변화를 측정하였다. 주 실험변수는 동결융해 조건, FRP 복합체의 종류, 동결융해 사이클로 설정하였다. KS F 2456의 동결융해 시험규격에 따라 실시된 탄소섬유복합체의 인장강도는 최종 사이클까지 변화가 없었으며, 또한 접착성능의 저하도 관측되지 않아 CFRP의 동결융해 저항성은 매우 우수한 것으로 나타났다. 이에 대하여 유리섬유복합체의 경우는 최종 사이클에서의 인장강도 및 인발접착강도가 각각 10%, 15% 저하된 것으로 나타나 부분적으로 성능이 저하되는 것으로 나타났다. 그러나 접착강도 평가시 지속적인 동결수가 공급되는 상황에서는 상이한 결과가 나타날 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심 용어** : 동결융해, 내구성, FRP 복합체, 인장강도, 인발접착강도