

실리카폼 및 메타카올린 치환률에 따른 고강도 콘크리트와 탄소섬유보강 폴리머 보강근의 부착거동

Bond Behavior of Carbon Fiber Polymer Reinforced Polymer Rebar in High Strength Concrete with Replacement Ratio of Silica Fume and Metakaolin

박찬기*† · 원종필** · 김종옥***

Park, Chan-Gi*† · Won, Jong-Pil** · Kim, Jong-Ok***

Abstract

This study is to relate the bond characteristics of CFRP rebar in high strength concrete incorporated with silica fume(SF) and metakaolin(MK). An direct bond test were performed to evaluate the effect of SF and MK on bond properties of high-strength concrete and CFRP rebar. The high strength concrete mix included four SF and MK mixes with 0%, 5%, 10% and 15%. Results of bond performance experiment in relation to pullout vs slip behavior of FRP rebar and high strength showed better performance of SF than MK. Also, the results showed the improved bond strength as replacement ratio of SF and MK increased. The relative bond strength in which 1.3~3.2 of estimated values were obtained.

Keywords : Bond characteristics, CFRP rebar, High strength concrete, Metakaolin, Silica fume.

I. 서 론

새만금 방조제를 비롯한 농업기반 콘크리트 구조물 등은 부식의 우려가 매우 높은 해양 콘크리트 구조물로서, 장기적으로 철근부식에 의한 성능 감소로 발전하여 보수 및 유지관리 비용을 향상시키는 문제점을 노출하고 있다(Kim 등, 2008). 농업기반 콘크리트

구조물은 특성상 수리구조물이 많으며, 항상 물과 접촉하고, 겨울철에는 동결융해 반복에 의한 영향을 받아 콘크리트의 열화를 발생시키며, 이로 인하여 콘크리트의 투수성을 증가시켜 보강재인 철근의 부식을 조기에 발생시킨다. 철근의 부식은 단면손실과 팽창을 발생시킴으로서 콘크리트의 탈락을 유발하는 동시에 구조성능을 감소시킨다(Won 등, 2007a; Park 등, 2001). 따라서, 농업기반 콘크리트 구조물은 사용수명이 일반 콘크리트 구조물에 비하여 현저히 짧은 문제점을 노출시키게 된다(Park 등, 2001). 철근 부식에 의한 콘크리트 구조물의 성능감소는 농업기반 콘크리트 구조물 뿐만아니라 다양한 사회기반시설물에서도 중요한 문제로 부각되고 있다(ACI 440H, 2000; Won 등, 2006). 이와 같은 문제점을 해결하

* 공주대학교 산업과학대학 지역건설공학전공
** 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과
*** 공주대학교 산업과학대학 지역건설공학전공
† Corresponding author. Tel.: +82-41-330-1266
Fax: +82-41-330-1269
E-mail address: cgpark@kongju.ac.kr

2008년 7월 19일 투고
2008년 9월 17일 심사완료
2008년 9월 18일 게재확정

고자 다양한 연구가 진행되고 있다. 철근부식에 대한 문제를 해결하기 위하여 가장 많이 진행되고 있는 연구로는 콘크리트의 성능을 향상시킨 폴리머 콘크리트를 포함한 고성능콘크리트를 적용하는 연구 (Sung 등 2007; Kim 등, 2007)와 보강철근의 부식을 억제하기 위하여 에폭시 도막철근을 사용하는 방법, 스테인레스 스틸을 보강철근의 대체재료로 사용하는 방법 등 다양하게 진행되어 왔다(Won 등, 2007b,c). 그러나 에폭시 도막철근의 경우 운반 및 시공시 도막이 벗겨진 부분에 응력집중 등의 문제가 발생하여 부식을 촉진하는 경우가 발생하여 궁극적인 해결책이 되지 못하며, 스테인레스 스틸을 보강철근의 대체재료로 사용한 경우 전식에 의한 부식이 발생하는 등의 문제점이 있다(ACI 440H, 2000). 따라서, 이러한 문제점을 궁극적으로 해결하고자 비부식성의 섬유보강 폴리머 보강근(Fiber reinforced polymer rebar; FRP rebar)에 대한 연구가 진행되고 있으며, 노후화된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강재료로는 국내에서는 널리 이용되고 있다. 외국의 경우 신규로 건설되는 교량 구조물 및 수리구조물에 적용이 증가하고 있다(Won 등, 2007b,c, ACI 440H, 2000; Galati 등, 2006). 한편, 해양환경과 수분에 항상 접촉해 있는 콘크리트 구조물의 경우 콘크리트 자체의 열화 문제를 해결하기 위하여 콘크리트의 성능을 증가시키기 위한 연구가 진행되고 있으며, 가장 널리 사용되는 방법이 실리카폼 등 광물질 혼화제를 사용하는 방법이다(Won 등, 2002; Kim 등, 2007). 콘크리트 구조물은 최근 들어 수리구조물 뿐만 아니라 대부분의 구조물이 대형화, 장대화, 대단면화 및 초고층화 되면서 이와 같은 구조물의 성능을 만족시킬 수 있는 고강도 콘크리트의 적용에 대한 연구와 관심이 증가하고 있다(Won 등, 2007b,c; Mazloom 등, 2004; Shannag 등, 2002; Chen 등, 2004). 고강도 콘크리트는 일반 콘크리트와 비교하여 골재의 크기를 감소시키고, 공극을 밀실화하며 미소구조를 강화한 재료이다(Reda 등, 1999). 콘크리트의 고강도화는 콘크리트 매트릭스의 밀실화를 통하여 접근하고 있는데, 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법은 물-시멘트 비를 낮게 하고 실리카폼을 포함한 광물

질 혼화제를 첨가하여 CaO-SiO₂비를 낮게 함으로써 달성하고 있다(Bonneau 등, 2000). 특히 실리카폼은 장기 내구성이 우수하고 화학적 내구성이 우수하여 고강도 콘크리트에 가장 널리 적용되는 재료이다 (Abdul Razak 등, 2005a). 그러나 국내의 경우 실리카폼이 생산되지 않기 때문에 수입에 전적으로 의존하고 있다. 최근 실리카폼의 대체재료로 메타카올린을 혼합하는 연구가 진행되고 있다(Won 등, 2002). 메타카올린은 균질하게 성분 조합한 카올린을 특수한 전처리를 거친 후 이를 소성하여 활성화시킨 다음, 일정한 입도로 미분화한 것이다. 메타카올린은 시멘트의 혼화재료로 사용함으로써 콘크리트의 각종 물성을 개선시키는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Jean Para 등(1998), Wong 등, 2005). 특히 메타카올린은 단기적으로 에트린자이트(ettringite)의 생성과 시멘트 중의 주요광물인 알라이트(alite)의 활성화로 인한 반응속도의 증가로 초기강도를 증가시키고 장기적으로 시멘트의 수산화칼슘과 포졸란반응으로 콘크리트 조직이 치밀화되어 강도 및 내구성을 향상시킴으로써 고강도 콘크리트에 적합한 것으로 알려지고 있다(Moulin 등, 2001). 메타카올린은 실리카폼에 비하여 국내 자원이 풍부하고 고강도 콘크리트에 적용시 경제성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 메타카올린 및 실리카폼 치환률이 고강도 콘크리트와 FRP 보강근의 부착특성에 미치는 영향을 평가하였다. FRP 보강근은 인장강도/단위중량의 비가 크기 때문에 콘크리트 구조물의 자체중량과 콘크리트 단면을 감소시킬 수 있는 장점과 무엇보다도 부식의 위험성이 없어 해양구조물 및 수리구조물에 적용하면 우수한 성능을 발휘할 수 있다(Tughiouart 등, 2006). 그러나 FRP 보강근이 콘크리트에서 우수한 성능을 발휘하기 위해서 고려되어야 할 특성 중에 하나가 콘크리트와 FRP 보강근의 부착 특성이다 (Focacci 등, 2000; Haddad 등, 2004). 그 이유는 콘크리트 구조물이 받는 하중은 콘크리트 매트릭스로부터 FRP 보강근으로 전달되기 때문이다(Haraji 등, 1994). FRP 보강근과 콘크리트 매트릭스가 부착성능이 낮으면 보강철근과 비교하여 충분한 보강효과를 달성할 수 없다(Cosenza 등, 1987). 그러므

로 FRP 보강근과 콘크리트와의 부착특성은 충분히 평가되어야 한다. 본 연구에서는 고강도 콘크리트에서 메타카올린 및 실리카폼이 FRP 보강근의 부착 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

II. 실험계획

1. 재료

1종 포틀랜드 시멘트(Table 1)와 비중 2.61의 잔 골재 및 굵은골재 최대치수 13mm의 부순 골재, 실

리카폼(Table 2), 메타카올린(Table 3)과 폴리카본 산계 고성능감수제와 공기연행제를 사용하였다. 실리카폼과 메타카올린의 화학적 성분을 비교해 보면 실리카폼은 SiO₂가 주성분으로 되어있는 반면 메타카올린은 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분인 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 국내 D사에서 제조한 CFRP 보강근(carbon fiber reinforced polymer rebar)을 사용하였다. 보강근은 직경 9mm로 탄소섬유와 비닐에스터 수지로 심부가 구성되어 있으며, 표면은 브레이딩 기술을 이용하여 리브를 주는 방식의 표면처리 방법이 적용되었다. 이와 같은 표면처리 기술을 사용한 이유

Table 1 Physical and chemical properties of cement

Physical properties	Fineness (cm ² /g)	Specific gravity	Stability (%)	Setting time		Compressive strength(MPa)		
				Initial (min)	Final (min)	3 days	7 days	28 days
	3,200	3.15	0.02	220	400	20	30	38
Chemical properties	L.O.I* (%)		MgO (%)		SO ₃ (%)			
	1.5		3.0		2.0			

* Loss on ignition

Table 2 Physical and chemical properties of silica fume

Specific gravity	L.O.I (%)	Fineness (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)
2.2	2.8	180,000 ~ 200,000	94.0	0.3	0.8	0.3	0.4	0.8	0.2

Table 3 Physical and chemical properties of metakaolin

Specific gravity	L.O.I (%)	Specific surface (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)
2.62	0.50	12,680	52.1	41.0	4.3	0.1	0.2	0.9

Table 4 Mix proportion of high strength concrete

Mix type	W/B (%)	S/a (%)	Unit materials contents(kg/m ³)								
			W	B [*]	C	Coarse agg.	Fine agg.	MK ^{**}	SF ^{***}	HRWRA ^{****}	AE ^{*****}
Control	25.0	42.0	165	660	660	889.80	597.81	-	-	11.88	0.396
SF5					627			-	33		
SF10					594			-	66		
SF15					561			-	99		
MK5					627			33	-		
MK10					594			66	-		
MK15					561			99	-		

* : Binder(cement + mineral admixture)

** : Metakaolin

*** : Silica fume

**** : High range water reducing admixture

***** : Air entraining admixture

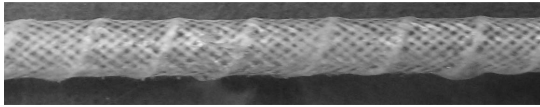


Fig. 1 Photo of CFRP rebar used in this study

는 심부 FRP 보강근과 표면처리 부분의 분리로 인하여 발생하는 부착성능의 감소를 해결하기 위한 것으로 표면처리를 위한 브레이딩 과정에 사용된 섬유는 PVA 섬유이다. FRP 보강근의 형상은 Fig. 1과 같다.

2. 배합설계

본 연구에서는 실리카폼과 메타카올린 치환률에 따른 고강도 콘크리트와 CFRP 보강근의 부착거동을 평가하기 위하여 Table 4와 같은 배합을 사용하였다. 실리카폼과 메타카올린은 시멘트 중량의 5, 10 및 15%를 각각 치환하였다.

III. 실험방법

1. CFRP 보강근 인장시험

CFRP 보강근의 인장거동을 평가하기 위하여 ACI 440K에서 제시하고 있는 기준에 따라 인장시험을 실시하였다(ACI Committee 440K, 2002). FRP 보강근의 인장시험은 변위를 조절할 수 있는 250KN 용량의 UTM을 사용하여 재하속도 5mm/min으로 시험을 실시하였으며, FRP 보강근의 변형률을 측정하기 위해서 스트레인게이지를 부착하였다.

2. 압축강도 시험

실리카폼 및 메타카올린을 혼입한 고강도 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위하여 KS F 2405에 따른 압축강도 시험을 실시하였다. 압축강도를 측정하기 위한 공시체의 크기는 직경 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 이용하였으며, 실험은 콘크리트 공시체를 제작한 다음 23±2℃의 온도와 상대습도 50±2%의 실내에서 24시간 동안 초기양생을 실시 후, 탈형하여 23±2℃의 물속에서 수중 양생을 실시

하였다. 재령 28일간 수중양생을 실시한 후, 각 배합 변수 마다 다섯 개의 공시체에 대한 압축강도를 측정하였으며, 압축강도시험은 2,000KN 용량의 UTM을 이용하였다.

3. 부착실험

부착실험은 GFRP 보강근의 부착실험을 실시한 Vijay(1999) 및 AFRP 보강근의 부착실험을 한 Soroushian 등(2002)이 사용한 원주형 공시체를 이용한 시험을 실시하였다. 부착실험 공시체의 제작은 150mm×300mm(직경×높이)의 원주형 몰드를 이용하였다. 부착실험용 몰드의 제작을 위해서 CFRP 보강근을 공시체 내부에 넣고 콘크리트를 타설하였는데, 이때 CFRP 보강근과 콘크리트의 정착구간은 CFRP 보강근 직경의 5배로 결정하였다. 즉, 정착길이는 45mm이며 비부착구간은 플라스틱관(plastic pipe)을 이용하였다. CFRP 보강근의 정착구간을 원주형 공시체의 중앙에 위치시키기 위하여 비부착 구간에 직경 30mm 플라스틱관을 설치하여 CFRP 보강근과 고강도 콘크리트 사이의 정착을 방지하였다. 그런 다음 원주형 몰드에 콘크리트를 타설한 후, 23±2℃의 온도와 상대습도 50±2%의 실내에서 24시간 동안 양생을 실시한 후 탈형하여, 28일간 23±2℃의 물속에서 수중 양생을 실시 한 후 다섯 개의

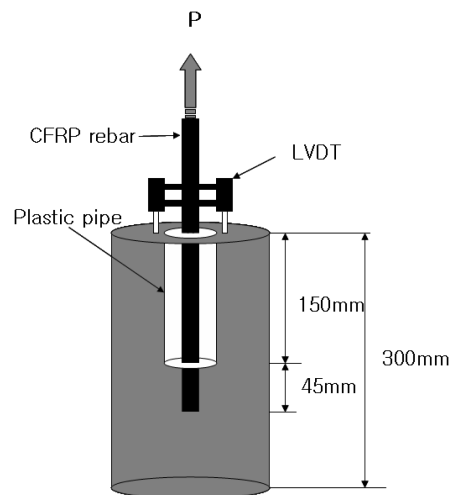


Fig. 2 Bond test specimens

공시체에 대하여 부착실험을 실시하였다. 부착실험은 250KN 용량의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 이용하였는데, 하중재하속도는 5mm/min으로 실험을 실시하였으며, 슬립(slip)을 측정하기 위해서 LVDT를 이용하였고, 부착강도 공시체의 형상은 Fig. 2와 같다.

IV. 시험결과 및 고찰

1. 인장특성

CFRP 보강근의 인장시험결과는 Table 5와 같다. 시험결과 CFRP 보강근의 인장강도는 약 2,047MPa로 나타났으며, 탄성계수는 120,876MPa로 나타났다. CFRP 보강근의 인장특성은 기존 CFRP 보강근과 큰 차이는 없었다(Won 등, 2007c).

Table 5 Tensile test results of FRP rebars

No. of specimens	Tensile strength (MPa)	Strain (%)	Elastic modulus (MPa)
1	2,120.56	1.93	109,873.52
2	1,995.37	1.78	112,099.44
3	2,032.82	1.51	134,623.84
4	2,043.23	1.61	126,908.70
Mean	2,047.99	1.71	120,876.37

2. 압축강도

본 연구에서는 실리카폼 및 메타카올린 치환률의 상한선을 15%로 결정하였다. 이와 같은 이유는 기존 연구자들의 연구결과를 분석한 결과 실리카폼 및 메타카올린 치환률에 따른 압축강도 및 인장강도 등 역학적 특성이 치환률이 15%일 때 까지는 일반적으로 증가하나, 20%이상으로 증가하면 역학적 특성이 감소하는 경우가 발생 한다는 연구결과가 있다(Kim 등, 2007). 따라서 본 연구에서는 이와 같은 연구결과를 고려하여 치환률의 상한선을 15%로 하였다.

실리카폼 및 메타카올린 치환률에 따른 고강도 콘크리트의 압축강도 시험결과는 Fig. 3과 같이 실리카폼 및 메타카올린의 치환률이 증가할수록 압축강도가 증가하였다. 기존 공시체의 경우 재령 28일에

서 74MPa를 나타내었으며, 실리카폼의 혼입률이 5, 10 및 15%로 증가함에 따라 압축강도는 각각 약 79, 82 및 84MPa로서 기존 공시체의 강도에 비교하여 6.75, 10.8 및 13.51% 증가하였다. 한편 메타카올린의 혼입률이 5, 10 및 15%로 증가함에 따라 압축강도는 각각 약 75, 78 및 81MPa로서 기존 공시체의 강도에 비교하여 1.35, 5.40 및 9.45% 증가하였다. 본 연구의 압축강도 시험결과 실리카폼 및 메타카올린 치환률이 같은 경우 실리카폼을 치환한 배합이 강도 증가가 약간 크게 나타났다. 그러나 실리카폼 및 메타카올린 치환률에 따른 압축강도의 증가는 크게 나타나지 않았다. 기존 연구결과를 살펴보면 기존콘크리트의 강도가 약 70MPa인 경우 실리카폼 및 메타카올린을 15% 치환하였을 때 강도가 약 76~80MPa 정도로 크게 증가하지 않았다(Kim 등, 2007). 이와 같은 경향은 일반적으로 기존 콘크리트의 압축강도가 클수록 나타나는데, 물-시멘트비가 30%정도이고 기존 공시체의 압축강도가 약 67~70MPa 인 경우 실리카폼 치환률이 15%일 때 압축강도가 83MPa 정도를 나타내며, 기존 공시체의 압축강도가 약 82MPa인 경우 실리카폼 치환률 15%에서는 93~95MPa 정도의 압축강도를 나타내는 것으로 보고하고 있다(Poon 등, 2005). 또한, 물-시멘트비가 35%인 고강도 콘크리트의 경우 기존 공시체의 압축강도는 약 60.4MPa 일 때 메타카올린 및 실리카폼을 10%치환하였을 경우 각각 71.6 및 69.1MPa로 압축강도의 증가율이 크지 않았다(Bhanja 등, 2005). 압축강도 시험결과 실리카폼 5 및 10%

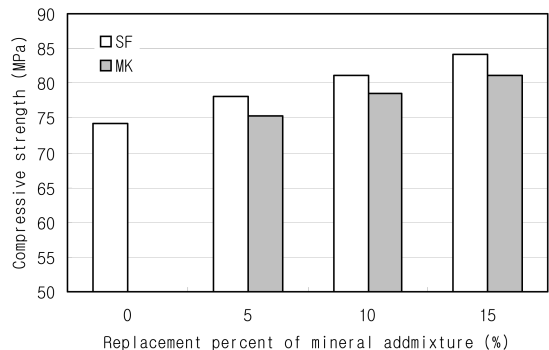


Fig. 3 Compressive strength results with replacement percent of SF and MK

를 치환한 경우와 메타카올린 10 및 15%를 치환한 경우와 비슷한 강도를 나타내었다. 이는 메타카올린의 경우 약 10% 이상이 되어야 콘크리트에서 충분한 효과를 발휘한다는 기존 연구결과와 일치한다 (Abdul 등, 2005).

3. 부착특성

가. 부착하중과 슬립거동과의 관계

실리카폼과 메타카올린의 치환률에 따른 부착하중과 슬립거동의 거동 특성은 Fig. 4와 같다. 실험결과 실리카폼과 메타카올린의 치환률이 증가할수록 인발하중이 크게 나타났으며 특히 최대 인발하중에 도달한 후 급격한 뽀침현상이 발생되지 않았다. 최고 하중까지 도달하기 전까지의 슬립도 실리카폼 및 메타카올린의 치환률이 증가할수록 작은 경향을 보여 주

었다. 즉, 최고하중에 도달할 때까지의 슬립이 실리카폼 및 메타카올린의 치환률이 커질수록 작아진다는 것은 CFRP 보강근과 고강도 콘크리트 사이의 부착계면이 강화되기 때문에 동일한 하중에서 CFRP 보강근의 인발에 대한 저항력이 강화 된다는 것을 알 수 있다. 최고하중에 도달한 후 거동에서도 실리카폼 및 메타카올린의 치환률이 증가할수록 급격한 인발이 발생하지 않고 점차적으로 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 최고하중 후에 거동에서 동일한 슬립에서 하중이 실리카폼 및 메타카올린의 혼입률이 증가할수록 크다는 것으로 실리카폼 및 메타카올린 치환률의 증가는 최고하중 후에 CFRP 보강근의 인발에 저항력을 증가시키기 때문이다.

나. 부착강도

실리카폼 및 메타카올린의 치환률에 따른 고강도 콘크리트와 CFRP 보강근의 부착강도 계산은 식 1에 따라 실시하였다.

$$\tau = \frac{P_{max}}{2\pi rL} \quad (1)$$

여기서, τ = 부착강도, P_{max} = 최대인발하중, r = CFRP 보강근의 직경, L = CFRP 보강근의 정착길이이다. 실리카폼 및 메타카올린의 치환률에 따른 부착실험 결과는 Fig. 5~6과 같다.

부착강도 실험결과 실리카폼 및 메타카올린의 치환률이 증가할수록 부착강도는 증가하는 경향을 보여주었다. 기준 공시체의 부착강도는 11.68 MPa를 나타내었고, 실리카폼을 5, 10 및 15% 치환한 배합에서는 각각 13.88, 17.31 및 19.34 MPa를 나타내었다. 메타카올린을 5, 10 및 15% 치환한 배합에서는 각각 13.09, 16.55 및 18.37 MPa를 보여주었다. 부착강도의 증가율은 실리카폼의 치환률이 5, 10, 및 15%로 증가함에 따라 각각 18.81, 48.16 및 65.51%이며, 메타카올린의 치환률이 5, 10 및 15%로 증가함에 따라 각각 12.05, 41.70 및 57.19%이었다. 이는 실리카폼 및 메타카올린은 콘크리트의 내부구조를 밀실하게 하여 CFRP 보강근과 콘크리트사이의 계면을 밀실하게 만들어주기 때문이며 압축강도 시험결과에서 알 수 있듯이 부착강도의 증가로 나타났

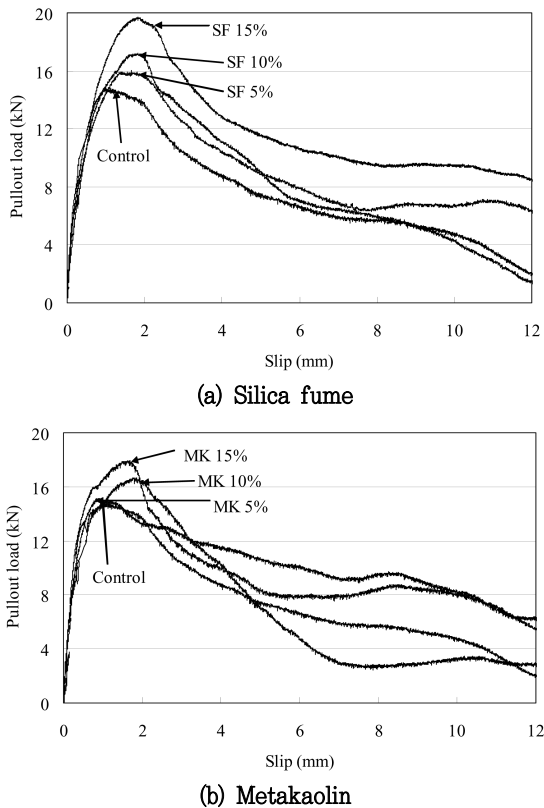


Fig. 4 Pullout load- slip curves associated with replacement percent of SF and MK

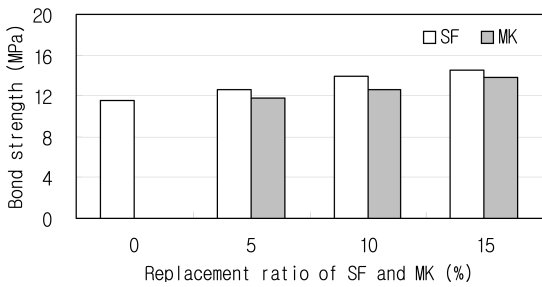


Fig. 5 Bond strength with replacement percent of SF and MK

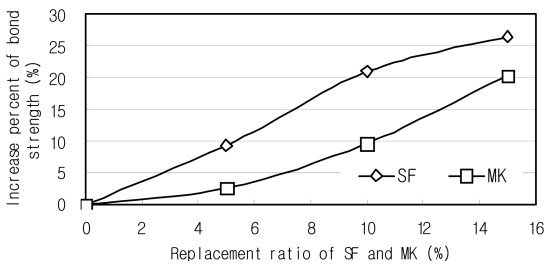


Fig. 6 Increase of bond strength with replacement percent of SF and MK

다. 실리카폼과 메타카올린의 치환률이 동일할 때는 실리카폼을 치환한 배합이 각 치환률에서 각각 6.76, 6.46 및 8.32% 정도 크게 나타났다. 실리카폼과 메타카올린을 치환한 배합에서의 부착강도의 차이는 크지 않았다. CFRP 보강근과 고강도 콘크리트와의 부착강도는 실리카폼 및 메타카올린의 동일한 치환률에서는 실리카폼이 약간 크지만 큰 영향이 아니기 때문에 메타카올린이 실리카폼을 대체하여 적용할 가능성이 있는 것으로 나타났다. Fig. 7은 압축강도와 부착강도와의 관계를 보여준다. 압축강도가 증가할수록 부착강도는 약간씩 증가하나 압축강도의 증가보다는 부착강도의 증가가 크지 않은 것을 보여준다. 실리카폼 10%치환한 경우 압축 및 부착강도는 메타카올린을 15% 치환한 배합과 비교하여 압축강도와 부착강도가 거의 유사하게 나타나고 있다. 메타카올린 10%를 치환한 경우와 실리카폼을 5% 치환한 배합의 결과를 비교해 보면 압축강도와 부착강도 모두 메타카올린을 10% 치환한 경우가 약간 증가하는 경향을 보여주었지만 거의 유사한 결과를 나타내었다. 따라서, 실리카폼을 메타카올린으로 대체할 때 실리

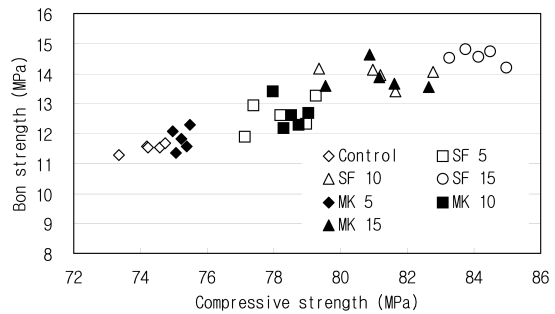


Fig. 7 Relationship compressive strength and bond strength with replacement percent of SF and MK

카폼 보다는 메타카올린의 치환률을 좀 더 증가시켜야 한다는 것을 보여주었다.

다. 상대부착강도

일반적으로 콘크리트의 압축강도 증가는 CFRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착강도를 증가시킨다. 또한, 실리카폼과 메타카올린의 첨가는 콘크리트의 압축강도를 증가시키는 경향이 있다. 따라서, 실리카폼 및 메타카올린을 첨가하면 콘크리트의 압축강도를 증가시켜 CFRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착강도를 증가시키게 된다. 본 연구에서는 실리카폼 및 메타카올린의 첨가가 CFRP 보강근과 고강도 콘크리트 사이의 부착강도에 미치는 순수한 영향을 평가하기 위하여 상대부착강도를 정의하여 평가하였다. 상대부착강도는 실리카폼 및 메타카올린의 첨가에 따른 압축강도의 변화가 부착강도에 미치는 영향을 최소화하기 위한 것으로 식 2로 정의하여 계산하였다.(Xial 등, 2007)

$$\tau_R = \frac{\tau}{\sqrt{f_{cu}}} \quad (2)$$

여기서, τ_R 은 상대부착강도이며, τ 는 부착강도, f_{cu} 는 콘크리트의 압축강도이다.

상대부착강도는 Table 6과 같다. 상대부착강도 결과는 약 1.34~1.59로 나타났다. 실리카폼의 치환률이 5, 10 및 15%로 증가함에 따라 상대부착강도는 6.56, 11.56 및 18.81%로 증가하였으며, 메타카올

Table 6 Results of relative bond strength

Concrete type	Replacement percent (%)	Relative bond strength ($\tau/\sqrt{f_{cu}}$)	Increase relative bond strength (%)*
Control	0	1.34	-
SF	5	1.42	6.56
	10	1.55	11.56
	15	1.59	18.81
MK	5	1.36	1.92
	10	1.43	6.58
	15	1.55	15.06

린의 치환률이 5, 10 및 15%로 증가함에 따라 각각 1.92, 6.58 및 15.06%로 증가하는 결과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 압축강도의 영향을 최소로 고려하더라도 실리카폼 및 메타카올린을 첨가하면 부착강도를 증가시킬 수 있다는 것을 보여준다. 동일한 실리카폼 및 메타카올린의 치환률에서의 상대부착강도를 비교해보면 실리카폼을 치환한 경우가 5, 10 및 15%에서 각각 4.55, 8.52 및 3.26% 정도 높게 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 고강도 콘크리트에서 실리카폼을 메타카올린으로 치환하더라도 CFRP 보강근과의 부착강도 측면에서는 큰 영향이 없다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 해양 및 수리구조물이 주를 이루고 있는 농업기반 콘크리트 구조물에 있어서 보강철근의 부식과 콘크리트의 열화환경에 대한 문제를 해결하고자 비부식성의 CFRP 보강근과 고강도 콘크리트에 대한 연구를 실시하였다. 실험변수로는 고강도 콘크리트에서 강도증가와 내구성 향상 등을 위해서 널리 사용되고 있는 혼화재료인 실리카폼과 최근 실리카폼의 대체재료로 많은 연구가 이루어지고 있는 메타카올린을 적용하였다. 시험을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실리카폼 및 메타카올린 치환률에 따른 고강도 콘크리트의 압축강도는 실리카폼 및 메타카올린의 치환률이 증가할수록 증가하였다. 실리카폼 5

및 10%를 치환한 경우 메타카올린 10 및 15%를 치환한 배합과 비슷한 강도를 나타내었으며, 이는 메타카올린의 경우 약 10% 이상을 사용하여야 효과가 있다는 것을 나타낸다.

2. 인발하중과 슬립거동의 관계에서는 실리카폼과 메타카올린의 치환률이 증가할수록 CFRP 보강근의 인발하중이 크게 나타났으며, 최대 인발하중에 도달한 후 급격한 뽐힘현상이 발생되지 않았다. 실리카폼 및 메타카올린의 치환률의 증가는 CFRP 보강근과 고강도 콘크리트 사이의 부착계면이 강화되어 최고하중에 도달하기 전까지의 슬립이 적게 나타나고, 최고하중이 도달한 후에도 슬립이 급격하게 증가하지 않은 결과를 보여주었다.
3. 실리카폼 및 메타카올린의 치환률이 증가할수록 부착강도는 증가하는 경향을 보여주었다. 동일한 치환률에서는 실리카폼을 치환한 고강도 콘크리트의 부착강도가 크게 나타났으며, 실리카폼 5 및 10%와 메타카올린 10 및 15%를 치환하였을 때 서로 비슷한 부착강도를 나타내었다.
4. CFRP 보강근과 고강도 콘크리트의 부착강도에 미치는 실리카폼 및 메타카올린의 치환률의 효과를 결정하기 위하여 상대부착강도를 평가하였으며, 상대부착강도는 약 1.34~1.59로 나타나 부착강도의 증가에 효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 공주대학교 신입교수 정착연구비에 의하여 연구되었음

References

1. ACI440K, 2002, Guide test methods for fiber-reinforced polymer(FRP) rods and sheets, Reported by ACI Committee 440K.
2. ACI Report 440H, 2000, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. American Concrete Institute Committee 440
3. Abdul R.H. and H.S. Wong, 2005, Strength

- estimation model for high-strength concrete incorporating metakaolin and silica fume, *Cement and Concrete Research*, 35(4), pp. 688~695
4. Bonneau, O., C. Vernet, M. Moranville and P. Aitcin, 2000, Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(12), pp. 1861~1867.
 5. Bhanja, S. and B. Sengupta, Influence of silica fume on the tensile strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(4), pp. 743~747
 6. Cosenza, E., G. Manfredi, and R. Realfonzo, 1987, Behavior and modeling of bond of FRP rebar to concrete, *Journal of Composites Construction*, 1(2), pp. 40~45
 7. Focacci, F., A. Nanni, and C.E. Bakis, 2000, Local bond-slip relationship for FRP reinforcement in concrete, *Journal of Composites Construction*, 4(1), pp. 23~34
 8. Galati N., A. Nanni, L.R. Dharani, F. Focacci and M.A. Aiello, 2006, *Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete*, *Composites: Part A*, 37(8), pp. 1223~1230
 9. Haddad, R.H. and R.M. Abendeh, 2004, Effect of thermal cycling on bond between reinforcement and fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(6), pp. 743~752
 10. Haraji, M. H., 1994, Development/splice strength of reinforcing bars embedded in plain and reinforced concrete, *ACI Structural Journal*, 95(5), pp. 511~520
 11. Jean Pera and Achene Amrouz, 1998, Development of highly reactive metakaolin from paper sludge, *Advanced Cement Based Materials*, 7(2), pp. 49~56
 12. Kim, K.H., Y.K. Cho and M.W. Kim, 2008, Development of the maintenance system for gate bridge, *Proceeding of KCI*, 2008, pp. 1025~1028(in Korean)
 13. Kim, H.S., S.H. Lee and H.Y. Moon, 2007, Strength properties and durability aspects of high strength concrete using korean metakaolin, *Construction and Building Materials*, 21(6), pp. 1229~1237
 14. Kim, Y-I. and C-Y. Sung, 2007, Strength and watertightness properties of EVA modified high strength concrete, *KSAE*, 49(1), pp. 45~54(in Korean)
 15. Mazloom, M., A.A. Ramezani pour and J.J. Brooks, 2004, Effect of silica fume on mechanical properties of high strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), pp. 347~357
 16. Moulin, E., P. Blane, and D. Sorrentino, 1999, Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements, *Cement and Concrete Composites*, 23(6), pp. 463~469
 17. Park, K.S., S.G. Shin and M.K. Park, 2001, A study on the problems encountered and comments on their solutions of agricultural hydraulic structures, *Proceeding of KSAE*, 2001, pp. 162~170(in Korean)
 18. Soroushian, P., S. Ravanbakhsh, and M.A. Nagi, 2002, Laboratory evaluation and field application of concrete reinforcement with aramid fiber-reinforced polymer bars, *ACI Materials Journal*, 99(6) pp.584~590.
 19. Reda, M.M., N.G. Shrive and J.E. Gillott, 1999, Microstructural investigation of innovative UHPC, *Cement and Concrete Research*, 29(3), 323~329
 20. Shannag, M. J., 2000, High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cement and Concrete Composites*, 22(6), pp.

- 399~406
21. Tughiouart, B., B. Benmokrane, and D. Geo, 1998, Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Construction and building materials*, 12(8), pp. 453~462
 22. Vijay P.V., 1999, Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars, PhD. thesis, Department of Civil Engineering West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA
 23. Wong, H.S. and R.H. Abdul, 2005, Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance, *Cement and Concrete Research*, 35(4), pp. 696~702
 24. Won, J.P. Y.S. Kwon and J.J. Lee, 2002, *Properties of high-Performance concrete containing high-reactivity metakaolin*, 14(3), pp. 349~356
 25. Won, J-P., J-Y. Lee, C-G. Park, and S-G. Park, 2007a, Optimum mix proportion of latex modified repair mortar for agricultural concrete structures, *KSAE*, 49(2), pp. 37~46 (in Korean)
 26. Won J. P., C. G. Park, H. H. Kim, S. W. Lee and C. I. Jang, 2007b, Effect of fibres on the bonds between FRP reinforcing bars and high-strength concrete, *Composites Part B: Engineering*, 39(7), pp. 747~755
 27. Won J. P., C. G. Park, H. H. Kim, S. W. Lee and C. Won, 2007c, Bond behavior of FRP reinforcing bars in high-strength steel fibre-reinforced concrete, *Polymers & Polymer Composites*, 15(7), pp. 569~578
 28. Won, J.P. and C.G. Park, 2006, Effect of environmental exposure on the mechanical and bonding properties of hybrid FRP reinforcing bars for concrete structures, *Journal of Composite Materials*, 40(12), pp. 1063~1076
 29. Xial, J., and H. Falkner, 2007, Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars, *Construction and building materials*, 21(2), pp. 395~401
 30. Yin-Wen Chan, Shu-Hsien Chu, 2004, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 34(7), pp. 1167~1172