

표면처리 및 양생 조건이 초고성능 콘크리트-보통 콘크리트 계면 부착강도에 미치는 영향

Effect of Surface Preparation and Curing Condition on the Interfacial Bond Strength between Ultra High Performance Concrete and Normal Strength Concrete

강성훈¹⁾ 홍성걸^{2)*}
Sung-Hoon Kang Sung-Gul Hong

Abstract

This study reports the interfacial bond strength between Ultra High Performance Concrete (UHPC) and Normal Strength Concrete (NSC). While previous studies have focused on the interfacial strength between NSC substrate and UHPC overlay, this study use precast UHPC for enhanced constructability and replacement of formwork. The factors affecting the interface strength are comprehensively reviewed. It can be classified into: interface shape, degree of hardening and moisture condition of UHPC before combining with NSC, and curing condition of composite materials. Conducted experiments verify the effects of each factor on the interface strength and, accordingly show different failure modes. In particular, a new failure mode of the failure of a part of UHPC was firstly found in the case of sample with rough interface between UHPC and NSC. The other factors of the degree of hardening and the moisture and curing conditions of UHPC were discussed. This research will provide a valuable foundation to utilize the UHPC as a composite material.

Keywords : Ultra high performance concrete (UHPC), Bond strength, Permanent formwork, Composite structure, Interface

1. 서론

지난 수 십년간 실리카 폼, 고성능 감수제 등과 같은 콘크리트 첨가제의 발전에 힘입어 보다 밀실하고 강도가 높은 콘크리트가 개발되어 왔다. 이러한 고강도 콘크리트는 최밀 충전이론을 바탕으로 한 골재 구성의 최적화로 150 MPa 이상의 초고강도를 실현할 수 있게 되었으며 (Kang and Hong, 2014), 취성적인 단점을 보완하기 위해 강섬유를 혼입하여 (Richard and Cheyreyz, 1995) 강도와 연성능력을 모두 갖춘 초고성능 콘크리트 (UHPC)의 개발로 이어졌다. UHPC의 뛰어난 강도, 유동성 및 내구성으로 인한 장점과 가능성들이 국내외 많은 연구에서 보여지고 있지만, 현재까지 이 재료가 실제로 적용된 사례는 많지 않다. UHPC를 보다 안전하고 편리하게 활용할 수 있도록 재료성능과 특성이 보다 개선되고 밝혀질 가능성은 있지만, 기본적으로 재료단가가

높기 때문에 합리적이고 효율적인 활용방안이 모색되어야 한다.

사용량을 최소화시켜 경제적으로 UHPC의 장점을 최대한 활용할 수 있는 방안 중 하나는 보통 콘크리트 (NSC)와 합성하여 사용하는 것이다 (Hong and Kang, 2013). 이러한 합성부재는 프리캐스트 부재, 현장타설 구조물 등 다양한 방식으로 제작 가능하다. 대표적인 예로 UHPC를 NSC 표면에 얇게 합성하면, 구조성능 뿐만 아니라 내구성 (균열 저감 및 수밀성 향상)도 향상시킬 수 있다. 성능적인 장점 외에도 UHPC를 판 형태로 제작하여 거푸집으로 활용하면, 시공성 향상 및 거푸집해체 작업의 생략으로 인한 공기 단축과 더불어 폐 거푸집과 소음을 감소시킬 수 있기 때문에 환경적으로도 유리하다. 실제로, 영구거푸집과 이를 이용한 공법의 장점들 때문에, 고강도 및 섬유보강 콘크리트 (Kim et al., 2008; Cho et al., 2010; Leung and Cao, 2010; Thanoon et al., 2010; Tawab et al., 2012), PVC (Kuder et al., 2009) 및

1) 정희원, 서울대학교 건축학과 박사과정
2) 정희원, 서울대학교 건축학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : sglhong@snu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

FRP (Gai, 2014; Nelson and Fam, 2014) 등과 같이 다양한 재료를 활용한 영구거푸집과 합성부재의 개발이 지속적으로 진행되어 왔으며, 최근에는 유동성, 강도, 내구성이 보다 뛰어난 UHPC를 활용한 영구거푸집이 개발되고 있다 (Hong and Kang, 2013; Wirojjanapirom et al., 2013).

합성부재의 구조성능은 두 재료간의 일체성이 확보되어야 완전히 발휘 될 수 있다. 따라서 미리 제작된 UHPC를 NSC와 합성하여 구조부재로 활용하기 위해서는 두 재료간의 부착 성능에 영향을 미칠 수 있는 요인들이 사전에 검토되어야 하고, 이러한 요인들이 부착강도에 미치는 영향력에 대한 연구가 수행되어야 한다. 특히, UHPC는 양생 온·습도, 수분 조건 등 환경적인 요인에 따라 경화 전과 후의 성능에 많은 차이를 나타내기 때문에 (Kang and Hong, 2014), 이와 같은 요인들이 부착강도에 미치는 영향이 검토 될 필요가 있다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 기존 연구를 분석하여 UHPC-NSC 계면 부착성능에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 파악하였으며, 각 요인들이 부착강도에 미치는 영향을 실험을 통해 검증하였다.

2. 기존 연구

2.1 합성목적에 따른 구분

콘크리트의 계면 부착성능에 관한 기존연구는 주로 보수·보강을 목적으로 수행되었다. 따라서 기존 층의 콘크리트는 완전히 경화된 이후 노후화 되어 균열, 누수 등과 같이 사용성능 또는 구조내력의 저하로 인해 보수 또는 보강이 필요한 상태이다. 보통 NSC인 기존 층은 신설 층과의 부착성능을 향상시키기 위해 완전히 경화된 콘크리트를 Sand blasting, Grooving, Water jet, Drilling 등의 방법으로 표면에 흠집을 주는 것이 일반적이다. 그러나 UHPC를 먼저 제작한 후 NSC를 합성하는 방법은 Table 1과 같이 보수·보강을 위해 수행되는 합성방법과는 다소 차이가 있다.

우선, 원하는 표면 형상의 연출이 용이하다. UHPC는 유동성이 뛰어나고 굵은 골재가 포함되어 있지 않으므로, 타설 후 몰드의 형상과 질감을 그대로 연출 가능하다. 따라서 부착성능에 유리한 형상으로 몰드를 제작하면 원하는 표면을 연출 할 수 있다. 또 다른 방법으로 타설 후에 표면을 변형시키는 방법이 있다. UHPC는 높은 유동성과 더불어 점성도 높은 특성을 나타낸다. 특히, 포함되는 물의 양이 매우 적은 재료 특성상, 표면의 건조가 빠르게 진행되어 단시간 내에 표면이 딱딱하게 굳어진다. 이러한 현상은 레벨링 및 세팅을

Table 1 UHPC as Repair Materials and Precast Concrete

Purpose	Repair and retrofit	Composite precast concrete
Substrate	NSC	UHPC
New layer	HPC, FRC, HPFRCC, UHPC etc.	NSC
Degree of hardening of substrate	End of hardening	Depends on curing method and period
Surface preparation	Damage of harden concrete	Deformation of fresh UHPC

HPC : High Performance Concrete, FRC : Fiber Reinforced Concrete, HPFRCC : High Performance Fiber Reinforced Concrete

방해하므로 일반적으로 타설 직후 표면 건조를 막기 위해 비닐 등으로 덮거나 수분증발을 차단 할 수 있는 제품을 분사하는 등의 조치가 필요하다 (Fehling et al., 2013). UHPC의 높은 점도와 빠른 표면건조 특성은 부재 또는 시편 제작 시 시공성을 저하시킬 수 있는 원인이 되지만, 표면을 변형시키는 데는 장점으로 작용한다. 즉, 표면의 유동성은 단시간 내에 저하되지만, 적절한 시간대에 변형을 시킨다면 변형이 가능하면서 형태도 유지시킬 수 있는 가능성을 제공해 준다. 실제로 이 연구에서는 이러한 방법으로 시편의 표면을 연출하였다.

다음으로, 기존 층인 UHPC는 부착성능에 유리한 양생방법 (고온양생, 기중양생, 수중양생)과 신설 층과의 합성시점을 선택 할 수 있다. 따라서 기존 층에 포함된 미 수화 상태의 시멘트가 신설 층과 함께 반응하여 계면 부착강도를 증진시킬 수 있다. 이러한 내용은 기존연구 (Hong and Kang, 2013)에서 확인 되었다. UHPC-NSC 합성구조의 3점 재하 휨 성능 실험결과, UHPC를 고온 양생 (80°C, R.H 95% 48 시간)한 이후 NSC와 합성한 시편은 상온 (20°C, R.H 60%)에서 3일간 양생한 후 NSC와 합성한 시편에 비해 초기 강성은 더 높았지만, 계면 파괴로 인해 두 재료가 완전히 분리되었다. 반면, 상온 양생한 후 합성한 시편은 두 재료의 일체성을 유지하였으며, 보다 연성적인 휨 거동을 보여주었다. 실험 종료 후 시편의 계면을 비교한 결과, 고온 양생한 후 합성한 시편은 합성 이전의 매끈한 UHPC 표면을 그대로 유지하고 있었지만, 상온 양생한 후 합성한 시편은 UHPC 표면에 NSC 일부가 붙어있는 것이 확인되어, UHPC의 양생 조건이 계면 부착성능에 영향을 미친다는 것을 보여 주었다.

이러한 결과에 대한 원인으로는 재령 초기에 기존 층 (UHPC) 표면에 있던 미 수화 상태의 시멘트가 신설 층 (NSC)과 반응하여 보다 밀실하고 단단한 계면을 형성시킨 것으로 판단하였다. 고온 양생이 끝나는 시점에서는 UHPC의 강도발현이 종료되지만, 상온 양생한 경우 타설 후 91일까지 강도가

지속적으로 증가하였다. 일부 연구에서는 UHPC의 압축강도가 타설 후 10년까지 증가한 사례도 보고된 바 있다 (Kono et al., 2013). 상온(20°C)에서 양생한 UHPC의 압축강도 발현과 수화도 (Degree of hydration)의 상관관계는 Kamen (2006)의 연구에서 확인 할 수 있다. 연구에 따르면, 압축강도와 수화도의 상관관계는 1에 가까울 정도로 높다. 더욱이, 재령 90일째 수화도는 26%에 그치고 있어, 상온 양생시 미수화된 시멘트가 상당량 존재하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 UHPC를 고온양생 하게 되면, 반응성을 가진 실리카 폼이나 충전재와 시멘트 1차 수화 생성물 사이의 포졸란 반응이 더욱 활성화 되어 (Kang et al., 2010) 고온양생이 적용되는 48~72시간 내에 대부분의 경화가 종료된다. 결론적으로, UHPC의 경화 진행정도 (Degree of hardening)는 수화도와 매우 높은 상관성을 나타내므로, 상온에서 양생한 UHPC를 타설 후 1일 부터 7일 사이에 NSC와 합성하면 계면의 수화반응에 의한 차이가 부착성능의 차이로 이어질 수 있다.

비록 기존연구 (Hong and Kang, 2013)에서 UHPC의 양생방법에 따라 NSC와의 부착성능에 차이를 보인다는 것이 확인 되었지만, 시편의 표면상태는 모두 매끈한 것으로서, 표면형상에 대한 영향 및 표면처리를 한 경우 양생방법에 따른 차이점은 검토되지 않았다. 또한, 양생방법에 따른 부착성능을 휨강도 실험법을 통해 간접적으로 평가하였기에, 보다 다양한 요인을 고려한 부착강도가 직접적인 실험을 통해 검토 될 필요가 있다.

2.2 부착강도에 영향을 미치는 요인들

콘크리트 및 모르타르와 같은 시멘트계열 재료의 계면 부착강도는 마찰 (Friction), 맞물림 (Interlocking)현상 등과 관계되는 기계적 부착 (Mechanical bond) 효과, 그리고 시멘트

의 수화반응과 관계되는 접착 (Adhesion) 효과로 크게 구분된다 (Momayez et al., 2005; Mirmoghtadaei et al., 2015). 따라서 부착강도에 미치는 요인들은 골재의 표면 노출정도, 공극특성을 포함한 거친 정도 및 계면형상 (요철) 등과 같은 표면처리 상태, 그리고 수화반응과 관계되는 재료 및 환경적 요인들 (물, 습기, 양생 온·습도 이력, 동결/융해, 콘크리트 탄산화, 시멘트-실리카 비율)과 같이 다양하게 존재한다.

2.2.1 Transition Zone (TZ)의 정의 및 중요성

시멘트계열 재료의 계면 부착특성을 연구하기 위해서는 Transition Zone (TZ)의 이해가 필요하다. TZ는 Fig. 1(a)와 같이 신-구 콘크리트 사이의 기하학적 계면을 따라 형성되는 일부영역으로 정의된다 (Bissonnette et al., 2012). Fig. 1(b)에서는 계면 부착성능에 관계되는 3가지 표면을 나타내고 있다. 여기서, 기하학적 표면 (Geometrical surface)은 경계면의 수평형상을 나타내며, 실제 표면 (True surface)은 표면의 형상을 고려하여 입체적인 표면적을 반영한다. 또한, 유효 표면 (Effective surface)은 기존 층 및 신설 층의 재료가 실제로 접촉한 면적을 나타내며, 신설 층의 재료상태 및 타설 방법에 따라 유효표면은 실제표면과 가까워지거나 차이가 날 수 있다. 따라서 신설 층 재료의 작업성과 다짐정도가 부착성능에 영향을 미칠 수 있다 (Bissonnette et al., 2012).

Pigeon and Saucier (1992)의 연구에 따르면 이러한 TZ는 콘크리트에서 골재와 시멘트 페이스트 사이의 경계면으로 불리는 Interfacial Transition Zone (ITZ)의 구조와 매우 유사하다고 언급하였다. 즉, TZ에서도 기존 층으로의 물의 흐름이 유발되어 국부적으로 물-시멘트 비 (W/C)가 높아지는 Wall effect가 나타나고 (Li et al., 2001), 이는 상대적으로 약한 영역을 형성시킨다고 하였다. 콘크리트 내부에 형성되는 ITZ는 보통 20 μm ~ 40 μm의 두께로 (Wan, 2011), 골

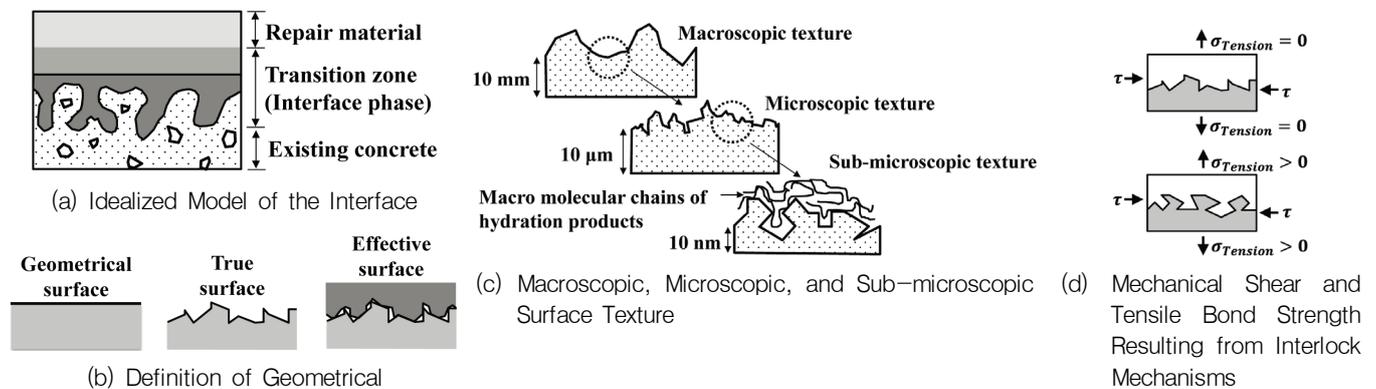


Fig. 1 Conceptual Approaches about Interface and Bond Strength between Old and New Concrete(Beushausen, 2005)

재 면에 나타나는 Water film 현상으로 인해 상대적으로 높은 W/C를 가지므로, 결국 시멘트 페이스트에서 보다 더 크고 많은 공극이 형성된다. 미세구조를 관찰해보면 ITZ에서는 시멘트 페이스트 대비 강도향상에 도움이 되는 C-S-H는 더 적고, CH (Calcium hydroxide) 및 에트링가이트는 더 많이 발견되어, 골재 또는 시멘트 페이스트 보다 더 약한 영역이 된다 (Mehta and Monteiro, 2006). 높은 CH 비율은 접착력을 약화시키므로 ITZ를 더욱 약한 영역으로 만든다. 콘크리트 계면의 미세구조 특성에 관하여 Espeche and Leon (2011)은 접착 메커니즘 (Adhesive mechanism)은 Micro-scale에서 발생하는 화학적 힘과 관계하며, 이러한 힘은 신-구 콘크리트의 부착력에 기여한다고 하였다. 또한 Fig. 1(a)와 같은 신-구 콘크리트 사이의 영역인 Overlay Transition Zone (OTZ)에는 신, 구 콘크리트 보다 많은 CH와 AFt (에트링가이트)를 포함하며, 다공질의 약한 영역이라고 언급하였다. 신-구 콘크리트 계면의 성분분석을 수행한 연구 (Li et al., 2001)에서 TZ에는 실제로 CH와 에트링가이트가 많이 포함되어있으며 다공질인 것으로 확인되었고, 이러한 요인들이 부착강도를 약화시키는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 콘크리트 계면 부착강도에 영향을 미치는 요인 중 시멘트 수화반응과 관계되는 화학적 요인 (접착효과)과 이에 따른 영향력을 알아보기 위해서는 이러한 TZ 및 ITZ의 개념의 이해가 중요하다.

2.2.2 기존 층의 표면형상

기존 층의 표면형상이 콘크리트 계면 부착성능에 영향을 미치는 원인은 Fig. 1(c)와 같이 단계별로 구분할 수 있다 (Beushausen, 2005). 즉, 가시적으로 보이는 Macroscopic texture 외에도 현미경으로 관찰 할 수 있는 Microscopic texture, 그리고 이보다 더 미세한 Sub-microscopic texture 로 구분 된다. 따라서 기존 층의 표면처리에 따라 기계적인 부착력을 증진시킬 수 있으며, 눈에는 보이지 않는 공극특성과 수화생성물의 결합상태 역시 계면부착 강도에 영향을 미칠 수 있다.

기존 층의 표면형상이 계면 부착성능에 영향을 미친다는 연구 결과는 이미 여러 번 도출되었다. Mirmoghtadaei et al. (2015)의 연구에서는 6가지의 다른 표면처리 (As cast, Wire brushed, Acid etched, Grooved, Grooved-wire brushed, Grooved-acid etched)를 한 W/C=0.4인 NSC의 계면 부착강도를 경사전단 강도 (Slant shear strength) 실험을 통해 측정하였다. 그 결과, Grooved-acid 시편의 부착강도가 가장 높았고, 이는 표면형상이 거칠면서 맞물림 (Interlocking) 효과가 함께 유발되어 나타난 결과라고 언급하였다. 또한, W/C=0.43인

NSC의 계면 부착강도를 경사-전단 및 쪼갬-인장 강도로 알아본 결과, 표면 처리방법에 따라서 두 시험법 모두 Hand-scrubbing > Shortblasting > Sandblasting > Wire-brushing > Left as-cast 순서로 나타났다.

한편, UHPC를 콘크리트 구조물의 보수·보강재로 활용하기 위한 계면 부착특성 연구들이 2010년 이후 수행되고 있다. 우선, 기존 층이 W/C=0.5인 NSC이고, 신설 층이 고온양생한 UHPC로 구성된 합성구조의 계면 부착강도를 표면처리 방법을 변수로서 알아본 연구 (Tayeh et al., 2013)에서는 표면처리를 할 경우 경사-전단과 쪼갬-인장 부착강도 모두 최대 2배 정도의 증가가 확인되었다. 상대적으로 부착강도가 낮은 As cast, Drilled holes, Wire brushed 시편은 주로 완전한 계면파괴 또는 계면과 NSC 일부의 복합파괴가 발생하였으며, 부착강도가 높은 Grooved 및 Sand blasted 시편은 완전한 NSC 파괴 또는 NSC와 계면 일부의 복합파괴가 발생하였다. 동일한 목적의 다른 연구 (Harris et al., 2011)에서도 경사-전단 부착강도의 크기가 Smooth < Chipped < Grooved = Shear key 순으로 나타나, 기존 층의 표면처리 방법에 따라서 전단 연결재 매립과 동등한 부착강도를 발휘할 수 있는 것으로 확인되었다.

2.2.3 실험방법의 영향

신-구 콘크리트의 계면 부착성능을 측정하기 위한 실험방법은 목적에 따라 몇 가지로 분류 될 수 있지만, 크게 인장-부착강도 실험과, 전단-부착강도 실험으로 구분된다 (Momayes et al., 2005). 인장-부착강도 실험은 직접-인장 부착강도 실험과 쪼갬-인장 실험으로 다시 구분된다. 직접-인장 부착강도 실험은 주로 현장에서 수행되며, 쪼갬-인장 실험은 실험실에서 보다 편리하게 수행할 수 있는 방법이다. 쪼갬-인장 실험과 더불어 휨-인장 강도 실험 역시 인장에 의한 부착강도를 간접적으로 평가할 수 있는 방법이지만, 실제 가력되는 하중에 비해 부착력이 유발되는 영역이 작기 때문에 (Abu-Tair et al., 1996), 쪼갬-인장 실험에 비해 효율성이 떨어진다 (Momayes et al., 2005). 다음으로, 전단-부착강도 실험의 경우 직접-전단 실험과 경사전단 실험이 있다. 그러나, Austin et al. (1999)의 연구에서는 현행 BS6319: Part 4로 채택된 경사전단 실험은 심각한 단점을 가지고 있다고 지적하였다. 즉, 계면에서의 응력은 압축과 전단응력의 조합으로 형성되므로, 파괴는 계면의 경사도에 따라 달라진다. 또한, 계면이 평면인 경우 거칠기에 따른 영향을 제대로 반영하기 어려우며, 신-구 콘크리트의 탄성계수 차이가 커질수록 응력집중현

상이 유발되어 실험 결과에 영향을 미친다고 언급하였다.

한편, 표면형상이 인장 또는 전단 부착성능에 각기 다른 영향을 미칠 수 있기 때문에 인장-부착강도 실험과, 전단-부착강도 실험과 같은 구분이 필요하다. 이는 Fig. 1(d)와 같은 개념으로 설명할 수 있다. 표면 형상이 계면과 수직방향 하중에 대하여 맞물림 작용이 일어나지 않는 경우에는 인장-부착강도에 기여하는 기계적 부착효과는 0으로 볼 수 있으며, 이러한 작용은 전단-부착강도에만 기여한다. 그러나 맞물림 작용이 수평 및 수직방향으로 모두 유효한 경우에는 기계적 부착효과가 인장 및 전단 부착강도에 모두 기여하게 된다. 즉, 표면처리를 통해 요철을 만든 경우 기계적으로 전단-부착강도 향상에 도움이 될 수 있지만, 인장-부착강도를 향상시키기 위해서는 수직방향으로 저항 할 수 있는 공극 등의 형성이 필요하다 (Bissonnette et al., 2012). 따라서 기존 층의 표면가공은 유발되는 하중의 방향을 고려하되, 기계적인 저항력이 발휘 될 수 있도록 하는 것이 장기적으로 유리하며, 시험방법 역시 이러한 요인들이 고려될 수 있도록 선택되어야 한다.

2.2.4 물과 수분

기존 층의 흡수상태와 표면의 수분상태가 부착강도에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 기존 층이 너무 건조하면, 신설 층에 포함된 물을 흡수하여 계면의 수화반응을 방해할 수 있다. 반대로 기존 층이 포화상태이고 표면에 물이 있으면, 신설 층이 타설 된 후 계면에서 국부적으로 W/C를 높이는 효과를 유발하여 강도를 약화시키고 더 많은 건조수축을 유발하며, 물이 기존 층의 공극을 채워 시멘트입자들이 침투하는 것을 막을 수 있다 (Bissonnette, et al., 2012). 즉, 표면에 존재하는 자유수는 계면 부착성능을 약화시킬 수 있다 (Gillette, 1964). Austin et al. (1995)의 연구에서는 기존 층의 표면과 내부의 수분이 부착강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 직접-인장 부착강도 실험을 진행하였다. 실험결과, 강도의 크기가 내부포화 표면건조 (SSD) > 내부건조 표면수분 (ASW) > 내부포화 표면수분 (SSW) > 내부건조 표면건조 (ASD) 순으로 나타났다. 비록, SSD와 ASD의 강도차이가 10% 이내로 근소하게 나타났지만, 그 이전의 연구 (Austin and Robins, 1993)에서도 역시 SSD가 SSW보다 더 높은 부착강도를 보였다. 다른 연구에서 수행한 실험결과 역시 이러한 결론을 뒷받침 해 준다. Shin and Wan (2010)의 연구에서는 직접-전단 부착강도 실험결과 SSD > ASD 인 것으로 나타났으며, Omar et al. (2010)의 연구에서도 SSD의 휨-인장 부착강도

가 가장 우수한 것으로 나타났다. 기존의 연구 결과들을 종합하면, 기존 층의 수분여부가 부착성능에 영향을 미치는 것으로 나타나며, 영향력은 시험방법에 따라 다소 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그러나 UHPC가 기존 층 또는 신설 층인 경우, 수분포함 여부가 부착강도에 미치는 영향에 관한 연구는 현재까지 찾아보기 어렵다.

2.2.5 양생 환경 및 합성시점

양생 환경에는 평균 온·습도, 온·습도 변화율과 같은 요인들이 있으며, 이러한 요인들은 신설 층 및 계면의 수화반응, 기존 층 및 신설 층의 수축/팽창 등과 같은 길이변화 특성에 영향을 미친다. 시멘트계열 재료는 일반적으로 양생 과정에서 수축이 발생하며, 신·구 콘크리트의 체적 또는 길이 변화가 다를 경우 계면에서 인장 또는 전단응력이 발생한다 (Beushausen, 2005). 따라서 양생 온·습도 조건 외에 신설 층을 타설하는 시점에 따라 이러한 응력차이를 유발시킬 수 있다. 이와 관련한 연구는 Santos and Julio (2011)에 의해 수행되었다. 실험결과, 실내에서 양생시킨 시편 (L 시리즈)과 실외에서 양생시킨 시편 (E 시리즈)에서 모두 신설 층을 타설한 시점이 늦을수록 (28, 56, 84일) 인장 및 전단 부착강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 사전에 예상한 것과 반대되는 것이었다. 그 이유는, 사용한 콘크리트의 수축을 타설 후 112일 까지 측정한 결과 지속적인 수축이 발생하였기에, 신·구 콘크리트 타설 시점의 간격이 클수록 상대적인 수축의 차이는 더 크게 발생하여 강도감소가 예상되었기 때문이다. 반면, 실내 대비 실외 양생시 더 많은 수축 (약 4배정도)과 더 극심한 온·습도 변화율이 계측되었기 때문에 합성시점이 동일할 때 L시리즈가 E시리즈보다 높은 부착강도를 나타낸 것은 예상된 결과였다.

2.3 부착파괴 모드

UHPC와 NSC의 부착강도 실험시 총 4가지의 파괴모드가 보고되고 있다. 즉, 완전한 계면파괴 (Type A), 계면과 NSC 일부의 복합파괴 (Type B), NSC와 계면 일부의 복합파괴 (Type C), 완전한 NSC 파괴 (Type D)로 구분되며 (Tayeh et al., 2013), 상대적으로 강도가 높은 UHPC 보다는 NSC에서 대부분의 파괴가 발생한다고 보고되고 있다 (Tayeh et al., 2012). Austin et al. (1999)은 전단-부착강도 실험시 표면이 편평하면 기계적인 저항력 없이 파괴면은 계면과 일치하게 되고, 이 경우에만 슬립 발생으로 인한 순수전단 파괴라고 하였다. 그러나, 표면처리로 인해 기계적인 맞물림 효

과가 발생하면 부착강도의 증가로 이어지게 되고, 이 경우 전단 및 인장의 복합과피라고 언급하였다.

3. 실험

3.1 사용재료 및 배합비

이 연구에서 사용한 UHPC의 구성재료 및 배합비는 Table 2와 같으며, 이를 포함한 타설 방법과 장비는 기존연구 (Hong and Kang, 2013; Kang and Hong, 2014)와 동일하게 하였다. 시멘트, 모래 및 자갈로 구성된 NSC의 W/C=0.54이고, 최대골재 치수는 25 mm이다.

3.2 재료 특성

UHPC와 NSC의 기본 물성을 알아보기 위해 KS F 2402 (Standards, 2007) 및 KS F 2594 (Standards, 2009)에 따른 슬럼프와 슬럼프 플로 시험, KS F 2405 (Standards, 2010)에 따른 압축강도 시험, KS F 2423 (Standards, 2006)에 따른 쪼갬 인장강도 시험을 진행하였으며, 일체된 재료의 직접 전단 강도를 확인하기 위해 Fig. 3(a)와 같은 방법으로 실험을 진행하였다. 시편 3개에 대한 실험결과를 정리하여 Table 3과 같이 평균과 표준편차로 나타냈다. 고온 양생 (Heat treatment)한 UHPC는 타설 후 24시간째 탈형 한 시편을 온도 80±2℃,

Table 2 Mix Proportion of UHPC (by weight ratio of cement)

W/C	SF/C	Cement	Silica fume	Sand	Filler	Superplasticizer	Steel fiber
0.21	0.25	1	0.25	1.1	0.35	0.04	2 (vol.%)

Table 3 Results of Material Tests

Type	Flowability [mm]	Curing		Strength [MPa]		
		Condition	Period [day]	Compressive	Direct shear	Splitting tensile
UHPC	Slump flow: 650±50	Heat treatment	7	167.6 ±5.6	-	-
		Air	7	117.7 ±3.5	33.0 ±2.5	17.2 ±1.1
			28	155.2 ±5.4	36.1 ±1.4	19.7 ±0.4
NSC	Slump: 120	Air	7	19.3±0.6	4.80 ±0.8	2.4 ±0.2
			28	23.3±0.3	6.60 ±0.6	2.0 ±0.1

Air : Constant temperature and humidity chamber (20±2℃ R.H 60±2%)
Heat treatment : Air curing with heat treatment

상대습도 95±5% 조건에 48시간 동안 노출시킨 것이며, 상온 양생 (Air curing)한 UHPC 및 NSC는 온도 20±2℃, 상대습도 60±2%인 환경에 강도 측정 전까지 노출시킨 것이다.

3.3 UHPC-NSC 합성 시편제작

부착강도 실험을 위한 합성 시편은 경화된 UHPC 위에 NSC를 타설하는 방식으로 제작되었다. UHPC의 표면 형상을 변형시켜야 할 경우, 경화 된 후에는 표면을 변형시키기 어렵기 때문에 2.1절에서 언급한 바와 같이 타설 후 표면 변형 작업을 진행하였다. 성형 후 형태를 유지할 수 있는 시간대는 사전 실험을 통해 타설 후 약 20~30분으로 결정되었다. 표면 변형 후 UHPC에는 실험 변수에 따른 양생 기간 및 조건이 적용되었으며, NSC가 UHPC 위에 타설된 후 28일 켜 되는 날 부착강도 실험을 진행하였다. 전체적인 시편제작 과정은 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

3.4 부착강도 실험방법

부착강도 실험은 Fig. 3과 같은 직접-전단 및 쪼갬-인장 부착강도 실험으로 진행하였으며, 만능재료시험기 (UTM)를 이용하여 화살표 방향으로 하중을 가하였다. 시편은 한변이 150 mm인 정육면체 형상으로 UHPC와 NSC 합성구조이다. 계면의 위치는 직접-전단 시편의 경우 3분의 2지점에, 쪼갬-인장 시편은 정중앙에 위치한다. 직접-전단 실험시 폭×높이×길이 가 50×35×160 mm인 강재 빔을 시편 윗면의 중앙에 위치시켰고, 시편 하부에는 폭×높이×길이 가 100×40×400 mm

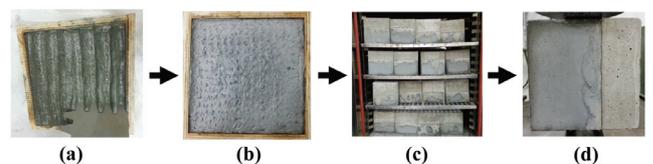
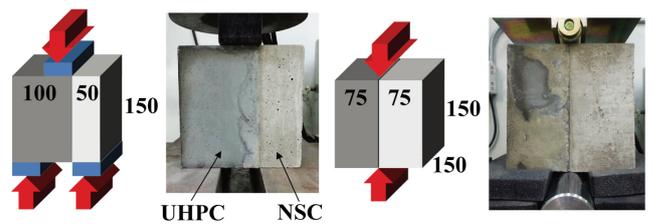


Fig. 2 Test Procedures: (a) Surface Preparation, (b) UHPC Curing, (c) NSC casting and Curing, (d) Bond Strength Test



(a) Direct Shear (b) Splitting Prism

Fig. 3 Test Methods and Specimens for Bond Strength

인 강재 빔을 시편의 정중앙 폭 50 mm를 제외한 양단부에 접촉시켰다. 쪼갬-인장 시험시 시편의 상, 하부면과 계면이 만나는 선을 따라 롤러를 위치 시켰으며, 하중이 가해져 자체적인 균형이 잡히기 전까지 스폰지를 이용하여 위치를 유지하였다.

기본적으로 모든 시편에 대하여 직접-전단 부착강도 실험을 진행하였으며, 2.2.3절에 언급한 바와 같이 부착강도에 있어 하중 방향성을 고려하기 위해 표면 형상을 변수로 한 기본 시편에 한해 추가로 쪼갬-인장 부착강도 실험도 진행하였다. 강도의 평균값을 얻기 위해 모든 변수에 대하여 동일한 시편 3개에 대한 강도 측정이 이루어졌다.

3.5 실험변수

UHPC-NSC 합성구조의 부착성능에 미칠 수 있는 다양한 요인과 그에 대한 영향을 알아보기 위해 결정된 실험변수는 크게 4가지로 구분되었다. 1) 기계적 맞물림 효과와 그에 따른 부착강도를 알아보기 위한 표면형상과 하중의 방향성, 2) NSC 합성시 UHPC의 경화 진행 정도에 따른 계면 접착(Adhesion) 성능을 알아보기 위해, 상온 양생한 UHPC의 합성 전 양생기간(1, 3, 7일 동안 경화 진행), 그리고 합성 전 고온 양생한 UHPC(경화 종료), 3) NSC 합성 시 UHPC에 포함된 수분의 영향을 알아보기 위한 상온 및 고온 양생한 UHPC의 수분상태(ASD, SSW), 4) 합성 후 양생 환경에 따른 영향을 알아보기 위한 양생 장소(향온-향습, 실내, 실외). 전체 변수 현황 및 설명을 Table 4에 정리하였다.

표면형상 변수 중 거친 표면(R)은 와이어 브러시를 이용하여 Fig. 2(b)와 같은 형상으로 성형하였다. 흠이 파진 표면(Gx, Gy)은 기존연구(Carbonell et al., 2012)를 참고하여 Fig. 2(a)와 같이 흠의 깊이와 너비가 각각 6~8 mm, 8~12 mm가 되도록 성형하였고, 흠의 방향이 Fig. 3(a)에 제시된 하중방향과 평행한 경우 Gx, 수직인 경우 Gy로 구분하였다.

Table 4에서 ASD는 NSC와 합성하기 전까지 UHPC를 총 7일간 온도 20±2℃, 상대습도 60±2%인 향온-향습기에서 양생시킨 것을 의미한다. 또한, 내부포화-표면수분 상태(SSW)를 도출하기 위해 총 6일간만 ASD와 동일한 조건에서 양생시켰으며, 합성 직전 24시간 동안 온도 20±2℃인 향온수조에서 양생시켰다. 합성 이후 양생장소에 따른 영향을 알아보기 위해 기본적인 향온-향습기(Air)외에 실내(Lab) 및 실외(Out)에서도 시편을 양생시켰다. 실외 양생의 경우 실내와는 다르게 태양 복사열 및 비, 바람에 그대로 노출된다(Santos and Julio, 2011). Fig. 4는 이러한 3가지 양생장소에서 기록

Table 4 Test Variables

Variables (Notations)	Specification
Surface shape (P, R, Gx, Gy)	Plane(P), Rough(R), Grooved parallel to load direction (Gx) and grooved perpendicular to load direction(Gy)
Curing period of UHPC (1day, 3day, 7day)	Curing period of air cured UHPC before casting Normal Strength Concrete(NSC)
Curing condition of UHPC (H, A)	Air cured UHPC with(H) and without(A) heat treatment before casting NSC
Moisture condition of UHPC (ASD, SSW)	Air Surface Dry(ASD), Saturated Surface Wet(SSW)
Curing place of UHPC and NSC composite (Air, Lab, Out)	Constant temperature and humidity chamber(Air), laboratory(Lab) and outdoors(Out)

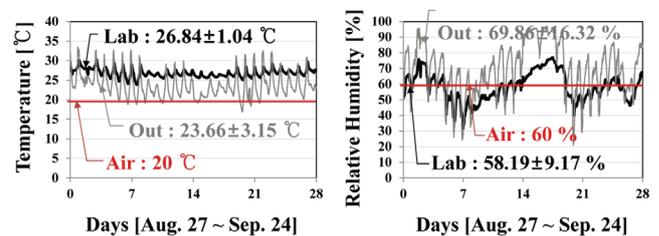


Fig. 4 Temperature and Relative Humidity in the Curing Places

한 온도 및 습도이며, 그래프에 표시된 수치들은 평균과 표준편차를 나타낸다. 양생 기간 동안 평균온도는 실내가 가장 높았으며, 상대습도는 실외가 가장 높았다. 그러나 실외의 경우 온도·습도 편차가 다른 두 곳보다 눈에 띄게 큰 것으로 나타났다.

4. 실험결과 및 분석

이 연구에서 수행한 실험 결과를 Table 5에 정리하였다. 표준시편(No. 1~4)과 조건이 다른 시편은 변수명 일부를 음영으로 표시하였다. 직접-전단 부착강도는 최대하중을 Fig. 1(b)의 Geometrical surface로 나눈 값이며, 쪼갬-인장 부착강도는 식 (1)과 같이 결정되었다(Momayes et al., 2005).

$$\sigma = 2P/\pi A \quad (1)$$

여기서, σ 는 쪼갬-인장 부착강도(MPa), P 는 최대하중(N), A 는 부착면적(mm²)이다.

4.1 표면형상에 따른 부착강도

Fig. 5는 표준시편(No. 1~4)에 대한 직접-전단 및 쪼갬-인장 부착강도를 표면형상을 변수로 나타낸 그래프이다. 두

Table 5 Results of Bond Strength Test

Specimen		Direct shear strength [MPa]	Splitting tensile strength [MPa]
No	Name		
1	P_7day(A)_ASD_Air	1.51±0.55	0.96±0.30
2	Gx_7day(A)_ASD_Air	3.56±0.46	1.12±0.41
3	Gy_7day(A)_ASD_Air	7.26±1.00	1.51±0.06
4	R_7day(A)_ASD_Air	4.49±0.14	1.49±0.10
5	P_1day(A)_ASD_Air	3.60±1.75	
6	Gx_1day(A)_ASD_Air	5.22±1.38	
7	Gy_1day(A)_ASD_Air	7.34±0.23	
8	P_3day(A)_ASD_Air	2.79±1.50	
9	Gx_3day(A)_ASD_Air	3.42±1.18	
10	Gy_3day(A)_ASD_Air	5.46±1.66	
11	P_7day(H)_ASD_Air	1.12±0.15	
12	Gx_7day(H)_ASD_Air	8.05±3.31	
13	Gy_7day(H)_ASD_Air	9.08±0.48	
14	P_7day(A)_SSW_Air	2.86±0.35	
15	Gx_7day(A)_SSW_Air	4.25±0.49	
16	Gy_7day(A)_SSW_Air	6.98±0.94	
17	P_7day(H)_SSW_Air	0.60±0.27	
18	Gx_7day(H)_SSW_Air	5.59±3.31	
19	Gy_7day(H)_SSW_Air	6.11±0.93	
20	P_7day(A)_ASD_Lab	1.75±0.47	
21	Gx_7day(A)_ASD_Lab	3.59±0.39	
22	Gy_7day(A)_ASD_Lab	4.73±2.66	
23	P_7day(A)_ASD_Out	2.38±0.89	
24	Gx_7day(A)_ASD_Out	4.15±0.47	
25	Gy_7day(A)_ASD_Out	5.21±1.04	

Name : Surface Shape_Curing period of UHPC (Curing condition of UHPC)_Moisture condition of UHPC_Curing place of composite specimens

가 지 실험에서 모두 부착강도의 크기가 $Gy > R > Gx > P$ 순서로 나타나, 표면처리를 한 경우 전단 및 인장에 의한 부착강도가 향상 되는 것이 확인되었다. 그러나, 하중의 유형에 따라 향상 정도는 달랐다. 즉, 직접-전단 부착강도의 경우 표면처리를 한 경우 그렇지 않은 경우 대비 최대 4.8배의 강도를 나타냈지만, 쪼갬-인장 부착강도의 경우 최대 1.57배 정도에 그쳤다. 또한, R시편의 결과를 강도가 가장 높은 Gy 시편과 비교해 보면, 직접-전단 부착강도는 62%에 그치고 있지만, 쪼갬-인장 부착강도는 99%에 이르고 있다. 다시 말해, Gy시편은 전단 부착거동에 있어서 R대비 월등한 성능을 보이지만, 인장 부착거동에 있어서는 동등한 성능을 나타낸다. 이러한 원인을 분석하기 위해 표면 형상별 파괴모드를 분석해 보았다. Fig. 6은 각기 다른 표면형상을 가진 시편의 파괴 면을 나타낸다. 시편에 따라 UHPC, NSC 및 계면의 파괴 비율이 다르게 나타난다. 기존 연구 (Tayeh et al., 2013)

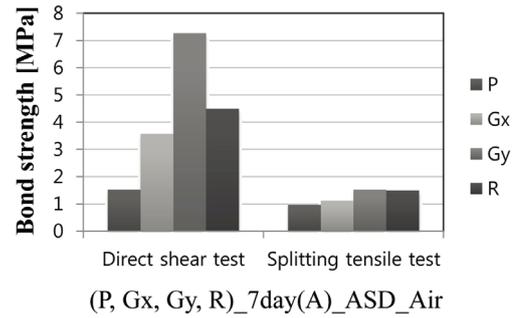


Fig. 5 Bond Strength with respect to Surface Shapes

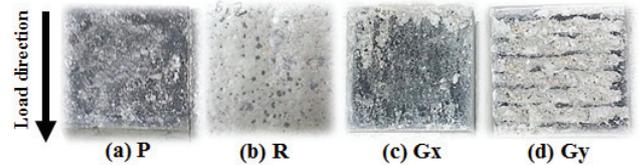


Fig. 6 Failure Surface of Specimens

에서 구분한 파괴모드를 기준으로, P시편은 완전한 계면파괴 (Type A), Gx시편은 계면과 NSC 일부의 복합파괴 (Type B), Gy시편은 NSC와 계면 일부의 복합파괴 (Type C)가 나타났다. 그러나, R시편의 경우 UHPC-NSC 합성구조에서 상대적으로 강도가 높은 UHPC 보다는 NSC에서 대부분의 파괴가 발생한 기존의 연구 결과 (Tayeh et al., 2012)와는 달리, 독특한 표면형상 때문에 계면과 UHPC 일부의 복합파괴라는 새로운 파괴모드 (이 연구에서 Type E로 정의 함)가 발생하였다. P시편과 비교해 볼 때 R시편의 부착강도는 눈에 띄게 증가하였다. 따라서 비록, 대부분의 파괴가 계면에서 발생하더라도 UHPC의 파괴가 조금이라도 관여할 경우 마치 기계적인 연결재의 역할을 수행하여 부착강도를 크게 향상시킬 수 있으며, 직접-전단 부착강도 뿐만 아니라 쪼갬-인장 부착강도에서도 효과를 발휘 할 수 있는 것으로 나타났다.

한편, Gy시편의 경우 상대적으로 강체에 가까운 UHPC의 요철부분이 NSC를 파괴시키는 기계적인 부착거동을 유발시켰다. 반면, Gx시편은 이러한 표면형상이 기계적인 부착거동을 유발한 것 보다는 True surface를 증가시켜 P보다 부착강도가 증가한 것으로 보인다. 마지막으로 R시편은 비록 Gy시편 보다는 요철의 크기가 작지만, NSC의 파괴를 유발시키지 않고 UHPC가 직접 파괴되는 거동특성을 나타냈다.

계면에 적용되는 하중의 방향성과 표면형상을 변수로 한 실험결과, 직접-전단 부착강도 향상을 위해서는 수평 방향으로 요철을 두어 기계적 부착거동을 유도하는 것이 유리하다. 이러한 결과는 건축구조물의 보, 슬래브와 같이 수평방향으

로 발생하는 직접 전단응력에 저항해야 할 경우 유용하게 활용될 수 있다. 반면, 교량 구조물과 같이 진동 등으로 인해 계면에서 수직 방향으로의 응력저항이 요구되는 경우, 쪼갬-인장 부착강도에 관한 이 연구의 실험결과를 참고하여, 수직 방향으로 기계적 부착거동을 유도하는 것이 바람직하다.

4.2 NSC 합성 전 UHPC 경화 진행정도에 따른 부착강도

Fig. 7은 NSC 합성 전 UHPC의 경화 진행정도에 따른 직접-전단 부착강도를 나타낸 그래프이다. 2.1절에서 언급한 바와 같이 UHPC의 강도발현은 수화진행과 상관성이 높다. 따라서 상온 양생한 UHPC가 강도발현이 되지 않은 상태(수화도가 낮은 상태)에서 NSC와 합성하게 되면 시멘트-실리카 폼 비율(SF/C)이 0.25로 매우 높은 UHPC의 배합특성과 더불어, 수화반응으로 인한 계면 접착강도의 증가를 예상할 수 있다. 반면, 고온 양생한 UHPC는 강도발현이 끝난 상태이므로 동일한 원인에 의한 접착강도 증가를 기대하기 어렵다. 이러한 결과는 Fig. 7에서 확인 할 수 있다. 즉, P시편의 경우 UHPC의 경화 진행 정도가 높을 때(수화도가 높을 때) NSC를 합성할수록 계면 접착강도를 감소시키는 것으로 나타났다. 반면, Gx, Gy시편은 1day(A)와 3day(A)에서만 이러한 경향이 나타났으며, 고온 양생한 경우(강도발현이 끝난 경우) 오히려 강도를 증가시켰다. 그 이유는 신설 층인 NSC의 조건이 동일할 때, 기계적인 부착거동을 유발시키는 UHPC 요철의 높은 강도 및 강성이 크게 기여했기 때문으로 보인다. 따라서, 고온 양생 또는 경화가 완전히 끝난 UHPC를 NSC와 합성하게 될 경우 표면처리를 하지 않으면 요구되는 부착성능을 확보하기 어려울 수 있다. 반면, 강도발현이 끝난 UHPC가 NSC와 합성할 경우, 기계적인 부착거동을 나타낼 수 있다면 오히려 부착강도 증진에 보다 효과적이다.

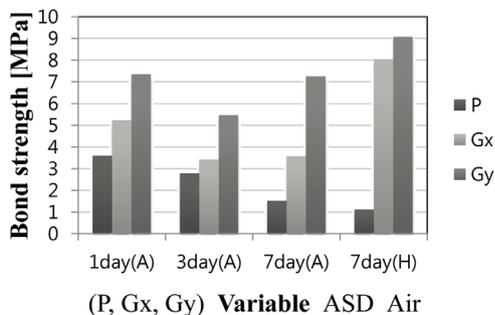


Fig. 7 Bond Strength with respect to Degree of Hardening of UHPC

4.3 UHPC의 표면 및 내부 수분에 따른 부착강도

Fig. 8은 NSC와 합성 직전, UHPC의 내부와 표면에 존재하는 수분에 따른 직접-전단 부착강도를 상온 양생(A)한 경우와 고온 양생(H)한 경우로 구분하여 나타낸 결과이다. 기존 층인 상온에서 양생한 UHPC의 내부는 포화상태이고 표면에 물기가 있는 경우(SSW) 부착강도를 대체적으로 증가시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 W/C가 매우 낮고 SF/C는 매우 높은 UHPC의 배합특성상, 수화도가 낮은 상태에서 공급되는 물은 계면의 W/C를 높여 약한 영역을 만들기 보다는, 추가적인 수분 공급을 통해 수화반응을 더욱 활성화 시켜 접착강도를 증진시키는 것으로 판단된다. 이러한 증진효과는 표면형상에 따라 다르게 나타났다. 즉, 접착에 의한 부착파괴(Type A 파괴)가 발생하는 P시편의 경우 부착강도가 크게 증가하였지만, 기계적 부착파괴의 기여도가 증가 할수록(Type B, Type C 파괴) 그 효과는 줄어들었다.

그러나, 고온양생 과정이 포함된 UHPC의 경우 정 반대의 결과를 나타냈다. 즉, 기존 층인 UHPC가 고온 양생을 통해 강도 발현이 끝난 경우, 내부가 포화상태이고 표면에 수분이 있으면 표면 형상과 관계없이 직접-전단 부착강도를 감소시키는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 강도발현이 끝난 UHPC 표면에 존재하는 물은 2.2.4 절의 설명과 같이, 계면에 국부적으로 W/C를 증가시켜 TZ를 더욱 약하게 만들기 때문이다(Bissonnette et al., 2012). 따라서 강도발현이 완전히 끝난 프리캐스트 UHPC를 NSC와 합성할 때 표면에 물기나 이물질이 없도록 관리해야 한다.

4.4 합성 후 양생장소에 따른 계면 부착강도

Fig. 9는 상온에서 7일간 양생한 UHPC에 NSC를 합성한 이후 양생 장소가 부착강도에 미치는 영향을 보여주는 그래프

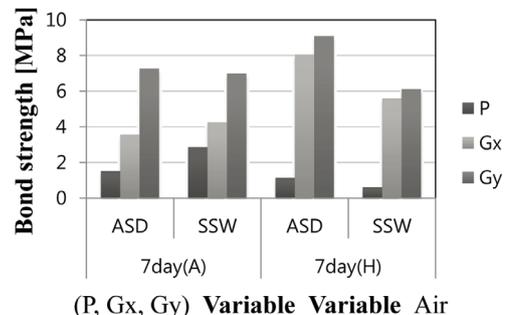


Fig. 8 Bond Strength with respect to Moisture Condition of UHPC

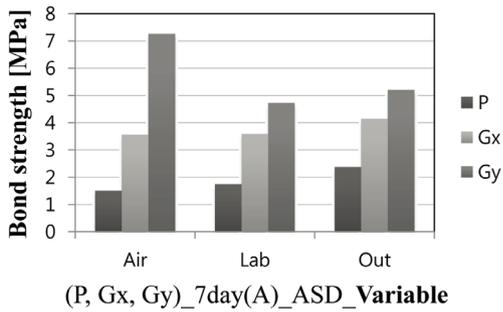


Fig. 9 Bond Strength with respect to Curing Place of UHPC-NSC Composite

프이다. 우선, 계면 파괴의 기여도가 상대적으로 큰 P와 Gx 시편은 부착강도의 크기가 실외 (Out) > 실내 (Lab) > 항온-항습기 (Air) 순으로 나타났다. P와 Gx 시편의 경우, 계면에서의 수화반응이 부착강도에 결정적인 역할을 하게 된다. 따라서, 항온-항습기 대비 평균 온도가 6.84°C 높은 실내양생과, 평균 온·습도가 각각 3.6°C, 9.86% 높은 실외양생인 경우, 높은 온·습도 조건이 계면에서의 수화반응을 더욱 촉진시킨 것으로 판단된다. 비록, 항온-항습기 대비 실내, 실외의 온·습도 변화율이 더 크지만, 이러한 요인은 계면 파괴에 의한 부착강도에는 결정적인 영향을 미치지 못하였다. 반면, Gy 시편은 항온-항습조건 보다 실내, 실외 양생 조건에서 더 낮은 부착강도를 나타냈다. Gy 시편은 UHPC 요철에 의해 기계적 부착파괴인 Type C가 발생하며, Type C 파괴는 NSC의 인장파괴가 전체적인 파괴에 크게 기여한다 (Austin et al., 1999). 일반적으로, 콘크리트 타설 후 양생 온도 및 습도가 증가하면 압축강도가 증가하며, 이는 인장강도의 증가로 이어진다 (Mehta and Monteiro, 2006). 따라서, 양생 당시 평균 온·습도의 차이보다는 온·습도 변화율이 NSC 인장강도에 더 크게 기여했으며, 이 때문에 Gy 시편의 부착강도가 감소한 것으로 보인다.

5. 결론

이 연구에서는 프리캐스트 UHPC와 그 위에 타설된 NSC 간 계면 부착강도에 미치는 요인들을 파악하였으며, 각각의 요인들이 부착강도에 미치는 영향을 직접-전단 및 쪼갬-인장 부착강도 실험을 통해 알아보았다. 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 표면형상에 따라 부착파괴 모드와 이에 따른 부착강도가 확실한 차이를 나타냈다. 즉, P 시편은 완전한 계면

파괴 (Type A), Gx 시편은 계면과 NSC 일부의 복합파괴 (Type B), Gy 시편은 NSC와 계면 일부의 복합파괴 (Type C), R 시편은 계면과 UHPC 일부의 복합파괴 (Type E)를 나타냈으며, 부착강도의 크기는 $Gy > R > Gx > P$ 순서로 결정되었다. P 대비 Gy 시편의 부착강도 비율은 UHPC를 상온 양생한 경우 4.8배, 고온 양생한 경우 8.1배로, 기계적인 결합력에 의해 NSC가 파괴되는 Type C 파괴는 Type A 파괴에 비해 월등한 부착강도를 보여주었다. 이러한 차이는 UHPC가 고온에서 양생되어 강도가 더 높은 경우 더욱 두드러지게 나타났다.

- (2) NSC와 합성하기 전 UHPC의 경화 진행 정도에 따른 부착강도를 확인한 결과, Type A 파괴가 발생하는 P 시편의 경우, 경화 진행이 완료에 가까울수록 부착강도가 크게 감소하였다. 즉, 상온에서 24시간 동안 양생한 UHPC에 NSC를 합성한 시편의 부착강도 대비 고온 양생하여 경화가 완전히 종료된 UHPC 위에 NSC를 합성한 시편의 부착강도 비율이 31%인 것으로 나타났다. 그러나, Type C 파괴가 발생하는 Gy 시편은 이와 정 반대의 결과를 보였다. 즉, 동일한 조건에서, 양생 24시간째 NSC를 합성한 시편 대비 고온 양생 후 NSC를 합성한 시편의 강도 비율이 123%로 오히려 증가하였다.
- (3) 합성 직전 UHPC의 수분상태가 부착강도에 미치는 영향을 알아보았으며, 표면형상과는 관계없이 UHPC의 양생조건에 따라 상반되는 결과를 나타냈다. 우선, 7일간 상온 양생 (20°C, R.H. 60%)한 UHPC 위에 NSC를 합성한 경우 표면과 내부에 존재하는 수분이 부착강도를 증가시켰다. 표면형상과 그에 따른 파괴모드에 따라 다소 차이는 보였지만, 평균적으로 부착강도가 34.7% 증가하였다. 반대로, 고온 양생한 UHPC 위에 NSC를 합성한 경우 동일한 조건의 수분이 부착강도를 감소시켰다. 역시, 표면형상에 따라 다소 차이는 있었지만, 평균적으로 37%의 부착강도가 감소하였다.
- (4) 합성 후 양생장소에 따른 부착강도 측정결과, P와 Gy 시편의 경우 온·습도 변화율보다는 평균 온도 및 습도가 증가할수록 높은 강도를 나타냈다. 반면, Gy 시편은 이와 다르게 평균 온·습도 보다는 온·습도 변화율이 부착강도에 더욱 크게 기여했기 때문에, 항온-항습조건보다는 실내 또는 실외 양생한 경우 강도가 더 낮게 측정되었다.

UHPC를 보수·보강재로 활용하기 위한 기존의 부착강도에 관한 연구와 달리, 이 연구에서는 UHPC를 프리캐스트 합성부재로 활용하기 위해 만족시켜야 할 부착강도에 관한 연구를 수행하였으며, 여기에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인에 대하여 검토하였다. 연구의 결과는 UHPC를 활용한 합성부재 제작시 부착강도를 감소시킬 수 있는 요인을 사전에 파악할 수 있는 자료로 활용 될 수 있으며, 더불어 부착강도를 향상시키기 위한 방법 개발에도 기여할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원 (13건설연구A02)에 의해 수행되었으며, 서울대학교 공학연구소로부터 논문게재료 일부를 지원받았습니다.

References

1. Abu-Tair, A. I., Rigden, S. R., and Burley, E. (1996), Testing the Bond between Repair Materials and Concrete Substrate, *ACI Material Journal*, 93(6), 553-558.
2. Austin, S. A., and Robins, P. J., (1993), Development of a Patch Test to Study the Behaviour of Shallow Concrete Patch Repairs, *Magazine of Concrete Research*, 45(164), 221-229.
3. Austin, S., Robins, P., and Pan, Y. (1995), Tensile Bond Testing of Concrete Repairs, *Material and Structures*, RILEM, 28(5), 249-259.
4. Austin, S., Robins, P., and Pan, Y. (1999), Shear Bond Testing of Concrete Repairs, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 29(7), 1067-1079.
5. Beushausen, H. D. (2005), Long-Term Performance of Bonded Overlays Subjected to Differential Shrinkage, Ph.D. Thesis, University of Cape Town, South Africa, 27-49.
6. Bissonnette, B., Vaysburd, A. M., and von Fay, K. F. (2012), Best Practices for Preparing Concrete Surfaces Prior to Repairs and Overlays, Transportation Research Board of the National Academies, TRB, Washington, D.C., 1-17.
7. Carbonell, M. A., Harris, D. K., Shann, S. V., and Ahlborn, T. M. (2012), Bond Strength between UHPC and Normal Strength Concrete (NSC) in accordance with Split Prism and Freeze-Thaw Cycling Tests, *Proceedings of Hipermat 2012*, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, 377-384.
8. Cho, C. G., Han, B. C., Lee J. H., and Kim, Y. Y. (2010), Flexural Test on Composite Deck Slab Produced with Extruded ECC Panel, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 22(5), 695-702 (in Korean, with English abstract).
9. Espeche, A. D., and Leon, J. (2011), Estimation of Bond Strength Envelopes for Old-to-New Concrete Interfaces Based on a Cylinder Splitting Test, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 25(3), 1222-1235.
10. Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., and Fröhlech, S. (2013), Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamental, Design, Examples, Ernst & Sohn, Kassel, 17-18.
11. Gai, X., Darby, A., Ibell, T., and Evernden, M. (2012), Experimental Investigation into a Ductile FRP Stay-In-Place Formwork System for Concrete Slab, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 49, 1013-1023.
12. Gillette, R. W. (1964), A 10-Year Report on Performance of Bonded Concrete Resurfacing, *Highway Research Record* (94), Highway Research Board, 61-76.
13. Harris, D. K., Sarkar, J., and Ahlborn, T. M. (2011), Characterization of Interface Bond of Ultra-High-Performance Concrete Bridge Deck Overlays, *Journal of the Transportation Research Board*, TRB, 40-49.
14. Hong, S. G., and Kang, S. H. (2013), Formwork Development using UHPFRC, *Proceedings of the RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, RILEM, Marseille, 197-206.
15. Kamen, A. (2006), Time Dependent Behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), 6th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, Zurich, 1-8.
16. Kang, S. H., and Hong, S. G. (2014), Performance of Fresh and Hardened Ultra High Performance Concrete without Heat Treatment, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 26(1), 23-34 (in Korean, with English abstract).
17. Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., and Kim, S. W. (2010), The Effect of Steel-Fiber Reinforcement on the Compressive Strength of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC), *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, JKSMI, 14(5), 110-118 (in Korean, with English abstract).
18. Kim, G. B., Pilakoutas, K., and Waldron, P. (2008), Development of Thin FRP Reinforced GFRC Permanent Formwork Systems, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 22(11), 2250-2259.
19. Kono, K., Musha, H., Kawaguchi, T., Eriguchi, A., Tanaka, S., Kobayashi, T., and Ikeda, A. (2013), Durability Study of the First PC Bridge Constructed with Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete in Japan, *Proceedings of the RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, RILEM, Marseille, 239-248.
20. Korean Agency for Technology and Standards (2006), Method of Test for Splitting Tensile Strength of Concrete, KS F 2423, Seoul, 1-16.
21. Korean Agency for Technology and Standards (2007), Method of Test for Slump of Concrete, KS F 2402, Seoul, 1-10.
22. Korean Agency for Technology and Standards (2009), Method of Test for Slump Flow of Fresh Concrete, KS F 2594, Seoul, 1-8.
23. Korean Agency for Technology and Standards (2010), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KS F 2405, Seoul, 1-10.
24. Kuder, K. G., Gupta, R., Harris-Jones, C., Hawksworth, R., Henderson, S., and Whitney, J. (2009), Effect of PVC Stay-In-Place Formwork on Mechanical Performance of

- Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 21(7), 309-315.
25. Leung, C. K. Y., and Cao, Q. (2010), Development of Pseudo-Ductile Permanent Formwork for Durable Concrete Structures, *Material and Structures*, RILEM, 43(7), 993-1007.
 26. Li, G., Xie, H., and Xiong, G. (2001), Transition Zone Studies of New-to-Old Concrete with Different Binders, *Cement Concrete Composites*, Elsevier, 23(4-5), 381-387.
 27. Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M. (2006), *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* 3rd edition, McGraw-Hill, New York, 21-84.
 28. Mirmoghtadaei, R., Mohammadi, M., Samani, N. A., and Mousavi, S. (2015), The Impact of Surface Preparation on the bond Strength of Repaired Concrete by Metakaolin Containing Concrete, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 80, 76-83.
 29. Momayez, A., Ehsani, M. R., Ramezani-pour, A. A., and Rajaie, H. (2005), Comparison of Method for Evaluating Bond Strength between Concrete Substrate and Repair Materials, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 35(4), 748-757.
 30. Nelson, M., and Fam, A. (2014), Full Bridge Testing at Scale Constructed with Novel FRP Stay-In-Place Structural Forms for Concrete Deck, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 50, 368-376.
 31. Omar, B., Fattoum, K., Maissen, B., and Farid, B. (2010), Influence of the Roughness and Moisture of the Substrate Surface on the Bond between Old and New Concrete, *Contemporary Engineering Sciences*, 3(3), 139-147.
 32. Pigeon, M., and Saucier, F. (1992), Durability of Repaired Concrete Structures, *Proceedings of International Symposium on Advances in Concrete Technology*, Athens, 741-773.
 33. Richard, P., and Cheyrezy, M. (1995), Composition of Reactive Powder Concretes, *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511.
 34. Santos, P. M. D., and Julio, E. N. B. S. (2011), Factors Affecting Bond between New and Old Concrete, *ACI Materials Journal*, ACI, 108(4), 449-456.
 35. Shin, H. C., and Wan, Z. (2010), Interfacial Shear Bond Strength between Old and New Concrete, *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures*, KCI, Seoul, 1195-1200.
 36. Tawab, A. A., Fahmy, E. H., and Shaheen, Y. B. (2012), Use of Permanent Ferrocement Forms for Concrete Beam Construction, *Material and Structures*, RILEM, 45(9), 1319-1329.
 37. Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., and Megat Johari, M. A., (2013), Characterization of the Interfacial Bond between Old Concrete Substrate and Ultra High Performance Fiber Concrete Repair Composite, *Material and Structures*, RILEM, 46(5), 743-753.
 38. Tayeh, B. A., Abu Bakara, B. H., Megat Johari, M. A., and Voo, Y. L. (2012), Mechanical and Permeability Properties of the Interface Between Normal Concrete Substrate and Ultra High Performance Fiber Concrete Overlay, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 36, 538-548.
 39. Thanoon, W. A., Yardim, Y., Jaafar, M. S., and Noorzaei, J. (2010), Structural Behavior of Ferrocement-Brick Composite Floor Slab Panel, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 24(11), 2224-2230.
 40. Wan, Z. (2011), Interfacial Shear Bond Strength between Old and New Concrete, M. S. Thesis, Louisiana State University, 1-21.
 41. Wirojjanapirom, P., Matsumoto, L., Kono, K., and Niwa, J. (2013), Experimental Investigation of Shear Behavior of RC Beam using UFC U-Shaped Permanent Formwork, *Proceedings of the RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, RILEM, Marseille, 187-196.

Received : 04/02/2015
 Revised : 04/09/2015
 Accepted : 04/16/2015

요 지

이 연구에서는 초고성능 콘크리트 (UHPC)와 보통 콘크리트 (NSC)간 계면부착강도에 관한 연구를 수행하였다. UHPC를 보수·보강재로 활용하기 위한 기존의 부착강도에 관한 연구와 달리, UHPC를 프리캐스트 합성부재로 활용하기 위한 연구에 초점을 맞추었으며, 여기에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인에 대하여 검토하였다. 기존 연구들을 분석한 결과, UHPC-NSC 계면 부착강도에 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 계면의 형상, 합성 전 UHPC의 경화 진행상태, 합성 전 UHPC의 수분 흡수상태, 그리고 합성 후 양생장소와 같이 크게 4가지로 구분되었다. 계면의 형상을 변수로 한 실험에서는 형상에 따라 각기 다른 파괴모드가 나타났으며, 기존 연구에서 확인되지 않았던 거칠게 처리한 UHPC 계면 일부가 파괴되는 새로운 파괴모드가 발견되었다. 합성 전 UHPC의 경화진행 상태가 부착강도에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이러한 영향은 부착 파괴모드에 따라 다르게 나타났다. 또한, 합성 전 UHPC의 수분상태가 부착강도에 영향을 주었으며, UHPC의 양생방법에 따라 서로 상반되는 결과를 보였다. 마지막으로, 합성한 시편의 양생조건 역시 계면 부착강도에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

핵심 용어 : 초고성능 콘크리트, 부착강도, 영구거푸집, 합성구조, 계면