

# 콘크리트 구조물의 외부 결합 섬유 강화 폴리머 시스템의 평가

저자: JACOB L. BORGERSON 및 WOODWARD L. BOGT

원래 1980년대 일본과 유럽에서 개발된 콘크리트 보강을 위한 섬유 강화 플라스틱(FRP)의 사용은 미국에서 그 인기가 증가하고 있습니다. FRP 시스템은 교량, 건물, 주차장 및 기타 콘크리트 구조를 갱신하고 복구하는데 사용될 수 있습니다. 그림 1은 콘크리트 빔의 장력 표면에 적용된 FRP의 사진을 보여줍니다. FRP는 고강도 탄소 또는 유리 섬유로 보강되는 폴리머 매트릭스입니다. FRP는 높은 인장 강도를 가지고 있으며, 또한 경량이며, 부식을 방지하고, 설치가 일반적으로 쉽습니다. 이러한 장점 때문에 FRP는 기존 콘크리트 구조물의 수리, 재활 및 갱신에 대한 바람직한 접근이 되었습니다. 콘크리트에 외부 결합 FRP의 적절한 부착 강도를 평가하기 위한 시험 방법 및 합격 기준은 여기에 설명되어 있습니다. 콘크리트 구조에 FRP 시스템의 설계, 설치, 그리고 적용에 대한 전체 설명을 보려면 ACI 440.2R "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures"<sup>1</sup>을 참조하십시오.



그림 1: 콘크리트 빔에 외부 결합된 FRP

## FRP 시스템 설치

외부 결합 FRP 시스템의 설치에는 사전 경화(즉, 조립식) 또는 상온 적층 응용법을 포함한 몇 가지 방법이 있습니다. 상온 적층법은 섬유 시트를 수지로 적셔 이를 콘크리트 표면에 적용한 뒤 경화시키는 방법이 수반됩니다. 반대로, 사전 경화 시트(또는 셀)는 제어 환경에서 제조된 이후에 콘크리트 구조에 부착됩니다. FRP를 콘크리트 구성원에 적용하기 전에 몇 가지 다른 매개 변수(예를 들어, 물질 특성, 환경 조건, 및 적재)이 사전에 고려되어야 하며, 숙련된 기술자의 지도 아래 완성되어야 합니다. FRP의 설치에는 일반적으로 간단한 과정으로 간주되지만, 취급 및 적용 시 오류가 발생할 수 있습니다. 따라서 최종 설치한 시스템을 검사하고 시험하는 것이 중요 합니다.

## FRP 시스템 검사 및 시험

FRP 시스템의 설치 전 및 설치 중, FRP 콘크리트 시스템이 성능 기준을 준수하도록 적절한 품질 관리 대책을 적용해야 합니다. FRP 시스템이 설치되고 적당히 양생되면 승인된 적용 절차와 적합성을 확인하기 위해 검사 및 시험을 해야 합니다. 음향 울림, 적외선 화상 처리, 접착 시험 등의 비파괴 시험 및 평가 기법(NDT&E)과 함께 육안 검사가 수행되어야 합니다. 다양한 방식 중 접착 시험은 최상의 양적 정보를 제공합니다 - 접착 시험은 최소한의 주관적인 접근이긴 하나 비용이 높습니다. (그림 2 참조)

육안 검사는 FRP 시스템 검사를 위한 가장 간단하고 일반적으로 가장 첫 번째 접근입니다. 검사관은 균열, 주름 및 물집(기포)과 같은 모든 유형의 표면 결합의 근거를 찾아야 합니다.

육안 검사는 FRP 설치의 품질을 평가하기 위한 효과적인 도구가 될 수 있지만, 그것은 근본적으로 주관적이며 검사관의 경험과 지식에 크게 의존하고 있습니다. (그림 3)

음향 측심(즉, 청음 시험)은 FRP와 콘크리트 간에 갈라짐, 박리 또는 기포의 존재 여부를 판단하는 데 사용됩니다. 일반적으로 조사관은 FRP 콘크리트 시스템의 표면을 청음하기 위해 망치를 사용하고, 둔탁하고 속이 빈 소리(바닥에 떨어진 세라믹 타일의 소리를 상상하면 됨)에 귀를 기울입니다. 이 기술은 콘크리트 교량 층의 공백 검출에 인기리에 사용되는 체인 끌기 법과 유사합니다. 그 대신에 열화상으로 갈라짐을 감지하는 데 사용할 수 있습니다.

열화상은 구조물에서 배출되는 적외선 방사량을 측정합니다. 갈라짐의 구조를 따라 열 흐름의 변화를 일으킬 수 있기 때문에 이러한 뜨거운 명소는 FRP가 부적절하게 콘크리트로 보세는 위치를 나타낼 수 있습니다. 이러한 기술은 신속하게 적용하고 시스템에 대한 개요를 제공할 수 있다는 두 가지 주요 장점이 있습니다. 음향 측심 및 열화상은 갈라짐을 식별하는 데 사용할 수 있긴 하나, FRP 시트 간 또는 FRP 콘크리트 접점의 접착력을 수량화하기가 불가능합니다.

ASTM D4541<sup>2</sup>; ASTM D7522/D7522M<sup>3</sup>; 또는 ACI 440.3R, Test Method L.1 접착력 시험은 FRP 층과 FRP 콘크리트 접점의 접착력을 구하는데 사용됩니다. 그림 4는 시험장비의 예를 보여줍니다. 시험방법은 FRP 콘크리트 시스템의 표면에 접착할 달리(당김 토막)가 필요합니다. 달리가 분리될 때까지(다시 말해 실패가 일어날 때까지) 표면으로부터 수직의 인장력이 가해집니다. 최대 인장 응력 또는 결합 강도는 적용 하중과 달리 면의 면적에 따라 계산됩니다. 그림 5는 시험 방법의 구조도를 제공합니다. 일반적으로 달리의 주변에 있는 FRP의 표면(즉, 0.25 ~ 0.50 in. [6.4 ~ 13mm])은 콘크리트 기질까지 절단되며, 이것을 "스코어링"이라 칭합니다. 표면의 스코어링은 하중이 돌리 면의 표면에 균일하게 적용되었으며, 결과 압력이 유일하게 인장력이라는 것을 보장합니다. 콘크리트의 이질적인 특성으로 인해 2 in. (50mm) 지름의 시험 달리가 사용됩니다. 더 작은 달리도 구입이 가능하지만, 작은 표면에 하중을 가하면 측정 결과를 국소적 변칙(예를 들어 대형 골재, 약한 페이스트, 등)의 영향에 더욱 민감하게 만듭니다.

시스템의 결합 강도 이외에 특정 실패 모드(예를 들어, 콘크리트 기질의 실패 또는 FRP의 층 간의 실패) 또한 언급되어야 합니다. 이상적으로, 실패는 콘크리트 기질에서 일어나

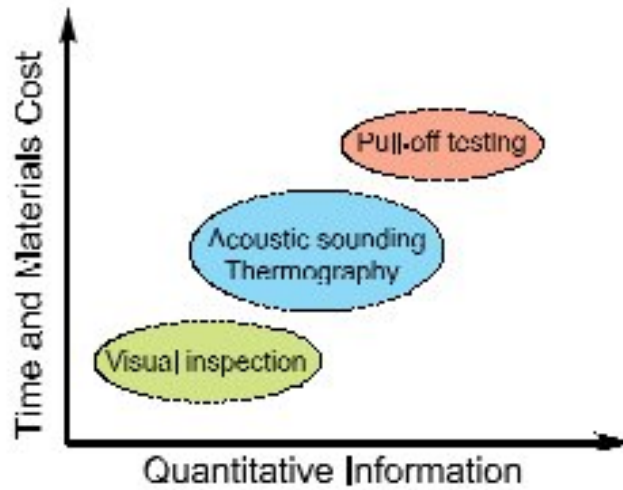


그림 2: 조사 기술의 상대적 비용 및 수량적 정보를 보여주는 도표



Fig. 3: FRP 콘크리트 시스템을 검사하는 조사관

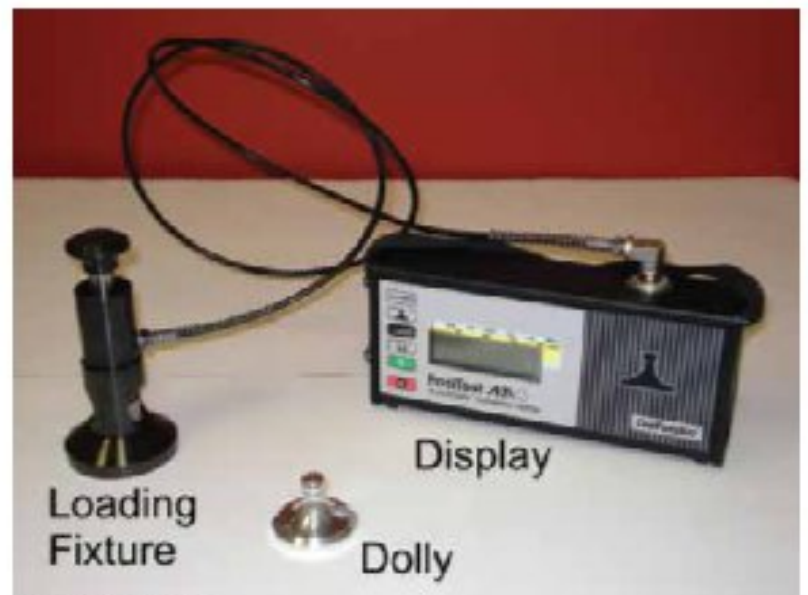


그림 4: 접착력 시험기

야 하며 (그림 6 및 7 참조), 이는 FRP 층 사이 그리고 FRP 콘크리트 접합 사이의 결합이 콘크리트 인장 강도보다 큰 것임을 의미합니다. 접착력 시험이 NDT&E 기술로 분류될 수도 있지만, 순전히 비파괴적이진 않습니다. 허나 영향을 받는 표면적은 전체 시스템에 비해 작습니다. (즉, 최소한의 손상을 줍니다.) 또한, 이 시험 방법은 달리에 미리 정해진 양의 압력 만을 가해 순수하게 비

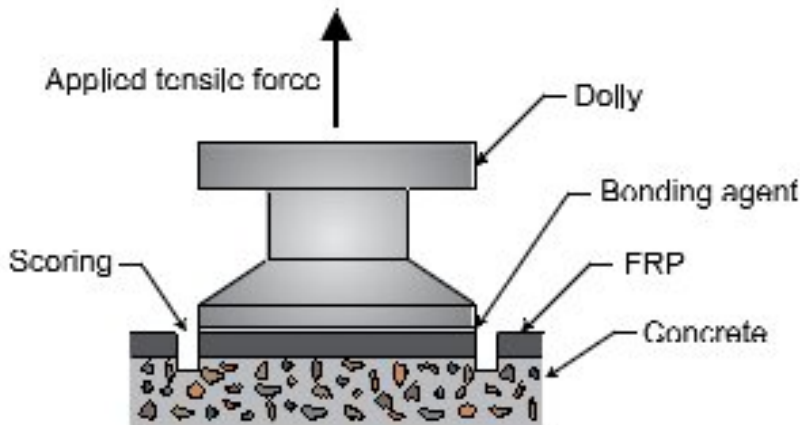


그림 5: 달리에 인장 강도를 가하는 것을 보여주는 계통도

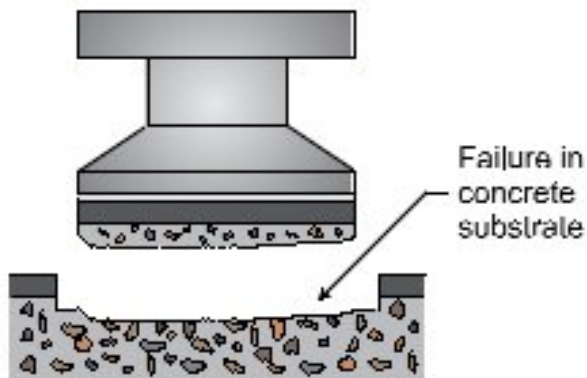


그림 6: 콘크리트 기질의 결합 실패를 보여주는 계통도



그림 7: 콘크리트 기질의 결합 실패를 보여주는 달리

파괴적이도록 수정할 수 있습니다. (즉, 그것이 실패할 때까지가 아님). 이런 방식의 시험 방법의 수정에서는 FRP가 갈라지지 않을 것입니다.

### 갈라짐

신중하게 설치하지 않을 경우, FRP를 콘크리트 표면에 붙일 때 갈라짐이 발생할 수 있습니다. ACI 440.2R은 점적률이 5% 미만이고, 이러한 갈라짐이 10 ft<sup>2</sup>(0.93 m<sup>2</sup>) 당 10개 이하이기만 하면, 2 in.<sup>2</sup> (1,290 mm<sup>2</sup>) 미만의 갈라짐은 허용된다고 명시하고 있습니다. 이 지침(즉, 2 in.<sup>2</sup>[1,290 mm<sup>2</sup>] 이상)을 준수하지 않는 갈라짐은 제대로 수리되어야 합니다.

### 접착 강도

FRP 소재가 콘크리트 구성원에 제대로 부착되는 것이 중요합니다. FRP의 여러 층이 접착되는 경우, 뿐만 아니라, 이 층이 함께 올바르게 결합되는 것을 보장하는 것이 중요합니다. ACI 440.2R은 결합이 중요한 적용 분야에서는 인장 접착 강도가 200 psi (1.4 MPa)를 초과해야 하며 (그림 6 및 7 참조) 콘크리트 기질 내에서 실패를 나타내야 한다고 명시하고 있습니다. 현재 ACI 440.2R은 제대로 개발된 시험 계획의 중요성을 강조하는 접착력 시험 위치와 횟수를 구체적으로 언급하지 않고 있습니다. 참조되는 특정 검사 기준에 따라 권장 시험 횟수는 대표적인 부위 당 3 ~ 5회로 다양합니다. 전형적인 시험 계획은 100 ft<sup>2</sup> (92.9 m<sup>2</sup>) 당 최소 1회 및 동일한 위치에서 최소 3회가 요구됩니다. 추가 요구 사항은 각 콘크리트 유형 및 / 또는 FRP가 적용된 날짜 별 시험을 포함할 수 있습니다. 복잡한 프로젝트일 경우, 개념 증명(즉, 작은 부분에 FRP를 적용하는 것)을 진행하여 FRP 콘크리트 시스템이 실제로 적용하기 전에 허용되는 시험 결과를 달성할 수 있도록 하는 것이 유리할 수 있습니다. FRP 시스템의 결합 강도가 허용 압축 및 인장 강도를 갖는 콘크리트 기질에 의존하는 것이 중요합니다. 결합이 중요한 중요한 적용 분야에서는 압축 강도와 콘크리트의 인장 강도가 각각 최소 2,500 및 200 psi(17.2 및 1.4 MPa)가 되어야 합니다. 이것은 설치 과정의 중요하지만 종종 간과되는 측면이 있으며, FRP 시스템을 적용하기 전 콘크리트 강도 시험의 중요성을 보여줍니다.

### 도전 과제

FRP의 적용이 간단하고 시험이 비교적 간단하지만, FRP 콘크리트 결합 강도의 평가 시 몇 가지 문제가 남아있을 수 있습니다. 날씨,

표 1: 접착력 시험의 도전 과제

도전 과제	잠재 원인
FRP 층간 또는 FRP 와 콘크리트 간 갈라짐	레진의 부적절한 경화 (예를 들어, 낮은 주위 온도)
	부착 시 시트 사이에 기포가 갇힘
FRP 표면에서 달리 분리	달리 면이 양호한 접착을 보장하기 위해 연마되지 않음
	달리 면이 기름으로 오염됨
	달리 접착제의 부적절한 경화
콘크리트 기질에서 접착 실패, 하나 낮은 접착 강도	부적절한 스코어링 과정이 콘크리트 기질을 약화시킴
	콘크리트 인장 강도가 낮음

특히 온도 변동으로 인해 에폭시 수지의 부적절한 경화가 발생할 수 있습니다. FRP 시스템이 콘크리트 구성원의 강도 향상에 효과적이라면 콘크리트 기질의 인장 강도가 충분해야 합니다. 예를 들어 콘크리트의 인장 강도가 200 psi(1.4 MPa) 미만인 경우, 실제 결합 강도가 200 psi(1.4 MPa)보다 큰 경우에도 실패한 시험 결과를 접할 수 있습니다.

표 1에서는 콘크리트 구조물의 외부 결합 FRP를 평가할 때 마주치는 전형적인 도전 과제를 요약했습니다.

## 참조

1. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 76 pp.
2. ASTM D4541-09e1, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, 16 pp.
3. ASTM D7522/D7522M-09, "Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Bonded to Concrete Substrate," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, 6 pp.
4. ACI Committee 440, "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2004, 40 pp.



**Jacob L. Borgerson, PhD**, is a Senior Project Manager for Paradigm Consultants, Inc. Borgerson received his PhD from the University of Illinois at Urbana Champaign. He has over 10 years of experience developing and implementing nondestructive testing methods for concrete, building materials, and structural systems. He is a member of ICR and the American Concrete Institute (ACI). Borgerson can be contacted at [jacob@paradigmconsultants.com](mailto:jacob@paradigmconsultants.com).



**Woodward L. Vogt, PE, FCI, FASCE**, is the President of Paradigm Consultants, Inc. Vogt has more than 35 years of experience encompassing geotechnical and materials engineering, construction materials inspection and testing, condition surveys, and forensic investigations. He is frequently called upon as an expert witness in dispute resolution. He actively participates in ICR, ACI, ASTM International, the American Society of Civil Engineers, and the American Association for Laboratory Accreditation. Vogt can be contacted at [woody@paradigmconsultants.com](mailto:woody@paradigmconsultants.com).