

탄소섬유쉬트-콘크리트 부착이음의 부착 모델

Bond-Slip Model for CFRP Sheet-Concrete Adhesive Joint

조정래* · 조근희** · 박영환*** · 박종섭****

Cho, Jeong-Rae · Cho, Keunhee · Park, Young-Hwan · Park, Jong-Sup

Abstract

In this study, a method determining the local bond-slip model from pure shear test results of CFRP sheet-concrete adhesive joints is proposed and local bond-slip models are presented. Adhesive joints with a specific bond-slip model, which is assumed as multi-linear curve in order to represent arbitrary function, are solved numerically. The difference between the solution and test results are minimized for finding the bond-slip model. The model with bilinear curve is also optimized to verify the improvement of multi-linear model. The selected test results are ultimate load-adhesive length curves from a series of adhesive joints and load-displacement curves for each joint. The optimization problem is formulated by physical programming, and the optimized bond-slip model is found using genetic algorithm.

Keywords : CFRP sheet-concrete adhesive joint, bond-slip model, multi-linear model, bilinear model, physical programming, genetic algorithm

요 지

이 연구는 탄소섬유쉬트-콘크리트 부착이음 실험 결과로부터 국부적인 부착모델(부착응력-미끄럼 모델)을 결정하는 방법을 제안하고, 실제 실험 결과와 비교하여 이러한 부착 조건에 적용 가능한 부착모델을 제시한다. 부착모델의 형상은 임의의 곡선 형태를 고려할 수 있도록 다중선형곡선(multi-linear curve)으로 가정하였으며, 수치적인 방법으로 부착이음의 해를 계산하여 실험 결과와 오차를 최소화하는 방법으로 부착모델을 결정하였다. 이중선형곡선(bilinear curve)을 도입한 부착모델 역시 최적화를 수행하여 다중선형모델과 비교하였다. 최적화의 대상은 동일 조건의 부착모델에 대해 여러 실험체로부터 구한 극한하중-부착길이 곡선과 개별 실험체의 하중-변위 곡선이다. 최적화를 위한 정식화는 physical programming을 사용하였으며 최적화 방법은 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용하였다.

핵심용어 : 탄소섬유쉬트-콘크리트 부착이음, 부착응력-미끄럼 모델, 다중선형모델, 이중선형모델, physical programming, 유전 알고리즘

1. 서 론

항공 분야에서 주로 사용되던 복합재료(FRP, Fibre Reinforced Polymer)는 가격하락 등으로 인해 토목건축 분야에서 최근 강재를 대체할 신소재로 각광받고 있다. 복합재료는 무게에 비해 강도 및 강성이 크고, 부식이 없어 내구성이 뛰어난 장점이 있다. 현재 토목건축 분야에 있어 복합재료는 구조물의 보수보강 분야에서 많이 사용되고 있으며, 이때 주로 사용되는 공법은 복합재료 쉬트·판 등을 에폭시 등의 접착제로 접착하는 부착공법이다. 부착이음(adhesive bonded joint)에 대한 순수전단실험은 콘크리트와 복합재료 보강재의 부착 거동 특성을 파악하기 위해 주로 사용되는 기초 실험이다. 많은 실험연구에서 밝혀진 사실은 (1) 부착

길이가 일정한 길이를 넘을 경우 더 이상 부착강도가 증가하지 않는다, 즉 유효부착길이가 존재한다는 점과, (2) 부착강도는 콘크리트 강도에 큰 영향을 받는다는 점, (3) 콘크리트와 보강재의 너비 역시 중요한 영향인자라는 점이다(Teng 등, 2002).

기존의 연구는 실험결과에 초점을 맞추어 접근하는 실험적 방법과 해석적 관점에서 파괴역학을 도입하여 접근하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. Hiroyuki 등(1997), Tanaka (1996)는 최대전단력을 부착면적으로 나눈 것으로 정의되는 평균부착강도 식을 실험결과로부터 제시하였다. 이 두 모델은 유효부착길이 개념이 결여되어 있다. Maeda 등(1997)은 평균부착강도 식과 유효부착길이 식을 별도로 제안하였으나 콘크리트의 강도를 고려하지 않았다. 유영찬 등(2001)과 박

*정희원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원(E-mail: chojr@kict.re.kr)

**정희원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원 · 공학박사(E-mail: kcho@kict.re.kr)

***정희원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원 · 공학박사(E-mail: yhpark@kict.re.kr)

****정희원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원(E-mail: jspark1@kict.re.kr)

중열 등(2003)은 유효부착길이를 비롯한 부착 특성을 실험적으로 고찰하였다. 실험 연구와 함께 파괴역학에 기초하여 해석적으로 부착 특성을 고찰한 연구는 다음과 같다. Täljsten (1994)은 파괴역학에 기초하여 부착강도를 유도하였으며, Chen 등(2001)은 여러 해석 모델에 대해 실험 결과와의 비교를 통하여 부착강도와 유효부착길이를 제안하였다. Wu와 동료 연구자들(Yuan 등, 1997; Wu 등, 2002a; Wu 등, 2002b)은 선형·비선형 파괴역학에 기초하여 간단한 형태의 부착응력-미끄럼 모델에 대한 부착이음의 해석해를 유도하였으며, 복잡한 비선형 모델에 대해서는 수치 해석을 통해 유효부착길이, 콘크리트의 강성 효과 등을 설명하였다. Chen 등(2001)은 τ_f 를 콘크리트 활열 인장 강도에서 구하도록 제안하고 있으며, Niedermier(1996)은 독일의 DIN1048에 따라 구할 수 있는 평균 콘크리트 표면 인장 강도에서 구하도록 제안하고 있다. 한편, 한상호 등(2003)은 탄소섬유슈트 보강된 철근콘크리트 보에 대해 부착응력-미끄럼 모델을 제시하고 이를 링크요소로 모델링하여 해석에 적용하였다.

이 연구에서는 보수보강 분야에서 적용되는 탄소섬유슈트를 콘크리트에 에폭시로 함침시켜 제작된 부착이음을 대상으로 국부적인 부착모델(부착응력-미끄럼 모델)을 결정하는 방법을 제안하고, 실험결과와 비교하여 이러한 부착 조건에 적용가능한 부착모델을 제시하고자 한다. 부착모델은 임의의 곡선 형태를 고려할 수 있도록 다중선형곡선(multi-linear curve)으로 가정하였으며, 수치적인 방법으로 부착이음의 해를 계산하여 실험결과와 오차를 최소화하는 방법으로 부착

모델을 결정하였다. 또한, 기존 연구에서 많이 사용된 이중 선형곡선(bilinear curve)에 대해서도 최적화를 수행하여 다중 선형모델과 비교하였다. 부착이음의 해는 조근희 등(2003)이 유도한 계면요소(interface element)를 이용하여 수치적으로 계산하였다. 탄소섬유슈트 부착이음의 실험은 콘크리트 강도가 다른 2가지 실험체 군에 대해 부착길이를 변화시켜가며 수행하였고, 각 실험체군은 동일한 부착조건을 가지고 있다. 얻어진 실험결과 중에서 실험체군에 대한 “극한하중-부착길이 곡선”과 개별 실험체에 적용하는 “하중-변위 곡선”을 최적화의 대상으로 채택하였다. 최적화에 사용된 방법은 조근희 등(2004)이 적용한 physical programming과 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용하였다.

2. 부착모델과 부착이음의 수치해석해

부착이음은 그림 1과 같이 경계조건에 따라 pull-push 이음과 pull-pull 이음으로 구분된다. 부착이음의 이론해는 그림 2와 같이 미리 가정된 부착모델에 대해 순수 전단 상태를 가정하여 지배미분방정식을 유도한 후, 적절한 경계조건을 부과하여 유도할 수 있다. 그림 2(a)~그림 2(e)는 기존 연구자들에 의해 제안된 부착모델 들이다. 특히 그림 2(a)와 그림 2(d)에 각각 표시된 선형과 이중선형의 두 가지 부착 모델들(각각 Wu의 모델 I, 모델 II)에 대해서는 Wu와 그 동료 연구자들(Yuan 등, 1997; Wu 등, 2002a)이 pull-push 이음, pull-pull 이음의 해석해를 각각 유도하였다.

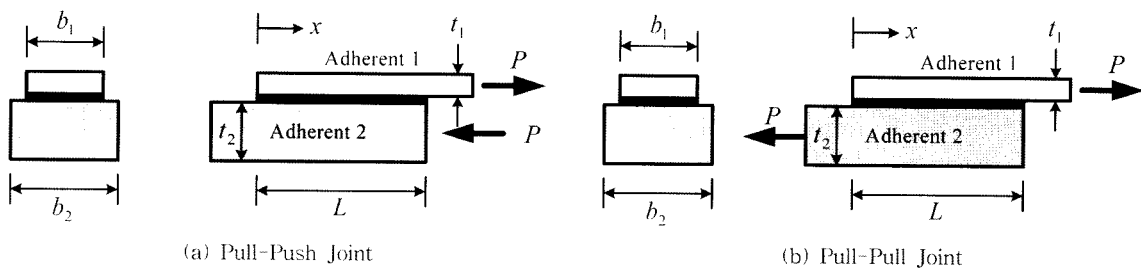


그림 1. 부착 이음의 종류

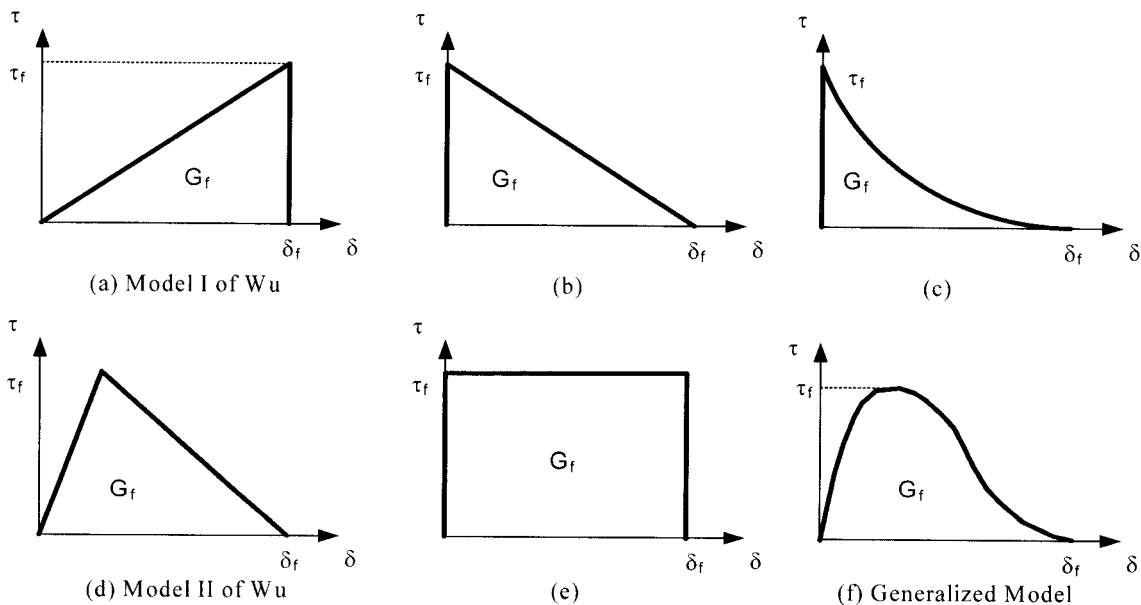


그림 2. 부착응력-미끄럼 모델(부착모델)

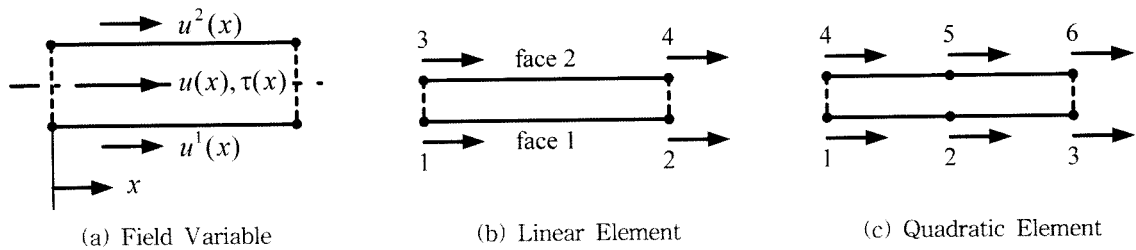


그림 3. 계면요소 (1차원)

이 연구의 목적은 부착모델 곡선을 실험 결과로부터 구하는 것으로 곡선을 구성하는 파괴에너지 G_f 와 같은 매개변수 뿐만 아니라 곡선의 형상 자체를 매개변수로 하고 있다. 하지만, 부착이음의 해석에는 그림 2(f)와 같은 일반적인 형상을 가지는 부착모델을 적용할 경우 유도하기 힘들기 때문에 이 연구에서는 수치적인 기법으로 부착이음의 수치해석을 구하였다. 부착 모델의 형상은 일반화된 형상을 표현할 수 있도록 다중선형곡선을 가정하였다. 수치해석은 조근희 등(2003)이 유도한 계면요소(Interface element)를 이용하였다.

계면요소는 계면의 거동을 수직 및 전단응력과 이에 대응하는 변위로 나타내는 요소이다. 여기서는 1차원 계면요소(그림 3 참조)의 정식화 과정을 소개한다.

계면요소에서 1면, 2면의 변위를 각각 $u^1(x)$, $u^2(x)$ 라 하면, 미끄럼 $u(x)$ 는 두 변위의 차로 정의된다.

$$u(x) = u^2(x) - u^1(x) \quad (1)$$

미끄럼 u 에 대응하는 부착응력 τ 은 다음과 같은 구성방정식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = f(x) \quad (2)$$

Isoparametric formulation을 도입하여, 각 면의 변위벡터를 보간하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u^1(x) &= \mathbf{N}(\xi) \hat{\mathbf{u}}^1 \\ u^2(x) &= \mathbf{N}(\xi) \hat{\mathbf{u}}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\hat{\mathbf{u}}^1, \hat{\mathbf{u}}^2$ 는 각각 1, 2면의 절점변위이고, $N(\xi)$ 는 형상 함수이다. 따라서, 미끄럼 u 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(x) = \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}} = [-\mathbf{N} | \mathbf{N}] \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{u}}^1 \\ \hat{\mathbf{u}}^2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

비선형 해석 단계에서 절점하중-절점변위 관계를 구하기 위하여 가상변위법을 적용한다.

$$\int_L \delta \mathbf{u}^T (\tau^j + \Delta \tau^j) dx = \delta \hat{\mathbf{u}}^T \mathbf{F}^{j+1} \quad (5)$$

여기서, L 는 계면요소의 폭이고, \mathbf{F}^{j+1} 은 $j+1$ 단계의 절점력으로서 다음 식과 같다.

$$\mathbf{F}^{j+1} = \int_{-1}^1 \mathbf{M}^T \tau \frac{dx}{d\xi} d\xi + \int_{-1}^1 \mathbf{M}^T \frac{d\tau}{du} \mathbf{M} \frac{dx}{d\xi} d\xi \Delta \hat{\mathbf{u}} \quad (6)$$

3. 부착이음 실험과 분석 대상 변수의 결정

탄소섬유슈트 부착이음에 대한 실험 데이터는 한국건설기술연구원에서 수행된 실험 결과를 이용하였다(한국건설기술연구원, 2002). 실험은 콘크리트 강도, 표면처리상태, 부착길이, 부착폭, 탄소섬유슈트 적층수를 변수로 하여 24개의 실험체 종류에 따라 각각 3개씩 동일조건의 실험체를 제작하여 탄소섬유슈트 양면부착 pull-pull 이음 실험을 수행한 것이다(그림 4). 하중 가력 속도는 KS F 2241 “유리섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방법”에 준하여 2 mm/min을 적용하였다. 이 연구에서는 표 1에 표시한 것과 같이 콘크리트 설계강도 13.5 MPa, 27 MPa에 따라 구분되는 CA135 실험체군, CA270 실험체군 등 2개의 실험체군을 부착모델을 구

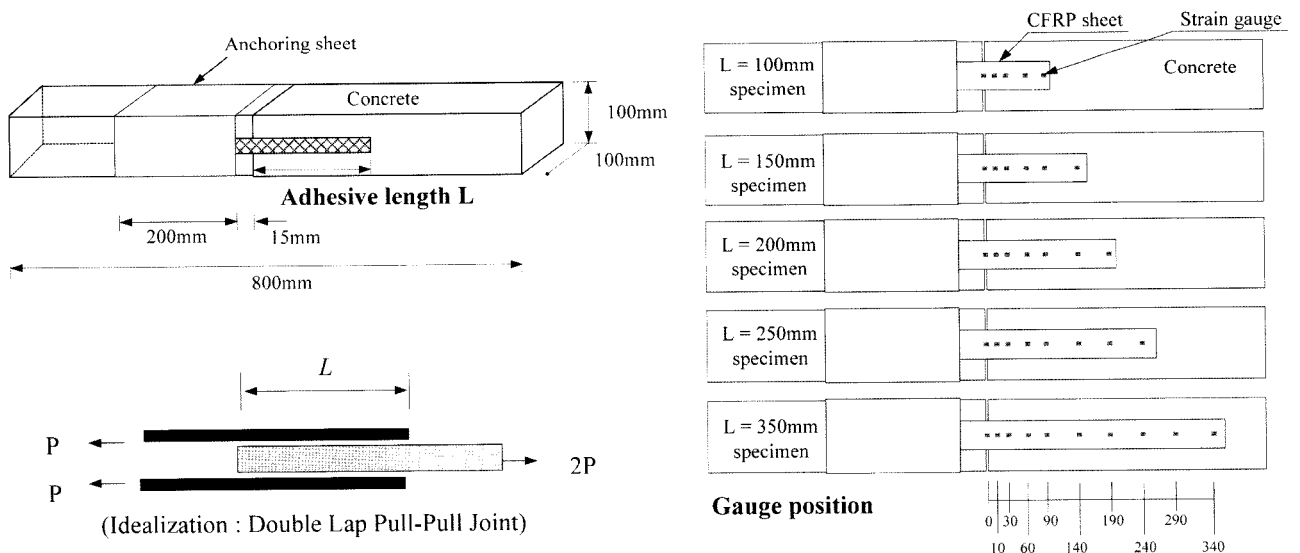


그림 4. 부착이음 실험 개요(한국건설기술연구원, 2002)

표 1. 부착이음 실험체 및 결과(한국건설기술연구원, 2002)

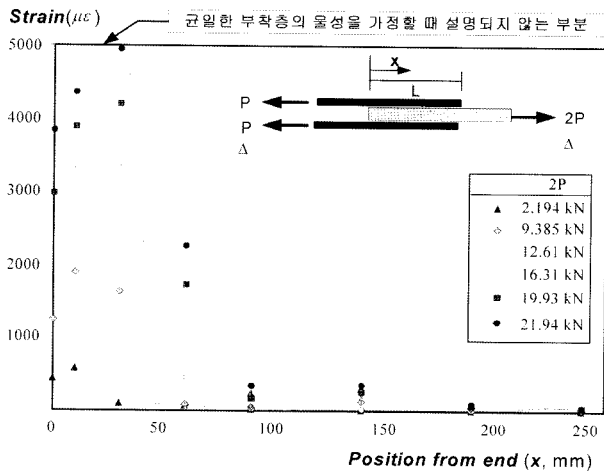
실험체군	콘크리트 강도 (MPa)		실험체명	부착 길이 (mm)	극한하중(kN), $2P_u$				평균부착응력(MPa)			
	설계 강도	공시체강도			시편 1	시편 2	시편 3	평균	시편 1	시편 2	시편 3	평균
CA135 실험체군	13.5	15.57	CA135-L10	100	16.74	17.02	17.01	16.92	1.674	1.702	1.701	1.693
			CA135-GPS	150	14.78	18.00	15.16	15.98	0.986	1.200	1.011	1.066
			CA135-L20	200	17.60	18.60	21.96	19.39	0.880	0.930	1.098	0.970
			CA135-L25	250	20.73	21.78	19.56	20.69	0.829	0.871	0.783	0.828
			CA135-L35	350	22.97	26.42	24.34	24.58	0.657	0.755	0.696	0.702
CA270 실험체군	27.0	28.27	CA270-L10	100	18.40	18.97	20.33	19.23	1.840	1.897	2.033	1.924
			CA270-GPS	150	20.49	21.89	19.70	20.69	1.366	1.460	1.314	1.380
			CA270-L20	200	22.43	20.69	-	21.56	1.122	1.035	-	1.079
			CA270-L25	250	25.23	22.31	22.40	23.31	1.009	0.893	0.896	0.933
			CA270-L35	350	22.22	24.24	25.12	23.86	0.635	0.693	0.718	0.682

※실험체 당 3개의 시편 제작, 표면처리는 그라인딩 후 프라이머 도포, 부착폭은 50 mm

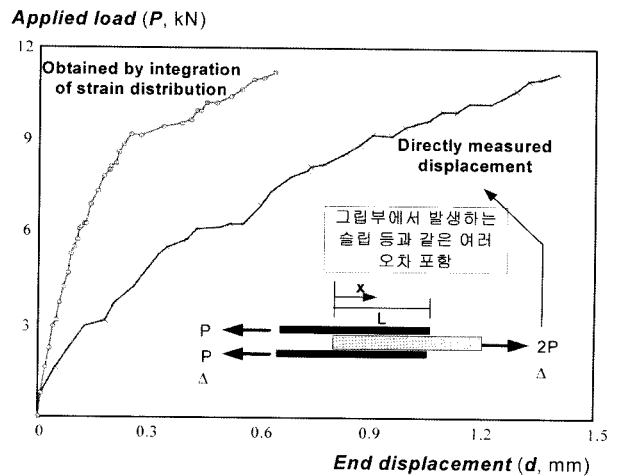
※탄소섬유쉬트의 설계두께 0.11 mm, 인장강도는 3550 MPa, 탄성계수는 235 GPa

※평균부착응력은 “극한하중/부착면적”으로 정의

※시편 3에 변형률게이지 부착 및 측정



(a) 축변형률분포



(b) 측정된 변위와 적분된 변위

그림 5. CA270-L25 실험체의 실험결과

하는 기본 자료로 활용하였다. 총 실험체의 개수는 CA135 실험체군이 15개, CA270 실험체군이 14개이다. 부착길이 (100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 350 mm)별로 동일한 조건의 시편을 3개씩 제작하여 실험하였으며, 변형률은 그 중 1개의 시편에 대해서만 측정하였다. 각 실험체군내의 실험체들은 동일한 부착모델로 가정할 수 있으며, 부착길이에 따라 거동차이를 보인다고 할 수 있다. 표 1에서 극한하중은 파괴시 가해진 하중을 나타낸 것이고, 평균부착응력(mean bond strength)은 극한하중을 부착면적으로 나눈 값이다.

실험 결과로부터 적절한 부착모델을 결정하기 위해서는 실험 오차를 적게 포함하면서 부착 특성을 잘 표현하는 분석 대상 변수를 선정하여야 한다. 그리고 이 분석 대상 변수에 대해 실험 결과와 수치해석해의 차이가 최소화되도록 부착모델의 매개변수를 결정하여야 한다. 실험에서 측정된 측정값은 표 1에 나타난 파괴시의 극한 하중, 하중 단계 별 하중, 변위, 변형률 등이다. 하중과 변위는 가력하기 위해 고정하는 그림에서 측정되며, 변형률은 탄소섬유쉬트 표면에 부착한 변형률게이지에서 측정되는 탄소섬유쉬트의 축

방향 변형률이다. 시공 조건 등에 따라 탄소섬유쉬트 부착이음 실험 결과는 동일 실험체 간 실험 편차가 큰 특성을 가지고 있다. 이것은 에폭시를 이용해 탄소섬유쉬트를 함침하는 과정에서 균일한 작업이 어렵기 때문이다. 그림 5(a)는 탄소섬유쉬트에서 측정되는 축방향 변형률을 하중의 증가에 따라 거리에 대한 곡선으로 나타낸 것이다. 그림에서 좌측과 같이 부착면의 끝단에서 변형률이 감소하는 데, 이것은 부착층의 성질이 부착면을 따라 일정하지 않음을 나타내는 것이고, 대부분의 부착이음 실험에서 나타나는 현상이다. 그림 5(b)는 직접 측정된 변위와 축방향 변형률을 적분하여 구한 변위를 비교하여 나타낸 것이다. 그림과 같이 큰 오차가 발생하는 것은 고정하는 장치인 그림에서 많은 미끄럼이 발생하기 때문이다. 따라서, 변형률을 직접 사용하는 것 보다는 평균적인 분포를 고려하여 변형률을 적분한 변위를 직접 측정된 변위 대신 사용하는 것이 타당하다.

이상의 관찰을 통해 이 연구에서는 부착모델을 결정하는데 사용할 분석 대상 변수로 실험체군에 대한 “극한하중-부

착길이 곡선”과 개별 실험체에 대한 “하중-변위 곡선”으로 선택하였다. 여기에서 “하중-변위 곡선”에서 사용되는 변위는 변형률을 적분한 변위를 의미한다. 적분을 통해 유효한 “하중-변위 곡선”을 구하기 위해서는 변형률계이지의 값이 전체 하중 증분에 걸쳐 측정되어야 한다. 실험에서 이러한 조건을 만족하는 실험체는 CA135-L15, CA135-L25와 CA270-L25이다. 정리하면 각 실험체군에 대한 선택된 분석 대상 실험 자료는 다음과 같다.

- CA135 실험체군
 - 극한하중-부착길이 곡선 1개 : 총 15개의 극한하중 데이터
 - 하중-변위 곡선 2개 : CA135-L10, CA135-L25 실험체
- CA270 실험체군
 - 극한하중-부착길이 곡선 1개 : 총 14개의 극한하중 데이터
 - 하중-변위 곡선 1개 : CA270-L25 실험체

4. 부착모델의 결정 방법

하나의 부착모델을 결정하기 위해서는 각 실험체군으로부터 얻을 수 있는 “극한하중-부착길이 곡선”과 개개의 실험체에서 구할 수 있는 “하중-변위 곡선”에 대한 실험결과와 해석 결과 사이의 오차가 동시에 최소화되어야 한다. 이것은 다중 최적화 문제에 해당한다. 이 연구에서는 Messac(1996)이 제안한 physical programming 기법을 이용해 다중 최적화 문제를 구성하였으며, 최적화는 유전알고리즘(Goldberg, 1989)을 통해 수행하였다.

다중 최적화 문제를 푸는 일반적인 방법은 최소화되어야 하는 각 설계인자(design parameter)에 가중치를 곱한 합으로 목적함수를 구성하고 이를 최소화하는 가중치에 기초한 방법(weight-based approach)이다. 반면에 physical programming 기법은 각 설계인자에 대해 그림 2와 같이 선호도 함수(preference function)를 정의하고 이의 합으로써 목적함수를 구성한다. 이 때 선호도 함수는 설계인자에 대한 만족도를 기준으로 구간을 나누고, 각 구간별로 문제 유형에 따라 함수 값을 대응하여 정의한다. 따라서 직접적인 물리량을 기준으로 최적화 문제를 구성하기 보다는 선호도를 기준으로 최적화 문제를 구성하기 때문에 각 설계인자의 물리량 및 변화량에 상관없이 각 목적함수 간에 통일된 척도를 갖게 할 수 있으며, 각 설계인자의 최적화 기준을 직접적으로 적용할

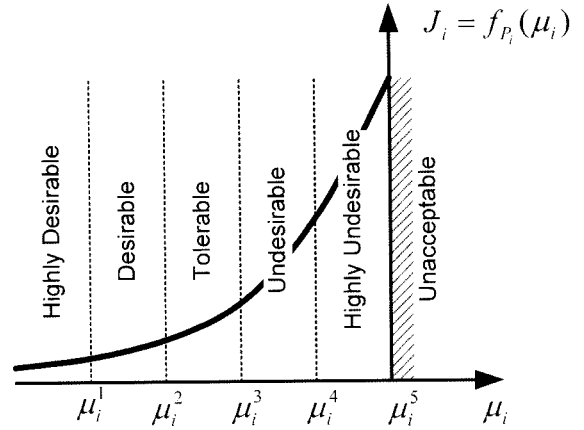


그림 6. 선호도 함수(smaller is better, soft)

수 있기 때문에 합리적인 다중 최적화 문제 구성 방법이라 할 수 있다. Messac은 설계인자의 유형에 따라 6종류의 선호도 함수를 제안하였는데, 이 연구에서 사용하는 선호도 함수는 그림 6과 같이 설계인자의 값이 작을수록 좋고(smaller is better), 함수형태가 연속인(soft) 경우에 해당한다. 선택된 선호도 함수는 그림 6에 표시된 것과 같이 6개의 구간이 있다. 이때 구간 경계값을 설계척도(design metric, μ_i^j)라 하며, 이 값을 최적화를 수행하는 연구자가 결정해 주어야 하는 값으로 가중치에 기초한 방법에서 가중치와 유사한 역할을 한다.

유전알고리즘은 주어진 영역 내에서 목적함수에 대한 적합성(fitness)을 기준으로 설계변수들의 최적해를 찾아가는 진화론적 최적화 방법이다. 각각의 설계변수들을 염색체(chromosome)로 간주되는 기호열로 표시하고, 이 기호열에 교배(crossover), 변이(mutation), 재생산(reproduction) 등의 유전자조작을 반복함으로써 다음 세대(generation)의 염색체들이 더 우수한 적합도를 갖도록 진화시키는 방법이다. 따라서, 최적화를 수행하기 위해 검색영역 내의 미분 정보가 필요치 않고, 국부적인 최소/최대값을 찾을 확률도 적으며 초기값 설정에 따른 민감성이 없어 초기값을 임의로 생성할 수 있는 이점을 가진다.

이상을 정리하면 이 연구에서 도입한 최적화 과정은 다음과 같이 정리할 수 있다.

0. 설계 척도, μ_i^j (design metric) 설정
1. 유전알고리즘을 이용한 목적함수 J 최소화

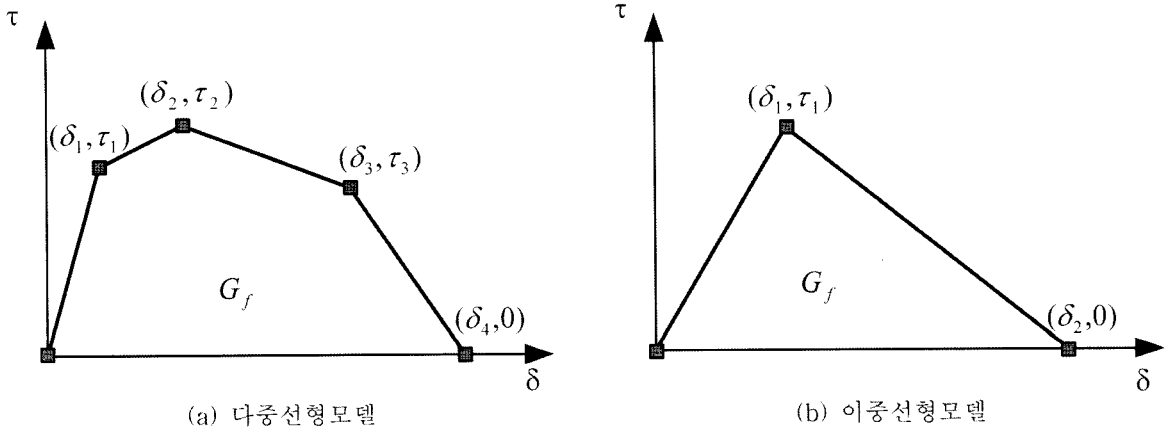


그림 7. 가정된 부착모델 곡선

표 2. CA135 실험체군의 설계척도(kN)

	μ_1^1	μ_1^2	μ_1^3	μ_1^4	μ_1^5	비고
$\mu_1 = \mu_{PL}$	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	15 data points
$\mu_2 = \mu_{PD-1}$	0.30	0.60	0.90	0.12	0.15	L=100 mm(CA135-L10)
$\mu_3 = \mu_{PD-2}$	0.30	0.60	0.90	0.12	0.15	L=250 mm(CA135-L25)

표 3. CA270 실험체군의 설계척도(kN)

	μ_1^1	μ_1^2	μ_1^3	μ_1^4	μ_1^5	비고
$\mu_1 = \mu_{PL}$	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	14 data points
$\mu_2 = \mu_{PD}$	0.30	0.60	0.90	0.12	0.15	L=250 mm(CA270-L25)

표 4. CA135 실험체군의 부착모델

구분	설계변수				목적함수, J	파괴에너지, G_f	초기기울기, E_0
	δ_1	δ_2	τ_1	τ_2			
Multi-linear model	δ_1	0.07 mm	τ_1	3.8 MPa	0.3054	0.7415 N/mm	54.3 N/mm ³
	δ_2	0.07 mm	τ_2	1.9 MPa			
	δ_3	0.42 mm	τ_3	0.6 MPa			
	δ_4	0.99 mm					
Bilinear model	δ_1	0.13 mm	τ_1	2.5 MPa	3.2337	0.7375 N/mm	19.23 N/mm ³
	δ_2	0.59 mm					

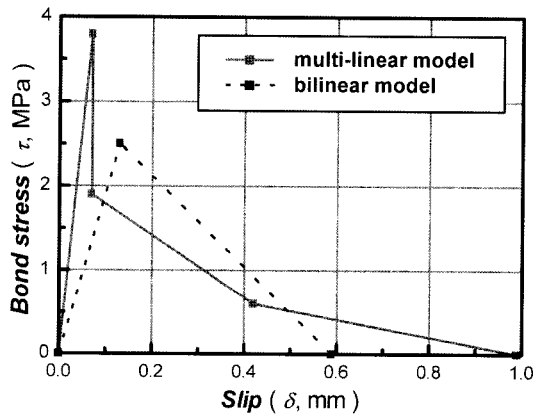
- 1.1 설계 변수, d_i (design variable; 여기서는 부착모델을 이루는 변수) 가정
- 1.2 설계 인자, μ_i (design parameter) 계산
- 1.3 선호도 계산 $J_i=f(\mu_i)$
- 1.4 목적함수 $J=average(J_i)$

1, 2, ..., 5로 설계척도의 경계를 나타내며, s 는 부착모델을 이루는 변수의 개수이다.

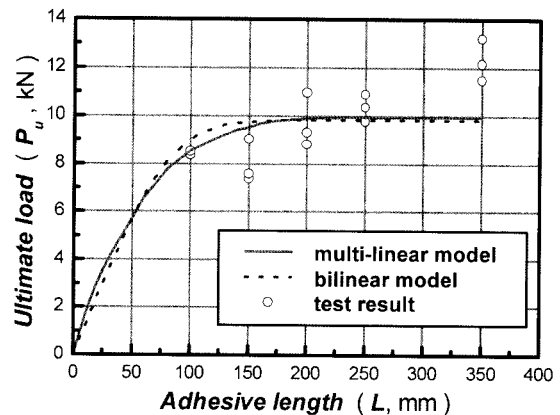
5. 최적화 수행

이 연구에서 가정한 부착 모델은 다중선형곡선(multi-linear curve)과 기존 연구에서 많이 사용된 이중선형곡선(bilinear curve)

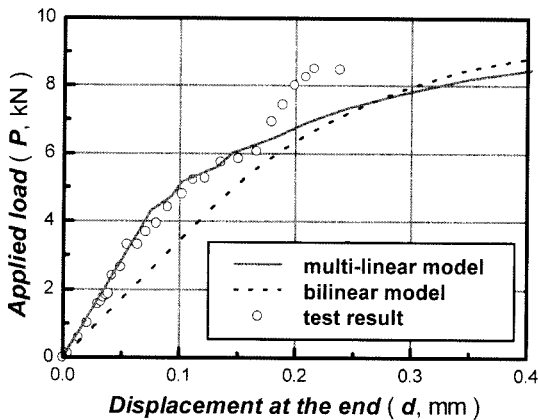
위에서, 첨자 i 는 1, 2, ..., (설계변수의 개수) 이고, j 는



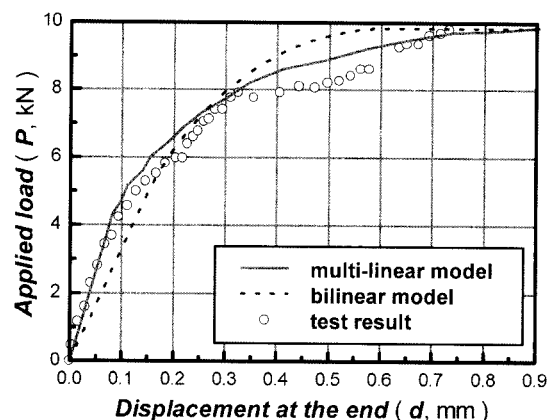
(a) 최적화된 부착 모델



(b) 극한하중-부착길이 곡선 비교



(c) 하중-변위 곡선 비교(CA135-L10)



(d) 하중-변위 곡선 비교(CA135-L25)

그림 8. CA135 실험체군의 최적화 결과

표 5. CA270 실험체군의 부착모델

구분	설계변수				목적함수, J	파괴에너지, G_f	초기기울기, E_0
	δ_1	δ_2	τ_1	τ_2			
Multi-linear model	δ_1	0.08 mm	τ_1	4.8 MPa	0.094	0.968 N/mm	60 N/mm ³
	δ_2	0.17 mm	τ_2	1.6 MPa			
	δ_3	0.28 mm	τ_3	1.0 MPa			
	δ_4	0.97 mm					
Bilinear model	δ_1	0.08 mm	τ_1	2.8 MPa	0.9561	0.966 N/mm	35 N/mm ³
	δ_1	0.69 mm					

curve)이다(그림 7). 다중선형곡선은 다양한 함수의 형상을 고려할 수 있도록 4개의 직선 구간을 갖도록 가정하였다. 각 모델에 대한 설계변수는 다음과 같다.

- 다중선형모델 : $[d_k]=[\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \tau_1, \tau_2, \tau_3]$ (7)

- 이중선형모델 : $[d_k]=[\delta_1, \delta_2, \tau_1]$ (8)

설계인자는 극한하중-부착길이 곡선에 대한 수치해석값과 측정값의 오차에 대한 RMS(Root Mean Square)와 선택된 개별 실험체에 대한 하중-변위 곡선을 대상으로 계산되는 오차의 RMS로 설정하였다;

• CA135 실험체군

$$\begin{aligned}
 [\mu_i] &= [\mu_{PL}, \mu_{PD-1}, \mu_{PD-2}] \\
 \mu_{PL} &= \text{RMS}[P_u^m(L) - P_u^n(L)] \\
 \mu_{PD-1} &= \text{RMS}[P^m(d_i) - P_u^n(d_i)] \text{ at CA135-L10(L=100 mm)} \\
 \mu_{PD-2} &= \text{RMS}[P^m(d_i) - P_u^n(d_i)] \text{ at CA135-L125(L=250 mm)} \quad (9)
 \end{aligned}$$

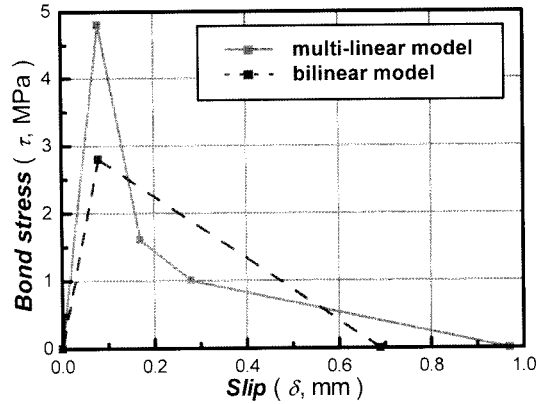
• CA270 실험체군

$$\begin{aligned}
 [\mu_i] &= [\mu_{PL}, \mu_{PD}] \\
 \mu_{PL} &= \text{RMS}[P_u^m(L) - P_u^n(L)] \\
 \mu_{PD} &= \text{RMS}[P^m(d_i) - P_u^n(d_i)] \text{ at CA270-L25(L=250 mm)} \quad (10)
 \end{aligned}$$

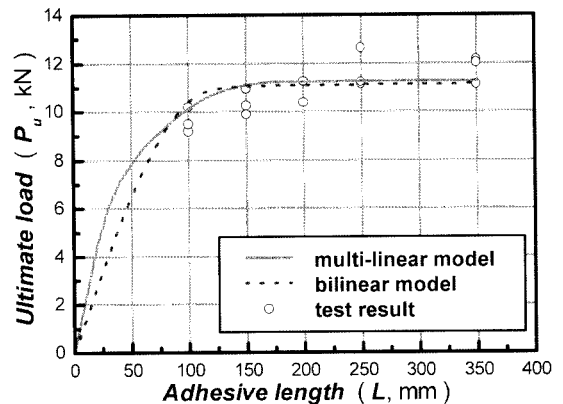
위에서, 위첨자 m 은 측정하중, n 은 수치해석을 통해 계산된 하중을 의미한다. 각 설계인자에 대한 설계적도는 표 2, 3과 같다.

유전 알고리즘을 이용해 최적화를 수행한 결과 결정된 부착모델을 표 4, 5에 표시하였다. 그림 8과 9는 결정된 부착모델로부터 계산되는 수치해석해와 측정값을 나타낸 것이다. 최적화된 목적함수 J 는 이중선형곡선을 사용하는 것 보다 다중선형곡선을 사용할 경우 작았다. 이는 다중선형곡선이 이중선형곡선보다 부착모델을 잘 표현할 수 있음을 의미한다. 파괴에너지 G_f 및 극한하중-부착길이 곡선은 부착모델곡선에 따른 차이가 거의 없다. 하지만, 다중선형곡선이 이중선형곡선보다 하중-변위 곡선의 초기기울기를 잘 표현할 수 있다. 즉, 이중선형곡선을 도입할 경우 극한하중-부착길이 곡선과 하중-변위 곡선을 동시에 최적화하기 힘들다.

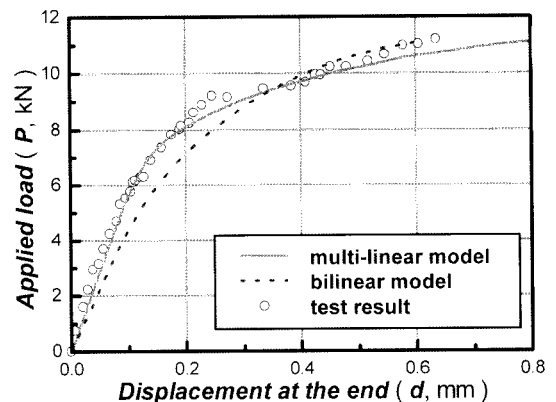
다중선형곡선을 도입한 최적화된 부착모델은 초기 선형 구간을 지난 후에는 지수 함수 형태로 그 값이 줄어드는 형태를 가지고 있으며, 콘크리트 강도가 클수록 초기기울기, 부착강도, 파괴에너지가 커지는 특성을 가지고 있다. 표 6은 초기기울기, 부착강도, 파괴에너지를 콘크리트 강도에 따라 비교한 것이다. 부착강도는 3.8~4.8 MPa 정도로 콘크리트의 인장강도와 비슷한 값을 갖게되며 이는 기존 연구결과와 부합된다(Teng 등, 2002).



(a) 최적화된 부착 모델



(b) 극한하중-부착길이 곡선 비교



(c) 하중-변위 곡선 비교(CA270-L25)

그림 9. CA270 실험체군의 최적화 결과

6. 결 론

이 연구에서는 탄소섬유슈트 부착이음에 대한 전단 실험 결과로부터 국부적인 부착응력-미끄럼 관계를 유도해 내는

표 6. 다중선형모델 적용시 부착모델의 비교

구분	CA135 실험체군 (1)	CA270 실험체군 (2)	비교 (2)/(1)
콘크리트 강도	15.57 MPa	28.27 MPa	1.82
초기기울기, E_0	54.3 N/mm ³	60 N/mm ³	1.10
최대 부착 강도	3.8 MPa	4.8 MPa	1.26
파괴에너지, G_f	0.7415 N/mm	0.9680 N/mm	1.30

합리적인 절차를 제안하였으며, 실험 결과와 비교하여 이러한 부착조건에 적용가능한 부착응력-미끄럼 관계 곡선을 유도하였다. 이 연구에서는 4개의 직선 구간을 갖는 다중선형 곡선을 부착응력-미끄럼 곡선의 기본 형태로 도입하여 전체적인 곡선의 형상을 유도하는 데 초점을 두었으며, 이중선형 곡선을 도입한 결과와 비교하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 경계면의 부착 모델은 콘크리트의 물성에 의존적이다.
- 국부 부착응력-미끄럼 곡선은 초기 선형 구간이 지난 후 지수 함수 형태로 감소한다.
- 콘크리트의 강도가 클수록 초기기울기, 부착강도, 파괴에너지 값이 커진다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 노후 교량 성능 향상 기술 개발의 과제 지원금에 의해 수행된 것입니다.

참고문헌

박중열, 황선일, 조홍동, 한상훈(2003) 매개변수 연구를 통한 CFRP판과 콘크리트 계면의 부착응력 특성 분석, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 1439-1444.

유영찬, 최기선, 최근도, 이한승, 김궁환(2001) 탄소섬유쉬트와 콘크리트의 부착강도 실험연구, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제13권 제2호, pp. 168-174.

조근희, 조정래, 김병석, 이영호, 진원중, 김성태(2003) FRP-콘크리트 이음의 부착모델 연구 I: 이론적 연구, **한국콘크리트학회 2003년 춘계 학술발표회 논문집**.

조근희, 조정래, 이영호, 김병석(2004) FRP-콘크리트 계면의 파괴 역학적 부착 모델, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권 제4호, pp. 653-661.

한국건설기술연구원(2002) 노후 교량의 성능향상 기술 개발.

한상호, 이경동(2003) 탄소섬유쉬트로 보강된 RC보의 유한요소해석, **한국전산구조공학회 논문집**, 한국전산구조공학회, 제16권 제1호, pp. 53-58.

Chen, J.F. and Teng, J.G. (2001) Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp. 784-791.

Goldberg, D.E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading Mass.

Hiroyuki, Y. and Wu, Z. (1997) Analysis of debonding fracture properties of CFRP strengthened member subject to tension, *Non-metallic(FRP) reinforcement for concrete structures*, proceedings of the third international symposium, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, pp. 287-294.

Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y., Ueda, T. and Kakuta, Y. (1997) A Study on bond mechanism of carbon fiber sheet, non-metallic(FRP) reinforcement for concrete structures, proceedings of the third international symposium, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, pp. 279-285.

Messac, A. (1996) Physical programming: effective optimization for computational design, *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 2, pp. 149-158.

Niedermeir, R. (1996) Stellungnahme zur Richtlinie für das Verkleben von Betonbauteilen durch Ankleben von Stahllaschen-Entwurf Mrz 1996, Schreiben Nr 1390 vom 30.10.1996 des Lehrstuhls für Massivbau, TU München

Täljsten B. (1994) Plate Bonding: Strengthening of Existing Concrete Structures with Epoxy Bonded Plates of Steel or Fibre Reinforced Plastics, Doctorial Thesis, Lulea' University of Technology.

Tanaka, T. (1996) Shear Resisting Mechanism of Reinforced Concrete Beams with CFS as Shear Reinforcement, Graduation Thesis, Hokkaido University

Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002) *FRP-Strengthened RC Structures*, John Willey & Sons, LTD.

Yuan, H. and Wu, Z. (1999) Interfacial Fracture Theory in Structures Strengthened with Composite of Continuous Fiber, *Proceeding of Symposium of China and Japan: Science and Technology of 21st Century*, Tokyo, September, pp. 142-155.

Wu, Z., Yuan, H. and Niu, H. (2002a) Stress transfer and fracture propagation in different kinds of adhesive joints, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 5, pp. 562-573.

Wu, Z., Yin, J. (2002b) Numerical analysis on interfacial fracture mechanics of externally FRP-Strengthened structural mechanics, *J. Materials, Conc. Struct. Pavements*, JSCE. No. 704 V-55, pp. 257-270.

(접수일:2005.2.1/심사 일:2005.7.1/심사완료일:2005.7.1)