

확률분포를 이용한 취성재료 특성의 탄소섬유보강폴리머 인장물성평가 및 보정

김윤곤^{1*}

Evaluation and Modification of Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP) as Brittle Material with Probability Distribution

Yun-Gon Kim^{1*}

Abstract: Carbon Fiber Reinforced Polymers(CFRP) has widely utilized as a material for rehabilitation because of its light-weight, deformability and workability. Because CFRP is brittle material whereas steel is ductile, it is inappropriate to apply conventional design approach for steel reinforcement. For ductile material, the behavior of combined elements is on average of that of unit element due to the stress redistribution between elements after yielding. Therefore, the mean value of the stress of combined elements is equal to that of unit element and the standard variation is smaller. Therefore, although the design value can increase, it is used as constant value because it is conservative and practical approach. However, for brittle material, the behavior of combined elements is governed by the weaker element because no stress redistribution is expected. Therefore, both the mean value and standard variation of the stress of combined elements decreases. For this reason, the design value would decrease as the number of element increases although it is eventually converged. In this paper, in brittle material, it is verified that the combination of unit element with normal distribution results in combined element with weibull distribution, so the modifying equation of mechanical properties is proposed with respect to the area load applied.

Keywords: Fiber reinforced polymers, Brittle material, Coupon test, Weibull distribution

1. 서 론

교량 등 토목구조물의 장기간의 피로하중 증가 및 구조재료 노후화가 발생하거나, 설계하중 증가 등의 이유로 구조물의 본기능을 유지하면서 보수보강이 필요한 경우가 증가하고 있다. 또한, 법규적, 사업성 측면에서 재건축이 어려운 노후아파트의 리모델링, 설비환경 개선목적의 오피스빌딩의 경우도 기존 구조물의 전부 또는 일부를 존치한 상태에서 보수보강이 요구된다. 특히 최근 발생한 경주, 포항지진으로 인한 피해복구는 단기간에 제한된 환경 - 협소한 작업공간, 구조물 형상 변화 최소화 등 - 에서 수행되기 때문에 신축공사와는 다른 접근이 필요하다.

탄소섬유보강폴리머(CFRP)는 경량이며 성형성이 뛰어나 단기간에 공사를 완료해야 하는 보수보강공사에 적합하여, 신축공사시 인장재인 철을 대체하는데 적합하다. 하지만 취성재료인 탄소섬유는 연성특성의 철근을 대상으로 적용하던 설계식 개념을 그대로 확장하는데 한계가 있다. 즉, 철근은 일

단 항복변형률을 초과하면 변형률과 상관없이 항복응력으로 강도를 평가할 수 있으나, 탄소섬유는 항복구간이 없이 파단할 때까지 선형 변형률-응력관계를 보이기 때문에 강도를 평가하기 위해서는 변형률 값이 반드시 필요하다.

이러한 연성재료와 취성재료의 차이로 인해 재료물성을 결정하는 시편실험 방법도 상이하다. 철근의 경우, 통상 3회의 직접인장시험만으로 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있는 반면, 탄소섬유는 시험결과의 편차가 커서 다수 실험 결과의 통계처리를 통해 물성치를 결정한다 (ASTM D3039). 실험편차의 발생요인은 시편의 제작 및 측정오차, 실험조건에 의한 불균등 응력분포 등이다. 철근의 경우 게이지 부착을 위한 철근표면처리 과정 중 일부 단면결손에 의한 편차가 발생하고, 탄소섬유는 에폭시 혼합비율 및 섬유방향에 따른 편차가 발생하기 때문에 기본적으로 실험편차 요인은 동일조건이라고 할 수 있다. 하지만 연성재료는 이 편차요인들에 의해 발생하는 철근단면의 부분항복은 항복 이후 소성구간동안 응력재분배를 통해 평균화되므로, 결과적으로 소수의 실험으로부터 높은 신뢰성을 확보 가능하다. 반면 취성재료는 편차요인으로 인해 부분 파단이 발생할 경우, 파단 면적만큼 즉시 강도저하가 발생하게 되어 응력재분배가 불가능하다. 따라서 전체단면의 물성치가 평균화되지 않으므로, 이 편차가 그대로 물성치에 반영된다. 이러한 취성재료의 특성을 고려하면, 실제 현

¹정회원, 대구대학교 건축공학과 조교수

*Corresponding author: yungonkim@daegu.ac.kr

Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 5월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

장은 실험실보다 시공품질 및 하중조건이 편차를 더 크게 유발하므로, 실험실 조건의 결과의 물성치를 적용하는데 주의해야 한다. 이에 설계값으로 주어지는 물성치는 평균값보다 감소한 값으로 제공된다.

특히 지금까지의 탄소섬유보강은 주로 모재와의 박리현상에 의해 파괴가 결정되어, 탄소섬유 파단강도의 50%미만을 이용하였고, 탄소섬유의 강도기여분을 탄성계수와 유효변형률만을 사용하여 평가하였다. 따라서 지금까지 극한강도(극한변형률)는 주요 관심사항이 아니었으나, 최근의 연구결과들에 의하면, 탄소섬유 단부에 앵커 등의 정착을 통해 탄소섬유의 박리 이후에도 응력상실 없이 파단변형에 이르는 것을 확인되었다. (Orton et al, 2008; Smith et al. , 2011; Kim, 2011) 이 경우 파단강도가 탄성계수보다 더 중요한 물성특성이 된다. 이에 본 연구에서는 시편실험에서 얻은 취성재료의 파단강도를 확률적 접근을 통해 실무적으로 활용 가능한 보정식을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기존연구동향

2.1.1 ACI 440.2R(2017)

현재 실무에서는 미국 콘크리트 학회의 섬유보강폴리머분과 (ACI 440) 지침들이 주로 활용되고 있다. 이중 보수보강을 다루는 ACI 440.2R의 4.3절에서 재료물성을 결정하는 두가지 방법 - 에폭시 혼합박판(gross-laminate), FRP섬유 (net-fiber) - 을 구분하고 있다. 탄소섬유를 이용한 보수보강공법은 크게 습식시공 (wet lay-up) 과 건식시공 (dry lay-up)으로 나뉜다. 습식시공은 현장에서 수작업으로 FRP섬유와 에폭시를 혼합하고 그 혼합체를 모체에 접착하는 형태이며, 건식공법은 선가공(precured)된 박판형태를 현장에서 부재와 일체화하는 방법으로 NSM(Near Surface Mounted)공법이 대표적이다. 보통 건식시공의 경우 혼합전단면(gross-laminate area) 기준의 물성치가 사용되고, 습식시공(wet lay-up)은 에폭시와 혼합비율에 따라 단면값이 달라지므로, 섬유량(net-fiber) 기준의 물성이 사용된다.

또한 인장물성치는 최소 20회 시편시험으로부터 얻은 결과를 통계처리를 통해 평균값에서 표준편차의 3배를 뺀 값을 설계값으로 하며, 이는 표준정규분포의 99.87% 신뢰도에 해당한다. 철근 시편시험이 3회인 것에 비해, 탄소섬유는 실험 결과값 편차가 크다는 점과 동일 평균에서도 편차에 따라 상이한 설계값이 적용된다는 점을 다시 확인할 수 있다.

2.1.2 ACI 440.3R(2004) / ASTM D3039(2007)

ACI 440.3R는 FRP 물성을 평가하는 실험방법을 포괄적으로

기술하고 있으며, 직접인장실험은 ASTM D3039를 참조한다. 특기할 사항은 Fig.1과 같이 시편 전면 2개, 후면 1개의 스트레인게이지를 부착하고 변형률을 측정하고, 시편의 면내, 면외 각 변형률이 평균변형률의 5%이내에 한하여 유효실험으로 간주한다. 이로부터 시편의 응력분포가 실험결과의 편차를 일으키는 주요인임을 추정할 수 있다. 실제 현장조건에서는 실험실 대비 작업품질이 저하되고, 불균등응력이 발생할 가능성이 증가하므로, 탄소섬유 사이의 변형률 편차는 더욱 증가할 것이며, 이로부터 물성치가 감소할 수 있음을 추정할 수 있다.

2.1.3 NCHRP REPORT 655(2010) / ASTM D7290(2011)

NCHRP보고서 655에서는 ACI 440 와는 다르게 ASTM D7290를 참조하여 인장물성을 결정하였다. FRP의 물성은 그 제작방법에 따라 Fig. 2와 같이 현장제작(b)의 물성값 편차가 공장제작(a)대비 매우 크게 나타난다. 이에 ASTM D7290은 취성재료의 특성을 고려한 와이블(weibull) 분포를 이용하여 설계식을 제안하고 있다.

2.2 취성재료와 크기효과

2.2.1 와이블 분포와 취성재료

와이블(weibull)분포는 금속 및 복합재료의 강도, 전자 및 기계부품의 수명분포를 나타내는 데 적합한 것으로 알려져 있다. (Weibull, 1951) 와이블 확률분포는 변수값에 따라 그

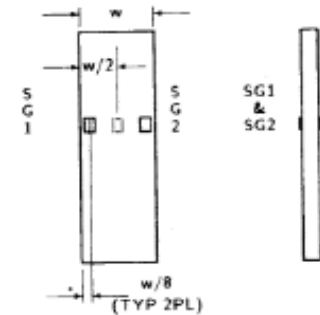
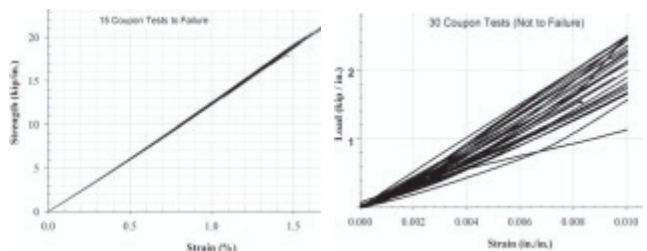


Fig. 1 Layout of strain gages in ASTM D3039



(a) shop-manufactured

(b) field-manufactured

Fig. 2 Load-strain relationship for FRP composite system

개형의 차이가 크지만, 확률밀도함수 및 누적확률밀도함수를 표준정규분포와 비교하면 평균(mean value) 기준으로 대칭인 정규분포에 비해, 평균 미만 구간의 확률밀도가 평균 이상보다 더 높은 확률밀도를 가지고 있다.

Klein(2009)은 SiO₂ 글래스의 단면적에 따른 실험결과를 와이블(weibull) 분포를 통해 분석하여 하중 작용면적이 증가함에 따라 파단강도는 감소하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한 Jin(2008)은 세 가지 FRP 제품을 대상으로 장기거동특성을 와이블분포를 이용하여 분석하여 20년 이상 경과한 경우 ACI 440.2R의 외부조건을 고려한 강도저감계수를 적용한 설계값이 불안전할 수 있음을 주장하였다. Bazant(2008)는 콘크리트의 크기효과(size effect)를 고려하기 위해 와이블(weibull) 분포를 이용하여 연구를 수행하였고, 실험실 조건의 결과에 근거한 설계식이 실무 규모의 크기에 대해 불안전축임을 확인하였다. 상기 연구들의 공통점은 취성재료의 거동특성에 기인하여 발생하는 일반적 접근의 오류를 지적했다는 것이다.

2.2.2 FRP 직경(크기)에 따른 물성값

FRP에서도 콘크리트와 유사한 크기에 따른 물성특성의 변화를 찾을 수 있다. 연성재료인 철근의 재료물성은 직경과 상관없이 탄성계수나 항복강도가 상수로 주어지지만, 취성재료인 FRP는 Table 1과 같이 직경에 따라 상이한 물성값을 제공하고 있다. 탄성계수는 초기변형률 구간에서 정의하기 때문에 직경별 차이가 없으나, 파단강도 및 파단변형률은 직경이 증가할수록 감소하고 있다. 탄성계수를 초기변형률 구간에서 정의하는 이유는 대부분의 경우 FRP와 모재와의 박리로 인해 파단변형률의 50% 미만의 유효변형률을 나타내고, 또한 파단변형률에 근사할수록 단면의 부분파단에 의해 탄성계수가 감소하여 상수값으로 정의하기 힘들기 때문이다. 이러한 경향은 다수의 기술자료 (Bank, 2006; Fyfe, 2010; Hughes, 2011; You et al., 2006)에서 공통적으로 확인된다. 이는 H형 강재의 압연과정에서 발생하는 단면내 잔류응력 차이에 의해 항복점이 불분명하고, 탄성계수값이 점차적으로 감소하는 것과 유사한 측면이 있지만, 철재의 경우 궁극적으로 연성특성에 의한 응력재분배에 의해 전단면이 항복에 이르고, 취성재료는 그렇지 않다는 점이 다르다.

예를 들면, Table 1에서 직경 13mm (126.7mm²) FRP 봉강 하나의 인장강도와 직경 6mm 봉강 네 개 (31.67×4= 126.67mm²)의 인장강도를 비교하면, 거의 동일한 단면적에서 인장강도는 95.9 kN과 113.4 kN (=28.34×4)으로 크게 차이가 난다. 하지만 거의 동일한 단면의 강도 성능이 위와 같이 차이를 가진다는 것은 논리적으로 받아드리기 어렵다. 그 이유는 두 경우의 파단변형률의 차이 - 0.0194 (D6), 0.0165 (D13) - 에 기인한다. 즉, 4개의 D6이 동시에 파단되지 않는다면 113.4 kN을 얻을 수 없기 때문에, 실제 유효강도는 감소하며, 이는 유효파단변형률이

Table 1 Mechanical tensile properties of GFRP rebar product data sheet

Nominal Diameter (mm)	Nominal Area (mm ²)	Guaranteed Strength (MPa)	Ultimate Load (kN)	Guaranteed Modulus (GPa)	Ultimate strain
6	31.67	896	28.34	46	1.94%
10	71.26	827	58.72		1.79%
13	126.7	758	95.90		1.64%
16	197.9	724	143.41		1.57%
19	285.0	690	196.60		1.49%
22	387.9	655	254.00		1.42%
25	506.7	620	314.27		1.34%
29	641.3	586	375.83		1.27%
32	791.7	551	436.60		1.19%
35	958.1	482	462.40		1.04%
38	1160	448	520.40		0.97%
41	1338	413	553.50		0.90%

감소함을 의미한다. 이를 일반화하면 취성재료의 물성치는 주어진 (단면)조건에서만 유효하고, 조건에 따라 항상 새로운 물성값을 정의할 필요가 있다는 것을 뜻한다. 이러한 특성은 연성재료인 철근에서는 고려할 필요가 없었기 때문에, 기존의 철근콘크리트구조의 보강근으로 철근을 FRP로 대체하여 접근할 때 이에 대한 추가 고려되어야 한다. 따라서 재료특성에 따른 물성값이 달라지는 원인을 분석하여 실무에 반영하는 것이 필요하다.

2.2.3 건설기술연구원 연구결과 (2006)

건설기술연구원은 보강재료의 품질 성능에 영향을 미치는 시공요인을 평가하였다. 그 중 보강매수에 따른 탄소섬유복합체의 강도저하 특성을 지적하고 있다. 그 원인으로 섬유배열이 일정하게 유지되지 못하고, 에폭시의 기포 등 결함에 의한 응력이 균등히 분배받지 못하는 것을 지적하였다. 이는 보강매수가 3매 이하에서 두드러지고, 3매 초과시 미비한 영향을 보였다. 이에 실무 적용시 현장 여건을 고려하여 물성치의 부분안전계수 적용을 추천하였다. 그 외 겹침길이, 양생기간 및 온도, 에폭시 계량오차 등에 따른 품질을 평가하여 실험실 조건 대비 현장 여건을 고려하는 것이 필요함을 강조하였다.

2.3 재료특성(연성/취성)을 반영한 확률분포 조합

2.2절에서 언급한 FRP의 특성은 그 취성특성에 기인한 것이다. 이에 2.3절에서는 철근(연성재료)과 FRP(취성재료)의 특성 차이를 개념적으로 도식화하여 비교하였다. 철근과 FRP 재료 모두 정규확률분포를 갖는 단위요소로 가정하고, 각 재료특성-연성, 취성-을 반영하여 요소를 조합하고, 조합요소의 확률분포를 구하였다. 취성재료의 경우, 물성값의 확률분포가 요소수(크기)의 증가에 따라 점차적으로 와이블(weibull) 분포로 변경되는 것을 확인하고, 이에 대한 실무적인 고려방안을 검토하였다.

2.3.1 단위요소의 확률분포 - 정규확률분포

연성 또는 취성재료에 대하여 같은 항복강도 또는 파단강도를 가지고, 정규확률분포를 갖는 단순화된 단위요소 (또는 시편)를 가정하였다. 재료강도가 확률분포를 가지는 이유는 시편의 제작오차와 하중재하조건 등 실험요인에 의해 결과값의 편차 발생 등 단위요소의 변형을 결정하는 요인이 모두 균일하다고 보기 어렵기 때문이다. 모든 정규확률분포는 평균과 표준편차를 이용하여 표준정규확률분포로 변환 가능하고, 이는 Fig. 3 과 같이 표현된다. 2.1.1의 ACI 440.2R에서 명시한 것과 같이 재료물성의 설계값 (design value, f_{fu}^*)을 평균 (mean value, \bar{f}_{fu})에 표준편차(standard deviation, σ) 3배 감소한 값으로 정하고, 이는 99.87%의 신뢰도에 해당한다.

2.3.2 연성재료와 취성재료의 조합특성

Fig. 3 의 강도 확률분포를 가지는 두 단위요소 (또는 두 배면적)를 조합하여 새로운 확률분포를 도출하였다. 철근과 같은 연성재료의 경우, 편차를 가지는 두 요소 중에서 항복강도에 먼저 도달하는 요소는 항복하지 않은 요소가 항복할 때까지 강도저하 없이 변형이 증가하므로, 하중증가에 따라 조합요소의 강성은 점차적으로 감소하지만, 강도 자체는 지속적으로 증가하여 최대강도에 이른다. 이 값은 각 요소강도의 산술합이며, 조합요소의 항복응력은 총면적으로 나눈 값으로, 면적비가 고려된 항복응력들의 평균값이다. 반면 취성재료는 먼저 한 요소가 먼저 파단강도에 이르면 그 요소의 강도기여분을 상실하고, 그만큼 잔여요소가 부담해야 한다. 즉, 모든 요소가 동시에 파단하지 않는다면 최대강도는 각 요소들의 강도합이 될 수 없음을 뜻한다. 이는 조합요소의 최대강도(파단시 강도)를 요소면적합으로 나눈 파단응력은 개별요소들의 응력평균값보다 작아진다.

간단한 예를 들면, 강도의 정규확률분포를 가지는 요소에 대하여 강도의 평균(\bar{f}_{fu}), 표준편차(σ)로 정규화한 이후 Fig.4 와 같이 요소1, 요소2의 강도가 $f_{fu1}^* = \bar{f}_{fu} - 1\sigma$, $f_{fu2}^* = \bar{f}_{fu} - 4\sigma$ 인

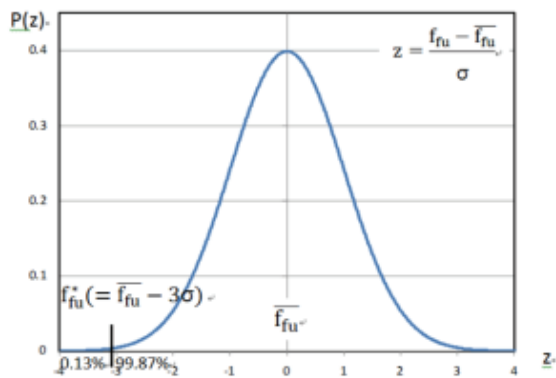


Fig. 3 Standard normal distribution of unit element

경우를 검토하였다. 즉 요소1은 설계값($\bar{f}_{fu} - 3\sigma$)을 만족하지만, 요소2는 만족하지 못한 경우이다. 연성재료의 경우, 조합요소1+2의 강도는 $2\bar{f}_{fu} - 5\sigma$, 응력은 $\bar{f}_{fu} - 2.5\sigma$ 이며, 이는 설계값 ($\bar{f}_{fu} - 3\sigma$)보다 크므로 허용된다. 반면 취성재료인 경우, 요소2의 파단시점에서 최대강도가 결정되고, 이 시점의 요소1의 강도를 더하므로, 요소간 균등하중이 작용하였다면 조합요소1+2의 강도는 $2\bar{f}_{fu} - 8\sigma$, 응력은 $2\bar{f}_{fu} - 8\sigma$, 로 설계값을 만족하지 못하며, 요소1의 잔여강도(3σ)는 최대강도시점에서 무의미하다.

이러한 연성, 취성특성을 고려한 요소의 조합을 전구간에서 평가하고, 조합요소의 설계값을 만족하지 못하는 구간을 표현하면 Fig. 5와 같다. 제시된 확률값은 각 구간별 두 요소의 확률밀도함수 곱으로 산출되었다. Fig. 5와 같이 연성재료의 경우, 설계값을 만족하지 못하는 확률은 단일요소의 0.13%에서 0.0011%로 감소하는 반면, 취성재료는 0.275%로 증가한다. 따라서 연성재료의 경우 작은 시편에서 결정한 값을 실무에 적용하는 것이 보수적 접근이라고 한다면, 취성재료에서는 그렇지 못하다. 이는 설계원칙의 기본접근에 부합하지 못하기 때문에 별도의 조치가 필요하다.

2.3.3 조합요소의 설계값

조합요소의 확률분포는 재료특성에 따라 단위요소와 다르기 때문에 동일한 설계값을 적용할 경우 그 신뢰도가 달라진다. 이에 단일요소와 동일한 신뢰도를 만족하는 조합요소의 설

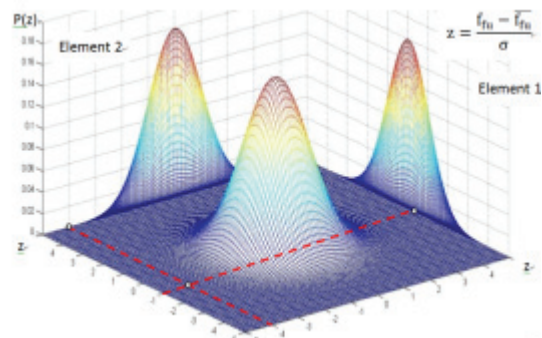


Fig. 4 Example: Joint probability function of two elements

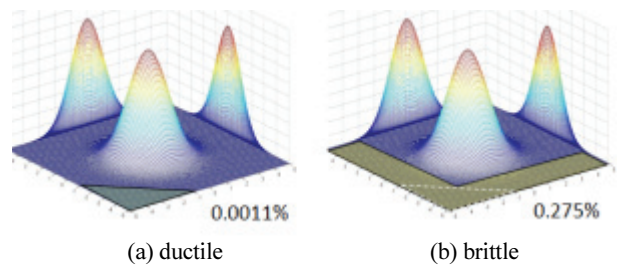
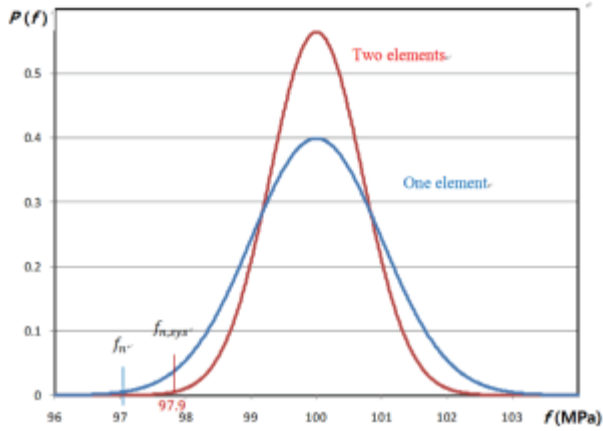
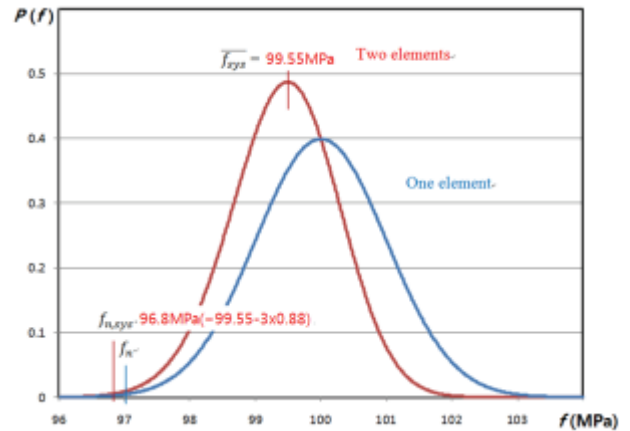


Fig. 5 Comparison of joint probability function for ductile and brittle material

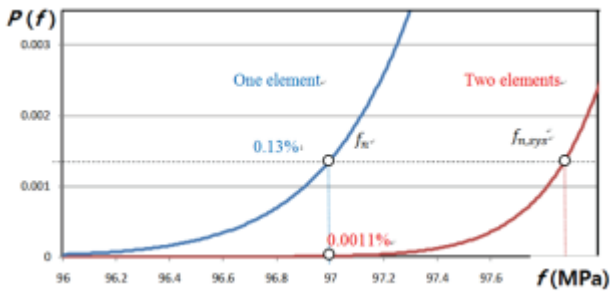
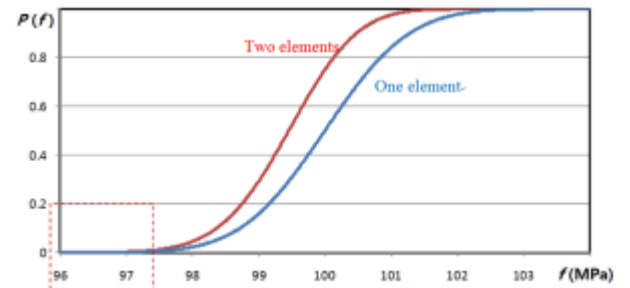
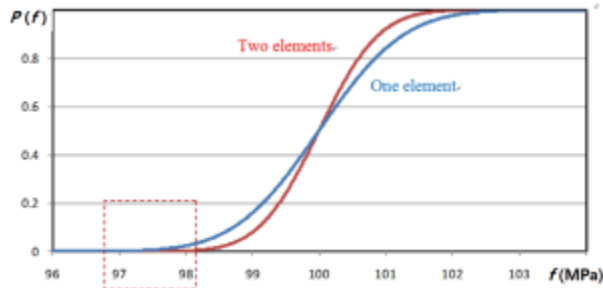


(a) ductile

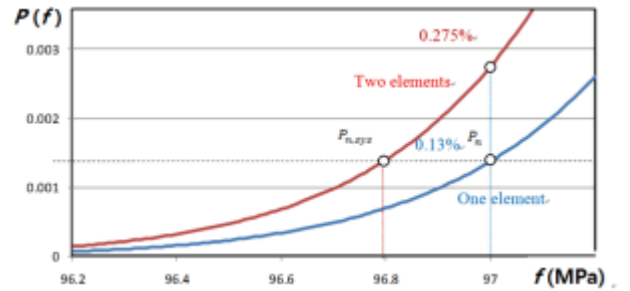


(b) brittle

Fig. 6 Stress probability function of unit and combined element



(a) ductile



(b) brittle

Fig. 7 Cumulative probability function of unit and combined element

계값을 단순예제를 통해 확인하였다. 임의재료의 단위요소 강도가 평균 100 MPa, 표준편차 1 MPa인 정규확률분포를 가진다고 가정하고, 연성/취성 특성을 반영하여 조합요소의 확률분포를 평가하였다. 물론 취성재료의 경우, 와이블(weibull) 분포로 정의하는 것이 더 바람직하지만, 이는 요소조합을 통해 와이블 분포의 특성을 보이게 것이며, 이것이 본 예제의 목적이기도 하다. 2배 단면적 - 동일한 확률분포를 가지는 2개 요소조합 - 을 직접인장을 통한 최대강도 확률분포를 2.3.2절의 접근방법과 같이 평가하면 Fig.6 과 같고, 이는 Fig. 5의 조합확률분포를 평면화한 것과 같다.

연성재료의 경우 정규확률분포의 기본연산이 유효하므로,

조합요소의 평균강도는 단위요소와 동일하며, 표준편차는 $0.7 \text{ MPa} (=1/\sqrt{2} \sigma)$ 로 감소한다. 이에 따라 조합요소에서 단일요소와 동일한 신뢰성(reliability index)을 확보하기 위한 설계값은 $97.9 \text{ MPa} (=f_{fu} - 3/\sqrt{2} \sigma = 100 - 3 \times 0.7)$ 으로 단위요소 설계값(97 MPa)보다 증가한다. 즉, 단위요소 설계값을 조합요소에 그대로 적용하더라도 더 높은 신뢰도를 확보하기 때문에 이론적으로 설계값을 증가시킬 수 있지만, 실무적으로 시편실험에서 결정한 설계값을 그대로 적용할 수 있으며, 이는 보수적/안전측 접근이다.

반면 취성재료는 연성재료와 달리 정규확률분포의 일반연산이 불가능하기 때문에 단위요소의 연속확률분포를 미소구

간별로 나누어 확률밀도를 구하고, 임의의 두 요소의 각각의 구간 대표값에 대하여 조합을 가정하여 두 요소 중 취약요소의 강도값으로 기준으로 조합요소 강도를 결정하고, 각 요소의 확률밀도들의 곱으로 조합요소의 확률밀도로 전구간 평가하여 조합요소의 확률분포를 구하였다(Fig.6-b). 이로부터 조합요소의 누적확률이 0.5가 되는 강도값, 즉 강도평균(mean value)은 99.45 MPa 로 평가되었다. 또한 단위요소와 같은 신뢰도를 확보하는 설계강도는 조합요소의 누적확률이 0.13%가 되는 96.8 MPa 으로 평가되었다. 평균강도와 설계강도의 차는 2.65 MPa (99.55- 96.8)로 단위요소의 편차(3 MPa)보다 다소 감소하였다.

연성/취성재료의 조합특성 차이는 단위요소와 조합요소의 누적확률분포를 비교한 Fig. 7에서 더 분명하다. 단위요소의 설계강도를 조합요소에서 그대로 사용시, 연성재료의 신뢰도는 99.87%에서 99.999%로 증가하는 반면, 취성재료는 99.725%로 감소한다. 이처럼 취성재료는 요소조합에 의해 단위요소에서 결정한 설계강도의 신뢰도가 감소하므로, 시편실험에서 결정된 물성을 범용으로 적용하는 것이 안전측/보수적 접근이 아니다. 따라서 원칙적으로는 실제 적용 크기를 대상으로 물성 실험을 통해 산정해야 하지만, 현실적인 대안으로는 시편 실험에서 결정된 취성재료의 물성값에 크기효과를 고려한 보정값을 적용하는 것이 합리적이다.

2.4 취성재료의 크기효과를 고려한 설계값

2.4.1 크기효과에 따른 취성재료의 확률분포

요소수(또는 크기)에 따른 취성재료의 설계값의 변화를 평가하기 위해 요소 조합수를 증가시키며 확률분포를 분석하였다. 2개 요소 조합의 확률분포로부터 동일한 조합방법을 통해 4개 요소의 확률분포를 구하여 평균강도 99 MPa, 설계강도 96.6 MPa를 얻었다. 이 과정을 8개 요소에 동일 적용하면, Fig. 8와 같이 요소수가 증가할수록 확률분포의 표준편차는 다소 감소하지만, 평균강도의 감소 영향이 더 커서 설계강도는 감소한다. 이를 반복하여 산출된 평균값, 설계값 및 표준편차는 Table 2와 같다. 요소수가 증가할수록 단일요소의 판단시점에 잔여요소들의 잔여강도 여유치의 합이 판단요소의 강도 이상인 경우, 그 시점에서 최대강도가 결정되지 않을 수도 있지만, 설계관점에서 결과를 보수적으로 평가하므로 여전히 유효한 접근이라 할 수 있다.

2.4.2 크기효과를 고려한 보정계수식

현실적으로 주어진 조건에 대하여 항상 취성재료 물성값을 결정하기 위해 재료실험을 하거나 확률분포의 요소조합 및 통계처리를 통해 설계값을 산출하는 것은 불가능하다. 이에 시편실험의 물성치를 실무적으로 사용가능한 보정식을 제안하였다. Table 2의 요소수를 자연로그 함수화하여 설계강도

와의 상관관계를 회귀분석하고 (Fig. 9), 이를 단순화, 일반화하여 표현하여 식(1)을 얻었다.

$$f_{N,design} = f_{N_0,design} - 0.3\sigma \ln(N/N_0) \quad (1)$$

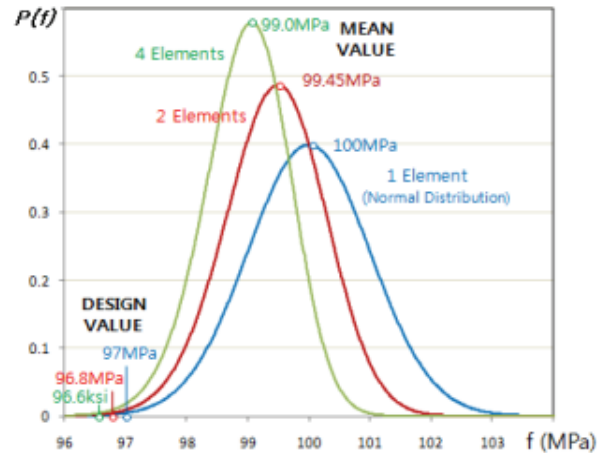


Fig. 8 Example: probability functions of strength in brittle material

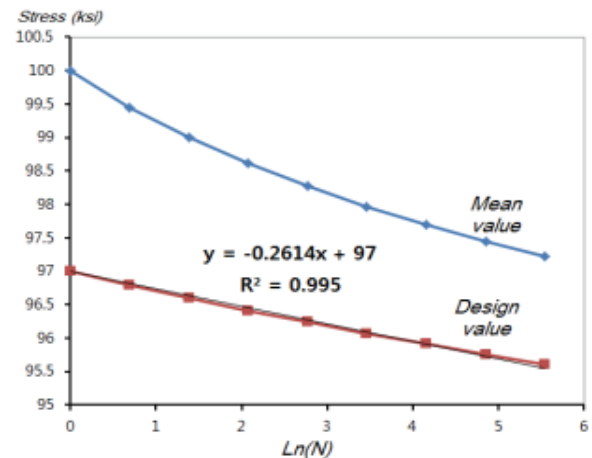


Fig. 9 Regression analysis of design value in Table. 2

Table 2 Statical results w.r.t the number of element combined

Number of Element	mean value (kN)	design value (kN)	standard deviation (kN)
1	100	97	1.00
2	99.45	96.79	0.89
4	99	96.6	0.80
8	98.61	96.41	0.73
16	98.27	96.24	0.68
32	97.97	96.07	0.63
64	97.7	95.91	0.60
128	97.45	95.75	0.57
256	97.22	95.6	0.54

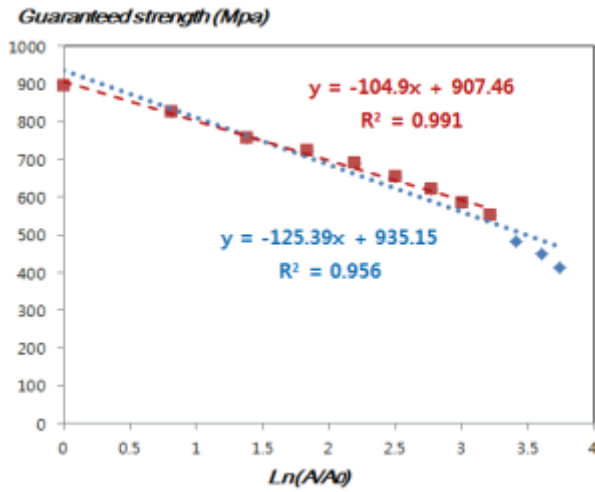


Fig.10 Regression analysis of the strength of GFRP

Table 3 Mechanical properties of GFRP rebar product data sheet

Nominal Diameter (mm)	Nominal Area (mm ²)	ln(A/A ₀)	Guaranteed strength (MPa)	Calculated strength (MPa)	Ratio
6	31.67	0	896	-	
10	71.26	0.81	827	811	0.98
13	126.7	1.39	758	750	0.99
16	197.9	1.83	724	704	0.97
19	285.0	2.20	690	665	0.96
22	387.9	2.51	655	633	0.97
25	506.7	2.77	620	605	0.98
29	641.3	3.01	586	580	0.99
32	791.7	3.22	551	558	1.01
35	958.1	3.41	482	538	1.12
38	1160	3.60	448	518	1.16
41	1338	3.74	413	503	1.22

식(1)의 적합성을 검증하기 위해 Table 1의 GFRP rod 직경별 강도에 적용하였다. 직경 6mm의 물성치를 단위요소로 기준 강도로 정하고, 이로부터 다른 직경의 설계강도를 보정식을 통해 추정하였다. Fig.10과 같이 모든 직경을 고려한 경우, 식(1)의 신뢰도는 96%이며, 직경 35mm 이상을 제외할 때 99%로 매우 높았다. Fig.10의 회귀분석으로부터 결정한 표준편차 값을 적용한 보정식을 사용하여 Table 3과 같이 보정식으로 추정한 값과 비교하여, 보정식의 유효성을 확인하였다. 즉, 취성부재 면적비의 로그에 비례하여 설계강도는 감소한다는 것을 확인하였으며, 이 보정식을 이용하여 임의 FRP 설계량에 대한 유효한 물성값을 정의할 수 있다.

3. 요약 및 결론

본 연구는 응력재분배없이 파단하는 CFRP의 인장물성의

특성을 분석하기 위해, 정규확률분포를 가지는 단위요소로부터 재료특성을 고려하여 조합요소의 확률분포의 구하고, 연성재료와 비교하여 다음 결론을 도출하였다.

- 1) 연성재료는 부분적 항복 이후에도 응력이 유지되기 때문에, 조합요소의 평균강도는 단위요소와 동일하고 표준편차는 감소한다. 조합요소의 설계강도는 편차 감소 요인에 의해 단위요소보다 증가시킬 수 있으나, 통상 보수적으로 단위요소 항복강도를 적용할 수 있다.
- 2) 반면 취성재료의 경우, 취약요소의 파단과 동시에 대부분의 경우 조합요소의 강도가 결정된다. 요소조합에 의해 평균강도가 감소하여, 시편강도를 범용으로 적용하는 것은 안전측 설계접근이 아니다. 원칙적으로 실제 적용조건을 반영한 설계강도를 얻어야 하지만, 현실적으로는 요소조합(크기, 면적증가)에 따라 보정하는 것이 합리적이다.
- 3) 표준확률분포 조건의 단위요소로부터 취성재료의 조합 특성을 반영한 결과 와이블 분포의 결과를 얻는다. 이 분포는 적용면적비의 로그값에 비례하여 설계값이 감소하였고, 이를 고려한 보정식을 제안하였다.
- 4) 직경별 물성치의 편차를 가지는 GFRP 제품에 대하여 제안한 보정식을 사용한 물성치와 비교하여 보정식의 유효함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 ‘생애 첫 연구(NRF-2017R1C1B5 018241)’의 재정지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

References

1. ASTM D3039-07, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", American Society for Testing Materials (ASTM International), 2007, 13 pp.
2. Orton, S., Jirsa, J., and Bayrak O., "Design considerations of carbon fibre anchors", Journal of Composites for Construction, ASCE, 12(6), 2008, pp. 608-616.
3. Smith S. et al., "FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors", Engineering Structures, 33(4), 2011, pp. 1075-1087.
4. Kim, Y., "Shear Behavior of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets and CFRP anchors." Ph.D Dissertation. The University of Texas at Austin, 2011, 405 pp.
5. 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, 2017,

- 110 pp.
6. De Lorenzis, L., and Nanni, A., "Bond Between Near-Surface Mounted FRP Rods and Concrete in Structural Strengthening," *ACI Structural Journal*, 99(2), 2002, pp. 123-132.
 7. ACI Committee 440, "Guide Test Methods for Fiber- Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04)", American Concrete Institute, 2004, 40 pp.
 8. NCHRP Report 655, "Recommended Guide Specification for the Design of Externally Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements," Transportation Research Board, 2010, 118 pp.
 9. ASTM D7290-06, "Standard Practice for Evaluating Material Property Characteristic Values for Polymeric Composites for Civil Engineering Structural Applications," American Society for Testing Materials, 2011, 4 pp.
 10. Weibull, W., "A statistical distribution function of wide applicability," *Journal of Applied Mechanics*,. ASME 18, 1951, pp 293-297.
 11. Klein, C., "Characteristic strength, Weibull modulus, and failure probability of fused silica glass", *Optical Engineering*, 48(11), 2009, pp 113401-1~10.
 12. Jin, S. "Reliability-based characterization of prefabricated FRP composites for rehabilitation of concrete", Ph.D Dissertations, UC San Diego, 2008, 220 pp.
 13. Bazant Z., "Mechanics based statistical prediction of structure size and geometry effects on safety factors for composites and other quasibrittle materials," *Theoret. Appl. Mech.*, 35(1-3), 2008, pp. 63-71.
 14. Bank, L., "Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials," Wiley, 2006, 560pp.
 15. Fyfe Co. LLC, "Quality Control Manual for the Tyfo Fibrwrap System," Fyfe Co., 2010, 100pp.
 16. Hughes Brothers, "Aslan 100 Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) Rebar Product Data Sheet," Hughes Brothers, 2011, 2pp.
 17. You, Y. et al, 'Establishment of test items, methods and criteria for certification of FRP strengthening technology' Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2006, 1014pp.

Received : 09/03/2018

Revised : 03/26/2019

Accepted : 03/26/2019

요 지 : 탄소섬유보강폴리머(CFRP)는 경량이며, 성형성 및 작업성이 뛰어나 보수보강재료로서 널리 사용되고 있다. 하지만, 연성재료인 철근과는 달리 CFRP는 취성재료이므로, 철근에서 사용되는 전통적인 설계접근 방법을 적용하는 것은 부적합하다. 연성재료인 철근은 항복이 후 요소사이의 응력재분배가 이뤄져 복합요소의 거동은 평균화된다. 따라서 복합요소의 응력 평균은 단위요소의 평균과 같고, 표준편차는 더 작아진다. 따라서 연성재료의 설계값은 증가시킬 수 있으나, 안전측, 실무적 접근에서 고정값을 사용한다. 반면 취성재료의 경우, 응력재분배를 기대하기 어려워 복합요소의 거동은 더 약한 요소에 의해 결정된다. 이에 복합요소의 응력의 평균값과 표준편차는 감소한다. 따라서 취성재료의 설계값은 요소수가 증가할수록 감소한다. 이 논문에서는 취성재료에서 정규분포를 가지는 단위요소가 요소 결합에 따라 와이블 분포를 가지게 됨을 증명하고, 이를 반영하여 하중이 작용하는 면적에 따른 물성치의 보정식을 제안하였다.

핵심용어 : 섬유보강폴리머, 취성재료, 시편시험, 와이블 분포
