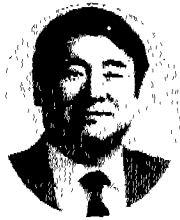


건설을 위한 복합재료

- 설계된 구조물을 사용한 건설의 필요성 -



김 덕 현*



한 봉 구**

머리말

이 글은 필자가 영국에서 출판한 511쪽 단행본 COMPOSITE STRUCTURES FOR CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING, 1988년 대한토목학회 제36회 정기총회 특별강연, 한국진산구조공학회 1991년 가을 학술발표회 특별강연, 한국복합재료학회 1998년도 정기총회 특별강연, The Third International Symposium on TEXTILE COMPOSITES IN BUILDING CONSTRUCTION에서의 Plenary Lecture, 1991년 중국 Harbin에서 열린 중국-일본-미국 지진공학 Workshop에서의 초청강연, 미국 및 한국 대학들에서의 세미나 특강들, Third PACIFIC RIM FORUM on ADVANCED COMPOSITE에서의 keynote speech, 1994년 이태리에서 열린 재료와 구조물의 파괴에 대한 치수효과의 영향에 관한 INTERNATIONAL UNION OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS SYMPOSIUM에서의 초청강연, 사회간접시설에 대한 복합재료의 응용에 관한 WILSON FORUM에서의 초청강연, 한국섬유공학회지 제1권 1호 특집기사(1997.3), 대한

기계학회지 39권 2호(1999.2)테마기획, 한국고분자학회지 10권 1호(1999.2) 특집기사, 한국전산구조공학회 2000년 봄 학술발표회에서의 특별강연(2000.4), 전남대학교 특강내용(2000. 5), 및 21세기 건설용 복합재료 세미나(2000. 8)의 특별강연 내용 등을 참고로 하여 최신의 발전현황을 추가하여 쓰고, 이 글의 제목에 해당되는 내용은 필자가 한봉구 교수와 공동으로 복합재료에 관한 제2회 한일workshop에서 발표한 내용을 번역하고 일부 추가하여 작성된 것이다^(8*).

1. 서 론

재료산업의 장래는 건설산업에서 쓰이던 재래의 재료들이 첨단복합재료로 대체될 때 결정된다. 건설에서의 재료는 kg이 아니고 ton으로 사용된다. 건설관련 세계시장 규모는 연간 2조 4천억달러로 추정되고 있고 미국만의 향후 20년간 사회간접분야 보수를 위한 투자 소요는 3내지 4조달러로 계산되고 있다. 이 글에는 필자가 인류문화사상 제5의 기본 구조개념이라고 주장해온 복합재료가 건설분야에서

* 정회원 · KOREA COMPOSITES, 대표

** 정회원 · 서울산업대학교 구조공학과, 교수

어떻게 이용되고 있고 장래 어떤 발전을 할 것인가에 대한 간략한 설명이 실려있다.

이러한 거대한 시장에 대하여 미국은 세계에서 30년 내지 40년 앞선 첨단군사기술을 응용하기 위한 기술재투자사업(Technology Reinvestment Program - TRP)을 착실히 진행하고 있다. 1996년 11월 워싱턴에서 열린 미국 토목학회 연차 총회에서 제4차 재료공학회의(Materials Engineering Conference)의 모임 주제는 새로운 1000년의 재료(Materials for the New Millennium)이었다.

강교는 부식된다. 콘크리트 보나 슬래브에 들어가 있는 철근은 전기화학적 작용에서 일어나는 부식을 피할 길이 없다. 지하 저유시설도 같은 상황에 놓인다.

대형구조물 설계 건설시 가장 큰 제한 조건은 모든 건설재료에는 치수(size)의 한계가 있다는 사실이다. 예를 들면 현수교나 사장교의 경우, 강재를 사용하면 최대 지간(span) 5000m~7000m가 가능하나 유리섬유 보강 복합재료는 이의 2배, 탄소섬유를 사용하면 3배가 가능하다.

대형구조물의 무게에서 오는 문제는 더욱 심각해서 고층건물의 경우 기초 지반 능력 한계가 층고의 한계를 일으키는 경우가 흔하고 아랫기둥 강도 한계가 층고의 한계를 가져오고 너무나 큰 기둥 크기는 건축 계획의 큰 장애물이 된다. 건설부재의 중량 때문에 중장비 사용이 필수적이며, 막대한 공사비가 증가하고 긴 공기가 필요하다. 복합재료를 사용하면 교량, 건물 등의 상판 무게가 콘크리트 재질 무게의 1/5~1/10도 가능해져서 중장비가 필요 없고, 엄청난 공기 난축이 얻어진다. 예를 들면 교량시설이 몇 년에서 몇 시간으로 단축될 수 있다. 내 부식성이 강해서 유지 보수비가 크게 감소하는 고로 복합재료를 사용한 구조물은 단기 및 장기적으로 경제적인 것이 된다. 지진 또는 충격시 판성력은 무게에 비례하므로 복합재료 구조물이 받는 충격력은 무게비 만큼 줄어든다. 유지보수 및 재생의 경우, 기존 구조물의 철거, 재시공은 엄청난 공기를 필요로 한다. 기존 구조물의 보수나 재생에는 복합재료의 사용을 절대적으로 필요로 한다. 교량 상판 무게가 1/4로만 감소되어도 파손된 기존 중방향 큰 보(girder)에 복합재료로 약간

의 보수만 해도 사용가능해지고 하중의 증가시도 그대로 사용할 수 있게 된다.

거의 모든 복합재료로 만들어진 건물이나 사회간접 시설은 적절한 설계 없이 제작된다. 대부분의 건설관계 기술자의 교육배경은 공학사이고, 더 높은 학위를 가진 기술자들도 복합재료가 아닌 재료의 건설재료로 만들어진 건물/사회간접 시설까지도, 만족할만한 정확성을 가진 설계/해석에 상당한 어려움을 갖는다. 그런데 이러한 구조물들은 항공기나 자동차부품에 대해서는 달리, 치수가 커서, 거의 모든 경우에 원형(prototype)실험이 불가능하다. 본문에서는 건설에서의 복합재료 활용을 실현하기 위해서 상세하게 적용하고 또, 필요하면 장차 더 연구해야 할 내용들을 다루기로 한다.

2. 구조물의 4대 기본 개념

장구한 역사를 지나면서 구조물 건설의 4대 기본 개념이 발전하였다. 이들은 그 시대에 사용가능한 건설 재료와 응용이 가능한 기술 지식으로 발전된 구조형식인데, 기둥과 보, 석조아치, 목재트러스, 현대 철강 트러스 및 뼈대 등이다.

칼데아에 있는 폐허화된 구조물은 기원전 5000년에 지어진 것이기는 하나 그리스이전에 지어진 최고의 구조물은 이집트사람의 불멸의 작품이라 할 수 있다. 이집트의 사원 중 가장 훌륭한 것은 카나크(Karnak)에 있는 아몬(Amon)의 대사원 이다. 기원전 1500년에 건립된 이 사원은 길이 360미터에 108미터의 폭을 차지하고 있으며, 거대한 석재 슬래브로 된 지붕을 기둥과 보가 지지하고 있다. 중앙의 기둥들은 13.5미터의 직경에 20.7미터의 높이를 갖고 있다. 이 구조물은 여러 세기에 걸쳐 건립된 것이다.

현대 건축은 그리스의 영향을 많이 받았다. 기원전 460년 내지 400년 사이의 그리스의 유명한 지도자 페리클레스(Pericles)의 시절에 그리스는 가장 뛰어나고 유명한 건축의 발전을 가져왔다. 아크로폴리스(Acropolis)라 불리는 아테네의 언덕에 건립된 파르테논, 에레크티엄(Erechtheum), 프로필레아(Propylaea)등은 현대 세계에서 가장 유명하고 완전한 구조물에 속한다.

로마인은 건설에 아치(arch)를 적극적으로 사용했는데, 이 기술은 동방의 수메르(Sumer)로부터 내려오는 것을 전수받은 “voussir” 또는 “true arch” 기술로서 이 구조의 원리는 에스트루칸(Estrucan)의 “corbelled arch”와는 다르다. 로마시대에는 수메르(Sumer)인들이 세운 많은 벽돌 아치들이 존재하고 있었다고 믿어진다. 아직 존재하고 있는 로마 아치 중 가장 오래된 것은 “TEMPLE OF SATURN” 앞에 있는데 이것은 기원전 6~4세기에 건립되었다. 그들은 도수관을 복석조 아치로 건설했으며 아직도 사용되고 있는 것도 있다. 43.2미터의 직경을 가진 석조 돔(dome)인 로마에 있는 파르테온은 서기 120년에 완공되었다. 의심할 여지없이 이집트인들은 어느 정도의 역학을 터득하고 있었다.

그리스 사람들은 이것을 더 발전시켜 재료역학의 기초가 되는 정역학을 개발하였다. 아르키메데스(기원전 287~212년)는 지레의 평형조건을 설명하고 물체 중심의 결정법을 찾아냈다. 그들은 이 이론을 여러 가지 중력 물체의 운반 기구 제작에 응용하였다.

로마인은 위대한 건설 자들이다. 기념탑이나 사원뿐 아니라 도로, 교량, 진지 등으로 쓰인 축성 구조물이 아직도 남아 있다. 아우구스투스(Augustus) 황제 시의 유명한 기술자인 비투루비우스(Vitruvius)가 쓴 책에는 이러한 건설에 관한 방법이 적혀 있다. 남부 프랑스에 있는 폰 두 가르(Pont du Gard)는 아직도 훌륭한 교량으로 이용되고 있다. 로마의 아치를 현대의 아치와 비교하면, 현대에는 더 가벼운 구조물을 만든다는 것을 알 수 있다. 로마인들은 응력해석의 이점을 갖지 못했다. 그들은 최적 형태의 아치를 사용할 줄 몰랐고, 통상 짧은 스패를 가진 반원을 썼다.

그리스와 로마인들이 쌓아올린 구조공학의 대부분의 지식은 중세에 들어서자 소실되었으며, 르네상스이후에야 회복되기 시작했다. 유명한 이태리의 건축가 폰타나(Fontana; 1543~1607년)가 식스투스(Sixtus) 5세 교황의 명령으로 바티칸침탑을 세웠을 때 구라파 기술자들로부터 많은 관심을 끌었다. 그러나 이집트인들은 이보다 수 천년 전에 씨엔느(Syene)에서 다듬은 석재를 나일강으로 운반하면서 수많은 이런 침탑을 건설하였다. 로마인들

은 이 침탑의 몇 개를 원위치에서 로마로 옮겨 세웠다. 16세기의 이태리 기술자는 그들의 조상들보다 이런 일에 훨씬 뒤져 있었던 것이다.

르네상스기간에 과학에 대한 흥미가 부활하여 건축과 기술의 예술지도자들이 등장한다. 레오나르도 다 빈치(1452~1519년)는 이 기간의 가장 뛰어난 사람이었다. 그는 이 당시의 지도적인 예술가일뿐 아니라 위대한 과학자요 기술자였다. 그의 기록을 보면 여러 분야의 과학에 관한 발견을 한 것을 알 수 있다. 그는 역학에 지대한 흥미를 가져서 그의 기록에 “역학은 수학의 결실이요 수학의 낙원이다”라 썼다.

현대 역학은 위대한 갈릴레오(1564~1642년)에 의하여 문을 연다. 그의 위대한 업적은 과학의 모든 분야에 영향을 미치고 있다. 17세기 기간에는 수학, 천문학, 역학 등에 급격한 발전을 이루어 1560년에는 이태리에 최초의 과학원(Academy of Sciences)이 세워졌고, 영국의 수학자 왈리스(Wallis) 및 그의 학우들의 모임에서 신 철학(New Philosophy) 또는 실험 철학(Experimental Philosophy)란 이름을 쓰기 시작했다(1645년). 이때 비로써, 과학이 철학과 분리되기 시작한 것이다. 르네상스 이전 특히 13세기의 스페인에는 고딕형태의 건축이 발전하여 영국, 독일, 이태리로 전파되었다.

중요한 구조물 건설의 개념인 목재트러스는 이태리의 앙드레아 파라디오(Andrea Palladio; 1518~1580년)에 의하여 쓰여졌다. 그러나 파라디오의 이 발명의 중요성은 18세기 중엽까지 인식되지 못하였다.

페시아(Persia)의 왕들은 3500년경 전부터 강철을 인도로부터 구했고, 이 제조 기술은 2900년전 쯤 중앙 유럽으로, 2600년전 경 중국으로 전해졌다. 1667년, 키르커(Kircher)는 서기 65년에 중국에 건설된 지간 60미터의 철재 현수교에 대해 기술했는데, 20개의 철재 체인으로 된 이 현수교에 대해, 후에 나비에(Navier)를 비롯한 여러 사람이 기술하였다. 탁월한 유지 보수에 대한 의문이 생기는데, 중국은 훌륭한 락커(lacquer)도장을 할 수 있는 원료를 주는 식물들이 무성해서 금속 체인에 효과적인 보호를 하는 것이 불가능하지 않았다고 보고 있다.

현대 철강기술은 미국 핏츠버그(Pittsburgh) 토

박이 윌리엄 켈리(William Kelly, 1811~88)가 개발했으나 혼자 연구를 하던 그는 결국 파산선고를 받고, 그의 업적은 영국의 헨리 벡세머(Henry Bessemer, 1813~98)것이 되어 작위까지 받은 벡세머의 이름이 이 기술을 대표하고 있다(1856). 구조용강의 발전과 이의 건물 건설에 대한 이용은 로마이후의 가장 기념될 만한 일이었다. 강도 높은 강철의 사용은 고층건물, 장대교, 높은 탑 등의 건설을 가능케 하였고, 20세기의 꽃을 피게 하는 원천이 되게 하였다.

3. 구조물의 제5 기본 개념

21세기를 눈앞에 둔 현재의 금속, 화학공학의 발달은 눈부신 발전을 거듭하여 각종 구조용 신소재의 등장을 통해 강철을 비롯한 각종 재래 구조재료의 퇴장을 강요하기 시작한 지 오래다. 지금까지 인간이 사용 가능한 재료와 응용 가능한 기술로 구조 형식을 발전시켜 왔듯이 우리에게 새로운 소재를 사용하는데 적합한 새로운 구조 형식의 개발이 필요한 것이다. 필자는 이것을 구조물의 제 5 기본 개념이라고 칭해 왔다^{1),P1)}.

인류 문화상 제5의 구조 개념의 대표적인 구조 형식은 복합재료구조(composite structure)이다. 인류는 복합재료를 수 천년 동안 사용해왔다. 진흙에 짚을 썰어 흙담을 쌓았을 때 우리조상들은 “discontinuous fiber reinforced composite”를 사용했던 것이다. 즉, 짚은 보강재이고 진흙은 모재(matrix)였다. 소위 첨단 복합재료(advanced composite)의 사용은 1964년 “저렴한” 가격으로 탄소섬유가 생산되고 부터이다. 각종 비행기에서, 부품으로부터 시작하여 이제는 주 구조재로 사용되고 있으며, Voyager나 Starship과 같은 100% 복합재료 비행기가 대두되었다. 이러한 소재의 사용은 각종 운동기구, 선박, 자동차 등으로 확산되어 갔다.

복합재료를 설계에 사용할 때, 매우 경량이고 부식이 발생하지 않는다는 사실 외에, 재래의 구조재료에 비해서 다음과 같은 장점이 있음을 구조 기술자는 발견하게 될 것이다.

가. 임의 방향으로의 보강 가능성

나. 스티프너 등과 같은 기하학적 보강 없이 구조 부재를 보강할 수 있는 가능성
 다. 구조적 요구 사항에 따라 최적 부재 / 구조를 생산할 수 있는 가능성.

이러한 여러 가지 장점에도 불구하고 토목, 건축 등 일반 건설 재료로서의 이용은 아직 초보 단계에 있다. 그 주된 원인은 다음 세 가지로 요약될 수 있다.

가. 이론이 일반 설계 기술자에게는 너무나 어렵다. 설계 사무소나 현장의 건설 기술자들은, 대개 학부 수준의 이론적 배경을 갖고 있다.
 나. 건설 기술자를 위한 포괄적인 교과서/참고서가 없다. 주된 이유는 항공우주분야등 신소재 구조 기술자와 건설 기술자는 서로 다른 “言語”를 사용하고 있는데 있다.
 다. 고급 복합재료의 가격이 높다는 편견이 있다.

최신 복합 재료의 이론은 학부를 졸업하고 실무에 종사하는 일반 건설 설계 및 시공 기술자들에게는 너무나 어렵다. 필자는 과거 수년간 일반 기술자가 소신을 갖고 쉽게 사용할 수 있는 간단하고도 정확한 이론의 개발을 위해 노력한 결과, 과거 5년간에 국내외 학회 등에서 발표된 논문 중 약 40여 편으로 거의 완성에 가까운 간단하고도 정확한 설계 이론을 확립할 수 있었다.

두 번째 문제의 해결을 위해서 필자는 “Composite Structures for Civil and Architectural Engineering”이란 약 500쪽의 책을 완성, 영국에서 출판하였다.

현재 각종 소재의 가격은 계속 내리고 있고, 경제적이고 효율적인 제작 방법이 나날이 개발되고 있어 설계 방법이 가격 형성에 결정적인 작용을 하고 있다. 기존 재료에 근거한 부적절한 개념에 의한 설계야말로 구조물의 가격이 높게끔 되게 한 장본인인 것이다. 필자가 구조물의 제 5기본 개념이라고 이름부친 새로운 개념에 근거한 최적설계가 결정적으로 필요한 것이다. 이것은 공사단가의 대소는 설계 개념에 따라 크게 좌우되기 때문이다. 선택의 폭이 방대하고 고려 사항이 무수히 많은 복합재료의 경우 가격은 설계자의 판단 능력에 더

욱 크게 좌우된다.

흔히들 건설 기술자들은 보수적이라고 하는데 이것은 잘못된 평가들이다. 건설 기술자들은 정확한 이론이나 설계 방법이 개발되기 훨씬 이전에, 현재 보다 훨씬 열등한 건설 재료로 장대교, 고층건물, 거대한 댐들을 설계 건설하여 왔다. 남산의 SEOUL TOWER의 경우 좌골과 진동은 완전히 새로운 이론을 개발 적용하여 해석되었으며, 최근 필자의 이론으로 확립하면서 50여 차례 국제회의에서 발표한 이 과제에 관한 논문들은 이 SEOUL TOWER에서 뿌리를 찾아야 하는 것이다.

3.1고가도로만 해도 필자는 그 당시 최신의 이론을 적용하였고, 최초의 여러 가지 건설 기술을 도입하여 경제적인 구조물이 가능케 하였으며, 강구조가 콘크리트 구조에 비해서 비싸지 않을 수 있다는 인식이 널리 퍼지게 되었다. 이러한 건설이 가능했던 주된 이유는, 설계자로서의 필자의 소신도 있지만 발주처 기술진의 용기에 있다고 보아야 한다. 이 기술자들이 구태의연한 설계에 만족하면서 지냈다면, 또 재료가 1/3로 감소되었는데도 “겁도 없이” 그런 공사를 감행할 수 있는 용기를 갖지 않았다면 그러한 새로운 구조물의 건설은 가능치 않았다. 건설에 대한 복합재료의 응용을 위해서는 같은 정도의 용기가 필요한 것이다.

4. 역사의 필연성

필자는 약 10여 년 전부터 복합재료를 21세기의 건설재료라고 홀로 떠들어 왔다. 그러나 1996년은 드디어 새로운 역사의 흐름을 확인할 수 있는 해였다. 1996년 11월 미국 토목학회 년차 총회에서 Materials Congress가 열렸는데 이 모임의 명칭이 “다음 천년을 위한 재료(Materials for the New Millennium)”이었다⁷⁾. 필자는 여기 참석해서 좌장을 맡고 논문도 발표했는데 만찬회에서 많은 사람들이 찾아와서 그간의 고군분투한 노력을 치하하고 필자가 쓴 저서가 엄청나게(gorgeous) 훌륭하다고 칭찬하는 소리를 들었을 때 그간의 힘들었던 일들은 다 잊혀지고 엄청나게 흐르는 역사의 필연성을 느낄 수 있었다. 누가 뭐라던 지구는 돌고 있는 것이다. 역사는 변하는 것이 필연이다. 구조개

념은 인류 역사의 필연성에 의해서 변해왔다.

지금까지의 구조물 4대 기본 개념은 그 당시 사용 가능한 소재와 응용 가능한 이론에 의해서 개발되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 필자가 인류문화상의 제 5구조물 기본개념 이라고 부르는 복합재료가 모든 구조물의 기본 설계에 사용되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다.

5. 건설에 대한 복합재료의 사용

건설 분야에 대한 섬유복합재료의 응용의 본격적인 움직임은 극히 최근의 일이다. 필자가 1989년 8월 중국 Guangzhou에서 열린 7차 ICCM(International Conference on Composite Materials)에서 “Geometric Nonlinear Analysis of Underground Laminated Composite Pipes”란 제목으로 발표했을 때 참가자 중 여러 사람이 건설, 특히 토질공학과 복합재료 역학을 결합한 최초의 논문이라고 평했다.

1991년 8월에 미국 과학재단 연구비를 수령하는 원로 교수 모임에 초청되어 Composite에 대해서 간단히 이야기 하니까 사회 보던 교수가 Composite 이론이 어렵지 않을 수 있으며 가격이 저렴할 수 있다는 사실을 처음 알았다고 이야기했다.

1990년 미국 토목학회 제8차 Structural Congress에서, Composite에 관한 학술논문은 필자의 것 하나뿐이었다.

이 해 초에 과학재단의 공무원들은, 필자로 하여금 영국에서 “Composite Structures for Civil and Architectural Engineering”란 책을 집필, 출판하도록 알선하였다. 이 초고는 1991년 8월의 원로교수 회의에서 소개되고 참석자들은 최소한 한가지의 전문 교과서는 있다고 기뻐했다.

1990년 12월에는 University of Illinois Urbana Champaign의 Parson 교수와 U. C. Davis의 Ramey 교수를 N.S.F.에서 한국으로 파견하여 필자와 공동 연구 계획을 세우도록 했다. 이 공동연구의 proposal에서, 필자는 이론 연구의 방향을 미국에 주어서 N.S.F.에 제출케하고, matrix와 제작 기술을 한국에 남기고자, 이 두가지를 중심으로한 proposal을

한국정부에 제출하였으나 사상최대의 comedy는, 이 1년에 2조 4천억불의 시장을 가진 건설에 대한 복합재료 응용은, 필자의 주도하에 진행하는것인데도 불구하고 한국정부서는 연구제안을 부결하고 미국서만 승인되었다. 자연히 필자는 미국과 연구를 진행하고 이 엄청난 결과는 한국서 떠나는 결과가 된다.

1991년 11월에는 중국에서 미. 일. 중 공동 세미나에 미국 대표 7명중 1인으로 참석, 복합재료 설계에 대하여 주제 발표를 하도록 알선했다. 1992년 1월에는 University of California, Davis에서 초청하여 "Design of Composite Material Structures for Civil Engineering Application"이란 제목으로 이야기했고 3월에는 University of Illinois, Urbana-Champaign에서 "A Simple Method for Exact Analysis of Composite Laminated Structures for Civil Construction"이란 제목으로 이야기했다. 이 일련의 움직임을 미국을 비롯한 선진국 학계는 신속하게 활용하고 있다. 1991년 12월 동경에서의 SAMPE 국제회의에서 필자가 좌장 역할을 하고 발표를 했을 때, 설계나 이론에 관한 논문은 별로 없었고 강재 단면을 모방한 Composite부제가 몇 가지 발표되었다. 그 이후의 여러 학회에서도 몇 번 발표된 이러한 단면들은 소재의 특성을 최대한 활용하지 못하여 경제적이지 못하나 내부식성 등에서는 평가될만 했다. 이때 SAMPE회장 Wilson은 필자에게 건설에 복합재료를 사용하는 것과 이를 위한 Consortium을 만들 것을 제의하고 그 후에 한국에 다녀오게 된다. 이 Consortium에서 필자는 R/D, engineering 및 marketing을 맡을 것으로 정해졌다. 현저한 변화는 1992년 3월의 제 37차 SAMPE 국제회의에서 볼 수 있었다. 28개 분과중에서, 제일 앞의 1A 분과에서 "산업, 교통, 건설에 대한 Advanced Composite 시장"이란 제목을 다룬 것이다. 세 가지 제목이 다 건설 관계임은 물론이다. 그 후의 변화는 더욱 놀랍다. 6월에는 볼란서에서 "Textile Composites in Building Construction"이란 회의가 열리고 10월에는 Canada에서 "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures"란 회의가 열렸다. 즉 건축과 교량에 관련된 복합재료에 대한 국제회의가 연거푸 같은 해에 열렸다.

필자는 상기 두 회의와, 7월에 중국에서 열린 소형 컴퓨터의 교육 활용에 관한 국제회의, 12월에 홍콩에서 열린 Computational Engineering Sciences에 관한 국제 회의 등에서 좌장 역할을 하고 논문도 발표하였는데 특기할 것은 중국의 회의는 중국 항공기 부품 제작에 관한 보고 이외는 복합재료에 관한 것은 필자것 하나 뿐이었으나 다른 모임들에서는 여러 가지 흥미로운 발표가 있었다. 그러나 그 내용은 아직 구각을 벗어나지 못한 상태여서 우리 나라는 아직도 비교 우위에 있다고 할 수 있었다.

1993년 2월에는 호주에서 "Advanced Composites - 93"란 회의가 열렸다. 이 회의는 참가자가 주로 우주 항공계이고 건설계는 필자 혼자 발표하였는데 그 내용이 신소재의 대량 사용을 위한 간단하고 정확한 설계에 대한 내용이어서 좋은 호응을 받았고 많은 과학자들로부터 계속 협조하자는 제의를 받았다. 중요한 것은 이 회의 후에 열린 초청 인사들만 모인 forum이다. 필자는 Boeing 항공사의 Chief Engineer Max Spenser 박사, 이태리의 Viscount 교수(ECCMVII회장), Duralcan(Alcoa 계열사) Bill Hoover 부사장 등과 같이 panelist 역할을 했는데 토의 논제는 "경제적인 설계와 제작"이었다. 첨단 우주항공 관련 회사들이 대량으로 재료를 사용할 건설 분야로의 응용을 위한 관심을 갖고 있다는 증거이며, 공학사상 획기적인 변화의 시초가 될 수 있겠다.

1993년 5월에는 캘리포니아주 Anaheim에서 제 38차 SAMPE 국제회의와 전시회가 열렸다. 필자는 다른 8명의 원로들과 함께 "CONSULTANTS CORNER"에서 상담역 노릇을 했는데 많은 방문자들 중 대부분이 첨단소재의 건설로의 응용에 관한 문제를 논의하고자 와서 상담역 9명중 유일한 건설 관계자인 필자는 상당히 바쁜 시간을 보냈다. 학술회의에서 발표된 건설관계 논문은 5편이었다. 주목할 것은 이후에 San Francisco에서 개최된 Wilson Forum이다. 30명의 초청 인사로 이루어진 이 모임은 첨단 재료와 건설을 어떻게 결합시키느냐를 토론하기 위한 것이었다. 2월 호주에서의 Australasia-Pacific Forum은 첨단 소재의 기술 이전을 중심으로 한 회의로서, 건설로의 이전이 첨단 과학 산업을

크게 활성화시킨다는 결론을 얻은 것인 반면, 미국에서의 이 모임은 처음부터 건설로의 응용을 주제로 한 최초의 모임으로 그 이름 자체가 "Existing and Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure"였다. Stanford 대학교의 Springer 교수 Texas 대학교의 Fowler 교수 등을 비롯한 학계원로들, 일본 SAMPE 회장 Teranishi 박사, 상해 합성수지 연구소 Yin 박사, 기타 미국 소재 관련 전문가들과 교통 담당부서의 공무원들이 모였다. 이것은 필자와 Wilson 회장이 합의해 시작한 건설용 복합재료를 위한 Consortium의 태동이 되는데 필자는 "Composites in Construction—Consideration for Design"이란 논제와 Summary Speech로서 건설에 대한 신소재 응용의 문제점과 이의 해결 방법, 기술 이전의 방법, 군사 기술의 평화 목적 이용을 통한 군수 산업체와 전반적인 경제의 대 발전과 제2 산업 혁명의 성공적인 완수 등에 대해서 이야기했다. 이 모임은 점점 여러분야 사람들의 관심을 높여와서 1997년에는 세 번, 1998년에는 네 번 개최하게 되는데 각 모임은 보수, 교량 상부구조 등과 같이 특별한 topic에 대해서 발표 및 토론을 하는 것으로 되어있었다.

복합재료의 교량 등 사회간접시설 및 건물에 대한 응용, 보수 및 재생을 위한 사용, 콘크리트 형틀, 콘크리트 보강, 생명선(life line), 탱크 및 파이프, 기타에 대한 응용등의 2000년도의 현황, 건설에 대한 복합재료 사용을 위한 연구 개발 방향, 표준시방서, 지능 구조물, 보수를 위한 지능(smart) 콘크리트의 사용, 유지보수 및 재생을 위한 지능소재, hybrid matrix의 사용, 초저온 및 초고온 구조재료등에 대한 간단한 설명은 참고문헌 [1, 4, 5, 8, 13, 14, 21, 23, 27, 29, 49~56]등에 설명되었으므로 이 글에서는 생략한다.

6. 설계된 구조물을 사용한 건설의 필요성

거의 모든 복합재료로 만들어진 건물이나 사회간접 시설은 적절한 설계없이 제작된다. 대부분의 건설관계 기술자의 교육 배경은 공학사이고, 더 높은 학위를 가진 기술자들도 복합재료가 아닌 재래의 건설재료로 만들어진 건물/사회간접 시설까지

도, 만족할 만한 정확성을 가진 설계/해석에 상당한 어려움을 갖는다. 철근 콘크리트나 강철로 된 건물/교량도, 시멘트등(matrix)와 강봉(fibers)과 같은 복합재료로 이루어진 3차원 구조물이다. 그러나 기술자들은 이러한 구조물을 1차원 보/기둥으로 생각하고 설계하고 해석한다. 그러나 그들은 법규나 시방서로 보호되어 있다. 복합재료로 된 거의 모든 건물이나 사회간접 시설에 대해서는 법규나 시방서도 없고, 적절한 설계없이 제작 시공되고 있다. 그런데 이러한 구조물들은 항공기나 자동차부품에 대해서와는 달리, 치수가 커서, 거의 모든 경우에 원형(prototype)실험이 불가능하다. 시편(test piece) 강도나 축소(sub-scale) 모델 시험강도는 일반적으로 현장구조재료의 실제 강도보다 높다. 즉, 이러한 시험강도는 위험한 정보를 제공한다. 아무도 설계강도를 얻기위해서 설계개념과 동일한 10층빌딩이나 100미터 스패의 교량을 파괴해 볼 수는 없다. 사람들은 100층이상의 건물이나 수천미터 스패의 교량을 건설하고 싶어한다. 본문에서는 건설에서의 복합재료 활용을 실현하기 위해서 상세하게 적용하고 또, 필요하면 장차 더 연구해야할 내용들을 다루기로 한다.

7. 기초이론의 철저한 공부

지난 1991년 12월에, 당시 SAMPE 회장이던 BRIAN WILSON씨가 필자에게 건설에 대한 복합재료 응용을 위한 CONSORTIUM을 만들자고 제의하면서 준 제안서에 의하면, 협조의 필요성을 강조하는 큰 이유중의 하나가, 건설인과 재료 및 항공산업계 인사들은 심지어 서로 다른 "언어"를 사용한다고 보일 정도로, 서로의 분야를 이해하지 못한다는 사실이라고 하였다.

이를 증명할 만한 사실들은, 한국에서도 금년 1년에 몇차례 일어났다.

여름, 어느 국내학회의 모임에서 건설계 어느 인사는 복합재료 교량 상판의 제작 실험결과를 발표하였다. 캘리포니아 대학교(CSULB)가 1980년부터 10여년간 연구해온 결과를 1989년에 발표한 바에 의하면 이러한 상판은 제작은 용이하나 구조적 여유가 모자란다고 했다. 차량방향에 직각으로 F/W

하였으나 차량운하중(wheel load)이 이동할 때, 이에 견디는 것은 epoxy matrix뿐이다. 이 시범에 참관했던, 모대학교의 조교는 차마 표현하기 곤란한 형용사로 평했다.

다음의 항반용 콘크리트 모서리(원통형태 블록) 피복구조물에 대한 설명은 놀라웠다. 원통형 콘크리트 덩어리를 씌었으니 이 복합재료 구조(?)는 충격하중이 중요하지, 응력이 분제되지 않는다. 그러나 2차원 평면에 대한 TSAI-WU CRITERIA를 사용했다고 했다. 3차원 원통 모양구조에서 2차원 면내강도 $XX'YY'$ 를 어떻게 구했다는 것인지. 더욱 가관인 것은 STRENGTH/STRESS RATIO, R,을 0.8, 0.75등이라면서 안전하다는 것을 여기 표현하고 싶지 않은 형용사로 이야기 하였다. R이 1보다 작으면 구보물은 파괴된 것인데, 그곳에서 토의하면, 그 사람의 신분에 위험이 갈까봐 힘들게 입을 나물었다.

이번 가을에는 항반용 파일에 대한 보고(?)를 했다. 10여년전부터 F/W된 파이프에 콘크리트를 채우는 연구결과가 미국에서 발표되어왔다. 여기서 흥미로운 것은 1996년 3월호 CALTRAN의 Memo이다⁸⁾.

강철이나 탄소섬유의 기둥용 jacket의 경우, 사람들은 두꺼운 CASING의 사용이 안전한 것으로 생각하고 있으나, 사실은 기둥의 ductility를 감소시켜서 더 위험한 것으로 되어있다. 이 경우, 기둥의 압축축은 너무 잘 “CONFINE”되어서 인장 보강제는 압축축이 “YIELD”하기전에 모두 잘라질 수 있다. 좋은 기둥 연성은 믿음만한 “힌지”회전으로 이루어 진다. 지나친 CASING두께는 “plastic hinge”의 길이를 감소시키고 연결 interface에서 철근의 절단을 일으킬수 있으므로 이로운 것보다 훨씬 더 파괴적일 수 있다.

필자가 F/W파이프의 최적두께를 검토했느냐고 질문했을 때, 그 대답은 충격적이었다. “파이프는 90°로 강하게 WINDING되었고, 전단력은 45°로 오니까 절대 튼튼하다는 것. 보에서 45° 방향으로 전단력이 작용한다고 착각하는 것은, 전단응력과 휨응력등의 응력 합성에서 오는 STRESS TRAJECTORY의 방향을 잘못 이해하는데서 온다. 지진이던 바람 또 선박이 부딪치는 힘은 엄연히 기둥에 90° 방향

에서 오고, 90°로 WINDING된 파이프는 matrix만으로 이 힘을 견디어야 하므로 결과는 불문가지이다. 필자의 질문은 이런 기초적인 문제가 아니라 지나친 “CONFINEMENT PRESSURE” 즉, 너무 두꺼운 튜브가 이롭지 않고 해로울 수 있으니 최적두께를 설계해야 한다는 것이었다.

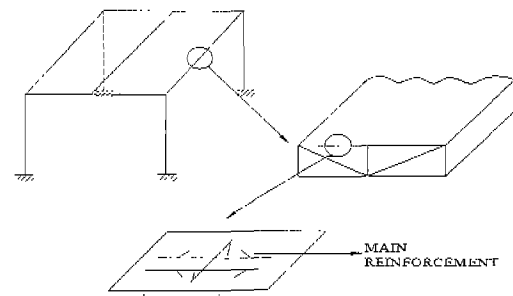
8. 구조물 개념의 최적화

건설에 복합재료를 사용할 때, 반드시, 필자가 구조물의 제5기본 개념이라고 이름붙인 새로운 개념에 근거한 최적설계를 실시해야 한다는 것은 3절에서 강조한 바와 같다.

토목, 건축 구조물의 거의 대부분은, 1차원 구조요소의 뼈대(framework)로 생각하고 해석될 수 있다. 복합재료는, 일반적으로, 인장에 강하다. 어느 구조요소가 인장하중에 대해서 설계되면, 얇은 단면을 갖게되고, 면내의 축방향 인장하중이 아닌 다른 형태의 하중에 대해서는 매우 취약하게 된다. 이것은, 얇은 판들의 결합을 통하여 단면계수를 증가시킬 것을 필요하게 한다.

구조물 뼈대가 1차원의 보와 기둥으로 해석되더라도 이들 1차원 구조요소들은 얇은 벽의 모임으로 이루어진 3차원 구조물로서 FOLDED PLATES (shells)라 불리운다. 결국, 복합재료로 만들어지는 건설용 구조물의 해석은 등방성(prismatic)이던 비등방성(nonprismatic)이던 FOLDED PLATES의 해석이 된다.

A TYPICAL BRIDGE FRAME



TOTAL SECTION: BEHAVES LIKE A FOLDED PLATE SHELL

그림 1 Typical bridge or building frame

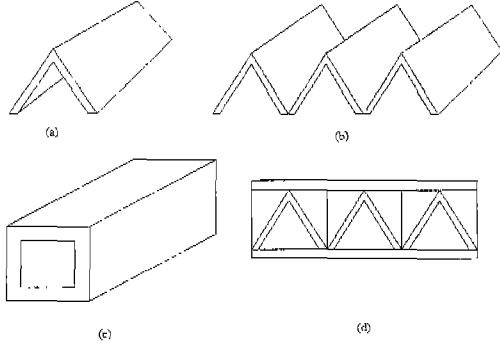


그림 2 Prismatic folded plate structures

9. 토목 건축건설의 주요 구조물해석을 위한 간편한 방법

건설용 복합재료 구조부재의 효율적인 형태 가운데 가장 중요한 것은 상형(box)단면인데, 이런 단면의 각요소(clement)면은 탄성지지된 적층판으로 이루어진다. 적층판의 설계와 해석은 너무 복잡해서 상당한 수의 구조 기술자들은 복합재료설계에 대해 아레르기 증세까지 보인다. 전체구조물의 최초 기본설계시부터, 각 판의 재료선택 및 섬유배향등을 결정한다는 것은 상당히 어려운일이다. 경계조건은 탄성지지되었으며, 지지조건은 아직 비지의 함수로 되어있다. 일반적으로 복합재료 적층판의 해석에 있어 경계조건은 고전적 역학이나 탄성론의 경우와 같이 단순하지가 않다. 가장 단순한 경우인 단순지지 및 고정지지인 경우라 해도 다음과 같이 여덟가지 형태(types)가 있다.

단순지지

Type 1 : $w=0, M_n=0, u_n = \bar{u}_n, u_t = \bar{u}_t$

Type 2 : $w=0, M_n=0, N_n = \bar{N}_n, u_t = \bar{u}_t$

Type 3 : $w=0, M_n=0, u_n = \bar{u}_n, N_{nt} = \bar{N}_{nt}$

Type 4 : $w=0, M_n=0, N_n = \bar{N}_n, N_{nt} = \bar{N}_{nt}$ (1)

고정단

Type 1 : $w=0, \frac{\partial w}{\partial n}=0, u_n = \bar{u}_n, u_t = \bar{u}_t$

Type 1 : $w=0, \frac{\partial w}{\partial n}=0, N_n = \bar{N}_n, u_t = \bar{u}_t$

Type 1 : $w=0, \frac{\partial w}{\partial n}=0, u_n = \bar{u}_n, N_{nt} = \bar{N}_{nt}$

Type 1 : $w=0, \frac{\partial w}{\partial n}=0, N_n = \bar{N}_n, N_n = \bar{N}_{nt}$ (2)

횡방향 전단변형이 무시된 간단한 경우에도 판의 휨 지배 방정식은 다음 세개의 연립편미분 방정식이다.

$$A_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2A_{16} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + A_{66} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_{16} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + (A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + A_{26} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - 3B_{16} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} = 0$$
 (3)

$$A_{16} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + A_{26} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_{66} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 2A_{26} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + A_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - B_{16} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} - B_{22} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} = 0$$
 (4)

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - 3B_{16} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} - B_{22} \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} = q(x, y)$$
 (5)

좌굴의 경우 식(5)는 다음과 같이 되고

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}$$

$$\begin{aligned}
 & -3B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} \\
 & -B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} \\
 & -B_{22} \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} = q(x, y) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
 & + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (6)
 \end{aligned}$$

진동의 경우 식(5)는

$$\begin{aligned}
 & D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \\
 & + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \\
 & - 3B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} \\
 & - B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} \\
 & - B_{22} \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} = q(x, y, t) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\
 & + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (7)
 \end{aligned}$$

다음과 같은 경우가 성립한다면, 계산은 상당히 간단해진다.

가. 고전적 역학이나 탄성론이 사용될 수 있을 때

이 경우는 “normalize”된 신장강성(extensional stiffness)과 “normalize”된 휨 강성(bending stiffness)이 동일할 때 이루어진다. 즉,

$$A^* = B^* \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 A^* &= A/h \text{ in GPa} \\
 B^* &= 2B/h^2 \text{ in GPa} \\
 D^* &= 12D/h^3 \text{ in GPa} \quad (9)
 \end{aligned}$$

이고

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$$

$$\begin{aligned}
 B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h^2_k - h^2_{k-1}) \\
 D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h^3_k - h^3_{k-1}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

여기서 h 는 적층판의 두께이다.

나. B_{16}, B_{26}, D_{16} 및 D_{26} 가 0으로 접근할 때

이 관계는, 필자가 쓴 책¹⁾의 7장9절에 상세히 설명되어 있다. 특정한 방향성을 갖는 많은 적층들은 층의 수가 증가함에 따라 B_{16}, B_{26}, D_{16} 와 D_{26} 의 값이 감소한다. 이러한 적층판들은, 변위의 세 성분 u, v, w 를 종속변수로 갖는 세 개의 연립편미분 방정식 대신, 종속변수 한 개, w 를 갖는 특별직교 이방성판의 지배 방정식 한 개로 완전한 해석이 가능해진다.

다음은 그러한 적층판들의 일부이다.

$$\begin{aligned}
 [AB] r, A &= -B \\
 [ABBAAB] r, A &= -B \\
 [ABBCAAB] r, C &= 0^\circ \text{ or } 90^\circ; A = -B \quad (11)
 \end{aligned}$$

만일 유사등방성 상수가 사용된다면, 등방성 판에 대한 식이 사용될 수 있다. 적층판의 비등방성을 나타내는 어떤 계수의 사용은 이런 형태의 적층판의 정확한 값을 구해줄 수 있다. 건설을 위한 대부분의 구조물은, 치수가 커서, 횡방향 전단변형의 영향이 무시될 수 있을만 하게 길이에 대한 두께의 비가 적더라도, 여러층의 적층을 필요로 한다. 예비설계시에는 적층판내의 각각의 층의 배향을 알 수 없다. 이 사실은 대부분의 기술자들로 하여금 처음부터 곤란하게 만든다. 유사등방성 상수의 사용은 간편하고 정확한 해석을 위한 지침을 제공한다.

복합재료 구조물의 예비설계시, 비록 단면이나 배향각이 결정되지 않은 상태에서 Tasi가 제안한 유사등방성 상수를 사용하면 문제 해결이 더 간단해진다. 역대칭 형태의 적층판을 포함한 $B_{16} = B_{26} \rightarrow 0, D_{16} = D_{26} \rightarrow 0$ 로 되는 적층판들은 특별직교 이방성 적층판과 같은 방정식으로 취급 될 수 있다^{20),22),24),25)}. 모든 비등방성 재료는 변환된 좌표축의 불변량인

이러한 상수들을 갖고있는데 이 것은 각각의 복합 재료가 갖고있는 최소한의 강도를 나타낸다. 적층 판에 작용된 하중에 대하여, 선택된 층의 각도 배 향에 관계없는 최소값은 어떠한 강성요소보다 더 좋은 설계요소가 된다.

Quasi-isotropic 상수는 다음과 같다.

$$[Q]^{iso} = \begin{bmatrix} U_1 & U_4 & 0 \\ U_4 & U_1 & 0 \\ 0 & 0 & U_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{8}(3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}), \\ U_2 &= \frac{1}{2}(Q_{11} - Q_{22}), \\ U_3 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 4Q_{66}) \\ U_4 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} + 6Q_{12} - 4Q_{66}) = U_1 - 2U_5, \\ U_5 &= \frac{1}{8}(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} + 4Q_{66}) \end{aligned} \quad (13)$$

이다.

Quasi-isotropic 상수를 사용 할 경우

$$D_{11} = D_{22} = D_3 = \left(\frac{h^3}{12}\right) Q_{11}^{iso} = \frac{h^3}{12} U_1 \quad (14)$$

그러면, 유사등방성 상수를 계산한 다음 등방성 판이론을 사용하여, $w_{mn}^{(iso)}$, $\omega_n^{(iso)}$, $N_{scr}^{(iso)}$ 등이 구해질 수 있다. 여기서 w_{mn} 는 Fourier급수로 표시된 등방성 판의 m 의 n 번째 항이고, $\omega_n^{(iso)}$ 와 $N_{scr}^{(iso)}$ 은 각각 등방성 판의 고유진동수와 임계 좌굴하중의 값이다.

필자는 수정계수 FRC를 다음과 같이 정의했다.

$$FRC(1)^2 = \frac{[D_1 + 2D_3 + D_2 + 2D_3(r^2 - 1) + D_2(r^4 - 1)]}{(h^3/12)U_1[4 + 2(r^2 - 1) + (r^4 - 1)]} \quad (15)$$

$$FRC(2)^2 = \frac{[D_1^* + 2D_3^* + D_2^* + 2D_3^*(r^2 - 1) + D_2^*(r^4 - 1)]}{U_1[4 + 2(r^2 - 1) + (r^4 - 1)]} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} FRC(4)^2 &= \frac{[4(U_1 - U_2) + 2(U_1 - 3U_2)(r^2 - 1) + (U_1 - U_2 + U_3)(r^4 - 1)]}{U_1[4 + 2(r^2 - 1) + (r^4 - 1)]} \end{aligned} \quad (17)$$

그러면, 이러한 것들의 정확한 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} w_{mn} &= w_{mn}^{(iso)} / FRC^2, \\ (\omega_n)^2 &= (\omega_n^{iso})^2 \cdot FRC^2, \\ N_{scr} &= N_{scr}^{(iso)} \cdot FRC^2 \end{aligned} \quad (18)$$

10. FOLDED PLATE 이론

모든 곡면은 적절한 모양의 삼각형 판의 연속으로 고려될 수 있다. 그러므로, nonprismatic folded plates 이론은 모든 형태의 셸 구조에 적용될 수 있다^{34),58)-(61)}. 모든 삼차원 구조물은, sectorial판으로 구성된 "nonprismatic" folded plates로 상당히 정확하게 표시될 수 있다. 면내, 또는 면에 수직인 힘들의 영향을 받는, sectorial판 문제는 유한 차분법, 유한요소법, 또는 다른 방법들로 해석될 수 있다. 그러면 문제는 두 인접하는 sector의 경계문제로 종착된다. 각 sector는 경사될 수 있다.

접선의 적합 및 평형조건 형태는 어떤 종속변수가 선택되느냐에 달려있다. 예를 들어, 횡모멘트 (transverse), M_n 와 변위의 세 성분, $u v w$ 가 미지수로 택해지면, 경사의 적합조건과 세 개의 힘의 평형조건이 각 절선(fold line)에서 만족되어야 한다. "힘"의 표현이 변위로 표시되므로, 적합조건은 자동적으로 충족된다. 지배적인 미분방정식이 적분될 때 각 절선에서, 이 조건들이 충족되어야 한다.

위에 설명한 해석 방법이 있으므로 문제는 "prismatic"이던 "nonprismatic"이던 임의의 경계조건을 가진 판을 해석하는 문제로 축소된다.

11. 복합재료 구조의 파괴에 대한 치수효과

치수효과는 콘크리트나 암석과 같은 quasi-brittle 재료들의 물리적 특성에 영향을 미친다.

모든 재료의 경우에 체적이 크면 흠이 클 수 있다. 복합재료 구조의 파괴역학에 대한 치수 효과의

적당한 이론이 아직까지 없었다. 구조물의 섬유 묶음 크기가 증가하면, 섬유 강도가 감소하는 현상을 흔히 경험해 왔다. 복합재료내의 강도 분배와 치수 사이의 관계를 특성짓는 효과적인 방법은 아직 완전하지 않다. 대형 복합재료구조가 일반적으로 작은 복합재료구조보다 약하다는 사실은 상당기간 알려져 왔다.

이런 현상에 대한 여러 가지 이유가 있을 수 있다. 가장 중요한 이유는 brittle한 보강 섬유의 치수 효과이다. brittle한 섬유는 일반적으로 강하고 지름이 균일하지만 다른 강도를 가진 흡을 포함하고 있을 수 있다. 긴 섬유는 짧은 섬유보다 그러할 가능성이 더 많다.

강도비 R은 적용된 하중에 대한 극한강도 또는 최대강도의 비율이다. 강도비의 정의는 다음과 같다.

$$\{\sigma\}_{\max} = R\{\sigma\}_{\text{applied}}, \{\epsilon\}_{\max} = R\{\epsilon\}_{\text{applied}} \quad (19)$$

R은 안전계수 또는 하중계수이다. 파괴는 R=1 일때 일어난다. R < 1일 때 1/R의 계수에 의한 강도보다 작용 하중이 더 커진다. 이것은 물리적으로 불가능하지만 설계에 있어서 유용한 정보를 제공해 준다. 예를들어 (R-1)비율 만큼 작용하중을 감소시키면 된다.

Tasi⁽⁴²⁾에 따르면 상호작용하는 파괴영역을 구체화하는 쉬운 방법은 quadratic criterion을 사용하는 것이다. 이것은 Maxwell에 의해 제안되어진 비틀림 에너지, 또는 응력의 일반화이고, 그 후에 Huber에 의해 더욱 개발 되었다. 이러한 영역을 사용함에 따라 우리는 파괴모드의 정의에 의한 파괴영역에 의존하는 대신에 사용 가능한 데이터를 설계도구로서 사용한 파괴영역을 찾아낼수 있다. Tasi와 Wu는 응력공간의 영역을 quadratic scalar products로서 다음과 같이 나타냈다.

$$F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_i \sigma_i = 1, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (20)$$

F_{ij} 와 F_i 는 2차와 4차 lamina strength tensor 들이다. 대칭축 x-y에 관하여 평면응력 상태에 있는 얇은 orthotropic ply에 대해서 이 파괴영역은 다음과 같이 된다.

$$F_{xx} \sigma_x^2 + F_{yy} \sigma_y^2 + 2F_{xy} \sigma_x \sigma_y + F_{ss} \sigma_s^2 + F_x \sigma_x + F_y \sigma_y + F_s \sigma_s = 1 \quad (21)$$

여기서 F는 강도 변수들이고 다음으로부터 얻어진다.

$$F_{xx} = \frac{1}{XX'}, \quad F_{yy} = \frac{1}{YY'}, \quad F_{ss} = \frac{1}{S^2}, \\ F_x = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'}, \quad F_y = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'}, \quad F_s = 0 \quad (22)$$

여기서

- X : 종방향 인장강도
- X' : 종방향 압축강도
- Y : 횡방향 인장강도
- Y' : 횡방향 압축강도
- S : 종방향 전단강도

이러한 강도들은 실험에 의해서 얻어진다.

4차 텐서인 F_{xy} 는 재료 주방향에 대한 단축시험으로부터는 결정될 수 없고 2축시험으로 결정될 수 있다. F_{xy} 가 위식에서 σ_x 와 σ_y 의 계수임을 상기하자. F_{xy} 의 값은 다양한 공학적 강도와 2축 인장 파괴응력들에 의존한다. Tasi는 다음의 공식을 제안했다.

$$F_{xy} = F_{xy}^* (F_{xx} F_{yy})^{1/2} \quad (23)$$

여기서 F_{xy}^* 는 기준화된 상호작용 항이며, 만일 믿을 수 있는 2축시험 데이터를 이용할 수 없다면 그것은 아래와 같은 실험 상수 값으로 취급될 수 있다.

$$-1/2 \leq F_{xy}^* \leq 0 \quad (24)$$

이 수치는 일반화 된 von Mises의 기준인 -1/2과 수정된 Hill의 기준과 거의 동일한 결과를주는 0의 범위 내의 값을 준다.

경험이 많은 복합재료 제조기술자에 의해서 경험으로 얻어진 filament wound 튜브에 사용되는 유리섬유의 인장강도 감소비율이 그림 3에 나타나

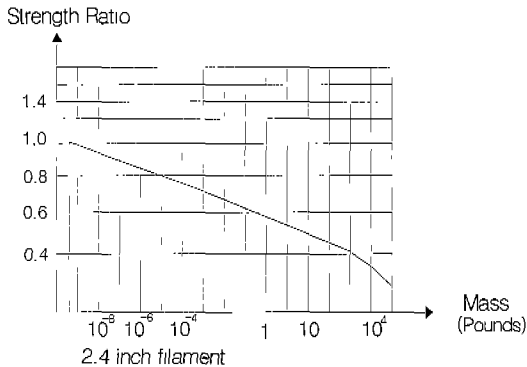


그림 3 질량 증가에 따른 유리섬유 인장강도 감소율

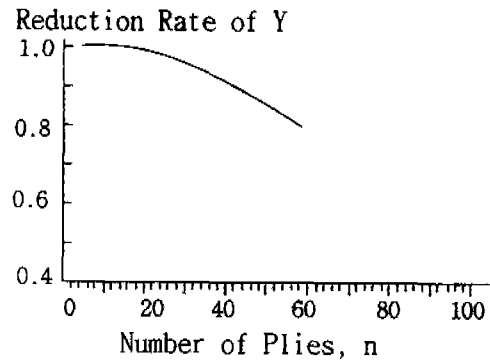


그림 4 질량증가에 따른 에폭시 모재의 인장강도 감소율

있다. Crasto와 Kim⁽⁸²⁾의, 일방향 보강된 AS4/3501-6 복합재료의 90° 방향 인장강도에 대한 실험결과는 그림 4와 같다.

현재의 이용가능한 지식으로 에폭시 모재에 유리섬유로 보강된 복합재료에 대해서 다음과 같은 강도-파괴해석 과정을 추천한다.

- 1) 그림 3에서 감소된 X값을 얻는다.
- 2) 크기효과는 인장과 압축이 같다고 가정한다.
(이 가정은 상세한 연구가 이루어진 다음에 수정되어질 것이다.)
- 3) 그림 4에서 감소된 Y값을 얻는다.
- 4) $Y' = Y$ 라고 가정한다.
- 5) $S = S$ (시험편 강도) 으로 가정한다.
- 6) 응력공간에 대한 Tsai-Wu 파괴영역을 사용한다.

탄성계수의 감소비를 모르기 때문에 변형을 공간의 영역 사용은 복잡하다.

위와 같은 단계로 얻은 강도는 다른 재료나 제작방법으로 만들어진 “증가된”크기의 복합재료에 정확하지 않을 수 있다. 그러나 그 결과가 아주 나쁘지는 않을 것이다. 무엇인가 있는 것이 없는 것 보다는 훨씬 안전하다. 감소된 인장강도 값으로 강도이론을 적용하는 것이 시험편 결과값에 의한 구조물 설계보다는 훨씬 안전하다. 추천된 가정으로 안전한 구조물을 설계할 수 있을 것이고, 더 나아가서는 다양한 재료성분으로 서로 다른 크기 효과를 갖는 복합재료 구조물의 파괴-강도 이론의 연구에 박차를 가할 수 있을 것이다. 재료가 유리섬

유나 에폭시가 아닐 경우에도 그림 3과 4만을 수정하여 사용하면 된다. 크기효과에 대한 정확한 지식이 없을 때 그림 3과 4만을 사용할 수 있다.

필자는, 이전에 발표된 논문들에서, 치수효과를 고려한 복합재료 강도-파괴 해석 과정을 제안하고, 강도비(즉 안전계수)는 다음의 다섯 가지 요인에 의해 좌우된다고 결론지었다.

이 다섯 요인은 시편 강도의 감소에 관한 두 경우인

- A) 감소를 인장과 압력 두 강도에 대해서 고려할 때와
- B) 감소를 인장 강도에 대해서만 고려할 경우,

두 개의 F_{xy}^* 에 대한 가정치, C) $F_{xy}^* = 0$ 과 D) $F_{xy}^* = -1/2$, 그리고 E) 작용 응력 상태 등이다.

제안된 size/scale 효과의 연구-개발 방향은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- A. 대형구조물에 사용 가능한 재료의 각각에 대하여 질량에 기초한 섬유강도의 감쇠율을 구한다.
- B. matrix에 대해서 A와 같이 한다.
- C. 설계에 사용될 여러 가지 적층판의 각 형태에 대해서, 작용 응력의 가능한 모든 조합하에 실험을 수행한다.
- D. 위의 A, B, C의 결과로 각각의 응력조합에 대해 $F_{xy}^* = 0$ 과 $F_{xy}^* = -1/2$ 중 어느 가정치가 실험결과와 가까운가를 찾아낸다.

- E. A, B, C, 의 결과로 각각의 응력상태에서, 횡방향 강도의 감소가 중요한지 아닌지를 알아낸다.
- F. 각 응력상태하에서 감소가 인장과 압축강도에 대해 적용되어야 하는지 아니면 인장강도에만 적용되어야 하는지를 알아낸다.

12. 진동해석

부식되는 공로교상의 콘크리트 슬래브나 건물의 문제는 전세계에서 심각한 문제로 되어있다. 보수공사에 대한 결심을 하려면 민을만한 비파괴 평가가 필요하다. 또 공사완료 후 설계대로 시공되었는지도 평가 해야하는데 이것은 거의 불가능하다.

민을만한 방법의 하나가 현장에서 슬래브의 고유진동수를 구하는 것이다. 현장에서의 측정값과 설계단계 또는 도면에서 구한 값을 비교하면, 파손의 정도를 비교적 정확하게 측정할수 있다. 그러나 판이 경계에서 단순지지되고 균등균질 단면을 갖고 등분포 하중을 받고 있지 않으면 민을 만한 답을 구하는 것은 아주 어렵다.

자유도가 하나인 체계의 진동해석의 가장 인기 있는 해석 방법인 Rayleigh 방법은 에너지 보존의 원칙이다 : 자유진동체계의 에너지는 이것을 흡수하려는 감쇄힘이 작용하지 않으면 상수로 남아 있어야 한다.

자유도가 무한개인 보의 경우, 이 보를 단일 자유도 체계로 축소하기 위하여 형태함수를 가정해야 한다. 진동의 주파수는 운동중 발생한 최대 변형률에너지가 최대 운동에너지와 같게 노아서 구해질 수 있다. 그러나 이 방법은, 특별한 경우를 제외하고는 실제 값보다 큰 값을 제공해준다. 복잡한 보의 경우, 정확한 형태함수를 가정하는 것은 불가능하다. 이런 경우 얻어진 값은 실제 값보다 크다. Rayleigh비율(quotient) $\geq 1^{11)}$ 인 것을 상기하자.

건물이나 공장의 바닥, 교량등에는 자중에 추가해서 집중하중을 받는다.

설계기술자는 이러한 구조요소의 고유진동수를 구해야 하는데 이런 문제를 정확히 해결하는 것은 거의 불가능하다. Pretlove⁶⁴⁾는, 유효질량의 개념을

사용하여 부착된 질량이 있는 보의 해석방법을 발표했다. 그러나, 이방법은 특정한 간단한 형태의 보와 하중의 경우에만, 그나마, 근사치를 구할수 있게한다.

불규칙한 단면을 갖고, 부착된 질량들이 있는 보나 탑 구조물의 좌굴하중과 진동의 고유주파수를 구하는 간단하면서 정확한 방법이 남산의 “서울타워”를 설계하던 필자에 의해서 개발되고 고유진동수를 계산하는 방법은, 그 후, 1974년에 발표되었다⁶⁵⁾. 그 후에 이 방법은 복합재료 적용을 포함하는 2차원의 문제로 확장 적용되고, 횡 방향 전단 변형률의 영향이 있는 경우와 없는 경우를 포함한 여러 가지 하중조건, 경계조건, 변단면 경우 등의 복합재료 판 해석에 응용되고 미국 토목학회의 8차 구조물 Congress¹¹⁾ 4차 재료Congress³¹⁾등을 포함하는 국내외 회의에서 발표되어왔다.

이 해석 방법은 참고문헌^{10)~12)} 및 여러 출판물에서 자세히 설명되었으므로 여기서는 반복하지 않는다.

13. 결 론

역사는 변하는 것이 필연이다. 지금까지의 구조물 4대 기본개념은 그 당시 사용 가능한 재료와 응용 가능한 이론에 의해 개발되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 필자가 인류 문화상의 제5 구조물 기본개념 이라고 부르는 복합재료가 모든 구조물의 설계 건설에 사용되게 되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다.

항공기나 자동차 부속과는 달리, 건물이나 교량의 원형(prototype) 실험은 불가능하다. 그러함에도 불구하고, 복합재료로 이루어지는 거의 모든 건물이나 사회간접시설구조물들은 적절한 설계없이 시공된다. 이러한 구조물들의 설계해석은 대부분의 기술자들에게는 너무나 어렵고, 어떠한 내용의 해석들이 필요한지도 잘 알 밝혀져 있는 상태이다.

이 글에는 이러한 설계에 필요한 내용들이 간략하게 설명되고, 기술자들이 안전하고 튼튼한 구조물을 설계하는데 도움이 되겠끔 자세한 참고문헌들이 주어져 있다.

참 고 문 헌

1. Kim, D. H., Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995
2. 김덕현, "토목공학의 정의와 분야", 대한토목학회지 제 21권 제2호, 1973, pp.38-45
3. 김덕현, "문화사적으로 고찰한 공학과 미래지향적인 공학 교육", 강원대학교 산업기술연구소 논문집 제7집, 춘천, 1987
4. 김덕현, "토목구조물을 위한 신소재의 응용", 대한토목학회 제36회 정기총회 특별강연, 서울, 1988. 4. 30
5. 김덕현, "도로구조물에 대한 첨단 신소재의 응용", 한국도로공사 초청강의, 서울, 1989. 6
6. 김덕현, "Design of Composite Material Structures", 한국전산구조공학회, 1991년도 가을 학술 발표회 특별강연, 서울, 1991. 10, pp.5-13
7. Chong, K. P., Editor, Materials for the New Millennium, Proc. of the Fourth Materials Engineering Conference, ASCE, Washington D. C., November 10~14, 1996
8. Kim, D. H., "Composite Materials for Repair and Rehabilitation of Buildings and Infrastructures", Plenary Lecture at The Third International Symposium on TEXTILE Composites In Building Construction, Seoul, Korea, November 7-9, 1996
9. Kim, D. H., "Geometric Nonlinear Analysis of Underground Laminated Composite Pipes," 7th International Conference on Composite Materials, Guangzou, 1989. 8
10. Kim, D. H., "A Simplified Method of Vibration Analysis of Irregularly Shaped Composite Structural Elements," First International Society for the Advancement of Material and Process Engineering Symposium(JISSE 1), Tokyo, 1989. 12
11. Kim, D. H., "Vibration Analysis of Irregularly Shaped Composite Structural Members," 1990 Structures Congress, American Society of Civil Engineers, Baltimore, MD., U.S.A., 1990. 5
12. Kim, D. H., "Vibration Analysis of Irregularly Shaped Laminated Thick Composite Plates," ICCM 8, Honolulu, Hawaii, July 1991
13. Kim, D. H., "Composite Structures in Civil and Architectural Engineering", Invited Lecture, EITM/BCS/NSF Research Grantee Workshop, Phoenix, AZ., August 5-6, 1991
14. Kim, D. H., "Composite Materials for Civil Structures," US-Korea-Japan Trilateral Seminar on Frontier R & D for Constructed, Facilities, Honolulu, 1991. 10
15. Kim, D. H., "Design of Composite Matrcial Structures," "Invited Speach, China-Japan-USA Trilateral Symposium/Workshop on Earthquake Engineering," Harbin, China, 1991. 11
16. Kim, D. H., "Design of Composite Material Structures for Civil Construction," Seminar Lecture, University of California, Davis, 1992. 2. 24
17. Kim, D. H., "A Simple Method of Obtaining 'Exact' Values of the Natural Frequencies of Vibration for Some Composite Laminated Structures for Civil Construction," Proc. of the Second International Symposium on Textile Composites in Building Construction, Lyon, France, 1992. 6. 23-25
18. Kim, D. H., "The Influence of Anisotropy on Buckling Strength of Laminated Composite Structures for Civil Construction," Proc. of International Conference on Education Practice and Promotion of Computational Method in Engineering Using Small Computers, Dalian, China, 1992. 7. 30-8. 2
19. Kim, D. H., "A Simple Method of Obtaining 'EXACT' Values of the Buckling Strength for Some Laminated Structures for Civil Construction," Proc. of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Sherbrook, Canada, 1992. 10. 7-9
20. Kim, D. H., "Simple Method of Analysis for Preliminary Design of the Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction,"

- International Conference on Computational Engineering Science, Hong Kong, 1992. 12. 17-22
21. 김덕현, "21세기의 건설재료 및 구조개념", 종합기술공사 특별강연, 1993. 2
 22. Kim, D. H., "A Simple Method of Obtaining 'EXACT' Values of the Natural Frequencies for Some Composite Laminated Structures for Civil Construction," Advanced Composites 93, Australia, 1993. 2
 23. Kim, D. H., "Composites in Construction-Considerations for Design," Summary Speech, The First Wilson Forum on Existing and Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, San Francisco, 1993. 5
 24. Kim, D. H., "Simple Method of Analysis for Preliminary Design of Certain Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction-II," Proc. of Advances in Materials and Processing Technology-93(AMPT-93), Dublin, Ireland, 1993. 8. 24-27
 25. Kim, D. H., "Simple Method of Analysis for Preliminary Design of the Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction," 3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, December 1993. 12
 26. 김덕현, "21世紀를 指向한 美 經濟 再建의 戰略," 汎武 71號, 1993. 4
 27. 김덕현, "21세기의 건설재료 및 구조개념," 대한 토목학회지, 제41권, 제5호, 1993. 10
 28. Kim, D. H., "Cement Problems - Applications of Composite Materials for the Infrastructure," The Second Annual Wilson Forum : Existing & Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, Santa Ana, California, 1994. 4. 18-19
 29. 김덕현, "Composite 프로젝트에 대한 사업성," 생산기술, 제6권, 제6호, 1995. 6
 30. Kim, D. H., "Proposed R/D Direction of Advanced Composite Materials Application for Civil Construction," The Third Asian Pacific Conference on Computational Mechanics, Sheraton Hotel, Seoul, Korea, September 16-18, 1996
 31. Kim, D. H., "Vibration Analysis of Special Orthotropic Plate with Variable Cross-Section, and with a Pair of Opposite Edges Simple Supported and the Other Pair of Opposite Edges Free," American Society of Civil Engineers, Washington, DC, November 10-14, 1996
 32. Preprints, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria VA, October 28~29, 1996
 33. 김덕현, "Theory of Non-Prismatic Folded Plate Structures," 서울대학교 應用力學研究會, 1966. 5. 13
 34. Kim, D. H., "Analysis of Triangularly Folded Plate Roofs of Umbrella Type," 16th Congress of Applied Mechanics, Tokyo, Japan, 1966. 10. 19
 35. Kim, D. H., "The Effect of Neglecting the Radial Moment Terms in Analyzing a Finite Sectorial Plate by Means of Finite Differences," International Symposium on Space Technology and Sciences, Tokyo, Japan, 1967. 5
 36. Kim, D. H., "A Simple Method of 'Exact' Analysis of Some Composite Laminated Structures for Civil Construction," Seminar Lecture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992. 3. 3
 37. Kim, D. H., "Influence of Angle Orientation and Plate Aspect Ratio on the Critical Buckling Load of [ABBCAAB]_r Type Laminates," 3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, 1993. 12
 38. Kim, D. H., "A simple method of analysis for the preliminary design of particular composite laminated primary structures for civil construction," Journal of Materials Processing Technology Vol. 55, Elsevier, London, 1995, pp.242~248
 39. Kim, D. H., "Optimization of Composite Material

- Structures - The State of the Art," Proc. of Korea-Japan Joint Seminar on Structural Optimization, Seoul, Korea, 18-20, 1992. 5
40. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization of Composite Structures," Proc. of Advances in Materials and Processing Technology-93(AMPT-93), Dublin, Ireland, 1993. 8. 24-27
 41. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization," Keynote Speech, 3rd Pacific Rim Forum on Advanced Composites, Honolulu, 1993. 11. 2-4
 42. Tsai, S.W., Composite Design, Think Composites, Dayton, OH., 1988
 43. Chong, K. P. and Kim, D. H., "Size/Scale Effect in the Failure of Brittle Materials and Composite Structure," Invited Lecture, International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures, Torino, Italy, 1994. 10
 44. 김덕현, "Size-Scale Effects in the Failure of Composite Structures," 한국 복합재료 학회, 1994. 11. 25
 45. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization in Design And Scale/Size Effects In the Failure of Composite Structures," Proc. of International Symposium on Public Infrastructure Systems Research, Seoul Korea, 1995. 9. 25-27
 46. Kim, D. H., "Importance of Concept Optimization in Design and Size/Scale Effects in The Failure of Composite Structures," EUROMECH 334, Lyon, 1995. 5. 15-17
 47. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization in Design and Scale/Size Effects in the Failure of Composite Structures," Invited Speaker, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria, Virginia, October 28-29, 1996
 48. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization in Design and Scale/Size Effects in the Failure of Composite Structures," The Third International Symposium on TEXTILE Composites In Building Construction, Seoul, Korea, November 7-9, 1996
 49. "토목건축공학을 위한 섬유복합재료", 특집, 섬유기술과 산업, 제1권, 제1호, 한국섬유공학회, 1997. 3
 50. "건물과 사회간접시설의 보수와 재건을 위한 복합재료", 대한토목학회지, 제45권, 제4호, 1997. 4
 51. "건설분야에서의 복합재료 응용", 테마기획, 기계저널, Vol. 39, No. 2, 대한기계학회, 1999. 2
 52. "21세기의 복합재료의 신전개방향", 특집, 고분자 과학과 기술, Vol. 10, No. 1, 한국고분자학회, 1999. 2
 53. "건설산업에서의 복합재료의 응용", 한국복합재료학회 1998년도 정기총회 특별강연, 1998. 11. 13
 54. "새로운 1000년의 건설재료", 강원대학교 초청강연, 1997. 6. 20
 55. "새로운 1000년의 건설재료", 서울 산업대학교 초청강연, 1997. 12. 11
 56. "새로운 1000년의 건설재료", 전남대학교 초청강연, 2000. 5. 19
 57. Duk-Hyun Kim, "Proposed R/D Direction of Advanced Composite Materials Application for Civil Construction," Proc. of Summer Workshop, Korea Society for Composite Materials, 1999, pp.49~60
 58. Duk-Hyun Kim, "Theory of Nonprismatic Folded Plate Structures," Analysis of Triangularly Folded Plate Roofs of Umbrella Type, Thesis Submitted as a Partial Fulfillment for the Degree of Doctor of Philosophy, Purdue University, 1965, pp.114~132
 59. Duk-Hyun Kim, "Theory of Non-prismatic Folded Plate Structures," Trans.Korea Military Academy(ed.Lee,S.H.), 5, 1967, pp.182~268
 60. Duk-Hyun Kim, et al, "Analysis of Three Dimensional Structures by Folded Plate Theory,"

- Proc. Spring Conference, The Korca Society for Composite Materials, 1999, pp.152~167
61. Duk-Hyun Kim, et al, "Analysis of Folded Plate Structures Composed of [45/-45/-45/90/45/45/-45] Type Laminated Composite Plates," Proc. Spring Conference, The Korea Society for Composite Materials, 2000, pp.93~96
 62. A.S. Crasto and R.Y. Kim, "The Influence of Specimen Volume on Matrix Dominated Composite Strength," Proc. 38th SAMPE Symposium, 1993
 63. Duk-Hyun Kim, et al, "The Importance of Size/Scale Effect in the Failure of Composite Structure," Proc. 4th Japan International SAMPE Symposium, 1995, pp.837~843
 64. A. J. Pretlove, "A Simple and Accurate Method for Calculating the Fundamental Natural Frequencies of Beams with Attached Masses," International J. of Mechanical Engineering Education, Vol. 15, No. 4, Ellis Horwood LTD., England, 1987, pp.257~266
 65. Duk-Hyun Kim, "A Method of Vibration Analysis of Irregularly Shaped Structural Members," Proceedings, International Symposium on Engineering Problems in Creating Coastal Industrial Sites, Seoul, Korea, October, 1974
 66. Duk-Hyun Kim, "The Effect of Neglecting Own Weight on the Natural Frequency of Vibration of Laminated Composite Plates with Attached Mass/Masses," Proc.EASFC-V, Australia, 1995
 67. Duk-Hyun Kim, "Matrix Analysis of Multiple Shells," Proc. Korea Society of Civil Engineers, 13(4), 1966
 68. Duk-Hyun Kim and Bong-Koo Han, "Composites in Construction-Construction with Designed Structures," Proc., The 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials, Seoul, Korea, October, 2000 