

Carbon/Epoxy 복합재료 적층판의 반복하중에 따른 강도계수의 변화에 대한 연구

김두환[†] · 김영필

서울산업대학교 공과대학 건설공학부
(2008. 11. 18. 접수 / 2009. 5. 27. 채택)

The Influence of Repeated Loading Cycles on Strength Ratio of Carbon/Epoxy Composite Laminates

Kim, Doo-Hwan[†] · Kim, Young-Feel

School of Civil-Engineering, Seoul National University of Technology
(Received November 18, 2008 / Accepted May 27, 2009)

Abstract : Currently the technique of composite material field is developed day by day. The many kinds industrial facility and life articles are coming to make with the composite material. But still the engineering works field the building and the bridge uses the material which is old era and is making. To here there is a various problem but the biggest problem the theory of the composite material is complicated too and means that the application is been delayed about constructive structure. When the composite material is used widely from constructive field, too with difficult theory in technical expert and easily with the research for the experiment data accumulation is necessary. The tensile and fatigue test of the carbon/epoxy which is a high-class composite material led from the present paper consequently and the change of the intensity coefficient which follows in repeated load researched.

Key Words : composite material, laminate, s-n curve, fracture stress, intensity factor

1. 서론

토목건설분야에 있어서 복합재료의 사용은 근래에 크게 요청 되고있고 특히 수지를 매트릭스로 하는 섬유강화 복합재는 내구성 및 내식성이 우수한 점에 착안되어 사용성이 주목되고 있는 실정이다.

섬유강화 복합재료는 구조재로써 뿐만 아니라, 사회 간접시설의 보수 및 유지를 위해서 필요하나 이는 구조물의 유지관리 문제뿐만 아니라, 건설 및 보수기간이 결정적으로 중요하기 때문이다.

일반적으로 토목 건설의 규모는 방대한 것이어서 경제성이 주요 고려사항이 된다. 복합재료를 주 구조재로 사용할 경우의 가격 문제는 단기적으로도 불리하지만 장기적인 관점에서의 장점은 훨씬 크다. 뿐만 아니라 공기 단축 및 각종 환경 문제의 부각을 피할 수 있는 장점도 가지고 있다. 이러한 장점에도 불구하고, 아직까지 복합재료 활용은 재료 개

발 및 이론 적용의 어려움 등의 문제들로 인해서 실제로는 많이 사용되지 못하고 있는 실정이고 특히 사용하중과 환경에 대한 특성이 규명되었을 때만 잘 활용할 수 있고 이러한 특성들이 잘 알려져 있지 않은 경우 실제 구조물을 설계 할 때에 높은 안전율을 주게 되며, 결과적으로 복합재료의 이용도를 낮추게 된다.

따라서, 본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재료를 이용하여 인장거동을 분석하고 S-N Curve 및 반복하중에 따른 강도계수를 고찰함으로써 탄소섬유강화 복합재료에 대한 실험적 자료를 축적하고, 축적된 자료를 건설기술에 응용하는데 목적이 있다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 인장 및 피로시험편 제작

시험편의 재료는 CU-125NS Carbon/Epoxy 프리프레그를 이용하였으며, 0° 방향으로 8층을 적층하여 패널 오토클레이브로 성형하였다. 성형공정을 거쳐 나온 판을 다이아몬드 톱으로 절단하여 시험

[†] To whom correspondence should be addressed.
kdh6504@snut.ac.kr

Table 1. Standard property of Carbon/Epoxy

Number of Filament	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Elongation (%)	Mass per Unit Length tex (g/1000m)	Destiny (g/cm ³)
12000	4900	230	2.1	800	1.8

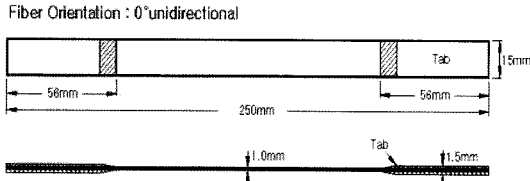


Fig. 1. Shape and Measurement of Tensile and Fatigue model.

하고자 하는 시편치수로 만들었다. 절단이 끝난 시편에 시험중 Grip이 물리는 양단에서의 응력집중을 방지하기 위하여 Tab을 부착하였다. Tab의 재료는 이미 제작되어 있는 Glass/Epoxy 복합재료를 사용하였고, 부착에는 항공용 접착제가 사용되었다.

Tab의 부착이 완료된 후에 별도로 피로시험편에 대해서 자유단 중간분리 등을 최소화하기위해 양 자유단을 #1000사포로 연마하였다.

시험편의 개수는 ASTM-D3039 및 D3479에서 추천하는 바와 같이 인장시험편은 5개 이상, 피로시험편은 12개 이상을 제작하여 실험을 진행하였다.

Table 1에서는 본 연구에 사용된 Carbon/Epoxy의 한가닥에 대한 기본물성치를 나타내었고, Fig. 1은 ASTM에서 추천하는 일방향 인장 및 피로시험편의 형상 및 치수를 나타내었다.

2.2. 인장실험

인장실험은 ASTM-D3039에서 추천하는 방법으로 진행되었으며, 시험편의 파괴시 까지의 변형률을 측정하기 위해 시험편의 정 중앙에 변형률 게이지를 부착하였다.

실험 data의 정확성을 확보하기 위하여 버니어 캘리퍼스를 이용하여 최소단위 0.05mm까지 측정하였으며, 폭 및 두께를 5군데 이상 측정하여 평균값을 내어 응력계산에 이용하였다.

시험편을 무는 Grip의 압력, 시험편이 물리는 면적 등은 수회의 예비실험에 의해 결정되었으며, 모든 시험편에 동일하게 적용되었다. 시험편이 정착된 후에 25ton 용량 UTM 시험기를 이용하여, 인장하중을 재하 하였다.

하중 재하방식은 변위제어이며, 재하 속도는 분당 2mm로 가하였고, 동시에 변형률 측정기를 이용하여 1Hz의 속도로 인장변형률을 측정하였다.

2.3. 피로실험

피로실험은 ASTM-D3479에서 추천하는 방법으로 진행되었으며, 사용한 시험기는 인장실험과 동일하다.

피로실험에서의 적용응력은 인장실험결과에 따르며, 주파수는 시험편의 온도상승을 무시할 수 있는 8Hz로 실시하였다.

하중재하방식은 Sine wave를 이용한 방식으로 하였다. 또한, 시험편에 압축이 걸리지 않도록 응력비 0.1의 인장-인장 피로실험을 상온에서 실시하였다.

피로실험에 적용된 응력수위는 0.9~0.65범위이며, 본 연구에서는 재료의 피로한도를 200만회로 보았다. 또한 신뢰할 수 있는 데이터의 축적을 위해 300만회 이상의 반복하중을 시험편에 가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 인장실험 결과 및 고찰

인장실험으로부터 극한강도, 탄성계수등의 기계적 성질을 측정하여 Table 2에 나타내었다.

단일방향의 Carbon/Epoxy 복합재료 시험편의 인장실험결과 Fig. 2의 응력-변형률 선도와 같이 선형적으로 변화하는 특성을 보였으며, 하중-신장량 관계는 최대 4mm 이상의 신장량을 가지는 것으로 나타났다.

건설 재료에 주로 사용되고 있는 강이나 철근콘크리트에서의 철근의 극한강도가 400~600MPa (RC강봉 SD30및 구조용 SS400강재)인 것에 비해 Carbon/Epoxy 복합재료의 인장실험결과 극한강도는 2417MPa로 우수한 인장특성을 보이는 것으로 분석되었으며, 동일한 프리프레그를 이용하여 일방향 32층 적층하여 3점 휨실험을 한 결과를 보면 시험편의 휨응력이 1233MPa로 나타났다. 따라서

Table 2. Carbon/Epoxy composite tensile test

Specimen No.	Ultimate Strength (MPa)	Max Strain (10E-6)	Tensile Modulus (GPa)	Max Load (kN)	Max Elongation (mm)
1	2667	18026	139	34.57	3.58
2	2224	14861	140	29.36	3.52
3	2417	14907	149	31.85	3.82
4	2417	15078	151	31.37	4.05
5	2358	14656	152	29.00	3.60

Mean Strength : 2417
Standard Deviation : 143.7
Coefficient of Variation : 0.06

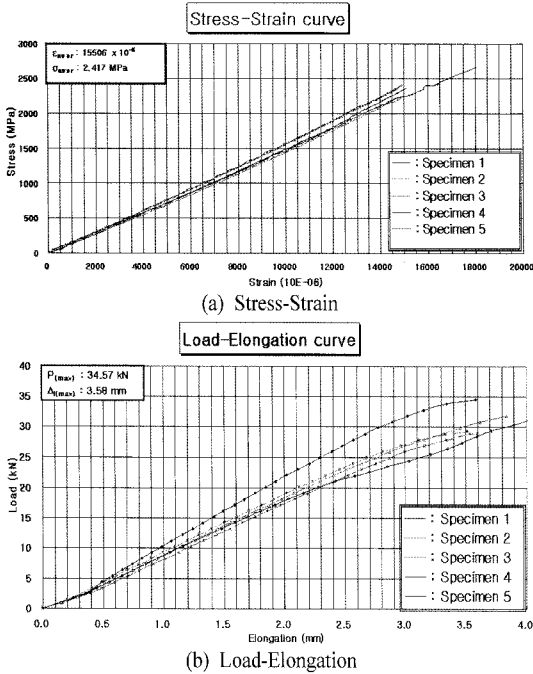


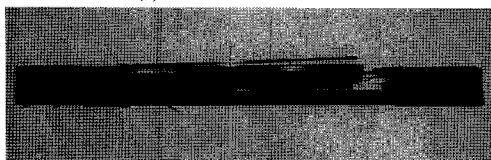
Fig. 2. Stress-Strain and Load-Elongation curve of tensile model.

본 연구에서 사용된 재료에 구조물의 최적화 개념을 적용한다면 우수한 구조용재료로써 이용가능하다고 판단된다.

그러나 Table 1에서 나타난 기본 물성치를 보면, 인장강도와 탄성계수가 인장실험 결과와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 재료의 크기가 작을수록 더 큰 강도를 발현하는 치수효과와 복합재료의 경화공정에서 발생하는 잔류응력의 원인으로 구조물의 기계적물성에 영향을 미치는 것 등을 의미한다.^{1,2)} 그러므로 복합재료 제작시 잔류응력의 억제에 대한 연구가 이루어져야하며, 또한 복합재료



(a) 중간바리에 의한 파괴



(b) 중간바리 및 응력집중에서의 복합적 파괴

Fig. 3. Carbon/Epoxy composite destruction shape.

의 치수효과에 대한 실험 등 여러 가지 문제점들을 규명하는 실험적 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

또한, Fig. 3에 나타난 시험편의 파단은 전체시험편 중 대표적인 것으로 계면에서의 층간바리에 의한 파괴와 시험편이 물리는 부위에 응력집중 현상이 발생하여 시험편의 양 끝단에서 파단이 일어나는 것을 알 수 있었다.

3.2. 피로실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 16개의 시험편의 실험 결과를 이용하여 Table 3에 피로 실험 결과를 나타내었다. 세로축은 적용응력(S), 가로축은 수명(N)인 일반적인 방법으로 최대적용응력을 기준으로 한 S-N Curve를 Fig. 4에, 응력범위를 기준으로 한 S-N Curve를

Table 3. Carbon/Epoxy composite fatigue test

Specimen No.	Stress Level	Maximum Stress (MPa)	Amplitude Stress (MPa)	Fatigue Life (Cycles)
1	0.900	2175	1958	62
2	0.875	2115	1903	151
3	0.850	2054	1849	107
4	0.850	2054	1849	571
5	0.825	1993	1794	17,060
6	0.800	1933	1740	3,608
7	0.800	1933	1740	73,076
8	0.775	1872	1686	154,082
9	0.750	1812	1631	930,810
10	0.750	1812	1631	1,487,309
11	0.725	1752	1577	689,551
12	0.725	1752	1577	1,071,835
13	0.700	1692	1523	1,594,212
14	0.700	1692	1523	2,221,137
15	0.700	1692	1523	3,000,000
16	0.650	1571	1414	3,500,000

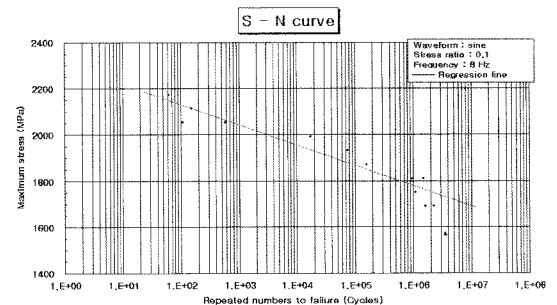


Fig. 4. Carbon/Epoxy composite fatigue test(S-N Curve) maximum stress.

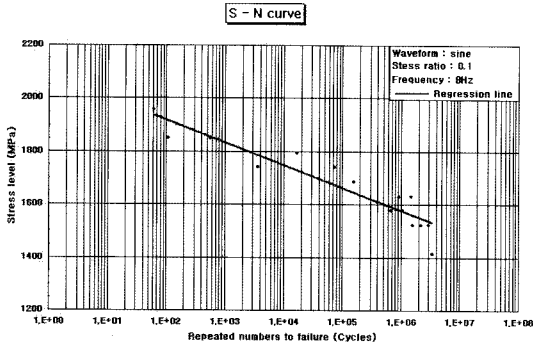


Fig. 5. Carbon/Epoxy composite fatigue test(S-N Curve) stress range.

Fig. 5에 나타내었고, Fig. 6~7은 피로시험에서 파괴까지의 수명을 측정하여 하중-신장량과 반복하중에 따른 신장량의 변화양상의 전체시험편 중 대표적인 것만을 나타내었다.

Maximum Stress는 시험체의 최대응력을 나타낸 것이며, Amplitude Stress는 진폭응력을 나타낸 것이다.

피로시험결과 응력수위 0.85 이하에서 피로수명이 증가하기 시작하였으며, 0.775 이하에서는 피로수명이 급격하게 증가하는 양상을 보였다. 전체 16

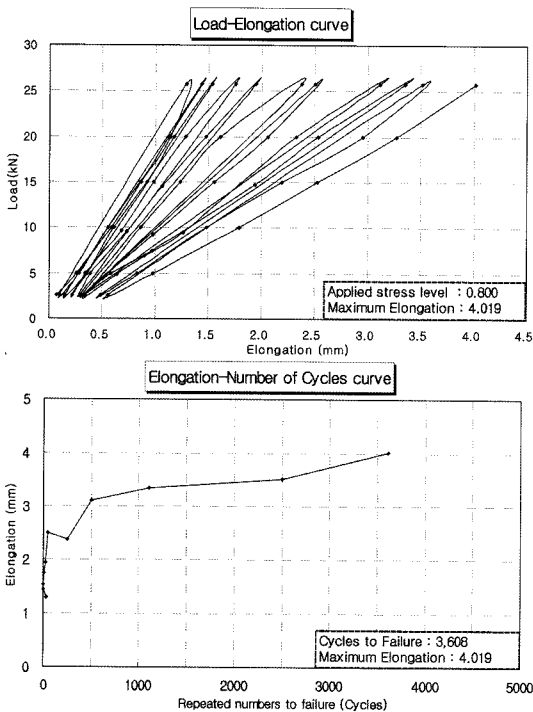


Fig. 6. Load-Elongation and Elongation-Number of Cycles Curve of fatigue model.

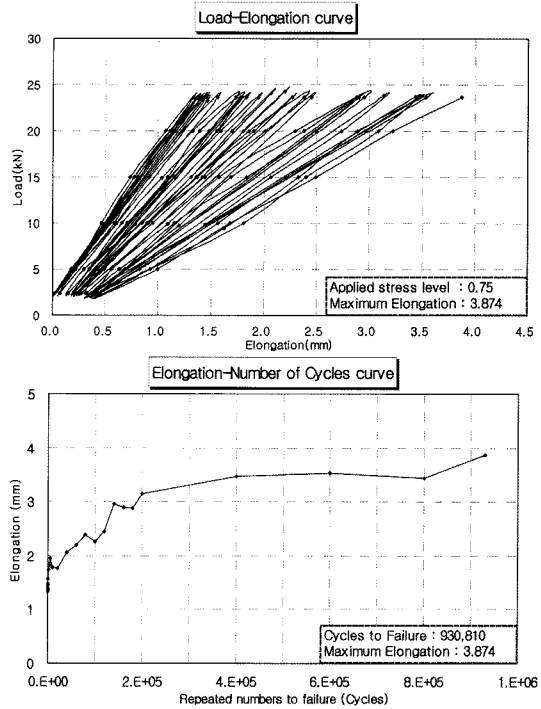


Fig. 7. Load-Elongation and Elongation-Number of Cycles Curve of fatigue model.

개의 시험편중 14개의 시험편은 파괴까지의 수명을 측정할 수 있었으며, 0.7과 0.65에서 300만회 이상의 수명을 가진 것으로 평가되었다. 또한, 응력수위 0.7에서 160~300만까지의 수명을 가진 것으로 볼 때, 건설분야에서의 무한 수명인 200만회를 만족하는 것으로 나타났다.

건설재료에 주로 사용되는 강이나 철근콘크리트의 Fatigue Limit가 0.5 이하에서 나타나는 것과 비교해 본다면, 본 실험에서 사용되어진 복합재료의 Fatigue Limit가 상당히 높은 범위에서 형성된다는 것을 알 수 있었다^{3,4)}.

피로시험편의 파괴형상은 높은 응력 수위에서는 인장시험편의 국부적인 파단형상이 나타났으나, 점차로 응력수위가 낮아질수록 대부분의 시험편에서 매트릭스 상의 균열, 계면의 박리, 분산상의 파괴 등이 조합되어 파괴되어지는 것으로 나타났다.

3.3. 강도계수-수명 곡선

피로시험 결과를 회기분석하여, 다음과 같은 식을 얻었다.

$$y = -38.718 \ln(x) + 2302.7 \quad (1)$$

위의 식을 이용하여 반복하중이 백회, 천회, 만회, 십만회, 백만회, 이백만회일 때인 여섯 단계에서의 파괴응력을 산출하였으며, 실험에서 얻어진 강도변수는 $F_{xx}(=1/xx')$ 와 $F_x(=1/x-1/x')$ 만이 존재한다⁵⁾.

그러나 본 연구에서는 반복하중에 따라 강도계수가 변화하는 양상을 고찰하는 연구이므로 단순히 실험에 사용된 재료의 압축강도는 인장강도와 같다는 가정하에서⁶⁾ Tsai-Wu 파괴영역에 산출된 파괴응력과 인장강도의 70%인 1692MPa를 적용응력으로 가정하고 강도계수를 구하여 Table 4에 나타내었고, Fig 8에 반복하중에 따른 강도계수의 변화인 R-N Curve를 나타내었다. 여기서, 인장강도의 70% 응력을 적용한 것은 Table 3의 결과에서 나타나듯 평균적으로 70%일 때 무한수명으로 보는 200만회를 상회하기 때문이며, 그 외의 응력에 대해서는 추후에 많은 실험적 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

현재 전 세계적으로 전 분야에 걸쳐 복합재료의 사용 빈도는 날이 확대되고 있으며, 그에 따라 적지않은 문제점들이 나타나고 있다.

토목·건축분야에서도 신소재를 이용한 구조물의 설계 및 시공이 활발하게 이루어지고 있으나 대부분의 복합재료 구조물의 설계시 재료의 치수효과 및 피로특성을 고려하지 못하고 기존의 방법인

강도계수 R을 적용된 하중에 대한 극한강도 또는 최대강도의 비율로만 적용되어지고 있다⁷⁾.

이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 피로실험결과를 회기 분석하여 Tsai-Wu 파괴기준에 적용하여 Fig. 8과 같은 그래프를 얻었으며, 분석 결과 재료는 반복하중에 따라 파괴강도가 점차로 감소하며 그에 따라 강도계수 역시 감소한다는 결론을 얻었다.

서론에서 언급한 바와 같이 구조물의 설계시 강도계수를 높게 주어 재료의 이용도를 낮추는 문제점 등을 보완하기 위해서는 구조물의 설계시 본 연구의 결과를 반영하여 구조물이 받는 반복하중을 고려하고, 그에 따른 강도감소 계수를 산출해야 한다는 결론이 도출되었다.

4. 결론

본 연구는 Carbon/Epoxy 복합재료 적층판을 이용하여 인장 및 피로실험을 통해 인장 및 피로특성을 고찰하였으며, 반복하중에 따른 강도계수의 변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Carbon/Epoxy 복합재료 적층판을 실험한 결과와 프리프래그 제작사에서 제공한 한가닥의 물성을 비교하면, 한 가닥인 경우 4,900MPa의 인장강도를 지나나 재료의 단면이 커질 경우 인장강도가 2,417MPa로 감소함을 알 수 있었다. 따라서 재료의 경화과정시 발생하는 잔류응력의 억제에 관한 연구가 이루어져야하며, 아울러 설계시 복합재료의 치수효과에 대한 중요성이 강조되므로 필히 반영해야만 한다.

2) 인장시험결과 응력-변형률의 관계가 파괴시 까지 탄성적으로 변화하는 특성을 보였으며, 현재 건설 재료에 주로 사용되어지고 있는 강이나 철근 콘크리트의 극한강도에 비해 Carbon/Epoxy 복합재료는 상당히 우수한 인장특성을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 사용된 재료에 구조물의 최적화 개념을 적용한다면 우수한 구조용 재료로서 이용이 가능하다고 판단되어진다.

3) 피로실험 결과를 이용한 S-N Curve를 만들어 본 결과, 극한응력의 0.65에서 0.7에 대한 응력수위에서 대부분의 시험체가 200만회 이상의 수명을 보였으며, 현재 건설재료에 주로 사용되어지는 강재(일반적으로 0.5 이하의 응력 수위에서 Fatigue Limit 형성)와 비교할 경우 본 연구에 사용된 Carbon/

Table 4. Failure Stress and Strength Ratio

Step	Fatigue Life (Cycles)	Failure Stress (MPa)	Strength Ratio
1	100	2123	1.254
2	1000	2035	1.203
3	10000	1948	1.151
4	100000	1860	1.099
5	1000000	1773	1.048
6	2000000	1746	1.032

Regression Line = $y = -38.718 \ln(x) + 2302.7$

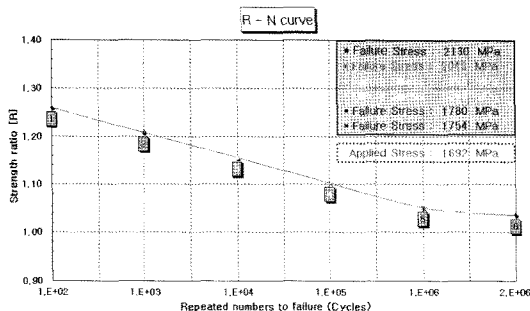


Fig. 8. R-N Curve.

Epoxy 복합재료 적층판의 Fatigue Limit가 상당히 높은 범위에서 형성됨을 실험을 통해 알 수 있었다.

4) 피로시험 결과를 회기분석 하였으며, 회기분석 자료를 Tsai-Wu 파괴기준에 적용하여 반복하중에 따른 강도계수의 변화를 고찰해 본 결과 반복하중이 증가함에 따라 파괴강도가 감소하며, 또한 강도계수도 감소한다는 결과를 보였으므로 이를 기존설계에 반영한다면 강도계수를 크게 산정하여 발생하는 비경제적인 과다설계 등을 피할 수 있어 유용하게 사용되어질 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) Tasi, S.W., "Composite Designing", 3rd Ed., Think Composites, Dayton, Ohio, 1987.
- 2) Kim, D.H., "Composite Structure for Civil and Architecture Engineering", E & FN SPON, 1995.
- 3) Tasi, S.W. and Hahn, H.T., "Introduction to Composite Materials", Technomics Publishing Co., Westport, Connecticut, 1980.
- 4) 강재운, 송지호, "고인성 열가소성 복합재료 AS4/PEEK의 피로강도에 관한 기초적 검토", 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제4호, pp. 1055~1064, 2000.
- 5) 이억섭, 한민구, 복합재료 파괴역학, 원창출판사, 1997.
- 6) 심봉식, 성낙원, 웅장우, "탄소섬유/에폭시 복합재료의 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명 평가", 대한기계학회논문집, 제15권, 제6집, pp. 1908~1918, 1991.
- 7) 김범준, 강태진, "브레이드 복합재료의 계면결합력에 따른 인장-인장 피로특성에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제7권, 제3집, pp. 77~86, 1994.