

금속 및 복합재료 충격흡수부재의 에너지흡수특성 비교연구

Impact Energy Absorption Characteristics for Metal and Composite Members

전 완 주
W. J. Jun



전 완 주
• 1957년생
• 복합재료응용 구조설계
• KIST 기전연구부 선임연구원

1. 서 론

1970년 이전까지는 자동차의 성능이 주로 차체의 안전성과 주행성능의 향상을 목표로 하여 개선되었기 때문에 차체중량은 증가되는 추세에 있었다. 그러나 1973년 1차 오일파동이후 부터는 연비의 향상과 직결된 차체의 경량화가 새로운 과제로 대두되었다. 에너지 절감문제와 함께 환경문제가 부각되면서 최근에는 미국을 필두로 선진각국에서 자동차 배기가스를 강력하게 규제하기 시작했으며 특히 미국자동차 소비량의 약 12%, 미국 수입차의 50%를 소비하고 있는 캘리포니아주는 자동차 공해규제를 더 한층 강화하여 1998년까지는 판매량의 2%, 2003년경에는 10%의 무공해 자동차 판매를 의무화하기에 이르렀다. 수출에 크게 의존하는 우리의 산업구조를 고려할때 저공해, 고연비의 자동차개발이 시급한 실정이다. 이에따라 국내에서도 전기자동차의 개발 필요성이 크게 인식되고 있고 고연비, 저무공해 자동차의 개발을 위해서는 엔진 성능의

향상, 차체의 공기역학적 저항력 설계, 차체의 경량화 개발등이 핵심기술이다. 전기자동차의 경우 지금까지 개발된 기술로는 배터리의 크기, 무게, 성능을 참작하면 엔진 및 차체의 외형설계기술은 한계에 이르러 차체무게의 경량화 달성만이 자동차의 성능을 향상시킬 수 있는 가장 타당한 방법으로 평가되고 있다. 그리고 연비향상을 위한 경량화 방안으로는 차체 및 자동차 부품에 기존의 소재를 고장력 강판, 알루미늄, 플라스틱 등으로 대체를 고려할 수 있고 안전성향상의 방안으로는 안전벨트 착용, 에어백 착용, 차실내의 구조강화, 내충격 에너지흡수 구조재의 대체등으로 요약할 수 있다.

본 연구에서는 자동차 차체의 경량화 방안으로서 섬유강화 복합재료를 이용한 충격흡수 구조재인 Side Member(측면부재)의 응용을 위한 시뮬레이션용 Box Tube의 충돌에너지 흡수특성 및 거동에 대해서 기존 금속 측면부재와 비교하여 논의해 보고자 한다. 그리고 본 연구는 복합재료 역학 및 제작방법에 대한 기본지식이 있는 경우를 기준으로 하고 이에 대한 소개를 생략하기로 한다.

2. 금속 충돌흡수 부재의 붕괴거동

측면부재는 일반 주행시 축과 구동장치들로

부터 야기되는 운전 동적하중을 지지하며 차량 충돌시 외부로부터 가해진 충돌에너지를 주어진 차체중량 및 변형 범위내에서 변형에너지로서 변환을 극대화시켜야 한다. 따라서 측면부재를 설계할때 충돌에너지의 흡수 최대화, 경량화, 필요한 공간확보를 고려하여야 한다. 전륜 구동방식 차량의 경우 구동축의 공간을 마련하기 위해서 굴곡형태를 갖고 형상은 그림 1과 같다. 현재 상용자동차의 경우 압연 연강을 사용하고 있으며 충돌에너지 흡수거동은 그림 2에서 보는 바와 같이 국부좌굴후 접합, 접촉과정을 반복하며 붕괴하면서 운동에너지를 변형에너지로 흡수한다 (그림 3, 4참조). 이는 Box Beam의 소성힌지이론을 도입하여 에너지 흡수거동을 해석할 수 있다.

소성힌지이론은 재료의 변형을 강화현상이 전혀 없는 완전소성재료로 가정하고 변형에너지는 오직 소성힌지에서 소성힌지 모멘트의 작용으로 흡수하고 보의 다른 부분은 강체운동을 한다는 이론이다. 따라서 그림 5의 고정힌지와 C, D부분의 이동힌지에서 모든 에너지가 흡수된다. A부분은 강체운동을 하는 부분이다. B, C, D의 각 힌지에서 흡수된 에너지는 식(1)로 계산된다.

$$E_b = 2 \cdot 3.14CM_0 \quad (1-1)$$

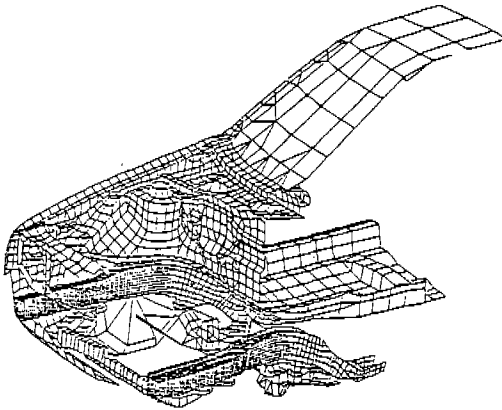


Fig.1 Side Member with Parts of Vehicles Front-End

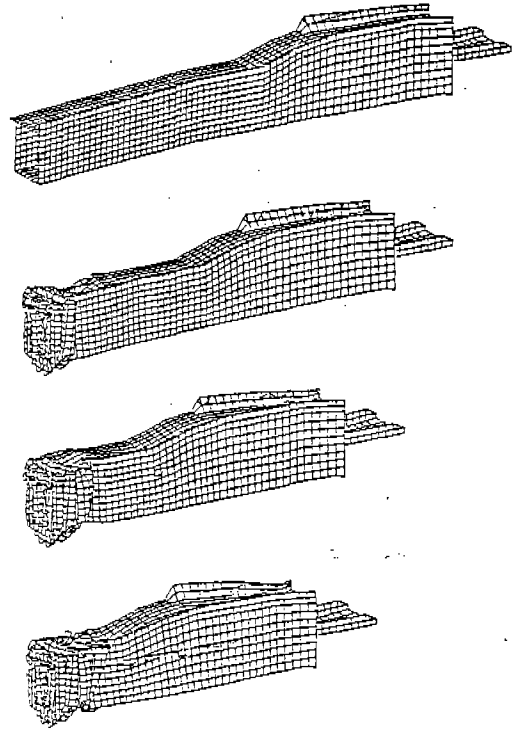


Fig.2 Sequence of Deformed Side Member Structure

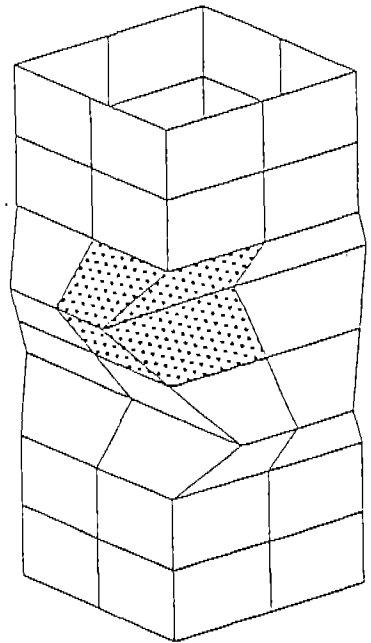


Fig.3 Folding Mechanism

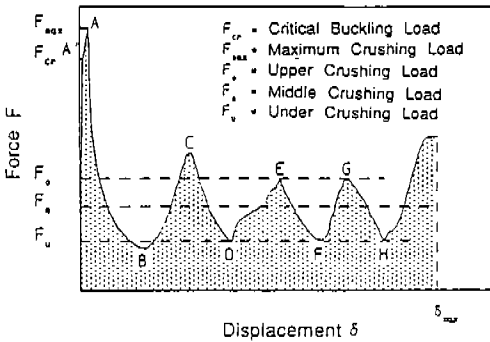


Fig. 4 Load-Deformation Curve of Box Beam

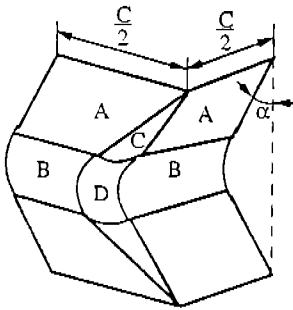


Fig. 5 Model of Folding Mechanism of Metal Box Beam

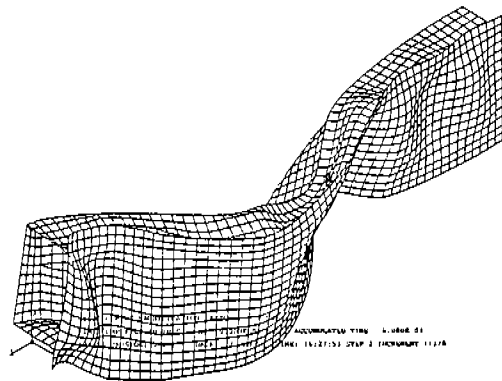


Fig. 6 Deformation after Impact without Dart and Bead

$$E_c = 4I_2 H^2 M_0 / b \quad (1-2)$$

$$E_d = 16HI_1 b M_0 / t \quad (1-3)$$

$$M_0 = \sigma_c t^2 / 4 \quad (1-2)$$

여기서 b 는 D와 C의 셀부분의 반경이고 M_0 는 단위길이당의 붕괴모멘트를 나타낸 것이다. (1) 식의 소성에너지지를 외부에서 가해준 에너지와 등치시키면 붕괴하중 P_m 을 얻을 수 있다.

$$P_m / M_0 = 52.22 (C/t)^{1/3} \quad (2)$$

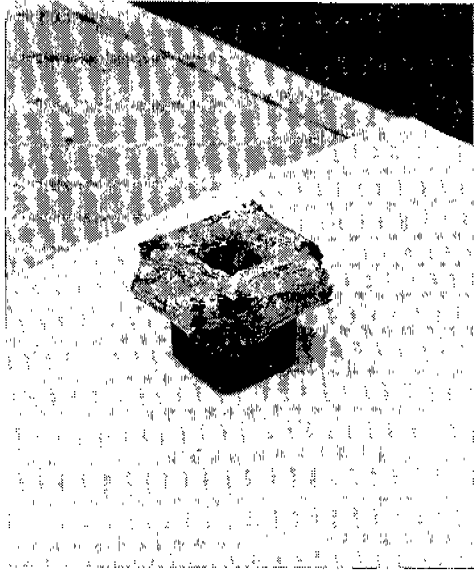
Strain Rate을 고려한 기존의 경험식을 이용하면 다음과 같다.

$$P_m / M_0 = 52.22 (C/t)^{1/3} \{1 + (0.33 V_i / C/D)^{1/2}\} \quad (3)$$

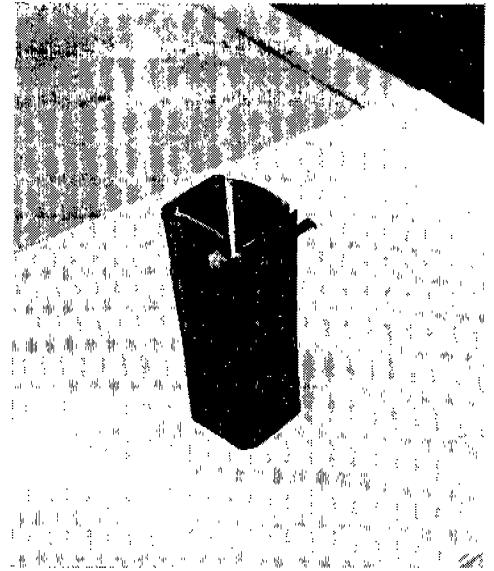
여기서 V_i 는 충돌속도이고, p, D 는 재료에 따른 상수이다. 즉 평균붕괴하중은 단면의 길이에 대한 두께의 비 t/C 만의 함수로 지수함수적으로 증가한다. 붕괴거동은 비선형 유한요소법으로 측면부재의 대변형 문제를 상용프로그램인 ABAQUS Explicit Code를 사용하여 해석하였고 비드나 다트가 없는 경우 충돌후 변형된 모습은 그림 6과 같다.

3. 복합재료 충격흡수부재의 붕괴거동

섬유강화 복합재료는 낮은 변형을 성질에 의한 취성때문에 연성의 성질을 갖는 금속과는 다른 거동을 한다(그림 7). 전술한 바와 같이 금속의 경우 소성변형에 의한 국부좌굴과 접힘으로 에너지를 흡수하는 반면에 복합재료 측면부재는 섬유와 기지의 파괴, 섬유와 기지의 층간분리와 에너지를 흡수하는 다양한 붕괴거동을 보인다. 모델링하기 위해서 복합재료의 경우 충돌에너지 흡수거동을 단면의 형상, 길이, 두께, Trigger방법, 하중의 속도등에 따라 붕괴거동을 살펴 보았다. 실차에 적용하기 위해서 이들 인자의 영향을 면밀히 관찰 하여야 한다.



a) Stable Collapse



b) Unstable Collapse

Fig.7 Collapse Behavior of Glass/Epoxy Fabric

국내에서 생산되는 직조 유리섬유/에폭시 프리프렉을 오토클레이브로 성형하여 Instron 8500으로 표 1과 같은 섬유강화 복합재료 Box Beam에 대해서 준정적 실험 결과 그림 8과 표 2에서 보인 바와 같이 두께가 증가 할수록 흡수에너지가 증가되고 안정적 붕괴를 보여준다. Trigger는 초기 붕괴하중을 낮게하고 안정적 붕괴를 유도하여 충돌에너지를 극대화하기 위해서 충돌선단에 놓는다. 그림 9에 보인 바와 같이 여러가지 형상이 있으나 표 1의 경우 Bevel Trigger의 경우이다. 붕괴모드는 두께에 따라 Global Buckling, Local Buckling, 파괴모드등으로 변함을 볼 수 있다. 파괴모드로 붕괴시 에너지 흡수는 최대이나 금속과 유사한 국부좌굴 붕괴모델이 측면부재 설계적용에 실용적이다. 그림 10에서 Trigger기구와 단면의 가로세로비에 따른 준 정적 실험결과 에너지 흡수면에서는 Tulip형상이 유리하나 제작에 다소 번거로움이 있다. 단면의 가로세로비에 따른 붕괴거동은 정 동적인 경우 일정한 경향은 관찰되지 않았다. 충돌시 에너지 흡수거동 즉 붕괴거동을 관찰하기 위해서 표 3의 시편의 경우 준정적 붕괴실험과 동적 붕괴 실험을 수행하였다. 충격실험은 General Research사의 Dynatup 8250

Table 1 Dimension of Square Specimen with Variable Thickness

Name	Lay-up	S [mm]	t [mm]	L [mm]	t/S	Number
GF4	[0/90] ₄	24.94	0.71	75	0.029	3
GF6	[0/90] ₆	25.02	1.02	75	0.041	3
GF8	[0/90] ₈	25.05	1.35	75	0.054	3
GF9	[090] ₉	24.92	1.48	75	0.059	3
GF12	[0/90] ₁₂	25.15	2.05	0.082	3	

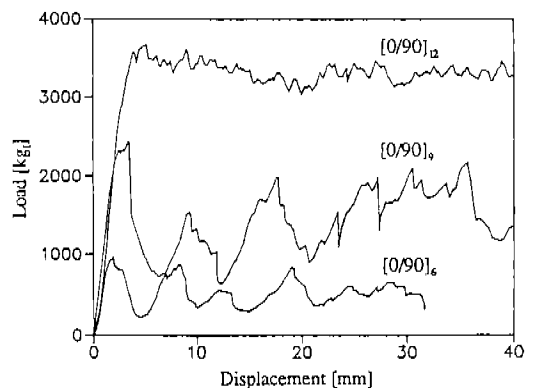


Fig.8 Load-Deformation Curve according to Number of Layer

Table 2 Collapse Mode of Quasi-Static Crush Test

Name	t/S	Load rate [mm/s]	Initial Peak Load[kg.]	Mean Crush Load[kg.]	Mean Crush Stress[MPa]	Collapse Mode
GF4	0.029	0.082	518	×	×	Global Buckling
GF6	0.041	0.082	990	498.57	48	Local Buckling
GF8	0.054	0.082	1905	951.13	69	Local Buckling
GF9	0.059	0.082	2352	1339.48	89	Local Buckling
GF12	0.082	0.082	3565	3212.90	153	Fracture

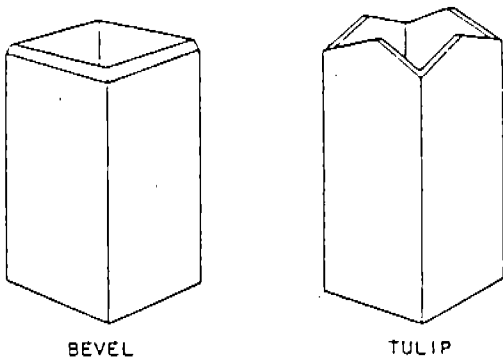
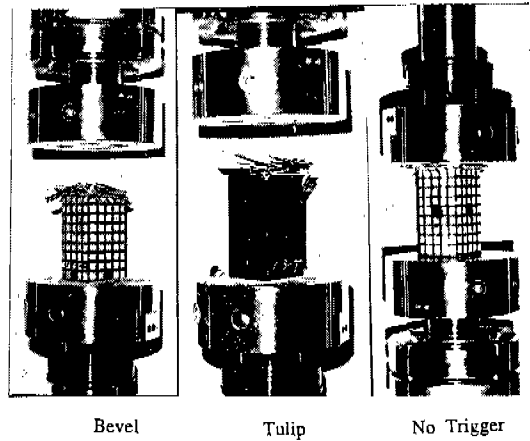


Fig.9 Trigger Mechanism



으로 충돌 발생시간내의 2048개의 하중치를 기록하였으며 충돌속도는 3.5~3.8m/sec로 하였고 결과는 그림 11과 같다. 붕괴하중의 값은 좌굴 모드의 변화없이 정적붕괴 하중을 기준으로 약 45% 증가한다. 이는 금속의 경우 변형률에 따른 재질의 강화현상으로 동적 붕괴지하중을 보이는 반면에 취성 복합재료의 경우 일반적으로 하중속도가 증가함에 따라 붕괴지하중이 증가함에 관찰되어 관성력의 영향이 큼을 알 수 있다.

표 3의 붕괴거동중 국부좌굴모드로의 붕괴를 갖으며 충돌에너지를 흡수하는 경우 모델링을 위하여 붕괴마디를 관찰한 결과 그림 12와 같다. 관찰된 붕괴거동으로 부터 금속과 유사한 붕괴 거동을 보이는 국부좌굴모드에 대해서 소성힌지 이론을 사용한 동적진진좌굴이론은 다음과 같다. 그림 7에서 보인 바와 같이 복합재료 Box Beam이 국부좌굴에 의하여 붕괴되는 경우 일정한 붕괴 마디를 유지하면서 붕괴되었고 모서리에서는 각 면에 법선방향으로의 분리가 발생하였다. 따라서

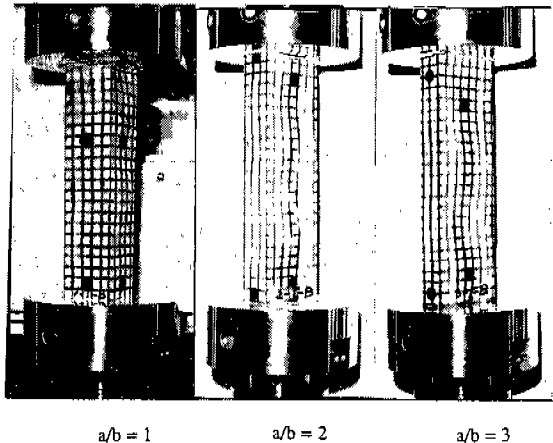


Fig.10 Collapse Behavior according to Trigger and Aspect Ratio

기본붕괴 메커니즘은 그림 13에서와 같이 모델링 할 수 있다. 그림 13에서 소성힌지 부분은 선 ab와 bc부분으로 두 강체면 A와 B를 연결하는 고정힌지 부분이다. 고정힌지에 의하여 흡수되는 에

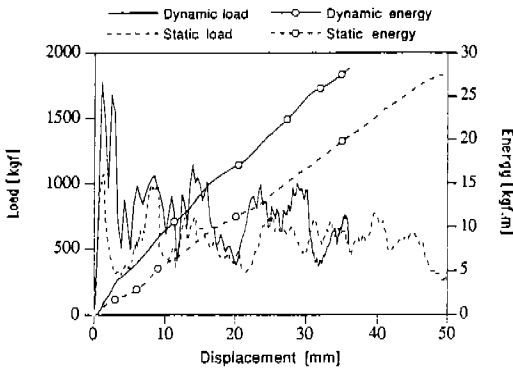


Fig. 11 Static and Dynamic Load/Energy vs. Displacement

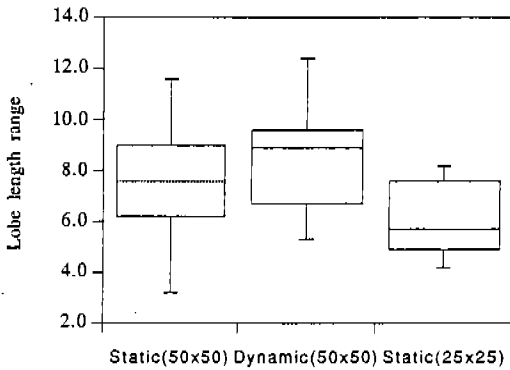


Fig. 12 Length of Collapse Lobe

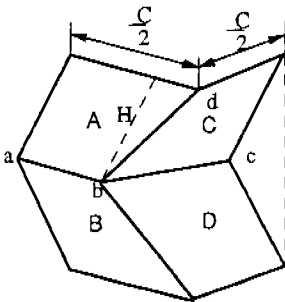


Fig. 13 Collapse Model of Composite Box Beam

Table 3 Dimension of Rectangular Section with Various Aspect Ratio Length, Thickness

No	Specimen	a[mm]	b[mm]	L[mm]	Trigger
1	X1-2-B	50	50	100	Bevel
2	X1-3-B	50	50	150	Bevel
3	X1-3-T	50	50	150	Tulip
4	X1-3-N	50	50	150	No
5	X1-4-B	50	50	200	Bevel
6	X1-5-B	50	50	250	Bevel
7	X2-2-B	67	33	100	Bevel
8	X2-3-B	67	33	150	Bevel
9	X2-4-B	67	33	200	Bevel
10	X2-5-B	67	33	250	Bevel
11	X3-2-B	75	25	100	Bevel
12	X3-3-B	75	25	150	Bevel
13	X3-4-B	75	25	200	Bevel
14	X3-5-B	75	25	250	Bevel
15	Y1-4-B	50	50	200	Bevel
16	Y2-4-B	67	33	200	Bevel

너지는 식(4)와 같다.

$$E_{ab} = E_{bc} = t_1 CH \sigma_{y1}^2 / 6 / E_1 \quad (4-1)$$

모서리 부분 bd 는 붕괴가 진행되는 동안 서로 수직인 방향으로 분리가 진행된다. bd 부분에서는 선형스프링 강성에 의하여 지지된다고 가정하면 bd 에서 흡수되는 에너지는 식을 정리하면

$$E_{bd} = t_2 HC \sigma_{y2}^2 / 2 / E_2 \quad (4-2)$$

따라서 흡수되는 전에너지는

$$E = E_{ab} + E_{bc} + E_{bd} = 4CH(t_1 \sigma_{y1}^2 / 3 / E_1 + t_2 \sigma_{y2}^2 / 2 / E_2) \quad (5)$$

이고 평균붕괴하중 P_m 은

$$P_m = E/H = 4C(t_1 \sigma_{y1}^2 / 3 / E_1 + t_2 \sigma_{y2}^2 / 2 / E_2) \quad (6)$$

와 같다. 이로 부터 금속 측면부재와 유사한 비선형 유한요소법으로 붕괴거동을 수치적으로 시뮬레이션 할 수 있을 것이다.

4. 결 론

하중방향의 충격하중을 받는 Side Member 등 충격흡수부재의 경우 금속과 복합재료를 사용하여 변형거동과 에너지흡수특성을 살펴 보았다. 같은 조건하에서 3배이상의 충격에너지의 흡수능력을 갖는 복합재료의 경우 가로세로비, 두께, 길이비, 안정적붕괴 여부를 결정하는 Trigger유무 및 종류에 따라 붕괴거동과 에너지 흡수특성을 실험적으로 고찰하였다. 실험적 고찰로 부터 복합재료의 경우 금속에서와 같이 소성힌지이론을 도입하여 붕괴거동의 모델을 제시하였다. 면에서는 일정한 마디를 갖으며 붕괴하면서 에너지를 흡수하고 모서리부분에서는 섬유와 기지가 법선방향으로 분리되면서 에너지를 흡수한다. 이는 수치적 해석을 위한 유한요소법의 적절한 요소선정을 가능하게 하고 이는 실차실험동 경제적 손실을 크게 줄일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 강수춘, 전완주, "섬유강화 복합재료 Box Tube의 Crush 거동", 자동차공학회지, 제13권, 제5호, 1991, pp.65-72.
2. 전완주, 강수춘, 구정서, "섬유강화 복합적층 Box Tube의 좌굴해석", 복합재료학회지, 제4권, 제1호, 1991, pp.118-126.
3. 홍예선, 전완주의, 차세대 자동차기술에 관한 개발과제 조사연구, 과기처보고서, 1992.
4. 전완주의, 자동차용 복합재료 요소개발에 관한 연구, 과기처보고서, 1992.
5. N. Jones, Structural Impact, Cambridge University Press, 1989.
6. 김창호, 전완주, 자동차용 Side Member에 대한 충격흡수 Mechanism의 유한요소해석, 산업계 Consortium보고서, 1993.
7. 전완주, 구정서, 섬유강화 복합재료 구조물의 설계프로그램개발, 과기처보고서, 1990.