

論文

복합재료 모노코크 구조물의 고속성형에 관한 연구

조치룡* · 이종혁**

Development of the Processing for the Composite Monocoque Structures

C.R. JOE* and J.H. LEE**

ABSTRACT

A method of manufacturing the composite monocoque structures is developed. The pressure of polyurethane foam is utilized to construct the monocoque structures. The mechanical performances of the developed structures are compared with the ones manufactured using other processing method. The developed polyurethane pressure method is successfully used in manufacturing composite bicycle parts.

Key word : monocoque structures, composite, polyurethane pressure, bicycle parts

초 록

본 연구에서는 양질의 복잡하고 3차원적인 모노코크형 복합재료 제품들을 제조할 수 있는 우레탄 폼 내부가압 성형법을 개발하였다. 이 성형법에 의해 제조된 제품의 특성과 타성형법을 비교 분석함으로써 제조공정이 제품성형에 끼치는 영향을 평가하였다. 개발된 공법은 산악용 자전거러그를 제작하여 응용하는데 적용하였다.

1. 서 론

복합재료의 구조효율을 극대화하기 위한 모노코크형 구조물은 항공기, 지상 해상운송수단 및 기타 구조물, 스포츠용품 등에 그 응용이 확대되고 있는 추세이다. 1973년 조사에 따르면[1] 복합재료에 관련된 연구와 개발의 약80%는 1965년 이후에 행해져 왔으며 그 이후에는 더욱 증가하고 있다고 보고하고 있다. 모노코크 구조물은 내부에 공간이 형성되므로 평면적 작업보다는 입체적인 성형기술이 요구되어 진다. 이와 같은 입체적 성형기술은

앞으로 고부가가치 제품의 생산을 위해서는 갖추어야 할 요소기술이다.

복합재료의 성형법은 가장 간단하고 일반화되어 있는 핸드레이업, 대형제품을 만들기 위한 백몰딩(Bag molding)공정[2], 연속적인 토우로빙이 수지 침투용해조를 통하여 지나가 회전하거나 또는 고정된 축에 감겨지는 필라멘트 와인딩[3,4]등이 개발되었다. 그중 가장 신뢰성 있는 제품을 만들 수 있는 오토클레이브(Autoclave) 성형법은 열과 압력을 동시에 사용함으로써 고 품질의 항공기 판재 및 샌드위치 구조물을 제작하는데 사용된다. 이

* 창원대학교 정밀기계공학과

** 창원대학교 대학원

성형법은 크기가 아주 크거나 제품 수량이 많지 않아 금형제작이 어려운 경우 사용되며, 공정이 복잡하고 부재료를 많이 필요로 하고, 공정 및 제조시간이 길고 장비가 고가인 단점도 가지고 있다. 특히 3차원 중공을 가진 물체를 제조하는데 있어 소형인 제품을 제조하는 데에는 매우 어려운 점들이 많다. 또다른 방법으로 최근에 활발히 연구되어지고 있는 RTM (Resin Transfer Molding) 성형방법에 있어서는 금형설계가 고도의 기술을 요하며 T형 관이나 곡면부의 역테이퍼(Taper) 진 제품의 성형에는 많은 제약이 따른다. 그러므로 3차원적인 양질의 모노코크 구조물을 단시간 내에 손쉽게 성형하기 위한 성형법이 요구되어 진다. 본 연구에서는 우레탄 폼의 발포압력을 이용하여 복합재료 모노코크 구조물을 손쉽게 성형하는 새로운 방법을 개발하였다.

2. 우레탄 내부가압 성형법

성형물의 중공내부에 충분한 작업공간이 확보된다면 여러 성형법으로 모노코크형 구조물을 제작할 수 있으나, 내부공간이 충분치 않다면 여러가지 부재료를 사용하는 성형법으로는 제작하기 어렵다. 이러한 측면에서 우레탄 폼 내부가압 성형법은 곡면부나 역테이퍼진 성형에 제약이 따르지 않으므로 우레탄 폼의 성질을 잘 이용하면 모노코크 구조물의 훌륭한 성형법이 될 수 있다.

우레탄 폼 내부가압 성형법은 우레탄 폼을 복합재료가 적층된 몰드 내부에서 발포시켜 복합재료를 몰드에 밀착시킴으로서 내부에 폼이 들어있는 가벼운 부품을 만드는 성형법이다. 우레탄 폼이 가사시간(발포시간)은 약 2분 가량으로 신속히 진행된다. 우레탄 폼(동성화학 : Model No. DSF-

884R/P)의 비중은 액상일 때 1.2에 불과하며 발포비율은 체적비로서 20배 이상이다. 우레탄 폼은 액체상태로 존재하다가 주제와 경화제를 적정비율(10 : 3)로 혼합시키면 화학적 반응에 의해 발포시 약120℃에 달하는 발포온도를 나타내고 최적비에 달하는 공간부분이 가스로 채워지면서 고체화되게 된다.

본 연구에서는 경화 사이클의 어느 시기에 우레탄 액을 주입하는 것이 최적인지를 결정하기 위하여 몰드 내부 5곳에 Thermocouple을 부착한 뒤 여러 온도에서 우레탄 액을 주입하면서 온도의 변화 및 성형제품 특성을 조사하였다. 성형시 우레탄 폼은 공간이 있는 곳에는 침투하는 성질이 있으므로 우레탄 폼이 CFRP에 스며드는 것을 방지하기 위하여 성형물체 내부에 같은 형상으로 다소 여유가 있는 비닐튜브를 제작하여 넣고 그 속에서 우레탄 폼이 발포되도록 하였다. 100℃에서 우레탄 액을 주입하였을 때 성형사이클은 Fig.1에 나타나 있고, Table 1은 우레탄 액 주입온도에 따른 성형제품의

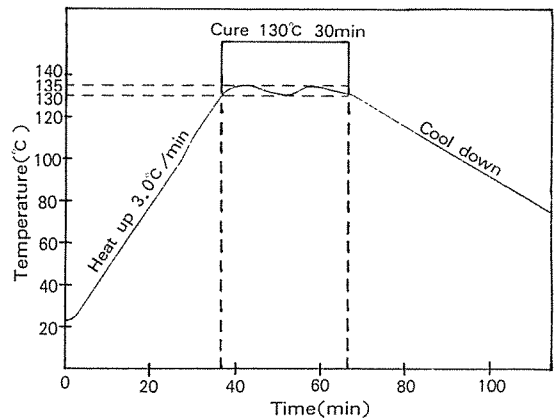


Fig.1. Curing temperature cycle of specimen by internal pressing of polyurethane foam

Table 1. Result of Naked-Eye Inspection

횟수 \ 온도	50℃	60℃	70℃	80℃	90℃	100℃	110℃	120℃	130℃	135℃
1	불량	불량	불량	양호	양호	양호	양호	불량	불량	불량
2	불량	불량	불량	불량	양호	양호	양호	불량	불량	불량
3	불량	불량	양호	불량	양호	양호	양호	양호	불량	불량
4	불량	불량	불량	불량	양호	양호	양호	불량	불량	불량
5	불량	불량	불량	양호	양호	양호	양호	양호	불량	불량

육안으로 외관검사한 결과이다. Fig.1에서 우레탄 액이 주입되는 100℃ 부근에 몰드 내부온도가 변화되는 것을 알 수 있고 이것은 적층된 프리프레그(Prepreg)에 우레탄 폼이 발포할 때 발생하는 발포온도가 내부의 온도에 다소 영향을 미친다는 것을 의미한다. Table 1에서는 몰드 내부온도가 50℃~90℃일 때는 프리프레그의 수지유동이 자유롭지 못한 상태라 여겨지며, 110℃~120℃ 일 때에는 수지의 경화반응이 진전되어 유동이 자유롭지 못하다는 것을 짐작할 수 있다. 100±5℃에서 우레탄 폼을 주입한 경우가 가장 양호한 성형상태를 보이는 것으로 이 온도 근처에서 우레탄 폼을 주입하는 것이 가장 좋다는 결론을 얻었다.

3. 타 성형법과의 비교

3-1. 시험편제작

본 연구에서 사용된 시편은 한국카본 제품의 Carbon/Epoxy Prepreg(C/C₁ Carbon UD P.PCU 125C₁ & Cloth P.P CF-3327)를 적층성형하여 제작하였다. 사용된 Fiber의 기계적 특성은 Table 2와 같다. 준비된 프리프레그를 [0/90/45/-45]_{2S} [45/-45]_{2S}의 적층방법으로 12 ply를 멘드렐과 몰드에 적층한 후 드라이 오븐에서 성형하였다. Fig.1과 같은 Curing temperature cycle로 성형하였는데 멘드렐-열수축 테이프 방법과 우레탄 폼 내부가압

성형에서 사용된 압력은 테이프의 장력 및 수축에 의한 압축력과 우레탄 폼의 발포압력 및 가스의 팽창력이다. 성형된 후에는 드라이 오븐 내에서 서서히 공냉시켰다. 성형된 CFRP 튜브는 다이아몬드 휠 톱으로 전달하였다. Table 3에 시험편의 외관치수와 섬유 함유의 중량비를 나타내었다.

3-2. 시험방법

두 성형법에 의한 시편의 성능을 비교하기 위하여 굴곡시험[5] 및 충격시험을 행하였다. 굴곡시험 장비로 INTESCO Model MO. 2020UTM을 사용하였다. 시험에 사용된 시험편 기준치수는 외경 28.6mm, 내경 25.0 길이 500mm로 하였다(Table 3 참조) 굴곡시험조건은 UTM의 Cross head speed를 굴곡시험에서는 5mm/min로 하여 시편이 파괴될 때까지 실시하였다. Fig.2에 굴곡시험편의 형상을 나타내었다.

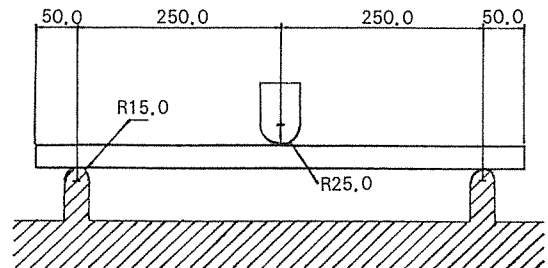


Fig.2 3-point loading diagram and dimension

Table 2. Mechanical properties of Fiber

종류	항목	Yeild (tex)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Tensile modulus (10 ³ kgf/mm ²)	Elongation (%)	Density (G/cm ³)	E.R (Ω cm)
3K		200	380	24	1.6	1.77	1.5×10 ⁻³
12K		800	400	24	1.7	1.77	1.5×10 ⁻³

Table 3. Dimension of specimns and fiber volume percentage

NO.	우레탄 폼 내부가압				멘드렐-열 수축 테이프			
	내경(mm)	외경(mm)	길이(mm)	섬유함유율(%)	내경(mm)	외경(mm)	길이(mm)	섬유함유율(%)
1	24.76	28.63	600.2	65.7	25.03	28.74	599.8	63.8
2	24.87	28.67	600.4	64.2	25.01	28.60	600.5	64.1
3	24.65	28.62	599.8	65.1	25.03	28.73	600.1	64.7
4	24.91	28.64	600.1	65.2	25.05	28.67	600.3	63.9
5	25.05	28.69	600.5	65.9	25.02	28.71	600.3	64.6

충격시험에는 Bae Kyung사의 최대 30ton·m Absorbed energy 충격시험기를 사용하였다. Fig.3 은 충격이 일어나는 충격부 형상을 도시화한 것이다. 이 충격시험기는 회전하면서 낙하하여 시험편에 충격을 가하도록 되어 충격에너지량을 조절할 수 있도록 되어 있다. 본 실험에서는 70kg·m(686 Joule)의 에너지로 제한하여 실시하였다. 충격 Head는 R2 라운딩 처리 및 30°의 각도를 가진 것을 사용하였으며 충격점의 선속도가 3.3m/sec의 속도로 시험편을 타격토록 하였다.

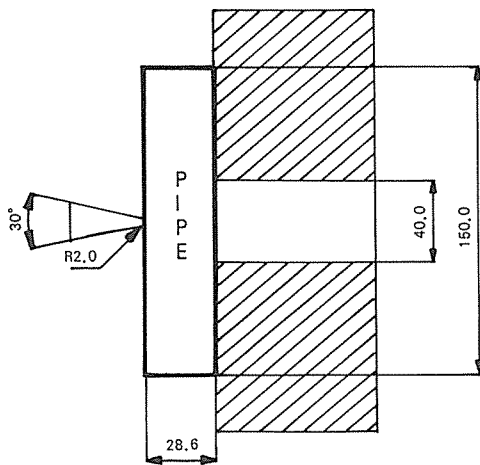


Fig. 3 Impact configuration

3-3. 실험결과 및 분석

우레탄 폼을 이용한 시편과 멘드렐-열수축 테이프를 이용한 시편에 대한 굴곡시험에 있어서 하

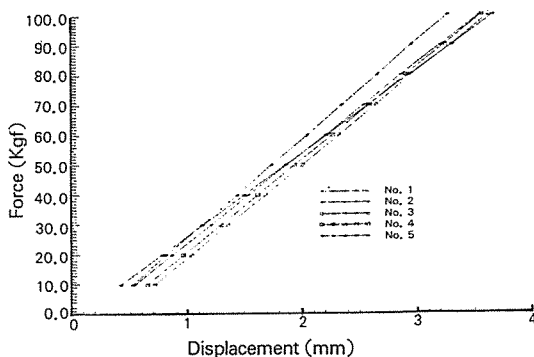


Fig. 4. Load-Displacement Diagram of the Specimens from Polyurethane Foam Method

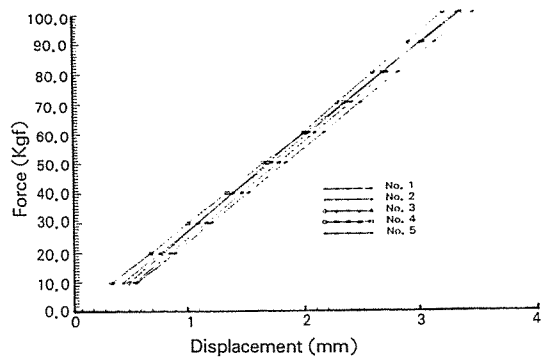


Fig. 5. Load-Displacement Diagram of the Specimens from Mandrel-Shrinkage Tape Method

중이 100kgf 이룰때 까지에 있어서 하중-변위 선도가 Fig.4 및 Fig.5에 각각 나타나 있다.

두 가지의 경우에 모두 하중-변위 선도가 각 시험편에 대해 대체로 일치하므로 두 가지 성형법에 의한 시험편들이 대체로 안정적인 기계적 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

하중-변위곡선의 초기 직선구간에서 3점 굽힘 시험의 탄성계수는

4각 단면일 경우

$$E_x = PL^3(1+S)/4bh^3 \delta \quad \dots\dots\dots (1)$$

중공원 단면일 경우

$$E_x = 4PL^3(1+S)/3\pi(D^4-d^4) \delta \quad \dots\dots\dots (2)$$

을 이용하면 구할 수 있다. 여기서 b는 보의 넓이, h는 보의 높이, δ 는 시편중앙의 변위이고 S는 전단변형에 대한 보상계수이다. D는 보의 외경이며, d는 보의 내경이다. 보상계수항은 전단탄성계수에 반비례한다고 알려져 있다. 전단 변형을 무시할 경우 식 (1), (2)는 식 (3), (4)로 나타내어진다.

4각 단면일 경우

$$E_x = PL^3/4bh^3 \delta \quad \dots\dots\dots (3)$$

중공원 단면일 경우

$$E_x = 4PL^3/3\pi(D^4-d^4) \delta \quad \dots\dots\dots (4)$$

본 연구에서는 시편의 강성이 시험기 자체의 강성에 비해 극히 작으므로 시편중앙의 변위 δ 대신

에 Cross head의 변위를 사용하였으며, 전단변형을 고려하지 않은 식 (3) (4)를 사용하여 탄성계수를 구하였다. Table 3에 나타난 시험편의 외관 치수를 이용하여 탄성계수는

$$I = \pi(D^4 - d^4)/64 \quad \dots\dots\dots (5)$$

로 구하였고, 단면계수는

$$Z = \pi(D^4 - d^4)/32D \quad \dots\dots\dots (6)$$

로 구하여 Table 4에 정리하였다.

Table 4. Comparison of the Results from 3-Point Bending Test

시 편	항 목	단면 2차 모멘트 I(mm ⁴)	단면계수 Z(mm ³)	탄성계수 E(kgf/mm ²)	굽힘강성 계수 EI (kgf·mm ²)
우레탄 폼성형	No.1	14531	1015	2936.65	38.31×10 ⁶
	No.2	14381	1003	2478.85	35.64×10 ⁶
	No.3	14798	1035	2241.33	33.17×10 ⁶
	No.4	14110	986	2435.36	34.36×10 ⁶
	No.5	13928	971	2573.40	35.84×10 ⁶
멘드렐 열수축 테이프 성형	No.1	14239	990	2722.08	38.76×10 ⁶
	No.2	13636	954	2626.97	35.81×10 ⁶
	No.3	14192	987	2779.50	39.44×10 ⁶
	No.4	13821	965	2888.36	39.91×10 ⁶
	No.5	14099	983	2656.40	37.45×10 ⁶

Table 5. Dimension of Specimens and Result for Impact Test

시 편	항 목	내 경 (mm)	외 경 (mm)	길 이 (mm)	흡수에너지 (J)
우레탄 폼 내부 가압성형	No.1	24.65	28.62	150.2	295.0
	No.2	25.05	28.69	150.1	324.4
	No.3	24.76	28.63	150.2	357.7
	No.4	24.87	28.67	149.7	292.0
	No.5	24.91	28.64	149.8	296.9
	평균	24.84	28.65	150.0	313.2
멘드렐- 열수축 테이프 성형	No.1	25.03	28.74	149.7	350.8
	No.2	25.03	28.73	150.3	353.8
	No.3	25.02	28.71	150.3	319.5
	No.4	25.01	28.60	150.2	306.7
	No.5	25.05	28.67	150.4	365.5
	평균	25.03	28.69	150.2	339.3

두 성형법의 평균적인 탄성계수를 비교하여 볼 때 우레탄 폼 내부가압 성형시에는 2473.12kgf/mm²으로 멘드렐-열수축 테이프 성형시 2728.66 kgf/mm²의 90.63%였다. 또한 평균적인 굽힘강성

값은 우레탄 폼 내부가압 성형시에는 35.46×10⁶ kgf mm², 멘드렐-열수축 테이프 성형시에는 36.27 ×10⁶ kgf mm²로 거의 같은 값을 가진다. Table 5 에는 충격시험의 결과가 정리되어 있다.

충격시험에 의한 에너지 흡수량을 비교하면, 우레탄 폼 성형의 경우 멘드렐-열수축 테이프 성형에 의한 시험편의 에너지 흡수량의 약 92%로서 크게 뒤지지 않는다.

따라서 우레탄 폼을 이용한 성형법이 보다 복잡한 형상을 간단히 성형할 수 있는 장점을 갖고 있으면서도, 제작된 부품의 기계적성능에 있어서는 거의 같은 강도를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 산악용 복합재료 자전거에의 응용

본 연구에서 개발된 우레탄 폼 내부가압 성형법을 응용하여 산악용 자전거를 제작 시험함으로써 실제 적용 가능성을 검증하였다. Fig.6은 본 성형법으로 제작된 산악 자전거용 각종러그이다.

이러한 러그를 사용하여 MTB(산악용자전거)를 제작하였으며 금속재료로된 다른 자전거들과의 비교를 위하여 가장 혹독한 시험인 에너지흡수시험을 행하였다. 자전거 에너지흡수시험[6~7]은 KS R 1092 (JIS D 9401)에 규정되어 있는 시험 방법을 실시하였다. Fig.7과 같이 Frame-Fork Assembly를 수직으로 유지하여 고정대에 뒤 차축을 고정하고 앞 차축부에서 뒤 차축방향으로 힘을 가하여 40 Joule (400kgf·cm)의 에너지를 흡수시켜 시험전후

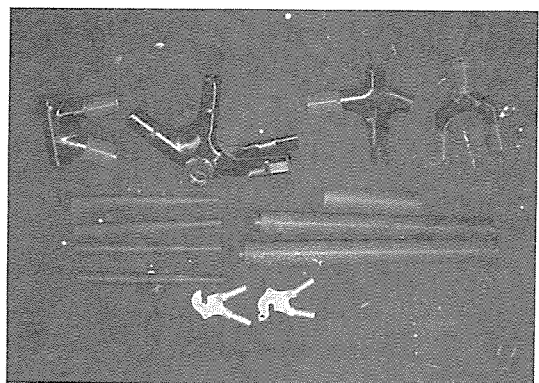


Fig.6. Lugs for Mountain Bikes

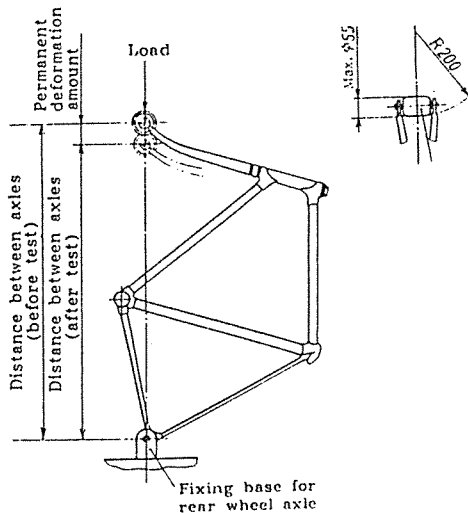


Fig. 7. Frame-Fork Assembly Energy Absorption Test(unit : mm)

차축간의 거리를 측정하고 영구변형량과 시험에서의 최대하중치를 구한다. 이 시험은 Instron (Model 5567)을 사용하여 Cross Head Speed는 10mm/mim으로 실시하였다.

Fig.8은 에너지흡수 시험에서 나타난 카본 Frame, 알루미늄 Frame, 그리고 구조용 탄소강 Frame 각각에 대한 하중-변위 선도이다.

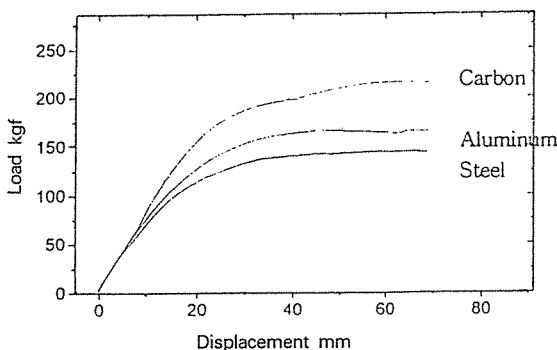


Fig. 8. Load-Displacement Diagram of Frame-Fork Assembly energy Absorption Test of Bike

위의 하중-변위 선도에서 보면 Carbon/Epoxy 로 제작된 Frame의 강도가 가장 높음을 알 수 있다. 에너지 흡수시험에서 얻어진 흡수 Energy량은 Table 6에 정리되어 있다.

Table 6. Result of Frame-Fork Assembly Energy Absorption Test for Bike

항 목	카본제	알루미늄제	강 제
최대하중(kgf-mm)	192.6	160.2	143.2
영구변형량(mm)	33.8	38.42	41.6

자전거 차체의 Energy 흡수량은 운행 중 충돌시에 얼마나 많은 에너지를 흡수하여 탑승자의 안전에 기여할 것인가를 나타내는 것으로 Carbon/Epoxy Frame이 가장 많은 Energy를 흡수하는 것으로 나타났다. 시험후 발생하는 영구변형량의 크기는 Carbon/Epoxy Frame에서 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 에너지 흡수시험에서 Carbon/Epoxy Frame은 그 강도가 높아서 대부분의 영구 변형이 강철로 되어 있는 Front Fork에서 발생하며 Frame 자체에는 큰 손상이 없는 것이 관찰되었다. 이상과 같이 Energy 흡수 Test에서 우레탄 폼 성형법으로 제작된 Carbon/Epoxy Frame이 가장 좋은 결과를 나타냄으로서 이 성형법의 성공적인 적용 가능성이 입증되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 내부에 중공을 갖는 복잡한 형상의 모노코크 구조물을 발포 우레탄 폼을 이용하여 성형하는 방법을 개발하였다.

우레탄 폼 내부가압 성형제품의 기계적 성질을 타 성형법에 의한 제품과 비교하였으며 실제로 복합재료 산악용 자전거 러그성형에 적용, 제품화하였고 그 성형법의 신뢰도를 Frame-fork Energy Absorption Test를 통하여 확인하였다. 간단한 형상만을 제작할 수 있는 타 성형법에 의한 시편과 본 성형법에 의한 시편의 기계적 강도 비교결과는 다음과 같다.

- (1) 우레탄 폼 내부가압에 의한 성형으로 제작된 시편의 평균 탄성계수값은 2473.13kgf/mm^2 로서 멘드렐-열수축 테이프 성형시에 나타난 2728.77kgf/mm^2 의 90.63%이다.
- (2) 우레탄 폼 내부가압에 의한 성형으로 제작된 시편의 평균 굽힘강성값은 멘드렐-열수축 테이프 성형시의 97.97%이다.

- (3) 충격시험 비교시 우레탄 폼 내부가압법으로 제작된 시편은 멘드렐-열수축 테이프 성형시의 92.3%에 달한다.
- (4) 우레탄 폼 내부가압에 의한 성형으로 제작된 시편의 fiber 체적함유량은 62~66%로서 상당히 높은 섬유 함유량을 나타내었으며, 이는 내부의 우레탄 폼 발포에 의한 압력이 Prepreg를 압착 시키기에 충분했음을 보여준다.
- (5) 본 성형법으로 제작된 러그를 이용하여 제작된 산악용자전거의 에너지 흡수능력이 기존제품 보다 우수하다.

후 기

본 연구는 1994~1995 선도기술개발사업 연구과제 “고성능 복합재료성형기술개발”의 세부과제 “복합재료의 Autoclave 대체성형기술개발”의 일부로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. A Wainwrite, W. D. Biggs, J. D. Currey and J. M. Goline, Mechanical Design in Organisms, John Wiley & Sons, New York, 1976.
2. A. Slobodzinsky, in Handbook of Composite materials, Van Nostrand Reinhold, New York, 1982, p.368.
3. A. M Shibley, in Handbook of Composite materials, Van Nostrand Reinhold, New York, 1982, p.448.
4. Yu. M. Tarnopol “ski and A. I. Bail”, in Fabrication of Composites, NorthHolland, Amsterdam, 1983, p.45.
5. ASTM D790-71, 1976.
6. KS R 1902, 1993.
7. JIS D 9401, 1993.