

탄소섬유 강화 복합재로 구성된 인라인 디스크 휠의 충격거동 평가

권혜인* · 이상진*[†] · 신광복**

Evaluation of the Impact Behavior of Inline Disk Wheel Made of Carbon Fiber Reinforced Composites

Hye-In Kwon*, Sang-Jin Lee*[†], Kwang-Bok Shin**

ABSTRACT: In this paper, The concept of a wheel with carbon fiber composite is to replace the conventional material used for a wheel hub, such as plastic, with a disk-type hub made of carbon fabric and epoxy resin. The impact load from the ground under real conditions was considered; a low-velocity impact test was conducted to evaluate the impact performance of the carbon wheel and compare it with that of a conventional plastic wheel. This study applied a 70 J impact load as a test condition. The impact energy was controlled in the test by adjustment of height and weight of impactor. The use of a carbon disk wheel hub was confirmed to reduce weight and generate an excellent repulsive force at low energy under conditions similar to real driving conditions. The results showed that the maximum load increased proportionally depending on the impact load, but the growth of the maximum load was reduced at a 20 J impact load and tended to decrease at a 45 J impact load. The carbon wheel showed excellent properties ; the level of rebounding was 35.3% and 19.1% of the total impact energy at impact loads of 5 J and 10 J, respectively. On the other hand, the carbon disk wheel rebounded less than 5% of the total energy due to crack generation of the thin carbon hub for impact loads of more than 20 J.

초 록: 본 연구에서 다루는 탄소섬유 복합재 인라인 휠은 플라스틱 인라인 휠 허브의 기존 재질을 탄소섬유 직물/에폭시 수지로 구성된 디스크 형의 허브로 대체하는 것이다. 지면으로부터의 충격 하중은 탄소섬유 복합재 휠의 충격 성능 평가를 위해 저속 충격 시험이 수행되었고, 기존의 플라스틱 휠의 성능과 비교하여 수행되었다. 본 연구는 시험 조건으로 70 J의 충격 하중을 적용하였다. 충격 에너지는 타격 추의 높이와 무게를 조정하여 조절되었다. 탄소섬유 복합재 디스크 허브의 사용은 무게를 절감하고 실제 운행 조건과 유사한 조건인 낮은 충격에너지에서 우수한 반발력을 나타내는 것으로 확인되었다. 충격 하중에 따라 최대 하중은 비례적으로 증가하지만, 최대 하중의 성장은 20 J 충격 하중에서 감소되었고, 45 J 충격 하중에서부터 감소되는 경향의 결과를 보였다. 탄소섬유 복합재 휠은 5 J, 10 J의 충격 하중에서 전체 충격 에너지의 35.3, 19.1%가 리바운딩 되는 우수한 특성을 보였다. 반면에 20 J 이상의 충격하중에 대해서는 얇은 탄소섬유 복합재 허브의 크랙 생성으로 인해 전체 에너지의 5% 이하로 리바운드 되었다.

Key Words: 인라인(Inline), 디스크 휠(Disk wheel), 저속충격(Low-velocity impact), 반발력(Repulsive force), 탄소섬유 강화 복합재(CFRP)

Received 3 January 2016, received in revised form 29 April 2016, accepted 29 April 2016

*Korea Textile Machinery Research Institute(KOTMI), Carbon Fiber Team

[†]Korea Textile Machinery Research Institute(KOTMI), Carbon Fiber Team, Corresponding author (E-mail: sjlee@kotmi.re.kr)

**Department of Mechanical Engineering, Hanbat University

1. 서 론

탄소섬유 강화 복합재는 우수한 기계적 성능과 경량화 등의 장점으로 항공기, 방산 부품으로 널리 활용되어 오고 있다[1]. 최근에는 철도차량 일체형 차체, 버스 및 경량전철 차체 재질로도 활용되고 있다[2,3]. 레저 스포츠 분야로의 복합재 연구사례로서, Kim 등[4]은 복합재 골프샤프트 적층 최적화를 통해 특성 파라미터인 프리프레그의 적층 방향, 적층순서를 고려하여 샤프트의 굽힘 강성과 비틀림 강성을 동시에 최적화 하는 목적함수를 제시하였다. Lee[5]는 자전거 프레임 재질로 탄소섬유강화 복합재 적용을 위한 설계, 제작, 성능평가를 수행하였다. 기존의 자전거 프레임 재질인 보통 강재 파이프의 인장강성과 동일한 수준의 탄소섬유강화 복합재 파이프를 설계하여, 테잎 와인딩 공법으로 총 두께 2 mm가 되도록 제작하였다. 제작된 복합재 파이프는 기존 기계구조용 탄소강재 파이프, Cr-Mo 강 파이프, 알루미늄 합금 파이프와 기계적 성능을 비교하였다. 탄소섬유강화 복합재 파이프는 비강도에서 알루미늄 합금 파이프의 4배 이상이며, 비강성은 2배에 달하였다. 중량의 경우는 강재 파이프에 55%, 알루미늄 합금 파이프에 30%의 경량화를 달성할 수 있었다. Cheong 등[6]은 탄소섬유 복합재 프리프레그 소재에 따른 골프 샤프트의 기계적 성능을 실험과 해석을 수행하여 분석하였다. 골프 샤프트의 특성인 진동, 비틀림 각, 처짐, Kick point 등 4가지 성능을 4가지 적층 패턴의 소재로 제작된 시제품에 대해 평가를 수행하였다. 해석 결과는 2% 이내에서 실험결과와 잘 일치하였으며, 소재의 섬유각도를 30~70°로 가변하며 골프 샤프트의 기계적 성능을 예측하였다. 이로써, 골프 샤프트에 대한 해석기법 및 섬유각도에 따른 샤프트 성능에 끼치는 영향 등을 확인하였다. Lessard 등[7]은 유한요소해석을 통해 복합재 자전거 프레임의 기계적 성능을 예측하였다. 해석에는 2종의 복합재 프레임 모델, 등방성 셀 요소의 steel 모델, 등방성 빔 요소의 스틸/알루미늄 모델로 총 5가지이었다. 이 중, 스틸과 알루미늄 프레임에 대해서는 실험과 해석을 동일 하중조건에서 수행한 결과, 7% 내의 차이로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 2종의 복합재 프레임의 강성이 나머지 금속 프레임의 강성보다 더 높은 결과를 얻었다. 이로써 해석을 통해 기존 프레임보다 동등이상의 기계적 물성을 가지며 더 가벼운 자전거 프레임 설계 및 성능 예측 기법을 정립하였다.

본 연구에서는 기존의 플라스틱 재질의 인라인 휠과 달리 디스크형의 탄소섬유 복합재 재질의 휠에 대한 설계 및 제작기술을 소개하였다. 탄소섬유 복합재 인라인 휠의 저속 충격거동 평가를 통해, 외부 충격에 대한 거동과 충격 에너지 변화 및 중량 저감 효과를 기존 플라스틱 재질의 휠과 비교분석하였다.

2. 탄소섬유 복합재 디스크 휠 설계 및 제작

2.1 인라인 디스크 휠 설계

기존 플라스틱 사출 휠 허브의 경우, 중량 저감을 위해 휠 센터부를 리브(Rib)형으로 바꾸는 등의 중량저감 노력을 기울여 왔다. 이와 달리 탄소섬유 복합재 휠 허브는 Fig. 1과 같이 원형의 얇은 판을 휠 중심을 기준으로 접합되는 설계 형상이다. 새로운 형상의 특징은 좌우의 탄소 디스크 허브 접합 전에 Inner Retainer를 삽입하여 휠의 정렬을 유지하고 허브의 변형을 최소화하도록 하였다. 본딩 접합된 디스크

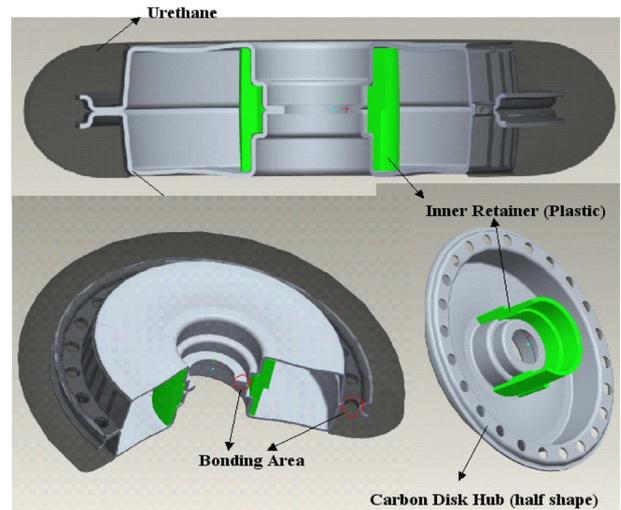


Fig. 1. Design of carbon disk wheel



Fig. 2. Manufacturing process of carbon disk wheel

크 허브는 우레탄과의 결합력을 높이기 위해 홀을 가공하여 좌우가 연결되도록 설계하였다.

2.2 인라인 디스크 휠 제작

설계 형상에 따라 적층 금형, 본딩 지그 및 우레탄 캐스팅 금형은 Fig. 2와 같이 준비하였다. 탄소섬유 복합재 인라인 휠 제작공정은 Fig. 2(a)의 금속 성형금형에 이형제 처리 후, 소재를 적층하고 Ring part, Upper part를 조립하여 고온 프레스에서 규정된 성형 사이클에 따라 탄소섬유 복합재 디스크 휠 허브가 제작되었다. Fig. 2(b)에서는 성형후 끝단부를 트리밍(Trimming)하고, 본딩 지그에서 2개의 탄소섬유 복합재 디스크 허브를 접착제를 사용하여 접합하였다 (Fig. 2(c)). Fig. 2(d)와 같이 본딩된 상태의 탄소섬유 복합재 디스크 휠 허브는 우레탄과 접착력을 높이기 위해 관통 홀을 가공하였다. 직경 4 mm 크기의 홀을 일정간격으로 총 24개 만들었다. Fig. 2(e)와 같이, 준비된 탄소섬유 복합재 디스크 휠 허브를 금형에 삽입 고정하고, 우레탄을 사출성형하여 Fig. 2(f)의 탄소섬유 복합재 인라인 휠 완제품을 제작하였다.

3. 탄소섬유 복합재 디스크 휠 충격특성 평가

3.1 충격성능 평가

3.1.1 시험편 및 충격 시험장치

제작 완료된 탄소섬유 복합재 디스크 휠의 충격 특성을 기존 플라스틱 사출품과의 비교를 위해 저속 자유 낙하시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시료는 3 ply 적층으로 제작된 탄소섬유 복합재 디스크 휠, PC(polycarbonate)/PBT (Polybutylen Terephthalate) 재질의 플라스틱 사출 휠이다. 탄소섬유 복합재는 평직 구조의 CF3327(Hankuk Carbon Co., Korea)에 에폭시 수지가 적용된 형태로 55 GPa의 인장강성,



Fig. 3. Setup for impact test

549 MPa 인장강도, 546.5 MPa 압축강도, 1.5의 비중을 가지며, 플라스틱 휠 재질은 2.37 GPa의 인장강성, 64.5 MPa의 인장강도, 1.2의 비중을 가진다. 사용된 시험 장비는 Instron Dynatup 8250 모델로 Fig. 3에 나타나 있다.

휠을 고정하기 위한 시험 지그는 실제 인라인 프레임과 휠의 조립조건과 동일하게 제작 적용하였다. 휠의 최외곽 부위인 우레탄에 충격을 가하는 타격 추는 노면으로부터 충격되는 실제 조건을 고려하여 면 접촉될 수 있도록 직경 25 mm의 원통형으로 제작 적용하였다.

3.1.2 시험 조건

탄소섬유 복합재 디스크 휠의 충격 특성을 평가하고자, 충격 하중 조건은 5 J~70 J 범위에서 충격이 가해지도록 중량 및 높이를 조절하여 충격 에너지를 조절하였다.

3.2 충격특성 분석

3.2.1 하중-접촉시간 선도

충격하중은 휠 상단 중앙부에 5, 10, 20, 45, 70 J의 충격에너지를 가했을 때의 타격 추에 연결된 로드셀에서 측정된 하중값으로 정의된다. 탄소섬유 복합재 휠과 플라스틱 휠의 하중-접촉시간 선도는 Fig. 4와 Fig. 5와 같다. 탄소섬유 복합재 휠의 경우, 하중-접촉시간 선도는 낮은 충격에너지인 5 J과 10 J에서는 포물선 형상을 나타내지만, 20 J 이상의

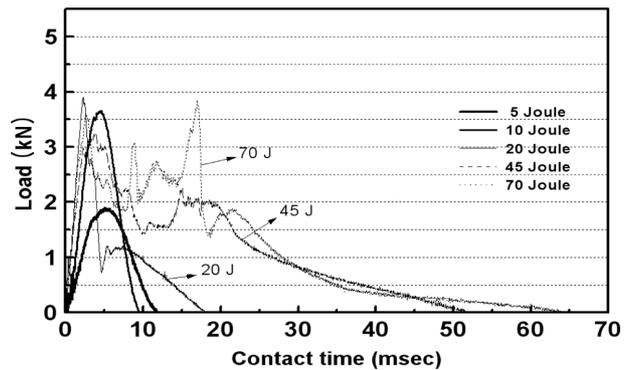


Fig. 4. Load vs. contact time curves of carbon wheel

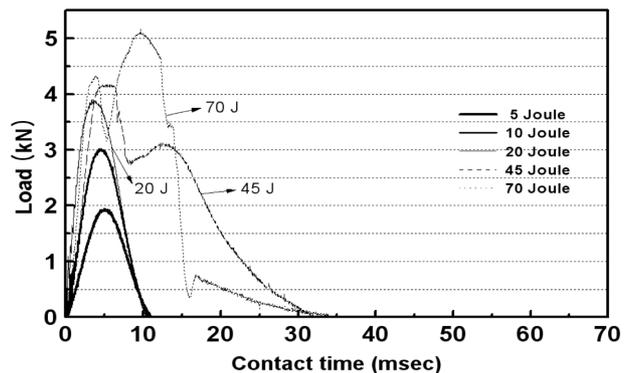


Fig. 5. Load vs. contact time curves of plastic wheel

Table 1. Maximum load and contact time of carbon wheel

Impact Energy (J)	Max. Load (kN)	Contact Time (msec)
5	1.91	11.74
10	3.66	9.44
20	3.90	18.22
45	3.26	52.34
70	3.61	63.75

Table 2. Maximum load and contact time of plastic wheel

Impact Energy (J)	Max. Load (kN)	Contact Time (msec)
5	2.08	10.52
10	3.02	10.49
20	3.90	10.76
45	4.17	31.96
70	5.16	32.48

충격에너지에서는 하중이 급격히 상승했다가 파손의 원인으로 감소되며 파손으로 인해 접촉시간도 상당히 길어졌다(Table 1). 플라스틱 휠의 경우는 5 J~20 J 충격에너지에서 하중은 포물선 형상을 나타내어 손상이 없는 것으로 확인되며, 일정한 접촉시간을 보이고 있다(Table 2). 45 J, 70 J의 충격에서는 최대 하중은 증가하였으나, 손상 발생으로 접촉시간이 길어진 것을 확인할 수 있다.

3.2.2 하중-변형 선도

Fig. 6에서는 탄소섬유 복합재 휠과 플라스틱 휠의 외부 충격에너지에 따른 하중-변형 선도를 나타내고 있다. 5 J의 낮은 충격에너지에서는 주로 최외곽의 우레탄 층의 변형

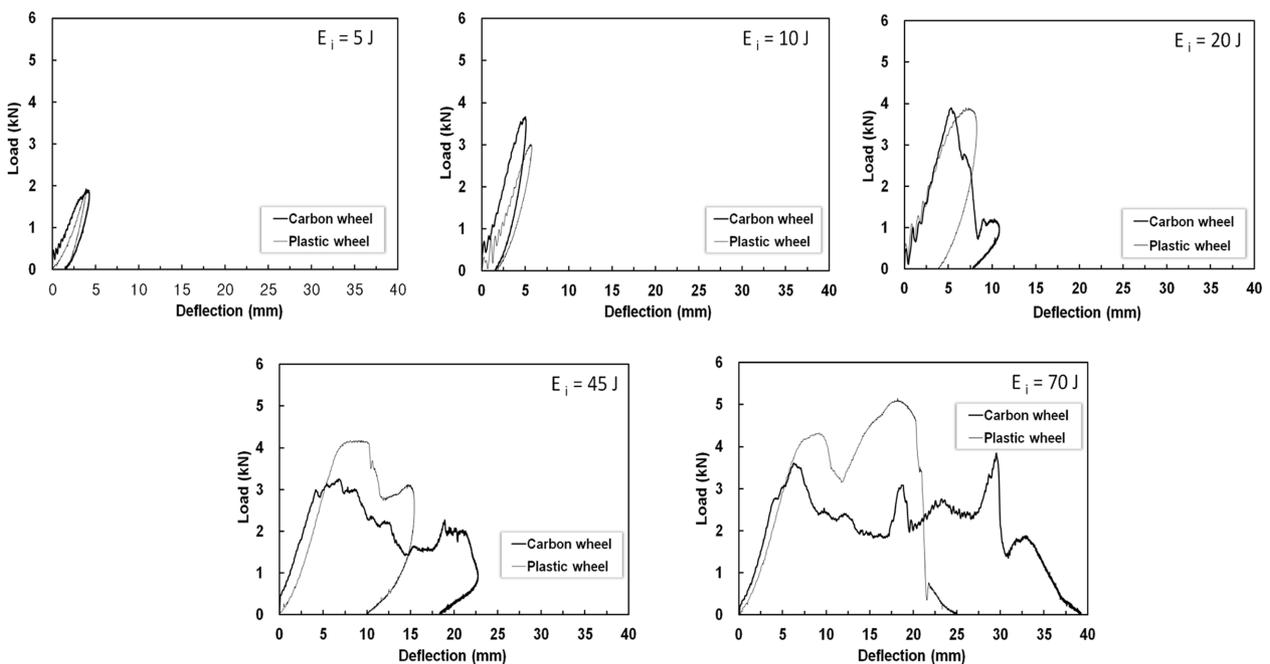
과 얇은 탄소섬유 복합재 허브의 변형으로 최대 변형이 플라스틱 휠에 비해 크지만, 10 J의 충격에서는 탄소섬유 복합재 휠 얇은 층의 저항으로 작은 변형이 발생하였다. 20 J에서는 탄소섬유 복합재 소재의 접합부에서의 층간분리로 큰 변형이 발생하였고, 45 J, 70 J에서도 최대하중 증가없이 파손으로 큰 변형이 발생하였다. 반면, 플라스틱 휠은 20 J에서도 손상없이 최대하중은 증가하였고, 45 J 및 70 J의 충격에서도 최대하중은 증가하였으나, 휠 리브 부분의 손상으로 큰 변형이 발생하였다.

3.2.3 변형-접촉시간 선도

Fig. 7과 Fig. 8에서는 탄소섬유 복합재 휠과 플라스틱 휠의 변형-접촉시간 선도를 보여주고 있다. 탄소섬유 복합재 휠의 경우, 5 J과 10 J의 충격에서는 최대 처짐 발생 이후 바로 원 위치로 돌아오지만, 20 J의 경우는 최대 처짐 발생 이후 일부 손상으로 원 위치로 돌아오는데 긴 시간이 소요됨을 확인할 수 있다. 45 J과 70 J에서는 영구 변형이 발생됨이 확인되었다. 플라스틱 휠의 경우에는 20 J까지의 충격에서는 일정 시간내에 원 위치로 돌아 왔으나, 45 J과 70 J의 충격에서는 영구변형이 발생하였다.

3.2.4 에너지-시간 선도

하중-변형 선도로부터 계산된 에너지-시간 선도는 Fig. 9에 나타내었다[8,9]. 에너지-시간 선도의 결과는 20 J까지의 거동을 비교하였다. 타격 추로부터 시료에 전달된 에너지는 최대치까지 증가되다가 타격 추가 시료에서 분리되면서 에너지는 감소되다가 일정한 값을 유지하거나, 손상이

**Fig. 6.** Load vs. deflection curves of carbon wheel and plastic wheel for various impact energies

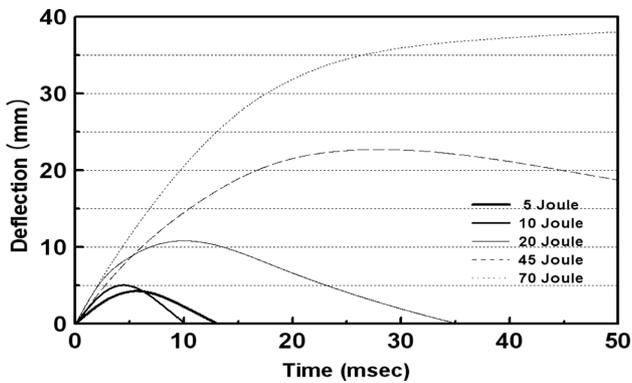


Fig. 7. Deflection vs. contact time curves of carbon wheel

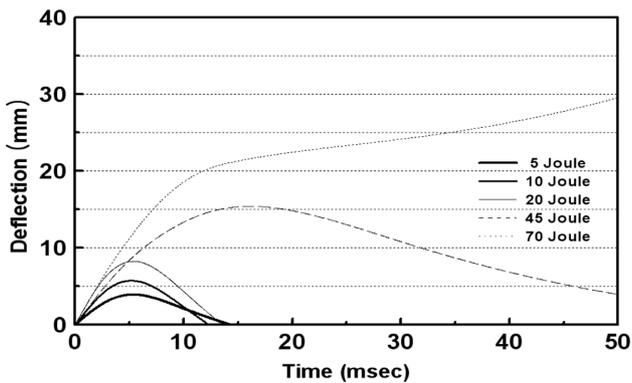


Fig. 8. Deflection vs. contact time curves of plastic wheel

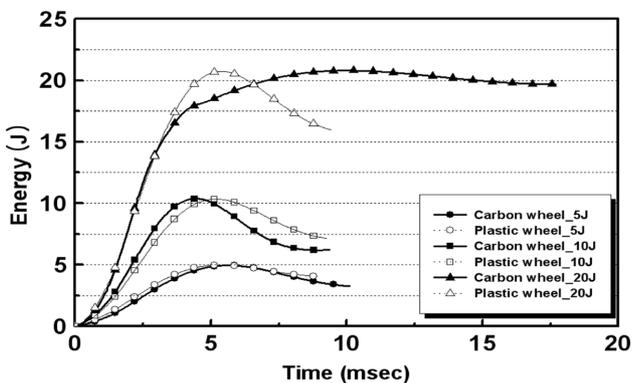


Fig. 9. Energy vs. contact time curves of carbon wheel and plastic wheel

Table 3. Energy results of carbon wheel

Impact Energy (J)	Max. Energy (J)	Repulsive Energy (J)	Absorbed Energy (J)
5	4.93	1.74	3.19
10	10.36	4.15	6.21
20	20.80	1.13	19.67
45	47.25	1.61	45.64
70	73	-	73

있을 시에는 최대치에서 일정하게 유지가 된다. 일정한 값을 유지하는 것은 시료에 영구 전달된 에너지(흡수 에너지)를 의미한다. 최대에너지 즉, 전체에너지에서 시료에 흡수되고 나머지는 타격 추의 운동에너지 즉, 반발에너지 (Repulsive Energy)로 타격 추에 전달된다. Table 3에서는 낮은 외부 충격인 5 J, 10 J에서는 탄소섬유 복합재 휠의 경우에 최대에너지의 35%, 40%까지 타격 추로 전달됨을 확인할 수 있다. 그 보다 더 큰 충격인 20 J, 45 J의 충격에서는 5%, 3.4%로 반발에너지의 비율이 줄어들고, 70 J의 충격에서는 거의 모든 에너지가 변형되어 흡수되는 것을 볼 수 있다. 20 J의 외부 충격에 탄소섬유 복합재 휠의 파손 형태를 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 얇은 판형의 탄소섬유 복합재 허브 접합부에서 크랙이 발생하였다.

플라스틱 휠의 경우는 5, 10, 20, 45 J 충격이 커짐에 따라 반발에너지의 비율이 19.1, 32.2, 24.0, 7.5%로 Fig. 11과 같은 손상으로 인해 45 J 충격에서부터 큰 폭으로 감소되는 결과를 보인다.

외부 충격에 대한 반발 특성을 재질에 따라 비교해 보면, Fig. 9와 Table 3, Table 4에서 전체 에너지는 유사한 값을 보이고 있으며, 반발에너지의 비율은 5 J 충격에서 탄소섬유 복합재 휠과 플라스틱 휠은 각각 35.3, 19.1%이며, 10 J 충격의 경우는 각각 40, 32%의 반발 특성을 보였다. 이는 작은 외부충격인 5 J, 10 J이 가해질 때, 탄소섬유 복합재 휠의 얇은 0.75 mm 두께 층이 변형되었다 복구되는 가역변형 과정이 우수한 반발 효과로 작용한 것으로 보인다.

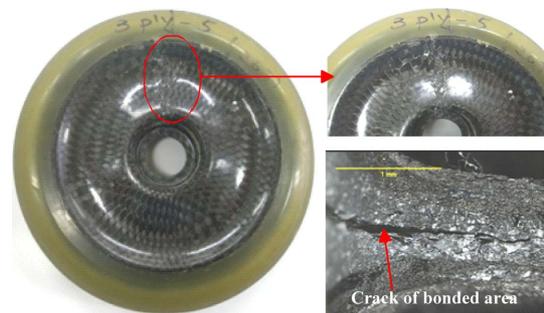


Fig. 10. Fractography of carbon wheel (20 J impact)



Fig. 11. Fracture of plastic wheel (45 J impact)

Table 4. Energy results of plastic wheel

Impact Energy (J)	Max. Energy (J)	Repulsive Energy (J)	Absorbed Energy (J)
5	4.97	0.95	4.02
10	10.33	3.33	7.00
20	20.73	4.98	15.76
45	45.82	3.45	42.37
70	73	-	73

3.3 경량화를 분석

탄소섬유 복합재 디스크 휠과 기존 플라스틱 휠의 중량은 각각 101 g, 114 g으로 탄소섬유 복합재 적용으로 12.3%의 경량화 효과를 얻었다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적인 인라인 스케이트의 휠 허브 구조를 기존의 플라스틱 사출 휠과 달리 탄소섬유 복합재 휠의 허브는 얇은 판형의 디스크 구조로 설계하고, 휠의 동심을 유지하고 디스크 형태의 탄소섬유 복합재 인라인 휠 제작기술을 소개하였다. 본 연구를 통해 실제 인라인 활용 시 받게 되는 외부충격에 대해 저속 충격시험을 통해 탄소섬유 복합재 휠의 성능을 기존 플라스틱 재질 휠과 비교분석하였다. 그 결과, 작은 충격인 5 J에서는 반발에너지의 비율은 탄소섬유 복합재 휠, 플라스틱 휠 각각 35.3%, 19.1%로 탄소섬유 복합재 휠의 경우가 큰 값을 보이며 경기력 향상에 효과가 있음을 확인하였다. 이 보다 더 큰 하중인 20 J에서는 얇은 판형 구조의 탄소 휠에서 큰 손상 발생으로 인해 보

완이 필요함을 확인하였다.

REFERENCES

1. Kim, W.-D. and Hong, D.-J., "Design of an Aircraft Composite Window Frame Using VaRTM Process", *J. Korean Society for Composite Materials*, Vol. 19, No. 6, 2006, pp. 1-7.
2. Shin, K.-B., Ko, H.-Y., and Cho, S.-H., "A Study on Crashworthiness and Rollover Characteristics of Low-Floor Bus made of Honeycomb Sandwich Composites", *J. Korean Society for Composite Materials*, Vol. 21, No. 1, 2008, pp. 22-29.
3. Kim, J.-S., Jeong, J.-C., and Lee, S.-J., "An Experimental Study on the Hybrid Composite Carbody Structure", *J. Korean Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 6, 2005, pp. 19-25.
4. Kim, M.-S., Han, D.-C., Kim, S.-J., and Lee, W.-I., "Optimization of Stacking Sequence for Composite Golf Club Shafts", *J. Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 1, 2007, pp. 1-7.
5. Lee, B.S., "Design and Manufacture of CFRP Pipe for Bicycle Frame", *J. Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 6, 2003, pp. 130-137.
6. Cheong, S.K., Kang, K.W., and Jeong, S.K., "Evaluation of the Mechanical Performance of Golf Shafts", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, 2006, pp. 464-473.
7. Lessar B. Larry, James A. Memes and Patrick L. Lizotte, "Utilization of FEA in the Design of Composite Bicycle Frames", *Composites*, Vol. 26, No. 1, 1995, pp. 72-74.
8. Cesin Atas and Onur Sayman, "An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plate", *Composite Structure*, Vol. 82, 2008, pp. 336-345.
9. Cesin Atas and Dahsin Liu, "Impact Response of Woven Composites with Small Weaving Angles", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, 2008, pp. 80-97.