

자동차용 탄소섬유/에폭시 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠 설계 및 성능평가

홍진호* · 유성환* · 장승환*†

Design and Performance Evaluation of Carbon Fiber/Epoxy Composite-aluminum Hybrid Wheel for Passenger Cars

Jin-Ho Hong*, Seong-Hwan Yoo*, Seung-Hwan Chang*†

ABSTRACT: In this paper, a carbon fiber/epoxy composite-aluminum hybrid wheel for passenger cars was suggested for better performance and a prototype was fabricated and tested. Adhesive bonding between aluminum part and a composite rim part was used, and the bonding length and thickness were determined by finite element analysis. For self alignment and the function of bonding jig the special structure with a groove and a protrusion was applied. To evaluate the performance of the hybrid wheel various FE analyses were carried out. Inner and outer molds were prepared for the composite rim part and the thermoformed composite part was bonded to the aluminum part. Vibration tests revealed that the hybrid wheel had 16% higher resonance frequency and 32% higher damping capacity with 10% weight reduction.

초 록: 본 연구에서는 차량의 승차감 향상을 위해 기존의 알루미늄 차량용 휠의 성능을 개선하고자 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠을 제안하고 시제품을 제작하여 평가하였다. 유한요소해석 기법을 통해 알루미늄과 복합재료의 접착부에 대한 접착 길이와 접착 두께를 결정하고, 자동조심 및 접착 지그 역할을 할 수 있는 홈과 돌기 구조를 적용하였다. 차량용 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠의 성능평가를 위해 다양한 실험을 유한요소해석을 통해 구현하고 안전성을 검토하였다. 복합재료 림 부의 성형을 위한 금형을 설계하고 진공백 성형방법으로 제작한 후 알루미늄 부와 접착을 하여 시제품을 완성하였다. 진동실험 결과, 동일한 형상의 알루미늄 휠보다 10% 가벼운 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠의 경우 고유진동수가 16% 증가하였고, 감쇠능이 32% 증가하였다.

Key Words: 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠(composite-aluminum hybrid wheel), 접착제 접합(adhesive bonding), 중량 감소(weight reduction)

1. 서 론

최근 자동차가 고급화 되면서 차량의 승차감 등 감성 품질에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 따라 관련 연구들이 활발히 수행되고 있다. 섬유강화 복합재료의 우수한 기

계적 물성은 차량의 연비 개선, 경량화, 안전성 그리고 승차감 개선 등에 많은 기여를 하고 있다. 특히 차량 경량화를 통한 연비 개선은 지구 온난화와 관련하여 법제계적으로 강화되고 있는 환경규제 기준에 부합하기 위한 필수요건이다[1-3]. 이러한 차량 경량화 연구의 일환으로 휠과 같

Received 23 November 2013, accepted 10 December 2013

*중앙대학교 기계공학과 대학원

*† 중앙대학교 기계공학과 대학원, Corresponding author (E-mail: phigs4@cau.ac.kr)

이 회전하는 요소의 질량 감소를 위한 노력이 많은 연구자에 의해 이루어졌다.

Deepak 등[4]은 알루미늄, 마그네슘, 아연 재질의 차량용 휠에 대하여 각각 정적해석, 피로해석, 진동해석 등을 수행하고 그 결과를 비교하여 알루미늄 휠의 우수성을 규명하였다. Kim[5]은 진동 실험을 통해 알루미늄 휠과 철제 휠의 주파수 응답함수를 비교하여 알루미늄 휠의 공진주파수와 감쇠비 등 진동 특성이 더 우수함을 보였다. 복합재료를 이용한 휠의 설계 및 제작에 대한 연구도 활발히 이루어졌다. Kim 등[6]은 수지이송법(Resin Transfer Molding)을 통해 휠 전체를 성형하는 연구를 수행하였으며, 기존의 알루미늄 휠보다 33% 경량화된 복합재료 휠을 제작하여 정적하중 지지능력 등의 기본적인 성능을 평가하였다. 하지만 수지 이송법을 이용한 휠의 제작은 스포크 부의 복잡한 형상으로 인해 수지과다영역(Resin rich area)과 프리폼의 불균일한 젖음현상 등의 문제가 발생하였다. 이외의 많은 연구자들이 전체 휠을 복합재료를 이용해 설계하려는 시도를 하였으나, 구조의 복잡성에 기인하여 대부분 시작품 제작 수준에 머물렀다. 본 연구자들을 포함하여 몇몇 연구자들은 스포크 부의 복잡한 형상에 기인한 근본적인 문제를 해결하기 위해, 복잡한 형상을 가진 스포크 부는 기존의 금속 재질을 사용하고 비교적 형상이 단순한 림(Rim) 부를 섬유강화 복합재료로 설계하여 두 이종재료를 체결하는 방식을 제시하였다[7-9]. 본 연구에서는 이와 같은 최근 방식을 도입하여 휠의 림 부를 탄소섬유/에폭시 복합재료로 설계하고, 기존의 알루미늄 스포크 부와 접착제로 접착하는 방식을 제안하였다.

제안한 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠을 제작하기 위해서는 이종재료간의 접착에 관한 연구가 수행되어야 한다. Kelly 등[10]은 복합재료-금속 단면접치기 조인트의 피로수명에 관한 연구를 진행하고 그 결과를 복합재료-금속 하이브리드 휠 설계에 이용하였다. Kim 등[11]은 자동차 구조용 접착제 접합 구조물의 전단 충격 강도 특성을 파악하고자 실험과 해석을 수행하고, 그 결과를 비교하여 충격 속도에 대한 구조물에 발생하는 하중의 크기 및 발생 위치를 파악하였다.

본 연구에서는 탄소섬유/에폭시 복합재료를 이용한 차량용 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠을 제작하기 위해 해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 복합재료와 알루미늄의 접착 부분을 설계하고 다양한 시뮬레이션을 통하여 휠의 안정성을 검토하였다. 또한 알루미늄 스포크부와 복합재료 림부와의 효율적인 접착을 위해 접착부에 각각 홈(Groove)과 돌기구조를 설계하여 접착시 구조물의 자동조심 및 접착지그 역할을 할 수 있도록 설계하였다. 유한요소해석을 통해 접착부의 최종 설계사양을 결정한 후 금형을 제작하여 시제품을 만들고 해당 제품의 진동테스트 결과를 바탕으로 우수성을 확인하였다.

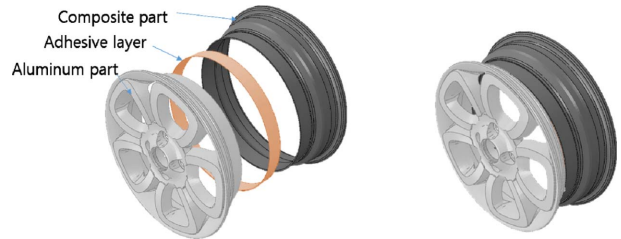


Fig. 1. Shape and composition of the composite-aluminum hybrid wheel

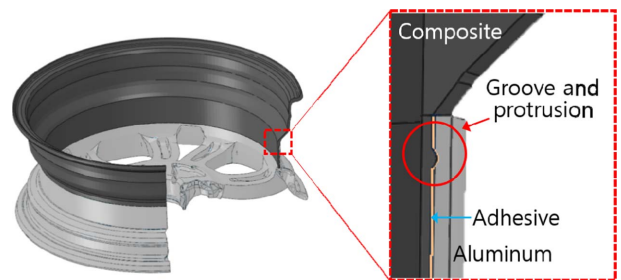


Fig. 2. Structure of the bonding parts; groove and protrusion

2. 형상 및 구조정보

본 논문에서 제안한 탄소섬유/에폭시 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 형상이 복잡한 스포크 부 및 림의 외측부분은 기존과 동일한 알루미늄으로 구성되어 있으며, 비교적 형상이 간단한 림의 내측 부분은 복합재료로 구성되어 있다. 또한 이 두 부분을 접착해주는 접착층이 이 사이에 존재한다. 자동차 휠이 고속으로 회전하는 구조임을 고려하여 알루미늄과 복합재료 두 구조의 동심축 일치를 보장하고, 알루미늄 부와 복합재료 부의 효율적인 접착을 위해 Fig. 2와 같이 홈과 돌기 구조를 적용하였다.

3. 실험

3.1 접착제의 인장실험

본 연구에 사용할 접착제(Loctite 3128)의 물성을 확인하기 위하여 인장 실험을 실시하였다. 실험표준 규격(ASTM D638)를 참고하여 시편을 제작하고 실험을 수행하였다. 실험은 만능 시험기(MTS-810)를 이용하여 1.3 mm/min으로 인장하여 4회의 실험을 실시하고 대표적인 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 접착 강도 실험

접착제로 접착된 알루미늄과 복합재료 구조의 접착력을 확인하기 위해 복합재료-알루미늄 단면접치기 접착 조인트의 인장실험을 수행하였다. 시편의 형상을 Fig. 4(a)에 제

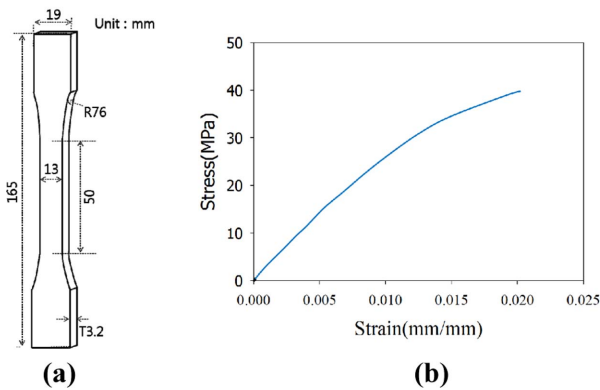


Fig. 3. Configuration of the adhesive tensile test; (a) shape and dimension of specimen, (b) representative stress-strain curve

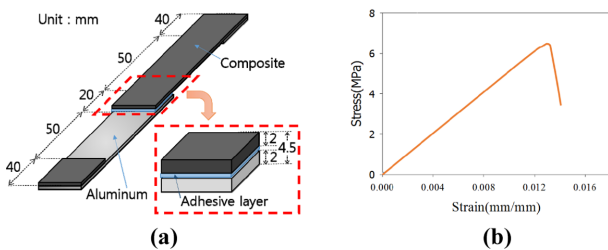


Fig. 4. Single lap joint bonding test; (a) shape and dimension of the specimen, (b) representative bonding strength test result

시하였다. 시편의 복합재료 부는 실제 휠 제작에 사용될 적층순서를 고려하여 $[0]_{8T}$ 로 적층되었으며, 알루미늄과 복합재료 사이에 0.5 mm의 접착층을 형성하도록 제작되었다. 실험은 실험표준 규격(ASTM D1002, D5868)에 따라 실시되었다. 만능 시험기(MTS 810)를 이용하여 1.3 mm/min으로 인장하여 4회의 실험을 실시하고 대표적인 실험결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다.

4. 유한요소해석

4.1 하이브리드 휠의 재료 및 구조

차량용 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠을 제작하기 위해 알루미늄(6061-T6), 직물형 탄소섬유/에폭시 복합재료(WSN3k, SK Chemical, Korea) 그리고 에폭시 접착제(Loctite 3128)가 사용되었다. 이 재료에 대한 물성을 Table 1에 정리하였다.

본 논문에서 제안한 탄소섬유/에폭시 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠의 형상을 Fig. 1에 나타내었으며, 해석을 위한 3차원 유한요소모델을 Fig. 5에 제시하였다. 적절한 접착조건을 구하기 위해, 접착길이와 접착두께를 설계변수로 하여 다양한 응력해석을 수행하였다.

Table 1. Material properties

Aluminum (6061-T6)			
Density	2700 kg/m ³	E	68.9GPa
σ_{yield}	275.79 MPa	$\sigma_{ultimates}$	310.656MPa
ν	0.3	Elongation	17%
Carbon/epoxy (WSN3k)			
Density	1480 kg/m ³	E_1, E_2	70 GPa
E_3	10 GPa	G_{12}, G_{13}	3.5 GPa
G_{13}, G_{23}	5.06 GPa	ν_{12}, ν_{13}	0.13
ν_{23}	0.13	X_t	778 MPa
X_c	591MPa	Elongation	1.8%
Adhesive (Loctite 3128)			
Density	1700 kg/m ³	E	3.9GPa
$\sigma_{ultimate}$	38MPa	Elongation	2.3%

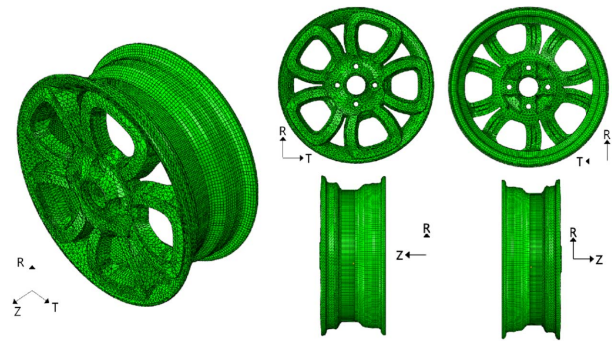


Fig. 5. Finite element model of the composite-aluminum hybrid wheel

본 연구에서는 일반적인 승용차 휠의 설계 기준을 유한요소해석 기법을 이용해 평가하였다.

4.2 정적 측면 하중

승용차 휠의 경우 30 ton에 대한 정적 측면하중 내구성이 요구된다. 따라서 정적 측면하중 실험을 유한요소해석 기법으로 구현하여 접착 길이 및 두께에 따른 에폭시 접착층의 최대 전단응력을 계산하고 접착부의 형상 및 조건을 결정하였다. 해석 개요는 Fig. 6과 같다. 접착길이는 10 mm, 20 mm, 30 mm 그리고 35 mm에 대하여, 접착두께는 0.1 mm, 0.3 mm 그리고 0.5 mm에 대하여 해석을 수행하였다. 해석

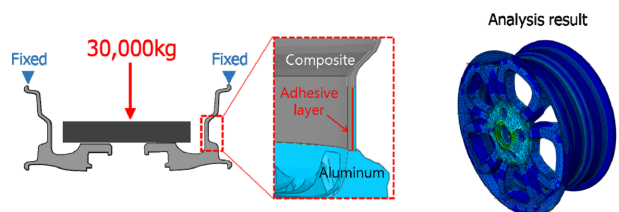


Fig. 6. Configuration of Static lateral loading test

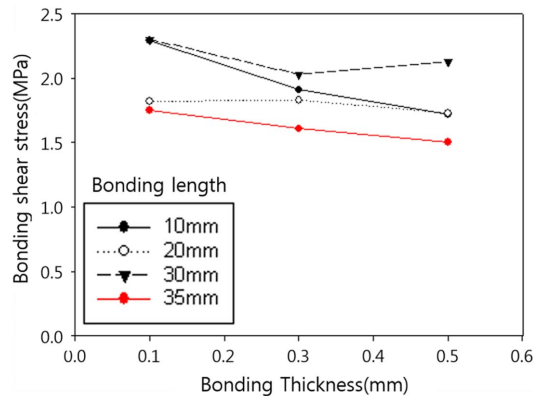


Fig. 7. Result of the static lateral loading test according to bonding length and thickness

결과 에폭시 접착층은 모든 경우 실험하중으로부터 안전한 것으로 나타났다.

또한 접착층의 전단응력은 접착 길이 및 두께와 반비례하는 것으로 나타났다. Fig. 7에 제시된 해석결과를 보면 35 mm의 접착 길이와 0.5 mm의 접착 두께를 가지는 경우 가장 안전함을 확인할 수 있다.

4.3 회전 및 굽힘 피로 성능

림의 회전 및 굽힘 피로성능 역시 유한요소 해석을 통하여 평가하였다. 전체적인 해석조건을 Fig. 8에 제시하였다. 자동차 업체에서 권장하는 2,000,000 사이클의 회전 피로파괴 기준을 확인하기 위해 휠에 실험 하중을 구현하여 적용한 후 발생한 응력을 살펴보았다. 각 재료의 피로곡선에서 2,000,000 사이클에 해당하는 하중을 기준 하중으로 설정하여 해석 응력값이 기준하중보다 작을 경우 안전하다고 판단하였다. 정적 측면 하중 해석 시 확인된 가장 우수한 접

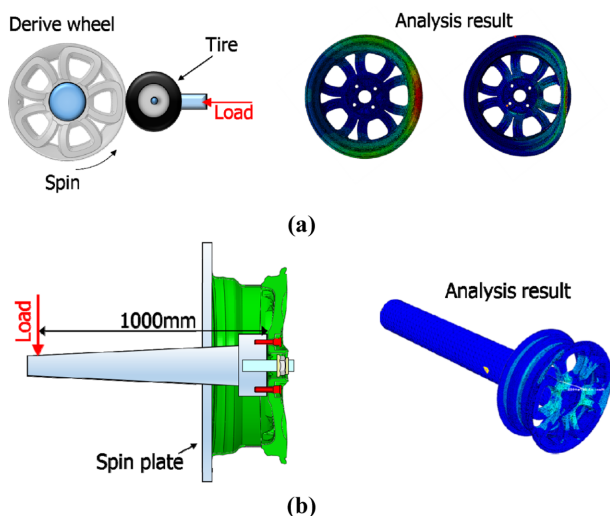


Fig. 8. Configuration of the analysis of the wheel; (a) rolling fatigue test, (b) rotary bending fatigue test

Table 2. Results of the analysis of rolling fatigue and rotary bending fatigue

	Aluminum part	Adhesive layer		Composite part
		von-Mises	shear	
Load for 2,000,000 cycles	less than 310 MPa	less than 35 MPa	less than 7.0 MPa	less than 591 MPa
Rolling rim [MPa]	77.36	7.405	0.8876	77.35
Rotary bending [MPa]	78.36	1.726	0.2997	17.96

착 조건(길이 35 mm, 두께 0.5 mm)으로 해석을 수행한 결과 복합재료, 알루미늄, 그리고 에폭시 접착층 모두 각 재료의 피로 강도보다 낮은 응력이 작용하는 것을 확인하였다. 또한 굽힘 피로파괴의 경우도 같은 기준과 방법으로 평가하였다. Table 2의 해석결과를 보면 회전 피로실험과 마찬가지로 굽힘 피로실험 역시 모든 재료에서 기준 하중보다 낮은 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

5. 시제품 제작

5.1 금형 제작

복합재료-알루미늄 하이브리드 휠에서 복합재료로 구성된 내측 부분을 제작하기 위해 4등분된 외측 금형을 제작하였다(Fig. 9). 금형은 원활한 열전달을 위하여 비교적 열전도율이 높은 알루미늄을 이용하였고, 추가적인 구멍가공을 통해 탈형이 쉽도록 고안하였다. 해석된 결과를 바탕으로 휠의 알루미늄 부분과 복합재료 부분이 접착길이 35 mm, 접착두께 0.5 mm를 갖도록 설계하였다. 내측 금형은 복합재료가 외측 금형에 효과적으로 압밀 될 수 있도록 금형용 실리콘을 사용하여 제작하였다.

5.2 복합재료 부의 성형 및 접착

위에서 제작한 금형을 이용해 복합재료 부분을 성형하였다. 금형의 각 파트를 체결 후, 축방향 경사 형상에 복합재료를 원활하게 적용하기 위하여 일정간격으로 자른 복합재료를 10 mm씩 중첩되게 적층하였다. 적층 과정에서 섬유 연속성을 최대한 확보하기 위해 중첩위치에서의 섬유 방향을 일치시켰다. 평직구조의 복합재료를 각 층간에

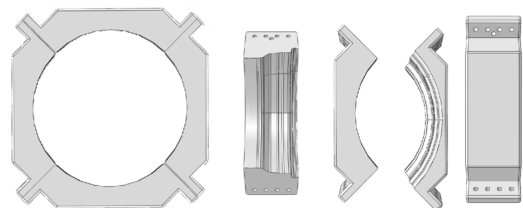


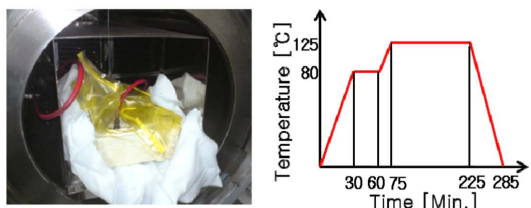
Fig. 9. Aluminum mould for thermoforming of a composite part



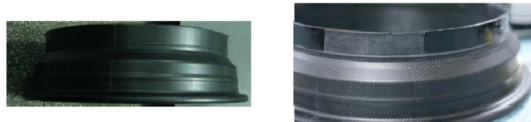
Assembly of Al-mould and Composite stacking



Assembly of inner mould and Degassing



Curing



Composite part and Spreading of adhesives



Bonding and Tire-mounted

Fig. 10. Fabrication process

교차로 적층함으로써 섬유 단속에 따른 영향을 최소화 하였다. 이후 실리콘 내부 금형을 체결한 후 진공백 성형을 위해 테프론 필름, 브리더 그리고 진공 필름 등을 이용하여 포장해 주었다. 이후 진공백 성형법으로 오토클레이브 안에서 온도와 압력을 가하여 성형하였다. 성형은 30분간 80°C 까지 가열 후 30분간 80°C를 유지하였다. 그 다음 15분 동안 125°C까지 가열시키고 150분동안 온도를 유지한 후 자연냉각시켜 주었다. 그 후 알루미늄으로 구성된 외측 부분

과 접착하기 위해 접착 부분에 접착제를 도포하고 알루미늄 부분과 체결한 후 120°C로 가열하여 접착제를 경화시켜 주었다. 전체적인 제작과정 및 성형 사이클을 Fig. 10에 제시하였다.

6. 진동 실험

제작한 시제품의 성능을 평가하기 위해 진동 실험을 수행하고 그 결과를 기존의 알루미늄 휠의 실험결과와 비교하였다. Fig. 11과 같이 휠이 최소한으로 구속되도록 스포크 부를 끈으로 고정하고, 충격 해머와 가진기를 사용하여 진동실험을 수행하였다. 제작한 시제품과 기존의 알루미늄 휠을 각각 10회씩 반복하여 실험하고 실험결과에의 평균값을 비교하였다. 알루미늄 휠과 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠의 주파수 응답함수는 Fig. 12와 같다.

진동실험 결과 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠의 고유진동수는 602 Hz로 측정되었으며, 512 Hz의 고유진동수를 갖는 알루미늄 휠에 비해 약 16% 증가하였다. 이에 따라 노면이나 타이어에 가해지는 저 주파수 대역에서 나타나는 공진현상이 일어날 확률이 다소 줄어들 것으로 판단된다. 두 휠의 감쇠능을 계산한 결과 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠이 0.178%로 감쇠능이 0.135%인 알루미늄 휠에 비해 32% 증가하였다. 이를 통해 높은 승차감이 요구되는

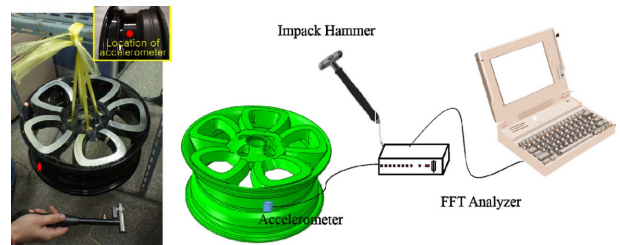


Fig. 11. Configuration of the vibration tests

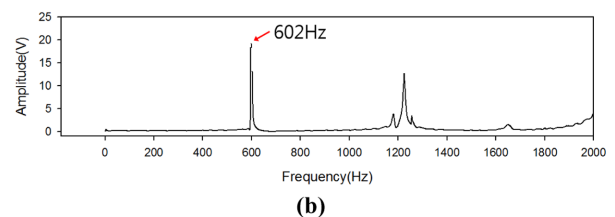
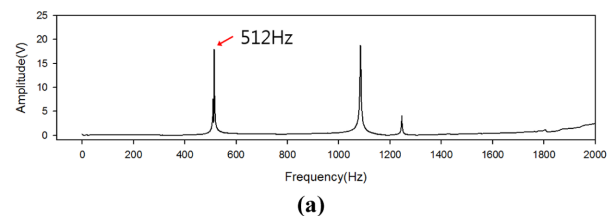


Fig. 12. Frequency response function of the wheels; (a) aluminum wheel, (b) hybrid wheel

최근의 경향에 부합하는 고성능 휠로서의 가능성을 확인하였다.

7. 결 론

본 연구에서는 경량구조와 승차감 향상을 위한 탄소섬유/에폭시 복합재료-알루미늄 하이브리드 휠을 설계하고 제작하였다. 제작의 용이성을 위해 휠의 스포크와 외측 림 부는 알루미늄으로 구성하고 내측 림 부는 복합재료로 구성하여 두 구조를 접착제를 이용하여 접착하는 방식을 제시하였다. 자동차 휠의 설계기준을 유한요소해석 기법으로 모사하여 복합재료 부와 알루미늄 부의 접착 사양(접착길이 및 접착두께)을 결정하고, 주요 하중조건에 대한 응력 해석을 통해 구조의 안전성을 검증하였다. 해석결과 접착 길이가 길고, 접착 두께가 두꺼울수록 안전성이 증가하였지만, 본 연구에서는 휠 형상을 고려하여 접착길이를 35 mm, 접착두께를 0.5 mm로 결정하였으며, 이러한 접착부 조건에 대해 주요 하중조건을 유한요소해석에 적용한 결과, 모든 구조물에서 파손응력보다 낮은 수준의 응력이 발생함을 확인하였다. 설계된 휠을 제작하기 위해 금속 금형 및 실리콘 금형을 제작한 후 금형 내부에 복합재료를 적층하는 방식을 통해 진공백 성형법으로 시제품을 제작하였다. 복합재료 부와 알루미늄 부의 접착과정에서 두 구조의 회전축을 일치시키고, 접착과정 중 고정지그의 역할을 할 수 있는 홈과 돌기 구조를 도입하여 접착과정의 효율을 증가시켰다. 제작된 시제품의 성능을 평가하기 위해 진동실험을 수행하였다. 진동실험 수행 결과 복합재료를 적용함으로써 기존 알루미늄 휠에 비하여 고유진동수가 16% 증가하였으며, 감쇠능이 32% 증가하였고, 무게가 10% 경량화되었다. 이 연구결과는 차량의 연비 및 승차감 개선에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Kim, K.S., Bea, K.M., Oh, S.Y., Seo, M.K., Kang, C.G., and Park, S.J., "Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Light-weight Vehicles," *Elastomers and Composites*, Vol. 47, No. 1, 2012, pp. 65-74.
- Kang, W.J., and Kim, S.T., "High Strain Rate Tensile Test of Composite Material for Automotive Front End Module Carrier," *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 20-24.
- Lee, M.S., Kim, H.H., and Kang, C.G., "Effect of Surface Roughness of Al5052/CFRP Composites on the Adhesion and Mechanical Properties," *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 26, No. 5, 2013, pp. 295-302.
- Deepak, S.V., Naresh, C., and Hussain, S.A., "Modelling and Analysis of Alloy Wheel for Four Wheeler Vehicle," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 1, No. 3, 2012, pp. 72-80.
- Kim, B.S., "A Study on Vibration Characteristics of Automobile Al-alloy Wheel," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 3, 2005, pp. 122-127.
- Kim, P.J., and Lee, D.G., "Improvement of Surface Quality and Development of Composite Wheel for Passenger Cars Manufactured by RTM," *Proceeding of Conference on KSPE*, Jeju, Korea, Vol. 3, No. 54, 2003, pp. 54-57.
- Yoo, S.H., Lim, T.S., Kim, H.J., Lee, Y.S., and Chang, S.H., "The Development of Composite-aluminum Hybrid Vehicle Wheel," *Proceeding of Conference on ACCM7*, Taipei, Taiwan, 15-18 November 2010.
- Yoo, S.H., Park, S.W., and Chang, S.H., "The Design and Fabrication of a Composite-aluminum Hybrid Vehicle Wheel," *Proceeding of Conference on ICCS16*, Porto, Portugal, 2011.
- Yoo, S.H., and Chang, S.H., "Design and Fabrication of an Aluminum-composite Hybrid Vehicle Wheel Using Adhesive Bonding Method for Weight Reduction and Ride Comfort," *Proceeding of Conference on ISGMA2011*, Seoul, Korea, 5-7 October, 2011.
- Kelly, G., "Quasi-static Strength and Fatigue Life of Hybrid (bonded/bolted) Composite Single-lap Joints," *Composite Structures*, Vol. 72, No. 1, 2006, pp. 119-129.
- Kim, Y.H., Park, S.K., Kim, D.O., Ryu, Y.M., and Cheon, S.S., "A Study on the Shear Impact Characteristics of Adhesively Bonded Tubular Joints," *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25, No. 1, 2012, pp. 14-18.
- Kim, K.S., Bea, K.M., Oh, S.Y., Seo, M.K., Kang, C.G., and Park,