

열처리된 Pine/탄소섬유 복합재료의 기계적 및 계면물성 향상을 위한 최적 조건

신평수* · 김중현* · 박하승* · 백영민* · 권동준** · 박종만*†

Optimum Conditions for Improvement of Mechanical and Interfacial Properties of Thermal Treated Pine/CFRP Composites

Pyeong-Su Shin*, Jong-Hyun Kim*, Ha-Seung Park*, Yeong-Min Baek*,
Dong-Jun Kwon**, Joung-Man Park*†

ABSTRACT: The brittle nature in most FRP composites is accompanying other forms of energy absorption mechanisms such as fibre-matrix interface debonding and ply delamination. It could play an important role on the energy absorption capability of composite structures. To solve the brittle nature, the adhesion between pines and composites was studied. Thermal treated pines were attached on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) by epoxy adhesives. To find the optimum condition of thermal treatment for pine, two different thermal treatments at 160 and 200°C were compared to the neat case. To evaluate mechanical and interfacial properties of pines and pine/CFRP composites, tensile, lap shear and Izod test were carried out. The bonding force of pine grains was measured by tensile test at transverse direction and the elastic wave from fracture of pines was analyzed. The mechanical, interfacial properties and bonding force at 160°C treated pine were highest due to the reinforced effect of pine. However, excessive thermal treatment resulted in the degradation of hemicellulose and leads to the deterioration in mechanical and interfacial properties.

초 록: 취성을 가진 섬유강화플라스틱은 충격을 받을 때 충격에너지를 흡수하면서 섬유와 기지재 간 계면에서 탈착 및 박리가 일어난다. 이는 복합재료의 에너지 충격흡수정도의 지표로 삼을 수 있다. 복합재료의 취성을 해결하기 위해 pine과 복합재료의 접착에 대한 연구가 되어 지고 있다. 이번 연구에서는 열처리 된 pine이 탄소섬유 강화복합재료와 에폭시 접착제를 이용하여 접착되었다. 최적의 열처리 조건을 확인하기 위해, pine을 160도 및 200도 조건하에 열처리를 하였다. Pine 및 pine/탄소섬유복합재료의 기계적 및 계면물성을 파악하기 위해 인장, 인장 중첩전단 및 아이조드 실험을 하였다. 또한, 열처리에 따른 나뭇결간의 결합력을 확인하기 위해 나뭇결 수직방향으로 인장시편 제조 후 파단될 때 탄성파를 음향방출시스템을 이용하여 분석하였다. 160도 조건으로 열처리 했을 때 나무강화 효과로 기계, 계면 및 나뭇결간의 결합력이 좋은 것을 확인하였다. 그러나 과한 열을 주게 되면 열에 약한 헤미셀룰로오스가 분해되면서 잡아주는 인자가 줄어들어 물성이 감소하였다.

Key Words: 소나무(Pine), 탄소섬유복합재료(CFRP), 열처리(Thermal treatment)

Received 10 May 2017, received in revised form 19 August 2017, accepted 30 August 2017

*Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Center for Creative Human Resource & Convergence Materials, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Gyeongsang National University

*†Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

**Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Gyeongsang National University

1. 서 론

오래전부터 목재를 이용한 건축물을 많이 지어왔다. 원시시대의 간단한 수혈주거에서 출발하여 차츰 지상건축물로 발전하여 오늘에 이르고 있다. 나무는 성장하면서 나뭇결방향으로 뻗어나고, 외부의 하중을 끊임없이 받으면서 좋은 기계적 물성을 가진다[1]. 그러나 낮은 밀도를 가지기 때문에 높은 하중 및 극심한 조건 같은 고차원적인 환경에는 사용에 제한이 된다. 이에 나무의 강성을 높이기 위하여 열처리, 이종재료에 대한 연구가 진행되고 있다[2].

목재는 흡윤성재료로 섬유포화점을 기준으로 물성이 달라진다. 목재의 섬유포화점은 건조 횡수와 방법에 따라 달라진다. 이를 이력현상이라고 하는데 목재 건조가 여러 번 반복되거나 고온에서 건조되면 손실된 흡착점 수가 늘어나서 섬유포화점이 낮아진다. 이러한 효과를 이용하여 목재의 치수안정성을 높이는 기술이 개발되었다[3,4]. 나무 열처리를 통하여 판재의 휨강도, 압축강도 등 기계적 강도를 증가시키는 연구가 실시되었다[4].

과거에는 알루미늄이나 철과 같은 금속판을 사용하여 복합재를 제작하였다면 최근에는 유리, 탄소, 아라미드, 바질트 등의 섬유를 판 형태로 성형한 섬유강화플라스틱이 사용되는 추세이다. 특히 탄소섬유복합재료는 높은 강성을 가지지만, 취성이 강하기 때문에 충격물성이 좋은 나무와 접착하여 구조재로 사용되고 있다[5].

위와 같은 연구로 일부 연구자들은 이러한 접합부에 대한 기계적 및 구조적인 거동에 대하여 연구가 진행되어왔다. 복합재료 간 접합부위의 파단은 접착제 강성도, 매트릭스의 성질 예를 들면 복합재료 섬유 층에 대한 배열상태, 환경적인 요인, 그리고 접합부의 기하학적 그리고 현상학적 하중에 의하여 결정된다[6].

각 요인을 통한 파단이 일어나는데 파단 되면서 생기는 미세파괴의 규명은 복합재 구조의 파괴 거동 조사의 매우 중요한 단계이다. 이에, 음향방출은 잘 알려진 미세파괴 구조를 규명하는 중요한 비파괴 시험방법 중 하나이다[7].

본 연구에서는 나무 중 pine을 이용하여 최적의 열처리 온도를 정하였다. 열처리 후 수분 및 유기물의 빠짐 정도를 확인하기 위해 밀도측정기를 이용하여 측정하였다. 인장 및 충격실험을 통하여 pine 자체의 기계적 물성을 측정하였고, 더 나아가 탄소섬유와 접착하였을 때 인장중첩전단 강도 및 충격강도를 측정하였다. 실험을 통하여 열처리 하지 않은 조건보다 열처리를 하였을 때 높은 물성을 나타내었다. 그러나 과도한 열처리의 경우 나무의 물성이 감소하였다.

2. 실 험

2.1 시편 제작

본 논문에서 사용한 pine은 진주 전통가구사업단을 통하

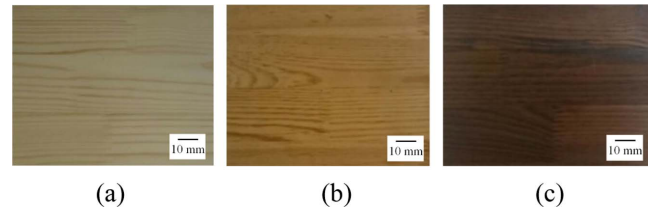


Fig. 1. Thermal treatment for pines for 10 hours: (a) neat, (b) 160°C and (c) 200°C

여 제공받았다. 각 온도에 따른 열처리하기 위해 고온용 오븐(FO-600M, 제이오테크, 한국)을 이용하여 10시간동안 열처리하였다. Fig. 1은 pine에 대한 상태를 나타내었다. 미처리 pine의 경우 연한 살색인데 반해 열처리 온도가 높을수록 진한갈색으로 변한 것을 확인하였다.

Toray T700 기반인 프리프레그를 이용하여 핫 프레스 성형을 통해 만들어진 탄소섬유복합재료는 한국카본을 통하여 제공받았다. pine과 탄소섬유복합재료를 접착하기 위하여 비스페놀-A계 에폭시 수지(KFR-730FL, 국도화학, 한국) 및 아민계 경화제(KFH-730FL, 국도화학, 한국)가 사용되었다.

Pine의 인장시편, 충격시편 및 인장중첩전단 시편을 제작하기 위하여 pine의 크기는 가로 8 mm, 세로 8 mm, 길이 56 mm로 하였다. 탄소섬유복합재료의 크기는 두께 2 mm, 너비 8 mm, 높이 56 mm로 하였다. 나무결에 따라 물성이 달라질 수 있기 때문에 동일한 나무결을 찾아 시편을 절단하였다. Pine과 탄소섬유복합재료를 접착하기 위하여 에폭시 수지와 경화제는 100:45 비율로 믹싱 후 0.5 mm 두께로 도포 후에 접착하였고 고온용 오븐을 이용하여 60도 조건에서 4시간 경화시켰다.

2.2 실험 방법

열처리 후 수분 및 유기물의 빠짐 정도를 확인하기 위해 밀도측정기(GP-300S, 마스하쿠, 대만)를 이용하여 측정하였다.

Pine의 열처리에 따른 인장강도 및 pine/탄소섬유복합재료 접착력을 확인하기 위해 만능재료시험기(H1KS, 로이드, 영국)를 사용하여 ASTM D683 기반으로 인장시험 및 ASTM D5868 기반으로 인장중첩전단시험을 하였다. 기계적 시험의 조건은 변위속도 1 mm/분 로 하였다.

또한, 열처리에 따른 pine의 결 간의 계면물성변화를 확인하기 위해 pine을 나뭇결 수직방향으로 절단 하였다. 만능재료시험기를 이용하여 1 mm/분 로 인장 후 파단될 때 음향방출센서(PICO, 피지컬 어쿠스틱, 미국)를 이용하여 탄성파를 검출하였다. 기타잡음을 제거하기 위하여 문턱값을 40 dB로 설정하였다.

Pine 및 pine/탄소섬유복합재료 충격강도를 확인하기 위해 아이조드충격시험기(KDI 300-3, 경도정밀, 한국)를 ASTM D4812를 기반으로 한 무노치 방식으로 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Pine 열처리에 따른 밀도 및 무게변화

Fig. 2은 pine 열처리에 따른 밀도 및 질량 감소율을 나타내었다. 열처리에 따라 밀도가 감소하고, 질량감소정도가 증가함을 확인하였다. 이는, 열처리를 통하여, pine 내에 함유하고 있는 수분 및 송진이 빠져나가게 되고, 과도한 열처리는 약한 결합을 띄는 헤미셀룰로오스가 분해됨을 확인하였다[8,9].

3.1 pine 열처리에 따른 물성변화

Fig. 3은 pine에 각기 다른 온도로 열처리 후 인장실험을 한 내용이다. 미처리 한 pine의 경우 인장물성이 가장 좋은 것을 확인하였다. 160도로 처리한 pine의 경우 물성이 감소하였지만, 미처리 한 나무의 인장응력-신율 곡선 패턴과 많이 유사한 것을 확인하였다. 200도로 처리한 pine의 경우 물성이 급격하게 감소하였다. pine의 파단 형태를 볼 때, 미처리 및 160도 처리한 pine의 경우 나뭇결들을 따라 수평파단이 발생하였다. 200도 처리한 pine의 경우 한 개의 수직파단이 발생하였다. 160도까지는 나뭇결 간에 결합력이 pine의 파단을 지연시켜 주지만, 200도 이상의 열 처리경우, 나뭇결 간에 결합력이 열에너지에 의해 약해졌고, 수직파단이 발생하였다.

Fig. 4은 pine에 각기 다른 온도로 열처리 후 충격강도를 나타내었다. 160도 처리한 pine의 충격강도가 미처리 및 200도 처리한 pine의 충격강도보다 높음을 확인하였다. pine을 손상하지 않은 범위에서 열처리의 경우는, 수분 및 유기물을 증발시키고, 증발된 만큼의 빈공간이 충격흡수를 한다. 그러나 과도한 열의 경우 pine을 구성하는 헤미셀룰로오스의 열분해에 의한 결합력이 감소하고, 이는 충격강도에 영향을 미친다.

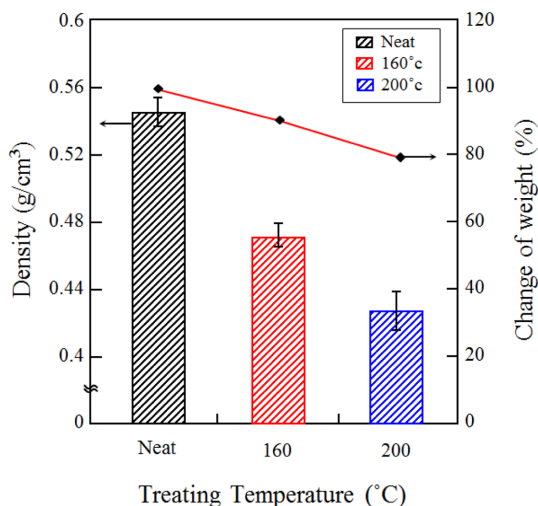


Fig. 2. Density of pine after thermal treatment

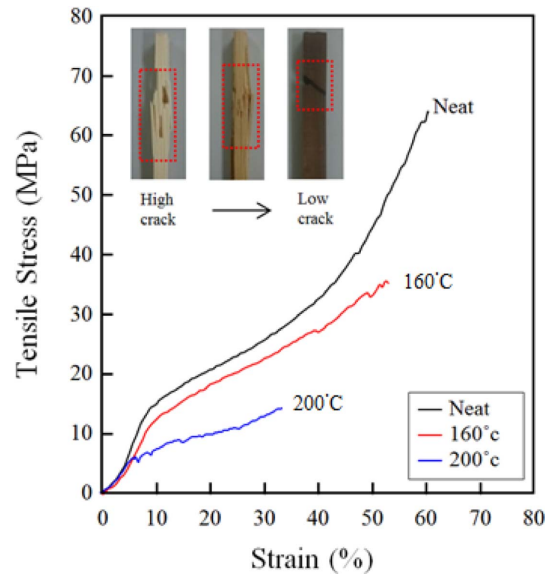


Fig. 3. Tensile test for different thermal treated pine

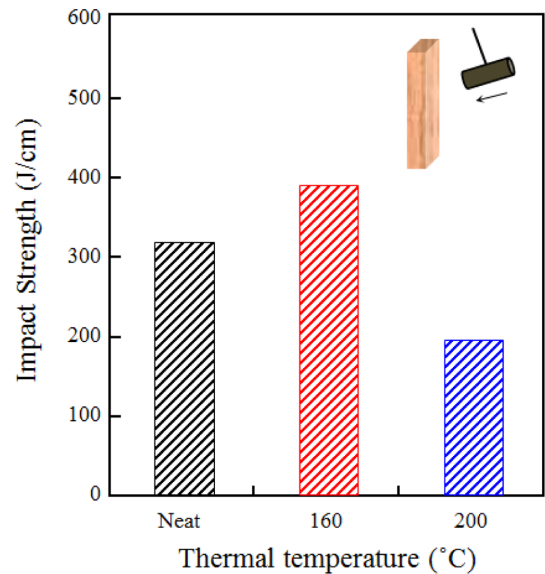





Fig. 4. Izod test for different thermal treated pine

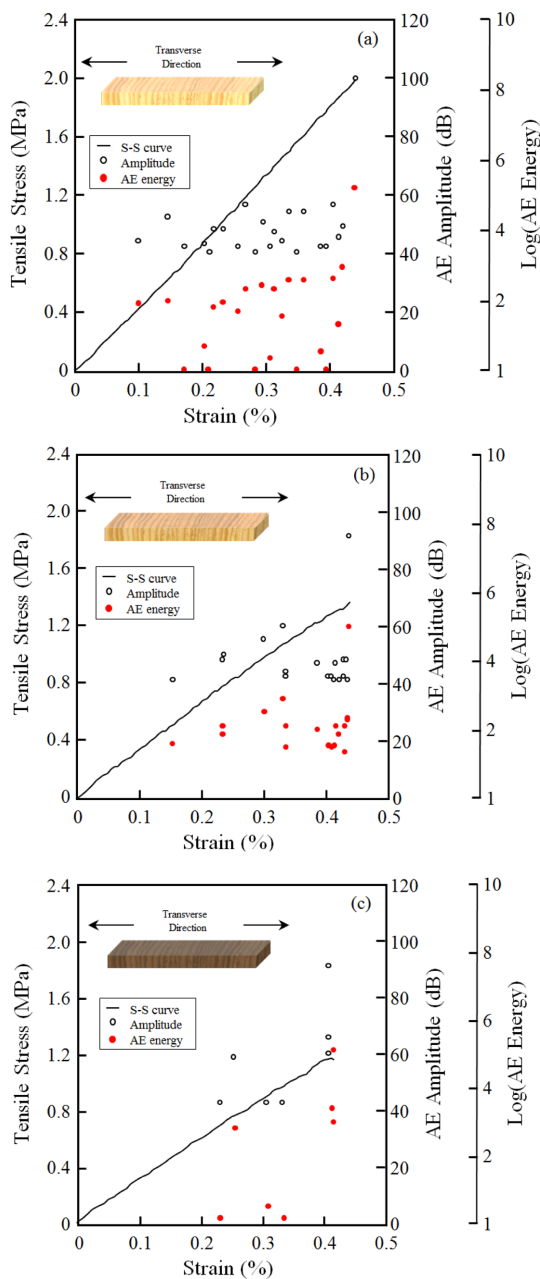
나무를 포함한 섬유복합재료의 경우, 열을 받을 때 가장 약한 계면에서 파단이 쉽게 일어난다. 열처리에 따른 pine의 결 간의 접착력 차이를 확인하기 위해, Fig. 5는 결 방향의 pine을 이용하여 결 수직방향으로 인장시편을 제작하고, 인장으로 인한 결 파단 시 생기는 탄성파를 음향방출 장치를 이용하여 진폭 및 에너지로 나타내었다.

3.2 Pine 열처리에 따른 비파괴평가

나무를 포함한 섬유복합재료의 경우, 열을 받을 때 가장 약한 계면에서 파단이 쉽게 일어난다. 열처리에 따른 pine의 결 간의 접착력 차이를 확인하기 위해, Fig. 5는 결 방향의 pine을 이용하여 결 수직방향으로 인장시편을 제작하

Table 1. Tensile AE data at transverse direction for different thermal treated pines

	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	Tensile Elongation (%)	Average Amplitude (dB)	Signal Number (No.)	Acoustic Energy ($V^2 \cdot \mu s$)	Fractured Surface
Neat	2.0	465	0.45	46 (5) ¹⁾	20	76 (104)	
160°C	1.4	325	0.44	45 (5)	17	79 (81)	
200°C	1.2	292	0.42	53 (12)	7	581 (707)	

¹⁾Standard Deviation (SD)**Fig. 5.** Damage sensing for different thermal treated pine: (a) neat, (b) 160°C and (c) 200°C

고, 인장으로 인한 결 파단 시 생기는 탄성파를 음향방출 장치를 이용하여 진폭 및 에너지로 나타내었다.

미처리 및 160도 처리한 pine의 경우 평균탄성진폭, 탄성 에너지, 그리고 신호의 개수가 유사하였다. 그러나 200도 처리한 pine의 경우 평균탄성진폭 및 에너지가 증가하였고 신호의 개수가 감소하였다. 인장실험 후 파단 형태를 확인했을 때, 미처리 및 160도 처리한 pine의 경우 나뭇결의 형태가 유사한 것을 확인하였다. 200도 처리한 pine의 경우 과도한 열에 의하여 나뭇결의 형태가 많이 변형 및 손상이 되었다. 열에 약한 헤미셀룰로오스가 분해되면서 잡아주는 인자가 줄어들어 결합력이 약해졌다고 할 수 있다.

3.3 Pine 탄소섬유복합재료간 접착 및 충격물성

Fig. 6은 pine과 탄소섬유복합재료에 에폭시접착제를 이용하여 인장중첩전단 시편을 제작하고 물성결과를 나타내었다. 160도 열처리를 한 pine을 이용하였을 때 전단강도가 가장 좋은 것을 확인하였다. 어떤 물질을 접착하면서 물 등의 세 번째 물질이 첨가될 때, 세 번째 물질은 접착하는데 방해하는 요인으로 작용한다[10]. 적당한 온도의 열처리는 물 및 유기물을 날려 보내 접착력이 증가하게 된다. 그러나 과도한 열처리는 나무의 구조를 변형시켜 나무자체의 물성 및 접착물성이 감소한다[11,12].

Fig. 7은 pine과 탄소섬유복합재료를 동일한 크기로 제작 및 접착 후 아이조드실험에 대한 충격강도를 나타내었다. 기존 pine만 사용했을 때와 동일한 경향으로 160도 열처리를 한 pine을 이용하였을 때 가장 높은 충격강도를 가졌다. 이 또한 pine이 가지고 있는 수분 및 유기물이 열에 의하여 제거되고, 제거된 만큼의 빈공간이 충격 시 충격흡수를 하였다.

3.4 열노화시 pine의 변화 및 접착거동

Fig. 8은 pine의 열 노화 시 pine의 거동 변화 및 탄소섬유복합재료와 접착할 때 접착거동에 대한 모식도를 나타내었다. 미처리 및 160도 처리한 pine의 경우는 열에 의해 구조 변형이 일어나지 않았기 때문에, 셀룰로오스에 포함되어 있는 하이드록시기이 접착력 향상에 영향을 미친다. 특히 160도 열처리한 pine의 경우 접착을 방해하는 요소가 없

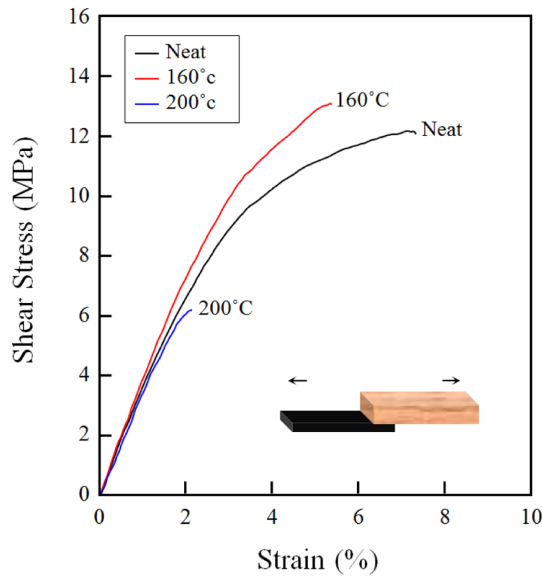


Fig. 6. Lap shear test between CFRP and pines

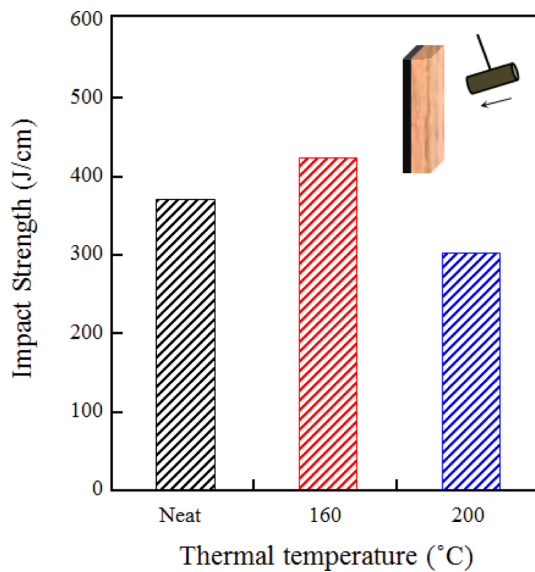


Fig. 7. Izod test for different CFRP/pine composites

기 때문에 접착력이 향상 된다. 그러나 200도 열처리한 pine의 경우 셀룰로오스의 파괴 및 탄화가 일어나고, 이는 하이드록시기의 감소로 이어져 접착력 감소로 이어진다. 또한, 열에 의하여 미세 균열이 생기게 되어 pine 자체의 물성 저하에도 영향을 미친다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 pine에 각기 다른 열처리를 하였고 열처리에 따른 기초물성을 파악하였고 파단 될 때의 탄성파를 음향 방출 방법을 이용하여 분석하였다. 또한 pine에 탄소섬유 복합재료와 접착 후 기계적 물성을 파악하여 열처리에 따

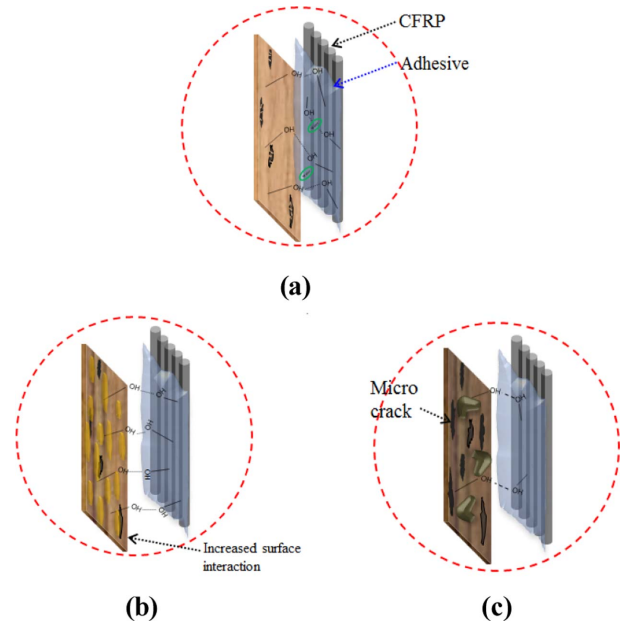


Fig. 8. Schematic plot of interface between CFRP and pines: (a) neat, (b) 160°C and (c) 200°C

른 물성변화를 보았다. 미처리 및 160도 처리한 pine의 경우는 열에 의해 구조 변형이 일어나지 않았기 때문에, 셀룰로오스에 포함되어 있는 하이드록시기가 접착력 향상에 영향을 미친다. 그러나 200도 열처리한 pine의 경우 셀룰로오스의 파괴 및 탄화가 일어나고, 이는 하이드록시기의 감소로 이어진다. Pine 자체의 인장 및 충격시험을 통한 기계적 물성이 감소하였다. 하이드록시기의 감소로 접착력 또한 감소로 이어졌다. Pine에 탄소섬유복합재료 접착 후 인장 중첩전단시험 및 충격시험을 통하여 물성 감소를 확인하였다. 또한 각 pine 열처리에 따라 pine의 결 파괴 시 탄성진폭, 에너지 영역범위, 그리고 신호의 개수가 감소하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20163030024550).

RERERENCES

- Dunlop, J.W.C., and Fratzl P., "Multilevel Architectures in Natural Materials," *Scripta Materialia*, Vol. 68, 2013, pp. 8-12.
- Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., and Arif M.M., "Flexural Stiffness and Strength Enhancement of Horizontally Glued Laminated Pine Beams With GFRP and CFRP Composite Sheets," *Construction and Building Materials*, Vol. 1112, 2016, pp. 547-555.

3. Song, Y.J., Jung, H.J., Lee, I.H., and Hong, S.I., "Performance Evaluation of Bending Strength of Curved Composite Glulams Made of Korean White Pine," *Journal of Korean Wood Science and Technology*, Vol. 43, No. 4, 2015, pp. 463-469.
4. Park, J.C., Shin, Y.J., Hong, S.I., "Bonding Performance of Glulam Reinforced with Glass Fiber Reinforced Plastics," *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, Vol. 37, No. 4, 2009, pp. 357-363.
5. Raftery, G.M., and Harte, A.M., "Low-Grade Glued Laminated Timber Reinforced with FRP Plate," *Composites: Part B: Engineering*, Vol. 42, 2011, pp. 724-735.
6. Haj, A.R., and Elhajjar, R., "An Infrared Thermoelastic Stress Analysis Investigation of Single Lap Shear Joints in Continuous and Woven Carbon/Fiber Epoxy Composites," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 48, 2014, pp. 210-216.
7. Park, J.M., Kim, D.S., and Kim, S.R., "Improvement of Interfacial Adhesion and Nondestructive Damage Evaluation for Plasma Treated PBO and Kevlar Fibers/epoxy Composites using Micromechanical Techniques and Surface Wettability," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 64, 2003, pp. 431-445.
8. Garrote, G., Dominguez, H., and Parajo, J.C., "Hydrothermal Processing of Lignocellulosic Materials," *Holz als Roh und Werkstoff*, Vol. 57, No. 3, 1999, pp. 191-202.
9. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H., and Zheng, C., "Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis," *Fuel*, Vol. 86, 2017, pp. 1781-1788.
10. Gledhill, R.A., and Kinloch, A.J., "Environmental Failure of Structural Adhesive Joints," *The Journal of Adhesion*, Vol. 6, 1974, pp. 315-330.
11. Bhuiyan, M.T.R., Hirai, N. and Sobue, N., "Changes of Crystallinity in Wood Cellulose by Heat Treatment under Dried and Moist Conditions," *Journal of Wood Science*, Vol. 46, No. 6, 2000, pp. 431-436.
12. Repellin, V., and Rene, G., "Evaluation of Heattreated Wood Swelling by Differential Scanning Calorimetry in Relation to Chemical Composition," *Holzforschung*, Vol. 59, No. 1, 2005, pp. 28-34.