JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(2) : 109-114 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.2.109

전자선 경화를 이용한 모자형 구조 탄소섬유강화복합재료의 제조

오승미[1], 김현빈[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Fabrication of Hat-type Carbon Fiber-reinforced Plastic by Electron Beam Curing

Seung Mi Oh[1] and Hyun Bin Kim[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea

Abstract The difference in electron beam absorption occurred by the bending angle on carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite was investigated via Monte Carlo simulation and experimental method. The simulation results show that high bending angle results unevenly cured composite because the beam penetration depth is limited. The bending effects become weaker as the thickness of the composite is getting thinner. The bent material with 5 mm thickness shows ununiformed absorption from 75° bending degree, which is comparable to the result with 10 mm thickness from 85°. For the experimental validation, the hat-type composite was fabricated using prepreg consisted with carbon fiber and epoxy acrylate resin. The absorbed dose was measured along hat shape using B3 film and alanine pellet. 8 ply and 16 ply stack were prepared and cured. The experimental results also show that the absorbed does depend the position on the slope. The composite with thin thickness is more evenly cured compared than the thick one, as expected. The present study suggests that the proper adjustment of the bending angle and the thickness is required for the electron beam irradiation on the complicatedly structured composite.

Key words: Epoxy acrylate, CFRP, Electron beam irradiation, Curing, Bending angle, Monte Carlo simulation

1. 서 론

탄소섬유강화복합재료(CFRP, Carbon fiber-reinforced plastics)는 플라스틱에 탄소섬유를 강화재로 사용하여 매우 가볍고 단단한 성질을 가지는 복합소재다. CFRP는 가벼운 무게를 가지면서도 큰 인장 강도와 좋은 내식성(corrosion resistance), 높은 피로저항을 가지며 우주, 항공, 선박, 자동차 부품, 풍력 부품, 로봇, 스포츠 용품 등 다양한 분야에 적용되고 있다[1,2]. CFRP를 제조하기 위해서는 탄소섬유 사이에 들어가는 레진의 경화를 위해 열경화 혹은 광경화 공정을 이용할 수 있다[3,4]. 그러나 열경화 공정은 긴 반응 시간, 에너지, 경화 과정을 촉진시키는 경화제가 필요하고, 광경화 공정에서는 광개시제가 필요하며 빛이 닿지 않는 부분에서는 반응이 일어나기 어렵다는 단점을 가진다.

전자선을 이용한 고분자 경화는 일반적인 열 반응 공정

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Hyun Bin Kim
Tel. +82-63-570-3094 Fax. +82-63-570-3068 E-mail. hbkim@kaeri.re.kr
Received 20 April 2022 Revised 9 May 2022 Accepted 26 May 2022

에 비해 매우 빠른 공정 속도를 가진다. 전자선은 물질을 구성하는 원자의 궤도전자와 충돌하여 물질을 전리시키며 이때 발생하는 이온, 라디칼 등의 활성종은 고분자 중합 반응을 일으킬 수 있다. UV 경화 과정에 비해서는 전자선이 투과할 수 있는 평균 거리인 비정(range)이 길기 때문에 불투명하거나 비교적 두꺼운 소재도 경화시킬 수 있으며 개시제나 촉매 없이 활성종을 생성하여 고분자 중합 반응을 일으킬 수 있기 때문에 순도 높은 생성물을 얻을 수 있다.

그러나 전자선 경화는 열경화와는 달리 곡면이 있는 경우 및 빔의 범위와 방향을 제어하기 어려운 경우에는 재료의 전 영역에 같은 조건으로 고르게 전자선을 조사하기 어렵다는 단점을 가진다. 열경화 과정의 경우 반응물 주변에서 일정하게 열을 공급할 수 있으며 반응 중 재료 자체에서 열이 발생하기도 하므로 재료의 전 영역에 걸쳐 일정하게 경화 조건을 유지하기가 비교적 쉽다. 하지만 전자선 경화 과정의 경우 제어된 빔 조건일지라도 재료의 형태가 복잡하면 부분적인 위치에 따라 입사선의 각도가 다르기 때문에 흡수선량이 위치마다 달라질 수 있다. 예를 들면 평평하게 노출된 부분과 각지거나 곡선을 가진 부분의 흡수선량은 다르다[5]. 전자선 경화 방법을 이용하여 CFRP를 합성할 수 있다는 사실은 이미 잘 알려져 있으나 복합소재를 전자선으로 경화시킬 때 전자선이 어느 정도로 투과하는지, 재료의 형상에 따라 전자선에 노출되는 각 부분이 어떠한 영향을 받는지에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 요철을 가지는 CFRP의 전자선 경화 현상을 시뮬레이션하고 실제 모형에서 전자선 흡수선량을 조사하였다. 재료의 형태는 모자형 구조 보강재의 형태를 따랐다[6]. 모자형 구조 보강재의 요철 부분 각도에 따라 흡수선량이 어떻게 달라지는지 몬테 카를로 방법(Monte Carlo method)을 통해 시뮬레이션하였으며 실제 보강재에서 각 위치에 따라 흡수되는 흡수선량을 실험적으로 측정하여 위치에 따른 흡수선량의 차이를 확인하였다.

2. 재료 및 방법

CFRP의 전자선 경화 전산 모사는 GEANT4 프로그램을 활용하였다. 복합 소재에 대한 전자선의 투과 깊이에 따른 에너지 전달 분포를 조사하기 위하여 프로그램 상에서 x, y, z 축에 대하여 300 × 100 × 50 mm의 크기의 밀도 1.7 g cm^{-3} 직육면체를 구현하고 이의 구성 원자를 C (78.3 at%)와 H (16.3 at%), O (5.4 at%)로 설정하였다. 피조사체의 중심으로부터 z축으로 50 cm 거리에 면광원을 설정하였으며, 10 MeV의 전자를 피조사체에 수직으로 조사하였다. 전자와 물질과의 상호작용에 있어서 물리 모델은 Penelope을 사용하였으며[7], 피조사체 내에 전달되는 에너지는 1 mm^3 단위로 스코어링하였다.

모자형 구조의 전산 모사에는 위와 동일한 조건에서 시편의 두께를 5 mm와 10 mm를 설정하였으며, 상판과 하판 사이의 연결하는 부분의 각도에 따라 전산 모사를 진행하였다. 전자선의 조사 방향은 실제 구조체 제작에 적용할 수 있는 오픈 몰드 형태를 고려하여 시편의 수직방향으로 진행하였다.

전산 모사 결과의 검증을 위하여 모자형 구조 테스트 몰드를 제작하였다. 모자형 구조체는 자동차 부품 적용을 고려하여, 부품의 형상 중 가장 높은 각도를 필요로 하는 부분을 선정하여 설계하였으며 83°로 설정하였다. 제작된 알루미늄 재질의 몰드에 선량 평가를 위한 B3 필름 선량계(GEX Corporation, USA)와 알라닌 펠렛 선량계(Alanine Pellet, Bruker)를 1 cm 간격으로 부착하였다. 부착된 선량계 위에 전자선 경화형 탄소섬유 프리프레그(prepreg)를 8 ply 및 16 ply로 적층하고 진공을 형성하여 한국원자력연구원의 10 MeV 전자선 가속기로 경화를 진행하였다. 이때 오픈 몰드 표면에서의 흡수선량이 스캔당 20 kGy가 되도록 2회 반복 조사를 진행하였다. 탄소섬유 프리프레그는 Toray사의 T700G 원사에 비스페놀 A형 에폭시 아크릴레이트 수지(KDU-1100, 국도화학)를 코팅하여 제작하였다. 전자선 조사 후 B3 필름 선량계는 Genesys 20 Spectrophotometer를 이용하여 553 nm의 단일 파장으로 분석하였으며, 알라닌 펠렛은 Bruker사의 e-scan 장비로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전자선 투과 깊이에 따른 전달 에너지 평가

CFRP는 매트릭스 소재인 고분자 수지에 강화제인 탄소섬유를 함침시킨 후 경화 공정을 수행하여 제작한다.

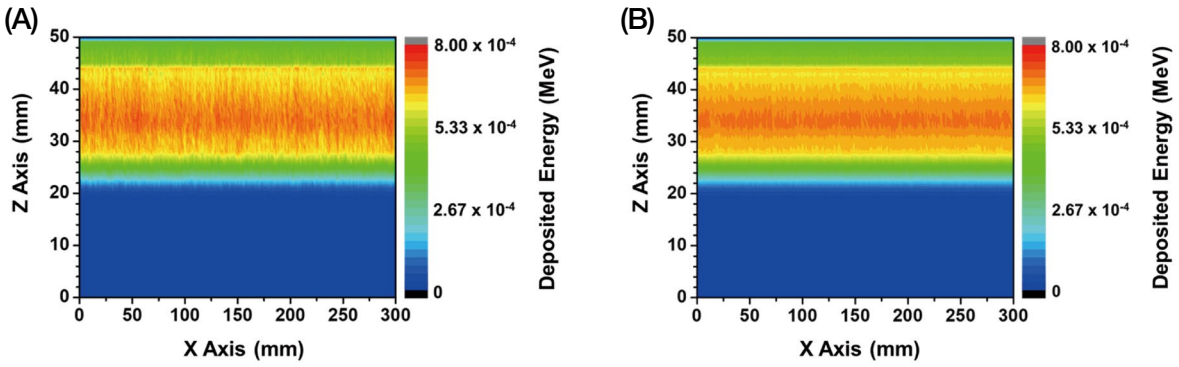

Fig. 1. Simulated 2D absorbed dose on CFRP with the size of 300 × 100 × 50 mm. The numbers of generated electrons are (A) 10^6 and (B) 10^7.

전자선 경화공정은 열경화공정보다 빠르게 진행할 수 있어 생산성 향상에 도움이 된다. 하지만 전자선과 같은 방사선을 재료에 조사하면 투과 깊이에 따라 전달되는 에너지의 분포가 균일하지 않으므로 제품이 갖는 형상에 따라 전자선의 조사 방향과 에너지 크기에 대한 세심한 주의가 요구된다.

Fig. 1은 CFRP에 대하여 10 MeV 전자선을 조사하였을 때 소재 내부에 깊이에 따라 전달되는 에너지를 계산한 결과이다. 전자선 에너지를 10 MeV로 고정한 것은 상업적으로 사용되는 전자선 가속기의 최대 에너지가 10 MeV로 한정되기 때문이다. 계산에는 10^6개와 10^7개의 전자를 각각 진행하였으며, 스코어링 단계에서 전달 에너지 총량을 전자의 개수로 나누었기 때문에 계산에 사용된 전자의 개수와 전달되는 에너지의 크기는 무관하다. 전자선은 Z축의 50 mm에서 0 mm 방향으로 조사된다. 계산 결과 10^7개를 사용하였을 때 10^6개를 사용하였을 때보다 부드러운 이미지를 얻을 수 있었다. 각각의 결과에서 시편의 표면 중심에서 두께방향으로 전달되는 에너지 크기를 Fig. 2에 나타내었다. 시료의 표면에 전달되는 에너지는 약 0.41 keV mm^{-3}이며 투과 깊이가 증가함에 따라 전달되는 에너지가 증가하게 되고 가장 많은 에너지가 전달되는 최대선량깊이(depth of maximum dose)는 시료의 표면에서 16 mm 깊이에 나타났다. 최대흡수선량이 표면보다 조금 깊은 곳에서 나타나는 이유는 입사되는 전자선에 의해 형성되는 이차전자가 타겟을 이온화시키기 때문이다[8]. 투과 깊이가 22 mm 이상에서는 급격하게 전달되는 에너지가 감소하기 시작하며, 30 mm 이상에서는 전달되는 에너지가 0에 수렴한다. 이러한 전달 에너지 분포는 본 연구팀에서 보고하였던 판형 빔 소스(plane source)에 의한 전달 에너지 전산 모사 결과와 같은 경향을 보인다[9].

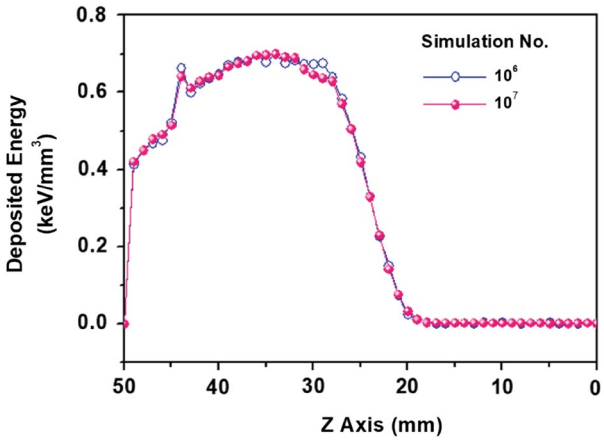

Fig. 2. The deposited energy by electron beam in CFRP as a function of the thickness.

3.2. 모자형 구조 복합소재의 전자선 경화 전산 모사

모자형 구조 제품에 대한 전자선 경화를 전산 모사하기 위하여 Fig. 3A와 같은 구조물을 Geant4에 입력하였다. 이때 피조사체의 두께는 5 mm이며, 상판과 하판 사이의 높이는 50 mm이고 두 판 사이를 연결하는 부분을 각도에 따라 60°에서 90°까지 5° 간격으로 전산 모사를 진행하였다. Fig. 3B에 나타난 결과에 따르면 낮은 각도의 피조사체는 전달 에너지의 분포가 전체적으로 균일한 것을 알 수 있다. 각도가 커짐에 따라 피조사체의 하판 모서리 부분에 전달되는 에너지가 상대적으로 낮은 부분이 관찰되었다. 이러한 특성은 85° 이상에서 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 벌크 형태의 복합 소재에 대하여 30 mm 이상 깊이에서 투과 에너지가 0임을 고려한다면 상

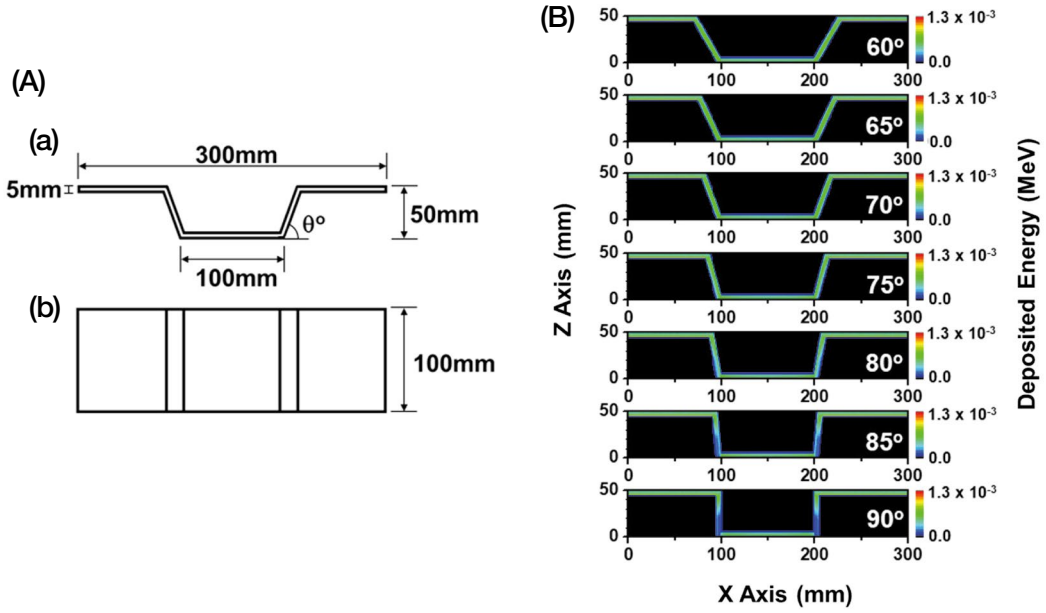

Fig. 3. (A) (a) Front view and (b) top view of the model of hat-shaped CFRP with 5 mm thickness for simulation. (B) Simulated 2D distribution of deposited energy.

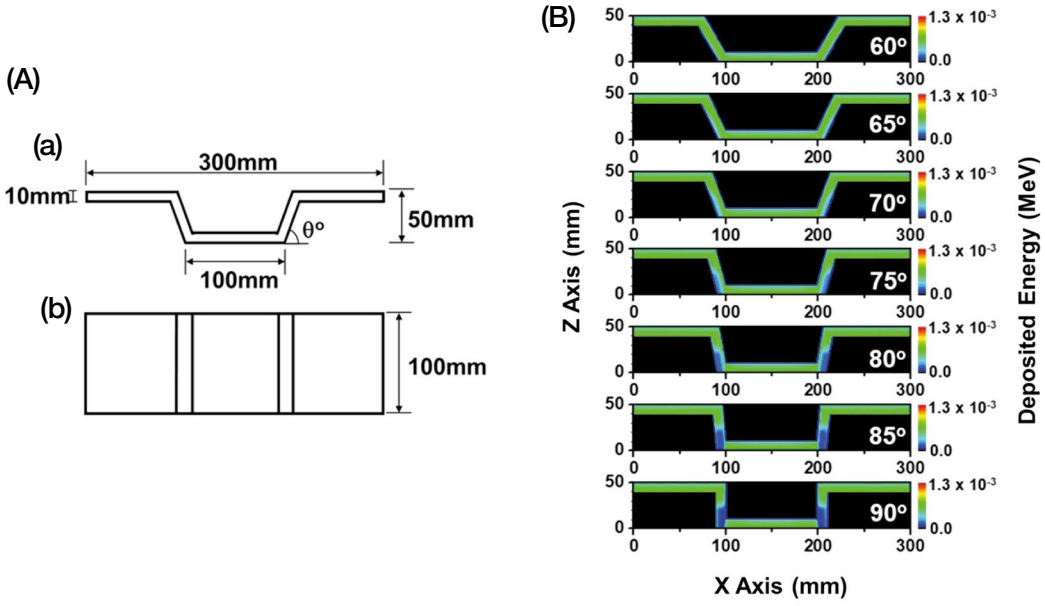

Fig. 4. (A) (a) Front view and (b) top view of the model of hat-shaped CFRP with 10 mm thickness for simulation. (B) Simulated 2D distribution of deposited energy.

판과 하판을 연결하는 부위의 각도가 증가함에 따라 전자선의 투과 깊이가 한계에 도달하는 부분이 발생하게 됨을 알 수 있다.

이러한 특성은 피조사체의 전체적인 두께가 증가함에 따라 더욱 낮은 각도에서 발생할 수 있다. Fig. 4A에 표현한 것처럼 피조사체의 두께를 10 mm로 더 두껍게 하여 전산 모사를 진행할 경우 Fig. 4B에서 나타난 바와 같이 75° 이상에서 전달되는 에너지가 상대적으로 작은 부분이 관찰된다. 따라서 피조사체의 두께가 증가함에 따라 상판과 하판 사이의 연결 부분의 각도를 감소시키거나, 상판과

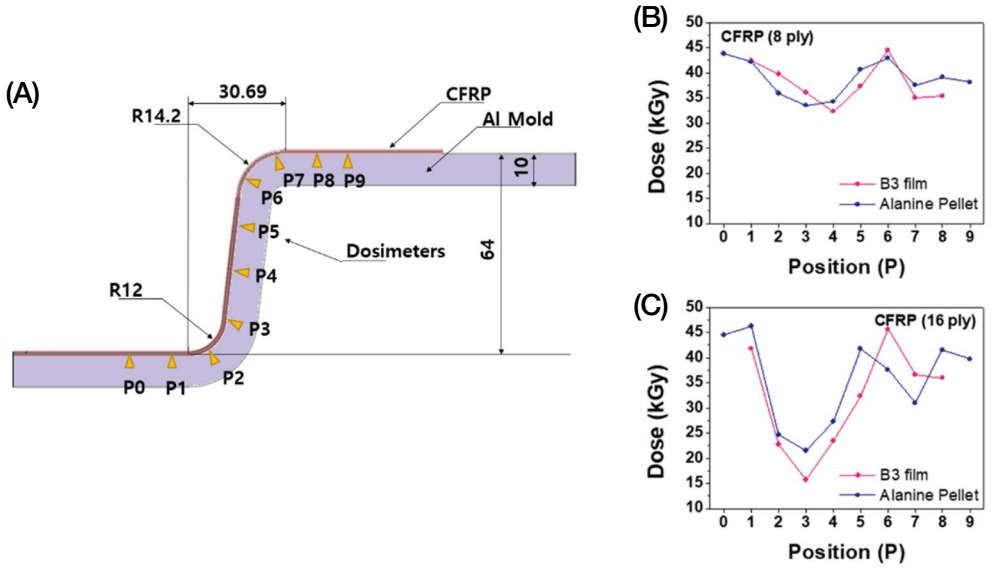

Fig. 5. (A) Scheme of the experiment for measuring the absorbed dose. The measured absorbed does from CFRP with (B) 8 ply and (C) 16 ply.

하판 사이의 높이를 제한할 필요가 있다.

3.3. 모자형 구조 CFRP 설계와 전자선 경화 조건

전산 모사의 결과를 기반으로 실제 모자형 구조 CFRP의 전자선 경화시 흡수선 변화를 알아보기 위해 Fig. 5A와 같이 알루미늄 재질의 모자형 구조 몰드를 설계하였다. 피조사체의 두께가 5 mm 이하인 경우로 한정하여 상판과 하판 사이를 이루는 연결 부분의 각도가 85°를 넘지 않도록 83°로 설계하였고, 전산 모사 상에서 문제가 발생할 수 있는 부분을 라운드 처리를 하였다. 제품에 전달되는 에너지 분포를 확인하기 위하여 모자형 구조 몰드 위에 필름형 도시메트리와 알라닌 펠렛을 각각 1 cm 간격으로 부착하였으며 복합소재의 경화가 완료된 후 탈형하여 전달 에너지를 평가하였다. 제작한 복합재료는 탄소섬유 1 ply 당 약 0.3 mm의 두께로서 8 ply 시료는 약 2.4 mm, 16 ply 시료는 약 4.8 mm의 두께를 보였다. 전자선 조사는 10 MeV 전자선 가속기를 이용하여 진행하였으며, 상판의 표면에서 40 kGy가 되도록 설정하였다. Fig. 5B, 5C에 나타난 바와 같이 8 ply, 18 ply 시료 모두 P8과 P9 위치에 있어서 도시메트리에 표시된 선량은 40 kGy 정도로 의도한대로 잘 조사되었음을 알 수 있다. P5~P7 위치에서는 상판보다 약간 높은 선량이 관찰되었는데, 이는 전산 모사 결과에서 전자선의 전달 에너지가 투과 깊이가 증가함에 따라 증가하여 15~20 mm에서 최대값을 보여준 경향과 일치한다. 흡수선량이 가장 낮게 나타난 부분은 P3 위치였으며 이 결과 역시 전산 모사의 결과가 상판에 비하여 모서리 부분의 흡수선량이 크게 줄어드는 경향과 유사하다. 그러나 8 ply 시료는 P3 근처에서 16 ply 시료에 비해 높은 흡수선량을 보이며 위치에 따른 흡수선량 편차도 작게 나타난다. 이는 피조사체의 두께가 감소함에 따라 모서리 부분에서 나타나는 흡수선량 차이가 완화된다는 것을 보여준다.

이러한 실험 결과는 전자선 경화 과정의 전산 모사 결과와 매우 유사하며 요철을 가지는 시료를 전자선 조사 방법으로 제작할 경우 고른 경화 정도를 얻기 위해 각도 혹은 두께 조절이 필요함을 시사한다. 또한 전산 모사 방법은 복잡한 형태를 가지는 시료의 경화 과정에 응용하여 최적의 경화 상태를 가지도록 재료의 두께나 요철 각도 등을 예측하는 데 응용할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFRP의 전자선 경화 과정과 재료가 요철을 가질 때 그 각도에 따라 흡수선량이 어떻게 달라지는지 몬테 카를로 방법을 통하여 전산 모사하고 실제 CFRP의 모서리 위치에 따른 흡수선량의 차이를 확인하였다. 전산 모사 결과 모서리의 굴곡 각도가 증가함에 따

라 모서리 위아래의 흡수선량 차이가 커졌으며 재료의 두께에 따라 모서리 각도의 영향이 줄어들었다. 실제 측정 결과에서도 전산 모사와 유사한 결과를 확인하였다. 본 결과는 다양한 형태의 CFRP를 전자선 경화 방법으로 제작할 경우 형태에 따라 흡수선량 차이가 생길 수 있으며 전산 모사 등을 통해 흡수선량 차이를 고려하여 조사 환경을 적절히 조절해야 함을 시사한다.

사 사

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 방사선고부가신소재개발사업(2020M2D8A1048739)으로 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Akbar A and Liew KM. 2020. Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials. *J. Clean. Prod.* **274**(20):123001.
2. Koumoulos EP, Trompeta AF, Santos RM, Martins M, Santos CM, Iglesias V, Böhm R, Gong G, Chiminelli A, Verpoest I, Kiekens P and Charitidis CA. 2019. Research and development in carbon fibers and advanced high-performance composites supply chain in Europe: a roadmap for challenges and the industrial uptake. *J. Compos. Sci.* **3**:86.
3. Kumar DS, Shukla MJ, Mahato KK, Rathore DK, Prusty RK and Ray BC. 2015. Effect of post-curing on thermal and mechanical behavior of GFRP composites. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **75**:012012.
4. Nishida M, Hongo A, Takahara H and Higashide M. 2021. Effects of electron beam irradiation on hypervelocity impact behavior of carbon fiber reinforced plastic plates. *J. Compos. Mater.* **55**(29):4295-4304.
5. Rudychev VG, Lazurik VT and Rudychev YV. 2021. Influence of the electron beams incidence angles on the depth-dose distribution of the irradiated object. *Radiat. Phys. Chem.* **186**:109527.
6. Balasubramaniam S, Ravichandran M, Kannan R and Moorthi KS. 2019. Design and analysis of stringer on the chassis frame in load carrying vehicle. In: Advances in Manufacturing Technology: Select proceedings of ICAMT 2018, Springer. Singapore. pp. 219-225.
7. Miloichikova I, Bulavskaya A, Cherepennikov Y, Gavrikov B, Gargioni E, Belousov D and Stuchebrov S. 2019. Feasibility of clinical electron beam formation using polymer materials produced by fused deposition modeling. *Physica. Medica*. 64:188-194.
8. Turner JE. 2007. Atoms, radiation, and radiation protection. 3rd ed. Wiley-VCH. Weinheim. pp. 167-169.
9. Kim HB and Lee NH. 2020. Modeling and simulation of the electron beam cured polyester using Geant4. *J. Radiat. Ind.* **14**(4):353-358.