

필라멘트 와인딩의 개요 및 기술 동향

[글] 윤재득¹, 정용호^{2*}
^{1,2}부산대학교 기계공학부
¹yjdeuk@pusan.ac.kr,
²yjhj@pusan.ac.kr

1. 서 론

섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite materials)는 강화 섬유와 결합재를 함침 가공한 복합 재질로서 알루미늄보다 가볍고 철보다 강한 내식, 내열성을 가지고 있는 반영구적인 소재이다. 강화 섬유로는 탄소 섬유, 유리 섬유, 아라미드 섬유가 주로 사용되고, 결합재로서는 에폭시 수지나 폴리에스테르 수지, 열가소성 수지 등이 이용된다. 섬유강화 복합재료는 소재의 우수한 특성과 함께 제품의 성형이 용이하여 그림 1과 같이 석유화학, 건축, 레저, 자동차, 방위, 환경 산업 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되며 향후 그 수요가 급격히 증대할 것으로 기대된다.



그림 1. 섬유 강화 복합재 적용 분야

섬유강화 복합재 부품을 제작하는 공법 중에서 로켓 모터 케이싱나 압력용기 등과 같이 가벼우면서도 높은 강도가 요구되는 제품을 제작하는데 필라멘트 와인딩이 사용된다. 필라멘트 와인딩은 기존에는 원통형의 단순한 형상에 대해서만 적용을 해왔지만 섬유의 정교한 배치가 가능하고 공정의 자동화를 할 수 있는 장점으로 인해 비축대칭의 복잡한 형상에도 적용 범위를 확대하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 기사에서는 필라멘트 와인딩 기술에 대해 소개하고 국내외 업체의 기술 개발 현황과 학계에서의 학술적인 연구 수준동향에 대해서 소개하고자 한다.

2. 필라멘트 와인딩 개요

섬유강화 복합재료를 성형하는 방법에는 그림 2와 같이 Spray-up, Hand lay-up, 압축 성형(molding compound), 필라멘트 와인딩(filament winding) 등이 있다. Hand lay up 방법은 수작업으로 형에 수지와 유리섬유를 적층하는 방법이며 기계적 특성이 크게 요구되지 않는 제품에 사용된다. 압축 성형 방법은 금형에 섬유를 한 방향으로 배열한 프리프레그(prepreg) 형태의 시트를 넣고 수지를 유입한 후 가압하여 성형하는 방법이다. 그리고 필라멘트 와인딩은 섬유의 방향을 제어하면서 정교하게 제작할 수 있는 공법으로서, 섬유의 방향성을 이용하면 기계적 강도가 높은 부품을 제작할 수 있는 장점이 있다.

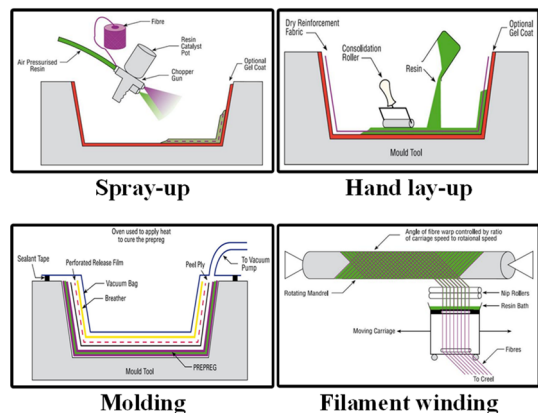


그림 2. 섬유 강화 복합재 성형 방법

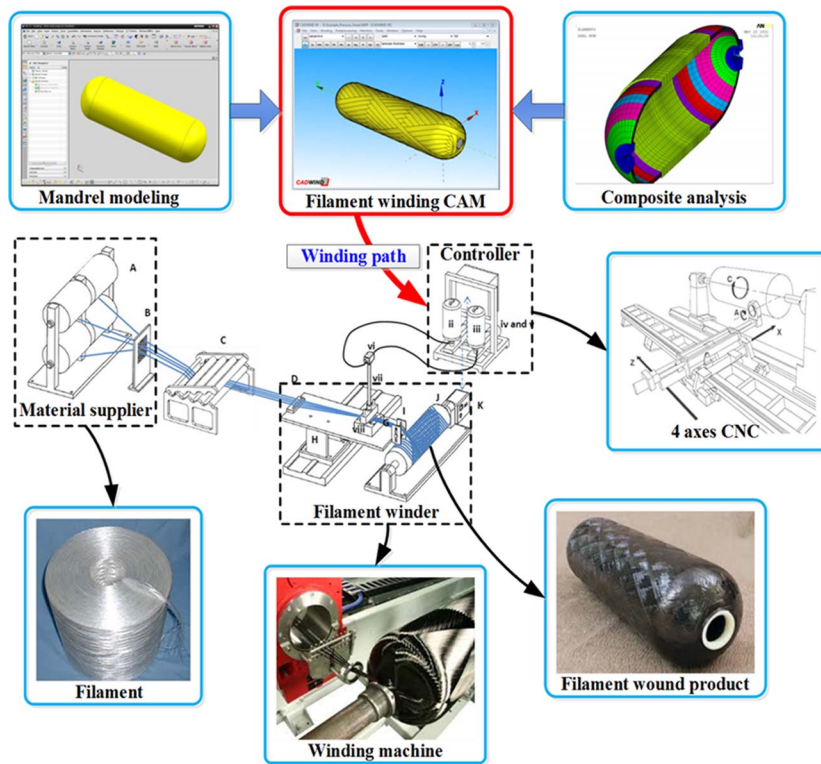


그림 3. 필라멘트 와인딩 시스템

필라멘트 와인딩은 그림 3과 같이 성형하고자 하는 형상의 맨드릴(mandrel)에 필라멘트 형태의 강화 섬유를 감아서 열경화성 수지와 함침 가공하는 공법이다 [1-3]. 필라멘트 와인딩으로 성형된 제품은 중량 대비 매우 높은 강도를 가지므로 고강도의 경량화가 요구되는 제품을 제작하기에 적합하며, 주로 전투기의 연료 탱크, LNG 탱크와 같은 고압 밀폐용기, 어뢰 발사관과 상하수도관 같은 각종 파이프를 제조하는데 사용된다 [4-6]. 따라서 경량의 고강도 제품을 제작하기 위해서는 섬유의 방향을 정교하게 배치하여야 한다. 이를 위해서 CNC(computer numerical control) 컨트롤러에 의해 4축 이상의 동시제어가 가능한 와인딩 기계와 함께, 이를 구동하기 위한 와인딩 궤적(winding path)을 생성해야 한다.

와인딩 궤적은 섬유가 맨드릴 위에 감겨질 때 미끄러짐(slip) 현상이나 섬유와 맨드릴이 분리되는 브

릿지(ridge) 현상 등이 발생하지 않아야 하고, 맨드릴 표면을 균일하게 완전히 덮으면서도 연속적으로 이어지도록 생성되어야 한다. 또한 필라멘트 와인딩으로 제작한 제품은 감겨지는 섬유의 방향에 의해 기계적 강도가 결정되기 때문에, 높은 강도를 가질 수 있도록 최적의 와인딩 궤적을 생성해야 한다. 이러한 조건들을 만족하는 와인딩 궤적을 생성하기 위해서는 반드시 필라멘트 와인딩 전용의 CAM 시스템이 필요하다.

3. 관련 연구 동향

3.1 산업기술 동향

복합재료 시장은 그림 4와 같이 매년 꾸준히 성장하고 있고, 에너지 절약의 중요성이 증대함에 따라 경량화가 필수 조건으로 자리매김하면서 복합재료에

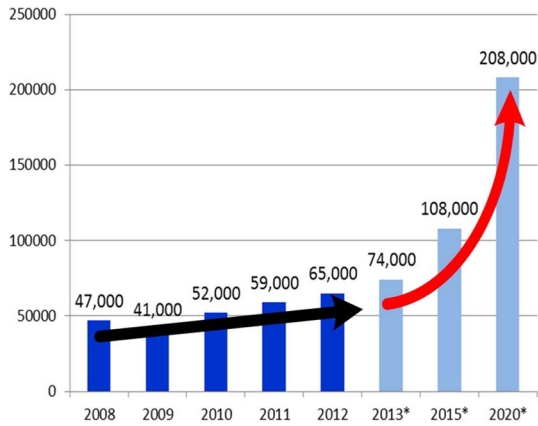


그림 4. 복합재료 시장 전망 (출처 : Composites market report 2013, Composite Germany, 2012)

대한 수요가 늘어나고 있으며, 향후 5년 이내에는 현재의 200% 정도로 성장할 것으로 예상된다. 또한 복합재료를 필라멘트 와인딩으로 제작하는 방법은 프리프레그를 사용한 압축 성형 방법에 이어서 두 번째로 많이 사용되고 있으며, 앞으로 필라멘트 와인딩으로 제품을 생산하는 비중이 점차 증가할 것으로 예상된다.

필라멘트 와인딩은 섬유를 원하는 방향으로 정확하게 감을 수 있기 때문에, 주로 압력 용기와 같이 높은 강도를 가지면서도 경량이 요구되는 부품의 제조에 많이 이용된다 [7-9]. 현재 생산되고 있는 필라멘트 와인딩 제품을 그림 5에 나타내었는데, 국내 업체에서는 파이프, 압력용기, 화학 약품의 저장탱크와 같이 원통형의 단순한 형상의 부품만을 생산하고 있다. 국외에서는 단순한 형상을 포함하여 비행기의

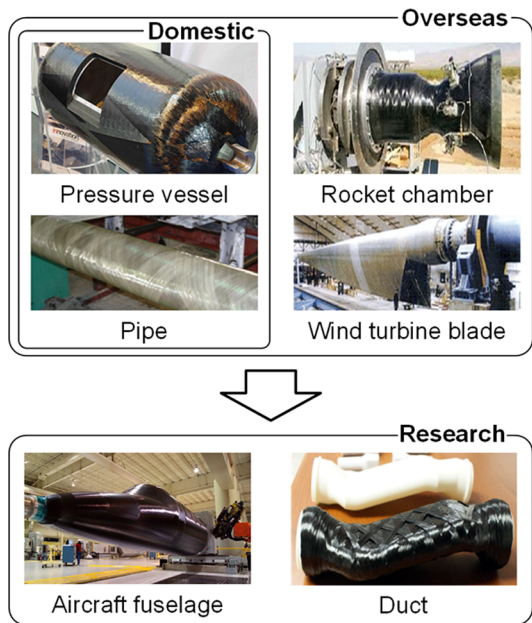


그림 5. 필라멘트 와인딩 제품 개발 현황

연료 탱크, 로켓 모터 케이스, 터빈 블레이드와 같이 복잡한 형상의 부품 제조에도 필라멘트 와인딩 공법이 사용되고 있으며, 일부 국외 기업에서는 소형 비행기 및 무인기의 동체, 항공기 엔진의 흡입구와 같은 더욱 복잡한 자유곡면의 비축대칭 형상에 까지 필라멘트 와인딩을 적용하여 제품을 생산하기 위한 연구가 수행되고 있다.

한편, 경량의 고강도 제품을 필라멘트 와인딩으로 제작하기 위해서는 섬유의 방향을 정교하게 배치하여야 하는데, 이를 위해서는 정확한 와인딩 궤적을

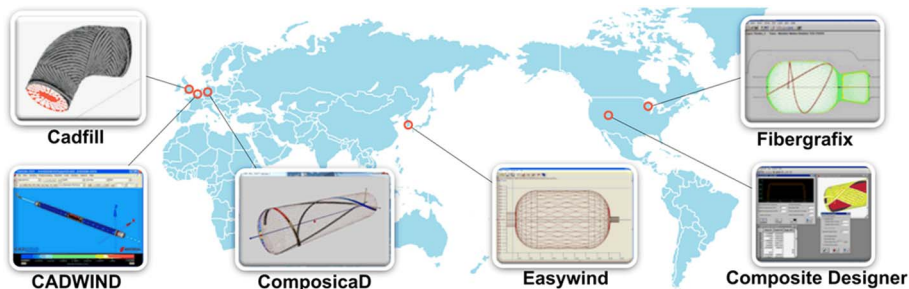


그림 6. 필라멘트 와인딩 CAM S/W

생성할 수 있는 CAM 소프트웨어가 필요하다. 이와 관련하여 그림 6과 같이 국내에서는 Easywind가 유일하며 국외에는 Material사의 CADWIND, SS&A사의 ComposicaD, Crescent Consultants사의 Cadfil 등 유럽에서 개발한 제품들이 있고, Entec Composite Machines사의 Fibergrafix, McClean Anderson사의 Composite Designer 등 미국에서 개발한 제품들이 있다.

국내에서 개발한 소프트웨어는 파이프, 압력용기와 같이 원통형 형상에 대한 와인딩 궤적의 생성만 가능하며, 국외에서 개발한 소프트웨어들은 축대칭 형상 이외에 엘보(elbow), T 조인트와 같이 단면이 일정한 비축대칭 형상의 궤적도 생성이 가능하다. 그러나 현재 개발되어 있는 상용의 소프트웨어들은 자유곡면의 비축대칭 형상에 대한 궤적 생성이 불가능하다.

3.2 학술 연구 동향

필라멘트 와인딩 관련한 학술적인 연구는 그림 7과 같이 90년대 들어서 많이 수행되기 시작하여, 최근에 복합재료 시장이 확대됨에 따라 관련 연구가 증가하고 있는 추세이다. 90년대부터 현재까지 주로

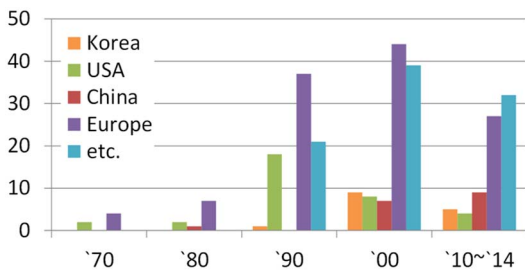


그림 7. 필라멘트 와인딩 논문

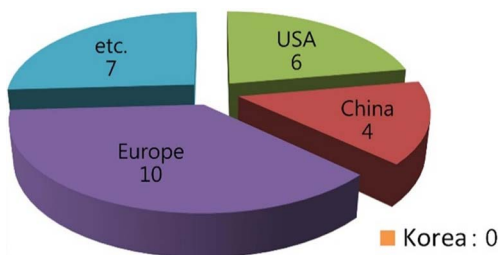


그림 8. 비축대칭 필라멘트 와인딩 논문

유럽에서 연구를 많이 수행하였고, 최근에는 중국에서도 많은 연구가 수행되고 있으며 이스라엘, 이란 등에서도 관련 연구가 급속히 증가하고 있다. 국내에서는 주로 파이프와 압력용기와 같은 단순한 형상에 대한 설계, 해석, 시험에 관한 연구가 수행되었으며, 국외에서도 대부분 축대칭 형상에 관한 연구가 수행되었다 [10-14].

한편, 비축대칭 형상과 관련한 연구는 엘보, 토러스와 같은 단면이 일정한 비축대칭 형상에 관한 연구가 대부분이었고, 최근에 블레이드, 항공기 엔진 흡입구와 같은 형상에 대한 연구가 일부 수행되었다 [15-20]. 그림 8과 같이 유럽, 중국 등에서 비축대칭 관련한 연구가 다수 수행되는 추세이나, 국내에서는 비축대칭 형상의 필라멘트 와인딩에 대한 연구가 전무하다.

3.3 와인딩 궤적 생성 방법

필라멘트 와인딩 궤적을 생성하는 방법으로 초기에는 섬유의 미끄러짐을 방지하기 위해서 측지 궤적 식의 방법을 사용하였다. 측지 궤적 식을 이용하는 방법은 측지 궤적 식을 구하기가 용이한 비교적 단순한 형상에 대해서만 적용 가능하기 때문에 원통형상에 대해 연구가 수행되었다 [21-25]. 그러나 측지 궤적은 시작점과 초기 각도가 정해지면 전체 궤적이 유일하게 정해지기 때문에, 부품에 가해지는 응력 방향이 일정하지 않은 경우에는 이에 대응하는 와인딩 궤적을 생성하기 어렵다.

이러한 한계를 극복하기 위해 미끄러지지 않는 범위 내에서 궤적의 방향 변화를 허용하는 비측지 궤적 식(non-geodesic equation)을 사용하는 방법에 대한 연구 [26-32]가 많이 수행되었다. 대표적으로 Parnas et al. [26]은 압력용기에 가해지는 내부 압력을 포함하여 축방향 하중 등 다양한 하중 조건에 대해 최적의 궤적을 생성하는 연구를 수행하였다. Zu et al. [27]는 원통형 압력용기의 돔(dome) 부위에 대해 비측지궤적 수식을 수립하고 다양한 미끄럼 계수에 대해 최적의 강도를 가지는 궤적을 생성한 연구를 수행하였다. Zu et al. [28]은 도넛 형태의 압력용기에 대해 비측지 궤적 수식을 수립하고 미끄럼

계수를 변화 시켜가면서 요구되는 강도에서 가장 얇은 두께를 가지는 미끄럼 계수 값을 찾아서 최적의 와인딩 궤적을 생성하는 방법을 연구하였다. 그러나 이러한 방법도 형상이 복잡해지면 미분 방정식으로 표현되는 비측지 궤적 수식의 해를 구하는 것이 불가능하기 때문에 주로 압력 용기와 같은 단순한 형상에 대해서만 적용이 가능하다.

측지 또는 비측지 궤적식을 사용하는 방법은 궤적의 수식을 구할 수 있는 맨드릴 형상의 한계가 있기 때문에, 보다 복잡한 형상에 대해서도 와인딩 궤적을 생성하기 위한 연구도 많이 수행되었다. Li et al. [33]는 Spline 기법을 이용하여 비축대칭의 형상에 대해 와인딩 궤적을 생성한 연구를 제안하였다. 그러나 이 방법은 균일한 간격의 와인딩 궤적을 생성하는 것이 목적이었기 때문에, 강도를 높이기 위한 최적의 섬유방향을 고려하지 못했으며 엘보 형태의 파이프와 매우 단순한 비축대칭 형상에만 적용이 가능하였다. Vargas et al. [34]는 convex 또는 concave 한 부분이 있는 비교적 복잡한 축대칭 형상에서 와인딩 궤적의 생성이 가능한 수학적 모델을 제안하였다. 이 방법도 초기에 입력한 와인딩 각도와 미끄럼계수에 따라 궤적을 생성하며 최적의 와인딩 궤적을 생성하는 연구는 수행하지 않았다.

Fu et al. [35]는 patch winding 방법을 제안하였는데, 맨드릴 모델을 포인트 클라우드(point cloud) 형태로 근사화 한 후 섬유 방향과 미끄럼 계수를 입력 받아서 와인딩 궤적을 생성한다. 이 방법은 맨드릴의 형상에 대해 수식을 세울 필요가 없는 장점이 있으나, 최대 강도를 갖는 와인딩 궤적을 생성하는 방법에 관한 연구는 수행하지 않았다. 맨드릴 형상의 자유도가 가장 높은 방법으로는 맨드릴 곡면을 삼각면(triangular facet)으로 근사적으로 표현하여 와인딩 궤적을 생성하는 방법 [36, 37]이 있다. 이 방법은 주로 상용 필라멘트 와인딩용 CAM 시스템에서 사용되는데, 최대 강도의 섬유 궤적을 생성하기 위해 사용자가 맨드릴 형상의 각 부분마다 와인딩 각도와 미끄러짐 계수를 다르게 입력하여 와인딩 궤적을 조정하여야 한다. 이를 위해 사용자는 하중의 방향을 고려하여 최적의 와인딩 각도를 미리 구해야 한다.

한편, 복잡한 형상에서 와인딩 궤적을 생성할 때 최적의 섬유 방향을 정하기 위해 구조해석에 의해 생성되는 주응력의 방향을 이용하는 연구[38]도 있었다. 이 방법은 주응력의 방향을 와인딩 각도로 계산한 후, 그 평균값을 맨드릴 곡면을 표현한 수학적식에 입력하여 와인딩 궤적을 생성하는 방법이다. 따라서 수학적식으로 표현이 되는 형상에 대해서만 적용이 가능하며 주응력의 방향이 변하는 경우에는 대응하지 못한다.

4. 맺음말

복합재료 시장이 급격히 증가하는 추세에 따라 복합재 부품 제조 방법에 대한 기술 개발과 학술적 연구가 활발히 진행되고 있다. 섬유 강화 복합재 부품은 섬유의 방향에 따라 부품의 강도가 결정되기에 높은 강도가 요구되는 부품제작에는 섬유의 방향과 위치를 정교하게 배치할 수 있는 필라멘트 와인딩 공법이 사용된다.

국외에서는 비행기의 동체나 블레이드와 같은 복잡한 형상에 대해서도 대량 생산을 위해 필라멘트 와인딩 공법을 적용하는 연구를 진행하고 있는 것에 비해 국내에서는 파이프나 원통형 압력용기와 같은 단순한 형상의 제작에 대한 기술을 보유하고 있는 수준이다. 필라멘트 와인딩은 CNC기계를 이용하여 부품을 제작하기 때문에 NC 궤적을 생성하기 위한 CAM기술이 가장 핵심적인 기술이라고 할 수 있다. 따라서 국내 산업의 필라멘트 와인딩 기술의 적용 범위를 확대하고, 고부가 가치의 복잡한 형상의 제품을 제작하여 관련 시장을 선점하기 위해서는 필라멘트 와인딩과 관련한 국내 CAM 기술에 대한 보다 적극적인 연구가 촉구되며 이러한 연구를 지원하기 위한 정책적인 배려도 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. Rossignac, J.R. and Requicha, A.A.E., "Offsetting Operations in Solid Modeling".

- Computer Aided Geometric Design*, Vol.3, pp. 129-148, 1986.
2. Weiler, K., *Topological Structures for Geometric Modeling*, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1986.
 3. Peters, S.T., "Composite filament winding". ASM International, Materials Park, 2011.
 4. Koussios, S., "Filament winding: a unified approach". Delft University Press, 2004.
 5. Shen, F., "A filament-wound structure technology overview". *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 42, pp. 96-100, 1995.
 6. Ross, C.T.F., "A conceptual design of an underwater missile launcher". *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp. 85-99, 2005.
 7. Young, K., "Advanced composites storage containment for hydrogen". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 17, pp. 505-507, 1992.
 8. Kim, C.U., Hong, C.S., Kim, C.G. and Kim, J.Y., "Optimal design of filament wound type 3 tanks under internal pressure using a modified genetic algorithm". *Composite Structure*, Vol. 71, pp. 16-25, 2005.
 9. Chapelle, D. and Perreux, D., "Optimal design of a type 3 hydrogen vessel: part I-analytic modelling of the cylindrical section". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, pp. 627-638, 2006.
 10. Liu, P., Xu, P. and Zheng, J., "Artificial immune system for optimal design of composite hydrogen storage vessel". *Computational Materials Science*, Vol. 47, pp. 261-267, 2009.
 11. Xu, P., Zheng, J., Chen, H. and Liu, P., "Optimal design of high pressure hydrogen storage vessel using an adaptive genetic algorithm". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.35, pp. 2840-2846, 2010.
 12. Hong, J.H., Han, M.G. and Chang, S.H., "Safety evaluation of 70 MPa-capacity type III hydrogen pressure vessel considering material degradation of composites due to temperature rise". *Composite Structures*, Vol. 113, pp. 127-133, 2014.
 13. Kim, Y.S., Kim, L.H. and Park, J.S., "The effect of composite damage on fatigue life of the high pressure vessel for natural gas vehicles". *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 2963-2968, 2011.
 14. Kim, C.U., Hong, C.S., Kim, C.G. and Kim, J.Y., "Optimal design of filament wound type 3 tanks under internal pressure using a modified genetic algorithm". *Composite Structures*, Vol. 71, pp. 16-25, 2005.
 15. Kim, C.U., Kang, D.H., Hong, C.S. and Kim, C.G., "Optimal design of filament wound structures based on the semi-geodesic path algorithm". *Composite Structures*, Vol. 67, pp. 443-452, 2005.
 16. Park, J.S., Hong, C.S., Kim, C.G. and Kim, C.U., "Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction". Vol. 55, pp. 63-71, 2002.
 17. Kisioglu, Y., "Burst pressure determination of vehicle toroidal oval cross-section LPG fuel tanks". *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 133, pp. 2021-2025. 2011.
 18. Zu, L., "Stability of fiber trajectories for winding toroidal pressure vessels". *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 1855-1860, 2012.
 19. Baker, W.R., Bello, S.D., Marcuzzi, D., Sonato, P. and Zaccaria, P., "Design of a new toroidal shell and support for RFX". *Fusion Engineering and Design*, Vol. 64, pp. 461-466, 2002.
 20. Zu, L., Zhang, D., Xu, Y. and Xiao, D., "Integral design and simulation of composite toroidal hydrogen storage tanks". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 1027-1036, 2012.
 21. Li, H., Liang, Y. and Bao, H., "CAM system for filament winding on elbows". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 161, pp. 491-496, 2005.
 22. Li, H. and Liang, Y., "Computer aided filament winding for elbows". *Journal of Software*, Vol.13, pp. 518-525, 2002.
 23. Pidgainyi, Y., Morozova, V. and Dudko, V., "Method of calculating the geodesic winding

- characteristics of shells of revolution". *Polymer Mechanics*, Vol. 3, pp. 721-725, 1967.
24. Pagano, N. and Whitney, J., "Geometric design of composite cylindrical characterization specimens". *Journal of Composite Materials*, Vol. 4, pp. 360-378, 1970.
 25. Johansen, B., Lystrup, A. and Jensen, M., "CADPATH a complete program for the, CAD-, CAE- and CAM-winding of advanced fibre composites". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77, pp. 194-200, 1998.
 26. Hojjati, M., Ardebili, V.S. and Hoa, S., "Design of domes for polymeric composite pressure vessels". *Composites Engineering*, Vol. 5, pp. 51-59, 1995.
 27. Vasiliev, V. and Krikanov, A., "New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications". *Composite Structures*, Vol. 62, pp. 449-459, 2003.
 28. Parnas, L. and Katýrcý, N., "Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions". *Composites Structures*, Vol. 58, pp. 83-95, 2002.
 29. Zu, L., Koussios, S. and Beukers, A., "Design of filament-wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories". *Composites: Part A*, Vol. 41, pp. 1312-1320, 2010.
 30. Zu, L., Koussios, S. and Beukers, A., "Design of filament-wound circular toroidal hydrogen storage vessels based on non-geodesic fiber trajectories". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 660-770, 2010.
 31. Koussios, S., Bergsma, O. and Mitchell, G., "Non-geodesic filament winding on generic shells of revolution". *Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 219, pp. 25-35, 2005.
 32. Youdong, L., Zhenqiang, Z. and Guozhao, W., "An extension of Clairaut equation and its application". *Applied Mathematics-A Journal of Chinese Universities*, Vol. 12, pp. 1-14, 1997.
 33. Koussios, S., Beukers, A. and Stathis, P., "Manufacturability of composite pressure vessels: application of non-geodesic winding". *In: 16th International Conference on Composite Materials*, Kyoto, Japan, 2007.
 34. Zu, L., Koussios, S. and Beukers, A., "Shape optimization of filament wound articulated pressure vessels based on non-geodesic trajectories". *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 339-346, 2010.
 35. Li, H., Liang, Y. and Bao, H., "Splines in the parameter domain of surfaces and their application in filament winding". *Computer-Aided Design*, Vol. 39, pp. 268-275, 2007.
 36. Vargas Rojas, E., Chapelle, D., Perreux, D., Delobelle, B. and Thiebaud, F., "Unified approach of filament winding applied to complex shape mandrels". *Composite Structures*, Vol. 116, pp. 805-813, 2014.
 37. Fu, H., Wang, X., Han, Z. and Fu, Y., "Abnormal shape mould winding". *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 20, pp. 552-558, 2007.
 38. Scholliers, J. and Van Brussel, H., "Computer-integrated filament winding: computer-integrated design, robotic filament winding and robotic quality control". *Composites Manufacturing*, Vol. 5, pp. 15-23, 1994.
 39. Christian, L., "Process simulation in filament winding". *Reinforced Plastics*, pp.40-42, 1992.
 40. DiVita, G., Marchetti, M., Moroni, P. and Perugini, P., "Designing complex shape filament-wound structures". *Composites Manufacturing*, Vol. 3, pp. 53-58, 1992.



▲ 제 25회 과학기술우수논문상 시상식 (정용호 교수, 부산대학교)