

복합재료 유체 저장 탱크 구조 설계를 위한 RTM 공법 수치 유동 해석

박현범^{1,†}

¹호원대학교 국방과학기술학부 항공시스템공학 전공

Resin Flow Analysis of RTM Manufacturing Method for Design of Composite Fluid Storage Tank Structure

Hyunbum Park^{1,†}

¹Dept. of Defense Science & Technology-Aeronautics, Howon University

Abstract

In this study, resin flow analysis of resin transfer moulding (RTM) method was performed for mould design of composite structure. The target composite structure was a tank used for fluid storage. Natural c fiber composite was adopted for composite structural design of the fluid storage tank. RTM was adopted for manufacturing of the tank using natural fiber composites. Resin flow analysis was performed to find the proper RTM conditions of the tank. The resin flow analysis was performed using the commercial FEM flow simulation software. After repeated analysis while changing the location of resin inlet and outlet, the proper resin filling time and pattern were found.

초 록

본 연구에서 복합재료 구조 설계를 위한 수치 이송 성형 공법의 수치 침투 유동 해석을 수행하였다. 대상 복합재료 구조물은 유체 저장 탱크 구조물이다. 유체 저장 탱크 복합재료 구조물 설계를 위해 자연 섬유 복합재료가 적용되었다. 자연섬유 복합재 구조의 제작을 위해 수치 이송 성형 공법을 채택하였다. 탱크의 적절한 RTM 조건을 도출하기 위하여 수치 침투 유동 해석을 수행하였다. 수치 유동 해석은 상용 유한 요소 해석 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 수행하였다. 수치 주입구와 배출구의 다양한 변경에 따른 반복적 해석을 수행하여 최적의 수치 주입 시간과 위치를 결정하였다.

Key Words : 수치 이송 성형(Resin Transfer Moulding), 수치 유동 해석(Resin Flow Analysis), 복합재 구조 (Composite Structure), 구조 설계(Structural Design)

1. 서 론

현재 복합재료는 항공기, 자동차 등 구조물의 경량화를 위하여 금속재료 대체를 위해 활용도가 급격히 증가하고 있다. 복합재료는 설계 과정부터 제작 공법에 대한 고려가 필요하다. 최근 들어 복합재료 대형 구조물 성형 및 생산성 등의 향상을 고려하여 RTM(resin transfer moulding) 공법이 부각되고 있

다. 1970년대 중반 미국과 캐나다를 중심으로 RTM 성형기술이 제시되어 10년 동안 저렴한 몰드(mould) 비용과 인력지향적인 오픈 몰드(open mould)작업에서 단순히 상부 몰드와 클램프 등을 적용한 결합 몰드(closed mould)로의 작업으로 복합재료 산업에 혁신을 가져왔다. 그러나 생산성과 경제성에 의해 소량 생산의 몇몇 업체를 제외하고는 RTM은 외면되고, 오픈 몰드 생산방식이 1980년대까지 이어지게 되었다. 최근 1990년대 들어와 대량생산의 기초를 마련한 몰드 기술과 소재의 발전 등으로 RTM 공정에 새로운 기술이 소개되면서 현재 미국을 비롯하여 유럽에서 복합재료

성형 산업에 가장 큰 기술의 주류를 이루고 있다. 특히 항공기 및 자동차 등의 대형 구조물 제작 산업에서 탈 오토클레이브 공정에 대한 경제성 및 성능 개선의 필요성이 제기됨에 따라 점차 RTM 등의 공정이 부각되고 있다[1].

복합재료 제작 공법에 관한 연구는 국외를 중심으로 최근 다양한 연구가 추진되고 있다. 특히 RTM 공정에 관한 국외 연구 동향을 살펴보면, Yu Fu 등은 RTM 하이브리드 공법으로 제작된 복합재료 I형태 빔의 3점 굽힘 시험을 수행하여 기계적 특성을 분석하였다[2]. M. Bodaghi 등은 고속 수지 주입 RTM 공정에 의한 높은 섬유체적비 적층 구조물의 기공 특성에 대한 연구를 수행하였다[3]. Bai J. 등은 RTM 공법으로 제작된 다중 적층 카본 섬유/에폭시 복합재료의 파괴 메커니즘을 실험적으로 결정하였다[4]. DeLong He 등은 RTM 제작 공법으로 제작된 유리섬유/에폭시 복합재 구조의 충격 특성에 관한 연구를 수행하였다[5].

국내에서는 이하승 등이 친환경 자연섬유 복합재료 적용 자동차 후드 구조에 RTM 성형 공정을 채택하여 제작하였다[1]. 한송희 등은 카본/에폭시 복합재료의 수지 침투 시간을 줄이기 위한 고속 RTM 공정에 관한 연구를 수행하였다[6]. 박슬기 등은 다채널 경화 모니터링 시스템을 이용한 속경화 수지의 유동과 경화도를 측정하여 다양한 압력 조건에서 상호 비교를 수행하였다[7]. 안종무 등은 고압 RTM 공정에서 고속 수지 유동에 의한 섬유 보강제의 변형 거동에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 섬유와 금형의 마찰계수 측정 장치와 고압 RTM 공정을 모사하는 장치를 구축하였다[8].

선행 연구 분석 결과 RTM 제작 공법 및 제작된 시편의 물성치 평가 등 다양한 연구가 수행되었으나 RTM 공법의 중요한 요소 중에 하나인 수지의 침투 유동 해석에 대한 고려는 일부 수행된 바 있다. 본 연구의 선행 연구로서 아마 섬유를 적용하여 시편 제작 연구를 수행한 바 있다[9]. 본 연구에서는 복합재료를 적용하여 자동차 차량용 농약 저장 탱크의 구조 설계 및 시제품 제작을 수행하였으며, 이에 대한 제작 공법으로 RTM 제작 공법을 적용하였다. 선행 연구를 통해 개념 설계된 탱크의 하단부를 양산을 위해 수지 유동 해석을 수행하여 제작 공법을 개선하였다[10]. RTM

공법의 수지 침투에 대한 다양한 설계 변수를 분석하여 주입구와 배출구의 최적 위치를 결정하였다.

2. 탱크 설계 및 해석

본 연구를 위한 대상 구조물인 자동차 차량용 농약 저장 탱크는 하단부 바닥판이 가장 큰 하중을 받으므로 바닥 구조 설계를 위해 복합재료 설계 기법으로 두 가지 방안을 적용하였다. 복합재료의 특성상 한 방향으로만 모든 하중을 담당한다고 가정하는 단순 설계 기법(netting rule)을 적용해 개념 설계를 수행하였다. 단순 설계 방법에 의한 설계 개념은 하중 방향으로 적층된 섬유만이 그 하중을 담당하며, 다른 방향으로 적층된 섬유는 강도에 기여하지 않는다고 가정하는 방법으로서 초기 개념 설계에 유용하다. 이를 개선하여 섬유의 방향성을 고려하고 타 방향의 하중을 담당하는 섬유 각도를 결정하는 혼합 설계 기법(rule of mixture)을 적용하여 준등방성(quasi-isotropic) 복합재 구조로 적층 순서를 결정하였다[2]. 혼합 설계 방법은 복합재료 설계시 하중 방향과 다른 방향으로 적층된 섬유도 원래 강도의 10%가 하중 방향에 기여한다는 이론으로서 보다 경량화된 설계 개념이다.

본 연구에서 적용된 재료는 선행 연구를 통해 기계적 물성치를 분석한 자연 섬유인 아마 섬유가 적용되었다. 자연 섬유 복합재료에 대한 연구는 유럽을 중심으로 활발하게 연구되고 있다. 본 연구에서는 영국 첨단제조센터에서 아마/비닐 에스테르 복합재료의 시편 제작 후 기계적 물성치를 분석한 결과를 적용하여 구조 설계를 수행하였다. 시편 제작에 적용된 아마 섬유는 영국의 composite evolution 에서 구매한 섬유이며, 섬유 직물의 직조 구조는 $\pm 45^\circ$ 로 직조된 2-D Fabric 형태의 섬유를 이용하여 시편을 제작하고 물성치를 평가하였다. 적용 재료의 물성치는 Table 1에 제시하였다[11].

설계 하중은 탱크 바닥판으로 작용되는 유체의 압력과 유체가 높이에 따라 중력의 영향으로 단계적으로 탱크 벽면에 작용하는 하중 두 가지를 분석하였다. 가장 큰 하중이 탱크 바닥판으로 작용되는 유체의 압력이므로 이를 설계 하중으로 정의하고 구조 설계를 수행하였다. 설계 하중은 유체를 물로 적용하여 물의 밀

도(ρ) 1000 kg/m³, 중력 가속도(g) 9.8 m/s², 탱크의 높이(h) 0.74 m를 적용하여 계산하였다. 계산된 하중은 7.252 kN/m²이다. 여기에 안전율 3을 적용하여 21.75 kN/m²로 계산하여 설계하중으로 적용하였다. 본 연구 대상 구조물의 안전율은 제작사와 논의하여 기존에 적용된 탱크 설계 요구 조건을 분석하여 안전율 3으로 적용하였다. Fig. 1은 탱크의 높이에 따른 수압을 그래프로 제시한 결과이다.

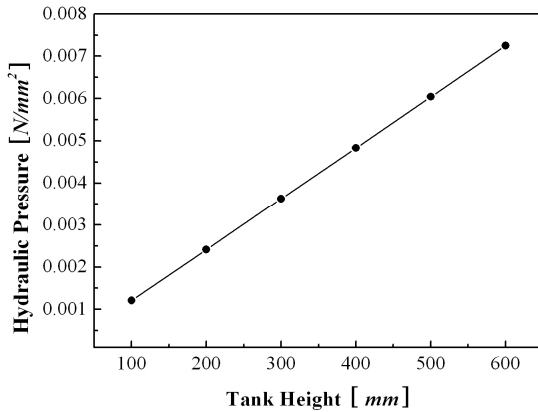


Fig. 1 Hydraulic Pressure vs Tank Height

앞서 계산된 설계 하중을 바닥판의 처짐과 적용 재료의 탄성계수를 고려하여 설계하였다. 구조 설계 결과 탱크 하단부는 2-D Fabric 아마 섬유 10plies 두께로 설계되었으며, 적층 형태는 $[\pm 45_2/(0/90)_2/\pm 45]_s$ 이다. 벽면 및 상부는 5plies 두께로 설계되었으며, 적층 형태는 $[+ 45/0/-45/0/+ 45]$ 이다. Fig. 2에 설계된 구조 형상을 명시하였다.

구조 설계 결과는 MSC Software사의 NASTRAN 유한 요소 해석 프로그램을 활용하여 구조 안전성을 평가하였다. Fig. 3은 유한 요소 해석을 위해 하중 및 경계조건을 적용한 형상이다. 해석 모델은 복합재료 요소인 PCOMP 요소를 이용하여 격자를 생성하였다. 경계조건은 탱크 하단부가 차량에 고정되는 양 옆면 체결부위에 고정 경계 조건을 적용하였으며, 하중은 탱크 내부에 적용되는 유체의 압력을 분석하여 적용하였다. 탱크 구조 해석 결과 탱크 하단부로 작용하는 압력에 의해 탱크 중앙 부위에 최대 응력이 작용한다. 최대 인장 응력은 27.7 MPa이다. 재료 강도는 227.2 MPa로서 안전계수 1.5를 적용하여 안전여유를 계산한 결과 4.46으로 검토되었다. 따라서 설계 결과는 충분

히 안전한 것으로 확인되었다. Fig. 4는 응력 해석 결과이다. 본 구조 설계 결과 형상과 적층수를 반영한 3차원 모델을 적용하여 수지 유동 해석을 통해 최적화된 제작 방안을 연구하였다.

Table 1 Mechanical Properties of Flax/vinyl Ester Specimen (Fiber Volume Fraction: 51%)

Type	Strength (MPa)	Test Institute
Tension	227.2	Advanced Manufacturing
Flexure	252.1	Research Centre with
In Plane Shear	27.6	Boeing, The University of Sheffield, UK

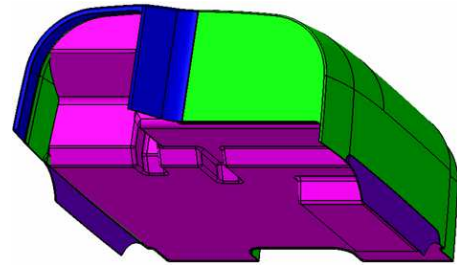


Fig. 2 Designed Configuration of Tank for Fluid Storage

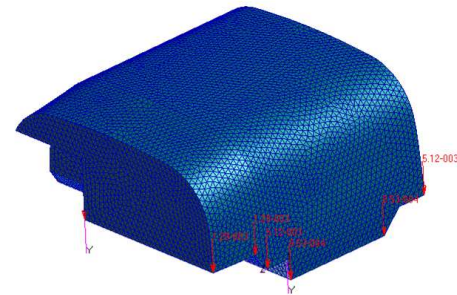


Fig. 3 Finite Element Modeling for Tank Analysis



Fig. 4 Stress Analysis Result of Tank for Fluid Storage

3. 수지 유동 해석

3.1 함침성 실험

본 연구에서 구조물 제작을 위해 채택한 공법은 수지 주입 공법인 RTM(resin transfer molding) 공법이다. 최근 들어 복합재료 대형 구조물 성형 및 생산성 등의 향상을 고려하여 RTM공법이 부각되고 있다. RTM 공법은 섬유 구성품인 프리폼(preform)을 미리 제작하고, 금형에 적층하여 수지를 주입하는 복합재료 성형 공법이다. 앞서 설계한 대상 구조물인 탱크의 구조 설계 형상 모델에 수지를 침투하는 시뮬레이션을 통해 최적화된 수지 입출구 위치를 결정하였다.

RTM 공법에서 수지 주입 시 고려되어야 할 사항은 수지의 점도, 수지 유동 속도, 수지 주입 압력, 수지 배출 진공 압력이다. 특히 RTM 공법에서 중요한 부분은 적절한 수지 침투 경로 및 수지 침투 시간이다. 즉, 수지 침투를 위한 주입구, 배출구 위치가 성형 공정에 영향을 미치는 주요 변수이다. 따라서 수지 침투 유동 해석을 통해 주입 경로를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 제품 형상이 대부분 복잡하므로 복합재료 구조물 제작 시 몰드 설계에 고려될 주입구와 배출구의 위치 선정과 최적 성형 조건을 결정하기 위해 수지 유동 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 수지 유동을 예측할 수 있는 상용 유한 요소 해석 프로그램을 적용하였다. 수지 유동 해석을 위해서 식 (1)에 제시한 점성 유체의 흐름 법칙인 Darcy의 법칙(Darcy's law)을 적용하여 함침성을 측정하였다[12].

$$t = \frac{\hat{A}\mu l^2}{2kP^r} \quad (1)$$

여기서, t 는 함침시간, \hat{A} 는 섬유 프리폼의 단면적, k 는 함침성 계수(단위 m^2), μ 는 수지의 점성, l 은 유동 선단, P^r 은 압력 차이이다.

수지 유동 해석에서 중요하게 작용하는 변수는 섬유 체적비, 수지의 점성 그리고 함침성 계수이다. 특히 함침성 계수는 직접 실험을 통해서 측정되어야 하며, 이를 위해서 직접 실험 장비를 설계 제작하여 함침성 계수를 측정하였다. 함침성 실험용 장비는 중앙의 구멍에 수지를 주입하고 주위의 구멍을 통해 출력되는 구조이며, 내부에서 수지의 침투 속도를 측정한다. 주입

구 압력과 수지의 점성 및 침투 속도를 통해 재료의 함침성을 측정하게 된다. 함침성 실험은 총 3번을 수행하여 평균값을 도출하였다. 복합재 섬유의 특성상 섬유의 길이 방향(물에 감긴 방향, K_1)과 수직 방향(K_2)을 측정했을 때 물을 감을 때 발생하는 힘에 의해 일부 차이가 나기 때문에 평균 함침성 계수를 측정하였다. K_1 방향의 함침성 계수 평균은 $5.077E-11 m^2$, K_2 방향의 함침성 계수는 $4.147E-11 m^2$ 이다. 두 값의 평균 함침성 계수는 $4.6E-11 m^2$ 로 계산되었다. 계산된 함침성 계수는 수지 유동 해석을 위한 변수로 적용되었다.

수지 유동 해석 프로그램의 해석 신뢰성을 분석하기 위해 함침성 실험 결과 조건을 적용하여 수지 유동을 모사하였다. 수지의 함침성 실험은 카메라를 통해 시간당 수지 흐름 선단을 분석하였다. 수지가 섬유 주입구 중앙에서 직경 50 mm 지점까지 도달하는 시간을 기준으로 함침성을 측정하였으며, 해석 시간과 비교하였다. 해석을 통한 함침성은 445초이며, 실험 결과는 480초로 측정되어 유사한 결과임을 확인하였다. Fig. 5에 함침성 실험 결과와 해석 결과를 비교한 사진을 제시하였다.

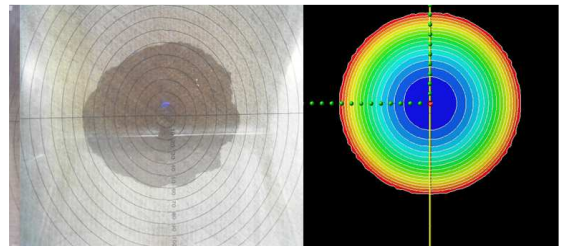


Fig. 5 Resin Flow Analysis Result of Permeability Test and Analysis

3.2 수지 유동 해석

RTM 공법의 수지 유동 해석을 위해서 탱크의 상하부의 두께를 Thin Shell로 모델링하였다. 수지 유동 해석은 Polyworx 사의 RTM-Worx 소프트웨어를 사용하였다. Fig. 6은 탱크의 하단부 모델링 결과를 보여주고 있다. Table 2에 해석을 위한 입력 상수에 관한 세부사항을 명시하였다. RTM 해석을 위한 해석 케이스는 Table 3과 같다. 수지의 주입 압력은 7bar로 적용하였다. 수지 주입 및 배출 조건은 총 세 가지 Case로서 Case 1은 하단부 앞쪽 중앙에서 수지를 주입하

여 하단부 뒤쪽 중앙으로 수지를 배출시키는 형태이다. Case 2는 뒤쪽 중앙에서 수지를 주입하여 앞쪽 왼쪽 끝단으로 배출시키는 형태이다. Case 3은 앞쪽 오른쪽 끝단에서 주입하여 뒤쪽 중앙으로 배출시키는 형태이다. Fig. 7~9 그림에서 빨간색 포인트가 수지 주입구, 푸른색 포인트가 수지 배출구 이다. 수지는 비닐에스테르 수지로서 경화시간은 60분(3600초) 이내이다. 따라서 60분 이내에 완전 침투가 되어야 경화가 진행되기 전에 완전히 주입된다.

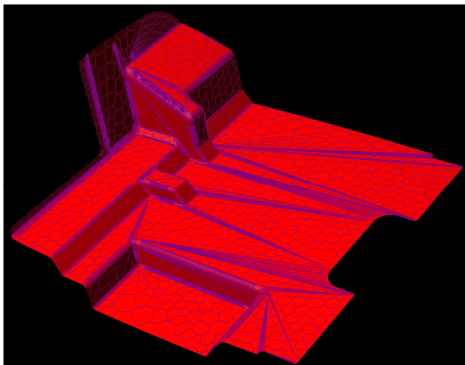


Fig. 6 Modelling of Tank Lower Part for Resin Flow Analysis

Table 2 Resin Flow Analysis Parameter

Injection Pressure	7bar
Fiber Permeability	4.6E-11m ²
Resin Viscosity	150cP
Fiber Volume Fraction	51%

Table 3 RTM Resin Flow Analysis Cases

Cases	Position of Injection Port	The Number of Injection Port	The Number of Bending Port
Case 1	Center of Bottom	1	1
Case 2	Back of Bottom	1	1
Case 3	Edge of Bottom	1	1

본 연구에서 Table 3의 조건으로 각각 해석한 결과 Case 1은 1,790초, Case 2는 3,790초, Case 3은 1,369초로 Case 2를 제외한 나머지 모든 조건이 경화가 일어나기 전 수지가 완전 침투를 하였으나, 완전 침투가 짧으면 좋기 때문에 Case 3의 RTM 침투 조건이 가장 적절한 것으로 확인할 수 있다. Fig. 7~9에 각 케이스의 해석 결과를 제시하였다. 각 그림의 첫

번째 그림은 수지 주입을 시작하여 침투하고 있는 장면이며, 두 번째 그림은 수지 주입이 완료되어 배출구로 수지가 배출되는 형상의 유동 해석을 수행한 결과이다. 각 그림의 왼쪽 그래프는 함침 시간을 의미한다. 본 수치 해석 결과를 활용하여 최적의 수지 주입 시간을 고려하고 주입구 및 배출구의 위치를 선정하였다. 수지의 입출구는 몰드 제작과 시제품 제작을 위해 제작 공정을 고려하여 Case 3의 위치로 선정하였다.

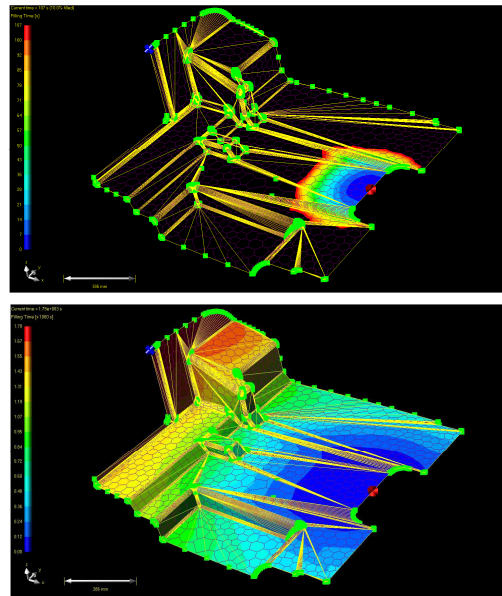


Fig. 7 Resin Flow Analysis Result of Case 1 (Filling Time)

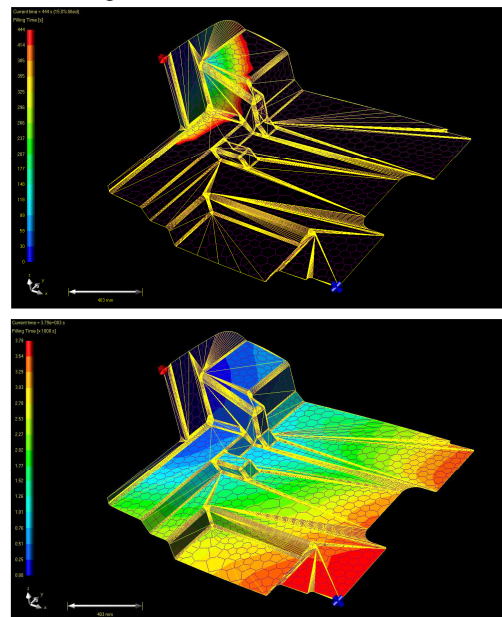


Fig. 8 Resin Flow Analysis Result of Case 2 (Filling Time)

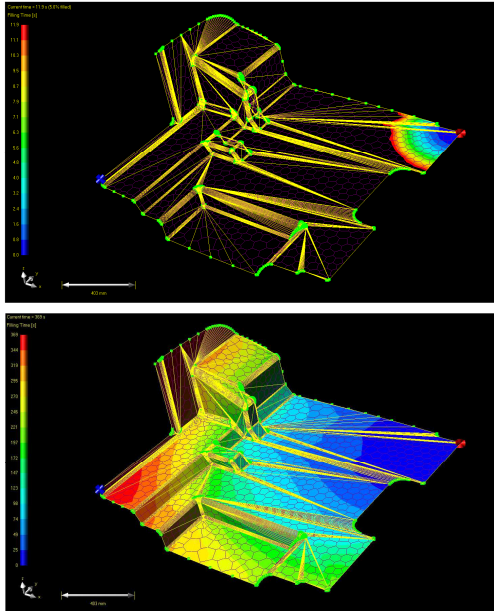


Fig. 9 Resin Flow Analysis Result of Case 3 (Filling Time)

4. 몰드 제작

앞서 수치 해석 결과를 활용하여 최적의 수치 주입 시간을 고려하고 주입구 및 배출구의 위치를 선정하였다. RTM 제작 공정의 수치 유동 해석 결과를 반영하여 수치 주입구와 수치 배출구를 바닥 측면 끝단 부분으로 결정하였다. 수치 입출구 위치를 고려하여 시제품 제작을 위한 몰드 설계 및 제작을 수행하였다. 탱크 설계 형상을 반영하여 마스터 모델을 제작한 후 몰드 제작을 수행하였다. Fig. 10은 몰드 제작을 위한 마스터 모델을 보여주고 있다. 제품 몰드의 표면 상태를 양호하게 제작하기 위해 모델에 Primer paint를 도포하고 유격이 발생한 자리는 Putty를 이용하여 표면을 매끄럽게 처리하였다. Fig. 11은 모델의 표면에 Gel coat를 도포한 형상이다. 본 연구 개발에 적용된 제작 공법은 진공과 함께 압력을 가하는 RTM 공법으로 상, 하형 몰드를 적용하여 성형하는 방식이다. 따라서 실제 제품의 제품 두께 확보를 위해 Sheet wax를 사용하였다. Sheet wax는 범용 적으로 사용되는 FREEMAN사의 Sheet wax를 사용해 실제제품의 제품 두께를 보정하였으며, 이를 이용해 제품 성형을 위한 몰드를 제작하였다. Fig 12는 몰드 제작을 위한 유리 섬유 복합재료를 적층한 형상이다. Fig. 13은 제작된

몰드의 형상이다.

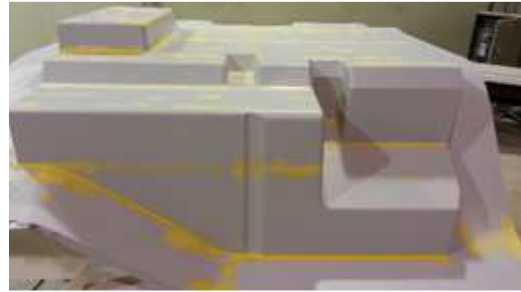


Fig. 10 Surface Treatment of Master Model

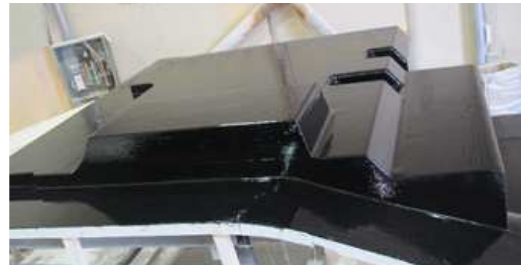


Fig. 11 Application on Gel Coat of Surface



Fig. 12 Lamination of Glass Composite for Mould Manufacturing

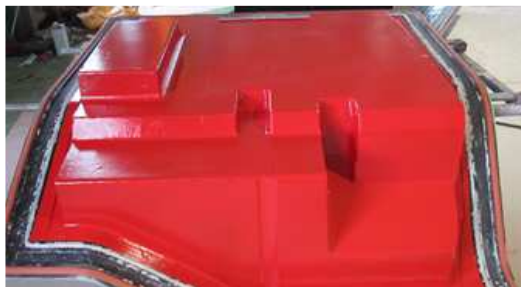


Fig. 13 Manufactured Mould of Tank

5. 시제품 제작

앞서 제작된 몰드에 선행 연구를 통해 도출한 수치 주입구와 배출구를 고려하여 각 포트를 장착하였다.

RTM 제작 공정의 수치 유동 해석 결과를 반영하여 수치 주입구와 수치 배출구를 바닥 측면 끝단 부분으로 결정하였다. 몰드 위에 설계 결과인 $[\pm 452/(0/90)2/\pm 45]$ 적층 각도를 고려하여 2-D Fabric 아마 섬유를 적층하였다. Fig. 14에 아마 섬유가 적층된 형태를 제시하였다. Fig. 15는 몰드를 활용하여 최종 제작된 탱크 하단부 형상이다. 제작된 탱크 상하면 시제품의 접착은 시편 제작을 통해 접합부를 결합하여 접착 시험을 통해 성능을 검증한 ISR 70-05 AP 접착제를 적용하여 결합하였다. 접착제의 세부 사양은 Table 4에 명시하였다.

Table 4 Adhesive Specification (ISR 70-05 AP)

Specific Gravity	1.5 g/ml
Skin Forming Time	15 min
Tensile Strength	2.3 MPa
Shear Strength	2.4 MPa



Fig. 14 Flax Fiber Lamination of Tank Lower Part



Fig. 15 Manufactured Prototype

6. 결론

본 연구에서 자동차 차량에 적용되는 농약 저장 탱크의 구조 설계 및 시제품 제작을 수행하였다. 탱크는

유체를 저장하는 형태이므로 바닥으로 작용하는 유체의 하중을 지탱할 수 있는 구조로 설계하였다.

농약 저장 탱크의 구조 설계 결과를 반영하여 최종 시제품 제작을 수행하였다. 시제품 제작을 위한 공법으로 RTM 제작 공법을 채택하였다. RTM 공정은 수지를 주입하는 방식으로 수지의 유동에 따라 섬유에 침투하는 시간이 성형 시간에 중요한 변수로 작용한다. 따라서 본 연구를 통하여 RTM 공법의 수치 유동 해석을 통해 복합재료 구조물 제작 시 고려될 주입구 및 배출구를 선정하고 최적의 성형 조건을 도출하였다. 수치 유동 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 제한 조건 이내에 성형의 성공 여부를 판단할 수 있었으며, 최적화된 제작 공법을 확립하였다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B07043553)

References

- [1] H. Lee, "Study on Structural Optimization of an Automobile Hood using Natural Fiber Composite," *Ph.D Thesis, Chosun University, Rep. of Korea*, 2016.
- [2] Fu, Y., Xiong, J., Luo, C., Yun, X., "Static Mechanical Properties of Hybrid RTM-made Composite I- and II-beams under Three-point flexure," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28, pp. 903-913, 2015.
- [3] Bodaghi, M., Cristovao, C., Gomes, R., Correia, N. C., "Experimental Characterization of Voids in High Fibre Volume Fraction Composites Processed by High Injection Pressure RTM," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 82, pp. 88-99, 2016.
- [4] Bai, J. B., Sheno, R. A., Yun, X. Y., Xiong, J. J., "Progressive Damage Modelling of Hybrid RTM-made Composite II-joint under Four-point

- Flexure using Mixed Failure Criteria,” *Composites Structures*, Vol. 159, pp. 327-334, 2017.
- [5] He, D., Salem, D., C, J., P., G. P., B, J., “Impact of the Spatial Distribution of High Content of Carbon Nanotubes on the Electrical Conductivity of Glass Fiber Fabrics/epoxy Composites Fabricated by RTM Technique,” *Composites Science and Technology*, Vol. 147, pp. 107-115, 2017.
- [6] Han, S. H., Cho, E. J., Lee, H. C., Jeong, Kun., Kim, S. S., “Study on High-speed RTM to Reduce the Impregnation Time of Carbon/epoxy Composites,” *Composites Structures*, Vol. 119, pp. 50-58, 2015.
- [7] Park, S. K., Kim, C. H., Choi, J. H., “A Study on Cure Monitoring of Fast Cure Resin RTM Process Using Dielectrometry”, *Composites Research*, Vol. 30, pp. 202-208, 2017.
- [8] Ahn, J. M., Seong, D. G., Lee, W. H., Um, M. K., Choi, J.H., “A Study on Slip Behavior of Fiber Preform by High Speed Resin Flow in High Pressure Resin Transfer Molding,” *Composites Research*, Vol. 27, pp. 31-36, 2014.
- [9] Park, H. B., “Investigation on Mechanical Properties of Natural-Fiber Composite Manufactured using VARTM Method,” *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 59-62, 2016.
- [10] Kong, C. D., Park, H. B., Lee, J. W., “Study on Structural Design and Analysis of Fax Natural Fiber Composite Tank Manufactured by Vacuum Assisted Resin Transfer Molding,” *Materials Letters*, Vol. 130, pp. 21-25, 2014.
- [11] Park, H. B., Kong, C. D., Lee, J. H., Kim, I. G., Lee., H. Y., “Investigation on Mechanical Properties of Flax/Vinyl Ester Natural Fiber Composite,” *Composites Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 19-24, 2014.
- [12] Jeong, J. W., Lee, B. S., Kang, B. Y., Han, K. S., Su, S. B., “Study of Laminating Strategy for FRP Hull Using Resin Infusion Simulation,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 98-103, 2009.