

論文

성형 압력이 ARTM에 미치는 영향

황헌기* · 김영록* · 이재원* · 류요한* · 정문조*

The Effects of Compressive Pressure on ARTM

Heon-Ki Hwang*, Young-Roak Kim*, Jae-Won Lee*,
Yo-Han Rew*, Mun-Jo Jung*

ABSTRACT

RTM process has been widely used because of its advantages such as low proto type cost, design flexibility, good surface finish, and so on. However, this process, specially when it requires high fiber volume(>50%), has been experienced some difficulties to make good quality products because of poor wetting through fiber reinforcements. Also, this process sometimes takes more than 4 hours of resin injection time. Recently, a new technique has been demonstrated with combination of RTM and compression molding processes. This process not only reduces resin injection time, but also improves mechanical properties of products. The objective of this paper is to investigate the effect of process variable (mold closing pressure) on the formation of voids in the parts. To understand this relationship, resin flow behavior in the mold will be investigated during the advanced RTM process. Also, this paper will present mechanical properties(tensile strength and drop weight impact properties) of advanced RTM parts.

초 록

RTM 성형법은 타 성형법에 비하여 낮은 생산 원가, 복잡한 형상의 일체 성형, 고등급 표면 처리등의 장점 때문에 지금까지 널리 쓰이고 있다. 그러나 RTM 성형법으로는 강화 섬유 부피 함량이 50% 이상 요구되는 고강도 구조물용 복합 재료 성형법으로는 성형상의 문제점으로 인해 한계가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 기존의 RTM 성형법과 Compression Molding 법이 조합된 새로운 성형법(Advanced Resin Transfer Molding : ARTM)이 최근 시도되고 있다.

이 새로운 성형법은 수지 주입 시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라 성형된 복합재료의 기계적 성질도 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 수지 주입 후 Mold에 가해주는 성형 압력이 복합 재료내의 가공과 성형된 복합 재료의 기계적 성질에 미치는 영향을 평가하였으며, 초기 Mold내에 수지 주입시 수지 흐름거동에 대하여 고찰하였다.

* 삼성중공업(주) 중앙연구소 신기술개발실

1. 서 론

경량·내식성 고분자 복합재료의 적용 분야가 항공·우주 및 방위 산업에서 수송기기 및 일반 산업 분야로 확대됨에 따라 고생산성, 저가격의 경쟁력 있는 성형 방법의 필요성이 강조되고 있다. 이러한 요구에 따라 기존의 Autoclave, Hand Layup 등의 수작업에 의한 제품 성형방식에서 벗어난 RTM(Resin Transfer Molding) 및 Pultrusion 등 자동화에 따른 생산 체계가 제품의 특성에 따라 개발 적용되고 있다. 특히 RTM은 복잡한 형상을 갖는 제품 또는 다품종 소량의 다양화된 제품에 그 적용이 적합하며, Pultrusion은 동일한 단면을 갖는 형상 제품에 적합하다.

종래의 RTM 공정은 Mold내에 강화 섬유 등의 예비 성형체를 위치시켜 Mold를 완전히 닫은 후 수지 주입구로 수지를 일정 압력 또는 일정량으로 주입 이송시켜 Mold내의 공기를 출구로 밀어내면서 수지를 채워 강화섬유에 젖게 하였다. 이 방법은 초기에 너무 높은 섬유 부피 함량의 예비 성형체를 Mold에 위치시키면 수지의 주입 압력이 높아져야 하고 또한 성형 시간이 오래 걸리는 단점 때문에 일반적으로 강화 섬유 부피 함량이 40% 내외로 한정되고 있으며, 비교적 낮은 섬유 함유량으로 인하여 고하중을 받는 구조재로서의 복합재료 성형 보다는 주로 외장재나 고하중을 받지 않는 일반 부품의 성형 방법으로 많이 이용되고 있다.

따라서, 고하중을 받는 복합 재료 구조재의 생산 공법으로 적용하기 위하여는 RTM 성형에 있어 고 섬유 함유율을 달성하는 것이 선결되어야 할 과제이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 여러가지 방안이 제시되고 있으나[1], 그 중에서 초기에 섬유 함유율이 낮은 상태에서 수지를 주입한 후 Mold에 압력을 가하여 Mold내의 수지를 짜내는 방법이 성형 시간의 단축 및 성형의 간결성 측면에서 유리하여 유망시되고 있다.

또한 고강도 구조물의 성형을 위해서는 평직 및 일방향 연속섬유등으로 구성된 예비 성형체가 사용되는데 특히 직모의 예비 성형체에 있어서 이러한 성형 방법의 적용은 성형시 섬유 다발내의 남아있는

공기에 의하여 기공을 형성하게 된다. 이러한 복합 재료내의 기공 존재는 복합재료의 기계적 물성을 저하시킬 뿐만 아니라 수분 흡수율을 증가시키며, 복합재료 성질의 신뢰성을 떨어뜨리는 등의 나쁜 영향을 미치게 된다.[2-4]

RTM 성형시 이와 같은 복합 재료내의 기공 생성에 대하여 수지내의 첨가제 반응에 의한 영향등이 제시되었지만, 그 중에서 섬유 다발들 사이의 수지 흐름속도와 섬유 다발 내로의 수지 흐름 속도의 차이로 인해 내부의 공기가 빠져나가지 못하고 잡히게 되기 때문이라는 제안이 가장 설득력이 있다[5]. 즉 섬유 다발에서의 수지 흐름을 미시적으로 보면, 섬유 다발들 사이로 흐르는 섬유 다발 외부에서의 흐름과 섬유 다발 외부에서 섬유 다발 중심으로 흐르는 섬유 다발 내부에서의 반경류로 나누어 생각할 수 있다. 이때 섬유 다발 외부, 즉 섬유 다발들 사이에서의 흐름 속도와 섬유 다발 내부로의 반경류 속도는 각각의 Permeability 차이에 의하여 그 차이가 생기게 되는데 반경류 보다는 섬유 다발 외부에서의 수지 흐름 속도가 더 빠르게 되어 반경류가 미처 섬유 다발 중심에 도달하기 전에 그 지점을 통과하여, 결국 섬유 다발내에 공기가 잡혀 기공이 생성된다는 것이다.

이와 같은 기공 형성에 영향을 주는 인자들로는 수지 주입 압력, 수지 출구에서의 압력(출구의 크기), 수지 주입 및 경화시의 Mold 온도, 강화 섬유의 표면 처리, 수지의 표면 장력, 수지와 강화 섬유의 접촉각 및 수지의 점도등이 있으나[6], 동일한 강화 섬유와 수지계를 사용할 경우, 성형 과정상의 인자로 기공의 생성에 영향을 주는 요인은 수지 흐름 속도 차이를 유발시키는 초기 Mold내의 섬유 부피량을 들 수 있다.

본 연구에서는 고섬유 함유율의 복합재료 구조재의 RTM 성형에 있어 성형시간단축, 기공함량을 최소화하는 최적 성형 조건을 찾기 위하여, Mold내 섬유 부피량을 낮춘 상태에서 수지 주입 후 압력을 가하며 압력 변화에 따른 제품내의 기공 생성 기구를 관찰하였다. 또한, 이러한 압력 변화에 의한 영향이 재료의 기계적 성질에 미치는 영향을 규명함으로써 최적 성형 조건을 찾고자 하였다.

2. 실험방법

2-1. 사용재료

본 연구에서 사용된 재료는 한국화이버에서 생산한 평직 상태의 Glass Roving Cloth와 미국의 DOW CHEMICAL에서 생산한 Vinylester를 각각 강화 섬유와 기지 재료로 사용하였으며, 그 기본 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Basic Properties of the Fiber and Resin.

FIBER	MODEL : WR 860A SURFACE TREATMENT : SILANE ROVING CLOTH THICKNESS : 0.8 mm WEIGHT : 860 g/m ² YARN COUNTER - WARP : 1.97(YARNS/cm) - F I L L : 1.76(YARNS/cm)
RESIN	MODEL : DERAKANE 411-45 VISCOSITY(25°C) : 450 cps SPECIFIC GRAVITY : 1.045 TENSILE STRENGTH : 7°C14 kgf/mm ² TENSILE MODULUS : 344 kgf/mm ²

2-2. 시편 성형

성형압력 조건에 따른 기공생성을 비교하기 위해 305 × 305 mm 복합재료 판재를 그림 1과 같은 금형에서 제작하였다. 제작된 모든 판재는 6장의 Glass Roving Cloth로 되어 있으며, 유압식 프레스내에서 초기 30% 내외의 섬유 부피 함량을 유지하도록 상하 Mold를 닫은 후 수지를 그림 1의 수지 주입구를 따라 판재의 중앙 부위에서부터 1 kgf/cm²의 일정한 압력으로 주입하였다. 이때 수지는 수지내에 기포가 남아 있을 가능성을 최대한 비제하기 위해 RTM 장비(HYPERJECT II)의 수지 Tank 내에서 5분간 진공 상태를 유지하며 기포를 제거하였다.

금형 4곳에 위치한 출구로 수지가 배출될때까지 수지 주입을 완료한 후, 압력 조건의 영향을 평가하기 위해 금형에 2 kgf/cm², 4 kgf/cm², 6 kgf/cm², 8 kgf/cm² 각기 상이한 압력을 부여 하기 위하여

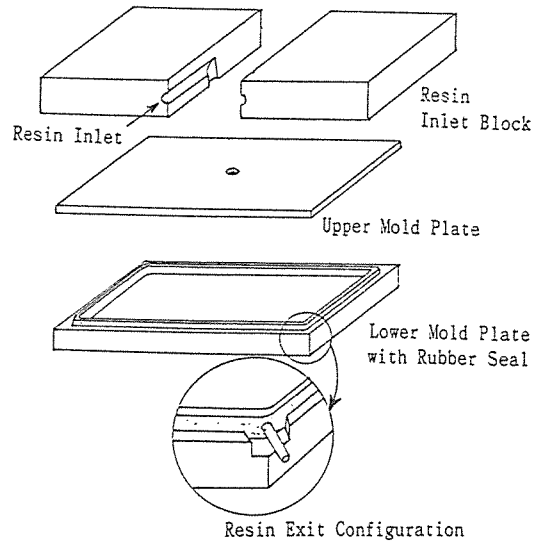


Fig. 1. Sketch of RTM Mold Configuration.

1.4 kgf/cm²/min의 동일 가압속도로 가압하였다. 판재는 Mold내에서 압력을 받는 조건에서 경화되었으며 탈형후 오븐에서 1시간 동안 90°C로 후경화되었다.

2-3. 시험 방법

시편 판재내의 기공 형성 경향을 파악하기 위하여 수지 주입구부터 수지 흐름 방향으로 4곳에서 시편을 채취 Mounting후, 연마하여 기공 형태를 현미경으로 관찰하였다. 각 조건에서 성형된 판재의 섬유 함량은 각 판재당 4곳에서 무작위로 채취하여 ASTM D2584(연소법) 방법으로 측정하였다.

또한 각 성형 압력별로 제작된 판재의 기계적 물성 변화를 보기 위하여 인장 시편이 각 판재당 5개씩 제작되었으며, 이 시편들을 인장 피로 시험기(INSTRON 8501)에서 일정 변위속도(2mm/min)로 인장 시험을 행하였다. 이때 하중, 변형률등의 데이터는 INSTRON사의 SERIES IX Program을 이용하여 얻어 졌다.

각 성형 압력별로 성형된 복합 재료의 충격 특성을 알아보기 위하여 각 성형판에서 100 × 100 mm의 크기로 채취하여, Drop Weight 충격 시험기(DYNATUP 8250)를 이용하여 21.266J의 충격에너지로 시험을 행한 후 초음파 탐상기(C Scan)를 이용하여 손상

영역을 측정하고, 그 결과를 비교 분석하였다. 이때 사용된 Impact Tup은 12.7 mm 직경을 갖는 반구 형태이였으며, 시편은 직경 76.2 mm의 원 형태 공간을 지닌 판 사이에 공압으로 고정되었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 압력 조건에 따른 기공 형성 기구

본 연구에서 사용된 강화 섬유는 평직 형태로 Mold 내에서의 수지 흐름을 크게 섬유 다발방향과 섬유 다발 직각방향으로 생각할 수 있다. Chan과 Morgan[7]은 섬유 다발 축과 동일한 방향의 수지 흐름 기구를 그림 2와 같이 제시하고 있다. 섬유 다발들 사이에서의 수지 흐름은 섬유 다발 방향과 같고, 섬유 다발 내부로의 수지 흐름은 섬유 다발과 직각 방향으로 반경류(Radial Flow)라고 생각할 수 있다. 섬유 다발 내부에서의 반경류는 섬유 다발 외각에서 중심으로 도달할 때까지 존재하고, 일반 반경류의 선단이 섬유 다발 중심에 도달하면 섬유 다발 외부에서의 흐름과 같이 섬유 다발 방향으로 흐름이 진행하게 된다. 이때 섬유 다발들 사이에서의 수지 선단

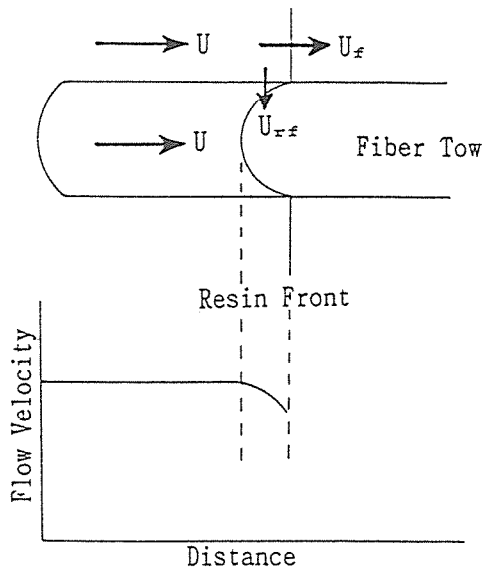


Fig. 2. Resin Flow Pattern (a) and Velocity Profile (b) to Fiber Tow Direction[7].

흐름 속도, U_f 는 그림 2-(b)에서 보는 바와 같이 섬유 다발 내부로의 반경류 영향으로 흐름이 늦어지게 되므로 섬유 Tow 중심까지 수지가 채워진 구간에서의 수지 흐름 속도, U 보다 떨어지게 된다. 따라서 선단에서의 반경류, U_{rf} 가 그 뒤쪽의 속도, U 보다 늦으므로 공기가 수지에 갇혀 기공이 생기는 현상을 발생하지 않는다. 즉, 수지의 흐름 방향이 섬유 다발 축과 같은 경우에는 섬유 다발 내부에 그림 2-(a)와 같은 원호 형상의 수지 흐름 선단을 가지면서 진행은 되지만 공기가 잡혀 기공이 생기는 경우는 발생할 수 없다.

섬유 다발에 대하여 수직 방향으로 수지가 흐르는 경우의 모델은 Parnas와 Phelan Jr.[5]가 그림 3과 같이 제시하였다. 섬유 다발을 가로지르는 수지의 선단(Resin Flow Front)이 섬유 다발을 만나면 수지 진행 방향과 다발 내부로의 Permeability 차이로 인하여 섬유 다발들 사이의 흐름 보다 섬유 다발 내부로의 흐름 속도가 작아 섬유 다발 내부에서의 수지 선단이 외부에서의 그것보다 떨어지게 된다.

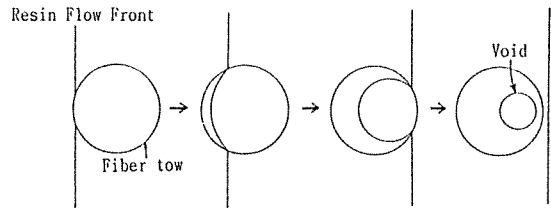


Fig. 3. Air Entrapment Process in Flow Perpendicular to the Fiber Tow Direction[5].

따라서 수지 흐름이 점차 진행됨에 따라 섬유 다발 외부로 수지가 완전히 감싸게 되고, 미처 따라오지 못한 섬유 다발 내부에서의 수지 선단은 결국 섬유 다발 내부에 잡히게 되어 기공이 생성되게 된다. 그러나 섬유 다발 내부에 기공이 형성된 후에도 섬유 다발 내부로의 수지 반경류는 기공 내부의 공기압과 섬유 다발 외부의 수지 압력이 평형을 이룰 때 까지 계속되어 기공의 크기가 작아지게 된다.

이에 따라 본 연구에서 성형된 판재 내의 기공은 그림 4에서 보이는 바와 같이 대부분 수지가 섬유 다발 방향에 직각으로 흐른 경우에 생성된 것이고, 섬유 다발 방향으로의 수지 흐름에 대해서는 기공이

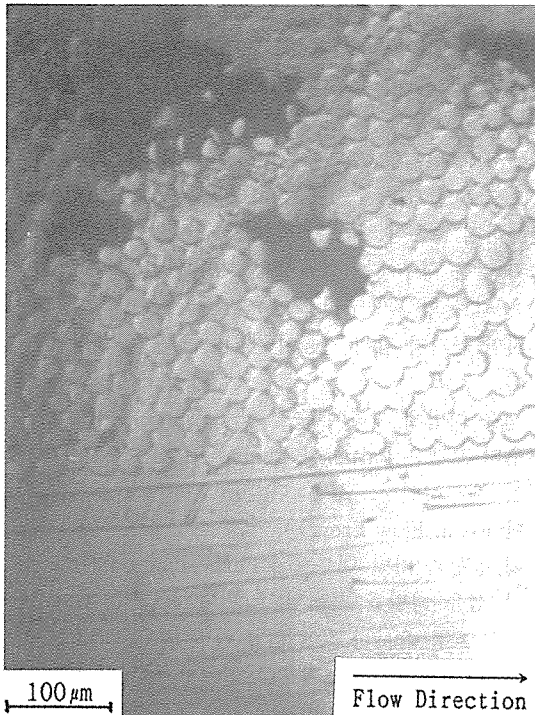


Fig. 4. Microphotograph of Glass/Vinylester Plain Woven Roving Cloth Specimen Cross-Section (0 kgf/cm² Applied Pressure).

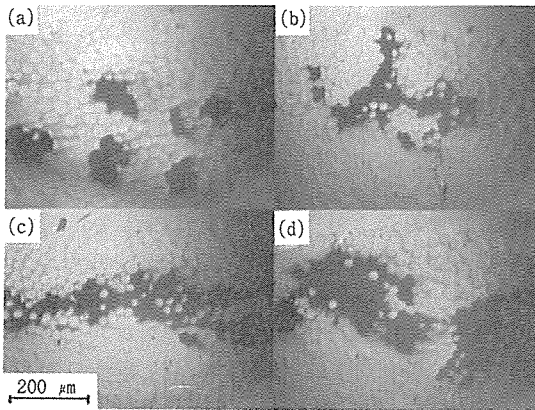


Fig. 5. Variation of Void Formation along the Flow from (a) Inlet to (d) Exit at 0 kgf/cm² Applied Pressure.

생성되지 않은 것을 관찰 할 수 있었으며, 이상에서 제시된 Model의 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 그림 5에서는 수지 주입 후 Mold에 압력을 가하지 않은

상태에서 성형된 판재 내에 존재하는 기공 형태의 사진을 보여주고 있다. 기공의 크기는 주입구에서 출구 방향으로 감에 따라 점차 커지고 있으며, 이는 수주 주입구에서의 압력이 출구쪽 보다 크기 때문에 주입구 부근의 섬유 다발 내부에서 초기에 생성된 기공이 출구쪽의 기공보다 큰 압력을 받았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이와같은 결과는 수지 주입 완료 후 상하 Mold에 인위적으로 압력을 가하여 섬유 다발 외부의 수지 압력을 높였을 때에도 같은 경향의 결과를 얻을 수 있었으며, Parnas와 Phelan Jr. 이 제시한 내용과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

그림 6에서는 각 성형 압력별로 수지 주입구와 출구 사이의 같은 위치에서 생성된 기공을 비교한 것으로, 성형 압력이 올라갈수록 상대적으로 기공이 작아지는 것을 알 수 있다. 이같은 결과는 다음의 두가지 이유로 나누어 생각할 수 있다. 우선 섬유 다발 외부의 압력을 높힘에 따라 일단 초기에 생성된 기공의 크기가 줄어들게 되기 때문이다. 이는 이상기체 법칙, $V_1 P_1 = V_2 P_2$ (여기서, V는 기공의 부피, P는 외부 압력, 1는 초기, 2는 종료시를 의미한다.)을 따라 외부 압력, P_2 를 증가시키게 되면 기공의 부피, V_2 가 줄어드는데 기인한 것으로 생각된다. 또한 압력을 가하게 되면 Mold 내부와 출구 사이의 압력 차에 의해 Mold 내부의 수지가 계속 빠져게 되는데, 이때 압력 조

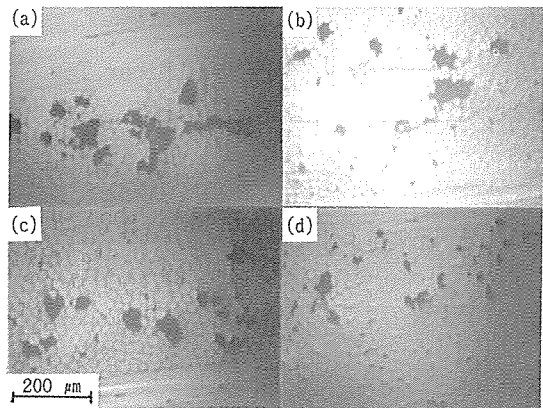


Fig. 6. Microphotograph of Voids for Glass/Vinylester Plain Woven Roving Cloth Specimen Cross-Section at Different Applied Compressive. (a) 2 kgf/cm² (b) 4 kgf/cm² (c) 6 kgf/cm² (d) 8 kgf/cm².

전까지 동일한 압력 속도를 유지 하였으므로, 성형 압력이 높아질수록 더 오랜 시간 동안 수지 흐름을 유지할 수 있게 되고 또한 수지 흐름을 따라 내부의 기포가 제거되는 효과에 기한 것으로 생각된다.

이러한 현상은 6 kgf/cm²의 성형 압력 이하에서 뚜렷하게 나타나고 있으며, 기공의 최소화를 위해서는 6 kgf/cm² 이상의 성형압력이 필요하다. 그러나 이러한 성형 압력조건은 초기 수지 주입시 Mold내의 섬유 부피 함량(즉 압력을 가하지 않은 상태)에 따라 바뀔 수 있으며, 초기 Mold 내의 섬유 부피 함량을 크게 했을 때에는 수지 주입시간이 길어지게 된다. 따라서 수지 주입 시간을 포함한 성형 시간, 수지 주입후 압력을 가하게 됨으로써 짜내어지는 수지 소비량의 최소화와 관련하여 최적 조건이 결정되어야 하며, 더 나아가서는 수지 주입후의 성형 압력의 단계별 조건 및 온도 변화에 따른 수지 점도의 영향도 고려되어야 한다.

3-2. 압력조건에 따른 재료의 기계적 특성

수지 주입 완료후 성형 압력을 높이면 수지의 흐름을 더 오래동안 유지할 수 있어 기공을 감소시키는 효과 외에 수지량의 감소에 따른 강화 섬유의 부피 함량이 증가되는 효과도 얻을 수 있으며, 이 결과는

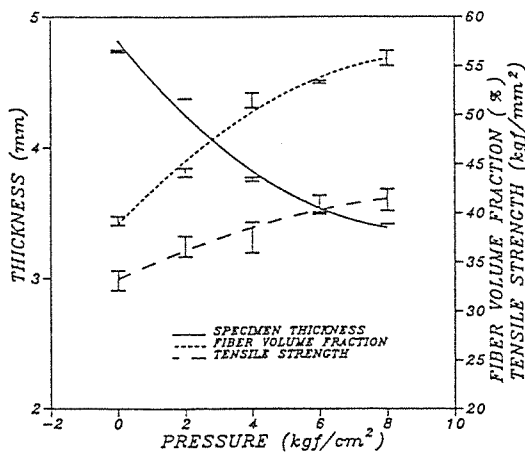


Fig. 7. Variation of Thickness, Fiber Volume Fraction and Tensile Strength of Specimens as a Function of Applied Compressive Pressure.

그림 7에 성형 압력에 대한 시편의 두께, 섬유 함유량 및 인장강도의 관계로 나타내었다. 그림 8에서 보면 성형 압력이 증가할 수록 성형된 시편의 두께가 얇아지며, 따라서 강화 섬유의 부피량과 인장 강도가 증가하는 것을 확인하였다. 이때 섬유 함유량은 성형 압력조건이 0 kgf/cm²의 압력에서 8 kgf/cm²으로 증가함에 따라 약 38%에서 55%로 1.45배의 증가를 보였으며, 4 kgf/cm² 이상의 압력 조건에서는 초기 증가 폭에 비해 둔화되는 경향을 보이고 있다.

각 성형 압력에 따라 제작된 Roving Cloth 시편의 기계적 거동을 고찰하기 위해 인장 시험을 실시하였으며, 그 결과는 그림 8에 응력-변형률 곡선으로 나타내었다.

성형 압력 조건에 따른 각각의 σ - ϵ 곡선의 초기 강성도는 성형 압력 증가에 따른 섬유 함유량의 변화에 비례하여 증가하고 있으며, 또한 성형 압력 증가에 따라 강성도가 감소하기 시작하는 KNEE POINT[8]에서의 응력은 증가하고 변형률은 감소하는 경향을 그림 9에서 볼 수 있다. 이러한 경향은 성형시 압력에 따라 WARP Direction(하중 방향)으로의 굴곡진 섬유 다발이 퍼지게 된 결과에 기인한 것으로 4 kgf/cm²까지는 그 경향이 뚜렷하나 그 이상의 압력조건에서는 큰 차이 없이 일정한 값을 갖는다.

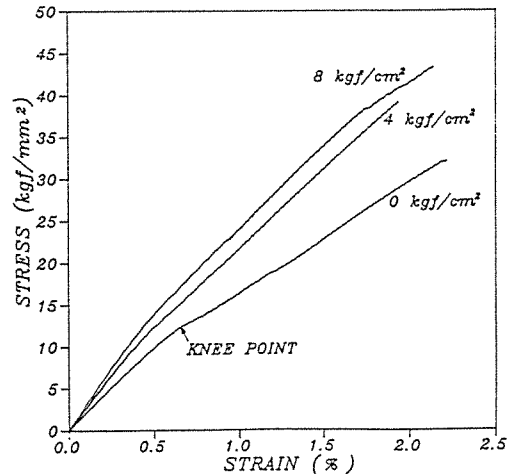


Fig. 8. Typical Stress-Strain Curves for Glass/Vinylester Plain Woven Roving Cloth Specimens with Various Applied Compressive Pressure.

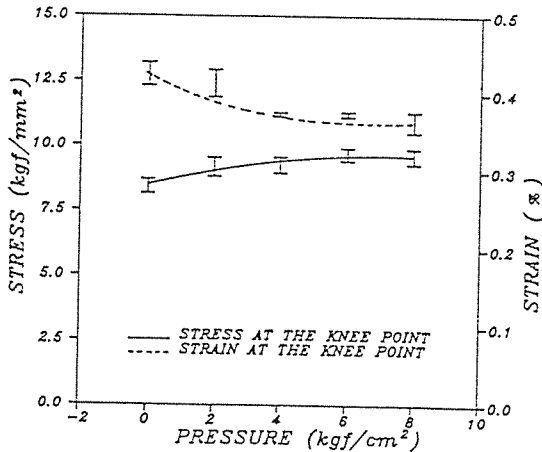


Fig. 9. Variation of Stress and Strain at Knee Point of Stress-Strain Curves as a Function of Applied Compressive Pressure.

또한 그림 8에서 높은 성형 압력의 응력-변형률 곡선은 KNEE POINT 이후에서는 주로 FILL Direction(하중 직각 방향) 섬유 다발들사이 및 내부에서 발생하는 기지 균열로 인하여 강성도의 완만한 감소와 함께 WARP Direction 섬유 파단시까지 선형관계를 갖고 있다.

그러나, 낮은 성형 압력으로 제작된 시편의 경우, 각 적층 사이에 존재하는 수지 과다 부위에서 기지 균열 발생으로 인하여, KNEE POINT 이후 급작스런 시편의 강성도 감소를 초래하는 천이 영역(Transition Zone)이 존재한 후 파단시까지 선형관계를 갖게 된다. 이러한 천이 영역은 4 kgf/cm²의 성형 압력 이상에서는 보이지 않았으며, KNEE POINT에서의 응력과 변형률이 일정한 값을 갖는 영역과 일치하고 있다.

그림 10에서는 성형 압력의 증가에 따른 수지 과다 부위의 감소와 섬유의 퍼짐 효과가 복합 재료의 충격 특성에 미치는 영향을 보기 위해 Drop Weight 충격시험을 한 결과를 성형 압력에 따른 시편의 충격 에너지 흡수량 및 충격 손상 영역의 크기로 나타내었다.

그림 10에서 보여주듯이 성형 압력이 증가할수록 흡수 에너지량은 점차 증가하였으며, 4kgf/cm² 이상의 성형 압력에서는 큰 변화를 보이지 않고, 거의

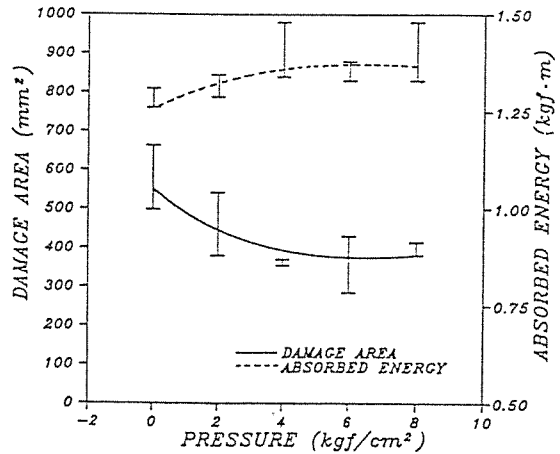


Fig. 10. Variation of Impacted Damage Area and Absorbed Energy for Glass/Vinylester Plain Woven Roving Cloth Specimens as a Function of Applied Compressive Pressure (Impact Energy : 21.266 Joule).

1.37 kgf·m의 일정한 값을 갖는다. 또한 충격 손상 영역은 이와는 반대로 성형 압력의 증가에 따라 손상영역이 감소하다가 4 kgf/cm²의 압력 조건 이상에서는 거의 동일한 영역의 크기를 갖는다. 이때 충격에 의한 손상 기구는 4 kgf/cm² 이하의 성형 압력 조건에서는 주로 층간의 수지가 많은 부위에서 파손이 되며, 층간 분리가 발생하였으나, 4 kgf/cm² 이상의 성형 압력 조건에서는 주로 충격을 받은 부위에서 국부적인 층간 분리이외에 섬유 다발의 파단이 관찰되었다.

따라서 이와같이 성형 압력이 증가함에 따라, 흡수 에너지량이 증가하며 손상 영역이 감소하는 결과는 결국 성형 압력이 높을수록 수지가 많은 부위가 감소하고 충격 에너지를 섬유 다발이 지지하게 됨에 따라 기지 균열에 의한 층간 분리 보다는 섬유 파손이 주를 이루는 결과 때문이다.

4. 요약 및 결론

유리 섬유 평직을 이용한 고섬유 함유율의 복합 재료 구조물의 RTM 성형시 영향을 미치는 성형 인자중 압력 변수를 최적화 하기 위하여 기본적으로 성형 압력을 변화하며, 이에따른 기공 형성 기구와

성형 재료의 기계적 특성을 관찰하였으며, 그 내용으로 부터 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 기존 RTM 성형 방법을 보완하여 수지 주입 후, 8 kgf/cm² 까지의 압력을 가함으로써 35% 내외의 섬유 함유량에서 55% 까지 1.5배 정도의 높은 섬유 함유량을 얻을 수 있었다.

- 평직의 섬유 다발내에서의 수지 흐름 및 기공 형성 기구는 기 제시된 이론적 모델과 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

- 수지 흐름 방향을 따라서 배열된 섬유 다발 내에서는 기공이 형성되지 않으나, 수직 방향으로 배열된 경우 흐름 속도차에 의해 섬유 다발 내에 기공이 형성되었다.
- 성형압력이 높아질수록 상대적으로 기공의 크기가 작아지며, 수지 주입구에서 출구쪽을 따라 압력 구배에 의해 기공의 크기가 점차 커짐을 알 수 있었다.

- 기공의 최소화를 위해서는 6 kgf/cm² 이상의 압력이 필요하나, 성형 시간 및 사용 수지의 최소화등을 고려한 최적 성형 조건을 만족하기 위해서는 초기 Mold내의 압력 조건(섬유 함유량), 성형시 단계별 압력조건 및 사용 수지의 온도에 따른 점도 영향 등이 고려되어야 한다.

- 성형 압력에 따라 제작된 시편의 응력-변형률 곡선의 특성은 KNEE POINT에 의해 두 특성 영역으로 나뉜다.

- KNEE POINT 이전에는 성형 압력에 따라 섬유 함유량 변화와 Warp Direction의 굴곡진 섬유 다발의 퍼짐에 의해 각각의 강성도 차이를 보이며 선형적으로 증가한다.
- Fill Direction의 기지 균열에 의해 발생하는 KNEE POINT 이후에서는 파단시까지 완만한 강성도 감소를 보이며, WARP Direction의 섬유 파단시까지 선형적인 관계를 보인다. 특히 4 kgf/cm² 이하의 낮은 성형 압력의 경우, 층 사이에 존재하는 수지 과다 부위의 균열로 인하여 갑작스런 강성도 감

소를 초래하는 천이 영역이 존재한다.

- 충격에 대한 특성으로 성형 압력 증가에 따라 흡수 에너지는 증가하나, 손상영역은 감소하는 경향을 보인다. 또한 4 kgf/cm² 이하의 성형 압력에서는, 주로 층간의 기지 균열과 층간 분리가 주 파손 기구였으나, 그 이상의 성형 압력에서는 주로 국부적인 층간 분리와 섬유 파손이 주를 이루고 있다.

따라서 기공의 최소화 및 기계적 특성을 고려할 때, 성형 압력은 6 kgf/cm² 이상이 되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 전의진, 이상관, 제 4 회 복합재료 CONFERENCE 'ADVANCED COMPOSITES', 1993년 6월, p.47.
2. L.J. Broutman and R.H. Krock, 'Modern Composite Materials', Addison Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1967.
3. B.D. Agarwal and L.J. Broutman, 'Analysis and performance of Fiber Composites', John Wiley and Sons, New York, 1980.
4. R.A. Grove, 'Failure Causes', Engineered Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Metals Parks, OH, 1987.
5. R.S. Parnas and F.R. Phelan Jr., "The Effect of Heterogeneous Porous Media on Mold Filling in Resin Transfer Molding," SAMPE Quarterly, Jan. 1991, pp.53-60.
6. T.S. Lundstrom, B.R. Gebart and C.Y. Lundemo, "Void Formation in RTM," 47th Annual Conference, Composites Institute, SPI, Feb. 1992, 16-F.
7. A.W. Chan and R.J. Morgan, "Modern Preform Impregnation and Void Formation in Resin Transfer Molding of Unidirectional Composites," SAMPE Quarterly, April 1992, pp.48-52.