

論文

RTM 공정에서 기체 유동을 이용한 프리폼의 투과성계수 측정 및 결함탐지 기법에 관한 고찰

김선경*

A Review of Gas Flow Method for Permeability Measurement and Preform Defect Detection in Resin Transfer Molding

Sun Kyoung Kim*

ABSTRACT

It is useful to detect defects of a preform for resin transfer molding before and after placement into the mold. To conduct this test, the gas flow method has been developed. This method not only measures permeability but also detects defects utilizing the pressure readings obtained from the gas flow test. This paper introduces the methodology and examine the applicability to actual processes.

초 록

RTM 공정의 성공적인 수행을 위해 프리폼의 삽입 후 혹은 삽입 전의 상태를 점검하는 과정은 매우 유용하다. 이를 위해 기체를 주입하여 유량과 압력 측정을 통해 프리폼의 투과성 계수를 측정하고 결함을 탐지하는 기법이 최근 연구 되어 왔다. 본 논문에서는 이 기법을 소개하고 적용성을 검토해 본다.

Key Words: RTM(resin transfer molding), 기체유동(gas flow), 결함탐지(defect detection), 투과성계수(permeability)

1. 서 론

RTM(resin transfer molding) [1]은 섬유강화소재를 생산하기 위한 액체 성형 기법(liquid composite molding)[2] 중 가장 널리 사용되는 것이라 할 수 있다. 이 공정에서 수지와 경화제의 혼합액은 강화 섬유가 삽입된 금형 안으로 주입된다. 이 과정에서 수지의 강화 섬유를 통한 유동전반은 최종 제품에 큰 영향을 미치게 된다. 그 동안 이 유동현상을 규명하기 위하여 많은 연구가 행해졌다[3]. 보통 섬유강화 소재를 흐르는 수지의 유동은 다공성 매질의 유동으로 다루어진다. 이 때, 투과성 계수가 프리폼의 유일한 유동 관련 물성이 된다.

수지의 물성인 점도는 비교적 신뢰할 만 하나 투과성 계수는 한 프리폼 안에서도 공간에 따라 편차가 심하고, 동일하다고 간주될 수 있는 프리폼 간에도 그 값의 차이가 상당하다 [4-6]. 이러한 투과성 계수의 변동은 수치모사를 이용한 충전

해석과 실제 과정의 차이를 매우 크게 만든다. 이는 공정의 예측 불가능성으로 이어져 공정의 성공과 실패를 가늠할 수 없게 만든다. 또한, 크고 작은 공동부를 생성시킬 개연성이 커서 기계적 물성에도 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 프리폼의 투과성 계수를 통계적으로 일정한 범위 안에서 유지시키는 일은 매우 중요하게 된다. 이 논문에서는 투과성 계수의 변동을 기체유동을 이용해 어떻게 측정하고 그 측정을 근거로 프리폼의 이상 유무에 대한 판단을 어떻게 내릴 것인가 하는 기법들을 살펴본다.

2. 기체 유동을 이용한 투과성 계수의 측정

복합재료 프리폼의 투과성 계수를 추정, 혹은 측정하는 문제는 오래 동안 연구되어온 주제이다. 그럼에도 불구하고

* 서울산업대학교 금형설계학과, 교신저자(E-mail:sunkkim@snut.ac.kr)

그 추정 및 측정 방법의 어려움과 불확실성으로 인해 계속적으로 연구되어져 왔다. 이러한 불확실성은 유동이 자유경계를 갖는 다는 점과 프리폼과 프리폼 사이 혹은 동일 프리폼 안에서의 구조의 변동으로 인한 투과성 계수의 변화가 크다는 점에 주로 기인한다. 이는 근원적인 문제로 방법론적으로 해결할 수 있는 문제는 아니다. 여기에 두 가지 중요한 문제가 있다. 하나는 평균적인 투과성계수를 어떻게 통계적인 신뢰구간과 함께 제시할 것인가 하는 문제이고 다른 하나는 과연 시험 대상이 된 프리폼이 레진 투과의 관점에서 문제가 없는가 하는 것이다.

앞에 언급한 두 가지 문제에 대한 대안으로서 기체 유동을 이용한 투과성 계수의 측정 방법에 대한 연구와 결함탐지에 관한 연구가 행해져 왔다. 이 단원에서는 투과성 계수에 대해서만 언급한다. 기체를 액체 대신 사용하는 이유는 기체의 사용이 금형 안에 삽입된 프리폼에 대해 아무런 물리적 영향을 미치지 않고 테스트가 가능하다는 점에 있다. 이런 점은 개별 프리폼 모두에 대해 테스트를 가능하게 한다. 기체를 사용하는 경우엔 포화유동이 될 수밖에 없으므로, 어쩔 수 없이 포화유동의 투과성계수와 자유경계유동의 투과성 계수가 같다는 가정을 수반하게 된다. 이 가정이 성립하는가에 대한 점은 논란의 대상이 되며, 이것에 관해 뒤에 다시 언급한다.

타 분야에서는 기체 유동을 이용한 투과성 계수의 측정과 관련된 많은 연구가 이미 행해졌으나, 복합재료 분야에서는 최근에 이르러서야, 기체 유동을 이용해 프리폼의 투과성 계수를 측정하려는 시도들이 행해졌다. 문헌에 최초로 발견되기로는, Liang 등[7]은 1차원 공간에서 유동방향으로 나열된 구멍들에서 압력을 측정하는 기법으로 프리폼의 투과성 계수를 측정하였다. 이 연구에서는 액체를 사용한 결과와 비교하였는데 수용하기 어려울 정도로 큰 오차가 있음을 확인할 수 있다. Liang의 방법의 단점으로는 벽면과 프리폼 사이의 간극의 발생에 따른 Darcy 유동이 아닌 Poiseuille 유동이 벽면에서 일어나는 점(race tracking)을 고려하거나 방지하기가 쉽지 않거나 방지과정에서 국부적으로 과도한 체결력을 가해야 하는 문제가 있어 실험의 불확실성이 커지는 문제가 있다. 무엇보다도 기체유동을 이용한 실험에서는 이러한 벽면 유동의 관찰 자체가 불가능하다.

그 후, Um 등[8]의 연구에서는 이러한 기체유동을 이용한 방법이 2차원으로 확장되었는데, 실험 방법은 대략 다음과 같다. 가로세로비가 다른 두개의 장방형 금형에서 각각 실험을 행한다. 이 금형들에서는 가운데 부분에서 질소를 주입하고 변은 모두 대기에 노출되어 있다. 실험적인 관점에서 장점이 있다면, 앞에 언급한 벽면 유동이 발생이 차단된다는 것이다. 이 방법에서는 이방성 프리폼의 투과성 계수를 두 번의 다른 금형에서의 실험을 통해 상호 연결시켜 구해내는 특징이 있다. 여기서 고려된 프리폼은 직교 이방

성이고 두 방향의 실제 투과성 계수는 2~4배의 차이가 있다. 두 실험을 수학적 과정을 통해 연결 지음으로써 투과성 계수의 비를 구해 내고 그로부터 압력 유량관계를 이용하여 투과성계수의 절대치를 구해내는 것이 방법의 골자다. 이 방법의 문제점은 실험적으로는 두 번의 실험이 필요하다는 것이 되겠고, 이론적으로는 두 실험을 수학적으로 연결 짓는 방법에 적분방정식이 개입하게 되어 오차를 크게 유발한다는 점에 있다.

최근 Kim 등[9]은 한 번의 실험으로 이방성 프리폼의 투과성 계수를 산정해 낼 수 있는 기법을 제안하였다. 이 방법은 Fig. 1 에서처럼 여러 지점에서 측정된 압력 데이터를 이용하여 두개의 직교방향의 투과성 계수의 비를 구해 내고 유량을 이용하여 그 값을 정하는 것이다. 여기서 투과성 계수의 비를 구하는 과정에 역해석 기법이 사용되었다. 그 방법을 간단히 서술하자면, 다공성 매질을 흐르는 기체 유동의 수치적 모사에 의한 각 압력 측정점에서의 계산된 압력값과 실제 측정된 압력값을 통계적으로 일치시키는 투과성계수의 비를 최적화 기법을 이용하여 찾아 내는 것이라 할 수 있다. 여기서 통계적인 일치란 실제 측정된 압력의 실험적 불확실성을 평가하여 계산값과 실험값을 그 평가된 불확실성의 범위를 고려하여 일치시키는 것을 말한다[10]. 이 과정을 통해 수치 모사 과정에서 변수로 고려될 수 있는 모든 측정값들은 미지의 값을 산정하는 기초 실험자료가 될 수 있다. 위의 설명을 수식화 하면 다음의 식의 $J(\alpha)$ 를 최소화 하는 투과성계수비, α 를 찾는 것이다.

$$J(\alpha) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{p(x_i, y_i; \alpha) - \bar{p}_i}{\bar{p}_i} \right)^2 \quad (1)$$

x_i 와 y_i 는 압력이 측정되는 총 N 개의 곳 중 i 번째 곳의 위치 좌표 이고, \bar{p}_i 는 측정된 압력, $p(x_i, y_i; \alpha)$ 는 미분방정식을 풀어서 계산된 압력이다. 여기서 α 는 K_{11} 과 K_{22} , 두개의 주축방향 투과성계수의 비로 간단한 최적화 프로그램을 통해 찾아지게 된다. 또한, 질량 보존을 통해서도 하나의 K_{11} 과 K_{22} 에 관한 식을 얻게 되므로 간단히 투과성계수 값을 결정할 수 있게 된다[10]. 앞의 식의 최적화 결과인 $J(\alpha)$ 는 특별한 의미를 가지게 된다. 투과성계수비의 통계적 신뢰구간이 이 결과로부터 결정되고, 이를 바탕으로 투과성계수에 관한 신뢰구간도 얻을 수 있다. 이 부분은 상당히 긴 전개가 필요하므로 문헌을 참고하기를 바란다[11].

이러한 방법으로 투과성 계수를 얻으려면 압력에 관한 정보가 여러 지점에 필요하게 되므로 주입구나 배출구가 여러 곳인 금형에서는 큰 문제가 되지 않았지만, 그렇지 않은 경우에는 압력 측정만을 위해 금형에 구멍 가공을 하여야 하는 문제가 있다. 이것은 심각한 문제라고는 할 수 없으나 상당한 번거로움이 있는 것은 사실이다.

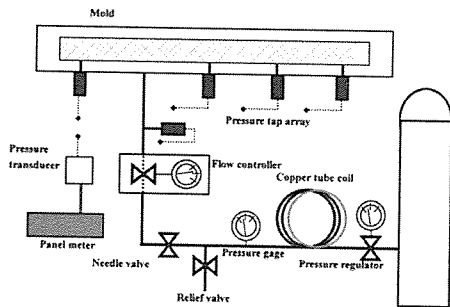


Fig. 1 Overall view of experimental setup[10].

앞에 언급한 두 연구, 즉 Um 등의 연구[8]와 Kim 등의 연구[10]에서 액체를 이용한 방법과 기체를 이용한 방법의 측정 결과를 비교하여 기체를 이용한 방법의 신뢰성을 검증하였다. 기본적으로 두 가지 측정방법은 유사한 수준의 측정 오차를 가지는 것으로 보인다. 이를 바탕으로 생각하여 볼 때, 기체를 이용한 방법이 정확성 측면에서 우월하다고 보기는 어렵다. 그러나 액체를 사용하는 방법은 항상 투과성계수를 측정하기 위해 고안된 특별한 상황에서만 적용가능하다는 문제가 있다. 즉, 개별 프리폼에 대해 쉽게 투과성계수를 측정할 수 없다는 한계가 있다. 기체를 이용한 방법의 장점은 대부분의 상황에서 특별히 준비된 경우가 아니라 하더라도 투과성계수의 산정이 가능하다는 점이다. 요약하면, 기체를 이용한 투과성계수 기법은 프리폼에 아무런 손상을 가하지 않고 즉 건조 상태를 유지하면서 측정이 이루어지므로 온라인(on-line) 측정을 가능하게 한다[15].

기체유동을 이용한 투과성 계수 산정방법의 재현성에 영향을 미칠 수 있는 측정 오차에 관해 설명하고자 한다. 실제로 프리폼의 투과성계수 측정치의 실험 사이의 변동은 대부분이 프리폼의 구조 변화에 기인하게 된다. 투과성 계수는 원래 공장에서 출하된 시점에서 섬유들이 어떤 구조를 가지고 있는지와 급형 안에 삽입되면서 혹은 그 준비과정에서 어떤 변형을 하는지에 매우 큰 영향을 받는다. 다시 말해서 측정 자체의 재현성 보다는 측정 대상의 변동이 큰 문제인 것이다. 실제로 급형에 삽입된 프리폼에 질소를 흘리면서 측정된 압력과 유량은 시간의 흐름에 따라 거의 변하지 않는다[10]. 투과성계수는 압력과 유량에 의해 결정되므로 측정시스템 자체에서 유발되는 재현성문제는 무시할 만 하다고 할 수 있다.

역해석 기법의 사용을 통해 실험적 그리고 해석적 방법론 자체의 문제점은 어느 정도 해소되었으나, 근본적인 두 가지 문제는 여전히 남아 있다. 첫째로, 이러한 기체유동에 의한 해석은 액체유동과의 상사성을 가정하고 있다. 이에 대한 입증은 여전히 간단치 않다. 기본적으로는 레이놀즈수의 유사성으로부터 이를 주장할 수 있으나, 실제로는 기체유동을 이용해 실제 RTM과정의 레이놀즈 수에 가까이 실험을 하기란 매우 어렵다. 이것은 기체의 저점도 때문에 초저유량에서 실험

을 행하여야 하기 때문인데, 이 경우 유량계 및 압력계의 불확실성은 매우 커진다. 그래서, 비록 레이놀즈수가 실제 레진 주입의 경우에 비해 큰 영역에서 실험이 행해지더라도 그 유동영역이 Darcy 영역이라면, 일반적으로 받아들일 수 있다는 주장이 가능하나, 논란의 여지는 있다. 왜냐하면, 유량에 따른 투과성계수 자체의 변동을 보고하는 연구들이 있기 때문이다[12]. 또한, 레진의 종류에 따라 주입구의 크기에 따라 측정된 투과성 계수의 크기가 달라진다는 보고 역시 투과성계수의 레이놀즈 수에 대한 의존성의 근거가 될 수 있다. 두 번 째 문제는 이러한 기체유동을 이용한 실험은 기본적으로 포화유동(saturated flow) 일 수 밖에 없다. 그러나 충전 중의 투과성 계수와 충전 후의 포화유동에서의 투과성 계수가 다르다고 주장하는 연구들을 찾아 볼 수 있다[13,14]. 특히, 이 부분은 강화 소재의 디자인에 크게 영향을 받는다. 섬유다발 사이의 유동과 다발들 사이의 유동이 미치는 상호 영향 관계에 따라 달라진다는 가설이 유력하다. 그밖에 표면장력, 판상력의 영향, 섬유의 운동 등 이유에 대해서는 여러 가지 설명이 있을 수 있겠으나 기체유동을 이용하여 산정된 투과성 계수를 실제로 적용하는 과정에 있어서 고려해야 할 부분임에 분명하다.

기체유동을 이용한 투과성 계수 산정에 관한 이런 논란에도 불구하고, 이 기법을 프리폼의 결함 탐지에 적용하는 것은 매우 효과적이다. 왜냐하면, 이 경우 투과성 계수의 절대 값 자체보다는 상대적인 변화가 더 의미 있는 값이 되기 때문이다. 또한, 프리폼의 손상 없이 이미 급형에 삽입되어 있는 프리폼에 대해 실험을 행할 수 있다는 것은 큰 장점이다. 이 논문의 나머지 부분들은 그 기법들에 관해 설명한다.

3. 통계적 기법을 이용한 이상유무의 판단

앞에 언급했던 Liang 등[7]의 연구에서는, 프리폼을 일정 부분을 잘라 낸 후 압력을 비교하여 그 방법의 적용가능성을 검토한 바 있다. 그러나 그 연구에서는 프리폼의 양불량을 판정하기 위한 어떠한 통계적인 근거도 제시하지는 않았다. 다시 말해서, 어느 정도의 압력이나 유량 편차를 이상으로 봐야 하는지에 대한 방법론적 제시가 없다는 문제를 안고 있다. 이를 극복하기 위해 Kim 등[15]은 이 문제에 대한 확실한 이론적 수단을 제공할 수 있는 판별분석(discriminant analysis)이라고 하는 통계적인 기법을 도입하였다. 이러한 판별분석은 사회과학, 의학 및 공학에 폭넓게 사용되고 있는데, 예를 들면, 도난 된 신용카드 사용의 적발이라든지, 반도체 생산공정에서 불량품의 탐지 등에 이용되고 있다[16].

판별분석에 대하여 간단히 설명하고자 한다. 판별분석은 다변수 통계 해석 방법인 MANOVA를 거꾸로 수행하는 것이라 할 수 있겠다[16]. 이 방법은 현재 시험하고 있는 프리폼이 기준에 시험되어 기준으로 삼고 있는 프리폼들과 비교하여 통계적으로 점검하는 것이다. 판별분석을 이용하

여 현재 시험하는 경우가 서로 배타적인 둘 이상의 그룹들 중에 어디에 속하는지 통계적으로 가려볼 수 있다. 이상적인 경우에는 그룹 안에서의 분산이 최소화 될 때 그룹간의 차이가 최대가 된다. 판별분석에서는, 따라서, 여러 그룹에 속한 여러 데이터를 동시에 시험하게 된다. 여기서 판별함수, DF^k 를 사용하게 되는데 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$DF^k = \sum_{i=1}^N c_i^k \cdot p_i \quad (2)$$

여기서 c_i^k 는 k 번째 판별함수의 i 번째 계수가 된다. 판별분석은 첫 번째 판별함수가 최대치의 판별을 수행할 수 있도록 이 계수들을 결정한다. 두 번째 판별 함수는 그 다음으로 최대치의 판별을 수행하며, 이런 식으로 계속된다. 이 함수들은 서로 직교 독립적이어서 개별 함수들의 판별 수행 능력은 겹치지 않는다. 다시 말해, 첫 번째 함수가 가장 큰 부분의 변동을 찾아내고, 두 번째 함수가 나머지 설명되지 않은 부분에서 가장 큰 변동을 찾아내는 형태로 계속 된다. 판별 함수의 개수는 분석에 사용되는 변수의 수와 그룹의 수에서 1을 뺀 값(자유도) 중에서 작은 값과 같다. 예를 들어, 정상과 비정상 두개의 그룹만 있는 경우 자유도는 1이 되어 오직 하나의 판별함수만 존재할 수 있다. 판별분석은 대부분의 통계해석 패키지에서 제공되고 있는 일반적인 통계적 방법이다.

이제 판별 분석을 사용하여 어떻게 해석이 수행되는지 설명하고자 한다. 이 판별분석을 이용한 기법에서는 정상적으로 간주될 수 있는 프리폼들에서 압력데이터를 여러 지점에서 측정한 데이터 군들을 저장한다. 이러한 데이터들은 이상 유무를 판단 할 수 있는 기준이 된다. 만약, 이상 유무가 알려져 있지 않은 프리폼에 대해 판단을 내릴 필요가 있을 경우에 새로운 데이터와 기존의 기준 데이터들을 함께 판별분석을 행하면, 이 새로운 데이터가 이상 데이터인지 혹은 기존 데이터와 같은 부류의 정상 데이터인지 알 수 있다. 이 과정은 데이터의 축적이 병행된다는 점에서 굉장히 실제적이라 할 수 있다. 이것은 또한 단점으로 볼 수 있는데, 데이터 축적 없이 가능한 결정론적인 방법론에 비해 데이터 축적에 비용이 상당히 많이 들게 되므로 불리할 수 있다.

결정론적인 방법이라면 다음을 생각할 수 있다. 투과성계수를 각 프리폼에 대하여 기체유동을 이용하여 측정한 후 기준치 이상 이탈하였는지 확인하여 보는 것이다. 이를 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$|K^{test} - K^{reference}| < \theta \sigma_K \quad (3)$$

여기서 σ_K 는 기준 투과성계수인 $K^{reference}$ 를 정하는 과정에 서 얻어진 투과성 계수이고 K^{test} 는 현재 시험 대상이 되고

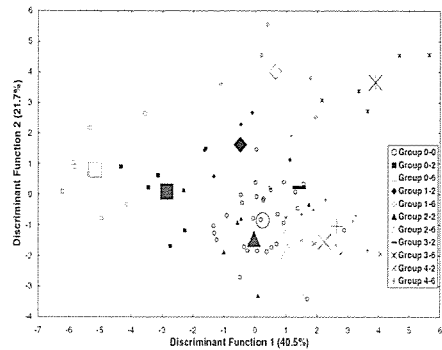


Fig. 2 Result of discriminant analysis[17].

있는 프리폼의 기체유동시험 결과 얻어진 투과성 계수이다. θ 는 시험의 유의수준에 따라 통계적으로 결정된다. 이 방법 역시 유효하다고 할 수 있으나, 유의수준을 어떻게 정할지는 모호한 문제라 할 수 있다. 따라서 그 기준치를 경험적으로 정해야 하는 문제가 있다. 또, 중요한 점은 압력 측정 데이터는 프리폼 전체의 평균적 투과성 계수 이상의 정보를 제공한다는 점이다. 각 부분의 압력은 특정 부분의 유동투과성(flow conductance)의 크기에 따라 크게 변동하게 되므로 부분적 이상을 찾아내는데 있어 판별분석이 더욱 유리하다고 하겠다.

판별분석은 이상유무 뿐만 아니라 이상의 종류를 판별하는 데도 적용이 가능하다. Fig. 2에서는 판별분석을 사용하여 프리폼의 결함들을 분류한 결과를 보여 주고 있다. 작은 표식들은 압력 데이터로부터 첫 번째와 두 번째 판별함수를 계산하여 가로축과 세로축에 표시한 것이고, 큰 표식은 각각의 그룹의 중심을 나타낸다. 각각의 그룹에 속하는 그룹들은 그림에서 볼 수 있듯이 다른 표식으로 나타내어져 있다.

이 경우엔 더욱 많은 데이터가 필요하게 되지만, 많은 양의 데이터만 축적이 된다면, 상당히 신뢰할 만한 결과를 얻을 수가 있다. 판별분석의 이런 경우의 사례를 들자면, 슈퍼마켓에서의 고객의 구매패턴을 분류하여 마케팅 자료로 사용하는 경우를 들 수 있겠다. Opperer등[17]은 이 방법을 프리폼의 결함의 종류를 탐지하는 데 적용하였다. 인위적으로 결함을 삽입하여 데이터베이스를 구축한 후 결함 유무와 결함 종류가 알려져 있지 않은 데이터가 판단 대상이 되었을 때, 판별분석을 통하여 성공적으로 결함 종류를 추정할 수 있음을 보였다. 이 방법은 기본적으로 제조 현장에서 데이터 구축과 병행하면서 수행해나가야 한다는 점이 중요하다. 그러므로, 100여 개 미만의 소량생산의 경우에는 적용하기가 적절하지 않다는 단점이 있다. Fig. 3(a)에서는 실제로 기체유동 기법이 적용하기 위한 급형의 체결과정을 보여주고 있다. Fig. 3(b)에서는 제작하고자하는 환 I-빔의 형상과 치수를 보여주고 있는데, 아크를 따라가면서 여러 개의 주입구가 있다. 이 주입구들은 순차 주입을 하기 위한 것인데, 이를 이용하여 기체 유동 시험을 시행하게 된다.

4. 결 론

기체 유동을 이용하여 투과성 계수를 측정하는 기법들을 소개하고, 금형안에 이미 삽입된 상태에서 이를 어떻게 적용할 수 있는지 설명하였다. 또한, 이를 기반으로 RTM의 공정성향상을 기하기 위하여 프리폼의 이상유무를 어떻게 판단할 수 있는지에 대해서도 기술하였다. 이 과정에서 판별분석이 어떻게 적용되는지 설명하였고, 실제현장에서 이를 어떻게 적용하여야하는지에 관해 소개하였다.

기체 유동을 이용한 기법의 전반적인 장단점을 그와 관련된 논란과 더불어 소개하였다. 가장 큰 장점이라면, 프리폼에 손상을 가하지 않고 현재 삽입된 프리폼에 관한 정보들을 얻어 낼 수 있는 점이라 하겠다. 단점이라면, 역시 실제 수지유동과의 상사성에 대한 확실한 근거가 아직 알려져 있지 않다는 것이다. 이 단점에도 불구하고, 이 기법을 결함탐지에 적용하는 것은 이론적으로 실제적으로 적합하다고 하겠다. 특히, 대량생산공정에 이 기법을 적용하는 것은 매우 바람직하다고 사료된다. 또한, 언급한대로 기체 유동 기법을 효과적으로 적용하기 위해 데이터웨어하우스를 구성하는 것이 유리하다.

참고문헌

- 1) K. Potter, *Resin Transfer Molding*, Kluwer Academics, 1997.
- 2) R. S. Parnas, *Liquid composite molding*, Munich: Carl Hanser Verlag, 2000.
- 3) A. Shojaei, S. R. Ghaffarian, "Modeling and simulation approaches in the resin transfer molding process: A review," *Polymer Composites*, Vol. 24, 2003, pp. 525-544.
- 4) R. Pan, Z. Y. Liang, C. Zhang and B. Wang, "Statistical characterization of fiber permeability for composite manufacturing," *Polymer Composites*, Vol. 21, 2000, pp. 996-1006.
- 5) K. Hoes, D. Dinescu, H. Sol, M. Vanheule, R. S. Parnas, Y. W. Luo and I. Verpoest, "New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM," *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, 2002, pp. 959-969.
- 6) Gauvin R, Trochu F, Lemenn Y and Diallo L., "Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement," *Polymer Composites*, Vol. 17, 1996, pp. 34-42.
- 7) Z. Liang, C. Zhang, B. Wang B and C. Shih, "In-Situ Measurement and Monitoring of Fiber Preform Permeability for Liquid Composite Molding," *Proceedings of the 45th International SAMPE Symposium Long Beach, CA*, Vol. 45, 2000, pp. 2053-2062.
- 8) M. K. Um, I. M. Daniel and B. W. Childs, "A gas flow method for determination of in-plane permeability of fiber preforms," *Polymer Composites*, Vol. 22, 2001, pp. 47-56.
- 9) S. K. Kim, J. G. Opperer, D. H. Kim and I. M. Daniel, "Determination of in-plane permeability of fiber preforms by the gas flow method using pressure measurements," *Polymer Composites*, Vol. 24, 2003, pp. 34-44.
- 10) J. V. Beck, B. Blackwell, C. R. St. Clair, *Inverse Heat Conduction : Ill-Posed Problems*, New York: Wiley, 1985.
- 11) S. K. Kim and I. M. Daniel, "Determination of three-dimensional permeability of fiber preforms by the inverse parameter estimation technique", *Composites Part-A*, Vol. 34, 2003, pp. 421-429.
- 12) D. L. Koch and A. J. C. Ladd, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 349, 1997, pp. 31.
- 13) F. D. Dungan, A. M. Sastry, "Saturated and unsaturated polymer flows: Microphenomena and modeling," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2002, pp. 1581-1603.
- 14) R. S. Parnas, K. M. Flynn, M. E. DalFavero, "A permeability database for composites manufacturing," *Polymer Composites*, Vol. 18, 1997, pp. 623-633.
- 15) S. K. Kim, J. G. Opperer and I. M. Daniel, "Detection of Local Preform Defects by Gas Flow Method and Statistical Analysis," *Advanced Composites Letters*, Vol. 12, 2003, pp. 109-114.
- 16) W. R. Klecka, *Discriminant Analysis*, Beverly Hills: Sage Publications, 1980.
- 17) J. G. Opperer, S. K. Kim I. M. Daniel, "Characterization of local preform defects in resin transfer molding by the gas flow method and statistical analysis," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004, pp. 1921-1935.
- 18) S. K. Kim and I. M. Daniel, "Gas flow test of braided preform quality for resin transfer moulding," *Advanced Composites Letters*, Vol. 12, 2003, pp. 161-163.
- 19) P. Ponniah, *Data Warehousing Fundamentals: A Comprehensive Guide for IT Professionals*, Wiley-Interscience, 2001.
- 20) E. Thomsen, *OLAP Solutions: Building Multidimensional Information Systems*, Wiley, 2002.
- 21) R. Jabobson, *The Microsoft SQL Server 2000 Analysis Services Step by Step*, Microsoft Press, 2000.