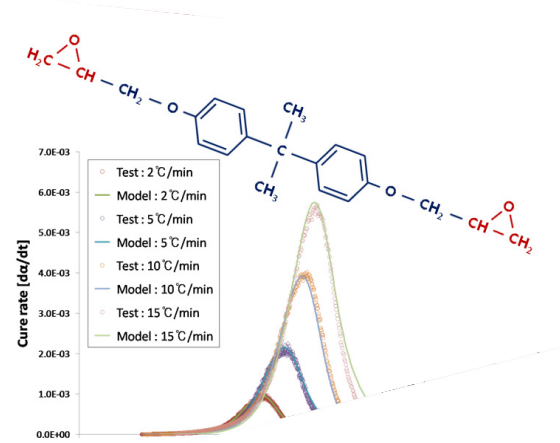


Abaqus User Subroutine을 이용한 에폭시 경화과정의 유한요소해석

Finite Element Analysis of an Epoxy Curing Processes by using Abaqus User Subroutine



에폭시 수지는 복합재료, 전자패키지, 절연재료 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 에폭시 수지가 사용된 제품들의 제조 공정 중 발생하는 경화 수축은 잔류응력 및 변형을 야기한다. 에폭시 수지의 경화도에 영향을 미치는 가장 지배적인 인자는 경화 온도 프로파일이다. 유한요소해석으로 경화도 및 경화 수축을 계산할 수 있다면 잔류응력과 변형을 최소화하는 최적의 경화온도 프로파일을 결정할 수 있다. 본 기사에서는 Abaqus User Subroutine 기능을 활용하여 경화 해석을 수행하는 방법에 대해 소개하고자 한다.

1. 서론

본 기사의 목적은 에폭시 경화 해석에서 Abaqus User Subroutine을 어떻게 활용할 수 있는지에 대한 기본 개념을 전달하는 것이다. 에폭시 수지의 경화는 열적, 화학적, 기계적인 반응이 복합적으로 작용하는 복잡한 현상이다. 이를 유한요소해석으로 구현하기 위해서는 우선 과도 열전달 해석에서 시간에 따른 온도 분포와 함께 경화도가 계산되어야 하고 경화에 의한 발열반응이 함께 고려되어야 한다. 과도 열전달 해석으로부터 시간에 따른 온도 분포와 경화도가 계산되면 열응력 해석을 수행하여 열변형 및 잔류응력을 계산한다. 이때 열팽창뿐만 아니라 경화에 의한 수축 및 경화도에 따른 탄성계수의 변화도 고려되어야 하며 시간의 영향을 고려하기 위해 점탄성 물성이 함께 고려되어야 한다.

우선 경화도 측정 데이터를 이용하여 경화도 모델의 파라미터를 구하고 이를 해석적으로 구현한 결과를 설명할 것이다. 경화도 계산이 가능해지면 이를 통해 경화 수축을 예측할 수 있고 경화도에 따른 탄성계수의 변화를 고려하여 해석을 수행할 수 있다.

2. 경화도 해석

경화과정의 유한요소해석을 위해서는 우선 시간, 온도에 따른 경화도를 계산할 수 있어야 한다. 이를 위한 다양한 모델이 제안되어 있으며, 본 기사에서는 Šesták-Berggren¹⁾이 제안한 식 (1)의 모델을 사용하였다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \alpha^m (1-\alpha)^n \quad (1)$$



강 진 혁

(주)브이이엔지 과장



김 수 등

(주)유라테크 차장

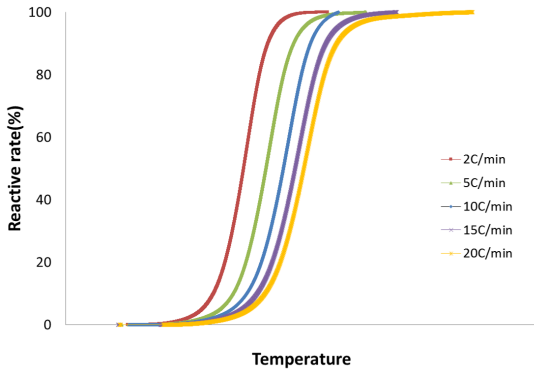


그림 1 DSC 실험으로 구한 경화도 데이터

여기서 α 는 경화도를 나타내며 E 와 R 은 각각 활성화 에너지와 기체상수이다. A , m , n 은 모델 파라미터이며 t 와 T 는 각각 시간과 온도이다. 결정되어야 하는 모델 파라미터는 A , E , m 그리고 n 총 4개이고 본 기사에서는 그림 1에 나타난 DSC(Differential Scanning Calorimeter) 실험 데이터를 활용하여 파라미터를 결정하였다. 보안상의 문제로 그래프에 모든 값들을 표시할 수는 없었지만 개념 설명에 있어 문제가 되지는 않는다. 이 실험데이터를 이용하여 4개의 모델 파라미터를 구하는 방법은 참고문헌²⁾에 잘 설명되어 있다. 그림 2와 표 1에 그 결과를 나타내었으며 경화도 모델이 실험 데이터를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

이제 경화도 모델과 파라미터를 서브루틴 코드로 작성하여 유한요소해석을 수행하는 방법과 결과를 설명하겠다.

표 1 Šesták-Berggren 모델 파라미터

A	E (kJ/mol)	m	n
3.28e6	69.94	0.47	1.24

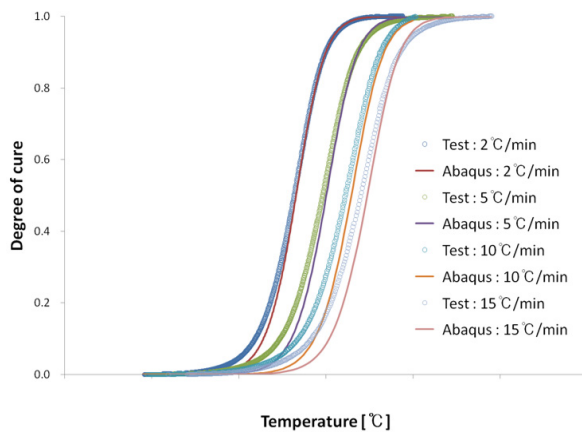


그림 3 실험 데이터와 해석 결과 비교

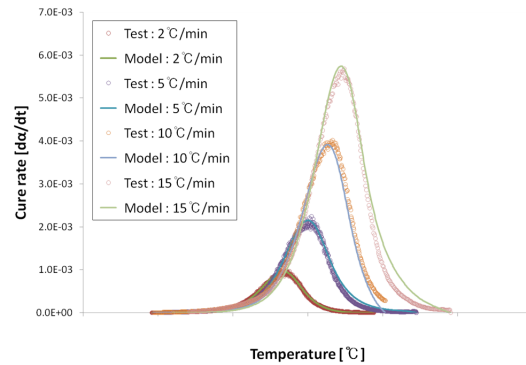


그림 2 실험 데이터와 모델 비교 결과

경화도를 Abaqus 해석의 결과로 확인하기 위해서는 solution dependent variable(SDV)을 정의해야 하며, 이를 위해 USDFLD 서브루틴을 활용하였다. USDFLD 서브루틴에서 경화도를 계산하여 SDV로 저장하면 이를 Abaqus의 ELEMENT OUTPUT으로 결과를 출력할 수 있게 된다. 발열 반응은 HETVAL 서브루틴과 Abaqus 인풋 파일에 사용되는 *HEAT GENERATION 키워드를 이용하여 간단히 계산할 수 있다. 해석은 그림 3과 같이 매우 간단한 모델을 이용하였고 모든 절점에 균일한 온도를 적용한 과도 열전달 해석을 수행하였다. 해석 결과 얻어진 경화도와 실험 데이터를 그림 3에 나타내었고 해석으로 실험 결과를 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다. 표 2에 USDFLD 서브루틴 구조의 일부를 수록하였다.

표 2 USDFLD 서브루틴의 구조

```
subroutine usdfl d ( field , statev , pnewdt , direct , t , celent , time ,
1 dtime , cmname , orname , nfield , nstatv , noel , npt , layer , kspt ,
2 kstep , kinc , ndi , nshr , coord , jmac , jmatyp , matlayo , laccflg )
```

```
include 'aba_param.inc'
```

```
character*80 cmname , orname
character*3 flgray( 15 )
dimension field( nfield ) , statev( nstatv ) , direct( 3 , 3 ) ,
* t( 3 , 3 ) , time( 2 ) , coord( * ) , jmac( * ) , jmatyp( * )
dimension array( 15 ) , jarray( 15 )
```

[온도 데이터를 불러오기 위한 함수 정의]

```
TEMPC = 온도
```

```
call cure( TEMPc , dtime , statev ) ← 경화 모델 코딩
alpha = statev( 1 )
field( 1 ) = alpha
```

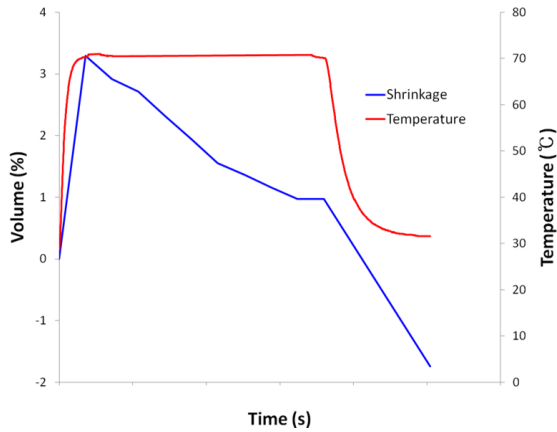


그림 4 경화 수축 측정 데이터

3. 경화 수축 해석

열전달 해석으로부터 경화도를 계산할 수 있다면 열응력 해석을 통해 경화 수축을 계산할 수 있다. 경화 수축 역시 매우 다양한 모델이 존재하며 본 기사에서는 식 (2)와 같은 Bogetti-Gillespie 모델³⁾을 이용하였다.

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{Shrinkage} &= 0, & \alpha &\leq \alpha_G \\
 \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{Shrinkage} &= \left(\frac{\alpha - \alpha_G}{\alpha_M - \alpha_G}\right) \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{Total}, & \alpha_G &< \alpha < \alpha_M \\
 \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{Shrinkage} &= \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{Total}, & \alpha &\geq \alpha_M
 \end{aligned} \quad (2)$$

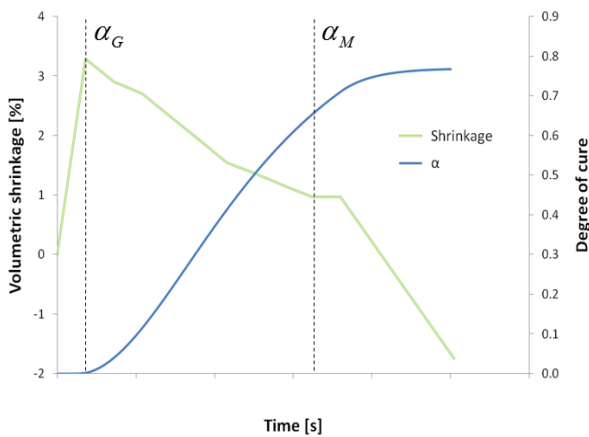


그림 5 경화도와 수축률 간의 관계

여기서 α_G 는 겔화(gelation)점에서의 경화도를 나타내고 α_M 은 경화 수축이 완료되었을 때의 경화도를 나타낸다.

α_G 와 α_M 을 구하기 위해서는 경화 수축 측정 데이터가 필요하고 이를 그림 4에 나타내었다. 이 실험 데이터를 살펴보면 경화 수축이 시작되는 시점과 완료되는 시점을 알 수 있다. 경화 수축이 시작되는 시점을 겔화점으로 판단할 수 있고 등온 구간에서 경화 수축이 더 이상 발생하지 않는 시점도 파악할 수 있다. 시간에 따른 온도가 있으므로 경화도 모델을 이용하여 경화도를 계산하면 그림 5에 나타낸 바와 같이 α_G 와 α_M 을 구할 수 있다.

경화 수축 모델의 파라미터를 구했으므로 서브루틴 코드를 작성하여 유한요소해석을 수행할 수 있다. 앞서 과도 열전달 해석에 사용했던 간단한 모델을 이용하여 열응력 해석을 수행하였다. 과도 열전달으로 시간에 따른 온도 분포와 경화도를 계산하였고 이를 열응력 해석에 적용하여 경화 수축을 계산하였다. 경화 수축을 계산하기 위한 서브루틴은 UEXPAN을 사용하였으며 해석 결과를 실험 데이터와 비교한 결과 그림 6과 같이 해석이 실제 경화 수축을 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 표 3에 UEXPAN 서브루틴 구조의 일부를 수록하였다.

4. 경화도에 따른 탄성계수

경화도에 따른 탄성계수의 변화를 구현하기 위해 UMAT 서브루틴을 사용할 수도 있으나 본 기사에서는 Abaqus의 FIELD VARIABLE을 활용한 방법을 소개하고자 한

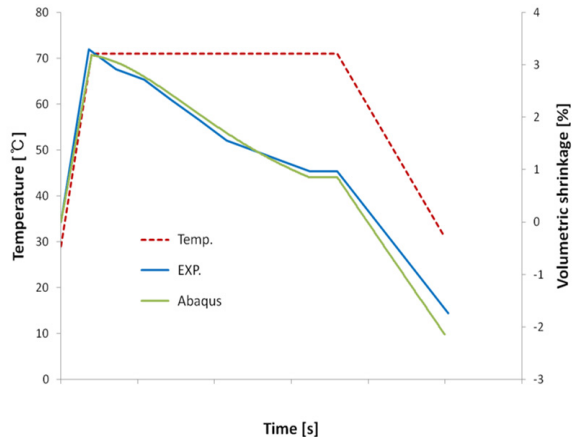


그림 6 경화 수축 해석 결과와 실험 결과 비교

표 3 UEXPAN 서브루틴의 구조

```

subroutine uexpan ( expan , dexpandt , temp , time , dtime , predef ,
$      dpred , statev , cmname , nstatv , noel )

include 'aba_param.inc'

character*80 cmname
dimension expan( * ) , dexpandt( * ) , temp( 2 ) , time( 2 ) ,
$      predef( * ) , dpred( * ) , statev( nstatv )

[열팽창 계수, 겔화점에서의 경화도, 경화수축 완료 시점의 경화도 등 변수 선언]

tempc = temp( 1 )
dtemp = temp( 2 )

alpha( 1 ) = statev( 1 )
call cure( tempc , dtime , statev )      ← 경화 모델 코딩
alpha( 2 ) = statev( 1 )

do k = 1 , 2
  if ( alpha( k ) <= alpha_G ) then
    ← 경화 수축 모델 코딩
  elseif ( ( alpha(k) > alpha_G ) .and. ( alpha(k) < alpha_M ) ) then
    ← 경화 수축 모델 코딩
  elseif ( alpha( k ) >= alpha_M ) then
    ← 경화 수축 모델 코딩
  end if
end do

return
end
    
```

다. Abaqus에서는 재료의 물성치를 FIELD VARIABLE의 함수로 정의할 수 있는 기능을 제공한다. 그림 7에 에폭시 가 경화됨에 따른 탄성계수의 변화와 경화도를 함께 나타내었다. 재료에 따라 다를 수 있겠지만 본 기사의 에폭시 재료는 경화도와 탄성계수 사이의 관계를 선형적이라고 가정할

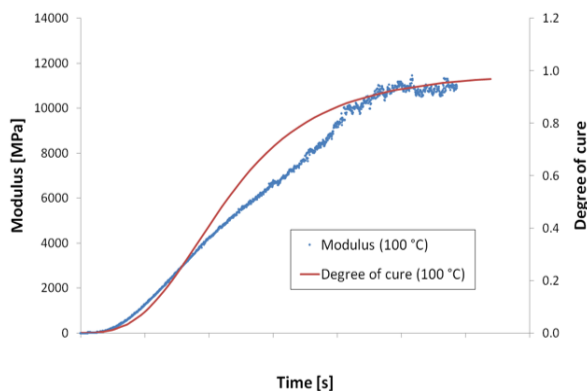


그림 7 경화도와 탄성계수 간의 관계

표 4 탄성계수를 FIELD VARIABLE의 함수로 정의한 예

```

*Elastic, DEPENDENCIES=1
  100, 0.32, ,0.1
 10000, 0.32, ,0.9
    
```

탄성계수 FILED VARIABLE

수 있었다. 이 때 경화도에 따른 탄성계수를 정의하는 방법을 Abaqus 키워드로 설명한 예를 표 4에 나타내었다. 예를 들어 경화도 10%에서의 탄성계수를 100MPa라 하고 90%에서의 탄성계수를 10000MPa라고 한다면 키워드를 표 4와 같이 작성할 수 있다. 표 2에서 경화도를 FIELD VARIABLE로 저장했기 때문에 이와 같이 간단하게 경화도와 탄성계수의 관계를 정의할 수 있다.

5. 결론

본 기사에서는 에폭시 경화 해석을 위하여 Abaqus User

Subroutine 기능을 활용하였고 경화도 및 경화 수축을 유한요소해석으로 구현할 수 있었다. 점탄성에 관한 내용은 서브루틴을 사용하지 않아도 Abaqus에서 기본적으로 제공하는 모델이 있기 때문에 설명을 생략하였다. 에폭시의 경화와 같은 복잡한 현상도 유한요소해석으로 구현할 수 있었으며 본 기사를 통해 Abaqus의 User Subroutine 기능이 매우 강력한 도구라는 것을 알 수 있었다.

국내외 산업 전반적으로 제품의 전자화, 경량화가 지속적으로 연구되고 있기 때문에 에폭시 재료가 사용되는 전자 부품, 복합재 등의 수요는 계속해서 증가할 것이다. 열경화성 수지의 경화에 대한 유한요소해석을 연구하고 있는 연구원들에게 이 글이 조금이나마 도움이 되길 바란다.

6. 참고문헌

1. J. Šesták and G. Berggren, Study of the kinetics of the mechanism of solid-state reactions at increasing temperatures, *Thermochim. Acta*, Vol. 3, 1971, pp. 1-12.
2. G. Wang, G. Jiang and J. Zhang, Preparation, curing kinetic and properties of a novel amine with flexible polyoxypropylene side chain curing agent for epoxy resin, *Thermochim. Acta*, Vol. 589, 2014, pp. 197-206.
3. T.A. Bogetti and J.W. Gillespie, Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates. *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 626-660. 