

형상기억합금 작동기의 모델링

이효직*(한국원자력연구소), 윤지섭(한국원자력연구소)

Modeling of an Shape Memory Alloy Actuator

H. J. Lee(Spent Fuel Tech. Dev. Div., KAERI), J. S. Yoon(Spent Fuel Tech. Dev. Div., KAERI)

ABSTRACT

Even though SMA actuators have high power to volume ratio, there exist disadvantages such as hysteresis and saturation. So the model identification for SMA actuators is very difficult. For the qualitative model identification, we described the behavior of SMA actuators using a so-called diagonal model, which can readily expect the turning point of an incomplete phase transformation. For the quantitative model identification, we developed the general dynamics of SMA actuators using the modified Liang's model. Using this dynamics we can describe the hysteresis and the saturation very well. It is also very important to notice that the modified Liang's model maintains a continuous martensite fraction at the change of the phase transformation but the original model cannot.

Key Words : Hysteresis (이력곡선), Saturation (포화), Modified Liang's model (수정된 Liang 모델), Phase transformation (상변태), Martensite fraction (마르텐사이트 분율)

1. 서론

형상기억합금 작동기는 부피 대비 높은 힘을 낼 수 있는 장점을 갖고 있지만, 이력곡선과 포화요소 등의 비선형특성들이 형상기억합금 작동기 모델링을 어렵게하는 요인이 되고 있다. 형상기억합금 작동기는 형상기억효과를 이용한 것인데 이는 상변태에 의해 유발된다. 형상기억합금의 고체역학적 구성방정식(constitutive equation)은 Tanaka¹, Liang & Rogers², Brinson & Lammering³에 의해 현상학적 모델(phenomenological model)이 고안되었다. 그 후 많은 연구자들에 의해 구성방정식이 제안되었으나 현상학적 모델이 가장 이해하기 쉬우므로 널리 사용되고 있는 실정이다.

형상기억합금 구성방정식에는 상변태의 거동을 설명하는 상변태동역학(transformation kinetics)이 포함되어 있는데, 현상학적 모델의 상변태동역학은 문제가 있다. 상변태의 진행 방향이 바뀔 경우 불연속이 발생하여 수치적 모델링을 할 경우 수렴할 수 없는 문제가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 수정 Liang 모델을 제시하였다.

형상기억합금 작동기의 동역학 모델은 Majima 등⁴에 의해 제시가 되었다. 그러나 온도변화에 의한 금속열팽창을 없다고 가정하였고, 수정되지 않은 Liang모델을 사용함으로 인해 실제 형상기억합금 작동기의 거동을 묘사하기에는 부족함이 있다. 이러한 점을 해결하기 위해 가정이 없는 동역학을 유도하고, 수정Liang모델을 사용하여 가장 일반적인 동역학을 제시하였다.

2. 구성방정식

2.1 Liang 모델

Tanaka¹에 의하면 구성방정식은 다음과 같이 네 개의 변수, 즉, 응력(또는 하중), 변형률(또는 변형), 온도, 마르텐사이트 분율(martensite fraction)로 이루어진다.

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \dot{T} + \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \dot{\xi} = D(\xi) \dot{\varepsilon} + \Theta \dot{T} + \Omega(\xi) \dot{\xi} \quad (1)$$

여기서 $\sigma, \varepsilon, T, \xi$ 는 각각 응력, 변형률, 온도, 마르텐사이트 분율이고, $\dot{\cdot}$ 는 시간에 대한 미분을 나타낸다.

타낸다. $D(\xi)$, Θ , $\Omega(\xi)$ 는 각각 탄성계수, 열탄성계수, 상변태계수이다. 구성방정식에서 열탄성에 의한 항의 크기는 다른 두 항의 크기보다 작아 생략하는 경우도 있다. 탄성계수와 상변태계수는 마르텐사이트 분율의 함수가 되며 다음과 같은 수식으로 표현한다.

$$\begin{aligned} D(\xi) &= D_A + \xi(D_M - D_A) \\ \Omega(\xi) &= -\varepsilon_L D(\xi) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 D_M 은 100% 마르텐사이트일 때의 탄성계수이고, D_A 는 100% 오스테나이트일 때의 탄성계수이며, ε_L 은 최대회복가능 변형률이다. 최대회복가능 변형률은 형상기억합금의 특성(property)이며, Ni-Ti 형상기억합금의 경우 대략 6~7% 정도의 대변형률을 갖는다. 소성이 일어나지 않는 범위 내에서 상변태만으로 6~7%의 변형률을 갖는다는 것은 어느 금속에서도 나타나지 않는 형상기억합금만의 고유한 성질이다.

마르텐사이트 분율을 나타내는 식을 상변태동역학이라고 부르며 Liang & Rogers²의 현상학적인 모델은 다음과 같이 온도와 응력의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{if } M \rightarrow A \quad \xi &= \frac{\xi_M}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A \sigma] + 1 \} \\ \text{if } A \rightarrow M \quad \xi &= \frac{1 - \xi_A}{2} \cos[a_M(T - M_f) + b_M \sigma] + \frac{1 + \xi_A}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ξ_M 은 $M \rightarrow A$ 상변태가 일어나기 전의 마르텐사이트 분율이며, ξ_A 는 $A \rightarrow M$ 상변태가 일어나기 전의 마르滕사이트 분율이다. 이 때 사용된 계수의 의미는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_A &= \pi / (A_f - A_s) \\ a_M &= \pi / (M_s - M_f) \\ b_A &= -a_A / C_A \\ b_M &= -a_M / C_M \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 C_A 와 C_M 의 의미는 상변태도에서 온도 대 응력의 기울기를 의미한다. Liang & Rogers²의 상변태도는 Brinson & Lammering³의 상변태도에 비해 단순한데, 쌍정마르텐사이트와 역쌍정마르텐사이트 사이의 구분이 없기 때문이다. 본 연구에서는 Liang & Rogers²의 상변태도를 기준으로 동역학을 구성하였다. Liang & Rogers²가 제시한 상변태 발생 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{if } M \rightarrow A \quad C_A(T - A_f) &\leq \sigma \leq C_A(T - A_s) \\ \text{if } A \rightarrow M \quad C_M(T - M_s) &\leq \sigma \leq C_M(T - M_f) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식을 만족하는 응력과 온도의 범위는 Fig. 1의 상변태도에서 띠(band) 내에 해당한다.

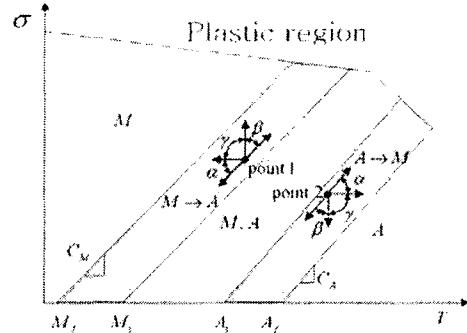


Fig. 1 Phase diagram of the modified Liang's model

2.2 수정 Liang 모델

Liang 모델에서 상변태 방향이 변할 때를 고려하면 두 가지 경우가 있다. $M \rightarrow A$ 방향으로 상변태가 진행되다가 $A \rightarrow M$ 으로 바뀌는 경우와 $A \rightarrow M$ 방향으로 상변태가 진행되다가 $M \rightarrow A$ 방향으로 바뀌는 경우를 들 수가 있다. 엄밀히 말하면 상변태 방향이 바뀌는 중간에는 상변태 없이 변형하는 구간이 존재한다. 식 (3)과 같은 상변태동역학을 사용할 경우 마르텐사이트분율의 연속성을 상변태 방향이 바뀌는 시점에서 보장할 수가 없다. 따라서 연속성을 보장하기 위해서는 식 (3)에서 ξ_M 과 ξ_A 를 다음과 같이 바꾸어줄 필요가 있다.

$$\begin{aligned} \text{if } M \rightarrow A \quad \xi_M' &= \frac{2\xi_M}{[\cos\{a_A(T - A_s) + b_A \sigma\} + 1]} \\ \text{if } A \rightarrow M \quad \xi_A' &= \frac{2\xi_A - 1 - \cos[a_M(T - M_f) + b_M \sigma]}{1 - \cos[a_M(T - M_f) + b_M \sigma]} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (3)의 ξ_M 과 ξ_A 는 상변태 방향이 바뀌는 시점에서 식 (4)로 한 번만 갱신해주면 된다.

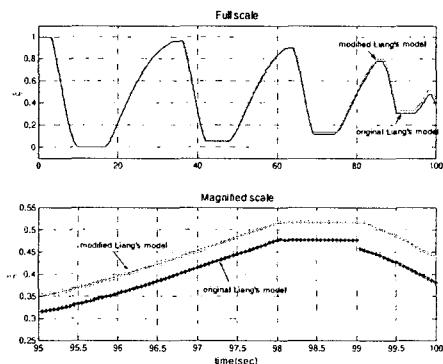


Fig. 2 Effect of the modification of ξ_M and ξ_A

마르텐사이트 분율은 100% 마르텐사이트 상일 때 1의 값을 갖고 100% 오스테나이트 상일 때 0의 값을 갖는다. 식 (6)과 같이 상변태동역학을 수정했을 경우 그 영향을 Fig. 2에서 알 수 있다. 기존 Liang 모델의 경우 상변태 방향이 바뀔 때 불연속을 보이는 데 반하여 수정 Liang 모델의 경우는 연속을 보여주고 있다.

수정 Liang 모델에서는 마르滕사이트 분율의 연속성의 보장 이외에도 상변태 조건의 구체적인 제시를 하였다. Fig. 1과 같은 상변태도에서 밴드 안에서 방향에 따른 상변태 발생 조건을 추가하였다. 즉, 식 (5)을 다음과 같은 구체적 조건으로 수정하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{if } C_A(T - A_f) \leq \sigma \leq C_A(T - A_s) \text{ and} \\
 & \quad (((0 \leq \frac{d\sigma}{dT} \leq C_A) \text{ and } (0 < dT)) \text{ and } (0 \leq d\sigma)) \text{ or} \\
 & \quad (((C_A \leq \frac{d\sigma}{dT}) \text{ and } (dT \leq 0) \text{ and } (d\sigma \leq 0)) \text{ or} \\
 & \quad ((0 < dT) \text{ and } (d\sigma \leq 0))), \\
 & \text{then } M \rightarrow A. \\
 & \text{if } C_M(T - M_s) \leq \sigma \leq C_M(T - M_f) \text{ and} \\
 & \quad (((0 \leq \frac{d\sigma}{dT} \leq C_M) \text{ and } (dT \leq 0) \text{ and } (d\sigma \leq 0)) \text{ or} \\
 & \quad ((C_M \leq \frac{d\sigma}{dT}) \text{ and } (0 < dT) \text{ and } (0 \leq d\sigma)) \text{ or} \\
 & \quad ((dT \leq 0) \text{ and } (0 \leq d\sigma))), \\
 & \text{then } A \rightarrow M.
 \end{aligned} \tag{7}$$

이와 같은 조건을 사용했을 경우와 기존 Liang 모델의 조건식을 사용했을 경우 이력곡선의 형태를 비교하면 Fig. 3과 같다.

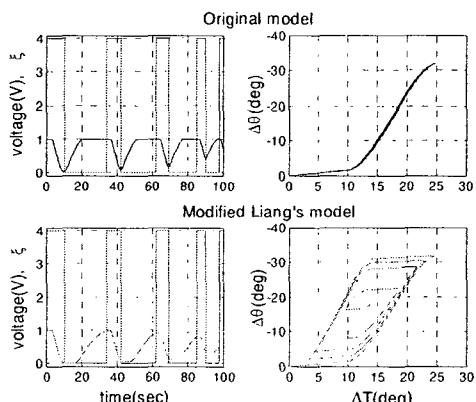


Fig. 3 Difference between original and modified Liang's model (phase transformation criterion)

기존 모델의 경우 이력곡선의 형태를 잘 표현할

수 없는 반면, 수정 Liang 모델의 경우 불완전 상변태에 의한 이력곡선의 형태를 잘 설명할 수 있다. 수정 Liang 모델의 결과 중 온도와 변위 관계를 살펴보면 기울기가 급격한 곳은 상변태가 진행중인 구간이고, 기울기가 낮은 곳은 열팽창 및 수축에 의한 변형이다. Fig. 2, 3의 결과는 다음장에서 설명한 동역학과 함께 MATLAB의 SIMULINK를 사용하여 구현하였다.

3. 형상기억합금 작동기 동역학

3.1 형상기억합금 작동기 구조

가장 흔히 쓰는 형상기억합금 작동기의 구조는 바이어스식이다. 바이어스식(bias-type) 작동기란 일방향성(one way) 형상기억합금 작동기와 함께 복원력(recovery force)을 줄 수 있는 스프링과 같은 요소를 직렬로 연결하여 양방향성(two way)을 구현한 것을 말한다. 본 연구에서 대상으로 삼는 바이어스식 형상기억합금 작동기의 구조를 Fig. 4에 나타내었다.

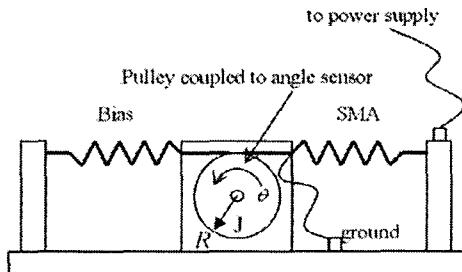


Fig. 4 Structure of the bias-type SMA actuator

여기서 J 는 회전자의 관성모멘트(moment of inertia)이고 θ 는 각도변위이고 R 은 회전자의 반경이며 형상기억합금의 외부 가진은 전기적 발열을 사용한다.

3.2 대각선모델

본 연구에서는 형상기억합금 작동기의 거동을 정성적으로 설명하기 위한 방법으로 대각선모델(diagonal model)을 제시하였다. 우선 형상기억합금 작동기의 온도 대 변위 곡선을 얻어보면 Fig. 5와 같은 이력곡선을 얻을 수가 있는데 이 이력곡선의 특징은 다음과 같이 단순화 시켜 설명할 수 있다. 주이력곡선(major hysteresis)은 최외각에 존재하며 어떤 경로든 이 주이력곡선 밖으로는 나갈 수 없다. 주이력곡선 안쪽으로 무수히 많은 경로가 존재할 수 있고 이를 부이력곡선(minor hysteresis)이라 부른다. 초기에 온도변화에 대한 각도변화가 없는 부분은 상변태가 발생하지 않는 구간이다. 상변태가 존

재하지 않는 구간과 상변태가 존재하는 구간의 합은 대각선모델(diagonal model)로 설명할 수가 있는데, 주이력곡선에 대각선을 그어 그 대각선과 만나게 될 때, 상변태 구간에서 상변태가 없는 구간으로 또는 그 반대로의 변화가 일어나게 된다.

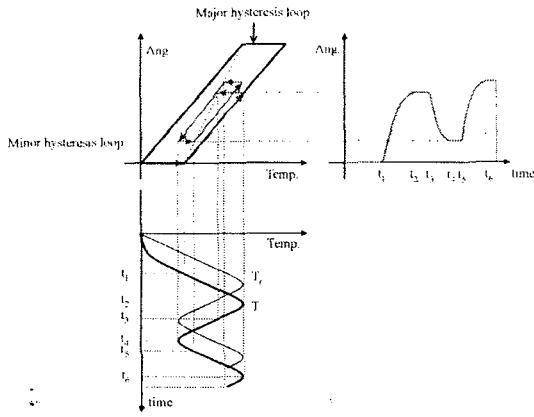


Fig. 5 Simplified hysteresis model (diagonal model) without thermal expansion

Fig. 5 는 가장 단순화된 모델이고 실제로 열팽창 및 수축에 의한 변형을 고려할 경우 암대(dead band)로 표시되는 상변태 없는 구간은 기울기가 약간 있는 형태로 바뀌게 된다.

3.3 형상기억합금 작동기 동역학

형상기억합금의 구성방정식을 하중, 각도, 마르텐사이트 분율, 온도의 함수로 바꿔 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{P} = AR\dot{\theta} + B\dot{\xi} + ET \quad (8)$$

여기서 P 는 형상기억합금이 받는 인장하중이고, A 와 B 는 Majima 등의 문헌에 자세히 나와있다. 그러나 문헌에 나와 있는 값은 틀린 값이며, 형상기억합금 작동기가 코일스프링일 때, 정확한 A , B 와 E 는 다음과 같다.

$$A = \frac{d_{sma}^3 G}{8n_{sma} D_{sma}^3}, \quad B = \frac{\pi d_{sma}^3 \Omega}{8\sqrt{3}D_{sma}}, \quad E = \frac{\pi d_{sma}^3 \Theta}{8\sqrt{3}D_{sma}} \quad (9)$$

여기서 G 는 횡탄성계수, Ω 는 상변태계수, n_{sma} 은 코일스프링의 감은수, d_{sma} 는 선경, D_{sma} 는 코일경이다. 여기서 $\sqrt{3}$ 이 들어가는 이유는 유효변형률(effective strain)과 유효응력(effective stress)을 사용하여 식(8)을 구성했기 때문이다. 바이어스 스프링이 받는 하중은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\dot{P}_b = -KR\dot{\theta} \quad (10)$$

여기서 K 는 바이어스 스프링계수이다. 식(8)과 식(10)을 연립하여 동역학을 구성하여 보면 다음과 같다.

$$J\ddot{\theta} + \rho\ddot{\theta} + R^2(K + A)\dot{\theta} = -RB\dot{\xi} - RET \quad (11)$$

여기서 ρ 는 감쇠계수(damping coefficient)이다. 마르텐사이트 분율에 대한 식을 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\dot{\xi} = C\dot{T} + D\dot{P} = \frac{1}{1-BD} \{ (C + DE)\dot{T} + ADR\dot{\theta} \} \quad (12)$$

여기서 계수 C 와 D 는 상변태 방향에 따라 그 식을 달리한다. 각각의 상변태 방향에 따른 값은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \text{if } A \rightarrow M \\ & C = -\frac{1-\xi_A'}{2} \sin[a_M(T - M_f) + b_M \sigma] p_M, \\ & D = -\frac{1-\xi_A'}{2S} \sin[a_M(T - M_f) + b_M \sigma] p_M \\ & \text{if } M \rightarrow A \\ & C = -\frac{\xi_M}{2} \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma] p_A, \\ & D = -\frac{\xi_M}{2S} \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma] p_A \\ & \text{if no phase transformation} \\ & C = D = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 S 는 등가면적으로 코일스프링의 경우 $\pi d_{sma}^3 / 8\sqrt{3}D_{sma}$ 의 값을 갖는다.⁵ 위 식(12)를 식(11)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$J\ddot{\theta} + \rho\ddot{\theta} + R^2(K + A + \frac{ABD}{1-BD})\dot{\theta} = -\frac{R}{1-BD}(BC + E)\dot{T} \quad (14)$$

식(14)의 모든 계수가 연속함수이면 적분 가능하다. 계수 C, D 의 값이 상변태 구간에 따라 다른 연속 함수의 형태로 나타나지만 구간의 경계에서 살펴보면 역시 연속임을 쉽게 알 수 있다. 따라서 연속함수의 사칙연산도 연속이 됨으로 식(14)의 모든 계수는 연속이다. 식(14)를 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & J(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_i) + \rho(\dot{\theta} - \dot{\theta}_i) + \frac{R^2(K + A + \frac{ABD}{1-BD})(\theta - \theta_i)}{1-BD} \\ & = -\frac{R}{1-BD}(BC + E)(T - T_i) \end{aligned} \quad (15)$$

즉, 형상기억합금 작동기의 온도 대 변위의 관계는 2 차 비선형 미분방정식의 형태로 표현할 수 있다. 그러나 계수가 상수가 아니므로 수치적으로 풀어내야 한다.

형상기억합금이 발생하는 힘은 상변태기준을 결정하는데 사용되고, 계수 C, D 를 결정하는 데 사용되며, 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{P} = \frac{AR}{1-BD}\dot{\theta} + \frac{1}{1-BD}(BC + E)\dot{T} \quad (16)$$

4. 수치해석

4.1 예측-수정 (prediction-correction) 방법

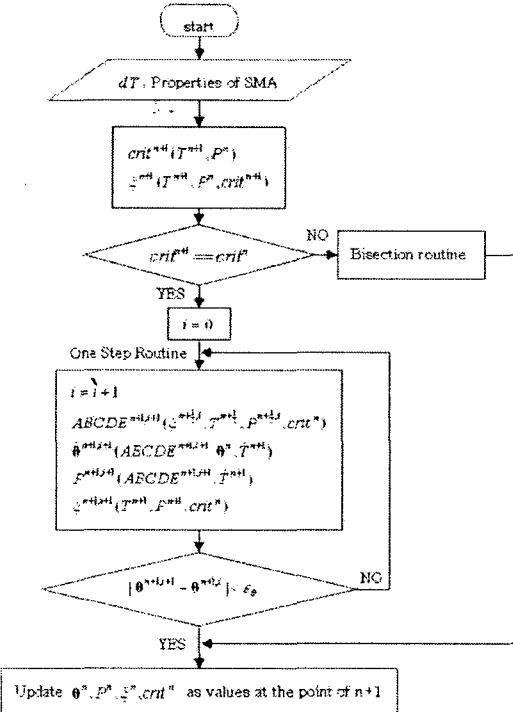


Fig. 6(a) Prediction-Correction: one step routine

앞서 전개한 형상기억합금 동역학모델의 검증을 위해 식 (14), (12), (16)을 순차적으로 사용하고, iteration을 통해 해를 얻는 방법으로 수치적 모델링을 하였다. SIMULINK/MATLAB®의 S-function으로 형상기억합금의 동역학을 모델링하였고, 그 절차를 순서도를 사용하여 Fig. 6에 나타내었다. 형상기억합금 동역학모델이 비선형내연적 방정식이므로 해를 구하기 위해 반복(iteration)적으로 수렴할 때까지 계산한다. 해를 구하는 과정은 현재스텝의 시작점과 끝점이 속하는 상변태 구간에 따라 one step

routine과 bisection routine으로 나뉜다. One step routine은 시작점의 상변태 구간과 같은 상변태 구간이 끝점에서도 유지될 경우 수행한다. 반면에 bisection step routine은 시작점의 상변태와 끝점의 상변태가 다른 경우에 현재스텝의 어느 시점에서 상변태가 달라지는지 검토하여 그 시점을 전후하여 서로 다른 one step routine을 갖도록 한 것이다. 한 스텝 내에 두 가지 종류의 상변태 구간이 존재하게 될 때 bisection step routine의 방법 등으로 상변태 구간이 바뀌는 점을 정확히 구하게 된다. 현재 스텝의 시작점의 상변태 구간을 가정으로 끝점의 해를 구하고, 시작점의 상변태 구간과 끝점을 비교하여 다르면 수정하고, 같으면 유지하므로 이와 같은 방법을 예측-수정(prediction-correction) 방법이라고 부른다.

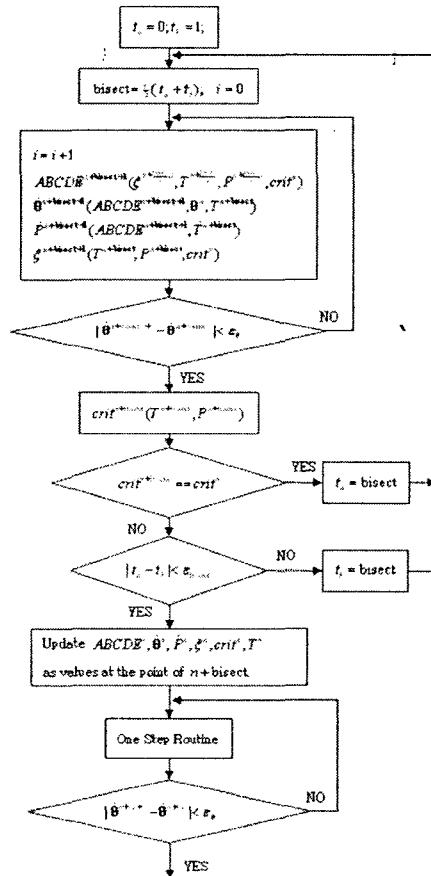


Fig. 6(b) Prediction-Correction: bisection routine

4.2 검증

형상기억합금 동역학 모델링의 검증을 위한 수치모의실험 역시 SIMULINK/MATLAB®을 사용하였

다. 이 때 사용된 재료 및 기하학적 상수 값은 문헌의 값을 이용하였다.⁶ 실험결과에서 얻은 이력곡선(hysteresis)을 수치모의실험에서도 잘 나타내는지를 시험하였다. Fig. 7에서 보면 외부의 이력곡선을 모의실험 결과가 비교적 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 다음으로는 주기형이력곡선(cyclic hysteresis)의 형태를 얻어보기 위한 모의실험을 수행하였는데 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

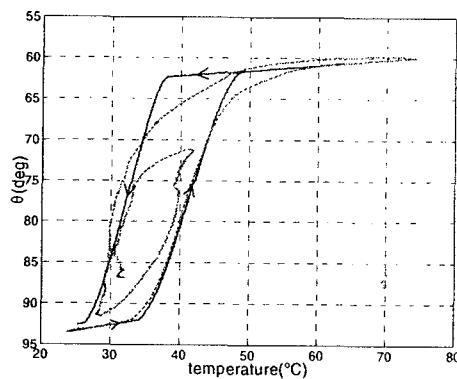


Fig. 7 Hysteresis curves. dashed line: experiment, solid line: simulation

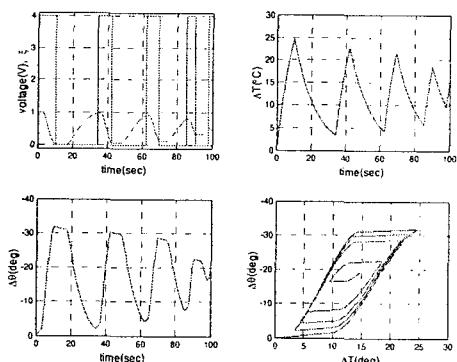


Fig. 8 Cyclic hysteresis of the SMA model.-Simulation

형상기억합금에 가해지는 전압을 0 volt 와 4 volt로 번갈아 가며 걸어주었을 때, 마르텐사이트의 분율, 온도, 각도, 이력곡선의 결과를 얻었다. 초기의 상은 100% 마르텐사이트 상이며, 초기에 4 volt를 걸어주게 되면 온도가 증가하면서 어느 시점(약 4 초)부터 상변태가 일어나게 된다. 상변태가 일어나기 전까지는 열팽창에 의한 완만한 각도변화만 있게 되지만 상변태가 일어나게 되면 마르텐사이트 분율의 감소와 함께 가파른 각도변화를 보이게 된다. 다시 전압을 0 volt로 바꾸어주게 되면 어느 시점(약 18 초)까지는 열팽창에 의한 완만한 각도변화

만을 보이게 되며, 그 이후로는 다시 상변태가 일어나면서 마르텐사이트 분율이 증가하고, 가파른 각도변화를 보여준다. 이러한 과정을 반복하면 불완전상변태에 의한 주기형이력곡선을 얻을 수 있게 된다.

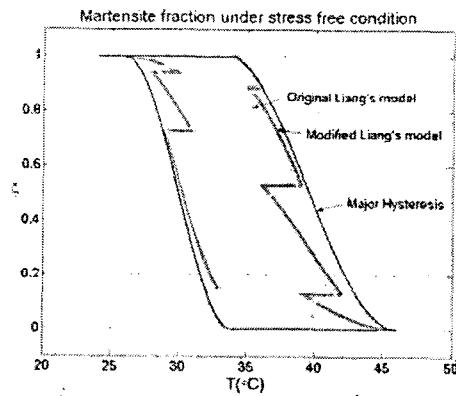


Fig. 9 Difference between original and modified Liang s model (martensite fraction)

Fig. 9는 온도입력을 $24 \rightarrow 36 \rightarrow 35 \rightarrow 39 \rightarrow 36 \rightarrow 42 \rightarrow 39 \rightarrow 46 \rightarrow 32 \rightarrow 33 \rightarrow 29 \rightarrow 31 \rightarrow 28 \rightarrow 30 \rightarrow 26^{\circ}\text{C}$ 와 같이 주었을 때이다. 이러한 온도 입력에 하중이 걸리지 않는 상태를 가정하면, 4 가지의 상변태 온도를 고려할 때, 상변태 방향의 변화는 다음과 같이 바뀌게 된다. $N \rightarrow (M \rightarrow A) \rightarrow N \rightarrow (A \rightarrow M) \rightarrow N \rightarrow (A \rightarrow M) \rightarrow N \rightarrow (A \rightarrow M) \rightarrow N \rightarrow (A \rightarrow M)$. 여기서 N 은 상변태가 없는 구간을 의미하는 것으로 기존의 문헌에서는 이 구간에 대한 고려를 하지 않는다. 예를 들어 $(A \rightarrow M) \rightarrow N \rightarrow (A \rightarrow M)$ 으로의 상변태 과정의 경우는 기존문헌에서는 간단히 $A \rightarrow M$ 상변태 구간이라고 표기하는데, 본 연구에서 N 구간을 특별히 나눈 이유는 원래의 Liang & Rogers 모델을 사용할 경우 $(A \rightarrow M) \rightarrow N \rightarrow (A \rightarrow M)$ 과 같이 불완전상변태가 일어날 때 상변태 구간이 변하는 점에서 불연속이 존재하기 때문이다. Fig. 9를 살펴보면 원래의 모델에서 발생하는 불연속성을 수정된 모델에서는 연속을 유지하도록 하고 있음을 알 수 있다. 완전상변태를 유발하는 주이력곡선의 경우 상변태 구간의 변화는 $N \rightarrow (A \rightarrow M) \rightarrow N \rightarrow (A \rightarrow M)$ 이며, 이럴 경우 원래 Liang & Rogers 의 모델과 수정된 Liang & Rogers 의 모델간의 차이는 없지만 불완전상변태를 유발하는 경우는 원래 Liang & Rogers 모델에서 불연속이 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

기존의 Liang 모델의 단점이었던 불연속성을 해결하고 상변태 방향의 조건을 구체적으로 제시함으로써 형상기억합금 작동기의 거동을 모델링하였다. 본 연구에서 유도한 동역학은 가장 일반적인 동역학으로 기존 문헌에 나타나 있던 가정을 없애고, 오류를 수정한 것이다. 이를 검증하기 위해 수치해석 방법을 제시하였고, 결과를 여러 측면에서 비교하였다. 본 연구로 말미암아 형상기억합금 작동기의 거동을 좀 더 쉽게 이해할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Tanaka, K., A thermomechanical sketch of shape memory effect: One-dimensional tensile behavior, *Res Mechanica*, Vol. 18, pp. 251-263, 1986.
2. Liang, C. and Rogers, C. A., *Finite-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials*, *J. Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 1, pp. 207-234, 1990.
3. Brinson, L. C. and Lammering, R., Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and Their Applications, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 30, No. 23, pp. 3261-3280, 1993.
4. Majima, S., Kodama, K. and Hasegawa, T., *Modeling of Shape Memory Alloy Actuator and Tracking control System with the Model*, *IEEE trans. Control Systems Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 54-59, 2001.
5. Lee, H. J. and Lee, J. J., *A study on the position control of an SMA actuator using time delay control*, *Proc. AROB 8th*, pp. 694-697, 2003.
6. Lee, H. J., *Application of controllers with time delay estimation to an SMA actuator*, KAIST, PhD thesis, 2004.