<학술논문> **DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.8.1083** ISSN 1226-4873

형상기억합금 비틀림 튜브 작동기의 거동 해석§

김 준 형* · 김 철*†
* 경북대학교 기계공학부

Analyses of Behaviors of a Shape-Memory-Alloy Torque Tube Actuator

Jun Hyoung Kim* and Cheol Kim*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received March 17, 2010 ; Revised June 4, 2010 ; Accepted June 8, 2010)

Key Words: SMA Torque Tube(비틀림튜브), Shape Memory Alloy(형상기억합금), Superelasticity(초탄성효과), Shape Memory Effect(형상기억효과)

초록: 형상기억합금은 지능형 재료와 구조물에 널리 쓰인다. 큰 힘과 변위를 발생시키는 것이 특징이며 작동기, 소음 및 진동감쇠, 동역학적 튜닝, 형상의 변형 제어 등의 다양한 분야에 응용될 수 있다. 본 논문에서는 형상기억합금튜브와 초탄성 스프링으로 구성된 형상기억합금 비틀림 작동기를 제안하였고 각각의 거동 특성을 알아보았다. 열전달 해석을 통해 저항열과 히터의 열을 동시에 형상기억합금튜브에 가하면 작동기의 성능을 더 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 접촉 해석으로는 실제 작동기의 거동을 시뮬레이션하였고 정상적으로 작동함을 알 수 있었다. 3 차원 형상기억합금의 거동을 표현하기 위해 비선형 구성방정식을 유한요소법으로 풀고 ABAQUS 의 U-MAT 기능을 이용하여 비선형 해석을 수행하였다.

Abstract: Shape memory alloys (SMAs) are smart materials. The unique characteristics of SMAs enable the production of large force and displacement. Hence, SMAs can be used in many applications such as in actuators and active structural acoustic controllers; the SMAs can also be used for dynamic tuning and shape control. A SMA torque tube actuator consisting of SMA tubes and superelastic springs is proposed, and the behaviors of the actuator are investigated. From the results of heat transfer analysis, it is proved that the SMA torque tube actuator with both resistive heating of SMA itself and a separate conventional heating rod in the tube core has good performance. The behavior of an actuator system was analyzed by performing a contact analysis, and the twisting motion was noticed when checking the actuation. 3D SMA nonlinear constitutive equations were formulated numerically and implemented by performing a nonlinear analysis by using Abaqus UMAT.

1. 서 론

형상기억합금(shape memory alloy: SMA)은 낮은 온도에서 변형이 용이하며 열을 가하면 저온의 형상으로 복원하는 형상기억효과와 상변태 이상의 온도에서 변형과 복원이 동시에 일어나는 초탄성 효과를 가진다. 이중에서도 Ni-Ti 합금은 Nitinol 이라고도 불리며 약 8~10% 의 큰 변형률, 높은 복원력, 뛰어난 피로수명 등의 성질을 가지고 있기 때문에 많은 연구가 진행되었다.

형상기억효과는 형상을 원자 배열로서 기억하기 때문에 발생한다. 이러한 효과는 확산에 의하지 않고 변태하는 합금에서 나타나는데 고온의 모상 원자배열이 저온에서의 변형 후에 기억되고 있다가 고온이 되면 원래의 원자 배열로 돌아가는 것이다. 이 경우 형상 회복과 동시에 큰 힘이 발생하기 때문에 SMA 는 센서로서의 용도만 아니라 기계부품을 작동시키는 액추에이터와 열 엔진으로서 열 에너지를 위치 에너지나 운동 에너지로 변환시키는 곳에도 사용된다.

1 차원 형상의 SMA 도 3 차원적으로 거동하기 때문에 3 차원 구성방적식을 고려하는 것은 해석의 정확도에 큰 영향을 미치며 3 차원 형상일 경우 반드시 3 차원 거동을 고려해야 한다. 3 차원 거동을 나타내기 위해 Reiner 등[1]은 구성방정식의 전 방향 오일러 시간 이산화에 근거한 수치해석을 하였고, Boyd and Lagoudas[2]는 열역학 제 2 법칙을 만족하는 열-기계적인 다항 경화 모델(polynomial

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2010. 3. 4.-5., 서울대) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimchul@knu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

hardening model)을 만들어 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 한편으로는 SMA 의 특성을 이용하여 작동기 및 구조물의 형상 및 진동 제어를 위한 응용연구가 진행되고 있다.

Roh 등[3]은 SMA 띠(strip) 작동기를 이용한 구조물의 형상 변형 제어 가능성을 해석적으로 보여주었으며 Kim 등[4]은 복합재료 보에 SMA 를 삽입하여 굽힘과 비틀림 특성을 해석하였으며 Hill 등[5]은 SMA 작동기를 이용하여 동적 하중이 가해지는 구조물의 진동을 제어하는 연구를 하였다. Reynaertsoh 등[6]은 SMA 를 이용한 로봇의 팔을 연구하였고 Fukuda 등[7]은 얇은 판에 SMA 를 나열하여 만든 작동기로 인위적인 파형을 만들어 물고기 지느러미의 운동을 모사하였다.

본 논문에서는 SMA 의 형상기억효과와 초탄성 효과(superelasticity)의 비틀림 특성을 알아보고 이것을 이용한 작동기의 거동을 연구하였다. 이를 위해 Lagoudas 등[8]과 Bo 등[9]에 의해서 유도된 SMA 의 3 차원 열-기계적 구성방정식을 프로그램화한 후 ABAQUS 의 UMAT 기능과 연계한 유한요소해석을 통하여 SMA 비틀림 작동기에 대해서 연구하였다.

2. 형상기억합금 구성방정식

SMA 의 특성을 구현하기 위해 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다. 이 중 Boyd 와 Lagoudas[2]의 3 차원 구성방정식은 형상기억효과와 초탄성 효과의 거동을 설명 할 수 있고 어떠한 구조물에도 적용할 수 있는 장점이 있다. 변태-경화 거동(transformation-hardening)이 비선형이고 열탄성 응답(thermoelastic response)이 선형이라고 가정하면 SMA 의 총 깁스 자유에너지(total Gibbs free energy)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &G(\sigma_{ij},T,\xi,\varepsilon_{ij}^{t}) = \\ &-\frac{1}{2}\frac{1}{\rho}\sigma_{ij}C_{ijkl}\sigma ij[a_{ij}(T-T_0)+\varepsilon_{ij}{}^{t}] \\ &+k[(T-T_0)-T\ln(\frac{T}{T_0})]-s_0T+u_0+f(\zeta) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, σ_{ij}, $\varepsilon_{ij}{}^{t}$, ξ, T 와 T_0 는 각각 Cauchy 응력 텐서, 변태 변형률 텐서, 마르텐사이트 부피비, 온도와 기준온도이다. C_{ijkl}, a_{ij}, ρ, k, s_0 와 u_0 는 초기상태에서의 유효 컴플라이언스, 유효 열팽창계수, 밀도, 유효 비열, 유효 비 엔트로피와 유효 비내부에너지이고, 함수 $f(\zeta)$ 는 상변태에 의한 변태 경화(hardening)를 설명한다.

Gibbs 의 자유 에너지는 다음의 Legendre 변태에 의해 내부 에너지 u 와 연결된다.

$$u(\sigma_{ij},s,\xi,\varepsilon_{ij}) = G+Ts+\frac{1}{\rho}\sigma_{ij}\varepsilon_{ij} \tag{2}$$

여기서, ε_{ij} 는 전체 변형률 텐서이며, s 는 식 (3a)로 표현되며, Truesdell 과 Noll[10]의 공식에 의해 G 와 u 를 열역학 제 1, 2 법칙에 대입하면 정리하면 다음과 같다.

$$s = \frac{1}{\rho}\sigma_{ij}a_{ij}+k\ \ln(\frac{T}{T_0})+s_0 \tag{3a}$$

$$\varepsilon_{ij} = C_{ijkl}\sigma_{kl}+a_{ij}(T-T_0)+\varepsilon_{ij}^{t} \tag{3b}$$

SMA 의 상변태 중의 모든 변화는 단지 마르텐사이트 부피비의 변화로 발생한다고 가정하면 변형률과 마르텐사이트 부피비의 변화 진행과정은 다음과 같이 연계된다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{t} = \Lambda_{ij}\dot{\xi} \tag{4}$$

여기서, Λ_{ij} 는 변태 변형률의 방향을 결정하는 변태 텐서이며, 문자상의 점은 시간에 대한 미분을 나타낸다.

전체 소산율(dissipation rate)은 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$(\sigma_{ij}\Lambda_{ij}-\rho\frac{\partial G}{\partial \xi})\dot{\xi} = \pi\dot{\xi} \geq 0 \tag{5}$$

여기서, π 는 ξ 와 열역학적인 힘의 공액(conjugate)관계로 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \pi = {} & \sigma_{ij}\Lambda_{ij}+\frac{1}{2}\sigma_{ij}\Delta S_{ijkl}\sigma kl+\Delta a_{ij}\sigma_{ij}\Delta T \\ & +\rho\Delta c[\Delta T-T\ln(\frac{T}{T_0})] \\ & +\rho\Delta s_0T-\frac{\partial f}{\partial \xi}-\rho\Delta u_0 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, Δ 값들은 오스테나이트와 마르텐사이트 상태에서 각각의 값의 차이이다

3. SMA 작동기의 메커니즘

형상기억효과와 초탄성효과를 적절하게 이용하면 2-way SMA 를 사용하지 않고도 작동기를 만들 수 있다. 2-way 작동기는 제어가 어렵고 복원력이

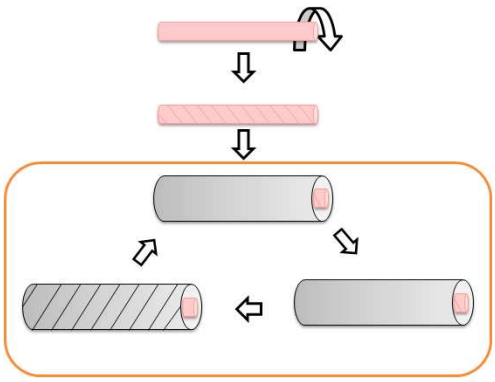

Fig. 1 Principle of a shape memory alloy torque tube actuator

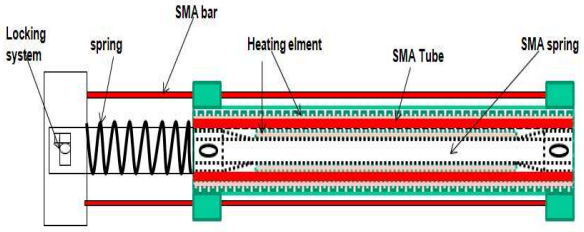

Fig. 2 Schematics of a shape memory alloy torque tube actuator

1-way 보다 작으며 제작이 힘들기 때문에 실제 적용에서는 1-way SMA 가 유리하다. 오스테나이트 상보다 마르텐사이트 상에서는 변형이 더 쉽게 일어난다. Fig. 1 과 같이 SMA 튜브와 그 내부에 SMA 봉(비틀림 스프링역할)이 장착된 구조를 고려하면, 마르텐사이트 상의 튜브는 비틀려 있는 오스테나이트 상의 내부 스프링이 복원되면서 발생되는 토크에 의해서 비틀릴 수 있고, 그 반대로 오스테나이트 상의 튜브가 복원되는 토크는 내부 초탄성 스프링 봉을 비틀 수 있을 만큼 크기 때문에 비틀린 초탄성 스프링을 SMA 튜브와 연결시켜 온도로 제어하면 1-way SMA 로 비틀림 작동기를 개발할 수 있다.

Figs. 1-2 는 작동기의 개념도 및 구성을 보여주고 있다. 또한 비틀린 상태를 계속 유지하려면 지속적인 열의 공급이 필요하기 때문에 자칫 비효율적으로 될 수 있다. 이 점을 해결하기 위해서 Fig. 2 와 같이 SMA 막대(bar), 코일스프링, 홈을 이용하여 비틀림을 잡아두는 잠금 장치를 고안하였다. SMA 는 A_f 이상의 온도(52℃)를 가하면 수축하게 되며 작동기가 비틀리는 동시에 홈에 고정되어 비틀림을 유지하며 온도가 내려가게 되면 스프링의 힘에 의해 홈에서 빠져 나오게 된다.

52℃의 비틀린 초탄성 스프링이 52℃의 온도를 가지는 SMA 튜브와 내부에서 결합되며, 결합 후 튜브의 온도를 M_s (martensitic start temperature) 온도인 18℃ 이하로 냉각시키면, 튜브는 내부 초탄성 스프링의 복원토크에 의해 맞물려서 같이 복원방향으로 비틀린다. 튜브 온도를 18℃에서 52℃ 이상으로 올리면 튜브는 원래의 위치로 회전하며 초탄성 스프링은 맞물려서 다시 비틀리게 된다. 초탄성 스프링은 항상 52℃의 온도를 가지게 되며, SMA 튜브 온도를 M_s 온도 이하와 A_f (austenitic finish temperature)온도 이상으로 제어하며 비틀림 작동기를 동작시킨다.

4. 열전달 해석

SMA 를 이용한 작동기는 오스테나이트 상변태가 시작되는 A_f 이상의 열을 가해야 원래의 형상으로 되돌아가는 복원력을 발생시킬 수 있다. 그래서 SMA 튜브의 열전달은 작동기의 움직임에 큰 영향을 미친다. SMA 비틀림 작동기는 헬리콥터의 로터 블레이드 등에 적용될 수 있는데, 이때 외부의 공기는 0℃ 이하의 온도를 가진다. 튜브 내부의 히터로 A_f 이상으로 가열하여 복원력을 가지게 하고, 외부 공기를 작동기 내로 유입하여 M_s 온도 이하로 낮추어 마르텐사이트 상으로 되돌린다.

SMA 작동기는 Fig. 2 와 같이 하우징(housing), SMA 튜브, 초탄성 토션바, 가열 장치(heating element) 등으로 구성되었다. SMA 튜브 안쪽의 발열 장치는 오직 초탄성 스프링을 A_f 온도 이상으로 유지하기 위해서 사용되기 때문에 SMA 튜브와는 단열이 된다. 하우징과 SMA 튜브 사이의 가열장치는 SMA 튜브를 가열하여 마르텐사이트 상에서 오스테나이트 상으로 상변태를 일으키게 한다. 하우징의 양쪽 부분에서 차가운 공기가 들어오게 만들어 발열장치를 통하여 냉각이 일어나게 하여 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로 상변태를 일으키게 한다.

외경 56mm, 내경 48mm, 길이 600mm 인 튜브를 Fig. 3 과 같이 길이방향으로 100, 반지름방향으로 4, 원주 방향으로 60 등분하여 24,000 개의 요소로 나누었으며, 열전달 요소인 DC3D8(8-node linear heat transfer brick)을 사용하였다. 하우징 안의 SMA 온도는 20℃, 하우징 내부의 온도도 20℃이며 대류 열전달계수는 20W/m^{2}K 이다. 내부의 초

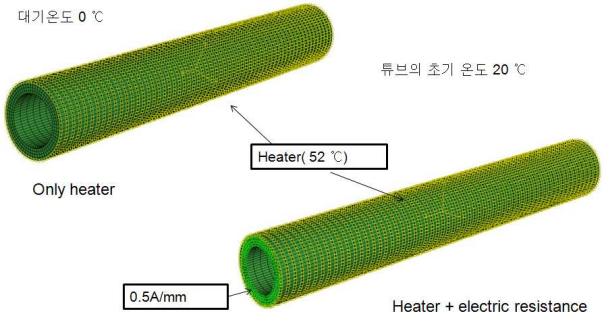

Fig. 3 Finite element model of the shape memory alloy tube for thermal analysis

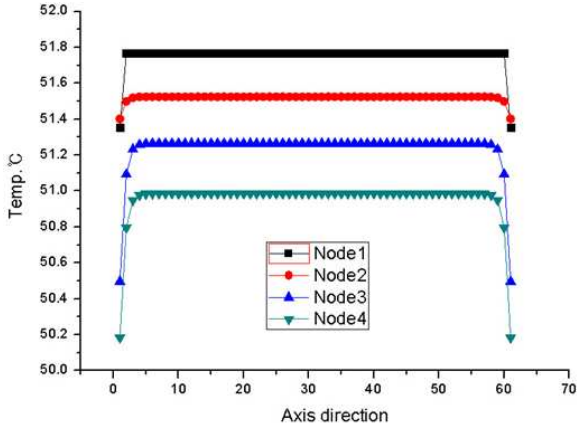

Fig. 4 Temperature distribution in the shape memory alloy tube using a heating device at each node

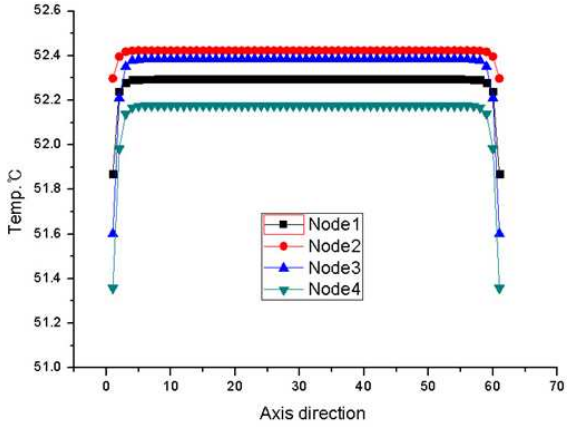

Fig. 5 Temperature distribution in the shape memory alloy tube using a heating device and electric resistance at each node

탄성 스프링과는 단열이 되어있기 때문에 내부에 있는 발열은 고려하지 않았다. Fig. 4 에서 보듯이 튜브 표면이 발열장치와 맞닿아 있기 때문에 표면의 노드에 52℃를 가했다. 대기에 노출되어 있는 양 끝단부는 50.1℃~51.3℃의 온도분포를 가지고, 나머지 부분은 50.9℃~ 51.75℃의 온도를 가진다. 그리고 튜브의 내부는 51.35℃의 온도를 가진다.

Fig. 5 는 별도 히터와 SMA 자체발열을 모두 사용할 때 튜브의 온도분포이다. 대기에 노출되는 양 끝단부는 51.3℃~52.3℃이며 끝단을 제외한 나머지 부분은 52.25℃~52.43℃ 차이를 보이며, 내부 온도 역시 오스테나이트 상변태가 끝나는 52℃를 가지기 때문에 발열장치만으로 가열하는 것보다 튜브 자체의 내부전기저항을 이용한 발열을 동시에 사용하는 것이 특정온도로 가열하는데 유리하다. 내부 전기저항을 고려하기 위해 전기에 의한 발열을 고려할 수 있는 DC3D8E(8-node linear coupled thermal-electrical brick)을 사용하여 위와 같은 개수의 요소로 나누었다. 튜브의 양끝 단에 0.5A/mm 의 전류를 가해주었으며 전류에 의해서 발생한 열은 모두 열로 전환된다는 가정으로 해석을 하였다.

5. 작동기의 비틀림 거동 해석

5.1 SMA 튜브해석

SMA 튜브와 내부의 초탄성 SMA 스프링의 설계는 Fig. 6 에 있으며, Table 1 의 3 가지 경우에 대해 9,000 개의 C3D8I 유한요소로 나누었다. 좌측 끝 단의 1, 2, 3 자유도를 구속하고, 우측 끝 단에 20,000N 을 6 부분에 각각 가하여 토크가 작용할 수 있게 하였다. 초기온도는 0℃ 이며 비틀림에 의한 소성변형이 일어난다. 이후 52℃의 온도를 가하여 원래의 형상으로 돌아오는 형상기억효과를 볼 수 있었다. Fig. 7 과 Table 2 를 보면 각 경우 별 최대 변형각을 알 수 있다. 작동기에 사용될 튜브는 작은 힘에도 큰 소성변형을 하며 열을 가하여 오스테나이트 상으로 변태할 때 큰 복원력을 가져야 효율적으로 사용할 수 있다. 토크의 증가로 소성변형도 증가하지만. 각 경우 별 큰 차이는 없으며 직경-길이 비가 클 수록 소성변형이 작아지며 응력과 복원토크을 고려하여 가장 적절한 모델을 찾는 것이 필요하다.

5.2 초탄성 토션바 거동해석

비틀림거동 시 초탄성 효과를 해석하기 위해 바의 초기온도는 52℃로 설정되었다. 설계 시 양 끝단부는 SMA 튜브와 연결되나, 여기서는 토션바만의 비틀림특성 해석을 위해서 좌측 끝단의 1, 2, 3 번 자유도를 구속하였고, 9,000 개의 C3D8I 요소

Table 1 Sizes of shape memory alloy tubes

	Case1	Case2	Case3
D1 (mm)	48	56	64
C1 (mm)	40	48	56
L1(mm)	600	600	600
Torque (KNmm)	3840	4480	5120

Table 2 Max angles and shear stresses of SMA tubes

	Max. angle (deg)	Max. shear stress (MPa)	Plastic angle (deg)
Case1	32.3	397	15.5
Case2	29	293	15
Case3	26.6	289	14.7

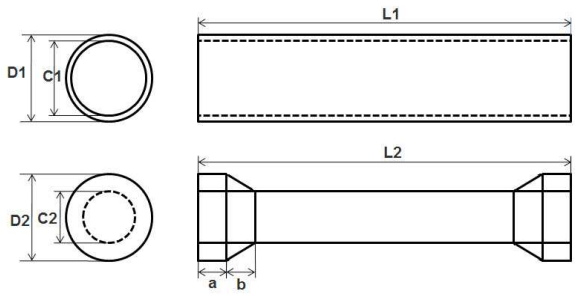

Fig. 6 Drawing of a shape memory alloy tube and a superelastic spring

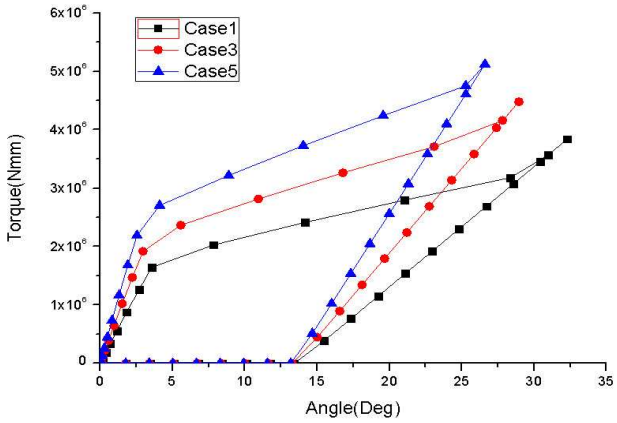

Fig. 7 Torque-Angle curve of shape memory alloy tube

로 모델링하였다. Table 3 에서 보듯이 스프링의 지름이 38mm, 46mm, 54mm 인 경우에 각각 20,000N 을 8 개 및 12 개 부분에 원의 접선방향으로 하중을 가한 두 경우에 대해서 해석하였다. 스프링의 지름이 달라지기 때문에 각각의 경우에 가

Table 3 Sizes of super elastic springs

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
D2(mm)	38	38	46	46	54	54
C2(mm)	24	24	32	32	40	40
L2(mm)	600	600	600	600	600	600
a=b(mm)	30	30	30	30	30	30
Torque (KNmm)	3040	4560	3680	5520	4320	6480

Table 4 Angles and von Mises of each super elastic spring

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Max. angle(deg)	100	142	22	69	12	20
Max. von mises(MPa)	927	1423	450	673	288	417

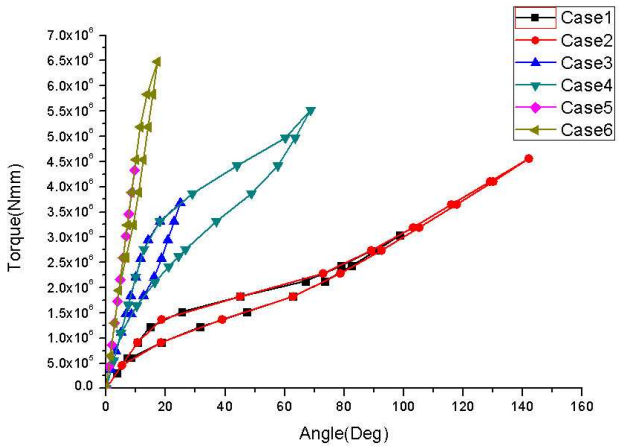

Fig. 8 Torque-angle curve of each superelastic spring

해지는 토크도 변한다.

Fig. 8 과 Table 4 를 보면, 지름-길이 비가 가장 작은 Case 1,2 에서 100° 와 142° 로 가장 큰 변형이 일어났으며 작은 힘에도 변형이 쉽게 일어났다. Case 1,2 는 1.25×10^6 Nmm 보다 큰 토크 이후에서 소성변형을 보였고, Case 3,4 는 3.0×10^6 Nmm 에서 소성영역을 보였다. 지름-길이 비가 큰 Case 5,6 에서는 6.5×10^6 Nmm 를 가했음에도 불구하고 12°, 20° 의 변형만 일어났으며, Case 6 은 5.0×10^6 Nmm 이후 소성영역이 미미하게 나타났으며 특히 Case 5 의 경우는 소성영역이 없는 완전 탄성구간을 나타내었다. Fig. 8 과 Table 4 의 각 경우 별 초탄성 스프링의 최대 변형각과 전단응력을 보면 Case 1, 2, 4 의 경우는 과도한 응력으로 인해 작동기로 적

Table 5 Max. Angles of the SMA torque tube actuator at each step

	Step1	Step2	Step3	Step4
Tube (℃)	52	52	18	52
Spring (℃)	52	52	52	52
Tube (deg)	0	-3.67	-3.6	3.6
Spring (deg)	17.5	13.83	10.23	13.83

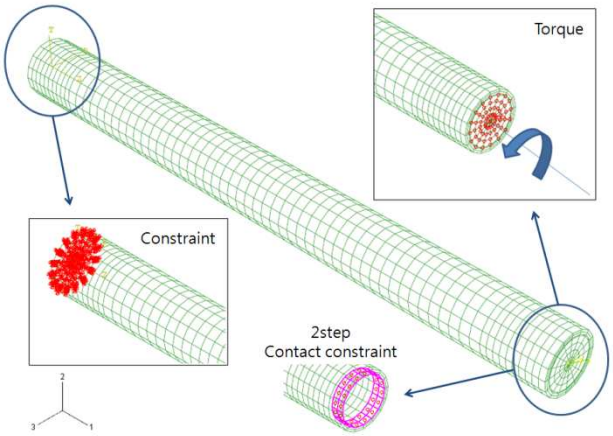

Fig. 9 Finite element model for a coupling analysis

절하지 않음을 알 수 있다.

5.3 SMA 튜브와 토션바 연동해석

앞에서는 SMA 비틀림 작동기를 구성하는 튜브와 초탄성 토션바를 각각의 치수별로 나누어 거동 특성을 확인하였다. 같은 해석기법으로 튜브 Case 2 와 토션바 Case 3 를 연동해석하여 실제 작동기의 거동을 시뮬레이션하였다. 6,528 개의 C3D8I 요소를 사용하여 모델링을 하였으며, 토션바와 튜브의 초기온도는 52℃이고, 해석과정은 4 단계로 구성 되었다.

Step 1 에서는 Fig. 9 와 같이 토션바와 튜브의 끝단 부분이 완전히 구속이 되어있다. 토션바의 구속된 반대편 끝 단면에는 중심축에 대해 반시계 방향으로 1,500 KNmm 의 토크가 가해진다. 초탄성 토션바는 17.5° 만큼 비틀리게 되고, 응력은 토션바의 가운데 부분에서 430MPa 의 최대 응력이 발생하였다.

Step 2 는 토션바가 비틀어진 상태에서 튜브와 토션바가 Fig. 9 와 같이 결합된다. 그리고 가했던 하중을 제거하면 토션바의 탄성 복원에 의해 튜브와 토션바는 결합된 상태에서 같이 -3.67° 비틀리게 된다. 토션바의 비틀림각이 줄었기 때문에 최대 응력은 340MPa 로 낮아진 것을 알 수 있었다.

Step 3 에서는 튜브 온도를 18℃로 냉각하였다. 튜브의 온도가 52℃에서 18℃로 바뀌게 되면 마르텐사이트 상으로 변하기 때문에 같은 토크을 가해도 변형량은 커진다. 즉, 튜브의 온도가 내려감으로써 작동기는 -3.6° 비틀린다.

Step 4 는 튜브의 온도를 52℃로 다시 증가시켰다. 예상대로 작동기는 3.6° 비틀렸다. Table 5 를 보면 알 수 있듯이 Step 3 과 Step 4 를 반복하면 튜브의 최대 비틀림각이 7.27° 이고, 작동각도가 3.6° 인 SMA 비틀림 작동기로 사용 할 수 있다. 작동기는 해석과정 중에 754~900MPa 의 극한인장강도를 초과하지 않고 정상적으로 작동되는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

중심부의 SMA 토션바와 그 외부의 SMA 튜브로 구성된 비틀림 및 토크발생 작동기의 개발을 위해서 유한요소해석을 통하여 거동을 모사하여 작동성을 입증하였다. 이러한 결과는 토크튜브 작동기가 가능함을 입증하는 것이다. 형상기억 및 초탄성 효과에 대해 각각 3 가지, 6 가지 경우에 대해서 비틀림 특성을 알아본 결과 열을 가해줌으로써 원래의 위치로 복원됨을 확인하였다. 바깥 SMA 튜브를 별도의 히터만으로 가열하면 작동온도 52℃에 미치지 못하며, 최고 온도와 최저온도의 차이가 약 2℃가량 나나, SMA 자체 전기저항에 의한 발열을 동시에 고려하면 전체적으로 52℃이상이며 양끝을 제외하면 온도편차는 0.2℃ 밖에 나지 않는 것을 확인하였으므로, SMA 비틀림 작동기를 가동시킬 때 전기저항 발열과 히터 발열을 동시에 사용하는 것이 유리하다.

SMA 비틀림 해석결과, 형상기억효과는 3 가지 경우 모두 13° 가량의 소성변형이 일어났으며, 최대 변형각은 Case 3 이 37° 로 가장 크게 나타났다. 초탄성 효과는 3 가지의 형상과 2 종류의 하중상태로 6 경우를 해석하였으며, Case 1, 2 는 100° 이상의 큰 변형이 일어나고 전단응력이 과도하게 부과된다. Case 3,4 는 22°, 69° 변형각을 갖는다. Case 5,6 은 10°～20° 로 가해진 토크에 비해 변형각이 작은 것을 확인 할 수 있다. 거동해석을 통해서 튜브형 SMA 작동기를 구동시킬 수 있는 가열방법과 적절한 비틀림 형상을 고안함으로서 향후 강력한 경

량의 비틀림 작동기 개발 개념을 제공하였다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0014008)

참고문헌

(1) Reisner, G., Werner, E. A. and Fischer, F. D., 1998, "Micromechanical Modeling of Martensitic Transformation in Random Microstructures," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 19, pp. 2457~2473.

(2) Boyd, J. G. and Lagoudas, D. C., 1996, " A Thermodynamic Constitutive Model for the Shape Memory Alloy Materials, Part I : The Monolithic Shape Memory Alloys," *International Journal of Plasticity* , Vol. 12, pp. 805~842.

(3) Roh, J. H., Han, J. H., Lee, I., 2006, "Nonlinear Finite Element Simulation of Shape Adaptive Structures with SMA Strip Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, pp. 1007~1022.

(4) Kim, C., Park, B., Goo, N. S., 2002, "Shape Changes by Coupled Bending and Twisting of SMA-Embedded Composite Beams," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, pp.519~526.

(5) Hill, J., Roh, J. H., Wang, K. W., 2009, "Position Control of Shape Memory Alloy Actuators with Load and Frequency Dependent Hysteresis Characteristics," *SPIE International symposium Smart Structures and Materials*, 2009

(6) Reynaerts D., Van B. H., 1998, "Design Aspects of Shape Memory Actuators," *Mater Design*, Vol. 23, No. 1, pp.11~19.

(7) Fukuda, T., Hosokai, H., Kikuchi, I., 1991, "Distributed Type of Actuators by Shape Memory Alloy and Its Application to Underwater Mobile Robotic Mechanism," *Proceeding of Robotic Automa*, Vol. 2, pp.1316~1321

(8) Bo, Z. and Lagoudas, D. C., 1999, "Thermo-Mechanical Modeling of Polycrystalline SMAs Under Cyclic Loading, Part I: Theoretical Derivations", *International Journal of Engineering Science,* Vol. 37, pp. 1809~1140.

(9) Bo, Z. and Lagoudas, D. C., 1999, "Thermo-Mechanical Modeling of Polycrystalline SMAs Under Cyclic Loading," Part Ⅲ, *International Journal of Engineering Science,* Vol. 37, pp.1175~1203.

(10) Truesdell, C. and Noll, W., 1965, *The Non-linear Field Theories of Mechanics, Springer* : Berlin