

## DC 서보모터를 이용한 나노튜브 제조용 압축-절단 장치의 토크 안전성에 관한 연구

최갑용<sup>1\*</sup>, 오태일<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>아주자동차대학 자동차계열

### A Study on the Stability of Torque for Compressing-Cutting Device of Nano Tube Manufacturing System Using DC Servo Motor

Kab-Yong Choi<sup>1\*</sup> and Tae-II Oh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Automobile, Ajou Motor College

**요 약** 본 연구는 나노튜브 제조시스템의 주요 구성요소인 압축-절단 장치가 안전한 성능을 발휘할 수 있도록 설계 하는데 목적이 있다. 나노튜브의 제조에 있어서 가장 중요한 핵심기술은 튜브에 나노물질을 주입한 후 압력을 가하여 안전하게 봉합하고 전단분리 하는 것이다. 이 때 작용하는 압력과 속도가 나노튜브의 품질을 결정한다. 본 연구에서는 DC서보모터에 의하여 구동되는 압축-절단 장치의 구동력을 설계하고 이를 바탕으로 시스템을 제작한 후 시제품을 생산하는 과정을 보이고자 한다.

**Abstract** The compressing-cutting device is used for manufacturing nano tube. the purpose of this study is to design and manufacture the compressing-cutting device witch has safety and stable performance. The most important core technology, in nano tube manufacturing, is to seam the each end of tube with appropriate pressure and to cut it off into the two part safely not to leak injected medium. Since the compressing pressure and the cutoff speed make the quality of nano tube, they are very important. This study will show the processes of design and manufacturing of compressing-cutting device.

**Key Words** : DC Servo Motor, Compressing Device, Nano Tube, Pressure, Torque

## 1. 서론

### 1.1 연구개요

컴퓨터를 비롯한 고집적 회로를 갖는 시스템이 작동할 때 발생하는 열을 냉각시키거나 열전소자를 이용한 냉난방시스템의 방열부를 냉각시킬 때는 고성능의 열전달 소자가 필요하다. 이와 같은 필요에 따라 열전달을 효과적으로 할 수 있도록 개발 된 것이 나노튜브이다. 친환경 에너지를 절감 정책의 확대로 나노튜브를 이용한 신제품 개발이 늘어나고 있고 이에 따른 나노튜브의 수요가 날로 증가하는 추세에 있다. 지금까지 우리나라의 나노튜브 공급은 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이로 인하여 납기가 지연되거나 비쌀 뿐만 아니라 다양한 개발제품의

형상이나 크기를 만족시킬 수 없었기 때문에 나노튜브의 국산화에 대한 필요성이 대두되었다. 이러한 필요에 따라 본 연구와 선행연구[1]에서 나노튜브의 제조공법과 제조시스템을 개발하였다. 본 연구는 선행연구에서 제기한 압축-절단 장치의 성능과 안정성 향상을 위한 방법을 제안하고자 한다.

### 1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 나노튜브 제조시스템의 중요한 구성요소인 압축-절단 장치의 구동요소인 DC 서보모터의 토크 안전성을 유지할 수 있도록 시스템을 설계하고 검증하는데 있다. 나노튜브 제조시스템은 경박단소(輕薄短小)의 개념으로 설계되었다. 이와 같은 취지에 따라 압축-절단

본 연구는 한국산업단지공단에서 지원하는 2010년도 생산기술사업화지원사업의 핵심기술개발을 위하여 (주)케이에스비와 아주자동차대학이 산학공동으로 수행되었습니다.

\*교신저자 : 최갑용(kychoi@motor.ac.kr)

접수일 11년 11월 03일

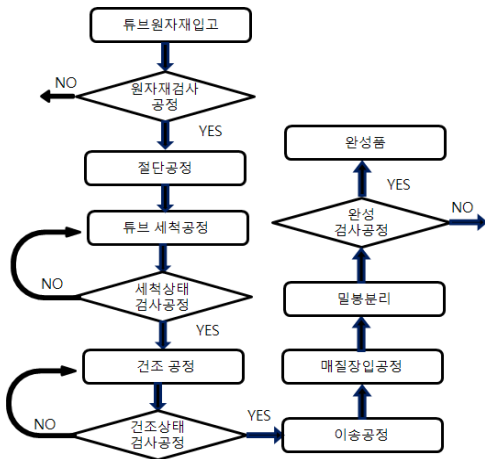
수정일 (1차 11년 11월 17일, 2차 11년 11월 21일)

계재확정일 11년 12월 13일

장치의 구동요소도 최소한 소형 DC 서보모터로 설정하였다. 나노튜브의 압착에는 압력과 진행속도가 동시에 고려되어야 하기 때문에 공압이나 유압을 쓰지 않고 정밀제어가 용이한 서보모터를 채용하였다. 본 연구에서는 토크가 6.5kg·cm DC서보모터를 이용하여 2000kg·cm의 작업토크를 가질 수 있도록 감속기와 증폭링크의 증폭계수를 설계하고 제작한 후 시제품 제작을 통하여 작업력을 검증하고자 한다.

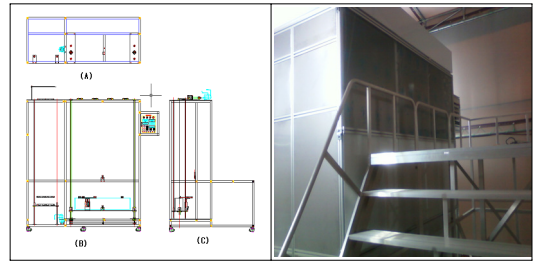
## 2. 나노튜브 제조 시스템의 구성

나노튜브의 제조공정은 그림 1과 같다. 먼저 튜브 원자재가 입고되면 원자재 검사를 실시하고 이어서 제조시스템의 용량에 맞추어 절단이 이루어진다. 절단된 튜브는 검사와 함께 세척을 실시하고 세척이 이루어진 후 건조시킨 다음 검사와 함께 다음 공정으로 넘어간다. 이송된 튜브의 내부에 매질을 투입한 후 규격의 크기에 맞추어 압착과 절단을 동시에 실시한다. 제조기에서 나온 나노튜브는 최종검사를 거쳐서 완성품으로 입고된다.



[그림 1] 나노튜브 제조 공정도  
[Fig. 1] nano tube manufacturing diagram

그림 2는 나노튜브 제조시스템의 설계도와 완성된 사진이다. 나노튜브 제조 시스템은 먼지나 유해한 성분이 제조과정에서 유입되지 않도록 보호할 수 있어야 한다. 이를 위하여 그림 2와 같이 주위 환경으로부터 완전히 차폐시키고 있다. 작업을 위하여 전면에는 슬라이딩 커버를 설치하였으며 매질의 주입 시 일정한 온도를 유지할 수 있도록 온도제어 장치가 설치되어 있다.[2]



[그림 2] 나노튜브 제조시스템  
[Fig. 2] nano tube manufacturing system

## 3. 압축-절단 장치 설계

### 3.1 압축-절단 장치의 작동원리

압축-절단 장치는 나노튜브의 품질을 결정짓는 나노튜브 제조시스템의 가장 중요한 구성요소이다. 본 장치는 생산성을 고려하여 하나의 시스템에 4개 조를 배치하였다. 본 장치는 서보모터를 이용하여 압력과 전단력을 제어하고 있는 것이 하나의 특징이다. 압축-절단 장치는 직선 구동을 해야 하기 때문에 모터의 회전운동을 직선운동으로 바꿔야 한다. 이를 위하여 볼스크류와 너트를 이용하였다. 원동 축과 볼스크류는 플렉시블 커플링으로 연결되어 있으며 볼스크류와 결합된 너트에 의하여 압축금형과 전단 날은 스크류의 회전방향에 따라 전후로 직선운동을 하면서 이 때 발생하는 추력을 이용하여 작업이 이루어진다.

### 3.2 토크와 추력을 이용한 용량설계[3][4]

선행연구를 통하여 구한 모터의 사양과 작업토크는 표 1, 표 2와 같다. 표에서 보는 바와 같이 순수한 모터의 토크만으로는 필요하고도 충분한 작업력을 얻을 수가 없다는 것을 알 수 있다.

[표 1] 제품모델별 작업토크의 범위  
[Table 1] Torque range of models

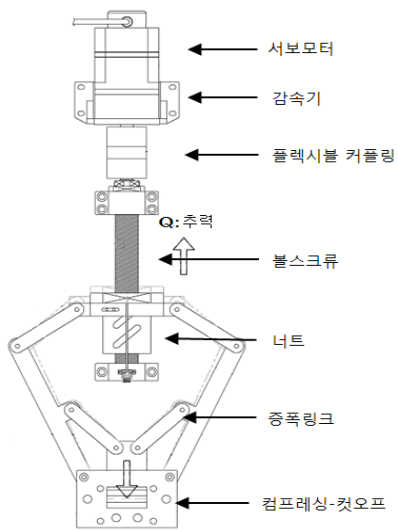
모델명	폭 [mm]	두께 [mm]	작업토크 ( $T_W$ ) [kg·cm]
KSB_NT_2020A	20	2.0T	1000~1200
KSB_NT_2540A	40	2.5T	1200~1400
KSB_NT_2550A	50	2.5T	1400~1600
KSB_NT_3040A	40	3.0T	1600~1800
KSB_NT_3050A	50	3.0T	1800~2000

[표 2] 모터 사양

[Table 2] Specification of motor

내용	용량
정격 출력(연속)[W]	200
정격 회전수[rpm]	3000
정격 토크 $T_1$ [N·m(kgf·cm)]	0.65(6.5)
순간최대 토크 [N·m(kgf·cm)]	1.3(13)

이와 같은 문제점을 해결하는 것이 본 연구의 주된 목적이다. 여기에서 본 연구는 그림 3과 같은 감속기와 증폭링크를 이용한 추력의 확대방안을 제안하고 이를 달성할 수 있는 설계 데이터를 구하는 과정을 보이고자 한다. 그림 3은 서보모터의 회전력  $T_1$ 이 감속기, 볼스크류, 증폭링크를 거쳐서 압축-절단에 직선운동의 작업력으로 전달되는 과정을 보여주고 있다. 감속기는 모터와 일체형으로 조립할 수 있는 기성품을 사용하였고 최대감속비 1/100을 선택하였다. 감속기만으로는 충분한 직업력을 확보할 수 없기 때문에 증폭링크를 추가하였다. 증폭링크는 작업력을 확대하는 것뿐만 아니라 제조공정상의 압착금형과 전달 날의 운동학적인 측면도 동시에 고려해서 설계해야 되는 사항으로 매우 중요한 의미를 갖는다.



[그림 3] 압축-절단 구조

[Fig. 3] Structure of compressing-cutting

본 연구에서는 모터의 회전력인 토크  $T$ 와 볼스크류에 작용하는 추력  $Q$ 의 관계를 해석하기 위하여 식(1)을 이용하여 해석하기로 하였다.

$$T = P \times \frac{d_2}{2} = Q \times \frac{d_2}{2} \times \frac{p + \mu \pi d_2}{\pi d_2 - \mu p} \quad (1)$$

여기에서  $P$  : 스크류의 유효지름에서 나선각을 따라 축직각 방향으로 작용하는 힘.  $p$  : 스크류의 피치,  $d_2$  : 나선의 유효지름,  $\mu$  : 마찰계수 이고  $\pi$  : 원주율 이다.

먼저 모터의 토크  $T_1$ 이 증폭계수  $R$ 인 감속기를 통과하여 만드는 추력  $Q_R$ 을 구하기 위하여 식(1)을 식(2)와 같이 정리하였다.

$$Q_R = R \times \frac{2(\pi d_2 - \mu p)}{d_2(p + \mu \pi d_2)} T_1 \quad (2)$$

증폭계수  $R$ 은 감속비의 역수이기 때문에 100으로 하였다.

식(2)에 적용할 볼스크류에 대한 파라미터의 값들은 표 3과 같고 이들을 대입하여 구한 추력  $Q_R$ 과 이에 대한 새로운 작업토크  $T_R$ 에 대한 계산 결과는 표 4와 같다.

[표 3] 볼스크류 파라미터의 값

[Table 3] Parameter of ball screw

파라미터	설정값
$p$	1.0[cm]
$d_2$	2.96[cm]
$\mu$	0.01

[표 4] 감속기를 통과한 작업토크  $T_R$

[Table 4] Working torque  $T_R$  of reducer

추력 $[Q_R]$	작업토크 $[T_R]$
3730.848[kgf]	650[kgf·cm]

표 1의 작업토크  $T_W$ 의 최대값은 2000[kgf·cm]로 조사되었다. 그러나 감속기를 통과한 작업토크는 표 4에서 보는 바와 같이 650[kgf·cm]에 불과하기 때문에 본 연구에서는 증폭링크에 의한 작업토크 확대를 제안하였다. 증폭링크의 증폭비를 구하기 위하여 지금까지의 결과를 분석해 보면 최소한 표 4의 결과 보다는 3배 이상 확대해야 된다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 3.5배로 확대할 수 있도록 증폭링크를 설계하였다. 본 연구는 증폭링크를 통과한 추력  $Q_L$ 을 알아보기 위하여 식(2)를 식(3)과 같이 정리하였다.

$$Q_L = R \times L \times \frac{2(\pi d_2 - \mu p)}{d_2(p + \mu \pi d_2)} T_1 \quad (3)$$

식(3)에서  $L$ 는 증폭링크의 링크증폭계수이다. 본 연구에서는 증폭계수를 3.5로 하였다. 추력  $Q_L$ 과 새로운 최종 작업토크  $T_L$ 의 계산결과는 표 5와 같다.

[표 5] 증폭링크를 통과한 작업토크  $T_L$   
[Table 5] Working torque  $T_L$  of link amplifier

추력 [ $Q_L$ ]	작업토크 [ $T_L$ ]
13057.97[kgr]	2275[kgr·cm]

## 4. 압축-절단 장치의 제작과 시작품 생산

### 4.1 장치의 제작과 시작품 생산

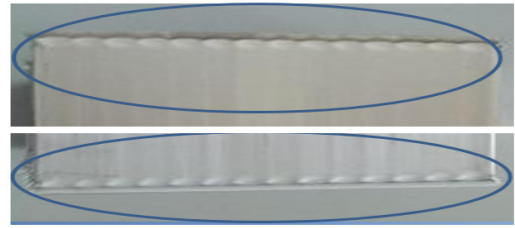
지금까지의 연구결과를 토대로 그림 4와 같이 압축-절단 장치를 제작하였다. 그리고 이를 이용하여 생산한 나노튜브의 시작품은 그림 5와 같고 그림 6은 컷오프 부분의 완성된 양 끝단을 보여주고 있다.



[그림 4] 압축-절단 장치  
[Fig. 4] Compressing-cutting device



[그림 5] 나노튜브 시작품  
[Fig. 5] nano tube by trial manufacturing



[그림 6] 나노튜브의 컷오프 부분  
[Fig. 6] Details of cutoff part

### 4.2 압축-절단 장치의 제작과 시제품 제조에 대한 고찰

증폭링크를 통과한 압축-절단의 작업토크는 표 5에서 보는 바와 같이 2275[kgr·cm]로 목표인 2000[kgr·cm]를 충족하게 되었다. 본 연구의 설계결과를 이용하여 그림 4와 같이 압축-절단 장치를 제작하고 그림 5와 같이 나노튜브를 시험 생산하였다. 그림 6의 원은 컷오프된 부분이다. 양호한 결과를 얻을 수 있었으며 업체로부터 성공적이라는 평가를 받았다. 다만 아쉬운 것은 우리나라에서는 아직도 나노튜브제조에 대한 역사가 일천하기 때문에 품질검사에 대한 방법이나 기준이 마련되어 있지 않아서 본 연구를 통하여 개발한 시스템에서 생산한 제품의 품질을 수입된 기성제품과 비교한 객관적인 자료를 제시하지 못했다는 다는 것이다. 나노튜브 제조시스템은 선행연구의 나노튜브 제조 공정과 제조시스템 설계 제작에 이어서 본 연구에서 가장 중요한 핵심구성품인 압축-절단 장치에 대한 연구가 마무리됨으로써 명실상부한 전체시스템에 대한 연구개발이 완성되었다고 할 수 있다. 앞으로 검사방법과 기준을 마련하는 것도 중요한 과제로 제시한다.

## 5. 결론

본 연구는 나노튜브 제조시스템요소인 압축-절단 장치의 작업토크를 설계하고 이를 바탕으로 압축-절단 장치를 제작한 후 시작품 생산을 통하여 실용성을 입증하였다. 본 연구의 진행과정과 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 나노튜브 제조시스템의 공정 흐름과 시스템의 구조와 기능에 대하여 연구하였다.
2. 서보모터 제어의 필요성, 압축-절단 장치의 직선구동용 방법, 축이음 등의 압축-절단 장치의 작동원리에 대하여 연구하였다.
3. 토크와 추력을 해석하기 위한 수식을 도입하고 각종 구동요소의 파라미터에 대하여 연구하였다.

4. 제품의 모델의 크기에 따라 작업토크를 구하고 압축-절단 장치를 설계하였다. 작업토크의 크기는 목표치 2000[kg·cm]을 충족하였다.

5. 설계결과를 토대로 압축-절단 장치를 제작하고 시제품 제조결과 성공적인 평가를 얻었다.

나노튜브의 국산화를 위한 제조 기술의 개발이 시급한 실정이다. 본 연구는 이와 같은 필요성에 부응하기 위하여 이루어졌다. 본 연구가 나노튜브 개발전에 기여할 수 있기를 바라며 연구보고를 마친다.

### References

[1] Kab-Yong Choi, "A study on the Development of the Console with LCD Panel for Exterior Advertizing", The Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 11, No. 1, pp. 13-20, 2010.

[2] Tae-II Oh, "A study on the Controller Design of Cooling System for LCD Panel Console", The Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 11, No. 10, pp. 3666-3672, 2010.

[3] J. L. Meriam, "Statics and Dynamics", Twor Press, pp. 250-270, 2000.

[4] Higdon, "Engineering Mechanics", Prentice Hall, pp. 180-220, 2005.

오 태 일(Tae-II Oh)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 대학원 기계과 졸업(공학석사)
- 2002년 3월 : 서울대학교 대학원 기계과 (공학박사 수료)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 아주자동차대학 자동차계열 교수(자동차 진단제어전공)

<관심분야>

자동차진동소음, 부품설계

최 갑 용(Kab-Yong Choi)

[정회원]



- 1989년 2월 : 숭실대학교 중소기업대학원 졸업(공학석사)
- 1996년 8월 : 숭실대학교 대학원 졸업(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 아주자동차대학 자동차계열 교수(자동차 개발전공, 금형전공)

<관심분야>

시스템 설계/제어, CAD/CAM/CAE