

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-AB.2010.34.2.227

동일신축 텔레스코픽모션을 갖는 천정이동장치 설계

윤광호* · 이효직**† · 이종광** · 박병석** · 김기호**

* 한국기계연구원, ** 한국원자력연구원

Design of Bridge Transport System with Equal Incremental Telescopic Motion

Kwang Ho Yoon*, Hyo Jik Lee**†, Jong Kwang Lee**, Byung Suk Park** and Kiho Kim**

* Korea Institute of Machinery and Materials

** Korea Atomic Energy Research Institute

(Received June 9, 2009 ; Revised December 21, 2009 ; Accepted December 22, 2009)

Key Words: Bridge Transport System(천정이동장치), Telescopic Tube(텔레스코픽 튜브), PRIDE(파이로 프로세서 목업시설), Nonlinear Programming Problem(비선형계획법), BDSM(천정이동 양팔서보조작기)

초록: 본 논문은 방사성시설에서 원격취급 작업을 위해 사용되는 서보조작기와 같은 장비의 이송을 위해 개발된 텔레스코픽 튜브를 갖는 천정이동장치의 설계에 관해 소개한다. 천정이동장치는 z-방향으로 신장, 수축이 가능한 텔레스코픽 튜브, 전력 및 신호 케이블의 관리를 위한 케이블 시스템, 횡행 움직임과 서보구동부 모듈 수납을 위한 트롤리 시스템으로 이루어져 있다. 천정이동장치의 작업환경은 설계에 기하학적인 제약을 주게 되는데, 시설의 높이가 낮고 텔레스코픽 튜브의 수축시 길이가 짧아야하며 스트로크는 커야한다는 요구사항을 갖는다. 텔레스코픽 튜브 어셈블리는 위 제약조건을 만족하도록 비선형계획법을 풀어 최적의 치수를 선정하였다. 텔레스코픽 모션으로 발생하는 케이블 길이의 변화를 수용할 수 있는 케이블 시스템을 소개하였고, 또한 천정이동장치 시스템의 충분한 구동을 위한 서보구동부의 선택지침을 소개하였다.

Abstract: This paper introduces the design of a bridge transport system with a telescopic tube for positioning equipment to perform remote handling tasks in a radioactive facility. It consists of an extensible and retractable telescopic tube assembly for z-direction motion, a cabling system for management of power and signal cables, and a trolley system for transverse motion and accommodating servo drives. The working environment for the bridge transport system with the telescopic tube requires strict geometrical constraints, including a short height, short telescopic tube length when retracted, and a long stroke. These constraints were met by solving a nonlinear programming problem involving the optimal dimensions. This paper introduces a cabling system for effective management of cables with changeable lengths to accommodate telescopic motions and a selection guide for servo drives that are sufficient to drive the system.

1. 서론

현재 사용후핵연료는 콘크리트 용기에 담겨 발전소 내의 임시 저장 수조에 보관되고 있으나, 머지않은 미래에 그 저장 한계에 도달할 것이 예상된다. 따라서 사용후핵연료의 처분 및 향후 고속로(fast reactor)와 연계한 사용후핵연료의 재활용에 관한 연구의 중요성이 대두되고 있다. 우리나라에서는 사용후핵연료의 처분 및 재활용이라는 두 가지 옵션을 모두 만족할 수 있는 기술로

서 건식처리 기술인 파이로프로세스(pyroprocess) 기술에 주목하고 있다. 파이로프로세스는 사용후핵연료의 해체/절단 및 탈피복/분말화를 수행하는 전처리 공정, 전기화학적 방법을 이용하여 산화물 사용후핵연료를 금속으로 전환시키면서, 고발열성 핵종(Cs, Sr)을 반응매질인 용융염(molten salt)에 녹여내어 제거하는 전해환원(electrolytic reduction) 공정, 전기화학적 방법을 이용하여 전환된 금속을 용융염에 넣어 순도가 높은 우라늄을 석출시키고, 나머지 핵분열생성물은 용융염에 잔류시키는 전해정련(electro-refining)공정, 용융염에 남아 있는 초우란(transuranic)핵종 등의 악티늄

† Corresponding Author, hyojik@kaeri.re.kr

족 원소들을 고속로 연료로 재사용하기 위해 액체 카드뮴 음극을 사용하여 회수하는 전해제련(electro-winning) 공정, 전해환원 및 전해제련 공정에 사용되는 LiCl 용융염 및 LiCl+KCl 공용융염(eutectic salt) 내에 누적되는 불필요한 핵종들(Cs, Sr 등의 희토류 핵종)이 포함된 폐용융염을 재사용하기 위한 염재생 등으로 이루어진다. 이러한 파이로프로세스 기술을 종합적으로 실현하기 위해서는 핫셀(hot-cell) 구축, 운전/유지보수를 위한 원격 취급, 폐기물의 운반/저장, 핵비확산성 파이로 기술의 핵투명성 확보를 위한 안전조치 기술 등을 아우르는 시스템공학기술이 뒷받침되어야 한다. 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)에서는 파이로프로세스 기술을 종합적으로 평가하기 위한 목업(Mock-up) 시설인 PRIDE (Pyroprocess Integrated Inactive Demonstration Facility)를 건설할 예정이다. 이 시설은 알곤(Argon) 셀로 구성되는데, 원격운전 및 유지보수 작업을 위하여 다수의 원격조작기가 요구된다. 공정장치가 배열되어 있는 핫셀 안쪽으로는 작업자가 직접 접근할 수 없으므로 모든 운전 및 유지보수 작업들이 원격으로 수행되어야 한다.

원격 운전 및 유지보수 작업을 위하여 PRIDE 시설 안에는 천정이동 양팔서보조작기(BDSM: Bridge transported Dual arm Servo Manipulator)와 벽부착형 마스터-슬레이브 조작기, 이동장치 및 크레인 등을 설치할 예정이다. 전체 시스템 중에서 천정이동양팔조작기는 거의 완료가 되어 있고, 현재 천정이동양팔조작기 시스템을 부착하여 셀 안에서 수직(z-축), 폭방향(y-축), 길이방향(x-축)으로 이동할 수 있는 천정이동장치가 개발 중에 있다. 이 시스템은 크기는 텔레스코픽 튜브와

케이블 관리시스템 그리고 트롤리 시스템으로 나뉜다. 텔레스코픽 튜브는 천정이동양팔조작기가 핫셀바닥까지 닿을 수 있을 만큼 신장해야 하며, 공정장치의 상부를 조작할 수 있을 만큼 수축이 가능해야 한다. 텔레스코픽 튜브 설계시 중요한 요소는 튜브가 최대 신장시에 흔들림이 최소화되는 구조이어야 하며, 벽부착형 마스터-슬레이브가 접근할 수 없는 사각지역을 접근할 수 있어야 한다. 그리고 일부 모듈에 대하여 원격 유지보수가 가능한 설계가 필요하다.

본 논문에서는 PRIDE 내에서 원격운전 작업을 지원하기 위해 개발된 동일신축 텔레스코픽모션을 갖는 천정이동장치의 설계에 대해 소개한다. 2장에서는 향후 천정이동장치가 설치될 PRIDE에 대하여 소개하였고, 3장에서는 비선형계획법(Nonlinear programming problem)을 이용한 텔레스코픽 튜브의 최적설계방안에 대해 논하였다. 4장에서는 케이블 관리 시스템에 대하여 서술하였으며, 5장에서는 트롤리시스템에 장착되는 z축 권양 및 y축 횡행 모터 및 감속기 선정절차에 대하여 소개하였다.

2. PRIDE 소개

Fig. 1은 PRIDE의 개념도이다. PRIDE는 세계 최초의 대규모 알곤 분위기 파이로프로세스 일관 공정 실증시설이며, 셀 체원은 40 m(L) x 4.8 m(W) x 6.3 m(H)이다. PRIDE 내에서 공학규모로 파이로프로세스 일관공정을 수행하기 위해서는 범용 원격운전 조작기가 필요하다. KAERI에서는 2007 년도부터 PRIDE를 위한 천정이동 서보식 조작기를 독자적으로 개발하고 있으며, 2009년 현재는 조작기 부분은 개발이 거의 완료되었으

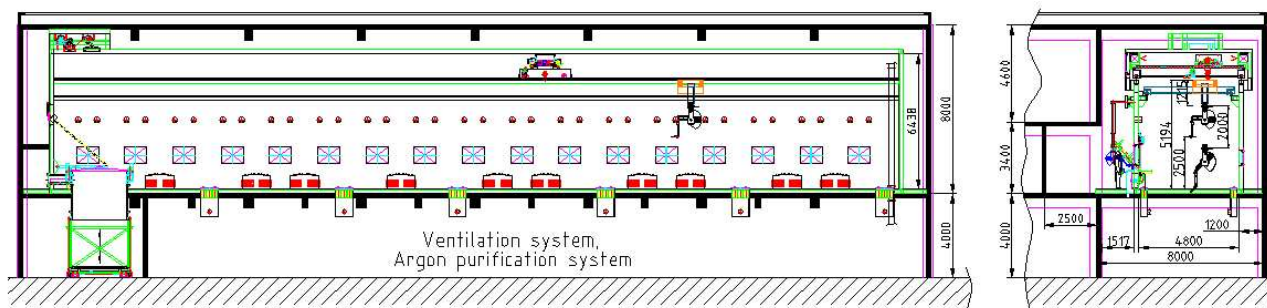


Fig. 1 Conceptual design of the PRIDE

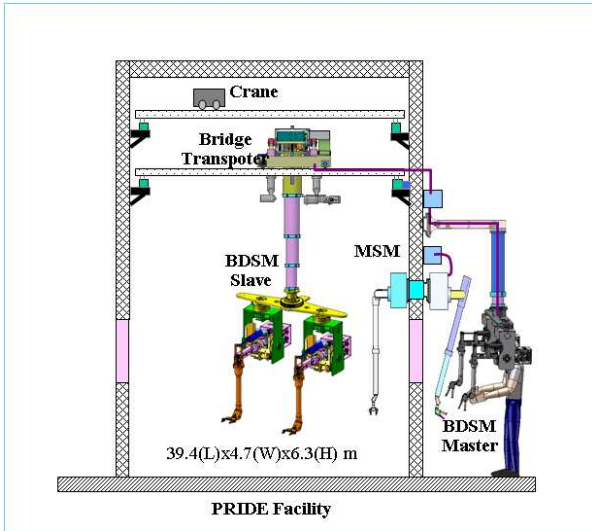


Fig. 2 Concept of the remote operation and maintenance system in argon cell of the PRIDE

며, 천정이동장치부분을 제작 중에 있다. Fig. 2는 PRIDE에서 원격취급 시스템의 개념도를 보여준다. 셀 한쪽면로 벽면 부착형 조작기(MSM: Master Slave Manipulator)가 배치되어 있고, MSM 사각지역의 원격작업과 물질이송을 위하여 천정 이동 양팔서보조작기(BDSM: Bridge transported Dual arm Servo Manipulator)와 이동장치, 크레인 등이 설치될 예정이다.

3. 설계 조건 및 최적화 설계

3.1 설계 사양들

Fig. 1의 PRIDE 개념설계도에서 보는 바와 같이 셀 내부에는 파이로프로세스 일관공정에 필요한 장치들이 일렬로 설치될 예정이고, 원활한 원격작업을 위하여 각 장치들의 최대 높이를 2,500 mm으로 제한하고 있다. 따라서 텔레스코픽 튜브의 스트로크(stroke)는 BDSM의 그리퍼가 특정 자세에서 핫셀 바닥에 닿았을 수 있어야하며, 또한 최대 공정장치 높이인 2,500 mm에 그리퍼가 접근할 수 있어야 한다. Fig. 1의 측면도와 같이 텔레스코픽 튜브가 최대 신장하여 BDSM이 기본자세로부터 어깨부가 -45° , 팔꿈치가 $+45^\circ$ 움직여 그리퍼가 바닥에 닿을 수 있어야 하며, 최대 수축시에는 기본자세에서 그리퍼가 바닥으로부터 2,500 mm 떨어져 있어야 한다고 제한하였다. 결

국 텔레스코픽 튜브의 스트로크의 길이는 2,000 mm가 되도록 설계하여야 위 제한조건을 만족한다. 또한 바닥으로부터 크레인 호이스트까지 높이가 5,194 mm이며 수축된 텔레스코픽 튜브와 트롤리를 합한 높이가 고장시 인양을 위해 1,598 mm보다 작게 설계되어야 한다. 텔레스코픽 튜브의 구동 체인(chain)은 약 1,000 kg의 하중(양팔 조작기 및 부하하중 동작튜브 하중)을 견디도록 설계한다. 또한 튜브의 최대 신장시 베어링 등의 유격에 의하여 발생하는 흔들림은 끝단에서 최소가 되도록 설계한다.

3.2 텔레스코픽의 신장 수축의 원리

KAERI의 ACPF(Advanced spent fuel Conditioning Process Facility)에 설치된 천정이동서보조작기^(1,2)의 텔레스코픽 튜브와 텔레스코픽 튜브를 갖는 천정 이동장치를 상용화한 PaR Systems Inc.의 텔레스코픽 튜브의 작동원리를 살펴보면 KAERI는 신장시 위쪽 튜브부터 수축시 아래쪽 튜브부터 인접튜브와의 상대 변위가 단계적으로 발생하는 다단 신축원리를 PaR Systems Inc.는 인접한 튜브와 상대 변위가 항상 동일한 동일신축 원리를 채택하고 있다. 다단 신축원리는 동일신축 원리에 비해 단순하지만, 텔레스코픽 움직임의 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 설계에서는 동일신축 원리를 채택하였다. 그러나 PaR Systems Inc.의 텔레스코픽 튜브에 적용된 동일신축 원리에 비해 구조를 단순화하였고 원형튜브를 사용하여 구조적 강성을 크게 향상시켰다.

Fig. 3은 텔레스코픽의 신장 수축의 원리를 개념적으로 나타낸다. Fig. 3에서 최상단을 1단이라고 하고, 그 아랫단을 순서대로 2, 3, 4, 5단이라고 한다. 체인은 체인 스프로켓(sprocket)이 부착된 바로 전 단과 다음 단을 연결시켜준다. 스프로켓을 기준으로 왼쪽 체인의 길이변화와 오른쪽 체인의 길이 변화의 합이 0이라는 진리하에 다음 식 (1)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} -x_1 + (x_2 - x_1) &= 0 & (1) \\ -(x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) &= 0 \\ -(x_3 - x_2) + (x_4 - x_3) &= 0 \end{aligned}$$

식 (2)는 식 (1)을 x_1 에 관해 풀 것으로 절대변위를 나타낸다. 텔레스코픽 튜브의 3단은 2단에 비해 2배, 4단은 3배, 5단은 4배를 더 움직였음을 말해준다.

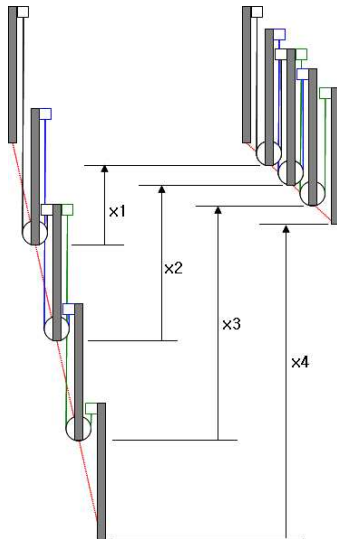


Fig. 3 Principles of the equal incremental retraction and extension

$$\begin{aligned} x_2 &= 2x_1 \\ x_3 &= 3x_1 \\ x_4 &= 4x_1 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (3)은 인접한 튜브끼리의 상대변위에 대한 결과로서 상대변위는 모두 동일함을 알 수 있다.

$$(x_2 - x_1) = (x_3 - x_2) = (x_4 - x_3) = x_1 \quad (3)$$

3.3 텔레스코픽 튜브의 단 최적화

텔레스코픽 단 수를 결정하는데는 여러 가지 고려해야할 사항들이 있다. 튜브의 단수가 많아지면 튜브와 튜브가 겹치는 부분이 늘어남으로써 최대 신장시 하단에서의 흔들림이 작아서 좋은 이점이 있고, 대신에 부품들이 늘어나서 고장의 범위가 확대되고 무거운 하중으로 인해 지지하는 체인의 굽기가 커져 동일신축 원리로 텔레스코픽 튜브 구성시 전체적인 크기가 커지게 되는 단점이 있다. 반면 튜브의 단수가 적어지게 되면 고장확률이 줄고, 무게가 적은 이점이 있으나, 튜브의 스트로크를 원하는 만큼 얻을 수 없으며, 원하는 스트로크를 내려면 고정튜브의 길이가 길어지고 중첩길이가 짧아져 최대 신장시 흔들림이 발생할 가능성이 높다.

그래서 본 논문에서는 튜브의 길이와 단수를 체계적으로 결정하기 위하여 비선형계획법(nonlinear programming problem)^(3,4)을 사용하였다. 매개변수로

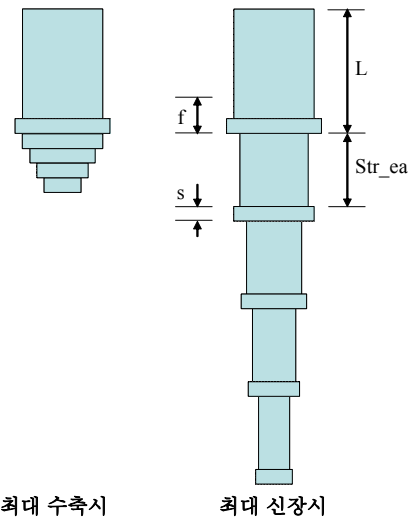


Fig. 4 The configuration of a telescopic tube

최대 신장시 중첩길이(folded length)와 멈춤장치(stopper) 길이만을 사용하였다. Fig. 4는 텔레스코픽 튜브의 구성을 나타내며, L 은 멈춤장치를 포함한 튜브의 길이, s 는 멈춤장치의 높이, f 는 최대신장시 중첩길이를 나타낸다. 이 때 목적함수를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고 제약조건을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 식 (5)를 만족하면서 목적함수를 최소화하는 튜브길이와, 개수를 찾는 비선형계획법 문제이다.

$$obj. ftn. = |stroke - 2,000| \quad (4)$$

여기서

$$stroke = \text{신장길이} - \text{수축길이}$$

$$\text{신장길이} = L + (L - f)(N - 1)$$

$$\text{수축길이} = L + s(N - 1)$$

이다.

$$\text{수축길이} \leq 1,598$$

$$N = \text{정수} \quad (5)$$

다양한 매개변수에 대해 식 (4)의 목적함수를 최소화하도록 하는 비선형계획법 문제를 풀기 위하여 EXCEL의 솔버(solver) 기능을 이용하였으며 Table 1에 몇 가지 매개변수에 대한 대표적인 해를 정리하여 나타내었다.

실제 텔레스코픽 튜브 설계에서는 고정장치에 니들롤러베어링(needle roller bearing)이 같이 결합된 형태로서 베어링의 크기에 맞추어 멈춤장치(s)

Table 1 The optimal solution (EXCEL Solver) of 5, 6 tube set

	5단 튜브 (N=5)		6단 튜브 (N=6)	
	f=220	f=270	f=220	f=270
튜브길이(L)	759	809	659	709
f/L	0.29	0.33	0.33	0.38
f/Str_ea	0.44	0.54	0.55	0.67
Str_ea	500	500	400	400
최대수축시길이	915	965	854	904
최대신장시길이	2,915	2,965	2,854	2,904

s=39 mm, 스트로크=2,000 mm 일 때

를 39 mm로 설계하였으며, 위 Table 1의 결과를 참고하여 중첩길이의 비율(f/L)을 36% 정도로 설계하였다. 튜브의 길이는 아래쪽 단으로 갈수록 약간씩 짧게 설계하였다. 총 튜브 개수는 최대수축시 전체 길이에서 짧아 유리한 6단 튜브로 설계하였다. 독일 WÄLISCHMILLER사⁽⁶⁾의 제품은 중첩길이 비율을 50%로 하여 흔들림을 매우 적게 구성하였으나 최대 수축시 튜브셋의 길이가 매우 길다. 중첩길이 비율을 50%로 할 경우 목표 스트로크를 맞추기 위해 7 단 이상의 튜브를 사용해야하며 이는 무게증가로 인해 서보모터의 용량을 높여 설계해야하는 부담을 주게 된다.

3.4 텔레스코픽 튜브설계

현재 원자력 기반 시설에 사용되는 텔레스코픽 (ACPF, PaR Systems Inc.) 튜브의 구조는 신장이자중에 의하여 동작하는 구조이며, 수축은 동력에 의하여 작동된다. Fig. 5는 ACPF에 설치된 텔레스코픽 구조를 보여준다. 텔레스코픽 튜브는 원형이며, 체인을 권양하여 튜브를 수축시키며, 원형타입이므로 원주 방향으로 회전이 일어날 수 있기 때문에 단마다 키를 넣어 회전을 방지 하였으며, 니들롤러베어링을 사용하여 텔레스코픽 모션을 가이드 하도록 하였다. 다만 신축원리를 채택하였고, 텐션롤러 커버 나사를 이용하여 니들롤러베어링과 튜브와의 간격을 조절할 수 있도록 설계되었다.

PaR Systems Inc.의 튜브⁽⁶⁻⁸⁾는 사각 또는 U자 모양의 형태이며, 동일 신장 및 수축을 할 수 있는 도르래 원리를 가졌다. Fig. 7(b)에서 보듯이

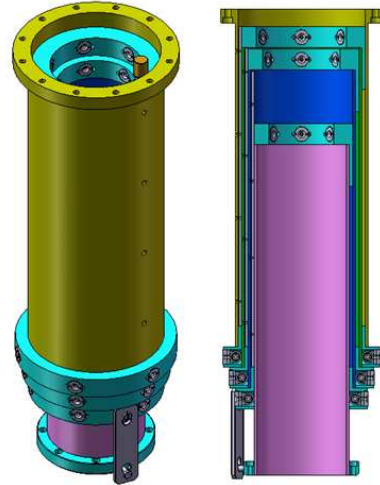


Fig. 5 The structure of the telescopic tube installed in the ACPF

한 개의 튜브에 상하 두 개의 도르래가 부착되어 있고, 각 도르래는 상단과 아랫단을 잇는다. 튜브의 한쪽 면은 두꺼운 판(plate)으로 LM 가이드를 부착하여 텔레스코픽 모션을 가이드하고, 정밀한 상하운동을 할 수 있도록 설계되었다. 튜브에서 두꺼운 판 이외의 다른 면은 두꺼운 판과는 다른 재질의 U자 모양 커버를 씌워 구조적 강성을 보강함과 동시에 공간이 일어나지 않도록 설계하였다. PaR Systems Inc.에서 개발한 텔레스코픽 튜브의 원자력시설 적용사례⁽⁹⁻¹²⁾는 여러 곳에서 찾아볼 수 있다.

Fig. 6(a)는 PRIDE 천정이동 양팔서보조작기를 부착하여 원격작업을 지원하게 될 본 논문에서 제안한 텔레스코픽 튜브를 보여준다. 텔레스코픽 튜브의 제일 마지막단은 전력과 신호 케이블이 원활히 지나갈 수 있을 정도의 공간만을 갖도록 크기를 제한하였다. PaR Systems Inc.처럼 사각 튜브 형태로 구성하는 것도 고려하였으나 이는 편하중을 받는 형태이며, LM 가이드를 부착하는 판의 두께로 인해 무게가 무거워져 원격유지보수 시 사용될 상위 크레인의 용량을 초과 할 뿐만 아니라 LM 가이드가 고가이므로 경제적으로도 적합하지 않다. 텔레스코픽 튜브가 사용될 공간이 충분하고, 용량 선택이 자유로운 곳이라면 4각 또는 U자 모양에 LM 가이드를 사용하는 방법도 나쁘지 않다. Fig. 6(b)는 튜브의 상하운동을 가이드 하기 위해 사용되는 니들롤러베어링과 간격을 조절하기위한 텐션롤러나사커버의 모습을 보여준다. 텐션롤러나사커버를 돌려 튜브와 니들



(a) Proposed telescopic tube (b) Needle roller bearings

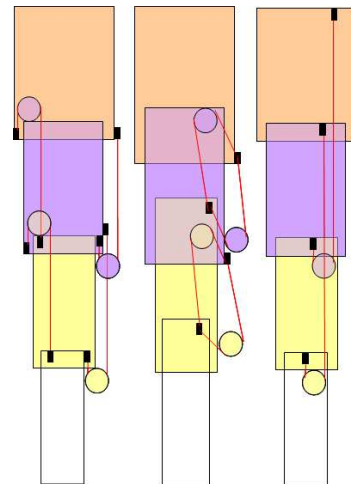
Fig. 6 The display of the proposed telescopic tube and needle roller bearings

롤러 베어링의 간격을 조절하는 방식이다.

Fig. 7은 텔레스코픽의 신축 구동 메커니즘을 나타낸다. Fig. 7(a)는 일반적으로 고소작업차, 사다리차 등에 일반적으로 많이 쓰이는 메커니즘⁽¹³⁾이며, Fig. 7(b)는 PaR Systems Inc.의 텔레스코픽 튜브에 적용된 메커니즘을 나타낸다. 본 논문에서 제안한 구동 메커니즘은 Fig. 7(c)와 같고 다른 두 구조(Fig. 7 (a),(b))에 비해 적은수의 도르래를 이용하여 단순하게 동일신축 원리를 구현하였다. 이로 인해 부품 수와 가격의 감소, 고장범위의 축소와 유지보수 측면에서 장점을 갖는다. 수축은 제일 아래 단을 체인 등으로 권양하여 이루어지며, 3.2절에서 설명한 것처럼 같은 모든 단이 동일하게 신장하거나 수축한다. 이로 인해 동일신축 구조가 없는 ACPF에 설치된 텔레스코픽 튜브보다 모션 정밀도가 향상되었다. 또한 PaR Systems Inc.보다 단순한 동일신축 메커니즘으로 인해 공간활용 측면에서 불리한 원형튜브를 선택할 수 있었고 결과적으로 구조적 강성이 사각형태의 튜브보다 월등히 뛰어나게 되었다.

4. 케이블 관리 시스템 설계

과워 및 신호 케이블 관리 시스템에 있어서 드럼의 직경은 케이블 직경(20 mm)의 5 배 이상으로 함과 동시에 전체적인 크기를 줄이는 방향으



(a) General (b) PaR Systems Inc. (c) Proposed
Fig. 7 The driving mechanism of telescopic tubes

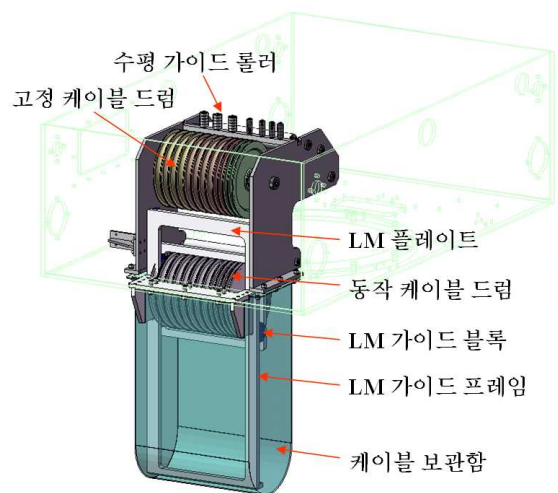


Fig. 8 Cable management system

로 설계하였다. Fig. 8에 케이블 관리 시스템의 주요 부품을 표시하였다. 텔레스코픽 튜브로부터 올라오는 케이블들은 총 6 가닥이며, 제일 처음 수직 가이드 롤러에 걸치게 된다. 케이블들은 그 용도에 따라 선경이 각기 다르므로 드럼 롤러의 가이드 홈은 선경에 맞추어 설계하였다. 케이블은 수직 가이드 롤러 및 수평 가이드 롤러를 차례로 거친 후, 고정 케이블 드럼에 90도 감아 수직 아래로 내려가 동작 케이블 드럼에 180도 감아 그대로 수직 위로 올라가며 다시 고정 케이블 드럼에 180도 감아 그대로 수직 아래로 다시 내려가 동작 케이블 드럼에 다시 180도 감아 그대로 수직 위로 올라간 후 트롤리 박스 내의 단자대와 연결된다. 즉, 케이블을 고정 케이블 드럼

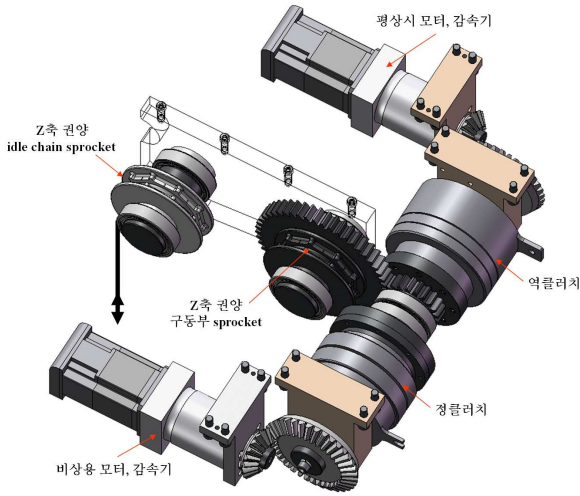


Fig. 9 Duplicated z-axis module

및 동작 케이블 드럼에 두번씩 감게 되므로, 드럼 롤러의 홈수는 12 개씩이 된다. 이렇게 두번 감게 되면 텔레스코픽 튜브의 신축거리의 1/4 만큼만 동작 케이블 드럼이 움직이면 되므로 케이블 보관함의 길이를 짧게 설계할 수 있다. 여기서 중요한 것은 동작케이블 드럼이 텔레스코픽 튜브의 신축거리에 동조하여 움직여야 하므로 적당한 무게를 갖도록 설계하는 것이 필요하다.

5. 트롤리 시스템 설계

트롤리에 설치되는 구동부는 텔레스코픽 튜브 이하 일체를 견인하는 구동부와 트롤리 횡행 구동부로 나뉜다. 모든 구동부는 유사시를 대비하여 이중화 개념으로 설계하였다. 즉 유사시에는 제 2의 구동모터를 작동하여 움직이는 원리이다. 본 논문에서는 다음과 같은 순서를 통하여 모터용량을 결정하였다.

1. 적절한 운전 선속도 선정 (z축에서는 권양속도)
2. 운전속도에 맞는 감속기 및 외부기어 감속비 가선편정
3. 부하를 고려한 모터 용량선정
4. 감속기 용량 선정 및 검토

5.1 z축 권양 모터용량 선정

Fig. 9에서 보는 바와 같이 z축 구동모듈은 정상시 구동부와 비상시 구동부로 이중화되어 있

고, 정상시에는 클러치에 전원을 인가하지 않고 역클러치의 아마추어(amature)와 회전자(rotor)를 붙게하여 정상시 모터 및 감속기 단에서 동력을 스포로켓(sprocket)까지 전달한다. 그러나 모터 고장 등의 이유로 정상시 구동이 불가능할 경우는 클러치에 전원을 가하여 역클러치를 떨어뜨리고, 정클러치를 붙여서 비상용 모터 및 감속기 단으로부터 동력을 공급받게 된다. z축 권양 구동부 모듈은 트롤리 박스의 내부에 위치하게 되며, 트롤리 박스내의 공간을 최대한 활용하여 트롤리 박스 전체의 크기를 줄이기 위해 베벨기어 등을 사용하였다.

PRIDE 천정이동장치의 적정 권양속도를 약 60 mm/sec로 가선편정하였고, 현재 권양 체인의 스포로켓은 직경이 121 mm이다. 이때, 감속기와 외부기어를 합한 총감속비는 다음 공식에 의해 구할 수 있다.

$$i = \frac{N_{motor}}{N_{end}} = \frac{N_{motor}}{\frac{V}{\pi D}} \quad (6)$$

여기서 i 는 총감속비, N_{motor} 는 모터정격속도(보통 3,000 rpm), N_{end} 는 부하끝단(Fig. 9에서 z축 권양 idle 체인 스포로켓)의 회전속도, V 는 권양속도, D 는 스포로켓 지름이다.

식 (6)에 의해 총감속비는 약 300이 나오게 된다. 외부기어 감속으로 베벨기어와 평기어 감속을 시키는데 트롤리 박스 내부의 설치공간 및 동력전달구조 등을 고려하여 감속비를 가선편정한 후 반복을 통해 적절한 값을 선정한다. 외부감속을 5:1로 설계하면 감속기에 의한 감속비는 60:1로 설계할 수 있다.

이 때 부하를 고려한 모터용량 산정은 우선 모터부하 토크를 계산하는 것으로부터 시작한다. 모터부하토크는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_L = \frac{1}{2} D W \left(\frac{1}{i} \right) = \frac{1}{2} D W \left(\frac{1}{n_g n_e} \right) \quad (7)$$

여기서 T_L 은 모터부하토크, D 는 스포로켓의 직경, W 는 견인하중, n_g 는 상용 감속기에 의한 감속비, n_e 는 외부기어 감속비를 의미한다.

권양해야 할 총 무게는 텔레스코픽 2번째 튜브 이하의 모든 구조물 하중에 취급 부하하중을 합

Table 2 Selected motor and gear-head for z-axis

	예상 부하토크	선정모델	선정모델의 정격토크
Tamakawa 도터	1.9 Nm	TS4614-N8000	2.39 Nm
Neugart 감속기	113 Nm	PLE80-60	110 Nm 176* Nm

* max torque allowable for 30,000 output shaft rotations

한 것이되며 약 950 kgf에 이른다. 위 공식에 의해 부하토크는 약 1.9 Nm가 된다. 감속기에 걸리는 토크는 다음공식에 의해 구할 수 있다.

$$T_{L,g} = T_L n_g \quad (8)$$

여기서 $T_{L,g}$ 는 감속기 출력단에 걸리는 부하토크이다.

이 때, 감속기 부하토크는 113 Nm가 된다. 본 천정이동장치에 사용되는 모터는 resolver를 사용하는 Tamakawa⁽¹⁴⁾ 제품을 감속기는 neugart⁽¹⁵⁾ 제품을 사용하며 앞서 계산한 부하토크에 합당한 모델을 Table 2와 같이 선정하였다.

5.2 y축 트롤리 횡행 모터용량 선정

트롤리의 적절한 횡행속도를 약 150 mm/sec로 선정하였고, 트롤리 바퀴의 직경이 120 mm로 설계하였고, 이 때 총감속비는 식 (6)을 이용하면 128이다. 트롤리 횡행의 외부기어 감속시 트롤리 박스 내부공간 배치 등을 고려하여 외부감속비를 2:1, 상용감속기에 의한 감속비를 64:1로 선정하였다. y축 구동부에 대한 3D 모델을 Fig. 10에 나타내었다. y축 횡행 구동부도 이중화하여 비상시를 대비하였다.

y축 횡행 구동모터에 걸리는 모터부하 토크는 다음 식 (9)에 의해 계산될 수 있다.

$$T_L = \frac{\mu WD}{2\eta} \left(\frac{1}{n_g n_e} \right) \quad (9)$$

여기서 μ 는 바퀴와 레일의 마찰계수, W 는 바퀴에 가해지는 모든 무게, D 는 바퀴직경, η 는 구동부 전달효율을 의미한다.

바퀴에 전달되는 하중은 3D 모델의해 예측한 결과 1.7 tonf가 되며 바퀴와 레일의 마찰계수를 0.1, 구동부 전달효율을 0.9라고 가정하고, 예상부

Table 3 Selected motor and gear-head for y-axis

	예상 부하토크	선정모델	선정모델의 정격토크
Tamakawa 도터	0.87 Nm	TS4614-N8000	1.27 Nm
Neugart 감속기	56 Nm	PLE80-64	50 Nm 80* Nm

* max torque allowable for 30,000 output shaft rotations

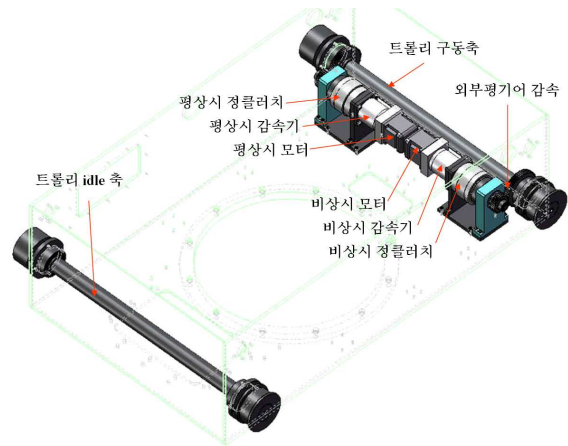


Fig. 10 Duplicated y-axis module

하토크를 계산하여 이에 맞는 모터와 감속기의 모델을 Table 3과 같이 선정하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 PRIDE 내에서 원격 조작기의 이동을 담당하게 될 천정이동장치의 설계에 관해 기술하였다. 주요 설계부로 텔레스코픽 튜브, 케이블관리 시스템 및 트롤리 시스템의 설계에 관해 언급하였다. 텔레스코픽 튜브를 설계함에 있어 PRIDE의 공간제약조건을 만족시키면서 스트로크를 만족하는 튜브의 개수 및 길이를 쉽게 구할 수 있도록 비선형계획법을 수립하였고, 국외 사례를 분석하여 동일신축 구동 메커니즘을 단순화하였을 뿐만 아니라 케이블관리시스템의 공간 사용을 극대화 할 수 있도록 설계하였다. 트롤리 박스내 설치되는 z축 권양 구동모듈과 y축 횡행 구동모듈은 비상시를 대비하여 이중화 설계를 수행하였고, 각각의 경우에 대해 모터 및 감속기 선정절차를 자세히 기술하였다.

본 연구에서 설계된 천정이동장치는 현재 참여

기업인 무진기연(주)에서 제작중이며 향후 PRIDE 내 공정장치들의 운전 및 유지보수를 담당하게 될 것이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, H. J., Lee, J. K., Park, B. S. and Yoon, J. S., 2009, "Bridge Transported Servo Manipulator System for Remote Handling Tasks Under a Radiation Environment," *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 36, No. 2, pp. 165~175
- (2) Lee, J. K., Lee, H. J., Yoon, K. H., Park, B. S. and Yoon, J. S., 2007, "A Servo Manipulator for Remote Handling of ACP Equipment," *Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp.954~959.
- (3) Ragsdale, C. T., 2008, *Spreadsheet Modeling & Decision Analysis 5e*, Thomson/South Western, pp. 339~408.
- (4) Bazerman, M. H., 2008, *Judgment in Managerial Decision Making*, Wiley, pp. 187~258.
- (5) <http://www.hwm.com/>
- (6) Sturm, A. J. and Benoit, M. W., MN(US), 2003, "Telescopic Tube Assembly with a Cabling System," United State Patent 6,561,368.
- (7) Sturm, A. J. and Hanson, F. W., MN(US), 2000, "Telescopic Tube Assembly," United State Patent 6,026,970.
- (8) <http://www.par.com/>
- (9) Rennich, M. J. and Burgess, T. W., 2006, "Remote Handling in the Spallation Neutron Source Target Facility," *Nuclear News*, Vol. 49, No. 2, pp. 32~36.
- (10) Rolfe, A. C., 1999, "Remote Handling-JET Experience," *Nuclear Energy*, Vol. 38, pp. 277~287.
- (11) Bardal, M., 2008, "Remote Handling Equipment in the High Level Waste Melter Cave Support Handling System at the Hanford Waste Treatment Plant," EP&R and R&RS Topical Meeting, Albuquerque, pp. 116~122.
- (12) Barker, M. E., Holt, T. E. and LaValle, D. R., 2008, "Welding Robot and Remote Handling System for the Yucca Mountain Waste Package Closure System," EP&R and R&RS Topical Meeting, Albuquerque, pp. 419~426.
- (13) Jensen, L. B. and Powers, C. W., 1977, "Suspended Extensible Boom," United State Patent 4,053,058.
- (14) <http://www.tamagawa-seiki.co.jp>
- (15) <http://neugartusa.com>