

---

# Global Report

---

## 다단계 유한요소법을 이용한 SSRI 냉동모듈의 도로운송 시스템 설계기술

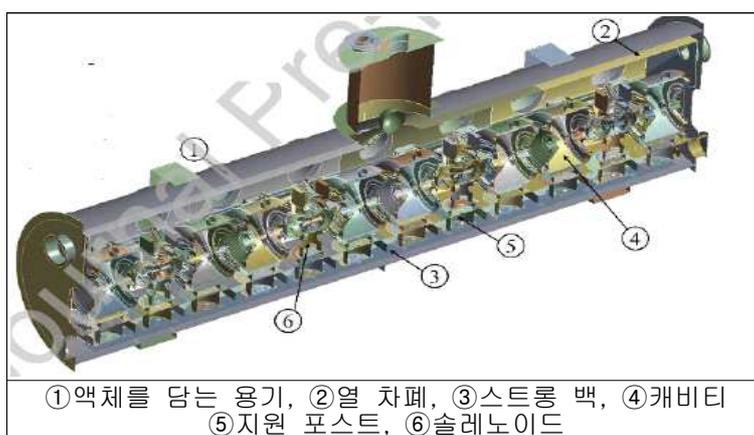
1. 개요
2. FE 모델의 유한요소 분석
3. MB모델의 유효성 검사
4. 서스펜션 시스템 설계
5. 교통 시뮬레이션
6. 결론

## 1. 개요

CM(Cryo Modules : 휴대폰에 디코딩된 1D 및 2D 바코드 스캐닝 솔루션을 제공하는 콤팩트 2D 이미징 모듈)은 입자물리학(Particle Physics) 연구 분야에서 에지 프론티어 어셈블리(edge-frontier assemblies)를 나타내는 솔루션이다. CM을 이용하여 도로운송에서 구조물이 받는 최적의 동적 하중을 계산하기 위해서는 적절한 서스펜션 시스템을 갖춘 운송도구(transportation Tool)를 설계해야 한다. 이 논문은 CM 연구 분야에서 처음 도입되는 PIP-II SSR1(Proton Improvement Plan-I Single Spoke Resonators 1 : 양성자 개선플랜-I 단일 스포크 공진기 1)에 대한 운송도구(transportation Tool)설계에 유용한 접근방식에 대해 설명한다. CM의 주요 하위 어셈블리를 위해 FE(Finite Element : 유한요소) 모델이 처음 개발되었다. 그러나 이 모델은 고도의 컴퓨팅 능력을 요구하고 있어 운송도구(transportation Tool)의 설계에 적합하지 않았다. 이러한 이유로 이 모델은 MNF(Modal Neutral File)로 이용하고 나머지 구성요소로 모델링된 MBS(Multi Body Software)를 주로 이용하게 되었다. 이에 MB모델은 계산시간을 대폭 단축하여 기계식 필터기능을 수행하는 HI(Helical Isolators)를 이용한 운송도구(transportation Tool) 반복설계 단계에서 성능이 입증되었다. CM LCLS-II(Linear Coherent Light Source II : 선형일관성 광원 II)을 이용하여 측정된 3D 가속 프로파일을 통해 도로운송에서 구조물이 받는 동적 하중을 줄이는 운송도구(transportation Tool)의 효과를 검증하였다. 아울러 MB모델링 결과는 CM의 일부 중요한 구성요소에 대한 구조적 검증을 수행하는 데 사용되었다. PIP-II(Proton Improvement Plan-II) 프로젝트는 5가지 유형의 SRF(Superconducting Radio Frequency : 초전도 무선주파수) 캐비티, HWR(Half Wave Resonator : 반파 공진기), 2대의 325MHz용 SSR(Single Spoke Resonators), 650MHz용 multi-cell cavities(LB650, HB650), 초전도 재료를 이용하여 진공환경에서 입자 빔을 가속화하는 실험으로 캐나다의 FermiLab에서 수행되었다[1].

## 2. FE 모델의 유한요소 분석

대부분의 CM 형상은 두께가 매우 작기 때문에 주로 쉘 요소(shell elements)를 사용하였으며, 모든 구성요소에 대한 형상, 재료특성 및 두께는 3D모델 및 어셈블리 도면에서 얻었다. 용기/열 차폐/스트롱 백/캐비티/지원 포스트/솔레노이드로 구성된 FE 모델의 주요 하위 어셈블리를 [그림 1]에 나타낸다.



\* 자료 : P. Neri, F. Bucchi, D. Passarelli, "A multilevel finite element-multibody approach to design the suspension system for the road transportation of SSR1 cryomodule", 27 August 2020, p.6.

[그림 1] FE 모델의 주요 하위 어셈블리

이 FE모델은 2상 파이프를 다양한 부품과 연결하는 구조가 아니기 때문에 신뢰할 수 있는 결과를 얻기

위해 매우 다양한 유한요소가 필요하며, 그 결과 계산시간이 매우 길어질 수 있다. 실제로 차량 운송에 필요한 주요부품은 MB 모델링을 통한 분석에서 고려할 것이다. [그림 1]에 나타낸 FE 모델의 주요 6개 하위 어셈블리 그룹은 CM의 전체 모델을 구성하는 전체 어셈블리이다. 각 부품 간 연결은 가급적 접촉요소의 이용을 피하기 위해 노드병합 및 고정조인트로 설계하였다.

### 3. MB모델의 유효성 검사

MB(Multi Body) 모델의 정확성을 검증하기 위해 열 차폐/스트롱 백/슬레노이드(V+TS : 액체를 담은 용기+열 차폐), 변형된 바디 형태로 모델링된 캐비티와 함께 CM(Cryo Modules) 선박의 MB(Multi Body) 환경에서 첫째로, modal analysis(모달 분석 : 도로운송에서 구조물이 받는 진동으로 인한 고유진동수 해석을 수행하였다. 둘째로, FE(Finite Element) 소프트웨어를 사용하여 해당 모델의 완전한 분석을 통해 얻은 주파수와 계산된 주파수를 비교하였다. 이어서, 2상 파이프를 추가하여 전체 CM의 주파수를 다중환경에서 계산하였다. 이러한 구조를 곧 Cryo module(CM)이라고 한다. FE 및 MB 모델의 모달 분석을 위해 사용된 주파수를 <표 1>에 나타낸다. 이 비교는 대형트럭과 같이 저속주행으로 인한 도로의 거칠기와 관련된 진동의 진폭은 무시할 수 있는 것으로 간주하고 약 20Hz까지 수행하였다.

<표 1> FE 및 MB 모델의 주파수

Mode #	$f_{V+TS}^{FE}$ [Hz]	$f_{V+TS}^{MB}$ [Hz]	$f_{CM}^{MB}$ [Hz]
1	9.5	9.5	9.6
2	15.4	15.3	15.2
3	17.2	17.1	17.9
4	19.1	18.8	21.6
5	21.2	20.8	23.1

\* 자료 : P. Neri, F. Bucchi, D. Passarelli, "A multilevel finite element-multibody approach to design the suspension system for the road transportation of SSR1 cryomodule", 27 August 2020, p.9.

### 4. 서스펜션 시스템 설계

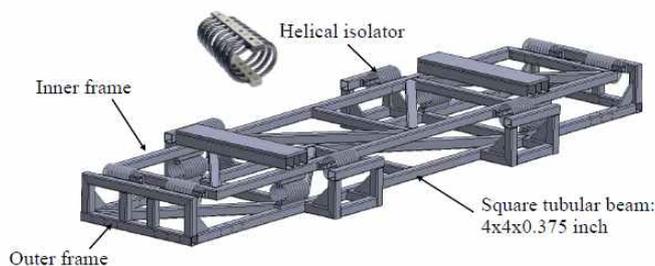
서스펜션 시스템(suspension system)은 극저온 상태에서 스프링의 강성을 보장할 수 있어야 한다. 이를 위해 1-dof 모델은 도로운송에서 구조물이 받는 최적의 동적 하중을 CM의 질량으로 가정하고, 동적 하중이 헬리컬 이솔레이터 시스템(helical isolator system)의 탄성력에 의해 수직으로 작용할 것으로 가정하였다. 서스펜션 시스템 스프링의 강성은 CM의 수직이동과 기계적 필터링 효과에 영향을 미친다. 특히 강성이 클수록 이동효율이 낮기 때문에 상대적으로 필터효과도 낮아진다. 예를 들어, st=25mm 서스펜션의 수직 정적압력을 고려한 레이아웃에 대한 CM(Cryo Modules) 및 운송도구(transportation Tool)모드의 주파수는 (식 1)과 같이 계산한 결과 3.1Hz인 것을 알 수 있다:

$$f_{Heave} = \frac{1}{2\pi} \omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} = 3.1 \text{ Hz} \dots\dots\dots (식 1)$$

여기서  $\omega_n$ 은 1-dof 모델의 주파수이며, g는 중력가속도(9.8m/sec<sup>2</sup>)를 의미한다. 이는 전술한 제1 및 제2 모드의 주파수보다 충분히 낮기 때문에 기계적 필터링 효과는 양호하게 나타날 수 있다. 주파수를 획득하는 데 필요한 서스펜션 시스템의 총 수직 강성(k<sub>tot v</sub>)은 (식 2)와 같이 계산할 수 있다:

$$k_v^{tot} = 4m\pi^2 f_{Heave}^2 = 3600 \text{ N/mm} \dots\dots\dots (식 2)$$

여기서  $m$ 은 CM과 운송도구(TT)의 질량의 합이며, 첫 번째 시도 값을 통해 서스펜션 시스템 스프링의 강성을 파악할 수 있었다. 이러한 상용제품 정보를 기반으로 설계된 운송도구를 [그림 2]에 나타낸다.



\* 자료 : P. Neri, F. Bucchi, D. Passarelli, “A multilevel finite element–multibody approach to design the suspension system for the road transportation of SSR1 cryomodule”, 27 August 2020, p.11.

[그림 2] helical isolator를 이용한 운송도구 설계

운송도구(transportation Tool)는 외부프레임으로 구성되며, 대형트럭의 경우 로딩받침대에 단단히 고정되어 있다. CM을 지지하고 있는 내부 및 외부 프레임은 12개의 헬리컬 아이솔레이터(HI : Helical Isolators)에 연결되어 있다. 그 특성은 첫 번째 수직강성 정도를 추정하여 계산된다. 운동궤도(x, y, z)를 따라 세 방향( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )으로 힘이 분산되는 부싱 요소(bushing element)를 통해 서스펜션 시스템의 선형 특성을 구현하였다[2][3]. 부싱 요소의 강성이 분산되는 세 방향( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )에 따라 CM과 운송도구(transportation Tool)에 장착된 강체시스템의 모드와 관련된 주파수는 다중바디 환경에서 계산되었으며, 이를 <표 2>에 나타낸다.

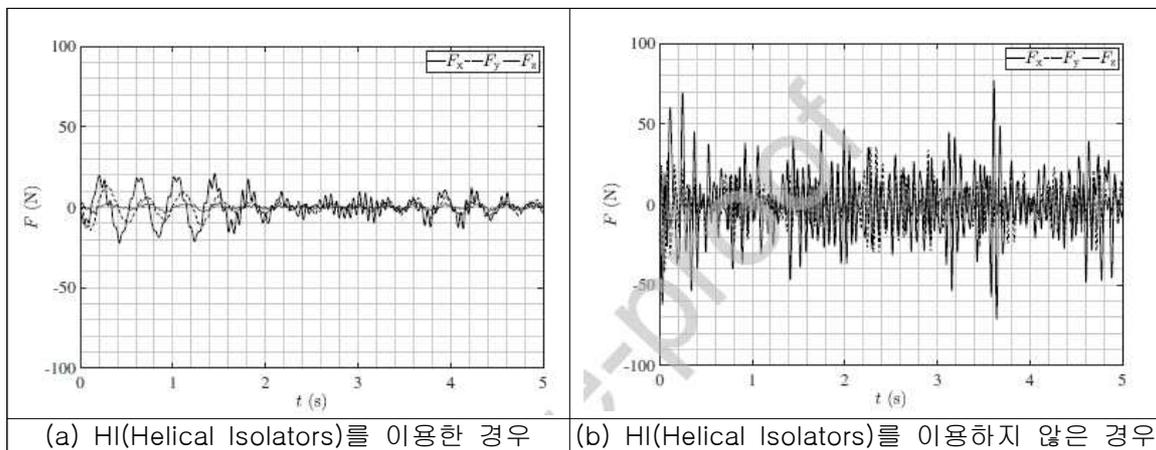
<표 2> 서스펜션 시스템의 CM+TT(transportation Tool) 주파수

모드	설명	주파수 [Hz]
1	롤링 진동	1.9
2	피칭 진동	3.0
3	당김 진동	3.3
4	편주 진동	4.1
5	복합진동 1	4.5
6	복합진동 2	5.3

\* 자료 : P. Neri, F. Bucchi, D. Passarelli, “A multilevel finite element–multibody approach to design the suspension system for the road transportation of SSR1 cryomodule”, 27 August 2020, p.11.

### 5. 교통 시뮬레이션

CM 구성요소에 작동하는 하중을 평가하기 위해 MB 환경에서 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 트럭 적재하중의 3D 변위시간에 대한 기록은 SSR1과 유사한 CM의 운송 중에 기록된 데이터를 근거로 하였다. 운행 중에 측정된 최대 변위 값을 기반으로 시뮬레이션 하여 각 구성요소에 작용하는 힘이 얼마나 되는지에 집중하였다. 운송도구(transportation Tool)를 탑재한 경우, 부싱 요소의 강성이 분산되는 세 방향( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )에 나타나는 벨로우상에 작용하는 힘의 강도를 [그림 3]에 나타낸다.



- \* 자료 : P. Neri, F. Bucchi, D. Passarelli, “A multilevel finite element–multibody approach to design the suspension system for the road transportation of SSR1 cryomodule”, 27 August 2020, p.13.

[그림 3] 벨로우에 작용하는 힘의 강도

HI(Helical Isolators)를 이용한 경우 힘의 강도가 분산되는 구성요소가 25N을 초과하지 않았으며, HI를 이용하지 않은 경우에는 75N에 가깝게 나타났다. 이는 HI를 이용하는 경우 기계적 여과효과로 인해 힘의 진폭이 다소 감소됨을 알 수 있다.

## 6. 결론

이 연구에서는 다단계 유한요소법(SW적)과 CM(Cryo Modules : HW적)을 이용하여 SSR(Single Spoke Resonators) | 냉동모듈이 장착된 대형트럭의 운송 중 진동을 줄일 수 있는 신뢰성이 높은 운송도구 설계기술에 대해 설명하였다. 설계단계에서는 다단계 접근방식을 이용하여 구조화하였으며, 용기/열 차폐/스트롱 백/캐비티/지원 포스트/솔레노이드로 구성된 FE 모델의 주요 하위 어셈블리를 포함한 유한요소 모델링을 통해 서스펜션 시스템의 제1 주파수를 평가하였다. 분석결과, 운송시스템의 주파수와 운송도구에 필요한 컷 오프 주파수가 일치하는 것을 확인하였다. 이 모델링은 서스펜션 시스템 스프링의 위치 지정에 따른 예비설계를 수행하는 데 도움이 될 수 있다.

냉동모듈이 장착된 대형트럭의 도로운송은 구조물이 매우 큰 동적 하중을 받기 때문에 적절한 서스펜션 시스템을 갖춘 교통도구를 설계해야 한다. 이 연구에서는 단일 스포크 공명기에 대한 교통도구 설계에 채택된 접근방식을 설명하였다. 이 연구결과는 국내 저온냉동 탐차의 도로운송 관련 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

## [참고문헌]

- [1] V. Roger, S. Cheban, T. Nicol, Y. Orlov, D. Passarelli, P. Vecchiolla, Design update of the SSR1 cryomodule for PIP-II project, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference IPAC 18 (Vancouver) (2018) Canada.
- [2] M. McGee, T. Arkan, E. Borissov, J. Leibfritz, W. Schappert, S. Barbanotti, Transport of desy 1.3 ghz cryomodule at fermilab, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada.
- [3] Isolation dynamic corps  
<<http://www.isolator.com/NewDocs/MSeries/M32CurveData.pdf>>

<원문제목> A multilevel finite element-multibody approach to design the suspension system  
for the road transportation of SSR1 cryomodule

<원문출처> Transportation Engineering