

## KSC-7 사용후핵연료 수송용기의 트레일러 운반에 대한 진동평가

서기석, 구정희, 정성환, 도재범, 노성기  
한국원자력연구소

### 요약

수송용기가 운반 트레일러에 의해 정상수송될 때, 국내 도로 상태에서 발생하는 반복적인 진동 혹은 충격하중을 측정하기 위해 국도 및 고속도로에서 차량수송시 가속도량을 기록하였으며, 이 측정결과를 주파수분석기로 분석하여 전산진동해석을 위한 입력자료를 생산하였다. 수송용기의 기계구조에 대한 건전성을 평가하기 위한 전산해석은 ABAQUS 코드로 KSC-7 수송용기를 3차원 보요소로 모델링하여 응력평가를 수행하였다.

### 1. 서론

관련법규는 미국 원자력법규인 10 CFR App. A-4, Regulatory Guide 7.8과 국제원자력기구 IAEA 규정인 No.7 E-619, 국내원자력법규인 과기처고시 85-8호 등에 명시된 바와 같이 차량진동에 대한 수송용기의 건전성이 유지되도록 요구하고 있다. 그러나 국내도로에서 차량 수송시 수송용기에 대한 진동시험을 한 예가 없으므로, 초기에 수송용기의 진동해석은 미국 Sandia lab.에서 수행한 미국도로 수송 진동자료를 활용하였다. 이 자료는 25.5 톤 중량의 수송용기를 고속도로에서 수송시 발생한 진동자료로써, 국내도로 여건에 적합하지 않으므로 국내 최대중량의 수송용기인 KSC-4를 차량에 의한 정상수송시 발생된 가속도량을 측정하였다. 진동은 도로의 노면으로부터 운반 트레일러와 고정구조물을 통하여 수송용기로 전달되며 이때 수송용기 본체에 미치는 영향을 알기 위해 수송용기 고정 구조물의 지지대에 가속도계를 설치하여, data recorder로 기록하였다. 전산해석에서 일반적으로 도로의 불연속 부분에서 발생된 최대 충격량을 수송용기 본체에 적용하고 있으나, 본 논문에서는 수송용기에 대해 response spectrum해석을 적용하였다.

### 2. 진동시험

#### 가. 시험모델

진동시험의 목적은 KSC-7 설계시 진동해석의 입력자료 생산이므로 시험모델은 국내에서 보유된 수송용기 가운데 최대중량을 가진 KSC-4 수송용기 및 트레일러를 대상으로 진동시험이 수행되었다. KSC-4 수송용기는 PWR 사용후핵연료 4개를 운반할 수 있는 수송용기로서 사각단면을 가졌으며 폭이 약 1 m, 길이는 약 4.8 m 이며 중량은 34 ton이다. 그리고 트

레일러는 미국 Eagle사의 제품으로서 전장이 약 13 m이고 축하중은 국내 교량 통과 기준인 10 ton으로 설계되어있다.

나. 측정계통 및 시험절차

진동측정계통은 그림 1과 같이 가속도계, 전압증폭기, 자료기록계로 구성되어 차량에 설치되고 기록된 양은 주파수분석기로 분석되었다. 진동시험은 가속도계로 미국 PCB 사의 모델 336M28을 사용하였으며, 가속도계는 수송용기 trunnion과 제일 근접한 수송용기 고정구조물의 상부에 길이, 수직 및 수평 방향으로 설치되었다. 전압증폭기는 미국 PCB 사의 모델 483B07로서 차량운반이 용이하고 DC 전원으로 가동되는 종류를 사용하였다. 자료기록계는 영국 Racal 사의 24 channel 용량의 V-store, 주파수분석기는 미국 Scientific Atlanta사의 SD380을 사용하였다. 각 장비의 전원으로 DC 12 V 배터리 두 개를 측정장비와 함께 수송용기 트레일러의 후면에 설치하여 진동시험을 수행하였다. 그리고 가속도계에서 가속도에 대한 출력전압의 비는 100 mV/g, 측정계통에서 출력전압에 대한 가속도의 비는 10 g/V가 되도록 하였다.

측정장비의 초기 setting 완료후 수송을 국도 및 고속도로에 대한 진동측정을 수행하였다. 진동측정을 위한 국도 구간은 천안에서부터 대전까지 1 시간이상 도로시험을 수행하였으며, 고속도로 구간은 추풍령에서부터 경산에 이르기까지 시험을 수행하였다. 진동량의 분류는 크게 두가지로 구분되었다. 차량진동이란 정상적인 도로상태에서 발생하는 정상 진동량과 도로의 불연속적인 상태인 웅덩이 혹은 철도건널목과 같은 도로를 통과할 경우에 발생하는 충격에 의한 진동량이 있다. 수송용기의 진동해석의 입력자료로는 정상 진동량보다는 충격에 의한 진동량이 크므로 이를 중심으로 주파수를 분석하였다.

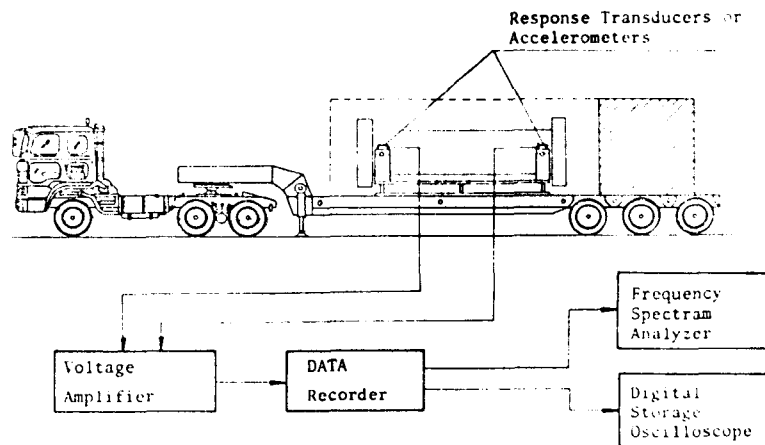


그림 1. Cask Trailer and Data Acquisition System

#### 다. 진동시험결과

차량 진동량은 순탄한 도로에서의 정상 진동량과 불규칙한 도로에서의 충격량으로 분류될 수 있는데 기록량의 99 %가 정상진동량, 1 %는 충격량으로 나타났다. 국도수송에 대한 진동시험결과는 표 1과 같이 주파수대역을 최대 4KHz범위까지 800 Hz씩 나누었을 때 길이 방향의 최대가속도량은 2400 ~ 3200 Hz 사이에서 최대값으로 0.125 g가 발생하였다. 국도수송인 경우에 차량속도가 최대 50 Km/hr이었으나 속도변화가 심하여 길이 방향에서는 출발전후 및 가감속시, 수직 방향에서는 도로의 굴곡상태 변화에 따라 가속도량이 각각 발생하며, 커브 길에서 발생하는 수평 방향의 가속도는 국도 수송시 속도가 낮으므로 비교적 작은 양이 발생되었다. 고속도로 수송에 대한 진동시험결과는 표 1과 같이 국도수송과 마찬가지로 주파수대역을 최대 4KHz범위까지 800 Hz씩 나누었을 때 수직 방향의 최대가속도량은 0 ~ 800 Hz사이에서 최대값인 0.2 g가 발생하였다. 고속도로 수송 차량속도가 최대 80 Km/hr으로 진동시험결과도 국도 수송 시험결과와 비슷한 경향으로 나타났으나 국도 수송 속도에 비해 크므로, 고속도로 수송에 대한 주파수 분석 결과를 response spectrum analysis의 입력자료로 활용하였다.

표 1. Vibration Test Results to Transport in Normal Road and Highway  
(unit : g-value)

freq. direc. (Hz)	longitudinal		vertical		transverse	
	road	highway	road	highway	road	highway
0 - 800	0.027	0.05	0.1	0.2	0.045	0.1
800 - 1600	0.035	0.046	0.025	0.05	0.02	0.05
1600 - 2400	0.018	0.015	0.03	0.035	0.025	0.031
2400 - 3200	0.125	0.135	0.1	0.062	0.085	0.062
3200 - 4000	0.075	0.05	0.018	0.085	0.027	0.023

### 3. 진동해석

#### 가. 해석모델

KSC-7 수송용기의 차량 운반 형태는 수평상태의 수송용기와 그와 직각을 이루는 trunnion 4부분이 고정구조물과 결합되어 있고 그 곳에 하중이 3방향으로 가해지는 특성상 3차원 해석이 필요하므로 3차원 보요소를 적용하였다. 해석모델은 34개 절점과 57 요소로 구성되었으며 그 가운데 구조재인 스테인레스 스틸로 이루어진 셸과 상하부 평판은 29개의 3차원 보요소인 B31를 적용하였으며, 24개 요소는 집중질량을 적용하였고, 4개 요소는 수송용기의 중심선과 trunnion부분사이의 위치상의 차이점을 해결하기 위해 스테인레스 스틸의 탄성계

수의 100배를 적용한 강성요소를 활용하였다. 구조재인 스테인레스 스틸 304의 탄성계수는  $1.9513 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 이며, 보요소의 단면 특성치는 수송용기 바닥면으로부터 길이방향으로 0.68 - 4.57 m 위치에서는 외부 fin에 대한 효과를 고려하였다. 본체 외부에는 두께가 40 mm, 폭이 95 mm인 냉각 fin이 80개 설치되어있어 단면적 및 면적모멘트의 증가요인이 되었다. 핀이 고려되지 않았을 때 단면적은  $0.2432 \text{ m}^2$ 이고 면적 관성모멘트는  $0.0556 \text{ m}^4$ 이며, 핀이 고려되었을 때 단면적은  $0.2736 \text{ m}^2$ 이고 면적 관성모멘트는  $0.0674 \text{ m}^4$ 로 각각 12.5 %와 21 %씩 증가되었다. 4개의 원통형 trunnion과 결합되는 고정 구조물의 상단 부분은 덮개가 있는 U자 형태이므로, 수송용기의 trunnion에서 직진 3방향과 회전 2방향의 자유도를 고정시킨 경계조건을 적용하였다.

#### 나. 해석방법

진동해석방법은 mode 해석과 response spectrum 해석의 두가지 방법으로 나누어진다. mode 해석방법으로 수송용기에 대한 고유진동수 및 mode shape를 계산하였다. 고유진동수가 적은 초기 mode 4개의 형상을 살펴보면, mode 1은 고유진동수 64 Hz에서 수직방향의 변형이며, 고유진동수 96 Hz에서 mode 2인 경우는 수송용기의 비틀림과 수평방향의 복합변형이다. Mode 3의 경우는 고유진동수 132 Hz에서 수송용기의 길이방향 변형을 나타내며, mode 4의 경우는 고유진동수 164 Hz에서 수송용기의 수직방향으로 mode 1에 비해 파장이 짧은 변형으로 나타났다. Mode해석결과를 다시 response spectrum 해석을 위해 수송용기 trunnion의 세축에 spectrum data를 적용하였다. Spectrum data는 KSC-4 수송용기를 대전에서 고리발전소로 운반중의 고속도로 진동자료를 averaging한 결과를 활용하였으며 modal combination은 SRSS방식으로 조합되었다.

#### 다. 해석결과

보요소의 해석에서 수송용기 중심으로 볼 때 길이 방향은 r 축, 수직 방향은 t 축, 수평 방향은 s 축으로 하였다. 해석결과 최대 전단력은 trunnion 부근의 s 방향에서  $1.3980\text{E}+04 \text{ N}$ 으로 크게 나타났으며, 이는 수송시 커브 길에서 체결부위에 대한 수평방향으로 수송용기 관성력이 작용되었기 때문이다. r 방향과 t 방향에서 각각 5222 N 및 4904 N으로 작게 나타났다. 그리고 최대 비틀림모멘트는 수송용기 중심 부근의 r 방향에서  $2.0608\text{E}+04 \text{ N-m}$ 으로 크게 나왔으며, 최대 굽힘모멘트는 s 방향과 t 방향에서 각각 3678 N-m 및 185.2 N-m로 나타났다. 그림 2는 response spectrum 해석결과 변형된 모습을 나타내며 수송용기 본체는 도로의 수직방향의 거동으로 인하여 굽힘 모멘트와 trunnion에서 전단력이 작용하여 mode shape 1의 영향이 크게 나타난 것으로 평가되었다.

3차원 보요소에 대한 해석 결과는 힘과 모멘트로 나타나므로 응력평가를 하기 위해서는 axial stress, bending stress 및 torsional stress 계산과 응력조합이 필요하다. 이에 대한 계산 방법은 아래와 같다.

$$\text{Axial stress : } AS_1 = F_r/A_1, \text{ Shear force : } V = \sqrt{F_s^2 + F_t^2}$$

$$\text{Bending stress( s direction ) : } AS_2 = M_s C_1/I_{ss}, \text{ ( r direction ) : } AS_3 = M_t C_2/I_{tt}$$

Combined bending stress :  $AS_4 = \sqrt{AS_2^2 + AS_3^2}$ , Shear stress :  $AS_5 = V/A_2$   
 Torsional stress :  $AS_6 = M_r C_1/J$ , Combined axial stress :  $TS_1 = AS_1 + AS_4$   
 Combined shear :  $TS_2 = AS_5 + AS_6$ , Equivalent stress :  $TE = \sqrt{TS_1^2 + 3TS_2^2}$

- $A_1$  : 수송용기 단면적
- $A_2$  : 전단력에 의한 유효면적
- $C_1$  : 수송용기 중심축으로부터 거리
- $J$  : r 방향 면적관성모멘트

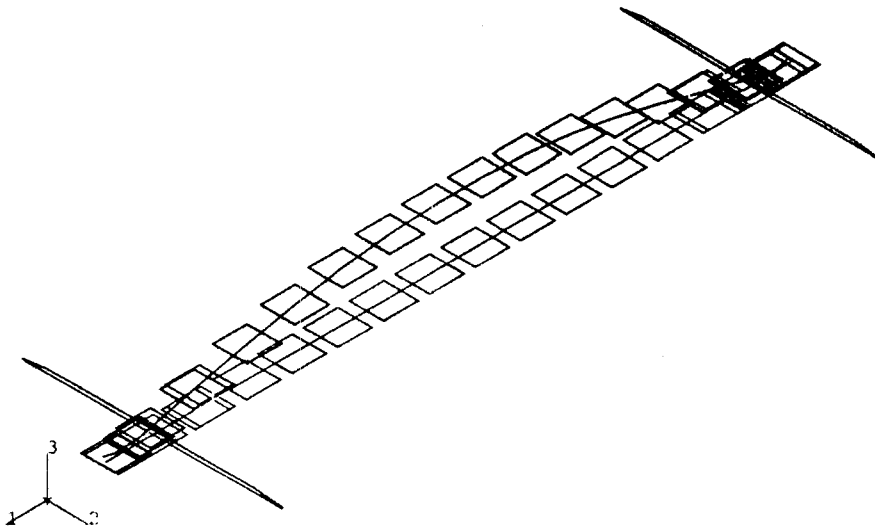


그림 2. Deformed Shape by Response Spectrum Analysis

여기서 전단응력을 평가하기 위해 유효단면적  $A_2$  값으로 원형 solid type은 단면적의 90 %, 원형 hollow type은 50 %를 각각 적용하였다. 상하부를 제외한 수송용기 셀부분의 응력계산 결과는 표 2와 같이 인장 및 압힘 조합응력  $TS_1$ , 전단과 비틀림 조합응력  $TS_2$ 와 등가응력  $TE$ 로 정리하였다. 각 moment와 관련한 응력값은 수송용기 중심축으로부터 거리인  $C_1$  과 비례하므로 반경값이 제일 큰 외부셀을 중점적으로 평가하였다. 정상운전 조건에서 허용 교변응력은 ASME Sec. III 설계피로 곡선의  $10^{11}$  cycle에서 스테인레스 스틸 304의 응력평가한계치는  $8.946 \times 10^7$  Pascal이고 계산된 등가응력의 최고값은 EL. No. 3에서  $2.867 \times 10^5$  Pascal이므로 진동해석 결과 안전한 것으로 나타났다.

표 2. Stress Evaluation of Response Spectrum Analysis

El. No.	TS <sub>1</sub> (Pa)	TS <sub>2</sub> (Pa)	TE (Pa)
1	0.3000E+05	0.1461E+06	0.2549E+06
2	0.1827E+05	0.1596E+06	0.2770E+06
3	0.2751E+05	0.1648E+06	0.2867E+06
4	0.3589E+05	0.1613E+06	0.2816E+06
5	0.4046E+05	0.1487E+06	0.2607E+06
6	0.4066E+05	0.1295E+06	0.2280E+06
7	0.4108E+05	0.1489E+06	0.2611E+06
8	0.3663E+05	0.1612E+06	0.2816E+06
9	0.2824E+05	0.1647E+06	0.2866E+06
10	0.1843E+05	0.1596E+06	0.2771E+06
11	0.3014E+05	0.1462E+06	0.2551E+06
12	0.7328E+04	0.2494E+05	0.4382E+05

3. 결론

국내 도로조건에서 34 톤 중량의 수송용기의 트레일러 수송시 얻은 진동자료와 전산해석 결과로부터 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 진동시험 결과 국도수송에서는 출발과 제동시 수송용기 길이 방향으로 최대 0.125 g를 받고, 고속도로 수송에서는 지면에 수직방향으로 최대 0.2 g를 받으며,
- 2) Response spectrum 해석결과 최대 전단력은 trunnion 부위에서 수평방향으로, 최대모멘트는 수송용기 중심에서 길이방향으로 작용하였으며
- 3) 계산된 최대응력이  $8.946 \times 10^7$  Pascal로 응력한계치  $2.07 \times 10^8$  Pascal보다 작으므로 KSC-7 수송용기의 트레일러 도로수송시 안전함을 알 수 있었다.