

# 유한요소해석을 통한 의료용 리프트 칼럼의 피로수명 예측

## Fatigue Life Prediction of Medical Lift Column utilizing Finite Element Analysis

천 희 준\*      조 진 레\*\*      양 희 준\*\*\*      이 시 복†  
Cheon, Hee-Jun      Cho, Jin-Rae      Yang, Hee-Jun      Lee, Shi-Bok

### 요 지

매우 큰 편심하중을 지지하면서 상하로 수직위치를 제어하는 의료용 리프트 칼럼은 수직위치의 정확도를 확보하기 위해 매우 낮은 구조적 변형과 진동은 물론 높은 피로강도가 요구된다. 리프트 칼럼은 일반적으로 3단 슬라이딩 붐구조로 유도 전동기로 작동되며, 상하운동에 따라 변동응력을 나타낸다. 본 연구에서는 리프트 칼럼의 상하운동으로 야기되는 변동응력에 따른 피로강도를 수치해석적으로 예측하였다. 한 주기 상하운동에 따른 응력변동은 유한요소해석으로 구하였으며, 피로수명은 Palmgren-miner기법과 재료의 S-N선도를 적용하여 예측하였다. 수치해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 리프트 칼럼의 상세형상과 체결부위를 반영한 3차원 FEM모델을 생성하였으며, 칼럼과 패드사이 계면은 접촉조건으로 처리하였다.

**핵심용어** : 리프트 칼럼, 편하중, 상하운동, 피로수명, 유한요소해석

### Abstract

Medical lift column controlling the vertical position while supporting heavy eccentric load should have the high fatigue strength as well as the extremely low structural deflection and vibration in order to maintain the positioning accuracy. The lift column driven by a induction motor is generally in a three-step sliding boom structure and exhibits the time-varying stress distribution according to the up-and-down motion. This study is concerned with the numerical prediction of the fatigue strength of the lift column subject to the time-varying stress caused by the up-and-down motion. The stress variation during a motion cycle is obtained by finite element analysis and the fatigue life is predicted making use of Palmgren-miner's rule and S-N curves. In order to secure the numerical analysis reliability, a 3-D FEM, model in which the detailed lift column structure and the fitting parts are fully considered, is generated and the interfaces between lift column and pads are treated by the contact condition.

**Keywords** : lift column, eccentric load, up-and-down motion, fatigue life, finite element analysis

## 1. 서 론

리프트 칼럼은 X-ray 장비를 위시한 각종 의료장비의 핵심부품으로 의료장비 이외에도 용접기, 마킹 등 일반 산업용으로도 그 용도가 확산되고 있다. X-ray장비에 설치되는 의료용 리프트 칼럼의 경우 X-ray 사진 촬영 시 촬영장비를 상하로 이동시키거나 환자의 의자를 상하로 이동시켜 촬영이 필요한 부분의 촬영을 가능하도록 한다. 일반적으로 리프트 칼럼은 중공의 사각단면을 가진 박판 알루미늄 사출품으로

제작되며, 다단 슬라이딩 방식으로 수납이 가능하며 유도 전동기에 의해 개폐되는 위치가 정밀 제어된다.

대부분의 경우, 리프트 칼럼이 이동시켜야 할 물체는 칼럼의 중심축에서 어느 정도 떨어진 지점에 위치한다. 다시 말해, 리프트 칼럼은 편심하중을 원하는 위치에 정밀하게 이동시키는 역할을 담당한다. 이러한 정밀 위치제어를 위한 리프트 칼럼의 설계에는 구조적 변형, 편심하중 이동시 구조진동 그리고 반복 이송운동에 따른 피로파괴가 핵심 사안으로 대두된다.

† 책임저자, 정회원 · 부산대학교 기계공학부 교수  
Tel: 051-510-2315 ; Fax: 051-514-7640  
E-mail: sblee@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 대학원 기계공학부

\*\* (주)마이다스아이티 기술연구소

\*\*\* (주)지엔에스모션

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.



그림 1 X-ray 장비용 리프트 칼럼

리프트 칼럼에 대한 선행 연구로 박상신 등(1997)은 화물차용 암형 리프트에 대한 기구학적으로 분석하고 설계를 위한 프로그램을 개발하였다. 그리고 이덕영 등(2005)은 스쿠터나 전동 휠체어를 승하차하기 위한 윈치 리프트 설계를 위해 FEM을 활용하여 구조변형과 응력을 분석하였다.

본 연구는 250kgf·m의 편하중을 상하로 이송하는 3단 의료용 리프트 칼럼에 대한 피로수명 예측을 목적으로 한다. 리프트 칼럼의 상하 운동으로 리프트 칼럼내 응력은 수직위치에 따라 변하게 되고, 이러한 변동응력은 리프트 칼럼에 피로를 누적시키게 된다. 편하중이 상하로 1회 왕복하는 기간을 한 사이클(cycle)로 정의하고, 사이클 동안 응력이 집중되는 지점에서의 응력변동을 유한요소해석으로 계산하였다.

구조해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 칼럼의 상세형상과 체결부를 모두 반영한 3차원 상세 FEM 모델을 적용하였다. 그리고 응력변동에 따른 피로수명은 Reservoir counting 기법과 Palmgren-miner rule(Maddox, 1991)을 적용하여 예측하였다.

## 2. 의료용 리프트 칼럼

### 2.1 리프트 칼럼의 구조

리프트 칼럼은 크게 구동부, 동력전달부, 운송체, 지지부로 나뉘는데 구동부의 모터에 의해 발생된 동력이 스크류, 실린더, 웜기어(worm gear) 및 베벨기어(bevel gear) 등으로 구성된 동력전달부에 의해 운송체로 전달되어 리프트 칼럼이 상하 운동하게 된다. 리프트 칼럼은 총 3개의 사각형 단면의 중공관으로 이루어져 있으며, 1번 칼럼(column)이 지면에 부착되어 고정된 지지부가 되고 2번 칼럼과 3번 칼럼은 리프트 칼럼 구동 시 직접적으로 상하 이동을 하는 운송체로 분류된다.

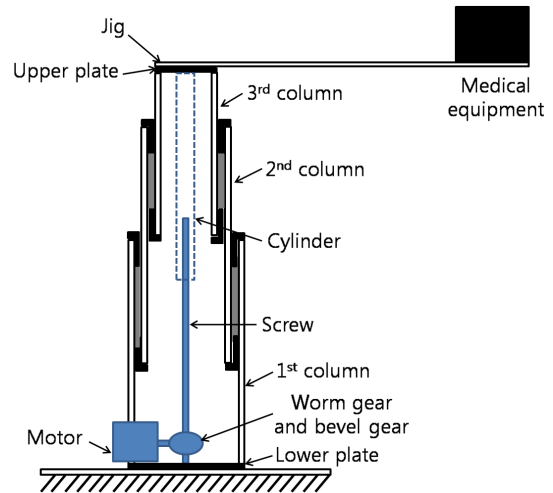


그림 2 리프트 칼럼의 단면 구조

그림 2와 같이 구동모터는 하부 플레이트(lower plate) 위에 설치되며 스크류는 모터와 연결된 베벨기어에 연결된다. 실린더는 상부 플레이트와 하부 플레이트 사이에 설치되며, 실린더와 스크류는 모터에서 발생한 동력을 운송체인 3번 칼럼으로 전달하고 리프트 칼럼에 가해지는 하중을 지탱하는 역할을 한다.

모터의 동력은 스크류와 실린더에 의해 3번 칼럼에 전달되고 3번 칼럼이 상승하게 된다. 3번 칼럼이 일정 이상으로 상승하게 되면 리프터(lifter)에 의해 2번이 상승하게 된다. 2번 칼럼은 스톱퍼(stopper)에 의해 일정높이까지만 상승하며, 이 높이가 리프트 칼럼의 최대 상승높이가 된다. 리프터는 3번 칼럼과 2번 칼럼 사이에 위치하며, 3번 칼럼의 상승높이 조절과 함께 2번 칼럼을 밀어 올리는 역할을 한다. 그리고 2번 칼럼과 1번 칼럼 사이에 위치한 스톱퍼의 길이에 의해 2번 칼럼의 상승 높이를 조절 가능하다. 본 연구의 대상이 되는 리프트 칼럼에 있어 3번 칼럼의 최대 스트로크는 355mm 그리고 2번 칼럼의 최대 스트로크는 345mm이다.

### 2.2 리프트 칼럼의 구성요소

리프트 칼럼은 3개의 칼럼, 64개의 패드(pad), 2개 플레이트, 4개의 리프터와 스톱퍼로 구성되며, 3번 칼럼의 상부와 1번 칼럼의 하부에 플레이트가 설치된다. 패드의 위치는 그림 3과 같이 3번 칼럼의 하부와 2번 칼럼의 하부에 각각 16개의 패드가 칼럼의 겉면에 설치된다. 또한 2번 칼럼의 상부와 1번 칼럼의 상부에도 각각 16개의 패드가 칼럼의 내면에 설치된다.

리프터와 스톱퍼는 동일한 단면 형상을 가졌으나 길이와 설치되는 위치가 서로 다르다. 리프터는 3번 칼럼의 하부 패드

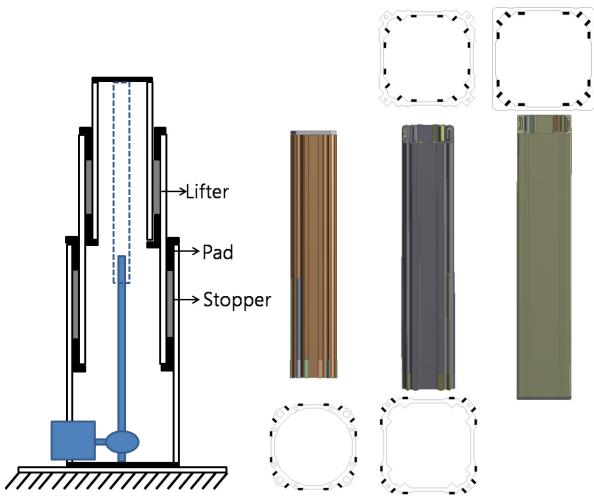


그림 3 패드의 부착위치 및 개수

와 2번 칼럼 상부 패드 사이에, 스톱퍼는 2번 칼럼 하부 패드와 1번 칼럼 상부 패드 사이에 설치된다. 리프트 칼럼의 패드는 각 칼럼과 면접촉하며, 접촉면에는 윤활유가 도포되어 칼럼의 상하 이동시 각 칼럼 사이에서 베어링 역할을 한다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 3차원 형상 모델링

본 연구에서는 편하중을 지탱하는 각 칼럼의 구조 안전성이 해석의 주된 관심사이기 때문에, 해석모델의 단순화를 위해 모터부는 모델에서 제외하였다. 스크류와 실린더부의 스크류는 단봉과 실린더로 간략화시켰다.

각 칼럼은 그림 4와 같이 정사각형의 중공관 형상의 단면을 지니고 있다. 1번, 2번 그리고 3번 칼럼은 폭이 각각 163, 146, 128mm이고 길이는 각각 648, 740, 840mm이다. 가장 큰 응력이 발생할 것으로 판단되는 3번 칼럼 상부의 경우, 상세 응력분포를 구하기 위해 칼럼에 부착되는 지그, 플레이트 및 고정용 볼트까지 모델에 포함시켰다.

그림 5와 같이 볼트는 지그를 3번 칼럼에 고정하는 4개의 지그볼트, 상부 플레이트를 3번 칼럼에 고정하는 8개의 플레이트 볼트 그리고 실린더를 플레이트에 고정하기 위한 1개의 스핀들 볼트로 구성되어 있다.

편하중을 지탱하면서 상하로 개폐되는 리프트 칼럼의 피로 수명을 예측하기 위해서는 우선 리프트 칼럼의 상하 이송 한 사이클(cycle)동안의 응력변동을 구해야 한다. 이를 위해 리프트 칼럼의 상승 스트로크(stroke)가 최대인 700mm, 최소가 되는 10mm, 최대 스트로크의 1/3 그리고 2/3가 되는 4가지 경우에 대하여 구조해석을 수행하였다.

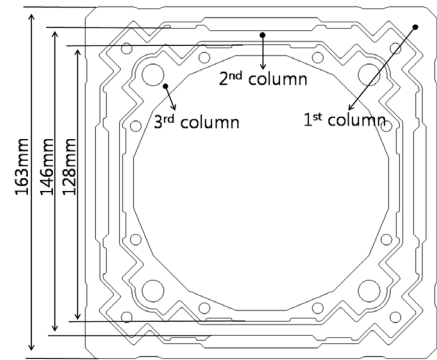


그림 4 각 칼럼의 단면형상 및 치수

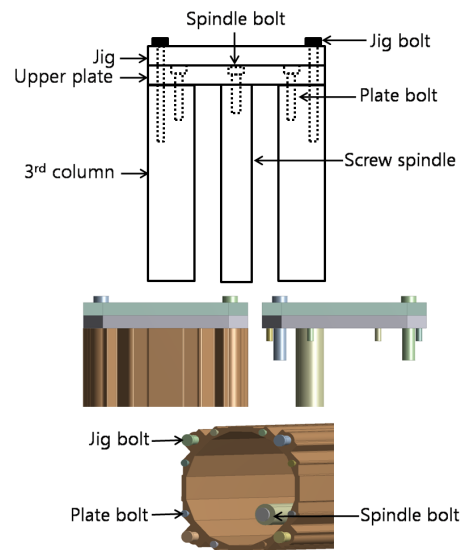


그림 5 볼트의 부착 위치

#### 3.2 3차원 FEM 모델링

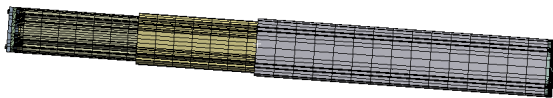
그림 6과 같이 스트로크에 따른 4종류의 리프트 칼럼의 요소망은 4면체(Tetra) 요소와 6면체(Hex) 요소를 혼용하여 생성하였다. 칼럼과 지그는 해석의 정확도와 수렴성이 좋은 6면체 요소를 사용하였고, 플레이트는 4면체 요소를 사용하였다. 스트로크 700mm, 400mm, 200mm, 5mm의 총 요소수는 각각 202,958개, 190,171개, 206,730개, 219,973개이고 각각의 총 절점수는 795,385개, 57,602개, 61,151개, 64,659개로 두고 해석하였다.

리프트 칼럼 구성요소들 간의 접촉은 리프트 칼럼의 실제 동작상태를 고려하여 결정하였으며, 그림 6에 각 구성요소 사이의 접촉조건을 개략적으로 도시하였다. 먼저 지그 볼트의 경우에는 지그와 1번 칼럼과는 슬라이딩이 없는 접촉조건으로 하였고, 상부 플레이트와는 금속사이의 마찰계수인 0.17을 적용한 슬라이딩 접촉을 부여하였다. 플레이트 볼트의 경우는 상부 플레이트와 1번 칼럼 각각의 부품과 슬라이딩이 없는 접촉조건을 부여하였고, 반면 패드와 칼럼간의 마

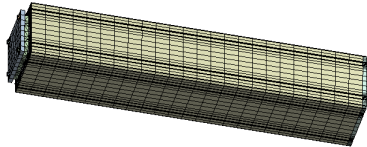
칼계수는 윤활 마찰인 점을 고려하여 0.005로 설정하였다. 패드와 리프터와 스토퍼는 슬라이딩이 없는 접촉조건, 하부 플레이트와 3번 칼럼은 슬라이딩이 없는 접촉조건을 각각 부여하였다.

리프트 칼럼에 작용하는 하중 및 경계조건은 그림 9와 같다. 하부플레이트 밑면 전체에 고정조건을 부여하였으며, 지그 윗면에서 1m 떨어진 지점에 작용하는 250kg 편하중은 리모트 하중으로 모델링하였다. 또한 리프트 칼럼 자체의 자중에 의한 하중을 고려하였다.

리프트 칼럼에 사용되는 재료의 물성값은 표 1에 기록하였다. 여기서, 알루미늄은 열처리된 알루미늄으로 많은 하중을 지탱하는 칼럼과 플레이트에 사용된다. 한편, 플라스틱은 엔지니어링 플라스틱으로 리프터, 스토퍼 그리고 패드와 같이 슬라이딩하는 부품에 사용된다. 그리고 볼트, 스크류 및 실린더에는 구조용 강이 사용되었다.



(a) 스트로크가 700mm인 경우



(b) 스트로크가 5mm인 경우

그림 6 스트로크에 따른 리프트 칼럼의 요소망

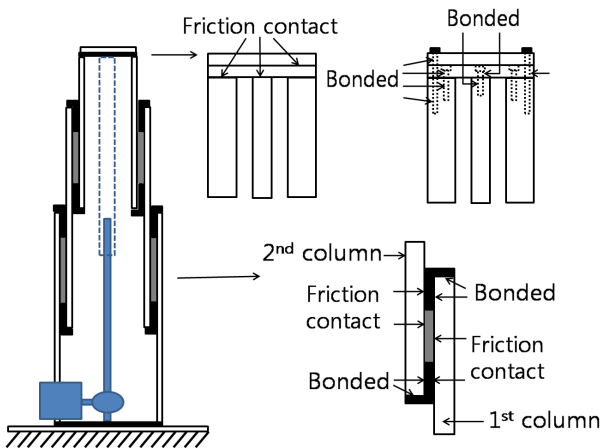


그림 7 접촉조건 부여

표 1 리프트 칼럼의 재료 물성값

	Young's modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Yield stress (N/mm <sup>2</sup> )
Aluminum	71.5	0.32	299
Plastic	2.4	0.35	60.76
Steel	200	0.3	250

### 3.2 구조해석 결과

리프트 칼럼의 수직 상승 스트로크가 700mm, 400mm, 200mm 그리고 10mm를 각각 상태1, 2, 3 그리고 4로 구별하여 구조해석을 수행하였다. 그림 8은 4가지 상태에 있어 각 칼럼에서 최대 등가응력을 나타내는 그림 9에 도시한 각 지점의 스트로크에 따른 최대 등가응력의 변동을 보여주고 있다.

그림 8에 나타난 바와 같이 3번 칼럼에 있어서 최대 등가응력은 스트로크에 따라 변동이 그다지 심하지 않은 반면, 1번과 2번 칼럼은 스트로크가 작을수록 최대 등가응력이 전반

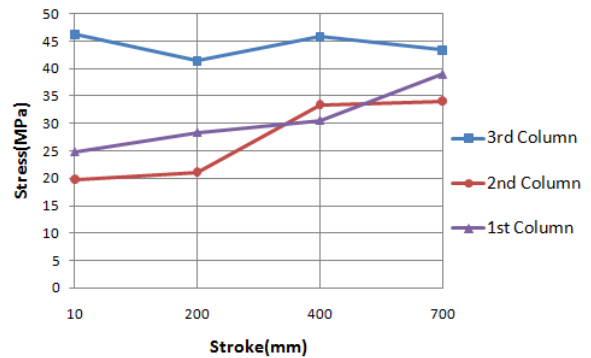


그림 8 최대 등가응력을 나타내는 칼럼 내 각 지점에서의 등가응력의 변동

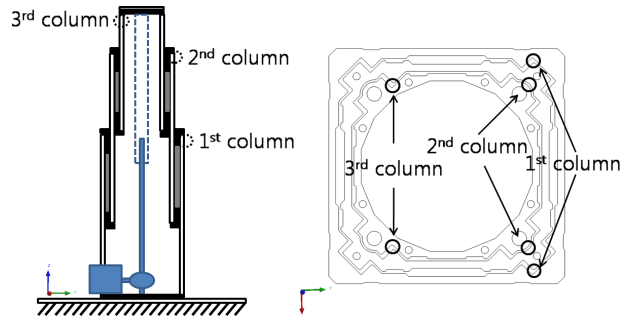


그림 9 최대 등가응력이 작용하는 지점

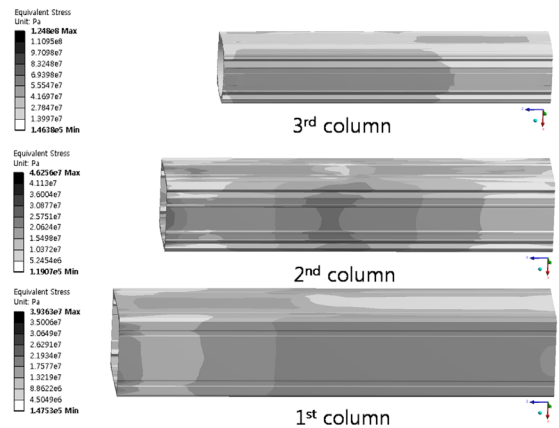


그림 10 상태 1에서의 등가응력 분포

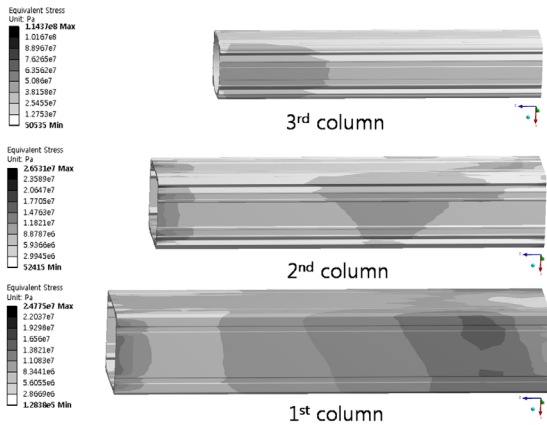


그림 11 상태 4에서의 등가응력 분포

적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

상태 1과 상태 4에 있어서 전체 리프트 칼럼에 작용하는 응력분포를 그림 10과 11에 나타내었다. 상태 1의 경우, 3번 칼럼에서 43.31MPa, 2번 칼럼 상부에서 34.05MPa 그리고 하부에서 46.25MPa, 그리고 1번 칼럼에서 39.06MPa의 최대 등가응력을 나타내었다. 반면, 스트로크가 가장 작은 상태 4의 경우, 3번 칼럼은 상태 1과 동일한 위치에서 46.25MPa의 최대등가응력이 나타났으며, 2번 칼럼의 상부와 하부는 각각 19.8MPa와 6.53MPa의 최대 등가응력을 나타내었다. 그리고 1번 칼럼은 24.78MPa의 최대 등가응력을 보였다.

#### 4. 피로수명 예측

##### 4.1 피로수명 예측기법

그림 8과 같이 물체 내에 발생하는 응력이 복합 응력변동으로 구성되어 있을 경우, 각 응력변동이 물체의 피로에 미치는 기여도는 각기 다르다. 이와 같이 복합 응력변동에 따른 물체의 피로수명을 예측하기 위해 Miner's rule이라 불리는 Palmgre-miner 피로축적법이 주로 사용된다. 만일 물체의 한 사이클 동작동안  $\Delta\sigma_i$ 라는 응력변동이  $n_i$ 번의 사이클을 나타낸다면, 이 응력변동에 의한 피로축적분은  $n_i/N_i$ 로 계산된다. 여기서,  $N_i$ 는  $\Delta\sigma_i$ 에 대한 해당 물체의 S-N선도로부터 피로수명 사이클을 나타낸다.

따라서, 물체의 한 사이클 동작동안 임의 지점의 응력이 M개의 응력변동으로 표현된다면, 물체의 한 사이클 동작동안 이 지점에 축적되는 피로량은 아래와 같이 각 응력변동에 의한 피로축적량의 합으로 계산된다.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

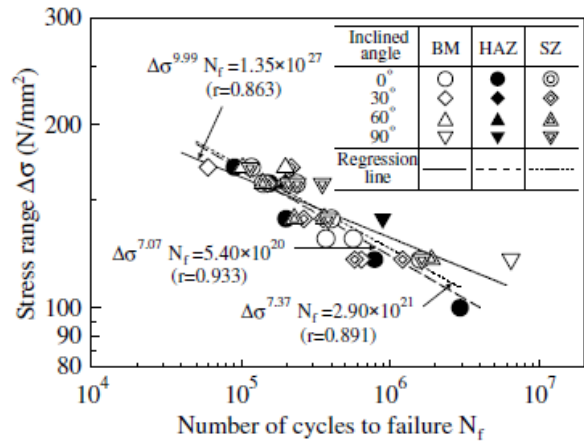


그림 12 A6N01S-T6의 S-N선도(Kainuma 등, 2008)

그리고 이 합의 역수가 바로 해당 지점의 피로수명 사이클이 된다.

각 응력변동의 사이클 수를 계산하기 위한 카운팅 기법(counting method)으로 range-pair, rainflow 그리고 reservoir의 3가지 방법이 대표적으로 사용되고 있다. 본 연구에는 reservoir 카운팅 방법을 적용하였다.

각 변동응력에 해당하는 피로수명 사이클을 구하기 위해서는 해당 재료의 S-N선도가 필수적이다. 본 연구에서는 Kainuma 등이 제시한 그림 12의 실험 데이터를 적용하였다. 그림에서 BM, HAZ 그리고 SZ는 각각 “base aluminum material”, “heat-affected zone” 그리고 “stirred zone”을 나타낸다. 본 연구에서는 BM 실험 데이터의 회귀곡선을 S-N선도로 활용하였다:

$$\Delta\sigma^{0.99} N_f = 1.35 \times 10^{27} \quad (2)$$

##### 4.2 피로수명 예측결과

리프트 칼럼 내 최대 등가응력 변동을 나타내는 그림 8을 토대로 상하 1사이클 운동 동안 각 칼럼 내 최대 등가응력 변동을 그림 13~15에 나타내었다. 칼럼 1과 2의 경우에는 하나의 응력변동 사이클을 반면 칼럼 3의 경우는 3개의 응력변동 사이클로 구성되어 있음을 확인할 수 있다.

각 칼럼에 있어 상하 1사이클 운동 속에 포함되어 있는 최대 등가응력 사이클의 응력변동의 크기와 사이클의 개수는 표 2와 같다. 이 값을 식 (2)에 대입하여  $N_f$ 를 계산한 후 그 역수를 취하면 리프트 칼럼 상하 1사이클 동안의 피로누적량을 계산할 수 있다. 그리고 Palmgre-miner 피로축적법 (1)로부터 각 칼럼의 피로수명을 표 2와 같이 구할 수 있다.



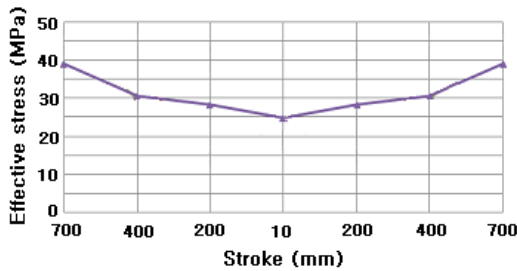


그림 13 칼럼 1의 reservoir cycle counting

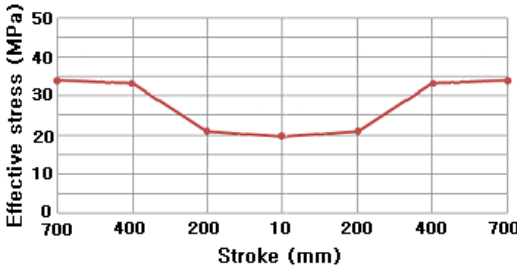


그림 14 칼럼 2의 reservoir cycle counting

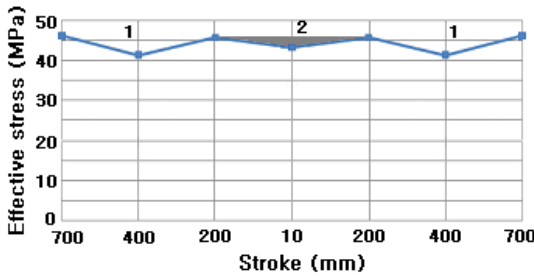


그림 15 칼럼 3의 reservoir cycle counting

표 2 각 칼럼의 피로수명 예측치

칼럼	응력변동 (N/mm <sup>2</sup> )	Cycle 수	Cycle당 피로누적	피로수명 (cycle)
1	14.28	1	2.543-E16	3.932+E15
2	14.25	1	1.299-E13	7.698+E12
3	4.88	2	1.117-E20	8.771+E19
	3.55	1	2.325-E22	

현 리프트 칼럼 설계안에서는 2번 칼럼이 피로수명이 가장 낮으며, 3번 칼럼이 상대적으로 높은 피로수명을 나타낸다. 따라서 리프트 칼럼 전체 수명은 2번 칼럼을 기준으로  $7.698 \times 10^{12}$  사이클로 예측할 수 있다.

### 5. 결 론

최대 250kgf·m의 편하중을 상하로 정밀하게 이송하는 3단 의료용 리프트 칼럼의 피로수명을 수치해석적으로 분석하였다. 리프트 칼럼의 상하 1주기 동안 칼럼 내 발생하는 응력변동은 유한요소해석을 통해 구했으며, 복합 응력변동에 따른 피로수명은 Miner's rule, reservoir 사이클 카운팅 방법 그리고 S-N선도를 활용하여 평가하였다. 피로수명 예측결과 현 리프트 칼럼은 2번 칼럼이 가장 낮은 피로수명을 나타내었으며, 2번 칼럼을 기준으로 전체 리프트 칼럼의 피로수명은  $7.698 \times 10^{12}$  사이클로 평가되었다.

### 후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

박상신, 안유민, 김영진 (1997) 화물차 차량부착용 암형 리프트 설계 프로그램의 개발, 한국CAD/CAM학회 논문집, 2(4), pp.244~252.

이덕영, 윤재용, 이수철, 임구 (2005) 스쿠터 승하차를 위한 밴승합차용 윈치 리프트 설계, 한국정밀공학회지, 22(5), pp.189~196.

이재훈, 최종호, 조진래, 이인수 (2007) 유한요소 해석을 이용한 선박용 엔진 프레임 박스 용접부의 피로수명 예측, 한국전산구조공학회 논문집, 20(5), pp.573~580.

Kainuma, S., Katsuki, H., Iwai, I., Kumagai, M. (2008) Evaluation of Fatigue Strength of Friction Stir Butt-Weled Aluminum Alloy Joints inclined to Applied Cyclic Stress, *International Journal of Fatigue*, 30, pp.870~876.

Maddox, S.J. (1991) Fatigue Strength of Welded Structures, Abington Publishing, Cambridge, pp.198.

- 논문접수일 2011년 3월 8일
- 논문심사일 2011년 3월 22일
- 게재확정일 2011년 5월 13일