

<논 문>

굴삭기 작업장치의 해석시스템 개발

권순기* · 박형진** · 서민석*** · 김형근***

(1995년 2월 27일 접수)

Development of Simulation System for Front Attachment of Excavator

Soon Ki Kwon, Hyung Jin Park, Min Suke Suh and Hyung Gun Kim

Key Words : Stress-Time History(응력이력), Fatigue Life(피로수명), Transient Dynamic Analysis(과도응답해석), Mode Superposition Method(모드중첩법)

Abstract

This paper presents a method to predict fatigue life of a construction equipment performing static stress analysis and dynamic stress analysis using the computer simulation for proto and pilot type model. The parameter of design variable is used for finite element modelling of a excavator. Designer can design reliable product and shorten lead time by using "Simulation System for Front Attachment of Excavator" developed in this study.

1. 서 론

굴삭기 작업장치는 작업의 특성상 가혹하고 다양한 하중에 노출되어 설계의 초기단계에서 구조물의 안정성 평가와 수명을 예측하는데 어려움이 있다. 이제까지의 설계는 주로 정적해석 결과에만 의존하였으며, 실제 구조물에 작용하는 동적하중에 의한 영향은 실차시험을 통해서만 반영되었다. 따라서 설계의 초기단계에서 정적해석 뿐만 아니라 동적해석 결과를 고려할 수 있고 피로수명을 예측할 수 있는 기법의 필요성이 대두되었다. 또한 굴삭기 작업장치는 작업종류가 다양하여 같은 모델에 대해서도 작업자세에 따라 다시 모델링을 해야 하는 번거로움이 있어서 보다 효율적인 모델링 기법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 ANSYS⁽¹⁾로 설계변수를 파라미터(parameter)화 한 유한요소 모델링 기법을 통해 모

델링에 소요되는 시간을 단축하며 해석 소프트웨어에 익숙하지 않은 일반 설계자들도 설계 변경에 따른 해석 필요시 쉽게 사용할 수 있게 하고, 이를 바탕으로 정·동적 응력 해석을 수행하여 장비의 피로수명을 예측할 수 있는 해석시스템을 구성하고자 한다.

2. 해석방법 및 대상의 유한요소 모델링

본 연구의 해석방법은 Fig. 1과 같으며, 이것은 굴삭기 작업장치의 해석시스템에 대한 전체 해석 순서도를 나타낸다.

작업장치의 각 구조물에 대한 유한요소 모델을 개별적으로 만든 후, 두께와 상대각도와 같은 설계 변수를 파라미터화하여 규정된 두께와 작업자세를 이룰 수 있도록 작업장치의 각 구조물들을 조립하여 유한요소해석을 위한 작업장치를 구성한다. 정적하중 상태에서 정적해석을 하여 구조물의 허용응력을 만족하는지 확인하고, 모드해석을 수행하여 구조물의 동특성을 파악하며, 과도응답해석(transient dynamic analysis)에 필요한 조건을 구한다.

*회원, 삼성중공업(주), 현재 삼성자동차(주)

**회원, 부산대학교 대학원 기계설계공학과

***삼성중공업(주) 창원연구소

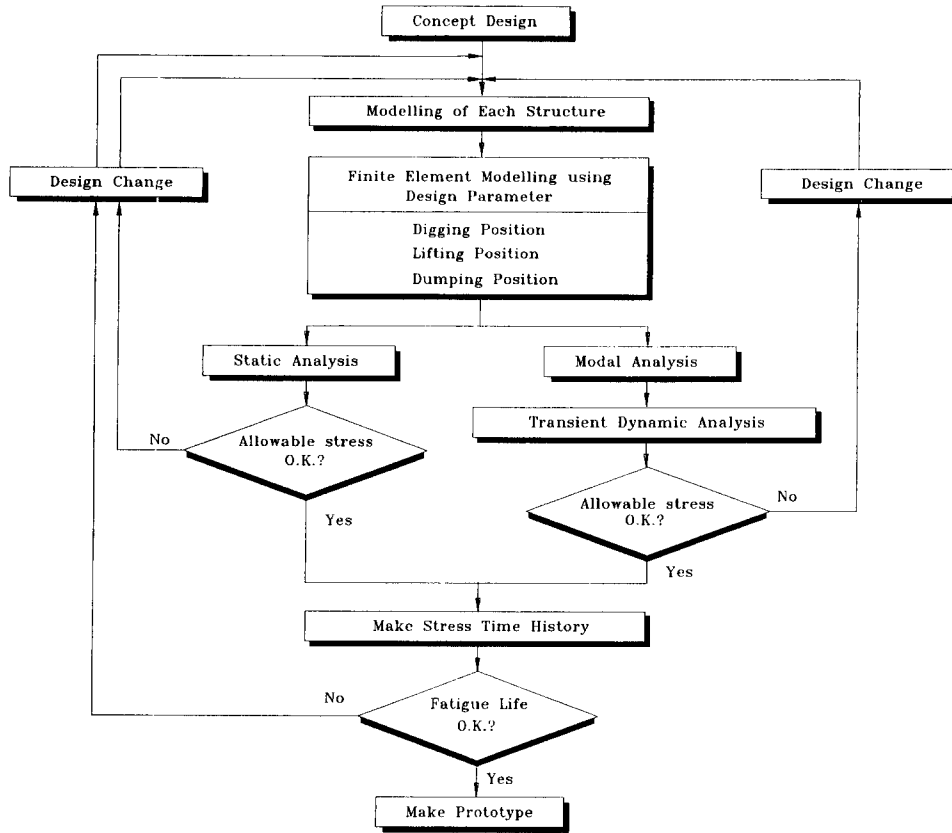


Fig. 1 Flow chart for analysis system

과도응답해석에서는 작업자세별 충격하중에 대한 응력이력(stress-time history)과 해석대상 구조물에 적합한 피로수명선도(S-N curve)를 이용하여 피로수명을 산출한다. 해석에 의하여 산출된 피로수명이 요구수명에 만족되는지 파악한 후, 조건을 만족하면 Prototype제작에 들어가게 되고, 그렇지 않으면 설계변경을 하여 요구수명을 만족할 때까지 다시 작업한다.

해석대상은 중장비 중에서 최대 굴삭하중이 24.5톤인 굴삭기의 작업장치를 선정한다. 굴삭기는 토양 또는 암반을 굴삭(digging)·인양(lifting)·상차(dumping)하는 것을 주작업으로 하며, 주요제원 및 형상은 Fig. 2와 같다. 굴삭기의 작업장치는 붐(boom), 암(arm), 버킷(bucket), 실린더(cylinder), 핀(pin) 등으로 구성되는 데, 이 중에서 붐은 실제 작업에서 가혹한 하중작용으로 인하여 파손이 자주 발생하는 부분이고, 형상이 길쭉하여 저주파 진동의 영향을 많이 받기 때문에, 이에 대하여 정·동

적해석 및 피로해석을 한다.

굴삭기 작업장치는 몇개 구조물들의 복합작용으로 작업이 수행되기 때문에 작업조건이 매우 다양하지만, 신작업시의 굴삭, 인양, 선회, 상차와 같은 몇가지 대표적인 작업자세를 규정할 수 있다. 이와같이 작업자세가 바뀌게 됨에 따라 같은 해석 모델도 다시 모델링 작업을 해야 하는 번거로움이 있었다. 또한 작업자세가 변하면 하중조건도 바뀌게 되는 데, 이러한 변화에 따른 반복되는 작업은 모델링 시간이 많이 소요되며 전체 해석 시간을 길게 하는 원인이 되었다. 그리고 두께를 변화시켜서 원하는 설계조건을 만족시키려고 할 때도 두께를 수정하는 데 많은 시간을 소요하게 된다.

이러한 모델링 작업시의 문제점을 해결하기 위하여 설계변수를 파라미터로 만들어서 반복작업을 없앨 수 있다. 즉, 유한요소 모델에서는 각 구조물을 개별적으로 모델링한 후에 각 구조물 사이의 상대 각도와 모재의 두께를 파라미터로 정의하여 일괄처

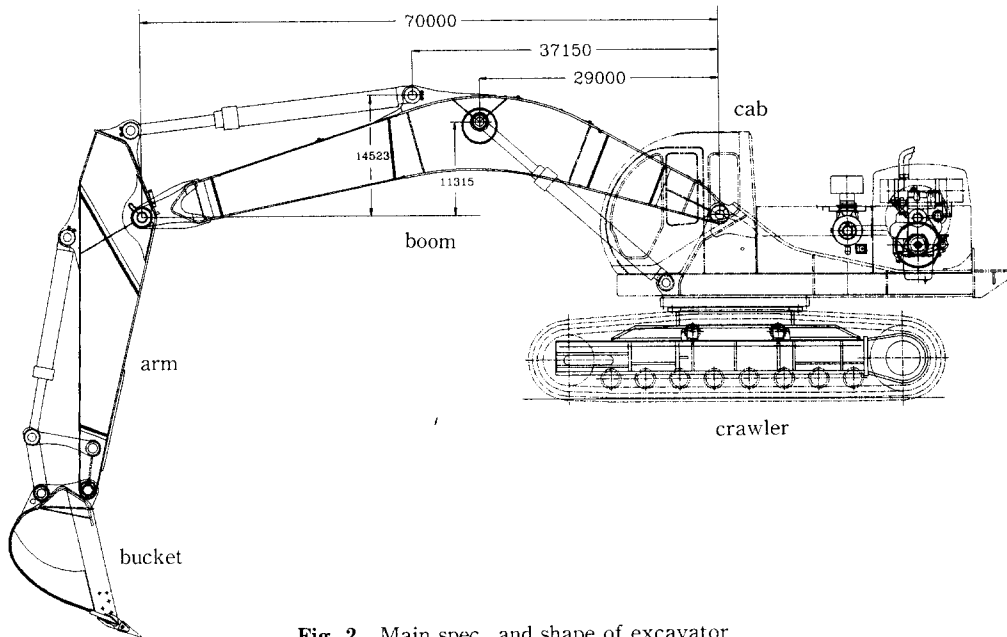


Fig. 2 Main spec. and shape of excavator

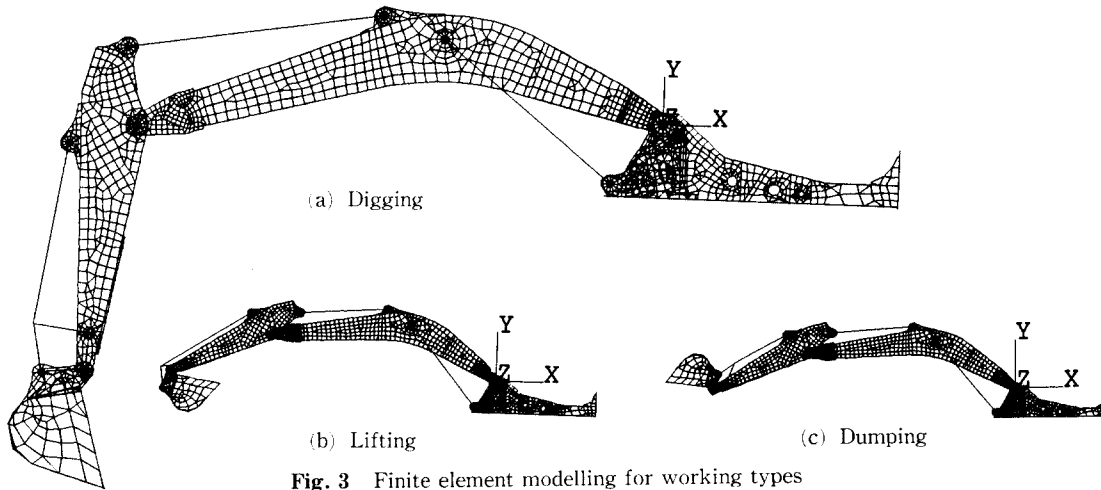


Fig. 3 Finite element modelling for working types

리 파일을 작성하므로써 원하는 작업자세와 모재 두께로 모델링할 수 있다.

각 구조물의 모재는 ANSYS⁽¹⁾의 SHELL63 (elastic shell)요소를 사용하였으며, 실린더와 각 구조물의 연결부인 핀은 단면적에 해당하는 BEAM4(3-D elastic beam)요소로 모델링하였다. 요소수는 7001개이고, 절점수는 7805개이다.

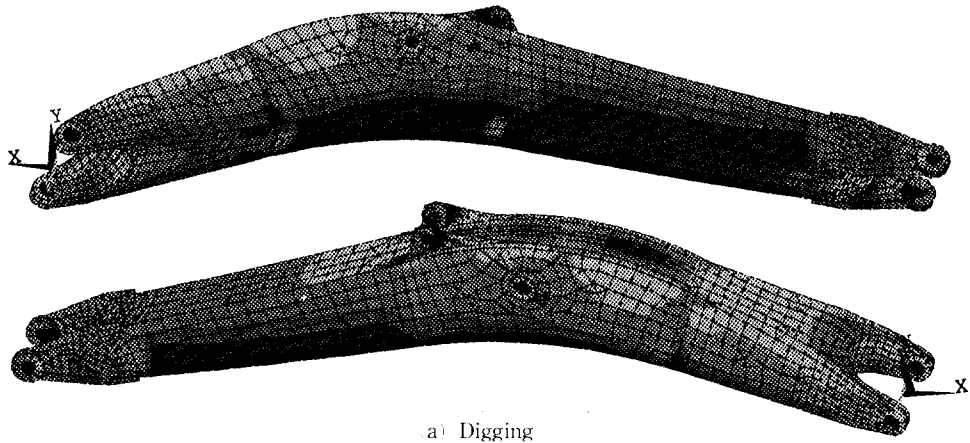
설계변수를 파라미터화하므로써 모델링에 소요되는 시간을 단축시키고 ANSYS와 같은 해석 소프트

트웨어에 익숙하지 않은 일반 설계자들도 쉽게 해석을 수행할 수 있도록 하였다.

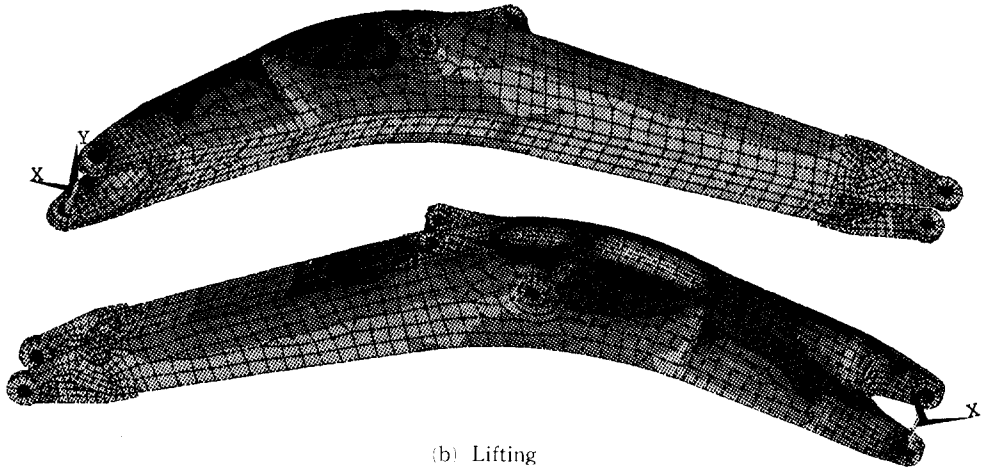
Fig. 3은 앞에서 언급한 방법으로 생성시킨 각 작업자세에 대한 유한요소 모델을 나타낸다.

3. 정하중해석

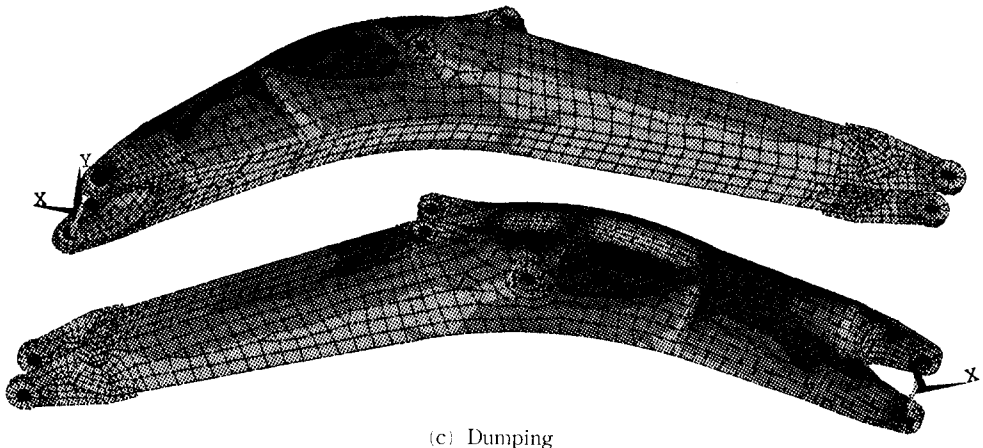
Prototype 설계단계에서 작업장치에 대한 유한요소 모델을 벤치시험(bench test) 자세로 만들어



a) Digging



(b) Lifting



(c) Dumping

Fig. 4 Static analysis results for working types

Table 1 Stress comparison for static analysis and bench test

(Unit:kg/mm²)

Location	Analysis	Test	Difference percentage
Front lug	8.44	9.76	13.5%
Center bearing	7.67	8.22	6.9%
Rear bearing	5.04	5.38	6.3%

서 해석을 하였는데 그 결과를 시험결과와 비교하므로써 해석모델의 신뢰도를 확보한 후, 실작업 상태를 고려하여 굴삭·인양·상차자세와 같은 다양한 작업자세에 대하여 정적 응력해석을 수행하여 초기설계 단계에서 구조물의 응력분포를 확인하였다. Fig. 4는 각 작업자세별 해석결과를 나타낸다. Fig. 4(a)의 굴삭자세는 벤치시험자세와 같으며 각 실린더에서 발생시킬 수 있는 최대 힘으로 버켓 끝단에서 최대의 굴삭력을 얻을 수 있는 작업조건이다. Fig. 4(b)의 인양자세는 붐과 아암이 반경방향으로 최대한 뻗은 상태에서 버켓을 최대로 접은 자세이고, 이때 버켓에 최대로 담을 수 있는 무게를 작용하중으로 하였다. Fig. 4(c)의 상차자세는 인양자세에서 버켓에 작용하는 무게를 없애고 버켓을 반경방향으로 최대한 펼친 것을 제외하고는 인양자세와 동일하다.

선회작업은 인양자세와 동일한 상태에서 자중과 선회충격력만 받게 된다.

하중조건은 각 작업자세에 대하여 최대설계하중으로 설정하였다. 해석결과 Fig. 4(a)에 나타난 굴삭자세에서의 주응력분포는 Table 1과 같이 동일한 자세인 벤치시험에서 스트레인게이지(strain gage)로 얻은 변형률을 주응력으로 바꾼 결과와 잘 일치하였다.

그리고 붐 중앙 만곡부 밀판에서는 굴삭작업시 Fig. 4(a)와 같이 인장응력이 발생하고 인양작업과 상차작업시에는 각각 Fig. 4(b), Fig. 4(c)와 같이 압축응력이 생기는 데, 내구성 시험조건으로 최대 굴삭하중과 같이 가장 극한적인 작업상황 1가지 만을 고려하는 것과는 달리 이와같은 현상은 구조물의 피로수명에 좀 더 영향을 미칠 것으로 예상된다.

4. 과도응답해석

Pilot 설계단계에서는 작업장치가 실제 작업을

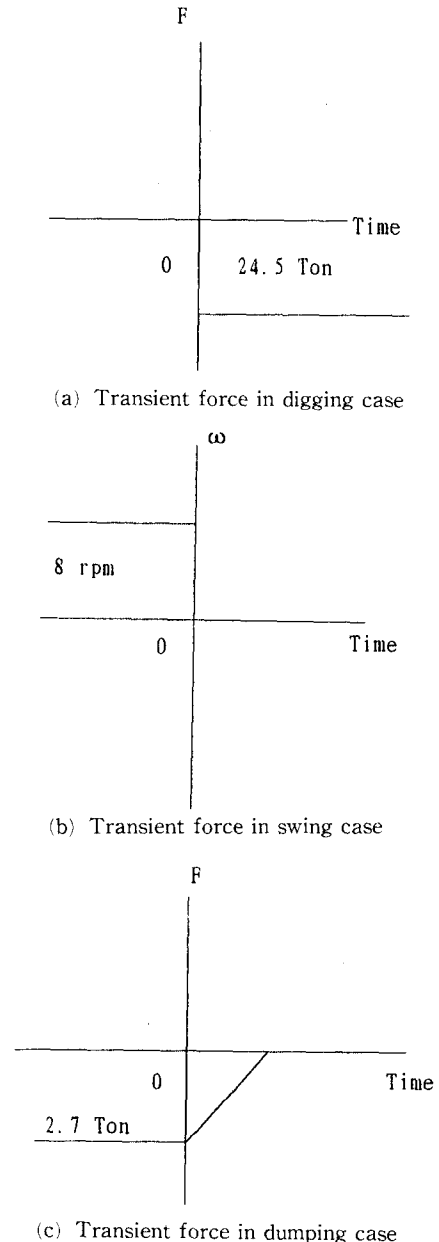
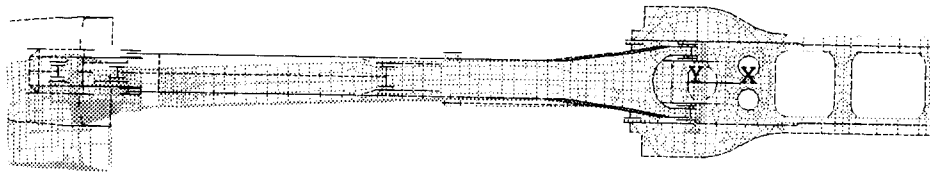


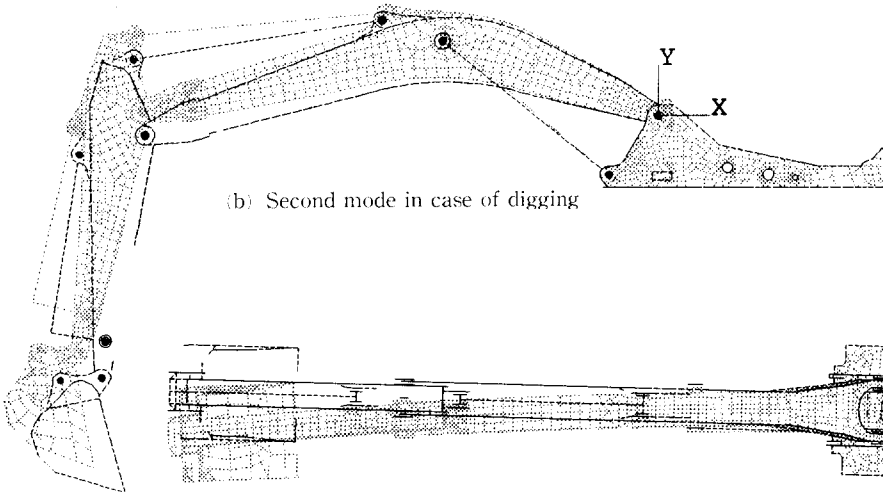
Fig. 5 Loading cases for transient dynamic analysis

Table 2 Modal analysis for working type

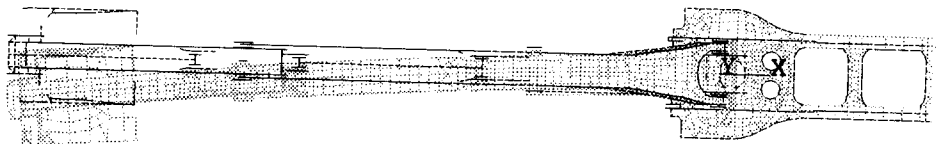
Mode	Frequency (Hz)		FFT result
	Digging position	Lifting position	
1	2.4139	2.5121	
2	5.2421	4.6976	
3	7.6874	8.7448	
4	12.6556	10.8201	
5	20.5638	15.4282	



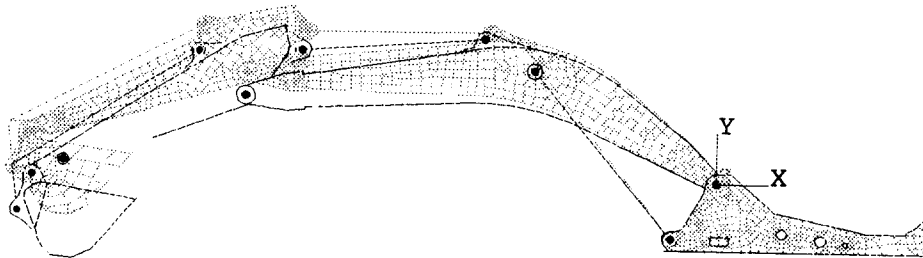
(a) First mode in case of digging



(b) Second mode in case of digging

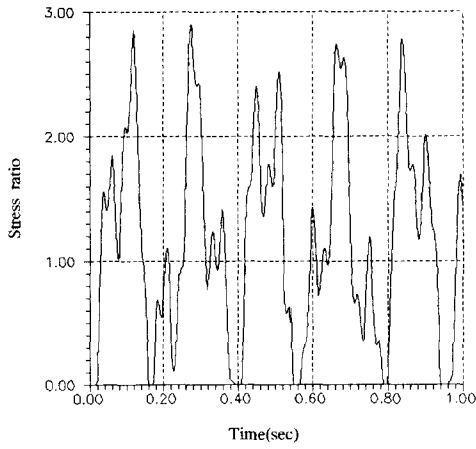


(c) First mode in case of lifting

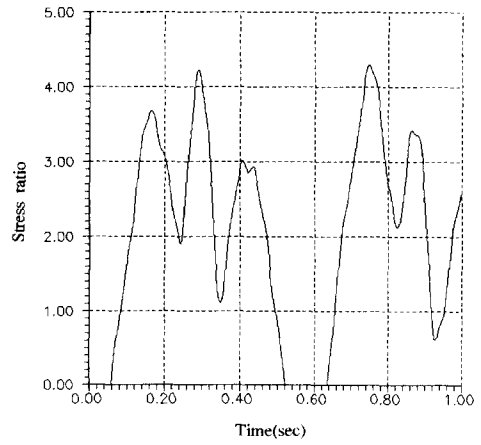


(d) Second mode in case of lifting

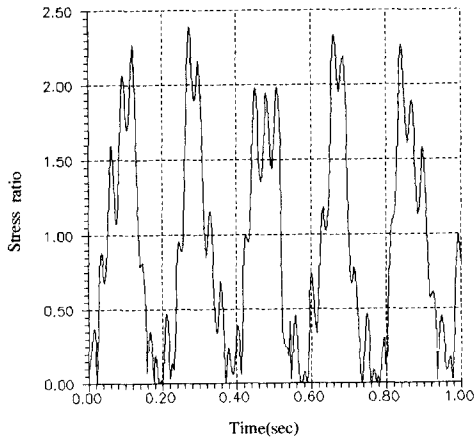
Fig. 6 Mode shapes of digging and lifting



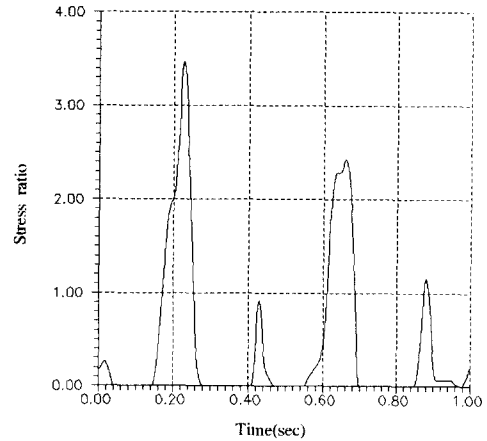
(a) At the front lug in digging position



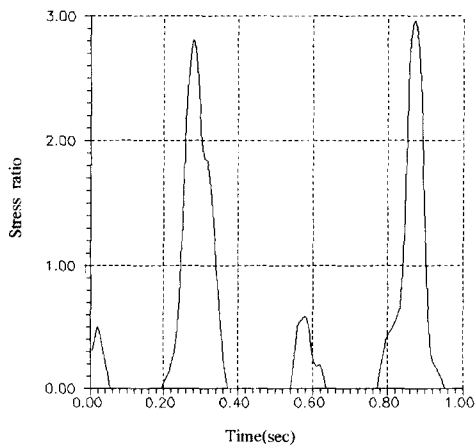
(d) At the center bearing in swing position



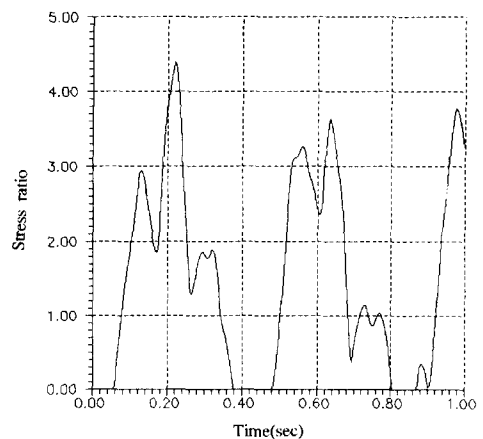
(b) At the center bearing in digging position



(e) At the front lug in dumping position



(c) At the front lug in swing position



(f) At the center bearing in dumping position

Fig. 7 Transient responses of interesting position for each working types

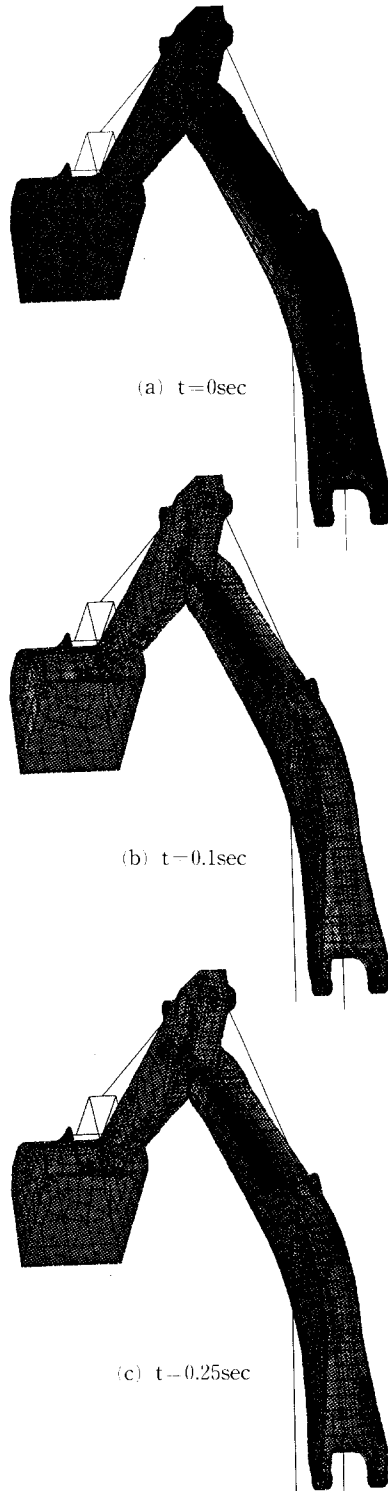


Fig. 8 Stress distribution with time for swing operation

하는 도중에 받는 굴삭하중, 선회충격, 상차충격 등과 같은 동하중에 의한 과도응답해석을 수행하였다. 굴삭충격은 굴삭자세에서 최대굴삭하중(24.5 톤)을 Fig. 5(a)와 같이 버킷 끝단에 작용시켰으며, 선회충격은 인양자세에서 Fig. 5(b)와 같이 정적 선회속도로 회전중 갑자기 정지하는 경우로 해석하였다. 그리고 상차충격은 상차자세에서 Fig. 5(c)와 같이 버킷에 작용하는 하중을 갑자기 제거시키는 형태로 해석하였다.

과도응답해석에 필요한 조건을 구하기 위하여 구조물의 고유치해석을 수행하였으며, Table 2는 굴삭자세와 인양자세에 대한 고유치해석 결과와 FFT(fast Fourier transform)결과를 나타낸 것이고, Fig. 6은 해당자세에서의 2번째까지의 모드형상(mode shape)을 나타낸 것이다. 고유치해석 결과 굴삭자세와 인양자세 모두가 첫번째 모드는 좌우방향으로, 두번째 모드는 상하방향으로 나타났는데, 이것은 실제 굴삭기가 작업할 때 파손을 가장 많이 일으킬 수 있는 모드이다.

과도응답을 얻기 위하여 FFT를 사용하였으며, FFT는 외력이 작용할 때 모드중첩법(mode superposition method)에서 어떠한 모드(mode)를 고려할 것인가를 결정하는 것으로서, 고려해야 할 모드가 10Hz 미만인 것에 불과하기 때문에 Table 2와 같이 5개 모드만을 고려하였다.⁽²⁾ Fig. 7은 붐의 Front lug부와 Center bearing부에서 시간에 따른 응력응답(stress response)결과를 나타낸 것이고, 세로축의 Stress ratio는 정적해석결과의 응력에 대한 동적해석결과의 응력의 비를 의미한다. 특히 Fig. 8은 선회충격시의 시간에 따른 응력분포를 나타낸 것인데, 붐에서의 최대응력이 초기에 Front lug에서 발생하였으나, 시간이 지남에 따라 Front lug로부터 Center bearing 앞쪽에 위치한 보강관 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. Front lug부의 응력분포 경향은 정적해석 결과 유사하지만 응력 수준이 증가하였고, Rear lug부분에서는 정하중 작용시 볼 수 없었던 응력집중 현상이 나타났으며, Rear lug부분의 뒷관과 곡면이 만나는 부위는 응력 수준이 상대적으로 높게 나타났다.

5. 피로해석

굴삭기의 내구성을 시험으로 평가하는 작업은 많은 시간과 비용을 요구하므로 이를 개선하기 위하

여 피로해석을 통한 내구성 예측의 필요성이 대두되었다. 벤치에서 시험이 가능한 조건인 굴삭후 측하중이 작용하는 경우에 대해서 내구성시험을 한 결과를 피로해석 결과와 비교하여 해석의 신뢰도를 확보한 후에, 실제 작업에서 일어날 수 있는 다른 자세들의 피로수명이 이 경우에 대해서 상대적으로 어떻게 변화하는지 비교하였다. 그리고 90° 상차작업을 Table 3과 같이 굴삭작업, 선회작업+봄상승작업, 덤프작업, 선회작업+봄하강작업으로 나누고, 이것을 표준작업(standard working) 1사이클(cycle)로 정의하여 과도응답해석을 통하여 구한 동적응력에 의한 피로수명을 예측하였다.

먼저, 벤치에서 수행되는 내구성 시험과 실제에서 일어나는 각 작업들의 상대적인 피로수명을 예

측하기 위하여 작업조건은 굴삭작업, 굴삭후 상차작업, 굴삭후 최대인양작업 그리고 굴삭후 측하중을 받는 경우를 선택하였고, 각 작업에 대한 응력 이력은 유한요소해석으로 구하여 그 중에서 만곡부 밀판 부위에 대한 결과를 Table 4에 나타내었다.

피로해석의 신뢰도를 확보하기 위하여 Prototype 장비에 대해서 봄 만곡부 밀판과 Front lug 축판에 대한 피로해석 결과를 벤치 내구성시험 결과와 비교하였다. 이때의 작업자세는 굴삭자세이며 하중조건은 굴삭후 측하중이 작용하며, 이러한 조건에서의 요구수명은 1.0E6 사이클이다. 해석결과는 Table 5와 같이 만곡부 밀판에서 4.4E5 사이클, Front lug 축판에서 3.8E5 사이클로 계산되었으며, 내구성 시험에서는 Front lug 축판에서 4.

Table 3 Standard working type for 1 cycle in actual field

Standard Working type	Part working type	Working position	Working time(sec)	Working rate(%)
Digging	Digging (standard)	Digging position	6.77	29.44
Swing + Lifting	Lifring	Lifting position	8.05	35.00
	Swing (impact)	Lifting position		
Dumping	Dumping (impact)	Dumping position	3.07	13.34
Swing + Descending	Gravity load (Descending)	Dumping position	5.11	22.22
	Swing (impact)	Lifting position		

Table 4 Stress-time history at lower bending plate for each working type (Unit:kg/mm²)

Working type	Stress range	Stress ratio	Stress-time history
Digging	12.25~0.00	0.00	
Digging + Dumping	12.25~- 4.10	-0.34	
Digging + Lifting	12.25~- 12.40	-0.99	
Digging + Side force	13.10~0.00	0.00	

Table 5 Fatigue analysis results for each working type

Working type	Lower bending plate (BS2573 part 1 class E)			Side plate of front lug (BS2573 part 1 class F)		
	Stress range (kg/mm ²)	Stress ratio	Fatigue life (cycle)	Stress range (kg/mm ²)	Stress ratio	Fatigue life (cycle)
Digging	12.25~ 0.00	0	6.6E5	10.80~ 0.00	0	4.5E5
Digging +Dumping	12.25~ -4.10	-0.34	2.5E5	10.80~ -2.10	-0.19	2.8E5
Digging +Lifting	12.25~ -12.40	-0.99	0.5E5	10.80~ -6.90	-0.64	1.0E5
Digging +Side force	13.10~ 0.00	0	4.4E5	11.23~ 0.00	0	3.8E5

1E5 사이클 후에 크랙이 발생되어 약간의 오차는 있지만 타당한 해석 결과라고 판단된다. 피로수명 선도는 용접형상과 작용하중의 방향을 고려한 BS2573⁽³⁾을 이용하였다. Prototype에 대한 피로해석 결과는 Table 5에 나타내었다.

상대적인 피로수명이 반곡부 밑판 부위에서, 굴삭 작업을 할 때는 굴삭후 측하중을 작용할 때에 비하여 150%, 굴삭후 상차작업을 할 때는 57%, 굴삭후 최대인양작업을 할 때는 11% 정도의 수명을 보였다. 그리고 Front lug 측판부위에서 굴삭 작업을 할 때는 굴삭후 측하중을 작용할 때에 비하여 118%, 굴삭후 상차작업을 할 때는 74%, 굴삭후 최대인양작업을 할 때는 26% 정도의 수명을 보였다.

한편, 표준작업에 대한 피로해석을 하기 위하여 과도응답해석에서 구한 응력이력을 구한다. 이것으로 부터 Rainflow Counting법⁽⁴⁾으로 구한 응력 사이클을 Modified Goodman의 규칙(rule)을 이용하여 Zero mean stress로 수정한 후, 선형 누적손상법칙인 Miner의 식을 주어진 피로수명 선도에 적용하여 피로수명을 계산하게 된다. 피로해석결과는 반곡부 밑판부위에서 3.7E5 사이클이고, Front Lug 측판부위에서는 2.9E5 사이클이었다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 설계변수를 파라미터화하여 유

한요소모 델링을 할 수 있었고, 정·동적 응력해석 그리고 피로수명 예측을 할 수 있는 일련의 시스템을 구축하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 설계변수를 파라미터화하여 모델링에 소요되는 시간을 현저하게 단축시킬 수 있었고, 일반 설계자들도 쉽게 활용할 수 있도록 하였다.
- (2) 동하중 작용시 과도응답해석을 통하여 정적 응력해석에서는 확인할 수 없는 국부응력과 시간에 대한 응력의 흐름을 확인할 수 있었다.
- (3) 정·동적해석을 이용한 피로해석 기법을 통하여 설계단계에서 작업자세별 상대적인 피로 수명 을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) "ANSYS Theoretical Manual," 1989, Swanson Analysis System.
- (2) Newland, D.E., 1989, *Mechanical Vibration Analysis and Computation*, Longman Scientific & Technical.
- (3) "BS2573:Part 1, Rules of the Design of Cranes," 1983; Part 1. Specification for classification, Steel Calculations and Design Criteria for Structure.
- (4) Fuchs, H.O. and Stephens, R.I., 1980, *Metal Fatigue in Engineering*, A Wiley-Interscience Publication.