

ODS를 이용한 굴삭기 상부프레임 진동 해석

김원영, ⁰전범석, 박경철

Running Mode Analysis of Excavator Upper Frame

WON-YOUNG KIM, BEOM-SEOK JEON, KYUNG-CHUL PARK

Key Words: ODS(Operational Deflection Shape), Upper Frame, MAC(Modal Assurance Criterion)

Abstract

The Operational Deflection Shape designates the motion pattern by which a structure vibrates under a specific operating condition. Modal Analysis is usually tested under test bench, but Operational Deflection Shape can be measured directly under real operating condition. It provide useful information for trouble-shooting and aid understanding and evaluation of the absolute dynamic behaviour of a machine or component. In this paper, It is analysed Excavator Upper Frame using Operating Deflection Shape.

I. 서론

굴삭기는 작업시 가혹하고 빈번한 동적 부하에 노출되기 때문에 동적 부하에 대한 동적 변형 응답을 정확히 예측하고, 합리적인 설계 방안의 개발은 중요한 과제이다.

동적 해석 방법으로 현재 실험적인 모드 해석(Experimental Modal Analysis)이 많이 적용되고 있으나, 주로 Test Bench에서 이루어지고 실차상태에서의 문제점을 정확히

반영할 수 없다는 단점이 있다.

이에 반해 동적 변형 모드(ODS, Operational Deflection Shape)는 구조물이 특정 작동 조건하에서 진동하는 형태를 실차 상태에서 측정하고 분석하기 때문에 공진 특성 및 가진 특성을 정확히 파악할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 ODS를 이용하여 굴삭기 상부 프레임의 동적 특성 규명을 실시하고, 실차 진동 문제를 파악하였다.

II. 진동 특성 규명 이론

1. 동적 변형 모드(ODS)

(1) ODS 개요

ODS는 구조물이 특정 작동 조건(specific operation condition)하에서 진동하는 형태로 모드가 lightly coupled인 시스템에서 공진에 의한 문제의 경우 ODS는 공진주파수에 해당하는 모드형태와 같게 나타나고, modal coupling이 큰 시스템에서 문제를 유발하는 주파수가 고유진동수 사이에 있으면 ODS는 근처모드의 임의의 선형 결합으로 표현할 수가 있다.

이같은 특성으로 ODS는 진동이 과도한 가진에 의한 것이든 자체의 공진 증폭 현상에 의한 것이든 동적 변형의 가시화(visualization)는 문제를 이해하는데 결정적인 역할을 수행한다.

ODS는 계산 방법에 따라 직접측정법과 Modal model을 이용한 간접추정법으로 나눌 수 있다.

(2) System Analysis Approach

using Modal Model

Modal Model을 이용한 접근 방법은 계의 선형성 및 외부 가진력 $\{F(\omega)\}$ 를 가정하며, full scale modal test로부터 modal model 구성을 위한 모드 형상, 고유진동수, 감쇠값을 추출한다.

이 방법은 다른 작동 조건하에서도 적용이 가능한 동특성 모델을 확보할 수 있고, 과

도 응답 해석(Transient response analysis) 및 구조물 변경등의 시뮬레이션에도 적용가능한 해석적으로 유용한 모델을 제공할 수 있다.

반면 가진조건인 $\{F(\omega)\}$ 를 설정하기 어려워 공간상에서의 외력의 정량화가 힘들다. ODS에서 나타나는 응답값은 다음과 같다.

$$\{X(\omega)\} = \sum_{r=1}^m \left[\frac{\{\phi_r^T\}\{\phi_r\}}{j\omega - p_r} + \frac{\{\phi_r^*\}^T\{\phi_r^*\}}{j\omega - p_r^*} \right] \{F(\omega)\} \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

(3) Signal Analysis Approach

using Transmissibility

Transmissibility(TR)를 사용하는 직접 측정 방법은 한개 또는 소수의 작동 조건하에서의 진동에 관심이 있으며 modal test를 하기 어려운 경우, 가진조건을 시험 또는 해석적으로 구하기 어려운 경우, 구조물에 비선형성이 강하게 나타난다고 생각되는 경우 등에 사용된다.

Complex Transmissibility Function은 다음과 같이 정의된다.

$$T_{ij}(\omega) = X_i(\omega) / X_j(\omega) \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

j : 기준 자유도

i : 임의의 자유도

i, j에서의 두 신호는 $T_{ij}(\omega)$ 에 대한 statistical noise reduction process를 적용할 수 있으며 이는 operation condition

에서의 small variation에 의한 영향을 최소화 한다. Transmissibility로부터 구한 상대적인 ODS는

$$\{X\}_{f_0} = \{T_y(f)\}_{f_0} \quad (2.3)$$

로 나타낼 수 있고, 절대적인 ODS는 각각의 ODS에 기준 신호의 Auto spectrum $G_{jj}(f_0)$ 에서 원하는 주파수에서의 RMS 값을 곱하여 구한다.

$$\{X(t)\}_{f_0} = \{X\}_{f_0} \sqrt{G_{jj}^{XX}(f_0)} \quad (2.4)$$

III. 굴삭기 상부 프레임의 ODS

1. ODS 측정 조건

ODS 분석을 위한 굴삭기 상부프레임의 측정 위치는 Fig.1과 같다.

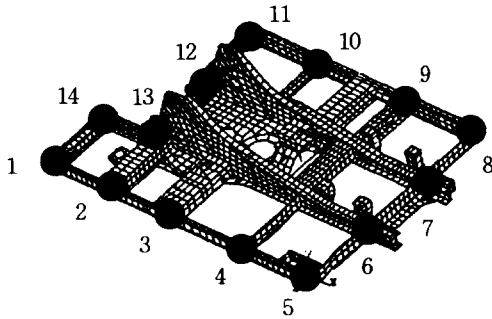


Fig 1. Measuring Position for ODS Analysis

측정 조건은 굴삭기가 충격 돌기인 ROUGH ROAD를 주행함으로써 무한계도 바퀴로부터 외부 충격 가진력이 있을 때의 진동 현상에 대해 가속도를 측정 하였다.

가속도 측정은 주행시 14 POINT를 동시에 측정했고, 가속도 응답이 상대적으로 크고 MODE 특성을 정확하게 나타낼 수 있는 CABIN 마운트 상부 프레임을 REFERENCE POINT로 설정했다.

일반적으로 측정 신호를 동기화 시킬 수 있는 응답이 있을 때는 측정 GROUP을 분리하여 몇번에 걸쳐 측정할 수 있으나, ROUGH ROAD 주행등의 조건에서는 충격 가진 신호가 RANDOM하게 입력되기 때문에 동기 신호를 설정할 수 없어 동시 측정이 필요하게 된다.

굴삭기 상부 프레임의 측정 및 분석은 직접 측정법을 사용하였고, Transmissibility Function을 이용하여 분석하였다.

2. ODS 결과

굴삭기의 ROUGH ROAD 주행 측정은 2분동안 14 Channel에 대해 동시에 가속도를 측정하였으며, 주행속도는 3.2 Km/h이다.

ODS 결과 COUNTER-WEIGHT가 부착되는 MAIN CENTER FRAME은 5Hz 영역의 주진동에 의해 영향을 받으며 이것은 전체 1차 BENDING MODE로서 전체 진동을 좌우하는 특성을 가지고 있다.

CABIN이 놓이는 상부프레임의 주파수 스펙트럼은 8 Hz 영역에서 크게 나타나며 이특성은 상부프레임 전체 구조물의 2차 MODE 특성으로 나타난다.

Rough-Road 주행시의 주파수 스펙트럼 특성

결과를 보면 상부프레임의 전체적인 주진동 특성은 20 Hz 이하의 저주파 특성을 가지고 있는 것을 알 수 있고, HIGH FREQUENCY 영역에서 국부적인 LOCAL MODE 특성이 나타난다.

상부프레임에 대한 ODS 결과는 Table1에 나타나 있다.

Table 1. MAC Analysis between ODS and Modal Result

		ODS				
		1st 6Hz	2nd 8Hz	3th 9Hz	4th 14Hz	5th 65Hz
M O D A L	1st 28Hz		3.3	1.5	2.5	11.6
	2nd 31Hz	3.2		7.5	1.5	2.9
	3rd 40Hz	1.1	17.2	0.3		21.8
	4th 48Hz	0.9	26.2	22	35.7	9.9
	5th 61Hz	17.7	10.7		12.8	50
	6th 64Hz	10.5	7.6	22.1	9.7	

위 Table1은 장비 전체 장착 상태에서 충격 돌기 주행시 상부 프레임의 ODS를 해석한 결과이며, MODAL 결과는 상부프레임 단품 상태에서의 BENCH TEST 결과이다.

Fig 2.1~2.6에 상부프레임 MODE 해석 결과를 6차 MODE 까지 나타내고 있다.

ODS 결과는 MODAL 결과에 비해 상부프레임

에 엔진, CAB등의 많은 장착물이 추가됨에 따라 고유진동수가 낮아짐을 알 수 있다.

MAC(Modal Assurance Criterion) 값은 두개의 MODE 사이의 상관 관계를 나타내는 것으로서, 두개의 MODE가 서로 직교하면 0이 되고 평행하면 1이된다.

보통 MAC값 비교시 70% 이상이면 같은 모드로서 판단이 된다.

ODS 결과중 MAC값이 60% 이상인 ODS 1st, 4th, 5th 모드는 Modal 1st, 3rd, 6th 모드와 같은 특성으로 상부프레임의 고유 진동 모드로 판단된다.

ODS의 2nd 모드(Twisting Mode)와 3rd 모드(2nd Bending Mode)는 MAC값이 낮아 정확하게 Modal 특성만으로 나타난다고 보기는 어려우며, 가진 특성이 많이 포함되어 있는 것으로 판단된다.

특히 9Hz의 2nd Bending Mode는 모드해석 결과에서 나타나지 않는 모드지만, 상부프레임의 Rough Road 주행시 CABIN쪽 프레임에서 크게 나타나고 있어 프레임 Crack과 승차감에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 고찰

ODS 결과는 실제 엔진 기진력으로는 가진되지 않는 20Hz 이하의 저주파 고유 특성을 정확하게 분리해 낼 수 있으며, 이 특성들이 실제 장비의 진동 및 CRACK의 주요 원인이 된다.

결과를 보면 상부프레임의 특성 주파수는 20 Hz이하에 4개의 주 특성 MODE를 가지며, 주요 마운트 위치별로 특성주파수 및 MODE가 달리 나타나기 때문에 상부프레임의 입력 조건 설정시에 고려되어야 할 요소로 판단된다.

ODS 결과 1차 MODE는 6 Hz에서 나타나며 상부 MAIN CENTER FRAME의 전체적인 거동 현상을 보이고 있으며 FRAME의 강성과는 별 무관한 유격과 COUNTER-WEIGHT등의 MASS와의 관계에서 형성되는 특성으로 나타나고 있다.

2차 모드와 3차 모드는 Mode Coupled된 복합 Mode로 외부 가진 특성도 함께 나타나는 변형모드로 판단된다.

또한 8Hz의 Twisting Mode는 CABIN 마운트계의 고유 특성과 맞물려 공진을 일으키기 때문에, 이러한 ODS 분석을 통해 상부 FRAME 특성을 분리하고 최적화할 때 CABIN 진동의 개선이 가능하며, 이 결과를 바탕으로 MODAL 해석후 민감도 해석(Sensitivity Analysis) 및 System Modification 에 활용 조건으로 사용할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 작동 변형 모드(Operational Deflection Shape)을 사용하여 실 장비의 실제 작업 및 가동시 일어 날 수 있는 동적 진동 특성에 대해 가진 특성을 배제한 모드 해석(Modal Analysis)와 비교하여 결과를

나타내었다.

이 결과에 대해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- ① 굴삭기가 충격 들기의 ROUGH ROAD를 주행할 때 ODS를 적용함으로써 순수 엔진 기진력만으로는 가진되지 않는 실 장비에 있어 주요한 진동 특성 MODE인 20 Hz이하의 고유특성을 정확하게 찾아낼 수 있으며, 이를 통해 진동 대책을 명확하게 수립할 수 있다.
- ② ODS를 적용함으로써 진동 모드 해석을 하지 않고서도 상부프레임의 고유 진동 특성을 파악할 수 있고, 이 결과를 바탕으로 CABIN 마운트 시스템의 공진 회피 설계를 할 수가 있다.
- ③ 상부프레임의 고유 특성 뿐만 아니라 외부 가진 특성을 분리 함으로써 고유 진동 및 가진 특성에 대해 진동 대책을 정확하게 세울 수 있다.
- ④ 이를 바탕으로 CABIN 마운트의 저진동 설계 대책 세울 수 있다.

참고 문헌

1. Operational Deflection Shapes: Background, Measurement and Application, Ole Døssing B&K, Denmark
2. Structural Stroboscopy Measurement of Operational Deflection Shapes, Ole Døssing B&K,

Denmark

3. Operational Deflection Shapes in Multisource Environments.

D.Otte, P.Van de Ponsele, J.Leuridan
LMS International

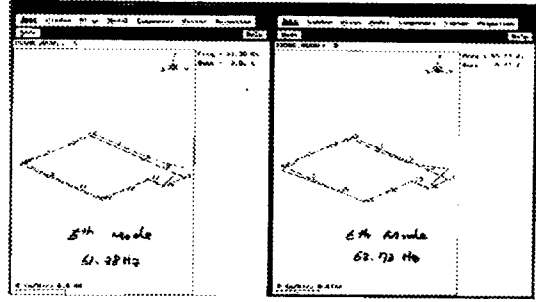


Fig 2-5.5th Mode Result of Modal Analysis Fig 2-6.6th Mode Result of Modal Analysis

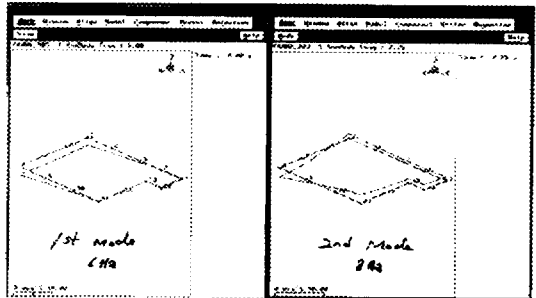


Fig 3-1.1st Mode Result of ODS Analysis Fig 3-2.2nd Mode Result of ODS Analysis

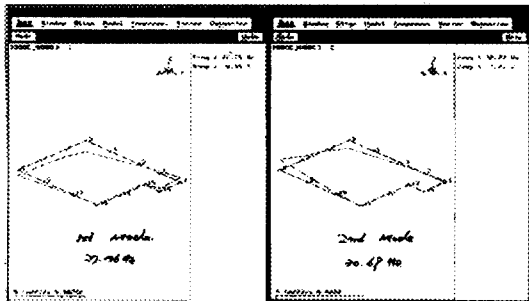


Fig 2-1.1st Mode Result of Modal Analysis Fig 2-2.2nd Mode Result of Modal Analysis

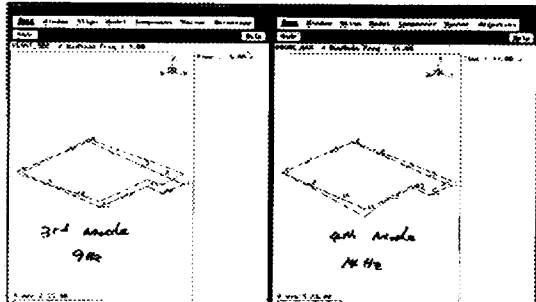


Fig 3-3.3rd Mode Result of ODS Analysis Fig 3-4.4th Mode Result of ODS Analysis

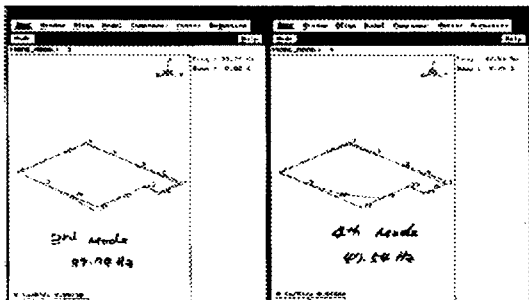


Fig 2-3.3rd Mode Result of Modal Analysis Fig 2-4.4th Mode Result of Modal Analysis

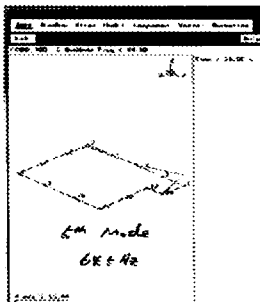


Fig 3-5.5th Mode Result of ODS Analysis