

대형 선박엔진용 크랭크축 해석을 위한 보-질량 모델 생성 기법에 관한 연구

서명원[†] · 심문보^{*} · 김기현^{*} · 김규희^{**}
(2002년 11월 15일 접수, 2003년 8월 11일 심사완료)

A Study on Efficient Generation of Beam-Mass Model for Simplification of the Crankshaft in the Large Marine Engine

Myung-Won Suh, Mun-Bo Shim, Ki-Hyun Kim and Kyu-Hee Kim

Key Words: Crankshaft(크랭크축), Beam-Mass Model(보-질량 모델), Section Property Method
(단면계수법), Dynamic Analysis(동적 해석)

Abstract

The purpose of this study is to develop the simplified model of the crankshaft in the large marine engine for dynamic analysis. Because the actual engine system is under complex dynamic loading condition and it has multi-cylinder, the dynamic analysis is purchased at a high computation cost. In spite of this burden, the dynamic analysis must be performed to assure structural integrity of operating marine engine. Therefore, simplification of the analytic model is necessary for dynamic analysis. Beam-mass model, which is generated with the section property method, is the model simplified effectively. Section property method can provide desired section information by optimization technique. By applying beam-mass model to the crankshaft in the large marine engine, the usefulness of the proposed method was proven.

1. 서 론

최근 산업사회의 다양화 및 급격한 발전은 더 이상 국내에서 머무는 것이 아닌, 국경을 초월한 무한경쟁, 자유무역세계로 나가고 있다. 이와 같은 상황에서 대량의 물자를 수송하는 대형선박(유조선, 컨테이너선)의 생산량 증가와 성능의 향상은 당연하다 하겠다.

대양을 오가는 대형 선박은 장시간의 항해를 하며 많은 위험요소를 가지고 있다. 특히, 부품의

결함으로 인해 선박이 파손되거나 정지한다면 조류의 영향으로 침몰하는 사고가 발생할 수 있으며, 이는 막대한 인명피해, 경제적 손실 및 해양환경오염 문제를 발생하게 할 수 있다. 이런 상황에서 선박운영의 핵심 부분인 엔진에 대한 기술 개발과 지속적인 정비 및 평가 작업은 선박제작의 필수적인 사항이다.

선행되었던 선박용 엔진 주 베어링 지지부에 관한 연구는 일반적으로 정적 해석을 통한 연구들이 대부분이었다. 그러나 실제 엔진의 거동을 살펴볼 때 실제의 운동형태가 여러 가지 복합적인 동적 힘으로 작용함을 알 수 있었고, 그에 대한 연구의 필요성이 대두되었다. 다만 동적 특성을 고려한 해석 결과와 정적인 해석 결과의 차이가 분명히 구분되지 않는다면, 경제적인 차원에서 정적인 해석을 사용할 수 있다고 판단하였다. 두 가지 해석의 결과 비교를 위해 동적 특성을 고려한 해석은 반드시 이루어져야 하며, 실험을 통한 실제 상황과의 비교 역시 꼭 필요한 절차라

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : suhmw@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7447 FAX : (031)290-5849
^{*} 성균관대학교 대학원 기계설계학과
^{**} 성균관대학교 대학원 기계공학과

할 수 있겠다. 하지만 동특성을 고려한 해석은 그 해석이 복잡할 뿐 아니라 해석 모델의 구성에 있어서도 정적인 해석을 위한 모델보다 고려해야 할 사항이 더 많아 모델 생성에 어려움이 많다.

기존의 동특성을 고려한 해석방법은 특별한 모듈이 없이 연립미분방정식으로 구성된 운동방정식에 포함되는 각각의 행렬식을 축소하는 방식으로 문제 해결을 하였다. Mourelatos⁽¹⁾는 크랭크축의 동적 해석을 위해 Ritz vector를 이용한 해석을 수행하였다. 하지만 축소행렬을 구성하는 과정이 매우 복잡하고 문제 해결을 위해서 새로운 수치해석 프로그램을 개발해야 된다는 점에서 어려움이 있는 방식이다. 또한 AVL사에서는 동적 해석을 수행 할 수 있는 상용 모듈을 개발하였다. AVL사의 Priebsh⁽²⁾는 크랭크축의 응력과 진동 해석을 위한 해석모델 개발을 위해 Macro Element와 Branching기법을 이용하였다. 모델 개발의 개념은 단위 하중과 모멘트를 3차원 모델에 적용하여 그때 발생한 변형량으로 강성값을 계산하여 축약모델을 구성하였다.

본 논문에서는 대형 선박엔진용 크랭크축의 동적 해석을 위한 모델 축약 기법으로 단면계수법을 이용한 보-질량 모델을 개발하였다. 단면계수법은 구조물 단면 형상 그 자체를 변화시키는 것이 아니라 형상 계수 즉, 단면적, 관성모멘트 등을 변화시켜 설계자의 목적을 만족시키는 방법이다. 이러한 단면계수법을 이용하여 구성된 대형 선박엔진용 크랭크축의 보-질량 모델은 3차원 솔리드 모델과의 모달해석 비교를 통해 효용성이 검증되었다.

2. 단면계수법을 이용한 보-질량 모델

2.1 단면계수법

서명원 등^(3,4)은 자동차 개발에서 초기설계 단계인 차체꼴격의 전체적인 형상(Layout)을 결정하기 위해 처음으로 단면계수법을 주장하였다. 종전의 연구에서는 기하학적으로 정의할 수 있는 단면의 반경, 높이, 너비 그리고 두께만을 설계변수로 고려하였다. 그러나 설계자의 목적에 맞는 기하학적 형상 그 자체를 구하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 형상을 명확하게 정의하기 어려운 경우도 발생할 수 있다. 단면계수법은 단면의 형상을 쉽게 정의할 수 없는 복잡한 대상에 대해

서도 단면의 면적, I_{xx} , I_{zz} 와 같은 2차 면적 관성 모멘트, J 와 같은 비틀림 상수 등을 설계변수로 정의하여, 적절한 설계조건을 만족하는 최적의 단면계수를 구할 수 있다. 이를 서명원 등은 차체단면 설계에 적용하였고 이 기법을 단면계수법이라 명명하였다.

2.2 보-질량 모델 생성

크랭크축 계를 구성하는 모든 부품은 부피를 갖는 3차원 물체로 일반적인 구조해석을 위하여 솔리드 요소를 사용하여 모델링 한다. 그러나 동적 해석시 많은 시간이 소요되기 때문에 축약모델이 요구되고 있으며, 본 연구에서는 효과적인 축약모델로서 단면계수법을 이용한 보-질량 모델 기법을 제안하고자 한다.

솔리드 모델은 보-질량 모델 생성시에 필요한 기초 데이터(계의 모드 형상에 따른 고유진동수)의 확보를 위한 해석으로만 한정하였다. 크랭크축 계의 축약모델인 보-질량 모델 생성을 위해 솔리드 모델을 구성하고 모달해석을 수행해야 한다. 이 결과는 보-질량 모델을 생성하기 위한 참조

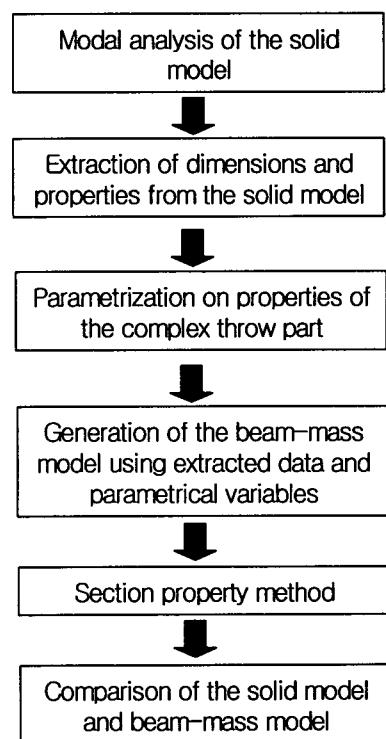


Fig. 1 Generation process of the beam-mass model

(reference) 대상으로 사용된다. 모달해석은 축약모델이 참조모델의 동특성을 계승하게 하는 것이 목적이기 때문에 수행된 것이다.

다음 단계로는 생성된 솔리드 모델에서 치수와 계수들을 추출한다. 크랭크축의 솔리드 모델을 축약모델인 보-질량 모델로 변환할 때 직관에 의해 구할 수 있는 단면계수들과 그렇지 못한 부분들이 있다. 우선 직관에 의해 확보된 치수 및 계수 값을 이용하여, 대략의 보-질량 모델을 생성한다. 여기서 형상의 복잡성으로 인해 구할 수 없었던 계수 값들은 단면계수법을 사용하여 그 값을 구한다. 단면계수법은 변수화된 단면계수들을 최적설계 기법을 이용하여, 원하는 형상계수 값을 얻을 수 있다. 마지막으로 솔리드 모델과 보-질량 모델의 모달해석 결과 비교를 통해 검증 작업을 수행함으로서 보-질량 모델의 신뢰성을 확인한다.

3. 동특성을 고려한 크랭크축의 보-질량 모델 생성 수치해석

3.1 보-질량 모델 생성

앞서 보-질량 모델의 개발 과정을 대략적으로 설명하였다. 본 절에서는 크랭크축 모델 축약을 위해 앞서 설명한 보-질량 모델 제작 방법을 적용하고자 한다. 우선, 크랭크축을 Fig. 2와 같이 CAD 모델과 Auto mesh를 이용한 유한요소 모델을 생성하고, 보-질량 모델의 변환을 위해 Fig. 3과 같이 크랭크축의 구성 요소를 크게 하나의 크랭크스로우와 3가지의 축으로 구분하였다. 다시, 하나의 크랭크스로우는 Fig. 4와 같이 3개의 파트로 구성되어 있으며, 그 가운데 part 2-3부위는 다시 Fig. 5와 같이 3개의 파트로 구분하였다.

크랭크축의 보-질량 모델은 질량과 관성모멘트를 갖는 6자유도 집중 질량 요소와 질량이 없고 단순히 강성만을 갖는 6자유도 보 요소로 이상화하였다. 집중 질량은 핀과 저널의 중심 축 상에 위치시켰다. 나머지 부분들의 집중 질량의 위치는 크랭크축의 기하학적 형상으로부터 구한 질량 중심의 위치에 일치하도록 분포시켰으며, 질량과 질량중심, 질량관성 모멘트를 계산하였다. 크랭크 핀 및 저널과 같은 축 형상을 갖는 부분은 보로 표현될 때 보의 이름이 실제 축의 이름을 갖는 원형 단면 보로 가정하였다. 축의 단면계수는 직

관적으로 계산이 가능하므로 해당 계수를 얻을 수 있다. 그러나 형상이 복잡한 크랭크스로우 부위는 단면계수들이 직관에 의해 값을 결정

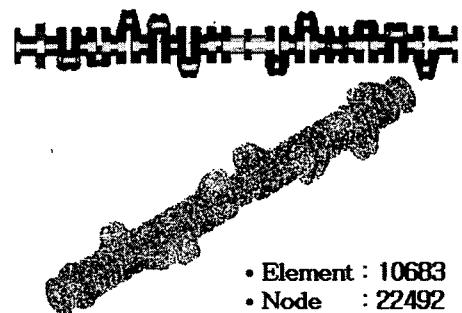


Fig. 2 CAD model & FE-model of the crankshaft

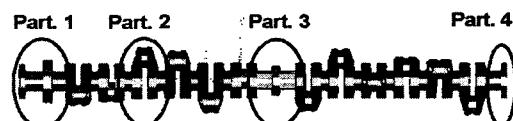


Fig. 3 Components of the crankshaft

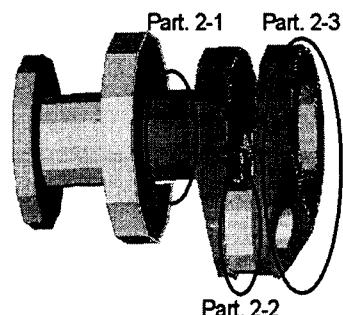


Fig. 4 Three parts of the crankthrow

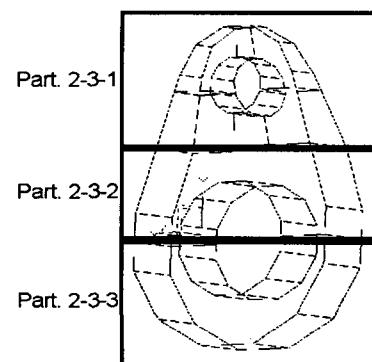


Fig. 5 Three parts of the part

하기가 불가능하다. 그래서 단면계수법을 이용하여 각각의 계수값을 추정하였다. 단면계수법의 문제 정의는 식 (1)과 같이 정식화하였다.

$$\text{Minimize} : F(x) = \sum_{k=1}^9 \left(\frac{f_k}{f_{ref_k}} - 1 \right)^2$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (1)$$

$$\underline{x} = (A_j, I_{1j}, I_{2j}, I_{3j}) \quad j=1,2,3$$

식 (1)에서 x_i 는 i 번째 설계 변수이고, x_i^L , x_i^U 는 x_i 의 하한값과 상한값을 의미한다. 목적함수는 f_{ref_k} 와 f_k 로 구성되어 있으며, 그 값은 각 모드에서의 솔리드 모델과 보-질량 모델의 강체 모드를 제외한 9개 모드의 고유진동수 값이다. 구체적인 설계 변수로는 A_j 가 3부분으로 구분된 복잡한 크랭크스로우의 단면을 나타내며, I_{1j}, I_{2j}, I_{3j} 는 3부분의 각 주축에 따른 2차 단면관성 모멘트와 비틀림 상수를 나타낸다. Fig. 6에서는 보-질량 모델을 이용하여 솔리드 모델 크랭크스로우를 축약하기 위한 계략적인 설명이 도식화되어 있다.

식 (1)의 문제를 해결하기 위해 최적설계방법 중 subproblem approximation 기법⁽⁵⁾을 이용하였다. Fig. 7은 최적화과정을 도식화 한 그래프이며, Table 1은 복잡한 형상의 크랭크스로우 부분의

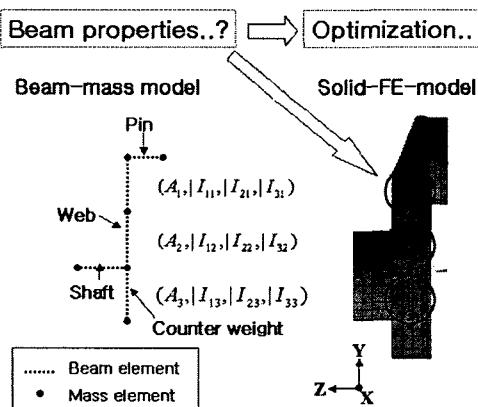


Fig. 6 Perimetrical section properties of a crankthrow

단면계수들을 초기값과 최적화를 통해 얻은 값을 비교해 놓았다.

최적화를 통해 구한 단면계수들과 솔리드 모델로부터 직관에 의해 얻은 단면계수 및 관성들을 적용하여 보-질량 모델을 구성하였고, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

3.2 모달해석을 통한 보-질량 모델의 검증

단면계수법을 통해 구한 보-질량 모델의 타당성 검증을 위하여 free-free 경계조건에서 모달해석을 실시하였다. 모달해석은 Block Lanczos method를 사용하였고, 고유진동수는 6개의 강체모드를 제외한 이후의 모드 9개를 추출하였다. 비교 대상은 앞서 제작된 솔리드 모델이며, 두 모델의 각 모드별 형상과 고유진동수 결과를 비교하였다.

솔리드 모델과 보-질량 모델의 상호 각 모드별 형상과 고유진동수의 결과 비교를 통해 두 가지의 모델이 대략 10%미만의 오차를 보임을 알 수 있었고, 이는 공학적으로 사용가능한 범위라고 판단하였다. 이로서 단면계수법을 이용하여 제작한 보-질량 모델은 솔리드 모델을 대신하여 동적 해석에서 사용하기에 신뢰할만한 모델임을 확인할 수 있었다. 해석결과는 Fig. 9와 같이 각각의 같은 모드에서 유사한 형상이 나타남을 확인할 수 있으며, Table 2를 통하여 각각의 모드에서의 고유진동수를 비교하여 오차 범위를 확인할 수 있다.

또한, Table 3에서는 솔리드 모델과 보-질량 모델의 요소수와 노드의 수, 모달해석의 계산시간을

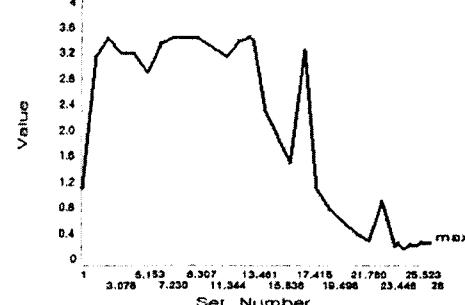


Fig. 7 Objective function history of section property method

간을 비교하였다. 해석조건이 같을 때 해석시간의 비교를 통해 보-질량 모델의 효율적인 측면에서의 우수성을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 초대형 선박 엔진의 구조물 중 크랭크축의 동특성 문제를 풀기 위한 축약모델로 보-질량 모델 생성기법을 제안하였다. 보-질량

Table 1 The initial and optimized design value gained by section property method

| Section properties | initial design value | final design value | |
|--------------------|----------------------|--------------------|----------------|
| A_1 | 4.0 | 7.7296 | $\times 1.0E4$ |
| A_2 | 5.0 | 1.0730 | |
| A_3 | 6.0 | 6.8328 | |
| I_{1j}^1 | 3.0 | 6.4255 | |
| I_{1j}^2 | 4.0 | 5.3213 | |
| I_{1j}^3 | 5.0 | 0.5796 | |
| I_{2j}^1 | 3.0 | 3.3165 | |
| I_{2j}^2 | 4.0 | 0.2076 | |
| I_{2j}^3 | 5.0 | 4.0838 | |
| J_j^1 | 3.0 | 7.5880 | |
| J_j^2 | 4.0 | 2.8695 | |
| J_j^3 | 5.0 | 5.5313 | |

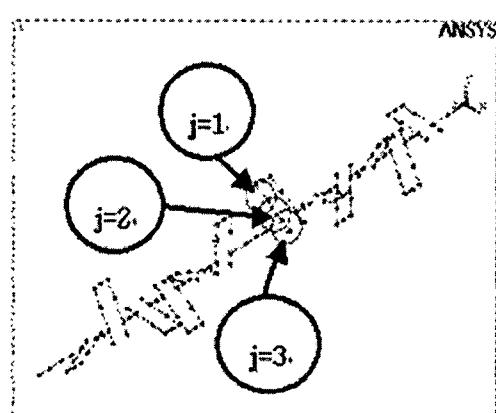


Fig. 8 Complete beam-mass model

모델제작 과정 중에 사용된 단면계수법은 기존에 여러 방면에서 많이 사용된 바 있는 기법이며, 충

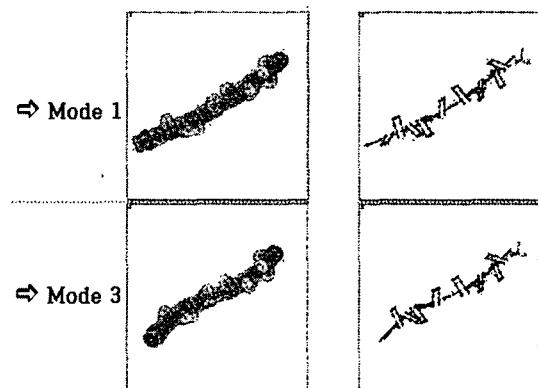


Fig. 9 Modal analysis result of the solid model & beam-mass model

Table 2 Comparison between natural frequency of the solid model and that of beam-mass model

| Mode / Hz | Solid model | Beam-mass model | Relative error(%) |
|-----------|-------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 2.4044 | 2.4169 | 0.52 |
| 2 | 2.4289 | 2.5173 | 3.64 |
| 3 | 5.7720 | 5.3540 | 7.24 |
| 4 | 5.8726 | 5.6034 | 4.58 |
| 5 | 8.1382 | 8.7622 | 7.67 |
| 6 | 11.547 | 11.116 | 3.73 |
| 7 | 13.250 | 13.245 | 0.04 |
| 8 | 15.810 | 14.021 | 11.32 |
| 9 | 16.675 | 15.301 | 8.24 |

Table 3 Comparison between modal analysis of the solid model and that of beam-mass model

| | Node (no.) | Element (no.) | Analysis Time(sec) |
|-----------------|------------|---------------|--------------------|
| Solid | 22492 | 10683 | 206.95 |
| Beam-mass model | 127 | 253 | 1.88 |

분히 신뢰할 수 있음을 확인할 수 있었다. 단면 계수법을 이용한 보-질량 모델을 통해 해석 시간이 현저히 절약되었으며, 또한 기존의 복잡한 행렬 축약 과정이 배제되어 복잡한 수학적 계산 없이 쉽게 이해하고 사용할 수 있게 되었다. 또한 향후연구로 본 연구에서 개발된 보-질량 모델을 이용하여, 동적하중을 고려한 해석을 수행함으로서 실제 엔진의 동적거동에 보다 근사한 해석을 수행할 수 있게 되었다. 이와 같은 동적하중을 고려한 해석이 수행된다면 엔진의 설계에 있어 보다 정확한 데이터를 확보할 수 있으며 매우 신뢰할 수 있는 엔진의 설계가 가능하게 될 것이다.

후기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mourelatos, Z. P., 2000, "An Efficient Crankshaft Dynamic Analysis Using Substructuring with Ritz Vector," Academic Press, *Journal of Sound and Vibration*, 238, pp. 495~527.
- (2) Priebsch, H. -H. and Affenzeller, J., 1992, "Prediction Technique for Stress and Vibration of Nonlinear Supported, Rotating Crankshafts," *ASME Jour.* Vol. 18.
- (3) Suh, M. W. and Suh, J. W., 2000, "A Study on the Comparison of Performances between Section Property Method and Section Shape Method for the Section Design of Vehicle Structure," SAE NO. 2000-03-0016.
- (4) Suh, M. W. and Suh, J. W., 1993, "Shape Optimization for the Section Design of Vehicle Structure," SAE NO. 931999
- (5) ANSYS Theory Manual, ANSYS inc., Chapter 20.