

우주발사체 개발에서의 중량관리 방법에 관한 연구

Mass Properties Control for Launch Vehicle Development

조철훈*, 조병규, 이창배, 원유진, 정의승 (한국항공우주연구원)

1. 서 론

중량(Mass 혹은 Weight) 값은 제작된 목적물의 주요한 제원 값 중의 하나이면서 설계 초기부터 운용 후까지 모든 과정에서 걸쳐서 통제되고 측정되는 항목이다. 특히 우주발사체는 다른 항공우주 비행체에 비해 그 특성 상, 중량에 민감하여 중량 항목은 임무 설계에서부터 운용 종료까지 통제/관리해야 하는 대단히 중요한 변수이다. 따라서 발사체 개발에 있어서 중량 자료를 관리하고 기록, 보고하는 일은 매우 중요한 과정이다. 발사체의 개발과 운용은 많은 수의 컴포넌트와 기능 섹션, 부분 조립체, 단별 조립체 및 전체 조립체를 개발/제작, 조립하여야 하며 각 부분 및 조립체 단위로 세밀한 중량 값의 관리가 행해져야 한다. 개발이 진행됨에 따라 여러 원인으로 초기에 제시된 값으로부터 벗어나게 되며 아울러 중량 값이 달라지면 많은 요소들이 영향을 받는다. 중량은 개발의 목표 항목이기도 하며 동시에 중량 값을 통해 개발을 통제하는 수단이기도 하다. 중량 관리의 결과는 개발 단위 물품의 성능뿐만 아니라 전체 발사체의 임무 달성 여부까지 좌우하게 되므로 조직적이고 체계적인 관리가 요망된다. 본 연구에서는 발사체 개발을 위해 필요한 중량관리 방법을 알아보고 현재 개발 중인 우주발사체 설계에 적용하는 중량 관리 기법을 고찰하였다. 그리고 결론으로서 실제로 개발 업무에 적용하기 위한 전산 시스템의 구현 예를 나타내었다.

2. 우주발사체의 중량 특성

발사체의 기본적인 중량 수치는 임무 설계 및 해석으로부터 주어진다. 해당 발사체의 개발 목표에서 목적제도 요소 및 페이로드 임무 중량, 추진 기관의 특성 등에서 전체 발사체의 중량 및 각 단별 중량, 추진체의 중량 등이 제시된다. 통상 이 값들은 발사 임무를 달성하기 위한 최대한의 것으로서 이를 초과할 경우 발사 임무 자체가 만족되지 않으며 임무 한계(Mission Limit)로 불리운다. 여기에서부터 출발하여 여러 범주의 중량 값들이 정의되고 관리되어진다[1]. 무게나 질량 값 외에 무게중심, 관성 값 - Moment of Inertia, Product of Inertia - 등을 포함하여 중량특성(Mass Properties)으로 다룬다. 중량 특성을 다시 여러 측면에서 분류하면 다음과 같다[2]. 기준이 되는 좌표계 표준, 단위계 및 기능/부위 별 분류에 따라 중량 특성들이 정의되고 분류된다.

예측중량특성(Estimated Mass properties) :

출도되지 않은 형상에 대하여 기본 정보, 경험, 통계, 공학적인 판단 등을 종합하여 예측한 중량특성값

계산중량특성값(Calculated Mass properties) :

소재 규격 및 특성이 부여된 치수화된 도면이나, 도면 작성을 위해 사용되는 CAD 도구로부터 해석하여 얻을 수 있는 계산된 중량특성값

실측중량특성값(Actual Mass properties) :

측정 또는 측정된 중량특성값을 알고 있는 거의 동일한 컴포넌트와의 비교값에 의한 중량특성값

으로 구분되며, 중량 특성 값의 도출 시점에 따라서는, 개발 기간 중의 임의의 시점에 대한 중량 특성과 운용 중 측, 발사 진행에 따른 발사체 상태의 중량 특성이 있으며, 발사체를 구성하는 위치별, 기능별 구분에 따라서도 중량 특성이 따로 관리된다. 중량특성과 관련된 여러 용어 및 파라미터의 정의와 설명은 다음과 같다 [3,4].

기초 중량특성값(Basic Mass Properties)

가장 최근의 설계 상황에 대한 평가(예측, 계산, 실측을 포함)에 근거한 중량으로, 중량증가 허용값은 포함하지 않는다.

중량증가 허용값(Weight Growth Allowance)

설계, 제작 상황 및 설계변경 가능성 등에 근거하여, 기초 중량특성값에 대해서 예견되는 변화량으로 중량증가 허용값은 설계 성숙도의 부족한 정도를 보상해 준다. 설계변경의 의미는 개발과정에서 계약상 설계 요구조건을 만족하기 위하여 발생하는 것을 말하며, 주요 계약 변경에 의한 형상변경은 포함하지 않는다.

예견 중량특성값(Predicted Mass Properties)

기초 중량특성값과 중량증가 허용값을 합한 값으로 개발완료 단계에서의 최종 중량을 예측하기 위하여 사용된다.

총괄주관기관 한계값

다른 유사 개발물에 대한 직/간접 경험을 근거로 사업 초기에 설정되는 값으로 개발 마일스톤 동안 통하여 일정하게 유지된다.

총괄주관기관 여유값

총괄주관기관 한계값과 당시 시점의 예견 중량특성값과의 차이에 의해 결정되는 값을 말하며, 설계 사이클 동안에 발생할 수 있는 불확실성을 고려하여 적절한 총괄주관기관 여유 값을 유지하기 위해 총괄주관기관으로부터 각 개발담당부서나 기업에 할당되는 목표값은 총괄주관기관 한계값에서 일정한 비율을 차감하여 할당된다.

임무한계(Mission Limit)

발사체의 성능 요구조건을 만족하기 위한 최대 값.

임무여유값

임무한계에 비해 실제 개발품에 대해 적용되는 총괄주관기관 한계 값에 대한 여유 값으로 개발이 진행됨에 따라 변경될 수 있음.

중량특성값의 불확실성(Mass Properties Uncertainty)

컴포넌트, 벤더품목의 중량특성값의 편차, 부품 위치와 방향의 불확실성, 호기에 따른 변동사항 등으로 인한 중량특성값의 불확실성을 일컫는다. 일반적인 변동사항으로 제작 공차, 자재 두께 공차, 습기 흡수, 움직이는 품목의 위치, shim 중량, 페인트 또는 접착제의 두께, 재질의 밀도변화 등이 있다.

한계중량특성값(Mass Properties Limits)

계약, 성능, 제어, 이송 등의 여러 요구조건에 의해 부과되는 중량특성값의 한계치(최대,최소)

이외에도 고객 제공 품목(Customer Furnished Equipment)에 대해서는 따로 중량특성값의 기록을 유지해야 하며, 중량특성값과 부품번호의 상호연관성(Correlation of weight and part number)이 유지되어야 한다. 그 수준은 발사체 모든 품목의 중량데이터가 빠지지 않고 포함되어 있다는 것을 결정할 수 있을 정도로 세분화 되어야 한다.

각 부분 및 범주에서의 중량특성값의 데이터의 신뢰도 정도를 표현하기 위하여 속성(예측, 계산, 실측)으로 분류/합산되어 서브시스템 레벨 또는 발사체 전체 레벨로 데이터 신뢰도 정도를 표현하여야 한다.

4. 중량특성의 관리

발사체 개발과정에서의 중량특성 파라미터들을 시간에 대해 나타내면 다음과 같다.

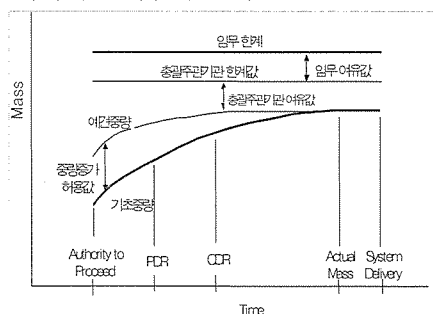


그림 1. 질량특성 파라미터

총괄주관기관은 앞 절에서 설명한 기본 조건 및 분류 기준을 확립하여야 한다. 그리고 개발 기간동안 중량특성을 통제하는 관리/결정/변경/이력/분석/검증/보고 계획을 수립하고, 이를 실천하기 위해서는 책임과 권한을 가지는 조직 또는 협의 기구와 데이터베이스 및 전산 네트워크 시스템을 구축하여야 한다. 중량특성은 넓은 의미로 볼 때에는 개발품의 형상 항목의 하나로 간주되어 형상관리의 한 기능으로 볼 수 있으며 보통은 일반적인 형상 정보와는 구별되어 독립된 관리 기능으로 구현된다.

4.1 중량관리 계획

총괄주관기관은 중량관리를 총괄하는 내용의 중량관리 계획을 작성하여 설계, 개발, 생산에 적용한다. 참여 기업의 경우, 총괄주관기관에서 배포한 요구조건에 의거 자체 중량관리 이행계획서를 작성하여 총괄주관기관의 승인을 득하고 설계, 개발, 생산에 적용한다.

4.2 인력 및 장비

모든 설계개발 부서 및 참여 기업은 중량관리를 수행할 능력이 있는 인력을 확보/배치하여야 하며 필요한 장비 및 측정 장치를 확보하여야 한다.

4.3 중량관리위원회(Mass Control Board)

중량관리위원회는 개발 중에 중량에 관한 자료를 검토, 결정, 수행하는 기구이다. 별도의 조직 구성을 가지거나 기존의 조직 구성에 업무 권한을 부여하여 적용할 수 있다. 개발 조직 내에서 중량특성관리 업무가 유용한 효과를 가지려면 총괄주관기관이나 참여기업에 상관없이 고위 관리층(사업책임자, 주요 보직자 등)은 중량특성값 관리 절차의 개발 및 유지에 적극적으로 참여하여 개발 단계에서 비용, 생산성, 중량특성값, 성능, 고객의 요구 등 여러 측면에서 적절히 균형을 맞추어야 한다. 아울러 발사체 중량특성값에 영향을 미치는 품목의 구매문서에는 참여기업에 대한 중량특성값 관리계획에 대한 요구조건을 부과할 수 있도록 중량관리 관련 사항이 포함되어 있어야 한다. 중량관리위원회는 다루는 사안의 경중에 따라 Critical, Major, Normal MCB 등으로 세분될 수 있다.

4.4 중량관리 전산시스템

중량특성의 기본적인 데이터 창구 역할을 하는 것이 중량 데이터베이스 및 이외 연동되는 전산 시스템이다. 데이터베이스의 내용은 개발 부서, 참여기업, 벤더로부터의 중량 자료를 포함하여 분석 또는 보고서 작성에 필요한 항목(부품번호, 기능코드, 중량, 무게중심, MOI, POI, 데이터속성(예측/계산/실측), 변경사항, 변경이유, 변경코드 등)을 관리항목으로 선정하여 구축되며, 데이터베이스 기능과 내용을 가능한 최선상태를 유지할 수 있도록 지속적으로 관리되어야 한다. 전산 시스템은 별도의 중량 관리 프로그램을 구축하거나 혹은 형상관리 용도의 전산 시스템에 중량 특성 항목의 관리 기능을 포함하여 구축하여 사용한다. 어느 경우든지, 개발에 사용하는 CAD 도구 및 엑셀 등과 같은 사

무 도구와 연동하여 데이터의 출납이 용이하도록 하여야 한다.

5. 중량특성의 유지/분석

중량특성 자료는 개발과정에 따라 다음과 같은 조건에 따라 유지, 분석되고 보고 되어야 한다[5].

5.1 데이터의 최신화 :

개발 단계에 따라 업데이트 주기가 변할 것이나, 기본적으로 2주일에 한번 정도(참여기업, 벤더품목 포함)로 업데이트를 실시하며, 백업을 받아야 한다. 주요 마일스톤이나 이벤트가 있는 경우, 필요에 의해서 최신의 데이터를 요구할 수 있으며, 각종 분석을 수행하게 되는 경우 분석 간의 비교 분석을 위하여 하나의 중량 기준을 적용하여 분석을 수행한다.

5.2 변경 이력관리 : 중량의 변경 이력관리는 변화량 및 변화 이유를 포함하여 중량관리 데이터베이스 상에서 이루어져야 하며, 데이터베이스에서 중량이 최신화될 때 함께 최신화되어야 한다. 중량의 변화는 그 원인에 대해서 코드화, 카테고리화되어 사업 전 기간을 통해 그 카테고리별로 누적 관리되어야 한다.

5.3 중량증가 허용값의 유지 : 총괄주관기관은 중량데이터에 예측되는 중량증가 허용값(사업 종료시점으로 가면서 소멸)을 유지하고 있어야 한다.

5.4 한계치 관리(Limit Monitoring) : 총괄주관기관 중량관리담당은 중량증가 허용값을 포함하여 예견중량특성값과 한계중량특성값의 비교 데이터를 유지해야 한다. 중량특성값의 불확실성도 명시하여, 당시 불확실성의 수준을 고려하여 예견중량특성값과 한계중량특성값을 비교할 수 있도록 한다.

5.5 절충 연구(Trade Studies) : 총괄주관기관 및 부문체 전문기업의 설계부서는 연구된 절충 연구에 대한 중량특성값 데이터를 필요시 검토할 수 있도록 유지하여야 한다.

5.6 시정조치(Corrective Action) : 총괄주관기관 중량관리담당은 한계중량특성값이 초과될 경우, Major MCB에 즉시 알려야 하며, 유관부서와 협력하여 시스템 성능에 대한 영향성 검토 및 시정조치 계획을 수립하고 실행해야 한다.

5.7 문서 배포(Document Release) : 시스템, 컴포넌트 등의 설계, 제작, 구매 등을 규제하는 문서는 배포 전에 중량관리담당의 확인을 받아야 한다.

5.8 중량특성값 불확실성 분석(Mass Properties Uncertainty Analysis) : 전체 발사체뿐만 아니라 각 요소들(용액, 독자적으로 움직이는 품목 등)의 중량특성값이 각종 분석(성능, 정적, 동적, 제어, 구조)에 사용될 때 중량특성값의 정확도가 인지되어야 한다. 불확실성

분석은 불확실성으로 인해 한계중량특성값이 초과될 때 행해지며, 불확실성을 야기시키는 근본 원인에 대한 자세한 분석내용을 포함하여야 한다.

5.9 비행 이벤트별 중량특성값 (Sequential Mass Properties) :

중량특성값은 임무완료까지 시간 함수로 하여 결정되고 분석되어야 한다. 시간의 증가값(time increments)은 주요 이벤트 또는 기타 분석에 필요한 사항을 근거로 정해진다. 임무수행 동안 소비, 투하, 제거되거나 이동되는 모든 품목들은 중량 특성값 기록으로 유지되어야 한다.

5.10 비행 후 분석(Postflight Analysis) : 주요 이벤트에 대한 실제중량특성값은 비행 후 분석되며, 계획된 값과의 차이는 품목별로 목록화되고 설명되어야 한다.

5.11 지상작업지원(Ground Operations Support) : 총조립(System Integration)의 각 단계 및 시험 과정에서 발사체 어셈블리와 지상지원장비(Ground Support Equipment)의 형상을 고려한 중량특성값이 요구될 경우(예를 들어, 리프트 포인트(lift point) 강도, 무게중심 범위 등과 같은 특별한 제한조건에 대한 정보가 조립 및 운송작업 동안 안전을 위해 필요할 수 있다.) 지상 및 발사작업의 지원을 위한 중량특성값이 도출되어야 한다. 이 특성값은 지상 및 발사작업의 실제 발사체 형상(장착물, 용액, 추진제 이용 여부)과 일치하여야 하며, 발사체에 대한 중량특성값의 마지막 측정 이후 발생된 모든 변경사항들은 기록/유지되어야 한다.

6. 중량특성의 검증/보고

설계부서, 관리자, 사용자가 중량특성값의 검증과 관련된 사항 즉, 중량특성값의 검증방법 및 정확도, 중량특성값의 측정 장비(handling, fixturing and support 장비)의 활용가능성 및 안전에 대한 고려 등을 검토할 수 있도록 자료를 제공하여야 하며, 개발 되는 발사체에 대해 전체적인 통찰력을 제공하기 위해 일정한 시기 및 내용의 보고를 수행해야 한다. 상세한 내용은 다음과 같다.

6.1 시험 계획(test plan) :

- 시험 대상 품목 및 한계중량특성값
- 시험 장비에 대한 설명
- 시험장비의 정확도
- 시험장비의 검교정(calibration) 절차 및 일정
- 계획 시험장소, 계획 일정, 시험대상 등의 내용을 포함한 시험 일정
- 시험절차(시험 준비, 장비, 치구, 관련 치수 및 데이터, 환경조건 등을 포함)에 대한 설명
- 성공 측정의 요구 회수, 여러 번의 독자적 측정값으로부터 평균 측정값의 결정 방법, 각 측정 간 장비의 해체 범위, 잠금 등에 대한 요구조건

6.2 보고 일정 및 기간 : 각종 보고서에 대한 일정 및 기간은 총괄주관기관이 정한다.

6.3 상태 보고서(Status Report) : 다음을 포함한다.

- 중량특성값의 요약 : 각 섹션별로 표현된다. 예견중량은 서브시스템별로 표 형식으로 표현하고, 총예견중량은 서브시스템별 예견중량을 합쳐서 구한다. 소비, 투하, 제거, 이동되는 부품들은 소비, 투하, 제거, 이동 등으로 표현되어야 한다. 각 섹션별 총 예견중량과 발사체 전체 총 예견중량은 발사상태(Launch Condition)로 제출되어야 한다. 보고되는 중량항목에 대해서, 속성(예측, 계산, 실측)이 표시되어야 하며, 백분율 형태로 표현할 수도 있다.

- 중량특성값 한계치관리(Mass Properties Limit Monitoring) : 예견 중량특성값과 한계 중량특성값의 비교 값을 표현하여야 한다.

- 변경사항(Changes) : 이전 상태보고서 제출 이후 통합된 모든 중량 변화값이 표현되어야 한다.

각각의 중량 변화값에 대해서 중량변화 원인별로 코드화 되어야 한다.

- 잠재 변경사항(Potential Changes) : 미결정(pending) 또는 잠재되어 있는 중량변경 사항이 표현되어야 한다.

- 형상별 중량특성값(Sequential Mass Properties) : 형상별 중량특성값이 표현되어야 한다.

- 고객 제공 품목(Customer Furnished Equipment) : 고객제공품목의 중량특성값을 표로 표현한다.

- 기준 좌표(Reference Axes) : 발사체 중량특성값 결정에 사용된 기준좌표계(Refernce Axis System)의 위치, 방향을 보여주는 도표가 마련되어야 하며, 기준좌표계 원점(Reference Axis System Origin)의 정확한 위치가 그 도표 상에 표현되어야 한다. 발사체가 여러 섹션으로 이루어지고 섹션마다 기준좌표계가 다를 경우, 각 좌표계는 위에 설명된 대로 표현되어야 하며, 상호위치 및 방향에 대한 설명이 주어져야 한다.

- 중량증가(Weight Growth) : 중량증가 허용값의 현 상태 및 허용값의 소멸 계획이 표현되어야 한다.

Rev	Item	Value	Units	Material	Material	Element Type
F 001	1016451	--	--	--	0	Working
F 001	1016451	--	--	--	0	Working
F 001	1016451	9.0256	kg	0	0	Working
F 001	1016451	9.0276	kg	0	0	Working
F 001	1016451	9.0196	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.2311	kg	0	0	Working
F 001	1016451	10.0	kg	0	0	Working
F 001	1016451	9.2594	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.1822	kg	0	0	Working
F 001	1016451	1.0008	kg	0	0	Working
F 001	1016451	9.0817	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.0021	kg	0	0	Working
F 001	1016451	1.0	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.0100	kg	0	0	Working
F 001	1016451	9.052	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.0100	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.2255	kg	0	0	Working
F 001	1016451	2.1744	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.0016	kg	0	0	Working
F 001	1016451	9.0637	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.2244	kg	0	0	Working
F 001	1016451	0.4622	kg	0	0	Working
F 001	1016451	23.0	kg	0	0	Working

그림 2. 부품별 기초 중량 자료를 제공하는 Pro/Intralink 형상 DB 화면

그림 3. 형상 DB로부터의 중량자료를 개발 호기별로 관리하는 PDM 중량 Report 모듈

Rev.	MOI_Ixx	MOI_Iyy	MOI_Izz	POI_Ixy
Rev.	Mass_KARI_Limit	Mass_KARI_Margin	Mass_Mission_Limit	Mass_Mission_Margin

그림 4. 중량 Report 항목의 예

7. 결론

발사체 개발에 있어서의 중량특성과 관리 기법에 대해 고찰하였다. 이를 실제로 적용하기 위해서, 발사체 설계 형상관리 시스템으로 구축되는 PDM(Product Data Management) 시스템에 중량관리 기능을 추가하여 개발하였다. 이는 PTC사의 Windchill PDMLink를 기반으로 추가 기능을 개발 구현하였다. 형상 정보 데이터베이스에 중량 특성 정보를 추가하고 중량관리 계획에서 요구하는 이력 유지와 각종 분석 및 보고에 활용하게 된다. 다음은 실제로 구현된 중량관리 전산 시스템의 화면 예이다[6].

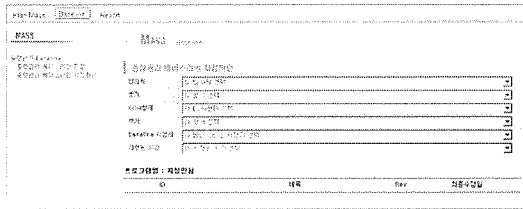


그림 5. 중량 베이스라인 관리 모듈

참고문헌

- [1] MIL-HDBK-1811, "Mass Properties Control for Space Vehicles"
- [2] AIAA R-020A, "Recommended Practice for Mass Properties Control for Satellites, Missiles, and Launch Vehicles"
- [3] SAWE NUMBER 6, "Standard Coordinate Systems for Reporting the Mass Properties of Flight Vehicles"
- [4] SAWE NUMBER 11, "Mass Properties Control for Space Vehicles"
- [5] 조병규, "KSLV-I 중량관리계획" KARI, 2003
- [6] "발사체 사업단 PLM시스템 사용 설명서", KARI, 2004