

3D기반 비정형 토목구조물 물량산출 알고리즘 개발

하철석* · 문소영** · 문현석*** · 강인석****

Ha, Cheol-Seok*, Moon, So-Yeong**, Moon, Hyoun-Seok***, Kang, Leen-Seok****

Development of Quantity Take-off Algorithm for Irregularly Shaped Structures using 3D Object

ABSTRACT

Recently, as the appearance and exterior design of the construction structure are highlighted, the irregularly shaped structures are increasing in a construction facility. Many softwares provide a quantity take-off function of 3D object under BIM environment, however, they are focused on the limited function based on the solid modeling method. Because the vast geometric information of the curved surface is difficult to extract in the 3D objects that consist of major changes in vertical section shape as the irregularly shaped structures, it is difficult to express a 3D object as a solid model. On the other hand, the irregularly shaped structures can be expressed in relatively free in the surface model because the surface model consists of points, lines and surfaces. Accordingly, the surface modeling method is suitable for the modeling of large irregularly shaped structures. This study suggests a quantity take-off algorithm for the irregularly shaped structures using the surface modeling approach that is beneficial in the design work of structures. Some case projects are used for verifying the accuracy of the proposed method.

Key words : Irregularly shaped structures, Quantity take-off, Triangulated irregular network, Surface model

초 록

최근 건설공사에 디자인적 요소가 많이 강조 되면서 비정형 구조물이 증가하고 있다. 이에 따라 여러 소프트웨어들이 BIM환경에서 3D객체의 물량산출기능을 제공하고 있지만, 솔리드 모델기반 정형화된 객체의 제한된 물량산출기능을 제공하고 있다. 비정형 토목 구조물과 같이 수직적 단면형상의 변화정도가 심한 3D객체는 다수의 곡면 표현을 포함하므로 솔리드로 모델링하는데 많은 노력이 필요하며, 해당 모델이 포함한 기하 정보의 수가 방대하기 때문에 특정한 단면에 대한 기하정보를 추출하기가 용이치 않다. 이러한 이유로 비정형 구조물을 솔리드 모델의 3D객체로 표현하는 데에는 한계가 따른다. 반면 서피스 모델은 비정형 객체의 형상을 비교적 자유로이 표현할 수 있고, 점, 선, 면으로만 이루어진 모델이기 때문에 정보의 용량이 적다. 따라서 대부분이 복잡한 형태로 방대한 양의 설계작업을 필요로 하는 토목공사의 설계정보 용량을 고려한다면, 서피스 모델링은 토목구조물 설계와 물량산출에 유리한 모델링 방법이 될 수 있다. 본 연구는 건설공사 비정형 구조물의 설계 작업에 유리한 서피스 모델기반의 3D객체를 이용한 비정형 객체의 물량산출 알고리즘을 제시하는 데 목적이 있다. 제시된 방법론은 사례적용을 통하여 수계산 및 기존 솔리드방식의 물량산출결과와 비교하여 정확성을 검증하고 있다.

검색어 : 비정형 구조물, 물량산출, 불규칙삼각망, 서피스모델

* 정회원 · 경상남도 서부권 개발본부 (ha732@korea.kr)

** 경상대학교 토목공학과 석사과정 (thdud456@gmail.com)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (hsmoon@kict.re.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 경상대학교 토목공학과, 공학연구원, 교수 (Corresponding Author · Gyeongsang National University · Lskang@gnu.ac.kr)

Received October 15, 2013/ revised November 28, 2013/ accepted December 21, 2013

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

설계단계에 BIM (Building Information Modeling)기술의 적용이 증가하면서 3D기반 물량산출기능을 제공하는 소프트웨어들도 개발되고 있다. 이들은 주로 솔리드모델(Solid model)기반의 정형화된 구조물에 대해서 제한된 물량산출 기능을 제공하고 있다. 반면에, 단면의 변화정도가 심한 비정형 구조물의 경우에는 변화정도에 따른 3D객체의 방대한 기하정보를 추출하기 어렵기 때문에 솔리드 모델을 생성하는데 많은 제약이 따른다. 이러한 모델 생성의 불리함을 이유로 대부분의 건설공사에서 비정형 구조물은 서피스 모델(Surface model) 기반의 3D객체로 생성되어 설계에 활용된다. 하지만 서피스 모델은 모델의 질량, 부피등의 다양한 정보를 제공하는 솔리드 모델에 비해 모델이 가지고 있는 정보의 양이 작다. 이와 같이 최소한의 기하정보를 활용하여 체적을 산출할 수 있는 장점이 있으므로, 서피스 형태로 변환이 가능한 대부분의 객체 모델은 손쉽게 체적을 산출할 수 있다. 하지만, 일부 비정형 모델의 경우 외피, 벽체 등 변곡이 심한 부분에 활용할 때는 제약이 있을 수 있다. 때문에 비정형 구조물 설계작업에 유리한 서피스 모델은 설계단계까지만 사용되고 물량산출단계에서는 서피스모델을 솔리드모델로 변환하거나 솔리드 모델로 재생성하여 물량산출을 수행하고 있다. 이러한 과정에서 물량산출에 적합한 모델생성을 위한 이중 작업으로 인한 시간낭비가 적지 않다. 따라서 본 연구에서는 건설공사의 비정형 구조물 설계에 적합한 서피스모델을 기반으로 직접 물량산출이 가능한 알고리즘을 제시하고자 한다.

1.2 연구 동향

BIM기반의 물량산출 방법에 대한 연구는 다음과 같다. 박영진 (2011)은 BIM으로 작성되는 기둥, 보, 벽, 바닥의 각 부재별 수량관련 속성과 부재별 수량산출 정보를 정리하여 BIM의 물량산출과 견적시스템을 구축하는 방법을 제시하였다. Kim (2011)은 BIM을 기반으로 보다 정확한 물량산출을 위한 모델링 방법과 부위별 물량산출 기준을 제시하였다. Kwon (2011)은 품셈기법을 적용한 BIM모델링 기법을 제시하여 BIM데이터 품질을 확보한 후 물량산출하는 방안을 제시하였다. Jun (2011)은 BIM기술을 이용한 물량산출의 정확성과 그 효율성을 알아보기 위해 수작업과 BIM을 이용하여 물량산출을 하고, 산출된 데이터 값을 비교분석하여 물량산출 과정에서 BIM의 활용성을 알아보려고 하였다. Han (2011)은 3차원 모델링을 이용하여 견적을 산출하기 위한 모델링의 LOD (Level of Detail)수준을 파악하고, 부재수준의 3차원 객체 정의를 위한 라이브러리를 통해 토목분야에서의 견적자동화 방안에 대한 연구를 수행하였다. Lee (2011)는 BIM기반 물량산출의 완성도에

직접적인 영향을 미치는 요인인 BIM모델 데이터 관련 요인을 주요 인자로 활용하여 BIM기반 물량산출 성과물의 완성도를 정량적으로 평가하기 위한 지수(BQI: BIM based Quantity take-off Index)체계를 개발하였다. 이를 통해 BIM모델의 완성도 수준을 평가하고 해당 모델을 통한 물량산출의 완성도를 예측할 수 있는 체계를 활용하여 발주자와 작업자간의 업무진행을 원활하게 할 수 있도록 하고자 하였다. Steel (2011)은 건축물의 물량산출을 위한 특정 모델의 수정, 변환에 관하여 연구하였다. 또한 모델의 물량과 금액산출을 언어로 표현하고 자동으로 물량산출이 가능하도록 도구를 개발하였다. Shen (2010)은 BIM기반의 견적과 기존 방식의 견적을 평가하기 위해 generality, flexibility, efficiency, accuracy의 기준을 사용하여 비교 분석하였다. 이와 같이 3D 객체의 물량산출에 관한 연구들이 진행되고 있으나, 연구 대부분이 3D모델 생성 방법 또는 BIM 기반으로 물량산출을 수행하기 위한 3D모델의 정보수준을 결정하기 위한 연구들로 진행되고 있다. 그리고 대다수 물량산출 관련 기존 연구들에서 사용한 모델은 솔리드 모델로 생성된 정형구조물에 한정되게 이루어지고 있다.

비정형 객체에 대한 물량산출 방안에 대한 연구는 다음과 같다. Yilmaz (2009)는 인공객체와 비정형 형태를 이용한 비정형 구조물의 체적계산 정확도에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 비정형 형상의 체적이 간접적으로 계산될 수 있는 인공적 객체를 사용하였다. 사진기하학으로 측정된 참조점을 통해 인공적 객체에 대한 보간법을사용하여 3D모델을 구성하고 체적을 산정하였다. Du (2007)는 산사태가 일어난 지역과 같이 특정지역의 빠른 토량산출을 위해 3D laser scanning 기술과 GPS (Global Positioning System)기술을 융합시켜 빠른 토량산출을 필요로 하는 지역의 토량을 산출하고자 하였다. 3D laser scanning기술과 GPS기술을 이용하여 수치지형모델을 만들어 내고 수치지형모델로부터 등고선 (Contour)을 생성하여 산사태 지역의 토량을 산출하였다. 이와 같이 비정형 객체에 대한 물량산출의 필요성도 점점 대두 되고 있지만, 비정형 객체에 대한 보다 간편한 방법에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 또한, 구조물의 3D모델 표현에 자유로운 서피스 모델을 직접 물량산출 단계에까지 이용하는 방안에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비정형 구조물의 형상 표현이 솔리드 모델에 비해 자유로운 서피스 모델을 적용하여 비정형 구조물의 물량을 산출할 수 있는 알고리즘을 구축한다. 그리고 실무활용성 검증을 위해 기존 방법들과 비교검증을 시도하고 있다.

1.3 연구 개선사항

구조물의 형상변화가 많지 않은 정형 구조물의 경우에는 대부분이 솔리드 모델로 라이브러리와 되어있어 물량산출이 손쉽게 이루어

어질 수 있다. 하지만, 형상변화가 많은 비정형 구조물의 경우에는 솔리드 모델로 표현이 어려워 물량산출이 쉽지않다. 이러한 이유로 설계단계에서는 비교적 표현이 자유로운 서피스 모델을 통해 설계하고, 물량산출단계에서는 서피스 모델을 솔리드 모델로 변환하는 작업을 거쳐 물량산출을 수행하고 있다. 물량산출을 위해 서피스모델로 작업된 객체를 솔리드 모델로 변환 시, 서피스모델의 자유로운 표현을 솔리드로 모두 표현하는 데에는 한계가 있다. 이로 인해 일부면이 과대 또는 과소 물량이 산출될 수 있으므로, 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 다음과 같은 방법을 시도하고 있다.

첫째, 불규칙 삼각망(TIN: Triangulated Irregular Network)을 통해 서피스 모델에 대한 물량산출을 시도한다. 이는 비정형 구조물의 형상과 특징을 삼각망으로 표현하는데 적합한 방법으로, 서피스 모델 형상의 변화를 최소화하여 물량을 산출 할 수 있다.

둘째, 불규칙 삼각망으로 표현된 모델의 물량 산출을 위해서 미소구간별 단면계선을 생성하여 모델의 결면적과 부피 산출을 시도한다. 이는 객체의 높이방향으로 무수히 많은 슬라이드를 생성하고, 각 슬라이드의 면적을 구하여 적분하는 방식으로 부피를 산출한다.

2. 이론적 고찰

2.1 불규칙 삼각망의 개요

불규칙 삼각망이란, 불규칙하게 분포된 점들의 3차원 좌표를 추출한 후 각 점을 삼각형으로 연결하여 지형을 표현하는 방식으로, 단면의 형상이 비정형인 구조물을 표현하기도 한다(Kong, 2002). 불규칙 삼각망의 데이터 구조는 표고점에서 추출된 랜덤한 데이터에 의하여 수치표고모델을 구성하는 것으로, 그 구축방법이 격자형 데이터 구조보다 복잡하지만, 기억장소를 절약할 수 있고, 복잡하고 굴곡이 심한 지형을 보다 효과적으로 표현할 수 있다는 장점이 있다(Chang, 2008). 불규칙 삼각망을 구성하는 방법에는 최적 삼각형(Optimal triangulation), 그리드 삼각형(Grid triangulation), 델로니 삼각망(Delaunay triangulation) 등의 방법이 있다. 이 중에서 델로니 삼각망은 세 개의 절점을 연결한 삼각형의 외접원 안에 다른 점이 포함되지 않도록 연결된 불규칙 삼각망으로, 불규칙 삼각망 구성 방법들 중 모델의 형상과 특징을 잘 표현하는 방법이다(Kong, 2002).

2.2 3D모델 생성 기법

3D모델을 생성하는 기법에는 대표적으로 와이어프레임, 서피스, 솔리드 모델링 기법이 있다. 와이어 프레임 모델링기법은 점과 선으로써 물체의 외양만을 표현하는 형상 모델링 기법이다. 입체를 구성하는 정보가 점과 선만 있기 때문에 간단하게 형상을 그릴

수 있지만, 면의 개념은 인식하지 못한다. 서피스 모델링 기법은 와이어 프레임 모델링 기법에서 면의 개념을 추가한 기법이다. 이는 점, 선 그리고 면의 개념으로 3D모델 형상을 표현하기 때문에 와이어 프레임으로 만든 모델위에 껍질을 씌워놓은 형태라 할 수 있다. 이를 통해 생성된 3D모델은 속이 빈 공간으로 인식되기 때문에 3D모델을 표현하는 표현력에 비해, 정보가 차지하는 용량은 매우 적다. 이러한 장점을 활용하여 다각적으로 3D모델의 표면을 표현하는 것이 서피스 모델링 기법 중 하나인 메쉬 모델이다. 즉, 이러한 메쉬 모델을 이용하면 객체의 모양을 보다 세밀하게 표현할 수 있다. 솔리드 모델링 기법은 점, 선, 면 및 질량을 표현하는 형상 모델링 기법으로, 3D모델의 형상뿐만 아니라 모델의 다양한 정보를 제공한다. 하지만, 정보량이 많은 만큼 많은 용량을 차지한다.

물량산출의 활용도에 관하여 서피스와 솔리드 모델링 기법의 차이점을 살펴보면, 서피스는 와이어 프레임 형태의 메쉬 모델을 생성하므로 부피를 가지는 기하정보는 없지만 해당 구조물의 외곽 형상을 결정하는 삼각망 요소인 점, 선의 기하정보와 이를 통해 구성되는 면 정보를 활용하여 개략화된 단면의 형상을 추출할 수 있다. 그리고 이를 적층구조에 따른 단면의 총합으로 손쉬운 체적을 산출할 수 있다.

반면에 솔리드 모델은 내부가 채워진 객체로 인식되어, 이를 표현하는 기하정보가 방대하다. 솔리드 모델기법으로 비정형 모델을 생성하기 위해서는 객체의 불린연산을 수행해야 하고, 이렇게 변형된 비정형 형상에 대한 체적을 산출하기 위해서는 이를 계산할 수 있는 알고리즘 구성이 필요하다.

2.3 3D 모델링 기법 비교

시설물의 미적인 외관을 구성하기 위해서는 비정형 구조물이 많은 부분을 차지한다. 서피스 모델은 이러한 비정형 객체의 설계에 적합한 모델로써, 점, 선, 면을 이용한 모델의 표현이 다른 모델링 기법에 비해 자유롭다. 이러한 서피스 모델의 장점을 이용하여 최근 여러 소프트웨어들이 서피스 모델기반의 설계기법을 개발하고 있다. 하지만 서피스 모델은 모델에 대한 정보를 많이 가지고 있지 않기 때문에 부피 및 면적 등의 모델 정보를 제공하지 않는다. 때문에 서피스 모델링 기법으로 설계된 3D객체의 물량을 산출하기 위해서는 솔리드 모델로 전환하는 과정이 필요하다. 그러나 솔리드 모델은 정보를 많이 가지고 있는 만큼 많은 용량을 차지하여 건설 공사 전반에 걸친 모델을 모두 표현하는데에는 무리가 있다. 또한 솔리드 모델은 서피스 모델처럼 모델의 자유로운 표현에 한계가 있기 때문에 비정형 구조물 표현에는 어려움이 따른다. 따라서 서피스 모델을 솔리드 모델로 전환하는 과정에서는 하나의 서피스 모델을 분할해서 여러 개의 솔리드 모델로 생성하는 것이 필요하다. 또는 솔리드 모델로 표현하기 쉽게 서피스 모델의 정확도를 낮추어

생성한 후 솔리드 모델로 변환하는 과정이 필요하다. 그러나 이와 같은 방법은 형상 표현이 자유로운 서피스 모델의 장점을 물량산출 단계에서는 사용하지 못할 뿐만 아니라, 물량산출을 위해 서피스 모델에서 솔리드 모델로 변환하는 이중 작업을 수행해야하는 불편함이 따른다.

최근에는 파라메트릭 기법을 통해 솔리드 모델의 물량산출을 지원하는 소프트웨어도 개발되고 있다. 솔리드 모델은 정형모델에 한하여 파라메트릭 기반을 통해 물량산출을 지원한다. 파라메트릭 기반은 물량을 산출하는 일반적인 공식을 라이브러리와 하여 변수에 따른 물량을 자동으로 지원해주는 기능을 말한다. 하지만 이는 물량산출 수식이 일반화 되어있는 정형 모델에 한해서 제공 가능하다. 비정형 구조물의 경우에는 여러 개의 정형구조물로 나누어 모델을 생성하고 물량을 산출하여 합하는 방법으로 시도할 수 있으나, 모델을 분할해서 생성해야하는 번거로움과 시간소모가 따른다. 또한 이 파라메트릭 기반은 물량산출 수행 시, 비정형 구조물의 경우 형상에 따른 물량산출 수식을 설정하기 어렵고 비정형 구조물의 특징 상 설계자에 따라 구조물의 형태가 다양하게 변하기 때문에 수식을 라이브러리화하기 곤란하다.

3. 비정형 구조물의 물량산출 프로세스

3.1 비정형 구조물 물량산출 프로세스의 개요

본 연구에서 제시하는 비정형 구조물의 물량산출 프로세스는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 우선적으로 비정형 구조물의 물량산출을 위한 3D객체를 생성한다. 생성된 3D객체는 서피스 모델 기반의 메쉬 모델이며, 불규칙 삼각망을 이용하여 생성된 모델이다. 3D객

체가 불규칙 삼각망으로 표현되면, 미소구간을 설정하여 참조점을 도출하고 이를 이용하여 단면경계선을 생성한다. 여기서, 미소구간이란 xy평면을 기준으로 z값 방향에 대하여 구조물 모델을 다수의 슬라이스로 나누었을 때 현재의 평면단면과 다음의 평면단면 사이의 구간으로 정의할 수 있다. 이러한 미소 구간은 사용자 정의에 의하여 동일하게 입력할 수 있으며, 구간의 단위 길이값이 짧을수록 실제 형상에 가깝도록 정확한 물량을 산출 할 수 있다.

단면경계선을 생성하기 위한 참조점은 미소구간의 슬라이스 단면과 불규칙 삼각망이 겹치는 지점에 생성된 점으로 직선보간법을 이용하여 참조점의 좌표값을 도출한다. 참조점은 비정형 구조물의 형상을 최대한 표현한 불규칙 삼각망과 미소구간이 겹치는 지점에 생성되는 점으로, 참조점을 이용하면 구조물 단면 형상을 실제와 가깝게 표현할 수 있다. 여기서 단면경계선은 동일한 높이에 위치한 참조점을 연결하여 생성한 선으로써 단면경계선을 구성하는 참조점이 많을수록 그 높이에 해당하는 구조물의 단면형상을 비교적 근사하게 표현한다. 그리고 단면경계선들은 참조점의 좌표값을 통해 단면경계선의 둘레길이와 면적이 산출된다. 이러한 단면 경계선들의 둘레길이와 면적을 객체의 높이값으로 적분하면 객체 전체의 겹면적과 부피를 산출할 수 있다. 다음 절부터 비정형 구조물의 물량산출 과정을 단계별로 살펴본다.

3.2 3D객체의 생성

BIM기반의 비정형 구조물 물량산출을 위해서는 먼저 3D객체생성이 필요하다. 본 연구에서는 서피스 기반의 메쉬 모델을 이용하여 물량산출을 시도한다. 서피스 기반 3D객체는 모델 정보용량이 적고 표현력이 양호하므로 공사내용이 광범위한 비정형구조물의 설계에 유리한 모델링 객체 구성방법이다. 연구에서는 델로니 삼각

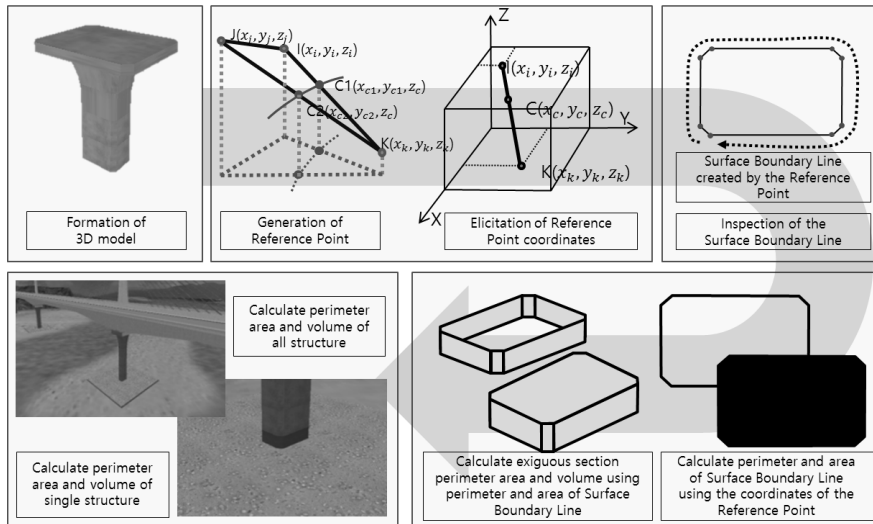


Fig. 1. Quantity Take-Off Process of Irregularly Shaped Structures



Fig. 2. Formation of 3D Model of Structure

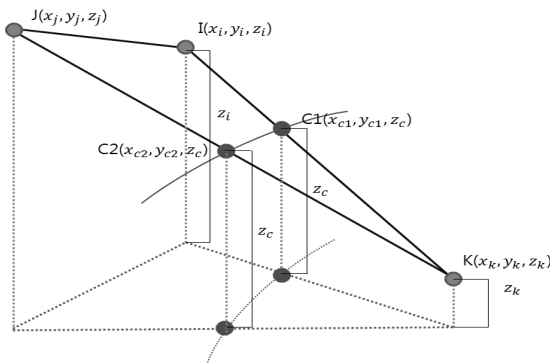
망 기법을 사용하여 서피스모델을 불규칙 삼각망으로 표현하는 메쉬 모델로 생성하였다.

Fig. 2에서 좌측은 교각 객체를 서피스 모델링 기법을 통해 생성한 3D객체이며, 우측은 서피스 기반의 3D객체를 메쉬로 나타낸 것이다.

3.3 참조점을 이용한 단면경계선의 생성

3.3.1 참조점의 생성

3D객체를 표현한 서피스 기반의 메쉬 모델을 일정한 높이 간격을 가진 미소구간으로 표현하기 위해서는 일정한 간격값 설정이 필요하다. 일정하게 설정된 간격에 해당하는 높이값과 3D객체가 접치는 지점을 참조점이라고 칭한다. 이러한 참조점은 3D객체를 표현하고 있는 불규칙 삼각망과 겹치고, 삼각망의 모서리나 변위에 생성되게 된다.



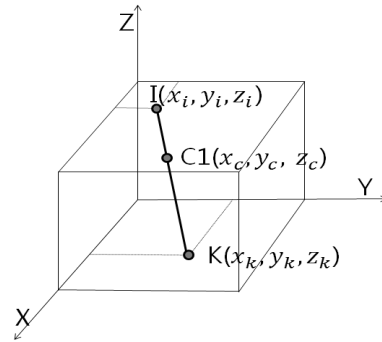
- 여기서, $\triangle IJK$: TIN을 구성하는 삼각형 중 한삼각형
 I, J, K : 삼각망을 구성하는 삼각형 꼭지점
 $C1$: 변 \overline{IK} 위에 생성된 참조점
 $C2$: 변 \overline{JK} 위에 생성된 참조점
 x_i, y_i, z_i : 점 I 의 x, y, z 좌표값
 x_j, y_j, z_j : 점 J 의 x, y, z 좌표값
 x_k, y_k, z_k : 점 K 의 x, y, z 좌표값
 x_{c1}, y_{c1} : 점 $C1$ 의 x, y 좌표값
 x_{c2}, y_{c2} : 점 $C2$ 의 x, y 좌표값
 z_c : 생성하고자 하는 단면경계선의 높이값

Fig. 3. Generation of Reference Point

Fig. 3에서 $\triangle IJK$ 는 서피스 기반의 메쉬 모델에서 비정형 구조물을 표현하고 있는 불규칙 삼각망 중 하나의 삼각형을 확대하여 나타낸 것이다. 점 $C1$ 과 $C2$ 는 불규칙 삼각망위에 생성된 참조점이다.

3.3.2 참조점의 좌표값 도출

생성된 참조점은 불규칙 삼각망 위에 생성된 점으로써, 불규칙 삼각망의 모서리 좌표값을 이용하여 참조점의 좌표값을 산출할 수 있다. 이러한 참조점의 좌표값은 단면경계선의 둘레 길이와 면적을 산출하는데 이용된다.



- 여기서, I, K : 삼각망을 구성하는 삼각형의 꼭지점
 C : 변 \overline{IK} 위에 생성된 참조점
 x_i, y_i, z_i : 점 I 의 x, y, z 좌표값
 x_k, y_k, z_k : 점 K 의 x, y, z 좌표값
 x_c, y_c, z_c : 점 C 의 x, y, z 좌표값(생성하고자 하는 단면 경계선의 높이값)

Fig. 4. Elicitation of Reference Point Coordinates

Fig. 4는 불규칙 삼각망을 이루는 변 \overline{IK} 위에 생성된 참조점 $C1$ 를 확대하여 나타낸 것이다. 불규칙 삼각망을 이루고 있는 점 I 와 K 의 좌표값은 불규칙 삼각망의 모서리 좌표값이기 때문에 변 \overline{IK} 위에 생성된 참조점 $C1$ 의 좌표값은 직선보간법을 통해 알 수 있다.

3.3.3 단면경계선의 생성

단면경계선을 생성하기 위해서는 동일 높이선상에 위치한 참조점들을 이용한다. 본 연구에서는 단면경계선을 비정형 구조물의 불규칙한 표면을 잘 표현하는 선으로써 같은 높이에 있는 참조점들을 연결하여 폐합한 선을 말한다. 참조점을 이용하여 단면경계선을 생성하는 방법은 첫째, 가장 낮은 높이에서부터 같은 높이값 Z 를 가지는 참조점들을 파악한다. 둘째, 같은 높이값을 가지는 참조점들 중에서 랜덤으로 하나의 기준점을 설정한다. 기준점을 기준으로 시계방향으로 참조점을 탐색하고 이들을 연결한다. 이러한 참조점

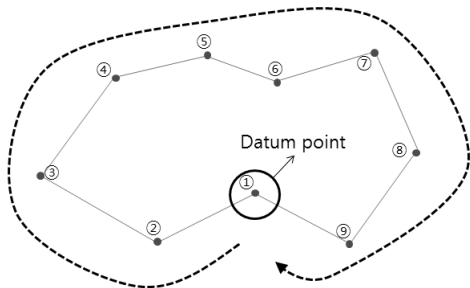
들의 연결을 통해 단면경계선이 생성된다. 셋째, 단면경계선의 생성 오류를 최소화하기 위해서 해당 높이에 생성된 참조점의 개수와, 해당 높이에 생성된 단면경계선을 이루는 참조점의 개수를 비교한다.

Fig. 5는 같은 높이값을 가지는 참조점들 중 기준점을 랜덤하게 설정하고 그 기준점을 기준으로 시계방향으로 참조점을 순차적으로 탐색하여 해당 높이의 단면경계선을 생성한 것이다. Fig. 5에서 기준점을 포함한 9개의 적색 점은 같은 높이값을 가지는 참조점들을 나타낸다. 기준점으로 선택된 1번점을 기준으로 참조점을 순차적으로 연결하여 생성된 청색 선은 해당 높이에 생성된 단면경계선을 나타낸다. 이러한 과정을 사용자가 설정한 일정 높이 간격마다 실시하면, 일정한 간격마다 단면경계선이 생성된다.

3.4 단면경계선의 길이, 면의 면적 산출

생성된 단면경계선은 참조점들을 연결한 폐합된 선으로써 하나의 단면을 가진다. 이러한 단면을 통해 미소구간별 겹면적과 부피를 산출하고, 이들을 합함으로써 3D모델의 전체 둘레길이와 부피를 산출할 수 있다.

단면경계선은 좌표값을 알고 있는 참조점을 연결하여 생성된 선이기 때문에 참조점들 간의 거리를 모두 산출하여 합하면 단면경계선의 길이를 산출할 수 있다.



Search order = ①→②→③→④→⑤→⑥→⑦→⑧→⑨→①

Fig. 5. Exploration of Reference Point in Consecutive Order

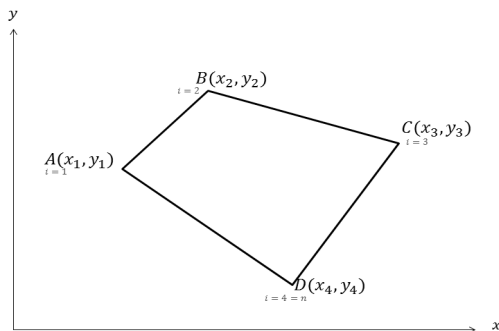


Fig. 6. Calculation of Surface Boundary Line Perimeter

Fig. 6은 비정형 구조물에 생성된 단면경계선 중 하나를 나타낸다. Fig. 6에서 점 A, B, C, D는 같은 높이값을 가지는 참조점으로, 단면경계선의 둘레길이를 산출하기 위해서 선분 \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CD} , \overline{DA} 의 길이를 산출하여 모두 합한다. 선분의 길이는 두 점간의 거리를 산출하는 공식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$l_m = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}) \tag{1}$$

- 여기서, A, B, C, D : 같은 높이값을 가지는 참조점
- 다각형 $ABCD$: 참조점 A, B, C, D 가 이루는 단면경계선
- n : 참조점의 개수
- l_m : m 번째 단면경계선의 둘레길이
- x_{n+1} : x_1
- y_{n+1} : y_1

Eq. (1)은 참조점들간의 거리를 이용하여 단면경계선의 둘레 길이를 산출하는 식을 간략화 한 것이다.

단면경계선이 이루는 면의 면적은 다각형 꼭지점의 좌표를 이용한 좌표법을 통해 산출할 수 있다. 즉, Fig. 6에서와 같이 사각형 ABCD의 면적은 참조점 A, B, C, D의 좌표값을 통해 산출할 수 있고, 이러한 식을 간략화 하면 Eq. (2)와 같다.

$$A_m = \frac{1}{2} [\sum_{i=1}^n y_i (x_{i+1} - x_{i-1})] \tag{2}$$

- 여기서, x_0 : x_n
- x_{n+1} : x_1

3.5 미소구간의 겹면적, 부피 산출

단면경계선 생성이 완료되면, 단면경계선의 둘레 길이와 단면경계선이 구성하는 면의 면적값을 이용하여 미소구간별 겹면적과 부피를 산출할 수 있다. 미소구간은 3D모델을 일정 간격으로 나눈 것으로, 미소구간의 겹면적과 부피를 산출하여 모두 더하면 3D모델 전체의 겹면적과 부피를 알 수 있다.

Fig. 7에서 아래에 있는 그림은 비정형 구조물에 미소구간별 생성된 단면경계선을 나타낸다. 그리고 Fig. 7에서 위의 그림은 3D 객체에 생성된 여러개의 미소구간 중 하나의 미소구간을 확대한 것이다. 미소구간을 이루는 높이와 상하 단면경계선의 둘레길이를 이용하면 미소구간의 겹면적을 산출할 수 있다.

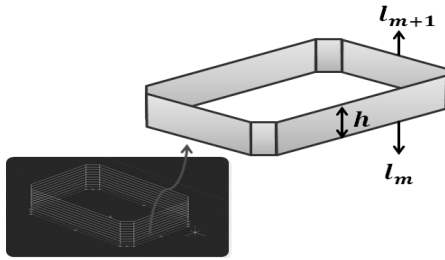


Fig. 7. The Surface Area of Exiguous Section

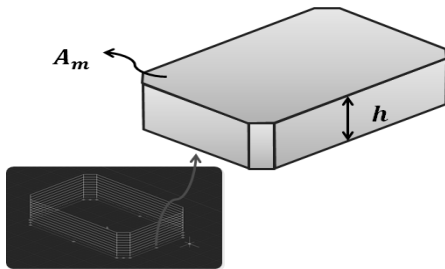


Fig. 8. Volume of Exiguous Section

$$A_{lm} = h \times \left(\frac{l_m + l_{m+1}}{2} \right) = h \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}) + \sum_{i=1}^k (\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2})}{2} \right) \quad (3)$$

- 여기서, n : 참조점의 개수
 h : 단면경계선 간격, 미소구간의 높이
 l_m : m 번째 단면경계선의 둘레길이
 x_{n+1} : x_1
 y_{n+1} : y_1
 l_{m+1} : $m+1$ 번째 단면경계선의 둘레길이
 A_{lm} : m 번째 생성된 미소구간 단면경계선 겉 면적

Eq. (3)은 미소구간의 겉면적을 산출하기 위해 양단면 평균법에 착안하여 생성한 식이다. 또한, 미소구간의 부피는 두 개의 단면경계선이 이루는 단면의 면적과 미소구간의 높이를 이용하여 산정할 수 있다.

Fig. 8은 단면경계선에 의해 생성된 면을 포함한 미소구간의 모습을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 아래의 그림은 비정형 구조물에 생성된 모든 단면경계선을 나타낸 것이며, 위의 그림은 단면경계선이 이루는 면을 포함한 하나의 미소구간을 나타낸 것이다. 단면경계선이 이루는 면의 면적을 미소구간의 높이값으로 적분하면 미소구간의 체적이 산출된다. 본 연구에서는 미소구간의 부피를 산출하기 위해 다음 Eq. (4)를 구성하였다.

$$V_m = \int_0^h A_m dA = \int_0^h \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n y_i (x_{i+1} - x_{i-1}) \right] dA \quad (4)$$

- 여기서, x, y : 참조점의 x, y 좌표
 n : 참조점의 개수
 m : 단면경계선의 생성순서 Number
 h : 단면경계선에 의한 미소구간 높이
 A_m : m 번째 생성된 단면경계선이 이루는 면의 면적
 x_0 : x_n
 x_{n+1} : x_1
 V_m : m 번째 생성된 단면경계선과 $m+1$ 번째 생성된 단면경계선이 이루는 미소구간부피

3.6 비정형 구조물의 물량산출

앞선 과정과 같은 방법으로 단일 비정형 구조물에 생성된 모든 미소구간의 겉면적과 부피를 합하면 단일 비정형 구조물의 겉면적과 부피를 산출할 수 있다. 그러나 비정형 구조물을 미소구간으로 나누는 과정에서는 객체 높이에 따라 최상위에 위치한 부분의 미소구간 크기가 일치하지 않을 수 있다. 즉, 비정형 구조물의 높이가 10.2 m인데, 1 m의 간격으로 단면경계선을 생성하면, 1 m의 높이값을 가지는 미소구간이 10개가 생성되고, 0.2 m의 높이값을 가지는 미소구간 하나가 생성된다. 따라서 0.2 m에 대한 겉면적과 부피를 별도로 산정하여야 한다. 따라서, 10 m까지는 Eqs. (3) and (5)에서 h 에 1 m의 값이 들어가지만, 최상위의 값에서는 0.2 m의 값이 들어간다.

$$A_{total} = \left(h \times \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \right) \right) + \dots + \left(h \times \left(\frac{l_m + l_{m+1}}{2} \right) \right) \quad (5)$$

$$= \sum_{i=1}^m \left(h \times \left(\frac{l_i + l_{i+1}}{2} \right) \right)$$

- 여기서, x, y : 참조점의 x, y 좌표
 n : 참조점의 개수
 m : 단면경계선 생성순서 Number
 h : 단면경계선 간격에 의한 미소구간 높이
 l_m : m 번째 단면경계선 둘레길이
 x_{n+1} : x_1
 y_{n+1} : y_1
 l_{m+1} : $m+1$ 번째 단면경계선 둘레길이
 A_{lm} : 미소구간 겉면적
 A_{total} : 단일구조물 전체겉면적

Eq. (5)는 단일 비정형 구조물에 생성된 미소구간의 모든 결면적을 합하여 단일 비정형 구조물 전체의 결면적을 산출하는 식을 나타낸 것이다.

$$V_{total} = \int_0^{m-1} \int_0^h A_m dA = \int_0^{m-1} \int_0^h \frac{1}{2} [\sum_{i=1}^n y_i (x_{i+1} - x_{i-1})] dA \quad (6)$$

- 여기서, x, y : 참조점의 x, y 좌표
- n : 참조점의 개수
- m : 단면경계선 생성순서 Number
- h : 단면경계선 간격에 의한 미소구간 높이
- A_m : m 번째 생성된 단면경계선이 이루는 면의 면적
- x_0 : x_n
- x_{n+1} : x_1
- V_m : m 번째 생성된 단면경계선과 $m+1$ 번째 생성된 단면경계선이 이루는 미소구간 부피
- V_{total} : 단일구조물 전체부피

Eq. (6)은 단일 비정형 구조물에 생성된 미소구간의 모든 부피를 합하여 단일 비정형 구조물의 부피를 산출하는 식을 간략히 한 것이다. 이러한 비정형 구조물의 결면적은 거푸집 물량산출 등에 이용될 수 있고, 부피는 콘크리트의 물량산출 등에 이용될 수 있다. 또한, 내부가 비어있는 비정형 구조물에 대해서 물량산출을 수행할 시에는 특정 높이에 대한 단면경계선이 두 개가 생성된다. 이와 같은 경우에 외부에 생성된 단면경계선을 통한 물량 값에서 내부에 생성된 단면경계선을 통해 산출된 물량 값을 빼는 방법으로 거푸집, 콘크리트 등의 물량을 산출 할 수 있다.

4. 사례적용

본 연구에서는 비정형 구조물의 물량산출 알고리즘의 타당성을 확보하기 위하여 사례모델의 부피값 산정을 실시하고 이를 기존 물량산출 방법을 통해 산출한 값과 비교한다.

사례모델은 지름 2 m의 구와 OO대교의 상부교각모델로 선정하였다. 구는 정형 모델이기도 하지만 곡선으로 이루어진 모델이고, 체적이 공식으로 정확하게 산정될 수 있기 때문에 사례모델로 선정하였다. OO대교의 상부교각모델은 모델의 중앙 부분과 양 끝부분의 높이가 변화하며, 모델 아랫부분에서 윗부분으로 가면서 모양이 변화하는 비정형 구조물이기 때문에 사례모델로 선정하였다. 특히 이러한 두 모델은 심한 비정형 구조물이 아니기 때문에 솔리드 모델을 통한 물량산출 수행할 수 있으므로 솔리드 모델을 통한 부피값과 본 연구에서 제시하는 부피값을 비교하기에 적합한

모델로 판단된다. 그리고 사례모델의 물량산출값을 도출하기 위해서 본 연구에서는 수계산 방법과 솔리드모델의 물량산출 기능을 지원하는 소프트웨어인 Allplan을 사용하고, 이를 본 연구의 방법과 비교한다.

4.1 수계산을 통한 물량산출

본 연구에서 제시한 알고리즘의 물량산출 정확도를 검증하기 위해서 수계산을 통한 물량산출을 수행한다. 수계산은 사례모델인 구와 OO대교를 대상으로 수행된다. 구는 부피를 산출하는 일반화된 공식이 존재하기 때문에 수계산을 통한 물량산출값은 연구에서 제시한 알고리즘의 물량산출 정확도를 검증하기 위한 비교 대상이 될 수 있다. 수계산을 통한 물량산출 수행결과는 아래와 같다.

$$\text{구의 부피} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \times 1^3 = 4.189 m^3 \quad (7)$$

위와 같이 수계산으로 산출한 값은 구의 부피를 구하는 일반적인 공식을 통해 산출한 값이므로, 모델 구의 사례 적용 검증을 위한 기준 값으로 사용한다.

OO대교의 상부교각모델은 부피를 산출하는 일반화된 공식이 존재하는 모델은 아니지만, 모델을 세분화 시켜 분해하면 각각의 모델이 일반화된 수식으로 부피를 산출할 수 있는 모델이다. 그러므로 이 모델 또한 수계산을 통한 물량산출값이 연구에서 제시한 알고리즘을 통한 물량산출 값의 정확도를 검증하기 위한 비교 대상이 될 수 있다. 수계산을 통한 OO대교 상부교각모델의 물량산출 수행결과, 66.104 m^3 으로 산출되었다.

4.2 기존 소프트웨어를 통한 물량산출

본 연구에서 제시한 알고리즘을 통해 산출한 물량의 정확도를 비교하기 위해 솔리드기반 3D모델의 물량산출을 지원하는 상용화된 소프트웨어인 Allplan (2012¹⁾)을 이용하여 같은 모델에 대한 물량산출을 수행하였다. 우선, 구를 3D MAX를 활용하여 서피스 기반의 3D모델로 생성하고, 이를 Allplan으로 Import하여 사용하였다.

Fig. 9는 Allplan을 통해서 물량산출을 수행하는 과정이다. Allplan에서 서피스 모델의 물량산출을 하기 위해서는 솔리드 모델로 변환하는 과정이 필요하기 때문에, 구의 3D모델을 솔리드 모델로 전환하여 물량산출을 시도하였다. 그러나 물량산출을 위해 서피스 모델을 솔리드 모델로 변환하는 과정에서 정확도가 높은 서피스 모델의 구성요소를 솔리드 모델로 모두 표현할 수 없는 문제로 인하여 서피스 모델을 솔리드 모델로 변환 시 모델의 정확도가

1) Copyright © NEMETSCHKE Allplan GmbH, München

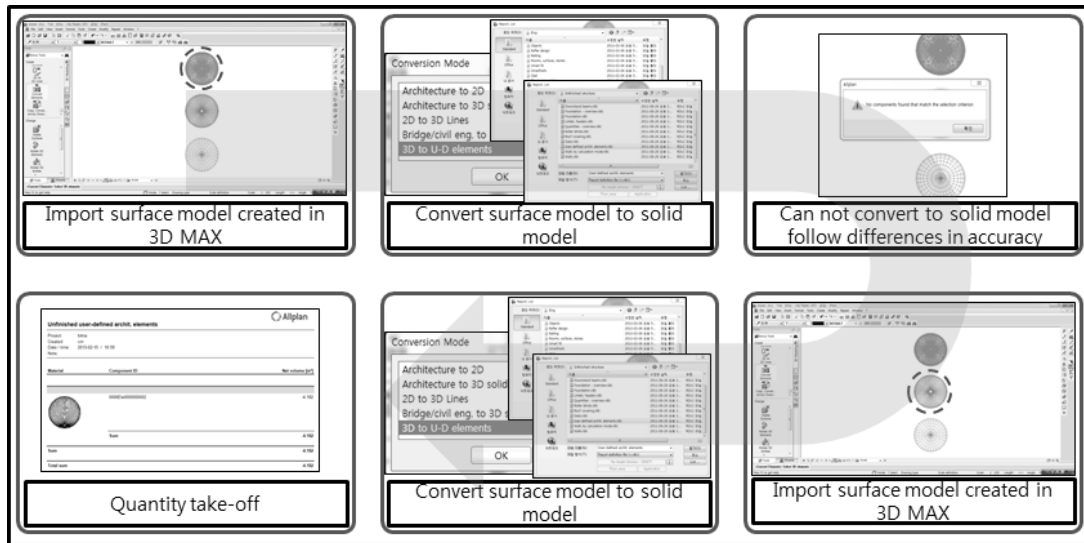


Fig. 9. Quantity Take-Off of Sphere Using Allplan

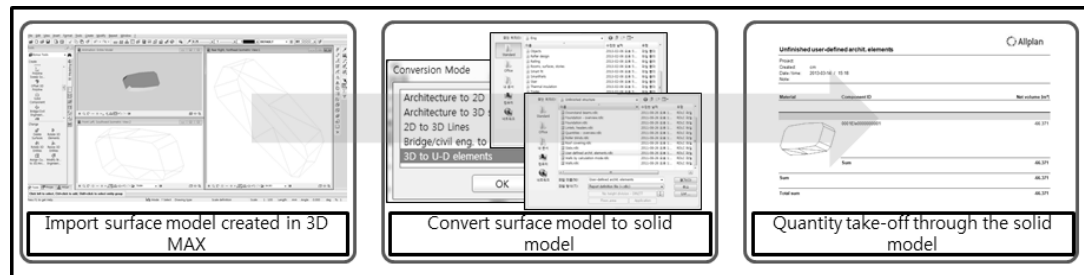


Fig. 10. Quantity Take-Off of OO Bridge Upper Pier Using Allplan

한 단계 낮아진 모델로 변환되어 물량산출을 수행하였다. 이를 통해 산출된 구의 부피는 4.182 m^3 으로 나타났다. 그리고 OO대교의 상부교각모델의 물량산출 또한 Allplan을 이용하였으며, 동일한 방법으로 3D MAX를 통해 생성된 모델을 Allplan으로 Import하여 솔리드 모델로 변환하였다.

Fig. 10은 Allplan을 통한 OO대교 상부교각모델의 물량산출 과정을 나타낸 것이다. Fig. 10에서 좌측부터 첫 번째 그림은 3D MAX에서 생성한 모델을 Allplan으로 Import한 것이고, 두 번째는 서피스 모델을 솔리드 모델로 변환하는 과정이다. 그리고 세 번째는 솔리드 모델을 통해 물량산출을 수행한 그림이다. Allplan을 통한 OO대교의 상부교각모델 부피값은 66.371 m^3 으로 산출되었다.

4.3 비정형 구조물 물량산출 알고리즘을 통한 물량산출

본 알고리즘에 사용한 3D 객체는 앞선 사례모델과 동일하게 3D MAX를 통해 생성된 3D 객체를 이용하였다. 물량산출과정은 3D MAX에서 생성한 서피스 모델을 Import시키고, 불규칙 삼각망 기법으로 삼각망을 구성한다. 생성된 삼각망에 미소구간의 높이를

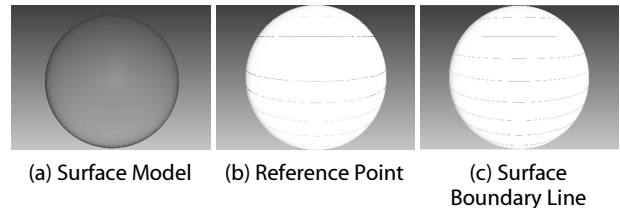


Fig. 11. View of Case Model Sphere

설정하여 단면경계선을 구성하기 위한 참조점을 생성한다. 그리고 참조점을 이용하여 단면경계선을 생성하고, 이러한 단면경계선을 통해 물량을 산출한다. 지름 2 m인 구는 덩치가 큰 토목 구조물에 비해 작은 모델인 관계로 0.01 m 간격으로 단면경계선을 생성하여 물량산출을 수행하였다.

Fig. 11은 본 연구에서 제시한 물량산출 방법을 이용하여 지름 2 m인 구의 부피를 산출하는 과정의 모델을 나타낸 것이다. Fig. 11 좌측에서부터 구의 서피스모델, 단면경계선을 생성하기 위해 참조점을 도출한 모델, 구에 0.01 m 간격으로 단면경계선을 생성한

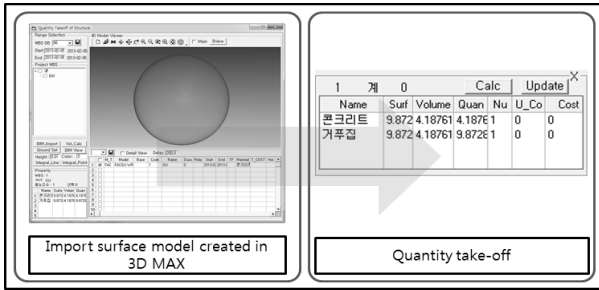


Fig. 12. Quantity Take-Off of Case Model Sphere

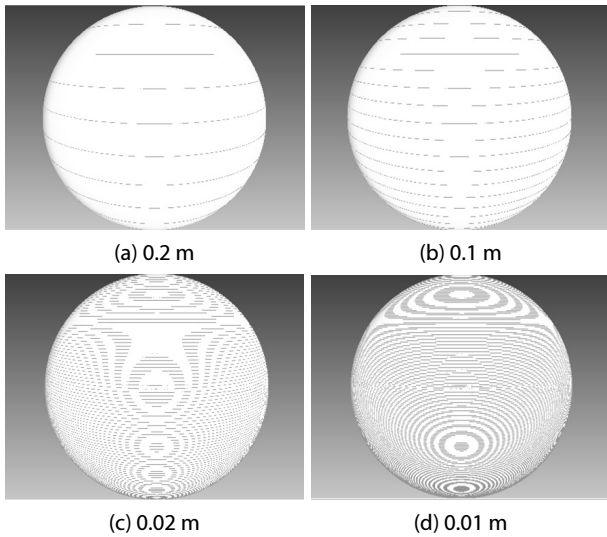


Fig. 13. Space Adjustment of Surface Boundary Line

모델을 나타낸다. 연구에서 제시한 알고리즘을 통해 지름 2 m 인구의 물량산출을 수행한 결과는 부피 4.188 m³으로 산출되었다.

Fig. 12는 본 연구에서 제시한 비정형 구조물의 물량산출 알고리즘을 이용하여 물량산출을 수행하는 화면이다. 또한, 단면경계선의 생성 간격에 따른 물량산출의 정확도를 파악하기 위해 추가적으로 지름 2 m 인구에 단면경계선의 생성 간격을 조절하여 물량산출을 수행하였다. 이를 위해 지름 2 m 구에 0.2 m, 0.1 m, 0.02 m, 0.01 m로 각각 다른 간격의 단면경계선을 생성하였다.

Fig. 13은 지름 2 m인 구에 0.2 m, 0.1 m, 0.02 m, 0.01 m의 간격으로 단면경계선을 생성한 모습을 나타낸 것이다. 단면경계선의 생성간격을 달리하여 물량산출을 수행한 결과는 아래의 Table 1과 같다.

Table 1은 단면경계선에 따른 부피값과 앞서 수계산을 통해 산출한 부피와의 오차를 나타내고 있으며, 미소구간의 높이를 좁게 하여 단면경계선의 수를 늘일수록 수 계산값에 더 가까운 값으로 산출되며, 추가 계산에 소요되는 시간은 많은 차이가 나타나지 않았다. 두 번째 사례모델인 OO대교의 상부교각모델은 높이 2

Table 1. Volume Value According to Surface Boundary Line Generation Interval

Interval of Surface Boundary Line	0.2 m	0.1 m	0.02 m	0.01 m
Volume value	4.371 m ³	4.236 m ³	4.187 m ³	4.188 m ³
Error(%)	4.34	1.121	0.047	0.023

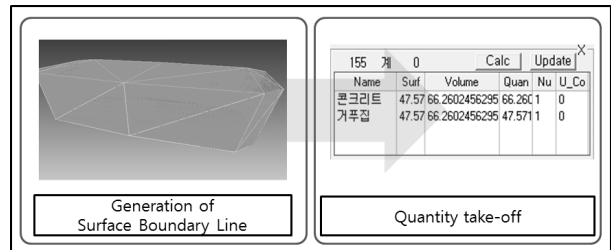


Fig. 14. Quantity Take-Off of Case Model OO Bridge Upper Pier

m의 모델로, 단면경계선의 생성간격을 0.01 m로 설정하여 물량산출을 수행하였다.

Fig. 14에서 좌측은 OO대교의 상부교각모델에 0.01 m의 간격으로 단면경계선을 나타낸 것이다. 우측은 생성된 단면경계선을 이용하여 물량산출을 수행한 것이다. OO대교의 상부교각모델에 대한 부피는 66.260 m³으로 산출되었다.

4.4 사례 적용 검증

본 연구에서는 비정형 구조물 물량산출 알고리즘을 통해 산출한 물량의 정확도를 검증하기 위하여 두 가지 사례모델을 대상으로 수계산과 상용 소프트웨어인 Allplan을 활용하였다.

먼저, 구에 대한 사례를 본 연구의 알고리즘과 비교하면, Table 2에서 확인 할 수 있듯이, 수계산과 Allplan을 통해 산출된 부피값과의 오차가 각각 ‘0.023%’, ‘0.143%’으로 차이가 근소한 것을 파악할 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 알고리즘이 물량산출 면에서 높은 정확성을 가지는 것으로 파악할 수 있다. 두 번째 사례모델인 OO 대교의 상부교각부위에 대한 부피값을 본 연구의 알고리즘과 비교하면 Table 3과 같이 나타난다.

Table 3에서 확인 할 수 있듯이, 수계산과 Allplan을 통해 산출된 부피값과의 오차가 각각 ‘0.235%’, ‘0.167%’의 차이가 발생한다는 것을 알 수 있다.

두 번째 사례모델은 첫 번째 사례모델과 비교하였을 때, 비교적 오차가 높은 것을 알 수 있다. 이는 두 번째 사례모델이 구와 같이 일반적인 공식이 정해진 것이 아닌, 비정형 모델이기 때문이다. 두 번째 사례모델의 크기가 일반적인 토목구조물과 비교하였을 때, 큰 규모의 구조물이 아닌 상황에서 0.235%, 0.167%의 차이가 나는 것으로 보아, 비교적 규모가 큰 토목구조물에서 기존 방법들과

Table 2. Volume Value of Case Model Sphere According to Quantity Take-Off Method

	Hand calculation	Allplan	The proposed method
Volume (m^3)	4.189	4.182	4.188
The error of the volume value with through this study (%)	0.023	0.143	0

Table 3. Volume Value of Case Model 00 Bridge Upper Pier According to Quantity Take-Off Method

	Hand calculation	Allplan	The proposed method
Volume (m^3)	66.104	66.371	66.260
The error of the volume value with through this study (%)	0.235	0.167	0

비교하여 더 높은 오차를 낼 수 있을 것으로 예상 되어 진다. 이는 수계산과 상용소프트웨어의 값이 정확한 값이라 볼 수 없는 상황에서 본 연구에서 제시한 방법의 가능성을 보여준다.

이와 같이 비정형적 성격이 다른 두 모델의 사례적용을 통해 본 연구에서 제시한 서피스 모델을 통한 물량산출 방법은 비정형 구조물의 설계에 비교적 유리한 서피스 모델링의 장점을 살리면서 솔리드 모델만큼 정확성을 가진 물량값을 산출할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 솔리드모델로 물량산출이 어려운 비정형 구조물에 대해 본 연구에서 제시하는 서피스모델 기반 물량산출 방법이 적용 가능할 것으로 기대 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 증가추세에 있는 비정형구조물의 물량산출 알고리즘 구축을 시도하였으며, 비정형 구조물의 모델링이 비교적 자유로운 서피스 모델을 물량산출 단계에까지 적극 활용하도록 하였다. 이를 위해 서피스 모델에 단면경계선을 생성하고, 단면경계선에 의해 생성된 미소구간의 겹면적과 부피값을 이용하여 구조물의 물량산출을 수행하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서는 서피스모델 기반 메쉬로 생성된 3D객체의 물량을 직접 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 제시된 알고리즘이 기존방식 대비 개선된 절차로 활용될 수 있도록 불규칙 삼각망의 참조점에 의한 비정형 등간격 단면생성 방법론을 제시하였다. 이는 기존 솔리드 기반의 물량산출이 건설공사 비정형 구조물 물량산출에 주는 한계점을 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 제시된 알고리즘의 실무적 활용성을 검증하기 위해 연구에서 제시된 방법론과 상용 프로그램에 의한 방법, 수 계산에 의한

방법으로 물량산출을 수행하고 상호 비교분석 하였다.

셋째, 솔리드 모델방식과 본 연구에서 제시하는 서피스모델 기반의 물량산출값의 정확도에서 다소 적은차이가 났지만, 본 연구에서 제시하는 방법은 서피스모델 기반의 객체를 통해 직접 물량산출을 수행하기 때문에 현재의 추가적인 솔리드 모델의 복잡한 생성절차와 전환 수고를 덜 수 있고, 서피스 모델의 장점을 그대로 물량산출 단계까지 확장시키는 방법론이 될 수 있다. 이러한 결과로 본 연구에서 제시하는 서피스 기반의 물량산출 방법론이 기존 솔리드 기반 물량산출 방법 대비 3D 물량산출에서 실무적인 활용도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

현재 BIM기반의 프로그램들은 비정형 모델의 정확한 물량 산출 및 비용 통합의 어려운 측면으로 인해 4D CAD가 5D CAD로 이전되지 못하고 있기 때문에, 본 연구에서 제시된 알고리즘에 향후 자원이나 장비 등의 시공정보를 통합한다면, 물량산출 프로세스를 포함한 nD CAD로 BIM환경이 확장될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 경제적인 물량 값을 산출하기 위한 적절한 단면경계선의 생성 간격을 판단할 수 있는 기준 제시를 위한 향후 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문의 일부는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0016064).

References

- Chang, K. T. (2008). *Introduction to geographic information systems* (4th ed.), McGraw-Hill, Boston.
- Du, J. C. and Teng, H. C. (2007). "3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation." *Journal of Automation in Construction*, Vol. 16, No. 5, pp. 657-663.
- Han, J. H. and Nam, S. H. (2011). "A study on the automated estimating system using BIM based library." *Journal of Korea Institute of Building Information Modeling*, Korea Institute of Building Information Modeling, Vol. 1, No. 2, pp. 13-17 (in Korean).
- Jun, K. H. and Yun, S. H. (2011). "The case study of BIM-based quantity take-off for concrete and formwork." *Journal of Korea Institute of Building Information Modeling*, Korea Institute of Building Information Modeling, Vol. 1, No. 1, pp. 13-17 (in Korean).
- Kim, C. S. (2011). *A study on the modeling method for material take-off of BIM based framework*, Master's Thesis, Kyeongsang National University (in Korean).
- Kong, J. Y., Kang, H. J. and Yoon, S. J. (2002). "A study on terrain surface modeling and polygon-searching algorithms." *Proceedings*

- of The Korea Society for Simulation Autumn Conference, *The Korea Society for Simulation*, pp. 163-170 (in Korean).
- Kwon, O. C., Jo, C. W. and Cho, J. W. (2011). "Introduction of BIM quality standard for quantity take-off." *Korea Journal of Construction Engineering and Management*, The Korea Institute of Building Construction, Vol. 11, No. 2, pp. 171-180 (in Korean).
- Park, Y. J., Oh, Y. S., Cho, C. Y. and Lee, J. B. (2011). "Quantity surveying for structural components using building information model." *Proceedings of Korea Institute of Construction Engineering and Management Annual Conference*, Korea Institute of Construction Engineering and Management, pp. 20-26 (in Korean).
- Shen, Z. and Issa, Raja R, A. (2010). "Quantitative evaluation of the BIM-assisted construction detailed cost estimates." *Journal of Information Technology in Construction*, Information Technology in Construction, Vol. 15, pp. 234-257 (in Slovenia).
- Steel, J. and Drogemuller, R. (2011). "Domain-specific model transformation in building quantity take-off." *Proceedings of the 14th International Conference*, Wellington, New Zealand, pp. 198-212.
- Trost, S. M. and Overlender, G. D. (2003). "Predicting accuracy of early cost estimates using factor analysis and multivariate regression." *Journal of Construction Management*, ASCE, Vol. 129, No. 2, pp. 198-204.
- Yilmaz, I. (2009) "A research on the accuracy of landform volumes determines using different interpolation methods." *Scientific Research and Essays, Academic Journals*, Vol. 4, No. 11, pp. 1248-1259.