

불규칙 삼각망과 수정된 진화론적 구조 최적화 기법을 이용한 평면구조의 응력경로 탐색 모델의 개발

Development of the Stress Path Search Model using Triangulated Irregular Network and Refined Evolutionary Structural Optimization

이 형 진* · 최 원* · 이 정 재**

Lee, Hyung Jin · Choi, Won · Lee, Jeong Jae

Abstract

In designing the structure, the stress path is the basic data. But the stress path is not standardized to analysis the structure. So the one-dimensional frame element structure model with the triangle irregular network is used to solve the problem. And the refined evolutionary structural optimization(RESO) used in structural topology optimization is applied to this study. Through this process, the search method of the stress path is advanced and the burden of the calculation. is reduced.

Keywords : RESO, Reinforcing Steel, Truss Model, Stress Path, TIN

1. 서 론

콘크리트는 경제성, 내구성, 내화성, 사용성 등과 더불어 유지관리 측면의 장점으로 인해 인류문명의 근간이 되어 온 건설재료로서 목재, 철강, 아스팔트, 석재 등 타 건설 재료에 비해 상당한 이점과 경쟁력을 가지고 있다. 하지만 콘크리트의 경우 압축강도에 비해 매우 낮은 인장강도를 가지고 있고 취성적인 파괴를 보이는 특성을 가지는 문제점을 내포하고 있다. 콘크리트가 가지는 높은 이점을 활용하면서 동시에 위와 같은 문제점들을 극복하기 위해서는 인장 강도

에 강하며 연성적인 거동을 하는 철근을 적절한 위치에 함께 배근해야 한다. 콘크리트와 철근의 적절한 배근에 관한 연구는 전 세계적으로 끊임없이 지속되어 왔고 트러스 모델과 Strut-Tie 모델이 대표적이다.

트러스 모델에 의한 해석 방법은 여러 가지의 내력성분(축력, 휨, 전단 등)을 갖는 구조물을 인장과 압축을 받는 스트럿과 철근 타이로 단순화하여 구조물 내의 힘의 흐름을 해석하고 도식화시켜 보여준다(Morsch, E, 1912; Leonhardt, F, 1965). 기존의 모델에 의한 압축강도 산정 결과는 소성학 테두리 안의 극한이론에 따르면 하한치에 해당하여 부재의 실제 강도보다 작거나 같으므로 안전한 구조설계의 결과를 얻게 된다. 이러한 모델은 하중 증가에 따라 균열이 발생하는 콘크리트를 해석할 때 연속체로 가정 한 역학적인 모델로 구조물 내부 힘의 흐름을 파악하는 것보다는 균열이 존재하는 부재에 대해 불연속적

* 서울대학교 대학원 생태조경 지역시스템공학부

** 서울대학교 생태조경 지역시스템공학부 교수

† Corresponding author. Tel.: +82-

Fax: +82-

E-mail address:

인 응력장인 모델로 파악함으로써 공학적인 측면에서 보다 현실적인 접근으로 볼 수 있다. 하지만 기존의 모델은 초기 기하학적인 구성을 위하여 사용자의 경험이나 직관에 의존해야 하며 구조물 내 미세한 부분의 해석에 한계가 있을 수 있으며 자의적인 부분은 설계에 있어 잘못 쓰일 위험이 있기 때문에 개선이 필요하다. 또한 기본적으로 스트럿 요소의 경우 전단력을 평가할 수 없기 때문에 전단보강이 되어 있지 않거나 적은 양의 전단보강이 된 세장한 철근콘크리트 부재의 전단강도를 과소평가하게 되므로 사용성에 제한이 있다.

점진적 방법들은 위상 구조 최적화를 기반으로, 이산화된 연속체에 쉽게 적용할 수 있어 점진적 구조 최적화 기법(ESO, Xie, Steven, 1993), 그리고 이들을 계속 발전시킨 모델들이 있다. 연속체를 이산화하면, 이들 방법에 의해 응력 경로의 탐색이 가능하게 된다. 하지만 구조물을 평면요소로 나누었기 때문에 아직도 계산의 부하량이 많고 응력의 방향을 표현하는데 제한적인 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 임의의 구조물을 모델링 할 수 있는 불규칙 삼각망을 이용하여 경험적, 직관적 방식에 따라 수행하는 트러스 모델과 응력의 방향성을 가지지 못한 ESO의 한계점을 개선하고자 하였다. 그리고 불규칙 삼각망의 변을 여러 가지 종류의 하중 조건으로 쉽게 다룰 수 있고 경계조건의 종류나 개수에 제한이 없는 프레임 요소로 적용하여 계산의 부하량을 줄였고 RESO(Refined Evolutionary Structural Optimization, Huang, 2003)를 본 연구에 적용하여 비효율적인 요소를 단계별로 삭제해 나가면서 최적의 구조 형태를 합리적인 수치를 이용해서 구하였다.

II. 응력 경로 탐색 방법

1. 불규칙 삼각망 생성

응력 경로를 탐색하는데 있어 요소를 면요소가 아닌 트러스와 같은 요소로 이용할 경우 1차원이기 때문에 응력의 방향성을 효과적으로 보여줄 수 있는 이

점을 가진다. 반면 삼각형이나 사각형 면요소로 구조물을 일반화한 경우 구조물 내에서 발생하는 응력은 방향성이 존재하나 면요소로는 그 방향성을 표현할 수 없기 때문에 내력의 방향을 효과적으로 표현하기에 어려움이 있다. 이러한 단점을 피하기 위하여 Advancing Front Method를 통한 모든 방향에 대한 응력의 표현이 가능한 불규칙 삼각망을 이용했다. 이 방법은 요소생성 영역의 경계 루프에서부터 차례로 절점과 요소를 생성시켜 나가는 방법으로 외부/내부 경계 상에 초기 절점을 배치하여 이 절점들의 방향성 있는 연결인 경계를 생성한 후, 외부 경계에서는 내부로, 내부 경계에서는 외부로 향하면서 요소열을 순환적으로 적층한다. 즉, 영역을 나누는 기본 경계 절점에서 다른 절점과는 교차하지 않으면서 외접원을 이룰 수 있는 가장 가까운 절점을 찾아가면서 삼각형을 만들어간다. 위와 같은 방법론을 따르기 때문에 불규칙 삼각망을 구성하기 위한 기본 입력 자료는 영역의 경계 절점 좌표만으로도 충분하다는 사실을 알 수 있고 본 연구에 적용한 모델에서도 처음의 입력 자료는 영역의 기본 경계 절점만을 입력하고 있다.

2. 강성 매트릭스 산출

2차원 공간에서 임의의 방향으로 경사가 있는 하나의 트러스 요소를 고려한다면 국소좌표계(x, y)와 전체좌표계(X, Y)가 있을 것이다. 부재의 축이 국소좌표계의 x 축이 될 것이며 각 절점마다 x 축으로 작용하는 힘 F_x 와 변위 u 를 가지게 된다.

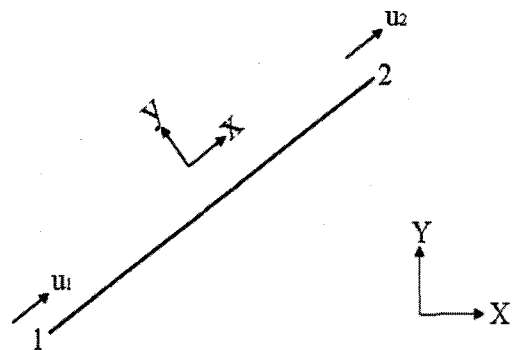


Fig. 1 Each truss element

구조물 정적거동에 대한 평형방정식은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$[F] = [k][U] \quad (1)$$

현재 트러스의 경계조건을 이용하면 식 (2)와 같은 연립방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -10 \\ 0 & 0 & 0 \\ -10 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

그리고 국소 좌표계 x, y 축에 대한 방향코사인을 $l_1, m_1; l_2, m_2$ 으로 한다면, 국소좌표계와 전체좌표계 간의 관계를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 \\ l_2 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

현재 트러스 봉에 작용하는 변형에너지는 식 (4)와 같고 강성방정식은 식 (5)를 통해서 얻어질 수 있다.

$$U = \frac{1}{2} (\overline{F_{x_1} u_1} + \overline{F_{x_2} u_2}) \quad (4)$$

$$F_i = \frac{\partial U}{\partial u_i} \quad (5)$$

강성 행렬과 변위, 힘의 관계를 정리하면 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} l^2 & lm \\ lm & m^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

각 요소들의 강성매트릭스 K_e 와 절점의 하중을 모두 합한다면 전체 구조물의 강성매트릭스 K 와 절점

하중 F 를 식 (8)과 식 (9)로 구할 수 있다.

$$[K] = \sum K_e \quad (8)$$

$$[F] = \sum F_e \quad (9)$$

3. 수정된 진화론적 구조 최적화 기법 적용

유한요소해석을 수행할 때 구조체를 작은 요소의 연속체로 두고 해석하면 개개의 요소가 분담하는 응력의 크기가 달라지며 이때 다른 요소에 비하여 상대적 중요도가 낮은 비효율적인 요소를 삭제하더라도 전체 강성에는 거의 영향이 없게 된다. 각 요소들의 위상을 결정하는 연구는 오래전부터 제안되어 왔고, 그 중에서 진화론적 최적화 기법(ESO)은 가장 널리 이용되며 가장 효과적인 접근 방법이다. ESO는 우선 간단하고 다른 방법들에 비해 보다 정확한 값을 얻을 수 있으며 유한요소법에서 효과적인 기능을 발휘한다. 하지만 ESO는 수치적인 방법이므로 해를 평가할 수 있는 합리적인 종료규준을 가져야하나, 더 이상 제거할 요소가 없을 때까지 반복하는 방법과 삭제율을 제한하는 방법 등 현재 정확한 규준 없이 설계 경험에 종속되어 있다(Zhao et al. 1998). 본 연구에서는 각 단계별 수행지수(Performance Index)를 통해서 가장 효율적인 단계를 찾아내어 최적위상을 구해내는 방법, 개선된 진화론적 구조 최적화 기법(Refined Evolutionary Structural Optimization, Liang and Steven, 2002)을 적용하였다.

우선 본 연구에서의 제거 규준은 설계영역 내에서 각 요소의 응력 레벨이 전구조체의 최대 레벨의 σ_{max} (모든 요소의 응력 중 최대값)에서 각 요소의 σ_{ele} (요소의 응력)의 비로 결정했으며, 다음의 조건을 만족하는 모든 요소는 비효율적이라 판단하고 다음 단계 수행 전에 삭제했다. 참고로 종래의 ESO의 경우 요소가 하나의 삼각망에 적용되나 본 연구에서는 트러스로 가정한 선요소로 대처하였다. 트러스 모델링을 적용했으므로 선요소에 축력의 해가 산출된다. 따라서 삼각망을 각각의 요소로 가정할 경우 삼각망을 구성하는 선요소들의 평균이나 합을 이용하여 해석을 수

행하여야 하나 인장력과 압축력이 연속되어 있는 부분의 해석에 한계가 있으며 삼각망의 수에 따라서 축력을 표현하는데 어려움이 있을 것으로 판단하여 선요소를 이용해서 해석하였다.

$$\frac{\sigma_{ele}}{\sigma_{max}} > RR_i \quad (10)$$

식 (10)의 RR_i 는 i 단계의 삭제율(Removal Ratio)이다. 이 식을 통해서 전 요소에서 이 기준에 부합하지 않는 비효율적인 요소가 모두 삭제될 때까지 진행되며 종료기준에 부합하는 정상 상태에 도달할 때까지 식(11)과 같이 현재의 삭제율에 진화율(Evolutionary Ratio, ER)을 추가시켜 요소삭제 과정을 반복한다.

$$RR_i = RR_i + ER \quad (11)$$

한 단계에서 과다한 요소의 삭제는 최적의 위상 최적화 상태를 탐색하는데 있어서 적절한 단계의 결과를 간과할 수도 있으므로 초기 RR , ER 을 최소단위인 1%로 규정하고 구조 해석을 반복하였다(Hinton and Sienz 1995).

본 연구에서 종료 기준 설정을 위해서 각 요소별 변형에너지 밀도를 이용하였다. 구조물의 정적 거동에 대한 평형방정식은 식 (12)와 같으며,

$$[F] = [K][U] \quad (12)$$

구조물의 변형 에너지는 식 (13)과 같이 정의 된다.

$$C = \frac{1}{2} \{f\}^T \{u\} \quad (13)$$

여기서 n 개의 유한 요소로 구성된 구조물로부터 i 번째 요소를 제거하는 경우를 고려해보자.

$$[\Delta K] = [K^*] - [K] = -[K^*] \quad (14)$$

강성 행렬은 식 (14)와 같이 변화할 것이다. 여기서

$[K^*]$ 는 i 번째 요소 제거 후의 강성 행렬이고 $[K^i]$ 는 i 번째 요소의 강성 행렬이다.

$$\begin{aligned} \Delta C &= \frac{1}{2} \{f^T\} \{\Delta u\} \\ &= \frac{1}{2} \{u^i\}^T [K^i] \{u^i\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$W_i = \frac{1}{2V_i} \{u_i\}^T [k_i] \{u_i\} \quad (16)$$

식 (13)을 강성 행렬의 변화량을 적용해서 풀어쓰면 변형 에너지의 변화량은 식 (15)와 같이 정의 되면 불규칙한 요소에 대한 정확한 비교를 위해 각 요소별 부피(V)를 이용하면 요소별 변형 에너지 밀도를 식 (16)과 같이 산출할 수 있다. 또한 이 방법론은 추후에 3차원 모델을 구성할 때도 각 요소를 같은 기준에서 정의하고 판단할 수 있다.

진화론적 구조 최적화 기법은 지정된 종료 기준이 있어 그 기준에 맞게 정상상태에 도달할 때까지 계속 되는 것을 원칙으로 한다. 종료 기준을 정의하는 방식에는 여러 가지가 있으나(Xie and Steven, 1993) 설계 경험에 종속되는 경우가 많다. 본 연구에서는 수치적인 연산에 적용할 수 있는 합리적인 종료기준의 설정을 위해 식 (15)의 변형에너지의 밀도와 전체 부피의 비를 이용한 수행지수(Liang and Steven, 2002)를 이용하였다. 이 지수를 통해 단계별 모델과의 효율성의 차이를 설명할 수 있다.

$$PI = \frac{1/W_i V_i}{1/W_0 V_0} = \frac{W_0 V_0}{W_i V_i} \quad (16)$$

일반적으로 부피당 구조물의 강성은 구조물 재료가 얼마나 효율적으로 사용되었는지를 측정한다. 구조물의 강성은 요소의 에너지와 반비례하므로 초기단계와 i 번째 단계의 에너지(W)와 부피(V)를 비교하면 수행지수를 식 (16)과 같이 구할 수 있다. 구조물에서 요소가 제거되면 강성은 줄어들고 그에 따라 변형 에너지는 증가하게 된다. 따라서 수행지수가 최대값을 가지는 시점, 가장 효율성이 높은 단계에 도달했을 때를 한계점으로 판단하고 반복 작업을 끝내도록 한다.

III. 모델의 개발

1. 모델의 기본 개념

본 연구에서 개발한 모델은 설계할 영역의 트리스 모델링을 적용한 구조 해석과 RESO를 적용한 것이다. 인장과 압축을 통해서 응력의 흐름을 손쉽게 표현할 수 있으며 트리스 모델링의 전처리 과정을 불규칙 삼각망을 통해서 구성하였기 때문에 임의적인 응력의 방향성을 유연하게 표현하는 장점을 가질 수 있다. 그리고 각 요소를 1차원 선분으로 가정하고 단계별로 비효율적인 미소 응력의 요소를 삭제시켜나갈 것이기 때문에 계산의 부하량을 줄일 수 있으며 구조물의 내력을 판단할 수 있는 유용한 모델이다.

2. 프로그램 흐름도

본 연구에서 개발한 트리스 모델링과 RESO를 통한 철근의 배근 위치 결정 모델은 다음과 같이 구분된다. 주어진 구조를 Advancing Front Method를 이용, 불규칙 삼각망을 생성시켜 해석을 위한 기초자료를 생성하는 부분, 구조물의 위치자료와 경계조건을 해석하여 구조해석을 시행하는 부분, 해석된 축력을 시각적으로 표현하여 철근 배근의 위치를 시각적으로 표현하는 부분, 제거 기준 및 종료 기준을 적용하여 새로운 자료를 이용한 반복계산을 시행하는 부분 등 총 4단계로 구분되며 진화론적 구조 최적화 기법을 적용한 해석 절차는 다음과 같다.

- Step 1) 최적화를 수행하는 설계영역에 메쉬를 부가한다.
- Step 2) 지정된 영역의 구조해석을 수행하여 강성 매트릭스를 구한다.
- Step 3) 강성 매트릭스와 외부 힘을 이용해 각 요소의 변위를 구하고 부재의 축력을 산출한다.
- Step 4) 부재의 축력을 이용하여 삭제 기준을 설정하고 그에 따라서 비효율적인 요소를 삭제한다.
- Step 5) 제거 기준에 도달할 때까지 Step 2~Step 4 단계를 반복한다.

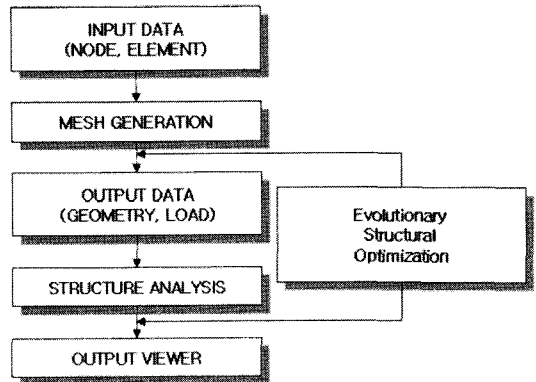


Fig. 2 The Algorithm of Model

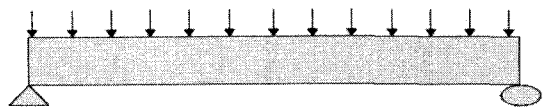


Fig. 3 Simple Beam

IV. 적용 예제 및 고찰

1. 적용 예제

본 연구에서 개발한 모델을 단순보에 분포하중을 고찰해보았다. 구조해석을 수행하기 이전에 주어진 영역을 불규칙 삼각망으로 나누는 전처리 과정을 진행한다.

Advancing Front Method를 이용해 나온 총 삼각망의 수는 452개, 선요소의 수는 총 718개가 산출되었다.

불규칙 삼각망으로 지정된 영역을 분할한 후 RR 을 1%로 두고 14단계로 진행하였을 때 수행지수는 10 단계에서 가장 큰 값을 내고 그 단계를 기점으로 요소 삭제의 과정은 비효율적인 것으로 나타났다. 따라서 10단계의 해석 결과를 최적 형상 단계로 판단하고 그 요소를 확인한 결과, 보의 중앙 하단 부분의 가로 방향으로 인장력이 크게 발생하는 영향선이 확인되었다. 모델의 결과를 참고하면 인장철근을 보강할 위치를 파악할 수 있으며 보의 양끝 사선 방향으로 인장력이 나타나는 것으로 보아 전단 철근을 배근함으로써 구조물의 전단 저항을 증가시키며 거동을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 그리고 단계를 수행할수록 해석해야 할 요소의 수가 줄어들어서 해

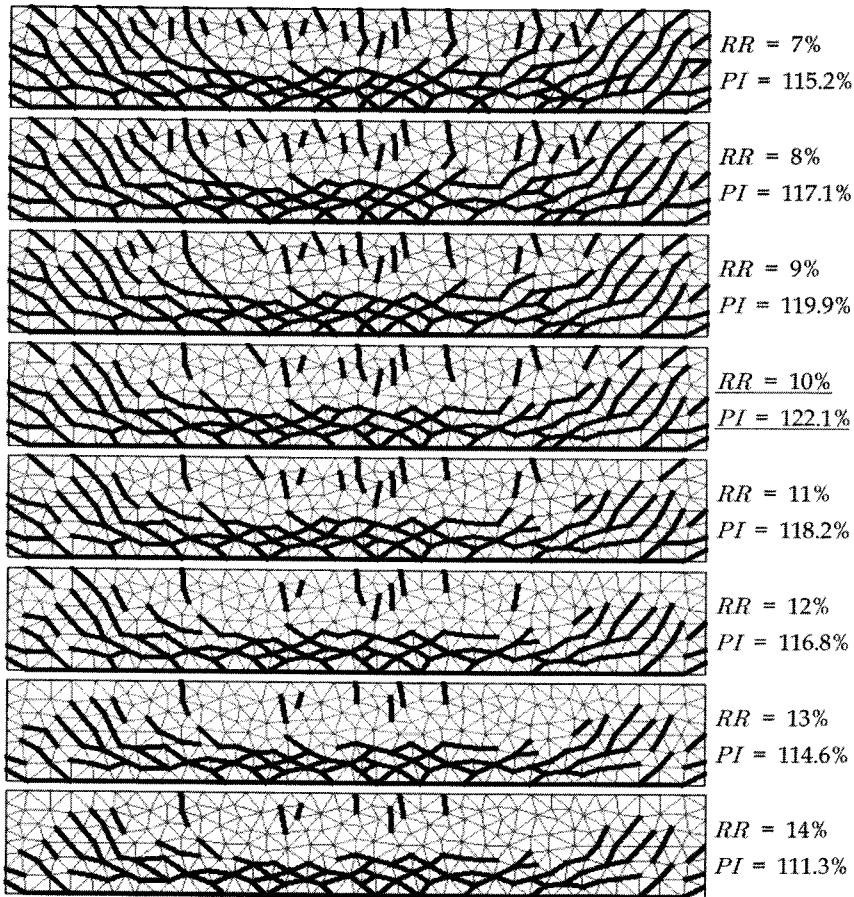


Fig. 4 Result in Each Phase(Mesh Number 452)

석시간을 향상시킬 수 있다. 처음 단계의 718개의 선 요소는 14단계에서는 291개로 줄어들어 구조해석을 진행함에 따라 효율적인 구조해석을 기대할 수 있었으며 누적시간과 단계별 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

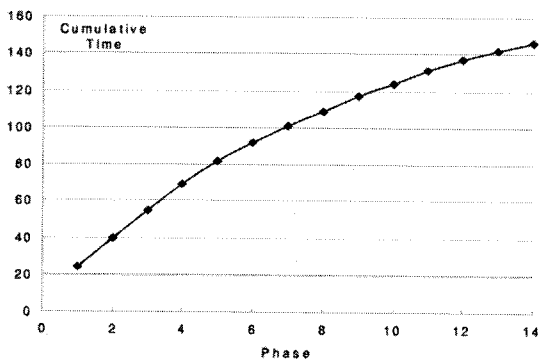


Fig. 5 Time to analysis the structure in each phase

구조해석 전처리 과정에서 Fig. 4와 달리 삼각망의 수를 다르게 할 때 그 결과와 구조해석 속도를 비교 해보았다. 삼각망의 수 238개, 선요소의 수 390개로 Fig. 4보다 적은 삼각망으로 나뉘었을 때와 반대로 Fig. 4보다 많은 1,175개의 삼각망, 선요소의 수 1,835개로 처리하여 모델을 구성했다. 두 모델은 각각 8, 10 단계에서 최적의 형상을 보였고 주응력의 흐름에 관해선 비슷한 경향을 보였으며 선요소의 수가 많아질 수록 임의적인 응력의 방향성을 표현하는데 있어서 효과적인 모델로 판단할 수 있다. 하지만 미소 부분의 응력이 제거되지 않는 경우도 많아서 설계 시 혼란을 가중시킬 수도 있다.

Fig. 7은 삼각망 수를 달리 했을 때 각각 수행지수를 통해서 결정된 최적의 형상을 보이는 RESO 단계에서 미소부분의 축력을 가지는 요소들을 축력이 작

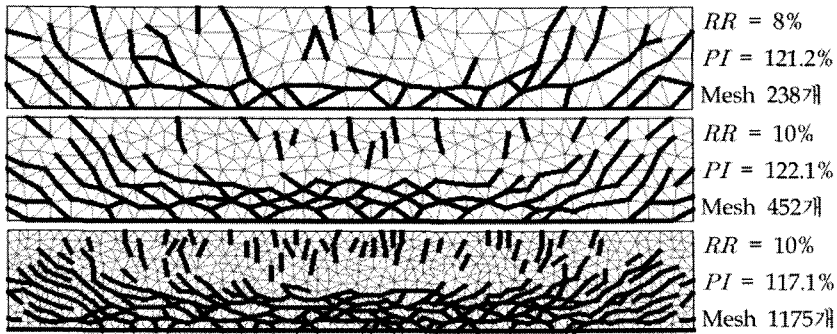


Fig. 6 Number of Mesh and the Optimum Phase

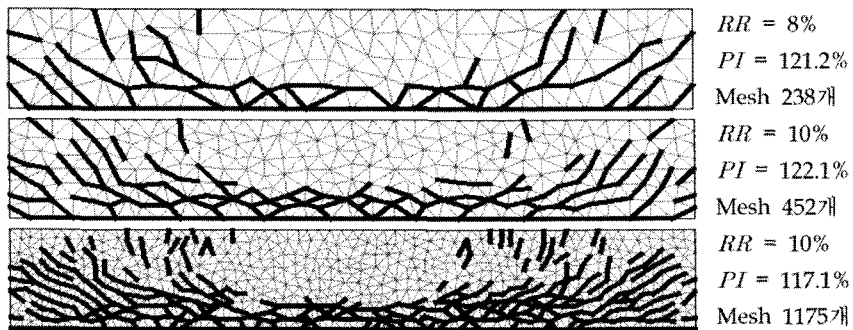


Fig. 7 Result modified by arbitrary standard

은 값 중에서 주응력선과 분리된 부분을 임의의 기준에 의해 제거한 결과이다. Fig. 6의 결과에서 미소 축력의 값을 가지고 있음에도 동일한 위상이었던 부재들을 제거하는 2차에 걸친 위상 최적화 작업을 통해서 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다. 물론 이 부분은 추후에 정립화 된 수치해석에 의해서 진행되어야 할 것으로 판단된다.

Table 1은 단계별 해석 시간은 동일한 PC (CPU: Intel 2.4 GHz, 2.00 GB RAM)에서 메쉬의 크기가 다른 세 가지 모델의 해석시간을 나타낸 결과이다. 이의 결과는 다른 구조물을 해석 시 적절한 요소의 수가 필요함을 알 수 있다.

Table 1 Time to analysis the structure in each phase

Number of Mesh	Time(s)
238	5
452	13
1175	16

2. 결과 고찰

본 절에서는 다른 응력 경로 해석 방법과 비교해 보았다. 먼저 Fig. 8의 (a)는 기존의 등분포 하중이 작용하는 단순지지 트러스 모델의 내력을 나타낸 것이고⁷⁾ (d)는 본 연구의 결과를 적용한 모델이다. 본 하중 작용점을 기준으로 인장력이 작은 부분은 fan shaped tension field, 인장력이 큰 부분은 diagonal tension field로 각각 점선, 실선으로 표시되어 있다. (d)와 비교해볼 때 임의의 응력의 방향성을 표현하는데 한계가 있어 세밀한 구조 설계는 어렵고 횡방향의 주철근 배근 위치를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

Table 2의 (b)는 ESO 단계를 거치지 않은 트러스 모델을 통한 단순보의 응력 경로 해석시의 결과이다. 본 연구의 결과인 B와 비교해보았을 때 보의 중앙 하단 부분의 인장 철근이 들어갈 부분을 (b)는 (d)에 비해 세밀하게 표현하지 못한 부분이 발견되었으며 중앙 상단부의 인장력을 과대평가하여 각 요소의 축력

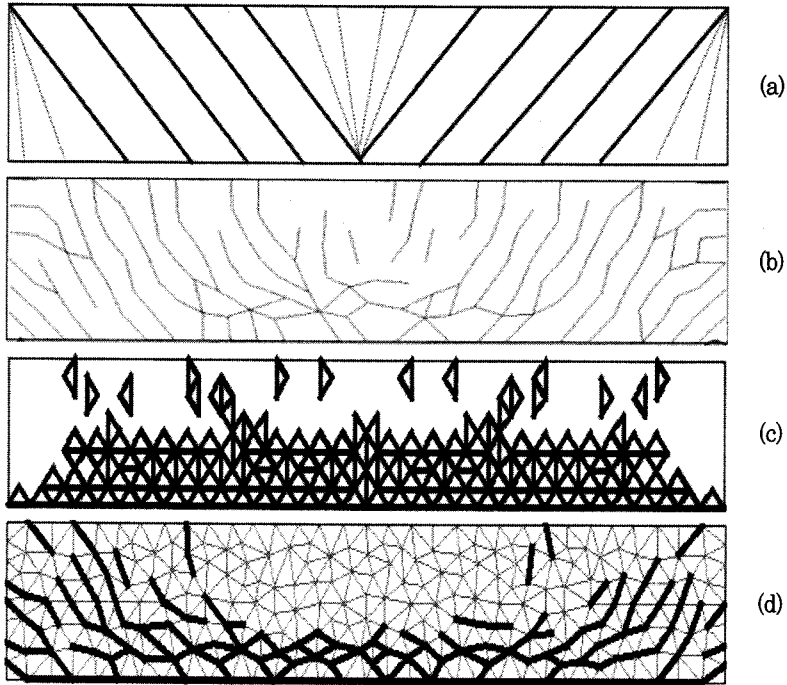


Fig. 8 Comparison with Other Method

을 상대적으로 정확하게 표현하지 못했음을 확인할 수 있다.

그리고 본 모델의 방법을 선이 아닌 삼각형을 하나의 요소로 보고 해석하였을 때의 결과는 (c)와 같으며 RR 과 ER 을 1%로 적용하여 수행지수가 117.3%인 최적의 형상을 보인 단계이다. 선 요소로 해석했을 때와 달리 사선으로 된 인장력의 부분이 생략된 부분이 크고 양 끝단에서의 인장력이 크게 나와서 (d)와는 다른 흐름을 보인다. 선 요소 축력의 평균을 산출하여 삼각형 요소를 판단했기 때문에 선을 요소로 해석을 수행하였을 때와는 다르게 미세한 부분의 축력을 표현하는데 한계가 있음을 확인할 수 있다.

동일한 PC(CPU: Intel 2.4 GHz, 2.00 GB RAM)에서 기존의 ESO 방법과 본 연구에서 이용한 모델의 해석시간을 Table 2를 통해서 비교해 보았다. 본 연구에서 사용한 모델에서 해석 전 처리 과정에서 격자망을 규정된 요소의 개수에 따라서 처리할 수 없기 때문에 동일한 요소의 개수에 따른 해석시간을 비교해 보진 못했지만 기존 ESO 방식에 비해서 1차원 선 요소로 처리한 과정은 확연한 효율성의 차이를 보였

Table 2 Comparison ESO work with Stress Search Model(TIN and ESO)

ESO Work		Stress Search Model(TIN)		Stress Search Model(TIN and ESO)	
Number Mesh	Time(s)	Number Mesh	Time(s)	Number Mesh	Time(s)
50	90	495	30	238	40
200	400	964	80	452	130
400	1890	1949	200	1175	160

다. 그리고 TIN만을 이용해 모델에 적용한 결과에 비해서 시간은 느렸지만 ESO를 거쳤고 또한 종료기준 역시 합리적으로 정립되지 않은 ESO 방식에 비해 본 모델에서 해석한 방식은 수행지수를 이용했으므로 결과의 정확성에서도 신뢰성을 가질 수 있다.

3. 모델의 응용

분포 하중을 받는 높은 보를 본 모델에 적용했다. 삼각망은 총 316개, 선 요소의 수는 498개이다. Fig. 9는 최적의 PI를 가진 단계의 해석 결과이다. 위에 적용한 단순보와 별다른 차이는 안보였다.

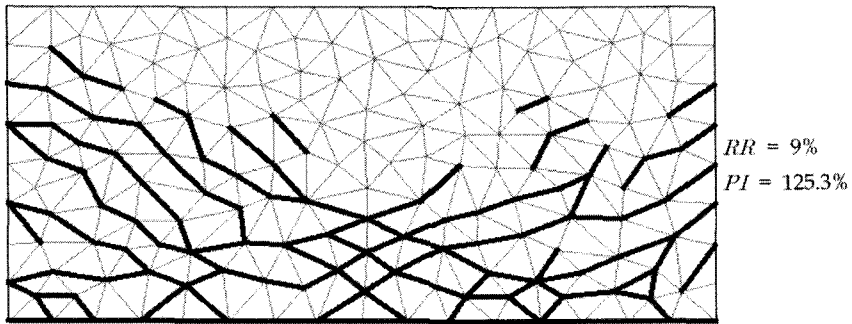


Fig. 9 Deep Beam

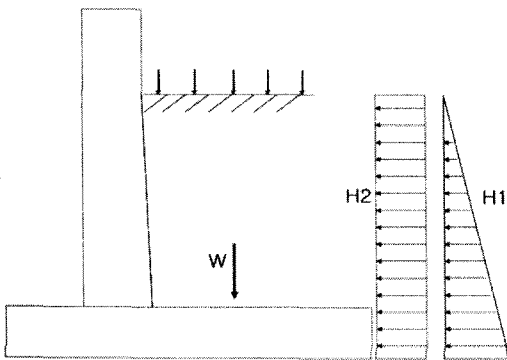


Fig. 10 The Force on Retain Wall

다음으로 적용한 예시는 Fig. 10과 같이 상재하중을 받고 있는 캔틸레버 옹벽이다.

상재하중에 의하여 받는 하중에 따라 옹벽 안쪽에는 흙과 상재하중에 의하여 수직하게 분포하중(W)이 발생하며 상재하중과 수평한 토압에 의해서 수평방향의 하중(H_1 , H_2)도 발생하게 된다. 삼각망의 수는 357개, 요소의 수는 579개이다.

옹벽의 해석 결과 인장응력은 옹벽의 수직한 오른쪽 면에 집중되어 있으며 옹벽의 기둥과 저판이 만나는 부분에 집중되어 있음을 Fig. 11을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 12는 고속도로 공사에 적용되었던 옹벽에 대한 실제 배근도이다. 일반적으로 옹벽 설계 시 옹벽과 저판이 만나는 부분에 사선 방향으로 철근을 보강하기 위하여 배근하였고 저판의 상부와 옹벽의 수직부분에 주철근이 들어가는 것으로 보아 본 모델이 철근 배근을 위한 기초자료로 효용성이 있음을 확인할 수 있다.

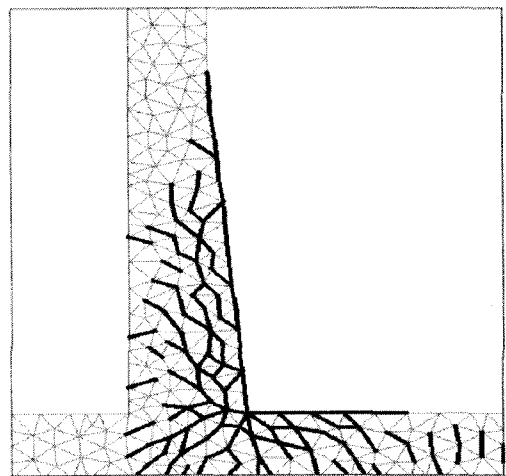


Fig. 11 Analysis Result of Retain Wall (RR = 4%, PI = 113.4%)

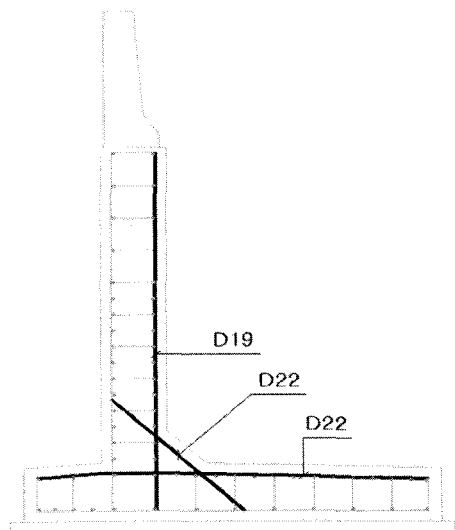


Fig. 12 Bar Arrangement on Retain Wall

V. 결 론

본 연구는 구조물의 응력을 탐색하기 위해 Advancing Front Method를 통한 불규칙 삼각망 구성과 RESO를 이용한 새로운 방식을 제안했다. 다양한 모델에 적용하기 위하여 임의적인 응력의 방향성을 유연하게 표현하기 위해 구조물을 수많은 삼각망으로 이산화 하였고 트러스 모델링을 적용하여 해석함으로써 응력의 방향성을 가시적으로 표현하며 반복 작업의 효율성을 향상시키고자 했다. 그리고 진화론적 구조 최적화 기법을 사용하되 수치적 해법을 평가할 수 있는 합리적인 종료 기준을 정립하여 구조해석을 진행함으로써 최적의 구조 형상 단계를 나타내고자 했다.

1. 불규칙 삼각망의 각 변을 트러스로 해석하여 트러스 모델과 비교했을 때 해석의 시간을 크게 단축시켰으며 임의적인 응력의 방향성을 표현하는데도 효과적이었다.

2. 기존의 ESO가 응력의 방향성 표현이 미비했던 점을 개선하였고 합리적인 종료 기준 설정으로 수치적 해법에 대한 신뢰성을 높일 수 있었다.

3. 임의의 구조물에 대한 응력 경로 탐색의 방법론을 제시할 수 있었으며 내력을 도식화함으로써 설계의 기초자료로 활용할 수 있다.

추후 3차원 요소를 이용하며 모델의 확장과 해석 결과에 대한 평가를 위해 지식 기반 구축이 이뤄진다면 실제 설계에 적용성을 보다 향상시킬 수 있을 것이며 복잡한 대형 구조물의 모델링과 해석에서 높은 생산력이 기대되며 결과적으로 더욱 향상된 구조물의 설계방안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 한국농촌개발연구소에서 시행한 ‘시·군관리 저수지 실태조사 및 정비방안 정립(2006. 09.25 ~ 12.30)’결과의 일부임

References

1. Hinton, E., and Sienz, J. 1995, Fully stressed

topological design of structures using an evolutionary procedure, *Eng. Comput.*, 12(2), 229-244.

2. Huang, C. W., 2003, Theory and software development of strut-and-tie models by using topology optimization techniques, National Taiwan Univ., Taipei, Taiwan.
3. Kim Y. S., Jung, N. S, Lee, J. J., Yoon, S. S., 2004, Development of a Stress Path Search Model of Evolutionary Structural Optimization Using TIN, *Journal of KSAE.*, 46(4).
4. Leonhardt. F., 1965, Reducing the Shear Reinforcement in einforced Concrete Beams and Slabs, *Magazine of Concrete Research*, 17(53).
5. Liang-Jenq Leu, Chang-Wei Huang, 2006, Strut-and-Tie Design Methodology for Three-Dimensional Reinforced Concrete Structures.
6. Morsch. E, 1912, *Der Eisenbetonb. seine Theorie und Anwendung.* Verlag Konrad Witterwer, Stuttgart.
7. NieLsen, M.P., 1984, *Limit Analysis and Concrete Plasticity*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey p.420.
8. Pyeon, H.W., Ohmori, Hiroshi, 2003, A Study on Structural Topology Optimization by Evolutionary Structural Optimization(ESO) Method, *Journal of AIK.*, 19(8).
9. Schlaich. J. Schaefer. K. and Jennewein. M., 1987, Towards a Consistent Design of Structural Concrete, *Journal of the Prestressed Concrete Insitute.* 32.
10. Yoon, S.S., 2001, A Study on the Reinforced Concrete using Evolutionary Structural Optimization, *Journal of KSAE.*, 44(2).
11. Zhao, C., Hornby, P., Steven, G. P., 1998, A generalized evolutionary method for numerical topology optimization of structures under static loading conditions, *Struct. Optim.*, 15(3/4), pp.251-260.