Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
DOI : http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2016.58.3.013

Vol. 58, No. 3, pp. 13~19, May 2016
ISSN 1738-3692 | eISSN 2093-7709

요소 중심의 네트워크 접근법을 이용한 부정정 트러스 구조 해석

Analysis of Indeterminate Truss Structures by Element-Focused Network Approach

한이철*,†
Han, Yicheol

Abstract

Element-focused network analysis method for truss structure is proposed. The propagation process of loads from external loads to connected other elements is similar to that of connections between nodes in accordance with attachment rule in a network. Here nodes indicate elements in a truss structure and edges represent propagated loads. Therefore, the flows of loads in a truss structure can be calculated using the network analysis method, and consequently the structure can also be analyzed. As a first step to analyze a truss structure as a network, we propose a local load transfer rule in accordance with the topology of elements, and then analyze the loads of the truss elements. Application of this method reveal that the internal loads and reactions caused by external loads can be accurately estimated. Consequently, truss structures can be considered as networks and network analysis method can be applied to further complex truss structures.

Keywords: Truss structure; complex networks; network analysis; load flows

Ⅰ. 서 론

트러스 구조는 규격화된 가벼운 부재의 조합을 통해 다양한 형상의 비교적 큰 하중을 지지할 수 있어, 각종 교량 및 대공간 구조물에 많이 활용되고 있다. 트러스 구조를 설계할 때는 하중을 구조물 전체에 적절히 분산시켜 단위 요소에 재하되는 하중이 허용한계를 초과하지 않도록 구조물 전체와 요소 각 부분에 대한 엄중한 하중해석을 반드시 고려해야 한다. 변위법 (또는 강성도법)과 하중법은 트러스 해석에 주로 사용되는 방법들이다. 변위법은 요소의 형상과 물성치를 포함한 강성행렬과 경계조건을 이용하여 외력에 따른 요소의 변위와 요소력을 계산한다. 그러나 전체 구조물에 대한 강성행렬을 만드는 방법은 구조물의 자유도가 높고 요소의 개수가 많아 대형 행렬이 생성될 경우, 계산 비용이 증가한다는 문제가 있다 (Gürdal and Tatting, 2000; Lee et al., 2012; Kim et al., 2014).

이에 반해 하중법은 요소들 간 연결 형상에 따른 힘의 평형을 이용하여 요소력을 계산한다. 하중법은 크게 위상 하중법 (Henderson and De, 1960), 대수 하중법 (Denke, 1962), 대수-위상 혼합 하중법 (Gilbert and Heath, 1987; Coleman and Pothen, 1986, 1987) 등이 있다. 전산구조해석에 대한 연구가 활발해 지면서 프로그래밍에 용이한 변위법 연구가 하중법에 비해 활발하게 진행되고 있지만, 이는 하중법이 갖는 비선형 분석과 최적화에 대한 강점들이 간과되는 결과를 야기했다 (Kaveh and Koohestani, 2007).

트러스 구조는 요소의 조합으로 이루어진 시스템이므로, 시스템 분석 방법을 이용하여 트러스 구조를 분석할 수 있다. 시스템은 구성요소와 그들의 상호작용으로 정의되고, 트러스 구조 해석은 평형 상태를 유지하기 위한 트러스 요소 간 힘의 분배량를 계산하는 것이다. 따라서 구성요소와 트러스 요소, 구성요소 간 상호작용과 트러스 요소 간 하중 전달량을 서로 대응하면, 시스템 환경의 변화에 따른 상호작용의 변화과정으로 트러스 외력에 따른 요소력을 계산할 수 있다. 따라서 변위법과 하중법의 한계를 넘어 트러스 구조를 해석하는 새로운 방법론을 얻을 수 있다. 시스템 해석 방법 중 하나인 셀룰러 오토마타를 이용하여 Gürdal and Tatting (2000)은 2차원 트러스 해석 방법을 제안한 바 있다. 트러스 구조물에서 요소에 힘이 재하되는 과정은, 외력의 작용점에서 지점부까지 순차적으로 연결된 요소들이 힘을 서로 전달하며 구조물 전체가 힘의 평형을 이루는 과정이다. 따라서 절점 단위 요소들 간 힘의 평형을 이용하는 하중법이 변위법에 비해 요소 간 상호작용을 정의하기 용이하고, 구조물 내 힘의 해석에 대한 직관적인 통찰을 제공한다.

* Northeast Regional Center for Rural Development, Pennsylvania State University, USA
† **Corresponding author**
Tel.: +1-814-863-7684 Fax: +1-814-865-3746
E-mail: yuh14@psu.edu
Received: March 31, 2016
Revised: April 8, 2016
Accepted: April 12, 2016

시스템은 네트워크 형태로 모사된다. 복잡계 네트워크 연구는 시스템의 행위 주체들 사이에서 발생하는 상호작용의 결과 창발되는 시스템의 거동을 분석하는 학문으로, 시스템의 행위 주체 (agent, component)를 노드 (node)로 행위 주체 간 상호작용을 연계 (link)로 시스템을 단순화 시켜서 이해한다. 구조분야에서 수치해석모델은 구조물을 이산화 된 노드-연계 구조로 치환한 후, 각 노드와 연계값을 계산한다. 따라서 이산화 된 구조물을 네트워크로 묘사할 수 있고, 다양한 네트워크 분석 기법을 이용하여 구조물을 보다 다양한 관점에서 분석할 수 있다. 시스템 내외부의 환경 변화 혹은 충격은 노드 간 상호작용의 규칙을 따라 네트워크 전체에 전달된다. 따라서 시스템의 거동을 이해하기 위해, 복잡계 네트워크 연구는 노드 간 상호작용 규칙을 밝히거나 (Watts and Strogatz, 1998; Barabási and Albert, 1999) 노드의 위상을 측정하고 시스템의 구조를 분석하기 위한 중심성 (Freeman, 1987; Borgatti, 2005)과 군집분석 (Ravasz et al., 2002; Ravasz and Barabási, 2003, Newman, 2004)에 대한 연구를 주로 수행되고 있다.

노드 간 연계가 방향성을 가지는 경우, 많은 연구에서 연계를 "흐름"으로 간주한다 (Freeman et al., 1991; Borgatti, 2005; Han et al., 2012). 예를 들어 질병전파 (Goh et al. 2007), 경제활동 (Smith and White, 1999; Fritsch and Kauffeld-Monz, 2010), 전자메일 (Dodds et al., 2003), 인구이동(Han et al., 2013), 신진대사 (Ravasz et al. 2002) 등은 연계의 방향성이 정해진 흐름이다. 트러스에 작용하는 외력이 지점부에 도달하는 과정은 방향성을 가진 요소들 사이의 힘의 흐름으로 간주할 수 있다. 즉, 트러스에 작용하는 외력이 모든 절점과 요소에서 힘의 평형을 만족시키면서 지점부에 도달하는 과정은, 네트워크가 노드에 가해진 충격을 연결된 노드들로 분산시키며 안정상태에 도달하는 변화 과정과 동일하다. 따라서 네트워크의 노드 간 상호작용 규칙과 구조분석방법을 이용하여 트러스 내 요소 간 힘의 흐름을 분석할 수 있다.

전통적인 트러스 해석은 힘의 평형을 위한 요소 간 힘의 분배량을 계산하여, 각 요소에 재하되는 하중이 재료의 허용한계를 벗어나지 않도록 트러스 구조를 설계하는데 목적이 있다. 따라서 절점 간 관계인 요소에 재하되는 하중이 분석의 대상이고, 요소 간 힘의 전달량은 고려의 대상이 아니다. 하지만 트러스의 실질적인 구성요소는 요소이고, 하중은 요소를 통해서 흘러간다. 네트워크 관점에서 요소 간 힘의 전달량은 구성요소 간 상호작용의 결과로 전체 시스템을 이해하고 분석하는데 가장 기본적인 정보를 제공한다. 본 연구에서는 트러스 구조를 네트워크로 간주하고, 요소와 요소 간 힘의 전달량을 노드와 연계로 정의하였다. 그리고 절점법을 응용한 요소 간 하중전달법으로 트러스를 해석할 수 있는 모델을 제시하고, 이를 간단한 트러스 구조에 적용하여 모형의 정확성을 검증하고 네트워크를 이용한 트러스 해석의 장점에 대해 고찰하였다.

II. 재료 및 방법

절점법은 위상 하중법의 하나로 임의의 절점을 중심으로 연결된 요소들 간 힘의 평형원리로 트러스 전체의 요소력과 반력을 계산하는 방법이다. 절점법의 핵심은 하나의 절점을 중심으로 연결된 요소들의 수와 연결각도에 따른 힘의 분배 (혹은 전달) 규칙이다. 평면 트러스의 경우 절점에서 모멘트는 무시할 수 있기 때문에 임의의 요소에서 연결된 다른 요소로의 힘 전달은 절점을 중심으로 한 힘의 평형원리로 계산할 수 있다.

절점 O를 중심으로 3개의 요소 (e_i, e_j, e_k)가 연결된 트러스를 가정하자 (Fig. 1). 요소 e_i와 e_j 사이의 각도를 a, 요소 e_i와 e_k 사이의 각도를 β라고 하고, 요소 간 연결 각도는 하중 $\boldsymbol{F}$가 작용하는 요소 e_i로부터 시계반대방향을 양수로 설정하였다. 모형의 단순화를 위해 모든 요소는 동일한 단면적과 물성치를 갖는다고 가정한다. 절점 O에서 힘이 작용하는 요소 e_i로의 방향을 y축이라 하고 이와 직교하는 축을 x축이라 하면, 요소 e_i에서 요소 e_j와 e_k로 전달되는 힘 w_{ij}와 w_{ik} 사이의 관계식을 x축과 y축 힘의 평형조건으로부터 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$w_{ij}\sin\alpha + w_{ik}\sin\beta = 0, \quad w_{ij}\cos\alpha + w_{ik}\cos\beta + F = 0 \qquad (1)$$

식 (1)을 각 하중항을 중심으로 정리하면, 요소 e_i에 재하된 하중 F가 절점에서 연결된 요소 e_j와 e_k에 전달하는 하중은 w_{ij}와 w_{ik}는 식 (2)로 계산된다.

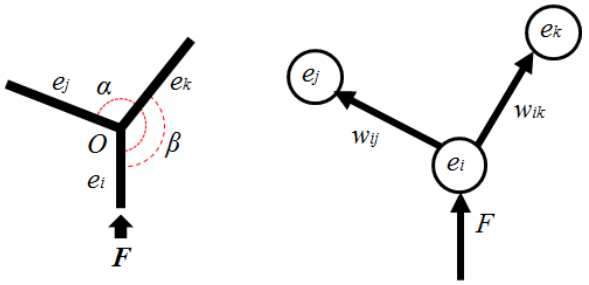

Fig. 1 Illustrations of truss with 3-elements (left) and concept of isomorphic network (right). In this case, internal force w_{ij} and w_{ik} are originated from force F.

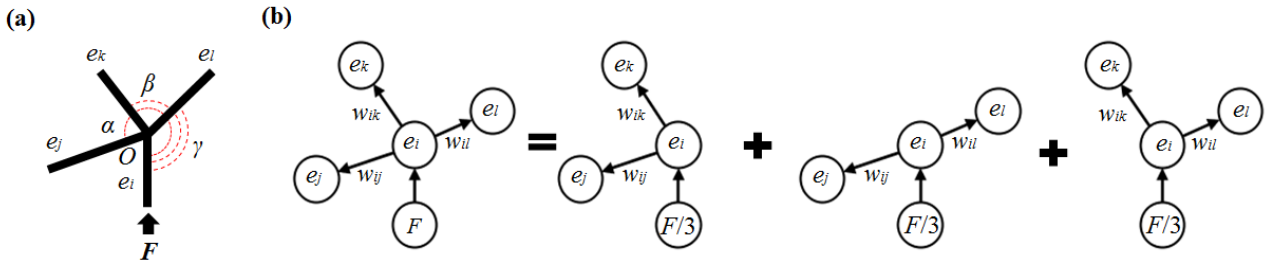

Fig. 2 Illustrations of truss with 4-elements (a) and concept of isomorphic network (b)

Table 1 Weights of transferred forces in four elements (e_j, e_k, e_l from loaded e_i)

Combined elements	w_{ij}	w_{ik}	w_{il}
e_je_k	$\sin\beta/\sin(\alpha-\beta)$	$\sin\alpha/\sin(\beta-\alpha)$	
e_je_l	$\sin\gamma/\sin(\alpha-\gamma)$		$\sin\alpha/\sin(\gamma-\alpha)$
e_ke_l		$\sin\gamma/\sin(\beta-\gamma)$	$\sin\beta/\sin(\gamma-\beta)$
Total	$\frac{F}{3}\left(\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha-\beta)}+\frac{\sin\gamma}{\sin(\alpha-\gamma)}\right)$	$\frac{F}{3}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin(\beta-\alpha)}+\frac{\sin\gamma}{\sin(\beta-\gamma)}\right)$	$\frac{F}{3}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin(\gamma-\alpha)}+\frac{\sin\beta}{\sin(\gamma-\beta)}\right)$

$$w_{ij}=\frac{F\sin\beta}{\sin(\alpha-\beta)},\quad w_{ik}=\frac{F\sin\alpha}{\sin(\beta-\alpha)} \tag{2}$$

평면 트러스에서 이용 가능한 힘의 평형방정식은 2개 (x축과 y축)이므로, 서로 연결된 3개의 요소 사이 힘의 전달량을 식 (2)로 결정할 수 있다. 하지만 한 절점에 연결된 요소가 4개 이상인 트러스는, 미지수 (연결된 요소)의 수가 조건 (평형방정식)보다 많기 때문에 요소의 축력을 결정하지 못하는 최적화 문제가 된다. 본 연구에서는 각기 다른 요인에 의한 하중은 선형 중첩될 수 있다는 원리를 이용하여, 절점에 연결된 요소가 4개 이상인 다중 연결 트러스를 해석하였다.

절점 O를 중심으로 연결된 4개 요소 (e_i, e_j, e_k, e_l)를 가정하자. 하중 F가 요소 e_i에 작용하고 있고, 요소 e_i와 요소 e_j, e_k, e_l 사이의 각도를 각각 α, β, γ라 한다 (Fig. 2a). 하중이 작용하는 요소 e_i를 제외한 나머지 요소들의 조합 중 정정구조를 만족하는 모든 경우에 대해 (총 3가지), 하중에 의한 요소력을 각각 계산한다 (Fig. 2b). 그런데 각 경우의 수마다 각 요소에 분배된 하중을 단순 선형중첩한 결과는 총 하중 $3F$가 작용한 결과이다 (Fig. 2b). 따라서 각 요소에 재하되는 하중은 우선 선형중첩한 후, 총 경우의 수로 나누어 계산한다 (Table 1).

일반적인 트러스 구조로써, 노드 i를 중심으로 n개의 요소가 연결되어 있다고 가정하자. 요소 e_i와 임의의 두 요소 e_j와 e_k 사이의 각을 각각 θ_{ij}, θ_{ik}이라 하면, 요소 e_i에 하중 F가 작용할때, 요소 e_j로 전달되는 힘 (w_{ij})는 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$w_{ij}=\frac{F}{N}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\sin\theta_{ik}}{\sin(\theta_{ij}-\theta_{ik})}(1-\delta_{ij})(1-\delta_{ik})(1-\delta_{jk})\right),$$
$$N=\frac{(n-1)(n-2)}{2} \tag{3}$$

여기에서, δ_{ij}는 크로네커 델타 (Kronecker delta)이고, N은 e_i를 제외한 n-1개의 요소들을 두 개씩 짝지을 수 있는 경우의 수이다. 만약 e_i를 제외한 임의의 두 요소가 평형하거나 일치하다면, 이 조합은 경우의 수에서 제외되도록 하였다.

본 연구에서 제시한 요소 간 하중전달법을 트러스 내 모든 요소에 적용하면, 외력이 유발하는 요소력을 계산할 수 있다. 계산 초기에는 트러스 시스템의 외력에만 힘이 존재하기 때문에, 외력과 직접 연결된 요소만 힘의 흐름을 구할 수 있다. 어떤 요소는 두 개 이상의 하중으로부터 영향을 받는 경우도 있기 때문에, 계산 과정에서 요소력이 변동될 수 있다. 따라서 모든 요소의 요소력이 결정되고 모든 절점이 평형상태에 도달할 때까지 반복적으로 요소력을 계산한다. 그 이후 지점부의 반력을 계산하고 해석을 완료한다. 외력을 직접 받는 국지적 정정구조물과 같이 이미 고정된 힘으로부터 평형상태를 만족하는 요소들은 반복계산에서 제외한다. 이미 고정된 요소력을 재계산하는 것은 효율적이지 않기 때문이다. 프로그램 내 데이터의 생성과 흐름을 Fig. 3에 제시하였다.

본 연구는 제안한 하중전달법의 정확성은 각 노드의 유입강도 중심성 (Strength-in centrality)과 절점법으로 계산한 요소력을 비교하여 검증하였다. 트러스 내 힘의 흐름은 방향성을 가지기 때문에, 각 노드는 흐름의 방향에 따라 유입강도와

유출강도를 갖는다. 노드 i의 유입강도 (s_i^{in})는 노드로 유입되는 흐름의 총량 ($\Sigma_j w_{ji}$)을 의미하는데, 본 연구의 경우 유입강도는 요소에 유입되는 힘의 총 합으로 요소력(인장력 혹은 압축력)을 의미한다.

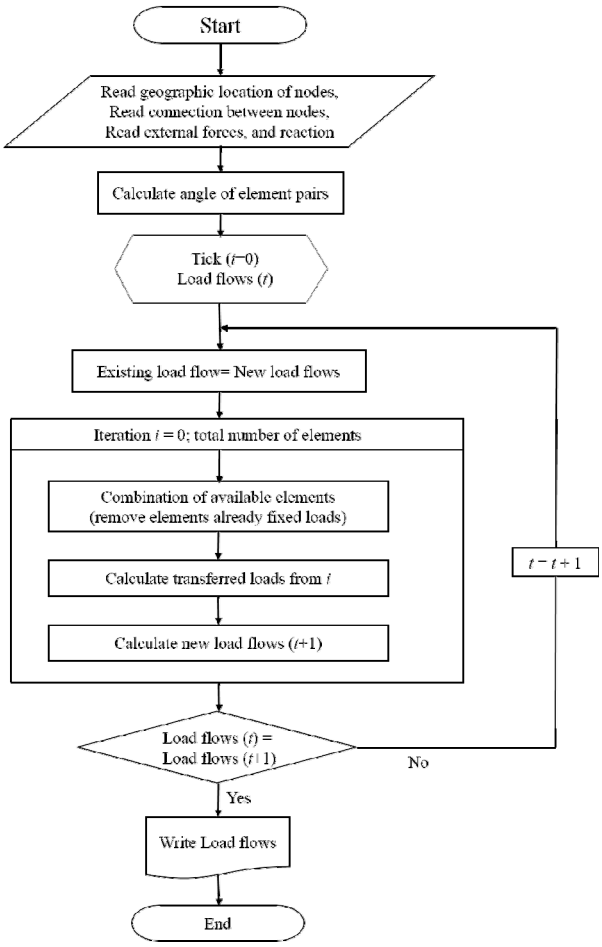

Fig. 3 Algorithm for determining the propagation of loads among elements

절점법은 힘의 평형원리를 이용하기 때문에, 구조물이 부정정 상태인 경우 요소의 하중을 결정하지 못해 일반화하기 어렵다. 위상 하중법은 부정정 구조물의 해석을 위해 평형 원리 뿐만 아니라 정합성, 응력-변형 재료특성, 변형-변위 관계, 경계조건 등을 활용한다. 본 연구는 부정정 구조물을 정정 구조물의 선형조합으로 간주하고, 각 정정 구조물에서 계산한 요소 간 하중 전파량을 중첩하여 전체 구조물의 요소력을 결정하는 새로운 방안을 제안하고 구현하였다. 이 방법은 트러스 구조물의 정정/ 부정정 여부에 관계없이 동일한 하중 전파법을 반복적용하기 때문에 일반화하기 용이하다. 또한 기존의 트러스 구조해석이 절점 간 힘의 관계를 정의하는데서 나아가 요소 간 힘의 관계를 정의하는 네트워크 해석법을 이용함으로써, 트러스 구조 내 힘의 흐름에 대한 보다 자세하고 다각적인 분석이 가능하도록 하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 요소 간 하중전달법을 간단한 형태의 트러스에 적용하였다. 사용한 트러스는 동일한 길이를 갖는 7개의 요소와 3개의 외력, 2개의 지점부 (힌지)로 구성된 1차 부정정 구조물이다 (Fig. 4a), 지점부의 힌지는 x축, y축과 평행하게 설치된 요소로 치환하여 계산하였다 (Fig. 4b). 그리고 트러스에 작용하는 외력 (10N)에 따른 요소 간 힘의 전달량을 계산하고 (Table 2), 결과를 네트워크 형태로 표현하였다 (Fig. 4c). 요소 간 힘의 전달량은 Java™를 이용하여 직접 작성한 프로그램을 이용하였다. 네트워크는 14개 노드로 구성되는데, 7개의 요소, 3개의 외력, 4개의 반력을 의미한다. 연계는 요소 간 힘의 흐름 (전달량)을 의미하는데, 화살표는 힘의 흐름 방향을 나타낸다. 힘의 흐름은 외력 노드에서 시작하

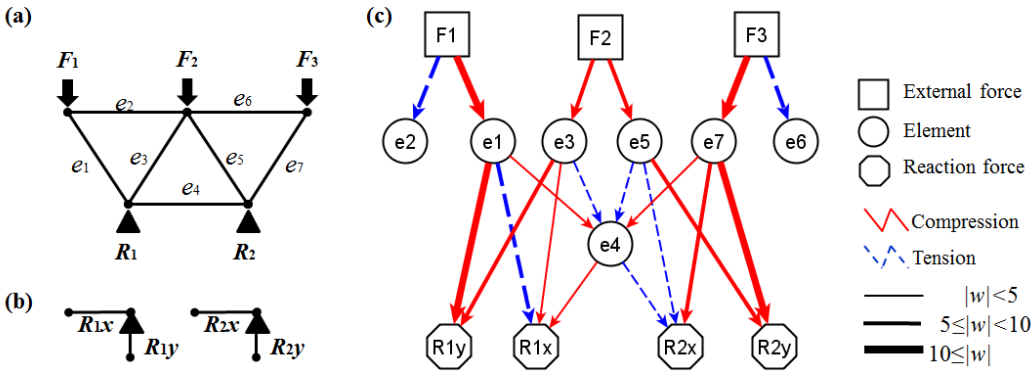

Fig. 4 Example of truss configuration (a) and truss network (b). The truss network has 5 joints, 7 elements, 3 external forces, and 2 hinged supports. All elements have identical element length, cross-section area, and elasticity. We assume that each external force is 10N

Table 2 Load propagation matrix for the truss example (unit: N)

Node	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	R_{1x}	R_{1y}	R_{2x}	R_{2y}
F_1	−11.55	5.77									
F_2			−5.77		−5.77						
F_3						5.77	−11.55				
e_1				−2.89				5.78	−10		
e_2											
e_3				1.44				−2.89	−5		
e_4								−2.89		2.89	
e_5				1.44						2.89	−5
e_6											
e_7				−2.89						−5.78	−10

Table 3 Comparison of axial forces of elements from joint method and suggested model (Unit: N)

Node	Joint method	Strength-in	Strength-out
F_1		0	−5.78
F_2		0	−11.54
F_3		0	−5.78
e_1	−11.55	−11.55	−7.11
e_2	5.77	5.77	0
e_3	−5.77	−5.77	−6.45
e_4	−2.89	−2.89	0
e_5	−5.77	−5.77	−0.67
e_6	5.77	5.77	0
e_7	−11.55	−11.55	−18.67
R_{1x}	0	0	0
R_{1y}	−15	−15	0
R_{2x}	0	0	0
R_{2y}	−15	−15	0

여 반력 노드로 수렴하는 형태를 가진다.

노드의 강도 중심성 (Strength centrality)와 절점법을 이용한 요소력을 비교하였다 (Table 3). 비교결과 노드의 유입강도와 요소에 재하되는 하중은 정확히 일치함을 확인할 수 있다. 유출강도는 한 노드에서 다른 모든 노드들로 유출되는 흐름의 총합이다. 유출강도가 0인 경우는 더 이상 힘의 전달이 없는 경우로 반력이 대표적인 예이다. 본 예제의 경우 반력 이외에도 서로 요소력을 상쇄하는 e_2와 e_6의 유출강도가 0이다.

절접법은 서로 연결된 요소들 간 힘의 평형원리에 기반하여 각 요소력을 계산한다. 이 방법은 요소에 재하되는 힘의 크기에 초점을 맞추기 때문에, 힘의 출처와 힘의 영향범위 대한 정보를 제공하지 못한다. 또한 요소력이 0인 경우, 힘의 흐름이 0인 여유 요소인지 동일한 크기의 인장력 또는 압축력이 작용한 결과인지 구분할 수 없다.

이에 반해 본 연구에서 제안한 하중전달법은 요소를 통한 힘의 전달량에 기반하기 때문에, 보다 자세한 트러스 내 힘의 흐름을 요소 간 하중 전달량을 이용하여 분석할 수 있다 (Table 2). 예를 들어 e_4의 요소력은 −2.89N (압축력)이다. 이 요소력은 e_1과 e_7로부터 각각 −2.89N씩, e_3과 e_5로부터 각각 1.44N씩 받은 결과이다. 보다 근원적으로 e_4의 요소력은 F_1과 F_3으로부터 −2.89N씩, F_2로부터 2.89N이 유도되었다. 동일하게 반력 R_1지점의 수평반력 (R_{1x})는 0이다. 이 요소력은 e_1에서 5.77N, e_3에서 −2.89N, e_4에서 −2.89N씩 흘러들었고, 이 힘들은 F_1에서 기원한 힘 2.89N과 F_3에서 기원한 힘 −2.89N들의 조합이다.

트러스 네트워크는 구조물 내 힘의 흐름 뿐만 아니라 임의의 요소 붕괴에 따른 구조물의 영향을 직관적으로 보여준다. 예를 들어 요소 e_6가 붕괴한 경우 그 영향은 요소 e_4와 e_7에만 영향을 미친다. 요소 e_4와 e_7의 변화된 요소력은 모두 지점부의 반력으로 흐르기 때문이다.

본 연구에서 제안한 하중전달법과 트러스 네트워크 분석은 트러스의 요소에 재하되는 힘의 크기 뿐만 아니라 힘의 흐름에 대한 자세한 분석이 가능함을 확인하였다. 더욱이 하중전달법은 구조물 전체에 대한 정보를 이용하지 않고, 국지적인 요소 간 연결형태에 따른 하중전달이 창발하는 전체 구조물 내 힘의 흐름을 해석한다. 따라서 갑작스러운 요소의 손상이나 외력의 변화 등 국지적인 변화가 구조물 전체에 미치는 영향을 판단하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

Ⅳ. 결 론

트러스 해석은 외력에 대한 트러스 요소들의 작용 반작용 크기와 방향을 분석하는 것이다. 외력은 작용지점에서 지점

부까지 요소를 통하여 흐른다. 이러한 힘의 흐름은 트러스 구조에서 개별 외력이 미치는 영향범위와 전체 구조물의 안전에 있어 요소의 중요도를 결정하기 때문에, 트러스를 설계하는데 중요하다. 그러나 현재 트러스 해석은 요소에 재하되는 하중만 계산할 뿐, 힘의 흐름에 대한 분석은 거의 이루어지지 않고 있다.

트러스 내 힘의 흐름은 요소와 요소 간 힘 전달량을 각각 노드와 연계량으로 하는 네트워크로 묘사할 수 있다. 본 연구는 트러스 네트워크의 노드 간 연결규칙으로 절점법을 응용한 요소 간 하중전달법을 제시하고 간단한 트러스 구조에 적용하였다. 구성된 트러스 네트워크의 강도 중심성을 계산하여 본 모델의 정확성을 검증하고 요소 간 힘 전달량을 이용하여 요소력의 출처와 그 크기를 분석하였다. 분석결과 본 연구에서 제시한 트러스 네트워크 모델은 요소력을 정확하게 계산할 뿐 아니라 트러스 내 힘의 흐름에 관여하는 각 요소의 위상을 분석할 수 있었다. 또한 개별 외력과 요소, 요소들 간 관계를 정량적으로 분석할 수 있어, 일부 요소의 붕괴나 하중의 변화가 미치는 영향을 직관적으로 이해할 수 있음을 확인하였다.

네트워크 관점에서 트러스 해석은 트러스에 대한 추가적인 정보들을 제공할 수 있다. 설계자는 트러스 구조물의 개별 트러스 요소 혹은 절점이 얼마나 큰 중요도를 갖는지를 네트워크 분석 방법을 이용하여 정량적으로 판단할 수 있다. 이를 이용하면 구조물 설계과정에서 비용이나 사하중을 절감하기 위한 대안 설계를 할 때에 설계자에게 유용한 자료로 활용될 수 있으며, 복잡한 구조물 설계를 위한 진화전략최적화 기법(Xie and Steven, 1993; Chu et al., 1996; Querin et al., 2000)에 적용할 경우 더욱 과학적인 판단기준을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Barabási, A. -L., and R. Albert, 1999. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science* 285: 509-512.
2. Borgatti, S. P., 2005. Centrality and network flow. *Social Networks* 27: 55-71.
3. Chu, D. N., Y. M. Xie, A. Hira, and G. P. Steven, 1996. Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. *Finite Elements in Analysis and Design* 21(4): 239-251.
4. Coleman, T. F., and A. Pothen, 1986. The null space problem I; complexity. *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods* 7(4): 527-537.
5. Coleman, T. F., and A. Pothen, 1987. The null space problem II; algorithms. *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods* 8(4): 544-561.
6. Denke, P. H., 1962. A general digital computer analysis of statically indeterminate structures. Technical Report. NASA-TN-D-1666.
7. Dodds, P. S., R. Muhamad, and D. J. Watts, 2003. An Experimental Study of Search in Global Social Networks. *Science* 301(5634): 827-829.
8. Freeman, L. C., S. P. Borgatti, and D. R. White, 1991. Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow. *Social Networks* 13: 141-154.
9. Freeman, L. C., 1978. Centrality in social networks conceptual clarification. Social Networks 1: 215-223.
10. Fritsch, M., and M. Kauffeld-Monz, 2010. The impact of network structure on knowledge transfer: an application of social network analysis in the context of regional innovation networks. *The Annals of Regional Science* 44: 21-38.
11. Gilbert, J. R., and M. T. Heath, 1987. Computing a sparse basis for the nullspace. *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods* 8(3): 446-459.
12. Goh, K. -I., M. E. Cusick, D. Valle, B. Childs, M. Vidal, and A. -L. Barabási, 2007. The human disease network. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(21): 8685-8690.
13. Gürdal, Z., and B. Tatting, 2000. Cellular automata for design of truss structures with linear and nonlinear response. In Proc. 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf., AIAA Paper.
14. Han, Y., S. J. Goetz, J. J. Lee, and S. Yoon, 2012. Simulating Network Structures Using Bernouilli's Principle. *Advances in Complex Systems* 15(4): 1250032.
15. Han, Y., S. J. Goetz, T. Kim, and J. J. Lee, 2013. Estimating Employment-Related Migration from Overlapping Migration and Commuting Networks. *Growth and Change* 44(3): 474-493.
16. Henderson, J. C., and C. De, 1960. Topological aspects of structural analysis. *Aircraft in Engineering* 32: 137-141.
17. Kaveh, A., and K. Koohestani, 2007. An efficient graph theoretical method for plate bending finite element analysis via force method. *Engineering Computations* 24(7): 679-698.
18. Kim, T. G., J. J. Lee, and K. Suh, 2014. Development of a Truss Structure Analysis Model based on Cellular Automata and Object-oriented Simulation Environment. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 56(3):1-9. (in Korean)
19. Lee, H. K., T. G. Kim, and J. J. Lee. 2012. Development of an Object-oriented Finite Element Model through Iterative Method Ensuring Independency of Elements. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2):115-125. (in Korean)
20. Newman, M. E. J., 2004. Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical Review* E 69:066133

21. Querin, O. M., V. Young, G. P. Steven, and Y. M. Xie, 2000. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimisation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 189(2): 559-573.
22. Ravasz, E., and A. -L. Barabási, 2003. Hierarchical organization in complex networks. *Physical Review E* 67: 026112.
23. Ravasz, E., A. L. Somera, D. A. Mongru, Z. N. Oltvai, A. -L. Barabási, 2002. Hierarchical Organization of Modularity in Metabolic Networks. *Science* 297: 1551-1555.
24. Smith, D. A., and D. R. White, 1999. Structure and Dynamics of the Global Economy; Network Analysis of International Trade 1965-1980. *Social Forces* 70(4): 857-893.
25. Watts, D. J., and S. H. Strogatz, 1998. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* 393: 440-442.
26. Xie, Y. M., and G. P. Steven, 1993. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures* 49(5): 885-896.