

라비뉴 타입 자동변속기의 기구학적 구성에 대한 조립 가능성 분석에 관한 연구

권현식*[#]

*동의대학교 자동차공학과

Assemblability Analysis of the Kinematic Configurations of Ravigneaux-Type Automatic Transmissions

Hyun Sik Kwon*[#]

*Automotive Engineering, Dong-eui University

(Received 21 January 2019; received in revised form 3 February 2019; accepted 7 February 2019)

ABSTRACT

Automatic transmissions are standard equipment in most automotive vehicles because they provide smooth speed shifting and a compact design with multiple speed ratios. Their structure consists mainly of planetary gear sets as power-transmitting devices and brakes and clutches as shifting devices. Several forward and one reverse speed ratios are achieved by actuating shifting devices to connect gears, input and output shafts, and the transmission case. In the development of a new transmission, kinematic configurations reflecting the transmission concept design are required, and the ability of the new concept design to be assembled without any interference among the connections must be demonstrated. In this study, an assemblability analysis of the kinematic configurations of a Ravigneaux-type automatic transmission was conducted with an assemblable example of an 8-speed Ravigneaux-type automatic transmission.

Key Words : Ravigneaux Type(라비뉴 타입), Automatic Transmission(자동변속기), Assembly Check(조립성 검사), Planarity Test(평면성 검사), Kinematic Configuration(기구학적 구성)

1. 서 론

유성기어는 선기어, 링기어, 그리고 축을 중심으로 배열되어 있으며 선기어와 링기어와 맞물리는 피니언을 고정하는 캐리어로 구성되어 있다. 이러한 유성기어는 동축지지가 가능하며 동력전달밀도가 높으며 패키징에 대한 장점으로 자동차용 자동변속기에 주로 적용되어 기어단 형성을 위하여 쓰

이고 있다. 유성기어의 주요 회전요소인 선기어, 링기어, 캐리어와 변속기 케이스, 토크컨버터로부터 흘러오는 입력축, 그리고 자동차의 바퀴와 연결되는 출력축을 브레이크 및 클러치의 계합장치의 연결로서 다양한 변속단을 구현한다. 현대 자동변속기는 일반적으로 3-4개의 유성기어 세트를 이용하여 9~10단의 변속비를 구현하고 있으며 선기어 두 개와 링기어 한 개, 캐리어 한 개로 구성된 라비뉴 타입의 유성기어 세트도 변속단 형성을 위하여 자동변속기에 흔히 적용되고 있다.

변속기의 기어트레인이 유성기어로 구성되는 자동

Corresponding Author : hskwon@deu.ac.kr

Tel: +82-51-890-2303, Fax: +82-505-182-6978

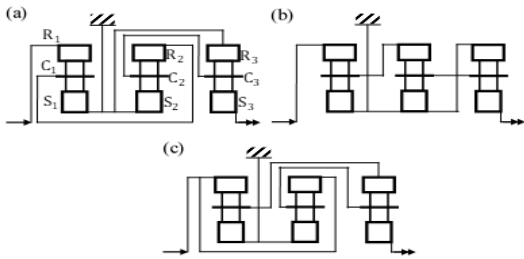


Fig. 1 (a) Assemblable kinematic configuration example, (b) unarranged presentation of (a), and (c) Un-assemblable kinematic configuration example

변속기에 대한 구조개발은 현재까지 많은 연구가 진행됐다^{1,2}. 주요 회전요소인 선기어, 링기어, 캐리어와 변속기 케이스, 입력축, 출력축의 연결로 원하는 개수와 기어비의 전진 및 후진 속도비를 제공하는 유성기어 변속기 연결구조 고안에 관한 설계 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 구조개발에 관한 연구는 구조로부터 발휘되는 속도비와 변속단 수에 관한 연구로 한정되어있다. 그러나 이러한 연구는 연결에 대한 간섭 여부를 고려하지 않은 연구이다. 우수한 속도비를 구현하는 구조라도 실제로 간섭없이 연결되지 않는다면 그 구조는 설계에 적용될 수 없다. Fig. 1의 연결에 대한 간섭의 예를 들어보자. Fig. 1(a)는 유성기어의 모든 회전요소와 입력축, 출력축, 브레이크가 간섭없이 연결되어 있다. Fig. 1(b)의 구조는 Fig. 1(a)의 구조이나 간섭을 고려치 않은 단순 연결상태이다. 즉 이 구조는 간섭없이 모두 연결이 가능하여 축을 중심으로 회전하는 변속기 구조상 실제 설계가 가능한 구조이다. 그러나, Fig. 1(c)의 구조는 연결을 변경하여도 브레이크로 연결되는 샤프트가 다른 샤프트와의 간섭을 회피할 수 없는 구조이다. 따라서 이러한 구조는 변속기 구조로서 쓸 수 없는 구조이다. 변속기 구조에 대한 설계 단계에서 이러한 구조는 설계 후보군에서 검토 전 미리 제거되어야 한다.

변속기 컨셉 구조에 대한 변속기 연결 및 조립성 검사를 위하여 Vertex Addition Algorithm(VAA)^[3]을 적용하여 유성기어로 구성된 기어트레인에 대한 연결 및 조립성 검사에 관한 연구는 수행되었다^[4]. 그

러나 단순 혹은 더블 유성기어로 구성되는 자동변속기 구조에 대한 분석만 이루어졌으며 라비노 타입에 대한 조립가능성 분석은 수행되지 않았다.

따라서, 본 연구는 라비노 타입의 자동변속기의 기구학적 구성에 대한 조립 가능성 분석에 관한 기존 연구의 공백을 보완하고자 연구를 수행하였다.

2. 그래프 이론 소개

이 부분에서는 조립가능성 분석을 위한 알고리즘에 적용되는 그래프 이론의 기초적인 내용을 짧게 소개할 것이다. 그래프 이론에 대한 깊이 있는 내용은 참고문헌을 확인하기 바란다^[3,5].

그래프 G 는 i 개의 점 v 로 구성된 점 집합 V 와 j 개의 무향 선 e 로 구성된 선 집합 E 로 이루어진 복합 구조물이다. 특히, 선 e 는 v_1 와 v_2 로 구성되며 방향성이 없다면 undirected-선(무향선)이라고 정의하고 (v_1, v_2) 로 표현하고, v_1 에서 v_2 로 방향성이 있다면 directed-선(유향선)이라고 정의하고 $\langle v_1, v_2 \rangle$ 로 표현한다. 임의의 한 그래프가 유향선으로 구성되어 있다면 그 그래프는 directed-그래프라고 정의한다.

점 집합 V 와 선 집합 E 로 구성된 임의의 그래프 G 에서 임의의 점 v_i 와 점 v_j 를 연결하는 통로가 있다면, 그래프 G 는 연결상태라고 정의할 수 있다. Fig. 2의 예를 들면, Fig. 2(a,c)는 연결상태라고 불

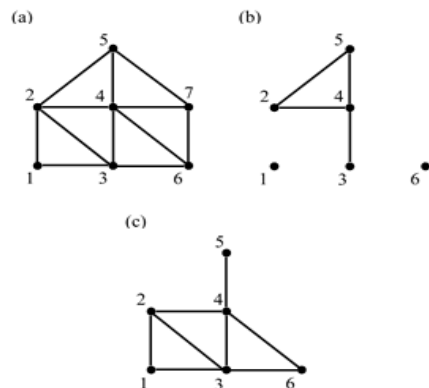


Fig. 2 (a) An example graph G , (b) an un-connected example, and (c) an example graph having a cut-vertex

수 있으나, 그림 (b)는 연결되지 않았다(점 1과 6이 연결상태가 아님). 임의의 그래프 G에서 어떤 점을 삭제했을 때 그래프의 구성요소가 증가한다면 그 점은 cut-vertex(절단점)이라고 부른다. 그림 (c)에서 점 4를 삭제하면 G는 점 {1 2 3 6}의 구성요소와 점 5의 구성요소로 구성되며 구성요소의 개수는 증가하게 된다. 그러나 그림 (a)의 경우 어떠한 점을 삭제하더라도 구성요소는 증가하지 않는다. 만약 그래프가 연결상태이며 절단점이 없다면 이 그래프 G는 2중-연결상태로 정의한다.

임의의 그래프 G를 평면에 그릴 때 모든 선간 간섭이 없다면 그 그래프는 한 공간에 embedding을 가지며, 만약 그 공간이 평면이나 혹은 구의 표면이라면 그 그래프는 평면(planar) 그래프라고 정의할 수 있다.

3. 조립가능성 분석 단계

본 연구인 라비노 타입의 자동변속기에 대한 기구

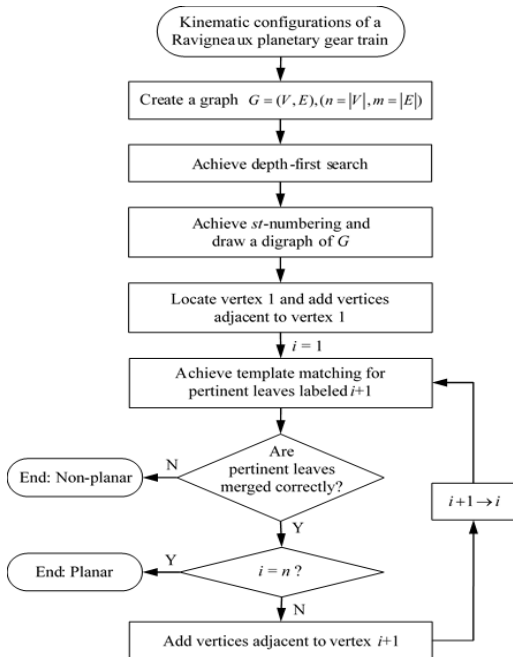


Fig. 3 A flowchart of the entire algorithm of assembly analysis^[4]

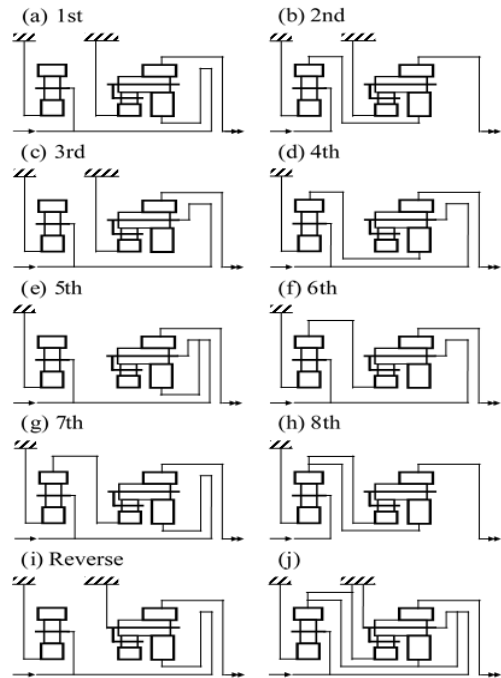


Fig. 4 An example of the 8-speed ravigneaux type automatic transmission concept design: (a)-(i) kinematic configurations of 1st - 8th and reverse speed ratios and (j) a superimposed stick diagram

학적 구성의 조립가능성 분석을 위한 각 단계와 순서를 Fig. 3의 순서도에서 확인할 수 있다. 전체적인 단계별 과정과 흐름은 유성기어 트레인에 대한 기구학적 분석에 관한 연구와 전반적으로 같으므로 각 단계별 상세 알고리즘은 설명하지 않겠으며 상세 내용은 참고문헌^[3, 4]을 참고하길 바란다.

본 연구에서 분석하게 될 라비노 타입 자동변속기 구조는 Fig. 4의 구조^[6]로 전진 8단과 후진 1단의 출력축 회전속도에 대한 입력축 회전속도의 비를 구현하며 각 속도단별 기구학적 구성은 Table 1에서 찾아볼 수 있다.

3.1 라비노 타입에 대한 그래프 변환

유성기어로 구성된 변속기의 단순 유성기어 혹은 더블 유성기어의 주요 회전요소들과 입력축, 출력축, 케이스에 대한 하드웨어 정보를 그래프로 표현

Table 1 Kinematic configurations of the 8-speed ravigneaux type automatic transmission concept design of Fig. 4

Gear ratio	Input	Output	Fixed	Connections
1	C ₁	R ₂	S ₁ S ₂	C ₁ -S ₃
2	C ₁	R ₂	S ₁ S ₂	R ₁ -S ₃
3	C ₁	R ₂	S ₁ S ₂	C ₁ -C ₂
4	C ₁	R ₂	S ₁	C ₁ -C ₂ R ₁ -S ₃
5	C ₁	R ₂	S ₁	C ₁ -C ₂ C ₂ -S ₃
6	C ₁	R ₂	S ₁	C ₁ -C ₂ R ₁ -S ₂
7	C ₁	R ₂	S ₁	C ₁ -S ₃ R ₁ -S ₂
8	C ₁	R ₂	S ₁	R ₁ -S ₂ R ₁ -S ₃
REV.	C ₁	R ₂	S ₁ C ₂	C ₁ -S ₃

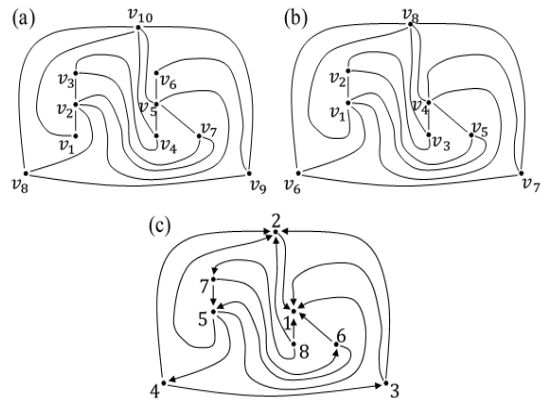


Fig. 6 (a) Graph of the design of Fig. 4(l), (b) the modified graph of (a), (c) the directed graph of (b)

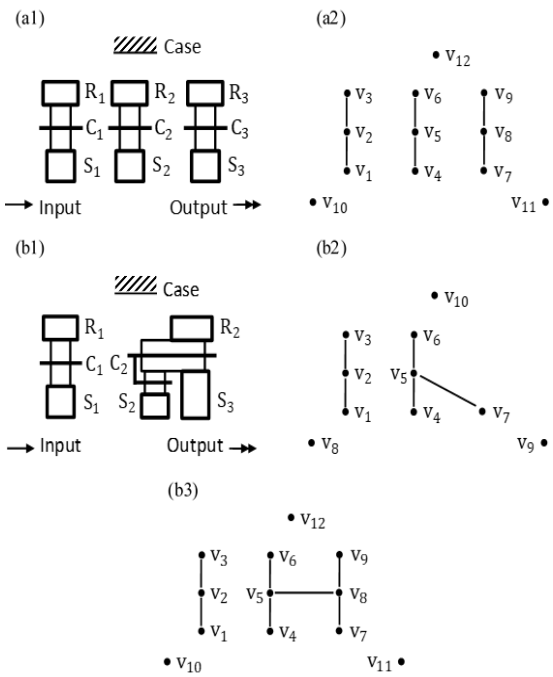


Fig. 5 (a1) Basic hardware of a planetary gear train consisting of 3 decks, (a2) a corresponding graph presentation of (a1), (b1) basic hardware of a ravigneaux type planetary gear train, (b2) a corresponding graph presentation of (b1), (b3) a graph containing cut-vertex

할 수 있다. Fig. 5(a1)에 표현된 3개의 유성기어 세트
 로 구성된 유성기어 트레인은 Fig. 5(a2)의 점과
 선으로 구성된 그래프로 표현할 수 있다. v_1, v_4, v_7
 은 선기어 S_1, S_2, S_3 를 나타내며, v_2, v_5, v_8 은 캐리
 어 C_1, C_2, C_3 를 표현하고, v_3, v_6, v_9 는 링기어 $R_1,$
 R_2, R_3 를 각각 표현한다. 그리고, v_{10}, v_{11}, v_{12} 는 입
 력축, 출력축, 그리고 변속기 케이스를 표현한다.
 선기어와 피니언기어, 피니언기어와 링기어의 기어
 물림은 각각의 물림에 맞게 선으로 표현하였다. 그
 러나, 본 연구의 라비노 타입의 변속기에 대한 그
 래프 표현은 일반 유성기어로 구성된 변속기 구조
 의 그래프 표현과는 다르게 나타내어야 한다. Fig.
 5(b1)의 라비노 구조는 Fig. 5(b2)의 그래프처럼 표
 현되어야 한다. 만약 Fig. 5(b3)처럼 v_5 와 v_8 을 연
 결하는 구조로서 표현하면 v_8 을 삭제하는 경우 다른
 점들과 연결되지 않은 v_9 이 하나의 구성요소가 되
 면서 전체 그래프의 구성요소 개수가 증가하게 되
 고 이 그래프는 2중-연결상태가 되지 않아 조립가
 능성에 대한 분석을 위한 VAA를 적용할 수 없다.
 이러한 이유로 Fig. 5(b2)의 그래프처럼 캐리어 C_3
 와 링기어 R_3 에 대한 점을 삭제하여 라비노 형태
 로 구성하여야 한다. 즉, 조립성 검사에 대한 알고리즘
 을 수행하기 위하여 그래프는 반드시 2중-연결상태
 의 그래프여야 한다.

Fig. 4(l)과 Table 1의 라비노 타입 변속기의 기구

Table 2 Adjacency lists of (a) a graph G of Fig. 6(a), (b) a graph G of Fig. 6(b)

(a)

Vertex	Adjacent vertices
v_1	v_2, v_{10}
v_2	v_1, v_8, v_5, v_7, v_3
v_3	v_2, v_7, v_4
v_4	v_3, v_{10}, v_5
v_5	$v_4, v_{10}, v_6, v_9, v_7$
v_6	v_5, v_9
v_7	v_5, v_2, v_3
v_8	v_{10}, v_2, v_9
v_9	v_8, v_6, v_{10}
v_{10}	v_8, v_1, v_4, v_5, v_9

(b)

Vertex	Adjacent vertices
v_1	v_2, v_5, v_4, v_6, v_8
v_2	v_1, v_3, v_5
v_3	v_4, v_2, v_8
v_4	v_3, v_5, v_1, v_7, v_8
v_5	v_4, v_2, v_1
v_6	v_1, v_7, v_8
v_7	v_4, v_6, v_8
v_8	v_6, v_1, v_3, v_4, v_7

학적 구성은 Fig. 6(a)의 그래프로 표현할 수 있으며, 각 점의 연결리스트(Adjacency list)는 Table 2(a)로 표현할 수 있다. Fig. 6(a)의 v_1 과 v_6 는 v_2 와 v_{10} 그리고 v_5 와 v_9 의 각각 두 개의 점들을 잇는 점이므로 이 두 점을 삭제하고 연결하는 점들을 직접 연결하여 Fig. 6(b)의 그래프와 Table 2(b)의 연결리스트처럼 점과 선의 개수를 축소할 수 있다.

3.2 Depth-First Search

순서도의 Depth-First Search (DFS) 단계는 그래프의 선들을 연속적으로 검토하여 tree-edge로 구성된 선 집합 T와 back-edge로 구성된 선 집합 B로 구분하여 분류하는 단계이다. Table 2(b)의 점간 연결리스트에서 각 점에 선으로 연결된 점들의 정보들을 바탕으로 최초 임의의 선의 한 점에 선으로 연결되는 점들을 연속적으로 검토하고, 검토된 모든 점이

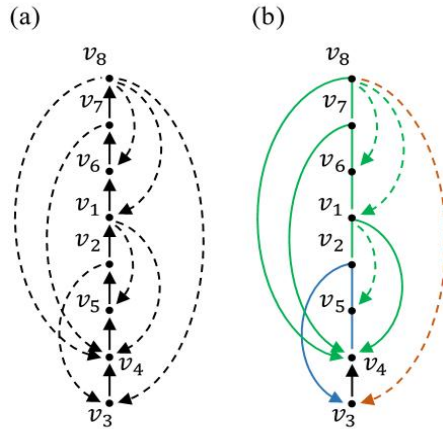


Fig. 7 (a) A depth-first tree consisting of tree and back edges of the modified graph of Fig. 6(b), (b) separate paths of the depth-first tree of (a)

Table 3 Depth-first numbers, fathers, lowest points of vertices of the example graph G of Fig. 6(b)

Vertex	DFN	FATH	LOW
v_1	5	v_2	1
v_2	4	v_5	1
v_3	1	-	1
v_4	2	v_3	1
v_5	3	v_4	1
v_6	6	v_1	1
v_7	7	v_6	1
v_8	8	v_7	1

연속적으로 이어지는 선을 tree-edge라고 부르며 그 선 집합을 T라고 한다. 선을 구성하는 점들은 검토되었으나 선이 검토되지 않은 선들은 back-edge라고 부르며 그 선 집합을 B라고 한다. 이렇게 구분된 T(실선)와 B(점선)는 Fig. 7(a)에 표현되었다.

DFS 단계의 점과 선들을 검토하는 과정에서 각 점의 주변 점들과의 관계가 형성되며, 점 v_i 에 대하여 depth-first number $DFN(v_i)$, father $FATH(v_i)$, lowest point $LOW(v_i)$ 의 값이 정해진다. DFS 단계에서 $v_i, v_j, v_k, \dots, v_p, v_q, v_r$ 순으로 검토를 하였다면, DFN는 각 점에 대한 검토 순서를 반영된다. 즉, $DFN(v_i) = 1, DFN(v_j) = 2$ 으로 값이 정해진다.

Father는 임의의 한 점 v_i 을 검토 후 바로 다음에 다른 점 v_j 을 검토한 경우, v_i 는 v_j 의 father 관계에 있다. 즉, $FATH(v_j) = v_i$ 이다. 그리고, v_j 는 v_i 의 son 관계로 정의된다. $LOW(v_i)$ 는 $DFN(v_i)$, $LOW(v_i)$ 의 son), $LOW(back-edge (v_i, v_j)$ 의 v_j 중에서 가장 작은 숫자로 정의된다. Table 2(b)에 대한 DFS 결과인 각 점에 대한 DFN , $FATH$, LOW 는 Table 3에 표시하였다.

3.3 st-Numbering 및 Directed 그래프 구성

st-numbering은 점 집합 V ($n = |V|$)와 선 집합 E 로 구성된 그래프 G 의 각 점에 1부터 n 의 새로운 번호를 부여하는 단계이다. 번호를 기준으로 그래프의 각 선은 방향성을 갖게 되며 그래프는 Directed 그래프로 변환된다. 이 단계 이후로 각각의 점 v_i 는 부여받은 새 번호 j 로서 표현되며 다음과 같은 2개의 규칙을 따른다.

- i) 첫번째 점 1과 마지막 점 n 은 서로 인접하다.
- ii) 점 j ($\in [2, n-1]$)는 두 개의 점 i 와 k 과 인접하며 그 번호관계는 $i < j < k$ 를 형성한다.

특히 첫 번째 점 1과 마지막 점 n 은 s (source)와 t (sink)로 정의된다. 점 1과 n 으로 구성되는 선은 n 에서 1을 향하는 선이며, $DFN(t) = 1$, $DFN(s) = 2$ 의 값을 갖는다. st-numbering 단계에서 새로운 번호를 부여하기에 앞서 이전 부분에서 수행한 선 집합을 다음의 3가지 선으로 분류해야 한다.

- Case 1: 선 e 가 back-edge 집합 B 에 속하는 경우
- Case 2: 선 e 에 연속적으로 연결된 선 중 마지막 선을 제외한 나머지 선들이 tree-edge 집합 T 에 속하고 마지막 선은 집합 B 에 속하며, 연속적으로 연결된 선의 첫 점의 LOW 와 마지막으로 연결된 점의 DFN 가 같은 경우
- Case 3: 선 e ($= \langle v_i, v_j \rangle$)에 연속적으로 연결된 선 $v_j v_k v_l \dots v_p v_q v_r$ 이 모두 집합 T 에 속하나 마지막 점 v_i 이 이미 검토된 상태이고, 점간 관계가 $v_k = FATH(v_j)$, $v_l = FATH(v_k)$, ..., $v_r = FATH(v_q)$ 이며 $DFN(v_j) > DFN(v_i)$ 인 경우

상기 규칙에 따라 Fig. 7(a)의 선 집합을 구분하면 각 점에 대한 경로는 다음과 같이 분류된다.

$$\begin{aligned} \text{PATH}(v_4) &= v_4 v_5 v_2 v_3 & (1a) \\ \text{PATH}(v_4) &= v_4 v_1 v_2 & (1b) \\ \text{PATH}(v_4) &= v_4 v_7 v_6 v_1 & (1c) \\ \text{PATH}(v_4) &= v_4 v_8 v_7 & (1d) \\ \text{PATH}(v_8) &= v_8 v_3 & (1e) \\ \text{PATH}(v_6) &= v_8 v_6 & (1f) \\ \text{PATH}(v_1) &= v_1 v_8 & (1g) \\ \text{PATH}(v_5) &= v_5 v_1 & (1h) \end{aligned}$$

경로에 대한 분류 과정을 통하여 그래프 G 의 선 집합 E 는 Eq.(1)로 분류되었다. 여기서, Eq.(1e)와 Eq.(1a)는 각각 Case 1(적색 점선)과 Case 2(청색 실선)로 구분되고, 나머지 식들은 Case 3(녹색 선)으로 구분된다(Fig. 7(b)).

st-numbering을 위한 알고리즘은 한 방향으로만 점에 대한 정보를 저장 혹은 삭제할 수 있는 stack 형식의 1차원 어레이를 사용하며, 이 형식을 바탕으로 Eq.(1)에 적용하여 각 점에 대한 새로운 번호를 부여받는다. st-numbering을 위하여 Fig. 8(a)처럼 $v_3(= t)$ 과 $v_4(= s)$ 를 stack에 순서대로 저장하며 시작한다. Stack에서 v_4 를 꺼내어 $\text{PATH}(v_4)$ 를 확인하였을 때 null이 아니므로, Fig. 8(b)처럼 Eq.(1a)의 v_2, v_5, v_4 순서로 stack에 저장한다. 여기서 주의할 점은 첫 점(Eq.1(a)의 경우 v_3)은 저장하지 않는다. 다

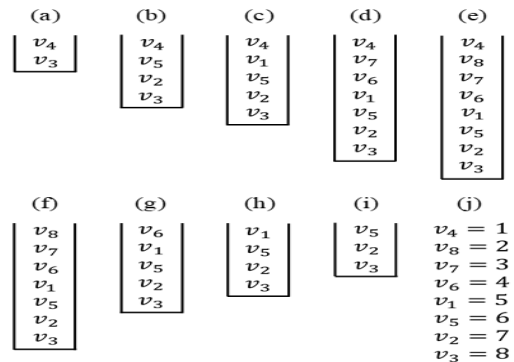


Fig. 8 (a-i) A st-numbering process of the example graph and (j) st-numbers assigned to every vertices

Table 4 Adjacency lists modified by st-numbering process

Vertex	Adjacent vertices
1	-
2	1
3	1 2
4	2 3
5	1 2 4
6	1 5
7	5 6
8	1 2 7

시 stack의 첫 번째 점 v_4 를 꺼내고 $PATH(v_4)$ 에 대한 Eq.(1b)를 v_1 와 v_4 의 순서로 저장한다(Fig. 8(c)). 이처럼 $PATH(v_4)$ 에 대하여 stack에 Eq.(1c,d)를 입력하면 Fig. 8(e)의 stack이 된다. 다시 v_4 를 꺼냈을 때 $PATH(v_4)$ 는 null이 되며, 이 순간 v_4 에 첫 번호 1이 부여된다. 그리고 stack에서 v_8 을 꺼내어 $PATH(v_8)$ 에 대한 Eq.(1e)의 점을 저장한다(Fig. 8(f)). Stack에서 v_8 를 꺼내었을 때 $PATH(v_8)$ 는 null이므로 두 번째 번호 2가 부여되며, 이어 꺼낸 v_7 역시 $PATH(v_7)$ 는 null이므로 다음 순서인 번호 3이 부여된다. 이러한 방법으로 stack의 마지막 점인 v_3 를 꺼낼 때까지 각 점에 숫자가 부여되며 최종 결과는 Fig. 8(j)처럼 새로운 숫자가 부여된다. 본 단계의 각 과정과 점에 부여된 새 번호는 Fig. 8에 나타내었다.

새롭게 부여받은 번호로 각 점을 표현하고, 각 점간 연결리스트 역시 이 번호를 이용하여 새로 표현할 수 있다(Table 4). 그리고, 이 번호를 바탕으로 큰 숫자의 점으로부터 작은 숫자의 점으로 선의 방향을 정의할 수 있고, 각 선이 방향성을 갖게 되면서 그래프는 Fig. 6(c)의 directed 그래프로 변환된다.

3.4 그래프의 PQ-tree 형태

st-numbering 단계를 통하여 점 집합 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 의 각 점은 새로운 번호를 부여받게 되어 새로운 점 집합 $V=\{1, 2, 3, \dots, n\}$ 으로 변환되었다. 그리고, 각 점에 대한 번호의 크기에 따라 선은 방향성을 갖게 되며 그래프 역시 directed 그래프로 변환되었다. 그래프 G의 sub-그래프 G'는 V의

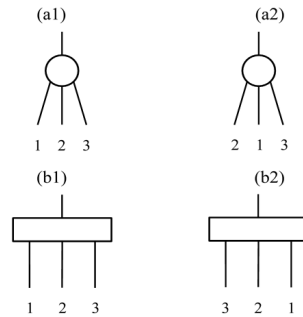


Fig. 9 (a) A permutation of a P-node and (b) a reversion of Q-node

sub-집합인 $V_j (= \{1, 2, \dots, j\}, V_j \in V)$ 와 E의 sub-집합인 $E_k (\in E)$ 로 구성되었을 때, G'와 G-G'간 연결되는 선이 있으며 이 선들을 가상 선(virtual edge)이라고 정의한다. 이 가상 선을 구성하는 두 점 중 한 점은 V_j 에 포함되며 다른 한 점은 V_j 의 여집합에 포함된다. 특히, 가상 선의 점 중 V_j 의 여집합에 속하는 점을 가상 점(virtual vertex)이라고 부른다.

VAA를 위한 그래프의 데이터 구조로서 PQ-tree 형태를 이용한다. PQ-tree는 크게 세 가지 구성요소로 구조화되어 있다. 첫 번째 구성요소는 leaves로서 단순 실선으로 표현하며 가상 점을 나타낸다. 두 번째는 P-node로서 중심이 빈 원형 형태의 노드형 그래프이며 cut-vertex를 나타낸다. P-node는 Fig. 9(a)처럼 P-node에 연결된 가상 점들을 순환하여 배치할 수 있다. 마지막으로 Q-node는 중심이 빈 직사각형태의 그래프로서 2중-연결상태의 그래프 구성요소를 나타낸다. Fig. 9(b)에서 확인할 수 있듯이 좌에서 우 혹은 우에서 좌로 회전할 수 있다. 그러나, 회전하여도 Q-node에 연결된 가상 점들의 연결 순서는 바뀌지 않는다. VAA를 위한 PQ-tree 형태는 알고리즘의 진행단계별 그래프를 구성하는 모든 점간 연결 관계를 유지하지 않아도 되는 장점이 있다.

3.5 Template Matching과 Vertex Addition Algorithm

PQ-tree의 sub-그래프는 PQT_j 라고 표현하며 이

sub-그래프에 연결된 가상 점 중 $j+1$ 의 번호를 갖는 가상 점은 pertinent 상태라고 정의한다. PQ-tree에서 leaves를 포함하는 최소 형태를 sub-tree라고 부른다. 만약 sub-tree의 모든 가상 점이 pertinent 상태이면 그 sub-tree는 full 상태라고 정의한다. 그리고, full 상태의 P-node 혹은 Q-node는 중심이 사선으로 표시된 원 혹은 직사각형으로 나타낸다. 부분적으로 pertinent 상태의 sub-tree가 연결되어 있다면 P-node는 빈 원형으로 표현하고 Q-node는 부분 사선으로

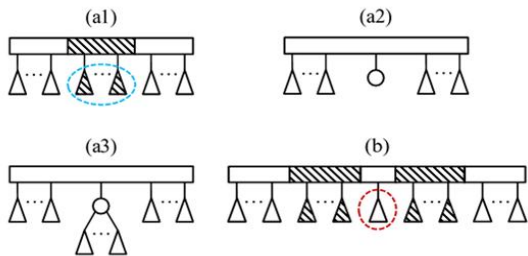


Fig. 10 (a) Reduction of pertinent sub-trees and vertex additions and (b) a failure situation of reduction

표시된 직사각형으로 표현한다.

본 연구에서 적용한 VAA가 진행될수록 PQ-tree는 PQT_1 에서 PQT_n 로 변형되며, pertinent 상태의 leaves, sub-tree 및 노드는 그래프 바탕의 연산방법을 통하여 순서를 바꾸고, 형태를 변환하며 연속적으로 나란히 위치하게 된다. 위치 변경을 통하여 연속적으로 배열된 pertinent sub-tree는 Fig. 10(a)처럼 P-node로 대체되며 이 노드에 연결되는 점을 추가하는 방식으로 조립가능성에 대한 분석이 계속 진행된다. 그래프에 대한 연산으로서 template matching을 이용하며 PQT_1 부터 PQT_n 에 이르기까지 점들을 추가하며 조립성 분석을 수행한다. Template matching은 Fig. 11에 표현된 9가지의 연산방법으로 구성되어 있으며 P-node와 Q-node의 순환과 회전 기능과 함께 PQT의 상황에 맞게 적용하여 pertinent 상태의 가상 점들을 나란히 위치시킬 수 있다.

PQ-tree를 바탕으로 template matching과 노드의 기본 기능을 이용한 VAA는 PQT_1 부터 시작하여 가상 점들을 추가하며 PQT_n 까지 변형된다. 마지막 단계인 PQT_n 에서 한 개의 P-node로 분석이 끝난다면 이 그래프는 평면상에 선 간 간섭없이 투영할 수 있는 평면 그래프(planar graph)로 판단된다. 즉, 평면 그래프로 판단된 변속기 컨셉 구조의 기구학적 구성은 기계적으로 조립이 가능한 구조이다. 그러나, Fig. 10(b)의 그래프처럼 알고리즘의 진행 중 pertinent 상태의 가상 점들이 연속적으로 위치할 수 없는 상태로 배열된다면 그 그래프는 평면 그래프로 볼 수 없다(non-planar graph).

Fig. 12은 라비노 타입 변속기를 반영하는 그래프 (Fig. 6(c))의 점간 연결 리스트(Table 4)에 대한 조립성 분석의 전체 template matching과 vertex addition 단계를 표현하였다. Fig. 12의 단계별 연산 과정은 다음과 같다.

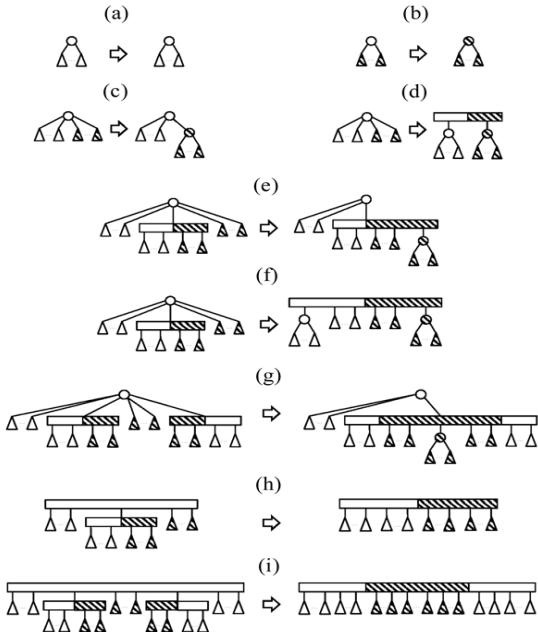


Fig. 11 Template matching operations^[3]

(a) PQT_1 은 점 1번을 P-node로 위치시키고 연결리스트로부터 1번과 인접한 점 {2,3,5,6,8}을 leaves로 추가한다. 여기서 pertinent 상태의 leaves는 2이다.

(b) 점 2를 P-node로 변환하고 인접한 점 {3,4,5,8}을 추가하면 PQT_2 가 된다. 두 개의 3번 leaves가

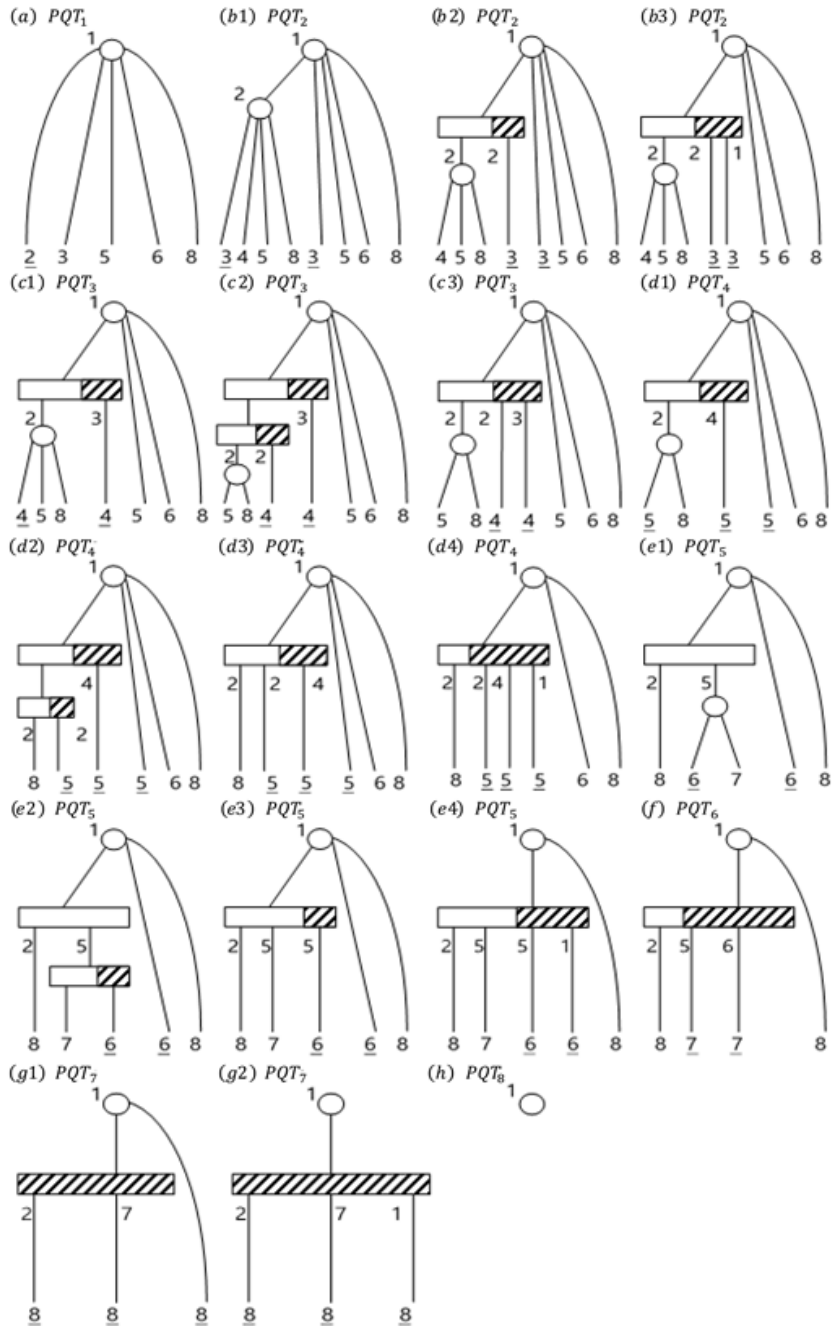


Fig. 12 An entire process of template matching and vertex addition of the example design

pertinent 상태이다. Fig. 11(d)에 의하여 P-node의 3번이 따로 분리되고 Fig. 11(e)로 3번 leaves를 나란

히 위치시킬 수 있다.

(c) 3번과 인접한 점 4를 추가하면 PQT₃가 되며

4번 leaves가 pertinent 상태가 된다. 다른 위치에 있는 두 개의 4번은 Fig. 11의 (d)와 (h)를 적용하여 나란히 위치시킬 수 있다.

- (d) PQT₃은 4번에 인접한 점 5번을 추가하며 PQT₄가 된다. Pertinent Leaves인 5번을 Fig. 11의 (d), (h), (e)를 적용하여 세 개의 5번을연속적으로 위치시킨다.
- (e) 5번을 P-node로 대체하고 인접한 점 {6,7}을 추가하여 PQT₅로 변환한다. Fig. 11의 (d), (h), (e)를 적용하여 6번을 위치시킨다.
- (f) 점 6에 인접한 7을 추가하면 PQT₆이 된다.
- (g) 7에 인접한 점 8을 추가하면 PQT₇으로 변형되고 Fig. 11(e)를 적용하여 pertinent leaves를 나란히 위치시킨다.
- (h) 마지막으로, 추가할 점이 더는 없으므로 가상 점 8번은 1번의 P-node로 흡수되며 이 그래프는 평면상 연결 가능한 것으로 판단하고 평면 그래프(planar graph)라 부른다.

예제를 들어 설명하였듯이 라비노 타입의 자동변속기 구조에 대한 조립가능성 분석을 위한 그래프에 대한 평면성 검사는 점간 연결리스트의 모든 점을 추가하고 나면 완료가 되며 그 그래프는 선간 간섭이 없는 평면의 그래프로 정의된다. 즉, 조립가능성을 분석하고자 하는 라비노 타입의 자동변속기의 기구학적 구성은 기계적으로 설계 가능한 구조로 판단한다.

라비노 타입의 자동변속기 구조에 대한 조립가능성 분석의 전체 과정은 Matlab 코드로 구현되었으며 3.7GHz의 프로세서의 PC로 0.02초의 연산시간이 소요되었다.

4. 결 론

본 연구논문은 라비노 타입 자동변속기의 기구학적 구성에 대한 조립가능성 분석을 위한 연구를 수행하였다. 일반 유성기어로 구성된 자동변속기에 대한 조립가능성 분석과 같은 방법으로 하드웨어를 반영하는 그래프 구성을 라비노 타입 유성기어로 구성되는 자동변속기에 그대로 적용하면 불필요한 그래프 구성요소의 존재로 조립가능성 분석은 수행

할 수 없음을 확인하였고 라비노 타입에 적합한 그래프 구성을 제안하여 조립가능성을 분석하였다. 라비노 타입의 설계(기계적으로 조립) 가능한 자동변속기 구조 예제를 이용하여 연구내용을 설명하고 조립가능성 분석과정을 설명하였다. 그러나 본 연구논문은 라비노 타입 자동변속기의 기구학적 구성에 대한 조립가능성 분석을 위함으로 조립 불가능한 구조의 예는 생략하였다.

후 기

이 논문은 2018학년도 동의대학교 교내연구비 (과제번호: 201802850001)와 한국연구재단 (과제번호: NRF-2018R1C1B5085509)의 지원으로 연구되었음.

REFERENCES

1. Kahraman, A., Ligata, H., Kienzle, K., Zini, D. M., "A Kinematics and Power Flow Analysis Methodology for Automatic Transmission Planetary Gear Trains," Journal of Mechanical Design, Vol, 126, No. 6, 1071-1081, 2005.
2. Raghavan, M., "The Analysis of Planetary Gear Trains," Journal of Mechanisms and Robotics, Vol. 2, No. 2, 021005, 2010.
3. Nishizeki, T., Chiba, N., Planar Graphs: Theory and Algorithms, North-Holland Mathematics Studies, 140 Annals of Discrete Mathematics 32, 1988.
4. Kwon, H. S., Kahraman, A., "An Assemblability Check Methodology for the Kinematic Configurations of Automatic Transmission Planetary Gear Trains," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 30, No. 12, pp.5605-5616, 2016.
5. Diestel, R., Graph Theory, Springer-Verlag, 2000.
6. Hayabuchi, M., Nishida, M., Kasuya, S., Gotou, K., Aoki, T., "Automotive Transmission for a Vehicle," United States Patent, US6558287B2, 2003.