SDH 기반의 동기식 광전송망 설계체계에 관한 연구

윤문길 · 차동완

고속/광대역 통신을 위하여 동기식 디지털 전송계위(Synchronous Digital Hierarchy : SDH)에 따른 전송망의 구축이 필수적으로 요구되고 있다. 특히, 광통신 기술을 이용한 동기식 광전송망의 구축이 활발히 진행되고 있는데, 이에 대한 시설투자에 막대한 비용이 소요되므로 경제적인 광전송망을 구축하기 위한 체계적인 전송망 구축계획이 수립되어야 한다. 경제적인 광전송망을 구축하기 위해서는 효과적인 설계도구가 필요하다. 본 연구에서는 이같은 설계도구의 개발을 위한 체계적인 설계절차를 소개함으로써, 동기식 광전송망 설계 및 구축시에 유용하게 활용하도록 한다. 따라서, 본 연구에서는 광전송망 설계를 위한 전반적인 접근방법과, 특정한 부문제의 고려시에 검토될 수 있는 모형의 소개에 연구의 초점을 두고자 한다. 본 연구에서 제시하는 전반적인 설계절차는 전체문제를 다수의 부문제로 분할하여 접근하는 방법이지만, 문제의 분할 수준과 설계모형은 수요의 특성, 장비의 특성 및 효과적인 해법의 개발 등을 고려하여 기존의 방법과는 다른 새로운 접근방식을 소개한다. 본 연구에서 제시하는 설계절차는 국내의 동기식 광전송망 설계도구를 개발하는데 있어 하나의 방법론으로 활용될 수 있을 것이다.

I. 서 론

정보통신 기술의 발달과 다양한 서비스의 출현은 통신망의 고속/광대역화를 촉진시켰고, 이에 따라 세계 각국에서 통신망의 광대역화를 위한 시설투자가 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 2000년대 초고속/광대역통신망의 구현을 목표로 전송망의 동기식 디지털 전송계위(Synchronous Digital Hierarchy : SDH) 방식으로의 전환을 추진하고 있으며, 음성, 데이터, 영상정보가 혼합된 다양한 복합정보서비스의 도입을 계획하고 있다. 이를 위해서 고속/광대역통신망의 하부구조가 될 동기식 광전송망이 필수적으로 구축되어야 하는데, 시설투자에 막대한 비용이 소요되므로 경제적인 광전송망을 구축하기 위한 체계적인 전송망 구축계획이 수립되어야 한다.

동기식 광전송망의 설계를 위한 설계도구가 Bellcore, NTT 등에서 개발하여 활용하고 있다. Bellcore에서 제시하고 있는 설계도구(SONET Toolkit)는 수요의 특성을 구분하여 전체 광전송망을 여러 개의 하부문제로 분할하고, 분할된 각 하부문제를 해결하기 위한 설계도구이다[9],[24]. 일본의 NTT에서도 전체적인 광전송망 설계도구는 아니지만, 광전송망의 설계에 필요한 관로 등의 설계를 위한 물리적 망 설계 도구를 개발하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 광전송망 구축시에 활용할 수 있는 설계도구의 개발을 위한 설계절차를 소개한다. 즉, 광전송망 설계를 위한 전반적인 접근방법과, 특정한 부문제의 고려시에 검토될 수 있는 모형의 소개에 연구의 초점을 두고자 한다. 따라서, 광전송망 설계를 위한 특정문제의 정의와 모형화, 해법의 개발에 관한 사항은 앞으로 계속적인 연구가 필요하며, 다양한 형태의 망 설계 모형에 대한 연구가 계속적으로 요구된다. 본 연구에서 제시하는 전반적인 설계절차는 전체문제를 다수의 부문제로 분할하여 접근하는 점에서 SONET Toolkit의 설계절차와 유사하지만, 문제의 분할 수준과 설계모형은 수요의 특성, 장비의 특성 및 효과적인 해법의 개발 등을 고려하여 새로운 접근방식을 소개하고자 한다.

제 II장에서는 동기식 광전송망의 설계에 따른 고려사항 및 제반 설계절차와 설계단위에 대한 소개를 한다. III장에서는 노드분할 문제와 Hub에 설치할 DCS의 적정 위치선정 문제에 대한 접근방법과 고려되는 설계모형을 제시한다. IV장에서는 ADM(Add Drop Multiplexer)을 이용한 SHR (Self-Healing Ring) 설계문제에 대한 각 단계별 접근방법과 설계모형을 소개하고, V장에서는 DCS(Digital Cross-connection System)를 이용한 SHN(Self-Healing Network) 설계문제에 대하여 논의한다. 마지막으로 이들 각 모형의 통합화 방안 및 앞으로의 연구과제 등에 대한 논의를 하고자 한다.

윤문길 : 한국항공대학교
차동완 : 한국과학기술원

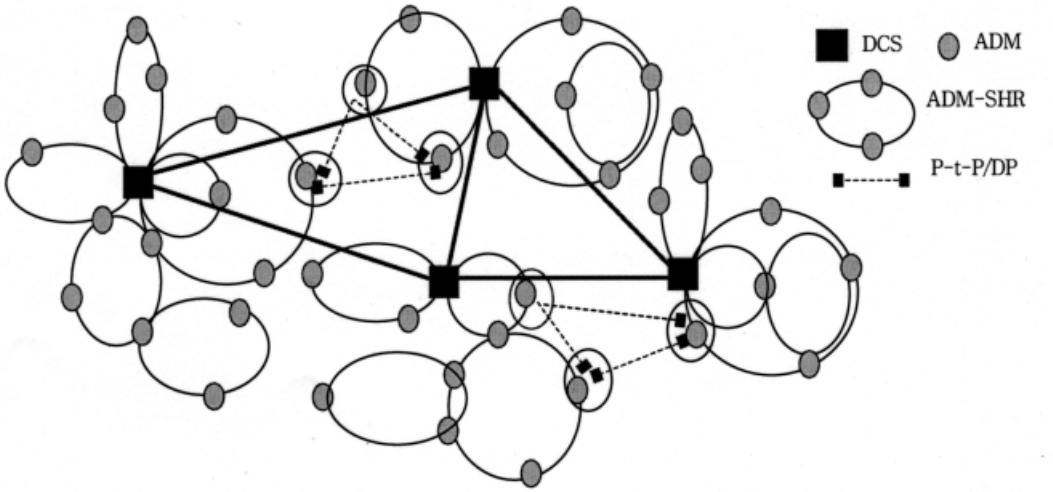


그림 1. Hubbing 구조를 갖는 광전송망

Ⅱ. 동기식 광전송망 설계절차

광전송망 설계시에 중요하게 고려되어야 할 요소가 생존도 문제이다. 즉, 하나의 전송 링크가 장애를 일으키는 경우에, 즉시 통신망을 재구성하여 요구된 수요를 적절히 처리해 줄 수 있는 통신망이 구축되어야 한다. 전통적으로 통신설비의 장애나 트래픽의 변화로 인하여 통신망을 재구성할 필요가 있는 경우에는 회선절체, 루팅변화 등의 복잡한 과정을 거쳐 수행되어 왔는데, 이러한 재구성에는 많은 시간과 노력의 투입을 필요로 하였다. 그러나 광통신을 위한 동기식 광전송 기술(SONET : Synchronous Optical Network)의 등장과 지능화된 전송설비의 출현으로 재구성작업은 중앙집중화 또는 분산화된 컴퓨터 장비를 이용하여 매우 빠르고 효율적으로 가능하게 되었다. 현재 재구성을 위한 전송설비로는 DCS (AT&T의 DACS Series, NT의 DDM Series 등)와 ADM 등의 장비가 활용되고 있고, 최근들어 WDM(Wavelength Division Multiplexer)의 도입이 활발히 검토되고 있다.

통신망의 재구성은 크게 트래픽의 변화에 따른 경우와, 망설비(링크 또는 노드설비)의 고장으로 인한 경우로 구분될 수 있는데, 전자는 대역폭 관리기법으로, 후자는 Self-Healing 방식으로 통신망을 재구성 할 수 있다[1]~[3],[25],[26]. Self-Healing 방식은 통신망의 장애를 자동적으로 인지하여 망을 재구성함으로써 서비스의 손실을 방지하기 위한 기술로, 본 연구에서는 Self-Healing 방식을 이용한 동기식 광전송망 구축을 위한 설계체계에 대하여 연구한다.

1. 광전송망 설계문제

본 연구에서는 재구성이 가능한 계층적 구조를 갖는 동기식 광전송망 구축을 위한 광전송망 설계절차를 제시하고자 한다. 즉, 상위계층에서는 DCS를 이용한 SHN(DCS-SHN)을 구성하고, 하위계층에서는 각 DCS를 중심으로 ADM을 이용한 SHR(ADM-SHR)로 구성되는 망 구조(Hubbing구조)를 연구대상으로 한다. 또한, 특정 노드간의 수요를 서로 다른 경로에 배정하는 점대점 이중경로시스템(Point-to-Point/Diverse Path System : P-t-P/DP)의 설치도 고려한다(그림 1).

ADM-SHR은 정상 상태하에서의 트래픽 흐름 방향에 따라 일방향(Unidirectional SHR : USHR)과 양방향(Bidirectional SHR : BSHR)으로 구분할 수 있고, BSHR 구조에서는 예비용량 확보를 위해 사용되는 광케이블의 수와 채널 이용방식에 따라 BSHR/2와 BSHR/4로 구분된다[3],[14],[25],[26]. BSHR/4 구조는 TSA(Time Slot Assignment) 기술을 적용하는 ADM을 고려하는 경우로서, 2개의 광케이블에 의한 운용회선과 2개의 예비회선으로 구성된다. BSHR/2 구조는 TSI(Time Slot Interchange) 기술을 적용하는 ADM을 고려하는 경우로서, 두 개의 광케이블을 이용하여 운용채널과 예비채널을 할당하는 방식이다. 케이블 소요량은 BSHR/4가 더 많이 소요되지만, ADM 장비가격은 TSI를 채택하는 ADM 장비가 더 비싸고 BSHR/2의 운영방식이 BSHR/4에 비하여 복잡하기 때문에 경제적인

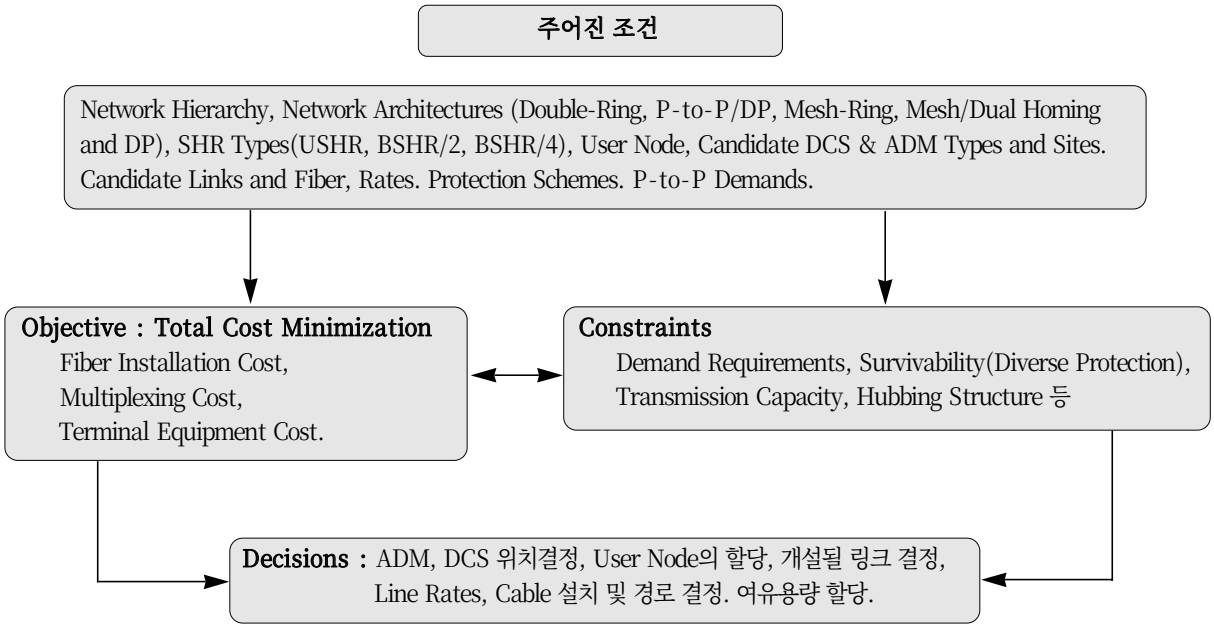


그림 2. 광전송망 설계문제의 구조

ADM-SHR의 구축을 위하여 케이블 설치비용과 ADM 장비 가격, 운영비용 등의 상충관계(Trade-off)를 분석하여야 한다.

광전송망 구축문제는 다음과 같은 단계로 구성된다 [24],[27],[30].

1 단계 : 이중연결성(2-Connectivity)이 보장되는 물리적 설비망(Physical Network Topology) 설계.

- Link 손실에 따른 대량의 정보 손실을 방지하기 위한 생존도 고려.
- 두 노드간의 회선수요를 서로 다른 2개의 경로로 광케이블을 설치할 수 있는 관로망의 설계.

2 단계 : 광전송망 설계문제

- 생존도가 보장되는 망구조하에서 주어진 회선 수요를 충족시킬 수 있는 광케이블 설치문제.
- 광전송장비를 이용한 다중화 문제.
- 운용회선과 예비회선 설치를 위한 여러가지 망 구조 (Network Architectures) 고려.
- 다중화계위, 다중화장비의 위치 및 용량, 다중화 장비의 전송속도 등 결정.

본 연구에서는 1단계인 물리적 설비망의 설계문제는 고려대상에서 제외하고, 2단계인 광전송망의 설계문제를 대상으로 하고 있다. 즉, 광케이블의 설치가 가능한 광관로 등이 주어진 조건에서의 광전송망 설계문제를 다루고, 이같은 문제는 그림 2와 같은 구조를 이루고 있으며 여러 가지 복잡한 의사결정 변수를 고려해야하는 매우 어려운 문제이다[9], [21],[24],[27]. 따라서, 하나의 최적화 모형으로 접근하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 여러 개의 부문제로 분할하여 해결하는 단계적 접근법을 택하고 있다[9],[21],[24].

2. 광전송망 설계체계

광전송망의 구조는 일반적으로 계층적 구조를 취하고 있다[9],[10],[31]. 따라서, 본 연구에서는 Bellcore의 Toolkit에서와 같이 Hubbing 구조를 갖는 계층적 광전송망 구조를 고려한다. Hubbing 구조에서는 고려되는 설계 지역이 Hub 설비들을 중심으로 다수의 집단으로 구분되고, 집단간의 수요는 Hub를 경유하여 처리되거나, 집단간 P-t-P/DP 시스템으로 처리된다. 집단내의 수요는 전송링크의 장애에 대비하여 i) Hub를 경유하는 Ring, ii) Hub를 경유하지 않는 Ring, iii) 집단내의 P-t-P/DP 시스템에 의하여 처리될 수 있다. 집단간의 수요를 Hub와 P-t-P/DP 시스템으로 구분하여 처리하는 문제는 하나의 최적화 시스템으로 해결하기에는 매우 복잡한 문제가 되기 때문에, 두 단계로 문제를 구분하여 고려하고 있다[9]. 즉, 일차적으로 집단간의 모든 노드의 수요는 반드시 Hub을 경유하여 처리되도록 정의한 후, 얻어진 실행

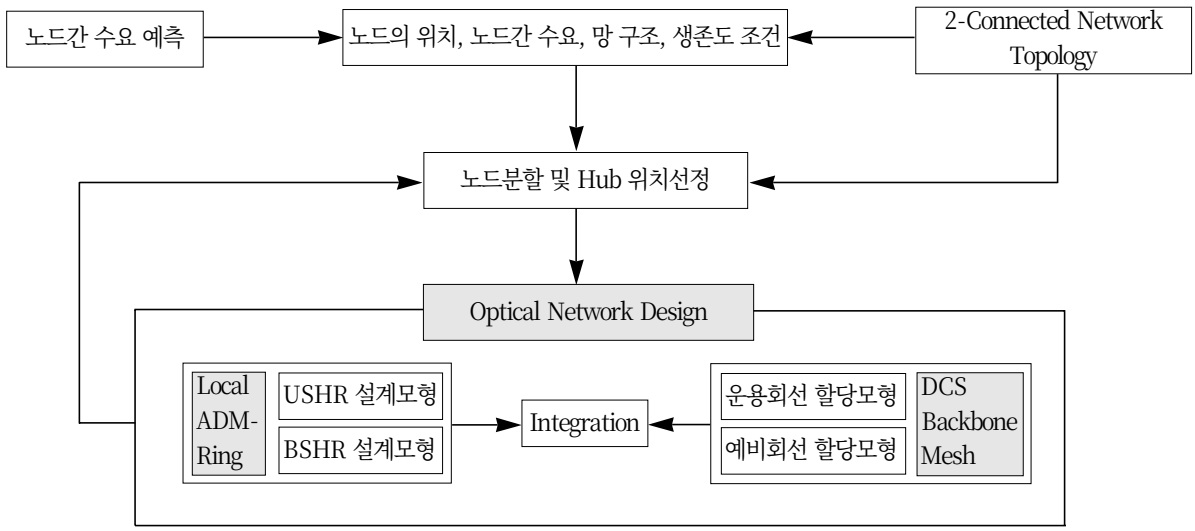


그림 3. 광전송망 설계체계

가능해로 부터 특정 노드 상간의 P-t-P/DP 시스템의 설치에 따른 경제성을 분석하여 설치여부를 결정하는 절차를 따른다.

Hubbing 구조에서는 집단간의 수요를 Hub간의 수요로 환산될 수 있고, 집단 내의 수요는 각 노드와 Hub간의 수요로 표현될 수 있다. 이러한 Hubbing 구조가 갖는 특성을 이용하면, 집단내에 구성되는 ADM SHR의 유형이나 용량 또는 구성방식에 관계없이 상위계층을 이루는 DCS Mesh망이 구성될 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 이러한 특성 때문에 광전송망 설계문제는 집단내의 ADM SHR 구성문제(Local ADM SHR)와 집단간의 Mesh망 구성문제(Backbone Mesh)로 분할하는 것이 효과적이다(그림 3).

설계대상 노드들이 적절한 집단으로 구분되고, 각 집단내의 Hub 설치위치가 결정된 경우에는 집단내의 수요와 집단간의 수요를 처리하기 위한 ADM SHR 또는 DCS SHN을 구성하여야 한다. 이러한 분할 접근 방법은 현실적으로 동기식 광전송망의 설계문제와 같이 복잡한 구조의 망 설계문제를 효과적으로 해결할 수 있는 적절한 방법이다[9]. 그러나 문제를 너무 세분화하는 경우에는 해결해야할 문제의 본질을 왜곡시킬 수 있는 위험을 내포하게 되므로, 적절한 수준의 문제 세분화가 매우 중요하게 결정되어야 한다. 본 연구에서는 효과적인 해법의 개발이 가능한 범위에서 가능한 세분화 정도를 최소화하였고, 이에따라 원래 동기식 광전송망 설계문제에서 고려되어야 할 특성을 최대한 반영하도록 하였다.

Ⅲ. 노드분할 및 Hub 위치선정 문제

주어진 여러 개의 노드들을 대상으로 광통신망을 설계하기 위해서는 우선적으로 이들 대상 노드들을 몇 개의 집단들로 분할해야 한다. 이와 같이 노드들을 그룹으로 묶어 몇 개의 집단으로 나누기 위해서는 각각의 노드들이 속해 있는 행정 구역, 지리적 특성, 노드들이 속해 있는 대상 지역들간의 트래픽 분포 등을 분석하여야 한다. 본 연구에서는 Hub에 DCS가 설치되는 Hubbing 구조를 고려하고 있기 때문에, 각 집단에는 하나의 Hub가 위치해야 한다. 집단간의 트래픽은 P-t-P/DP 시스템이 설치되지 않는 경우에는, Hub를 경유하여 처리되게 된다. 이와 같은 상황에서 다루어야 하는 문제는 주어진 노드들을 몇 개의 집단으로 분할하고, 각 집단 내에 설치할 Hub의 적정 위치를 결정하는 것이다.

노드분할 및 Hub 위치선정 문제는 트래픽의 유형에 따라 설계비용 및 통신망 구축 후의 트래픽 처리 비용에서 차이가 나기 때문에, 서로 다른 집단간의 트래픽과 이를 처리할 Hub들 사이의 거리를 함께 고려하여야 한다. 따라서 노드분할 결과와 Hub의 위치선정 결과는 DCS를 이용한 상위계층망의 설계비용과, ADM을 이용한 하위계층망의 설계비용에 결정적 영향을 주게 되기 때문에 매우 주의 깊게 연구되어야 한다. 주어진 노드들이 적절한 집단으로 분할되고, 각 집단에 DCS의 설치위치가 결정되었다고 하자. 이때 총비용은 상위 계층의 DCS간 SHN 설계비용(C_B)과 하위계층인 각 집단 내의 ADM-SHR의 설치비용(C_L)의 합으로 나타나게 된다. 따라서, 이같은 비용을 전체 망이 설계되기 전에 추정

하는 것이 불가능하기 때문에, 총비용을 최소화하는 문제를 최적화하는 것은 현실적으로 불가능한 문제이다. 따라서, 적절한 가정과 기준을 통하여 단계적으로 접근하는 방법이 효과적이다. 본 장에서는 이 문제를 해결하기 위한 분할접근 모형과 적절한 가정하에서 전체문제를 통합모형으로 처리하여 실행해를 발견적으로 개선하는 통합접근 모형에 대하여 설명하고자 한다.

1. 분할접근 모형

이 접근방법에서는 노드분할 문제와 Hub 위치결정 문제를 각각 별개의 문제로 분할하여 각 문제를 단계적으로 처리하기 위한 접근방법이다. 노드분할 여부에 따라 집단 내에서와 집단간에서 발생하는 트래픽의 관계가 변하기 때문에, 집단 내의 트래픽이 증가하면 C_B는 감소하고 C_L은 증가된다. 따라서, 망 설계자는 상위계층망의 설계 비용에 영향을 주는 DCS관련 장비의 비용과 하위계층망의 설계 비용에 영향을 주는 ADM관련 장비의 비용을 고려하여 집단 내의 트래픽을 최대화(또는 최소화)하는 노드분할을 구하고(노드분할 문제), 분할된 각 집단을 대상으로 Hub간의 연결비용을 최소화하도록 Hub의 설치위치를 선택(Hub 위치선정 문제)하는 단계적 방법을 고려할 수 있다. 분할접근 모형에서 유념해야 할 것은 노드분할 문제에 사용된 목적함수가 원래의 비용함수를 간접적으로 반영토록 한 함수이므로 최적해를 구하기 위해 너무 많은 노력을 투입하는 것은 비효율적이라는 점이다.

노드분할 문제는 모든 가능한 노드분할 집합에 대하여, 집단내 수요를 최대화(또는 최소화)하는 실행가능 집합을 선정하는 문제로 표현될 수 있다. 따라서, 이 문제는 기존의 Graph Partitioning 문제의 특수한 경우이어서 NP-hard의 계산복잡도를 가지고 있다.

노드분할 문제에 의해서 노드들이 p개의 집단들로 분할(Partition)이 되었다면, 이제는 각각의 집단에 대해 하나의 Hub가 설치될 적정위치를 구해야 한다. Hub 위치선정 문제는 노드분할이 주어진 상태에서 Hub의 설치비용과 Hub 간의 연결비용의 합을 최소화하도록 각 집단에 있는 Hub의 후보 중에서 하나를 선택하는 문제이다. 두 집단 사이에 설치될 회선수요는 각 집단의 Hub를 연결하는 관로망을 따라 설치되므로 Hub 사이에 놓여 있는 관로망의 최단 거리에 의해 전체 비용이 결정된다. 따라서, 모든 집단간에 발생하는 비용의 총합을 최소화하도록 각 집단의 Hub 위치를 결정해야 한다. Hub 설치에 따른 고정비용은 DCS장비의 설치비용과, Hub 설치에 따른 ADM Ring 구성비용이 함께 고려되어야 한다[2]. 이들 중 장비가격은 쉽게 산정할 수 있으나, ADM Ring의 구성비용은 Hub를 중심으로한 ADM-SHR 구성을 위한 의사결정과정을 거쳐야 알 수 있다. 따라서, Hub 위치선정 문제를 정식화하면 (*HL*)과 같고, 제약식의 특수한 구조를 이용하여 상대기반 해법(Dual Based Algorithm)등 보다 효과적인 해법의 개발이 가능한 모형으로 변환될 수 있다[3].

Hub 위치선정 모형

$$(HL)\ Min \sum_{i\in H}\sum_{j\in H} c_{ij}x_{ij} + \sum_{i\in H} f_i y_i$$

$$\text{s.t.} \sum_{i\in W_k} y_i = 1, \qquad k\in K,$$

$$\sum_{j\in W_k} x_{ij} = y_i, \qquad i\in H,\quad k\in K_i,$$

$$x_{ij},\ y_i \in \{0,1\}, \qquad i,j\in H.$$

K : 집단들의 집합, W_k : 집단 k에 속하는 Hub노드의 입지후보지, H : 모든 Hub의 설치 후보노드의 집합,

K_i : i노드가 속하지 않는 집단의 집합,

f_i : Hub i의 설치에 따른 고정비용

d_{ij} : Hub i와 Hub j간의 거리

r_{ij} : Hub i가 속한 집단의 모든 노드와 Hub j가 속한 집단 내의 모든 노드간의 총 수요량

c_{ij} : r_{ij} x d_{ij}

y_i : Hub i가 선택되면1, 아니면 0의 값을 갖는 이진 변수,

x_{ij} : Hub i와 j가 동시에 Hub로 선택되면 1, 아니면 0의 값을 갖는 이진 변수.

2. 통합접근 모형

하부계층의 망 설계 문제와 상위계층의 망 설계 문제를 동시에 고려하면서, 노드분할 및 Hub 위치선정 문제를 최적화하는 것이 현실적으로 불가능함은 앞에서 설명하였다. 그러나, 이 문제를 분리하여 개별적으로 문제를 해결하는 것 역시 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서, 적절한 가정과 기준을 통하여 하나의 모형에서 처리할 수 있도록 정식화하는 것이 중요하고, 이를 위하여 광전송망을 다음과 같은 망 구조로 단순화시켜 비용요소를 단순화시킬 수 있다. 즉, Hub와 CO(Central Office)간에는 단일 연결을 고려하는 성형(Star)구조를 갖도록 하고, Hub간에는 일반적인 망(Mesh) 구조를 갖는 것으로 가정한다. 물론, 이같은 가정을 고려하는 가장 큰 이유는 ADM-SHR을 설계하는 경우에도 비용요소가 거리에 비례하여 발생할 것이고, DCS를 이용한 SHN을 구성하는 경우에도 링크 설치비용은 거리에 비례하여 발생할 것으로 판단되기 때문이다.

따라서, 노드분할 및 Hub 위치선정 문제는 망-성형(Mesh-star) 구조의 계층구조를 갖는 Hub 위치선정 및 망 설계문제(Hub Location and Network Design : HLND)로 정식화가 가능하다[29],[30]. 그러나 이같은 가정하에서 얻어진 실행가능해는 Hub 계층에서는 Hub간의 운용회선의 설치만을 고려하였고, 하위계층에서는 Ring 구조가 아닌, 성형구조를 고려하였기 때문에 원래의 문제에 대한 최적해가

될 수 없다. 다만, 여기서 얻어진 실행가능해는 Hub의 위치선정과 노드분할에만 활용하고, 이를 바탕으로 ADM-SHR과 DCS-SHN 설계시에 Hub의 위치변동과 노드분할의 변화를 분석하여 개선된 실행가능해를 얻도록 하는데 활용할 수 있다.

노드분할 및 Hub 위치선정 문제를 HLND로 정식화하는데 있어서, 고려되는 Hub의 후보노드가 고정비용의 발생없이 경유노드(Bridge Node)로 활용될 수 있는가에 따라 설계모형이 달라진다. 우선, 고려되는 Hub의 후보노드가 경유노드로 활용될 수 없는 경우의 정식화 모형은 다음과 같은 절차로 수립된다. 각 CO와 Hub 사이의 최단거리와, 각 Hub 간의 최단거리를 구하여 링크의 거리로 정의한다. Hub와 가상 링크로 연결되는 가상노드를 고려하고, 가상링크의 거리는 0, 가상노드의 설치비용은 0으로 정의한다. 각 CO와 가상노드간의 쌍을 각각의 Commodity로 정의하고 이것을 집합 K_D라 하자. 각 CO간의 쌍도 각각의 Commodity로 정의하여 그 집합을 K_I라 하자. K_D에 속한 Commodity는 변동비용의 발생 없이 링크를 경유하여 가상노드까지 도달하게 된다. 그러나 K_I에 속한 Commodity는 경유하는 링크의 거리에 비례하는 비용을 부담하며 목적지까지 도달해야 한다. 물론, 이경우에 각 Commodity가 경유할 수 있는 링크가 개설되어 있어야 하며, 이들 링크 중에서 Hub와 연결된 링크는 Hub가 설치되는 경우에만 개설될 수 있음을 제약식으로 고려해야 한다. 따라서, 이 경우에 발생하는 총비용은 Hub의 설치비용, 링크의 개설 비용 및 링크상을 경유하는 Commodity의 변동비용의 합으로 표현된다. 이 문제를 정식화하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

Hub 위치결정 및 노드분할 통합모형

[*HLDN*]

$$Max \sum_{j \in J} g_j z_j + \sum_{\{i,j\} \in E} f_{ij} y_{ij} + \sum_{\{i,j\} \in A} c_{ij} x^k{}_{ij}$$

$$\sum_{j \in N} x^k_{ij} - \sum_{i \in N} x^k_{ji} = \begin{cases} r_k, & i = o(k), \\ -r_k, & i = d(k), k \in K, \\ 0, & otherwise, \end{cases}$$

$$\sum_{k \in K} r_k (x^k_{ij} + x^k_{ji}) \le Q_{ij} y_{ij}, \qquad (i,j) \in E,$$

$$x^k_{ij} \le z_i, \qquad (i,j) \in E, i \in J,$$

$$x^k_{ji} \le z_i, \qquad (i,j) \in E, i \in J,$$

$$x^k_{ij} \ge 0, \quad y_{ij}, z_i \in \{0,1\}, \quad i \in J \{i,j\} \in E.$$

$K = K_I \cup K_D$,

c^k_{ij} : k Commodity가 (i, j) 링크 경유하는데 발생하는 변동비용.

f_{ij} : (i, j) 링크 개설하는데 소요되는 고정비용.

g_j : Hub j의 설치에 소요되는 고정비용.

r_k : Commodity k의 수요.

Q_{ij} : 링크 (i, j)에서 수용할 수 있는 최대 수요량.

x^k_{ij} : (i, j) 링크에 k Commodity의 수요량이 점유하는 비율.

y_{ij} : 링크 (i, j)의 이용여부를 나타내는 이진 변수.

z_j : Hub j의 설치여부를 나타내는 이진 변수.

이 모형은 HLND의 일반적인 모형이지만, NP-hard의 문제복잡도를 갖는 망 설계 문제를 부문제로 포함하는 복잡한 문제이므로 효과적으로 해결할 수 있는 최적화 해법이 아직 제시되고 있지 않다. 이 모형을 이용하여 노드분할 및 Hub 위치선정을 결정하면, 이를 바탕으로 Local ADM-SHR 및 DCS SHN의 설계를 실시하고, 이렇게 설계된 망을 대상으로 Hub의 위치변동과 노드분할의 변화에 대한 분석을 실시하여 최종적인 해의 개선을 도모할 수 있다.

여기서 제시된 모형은 Hub 후보 노드의 경유를 허용하지 않는 것으로서, 가상노드와 가상아크 및 적절한 Commodity의 정의를 이용하여 정식화할 수 있음을 보였다. 그러나, Hub 후보노드의 경유를 허용하는 문제에서는 이보다 더욱 복잡한 모형이 된다. 즉, 고려되는 Hub의 설치 후보 중에서도 DCS의 설치 없이 단지 케이블의 통과만을 허용하는 노드로서의 역할을 하는 경우에는 Hub 설치에 따른 고정비용이 발생하지 않는다. 따라서, Hub가 설치되는 경우에 링크의 개설을 고려해야 할 뿐만 아니라, Hub가 설치되지 않아도 인접한 링크의 설치가 경제적이면 링크를 설치할 수 있게 된다. 이러한 문제의 경우에는 매우 복잡하게 정식화 될 수 있는데, 본 연구에서는 생략하기로 하고 Yoon and Current의 연구[29]를 참조하기 바란다.

노드분할 및 Hub 위치선정 문제의 특수한 경우로서, 이미 ADM-SHR이 설치되어 있는 경우에 이들 노드를 적절한 집단으로 분할하고, 분할된 각 집단에 Hub 노드를 설치하는 문제를 고려할 수 있다. 이러한 문제는 실제 광전송망의 구축단계에서 발생할 수 있는 문제로서, 이미 ADM-SHR이 구성되어 있으나, 용량의 제약으로 인하여 기존 SHR의 확장, 또는 DCS를 이용한 Hub 망의 구성을 고려하는 경우이다. 즉, 증가된 수요를 DCS를 통한 Hub 망에서 처리하는 경우의 Hub의 최적 입지 및 Hub에 접속되는 노드의 분할을 결정하는 경우의 문제이다. 이 경우에는 SHR을 이용하는 경우에는 용량제약은 받게 되지만 별도의 비용이 발생하지 않고, DCS Hub 망을 이용하는 경우에만 추가의 비용이 발생하게 된다.

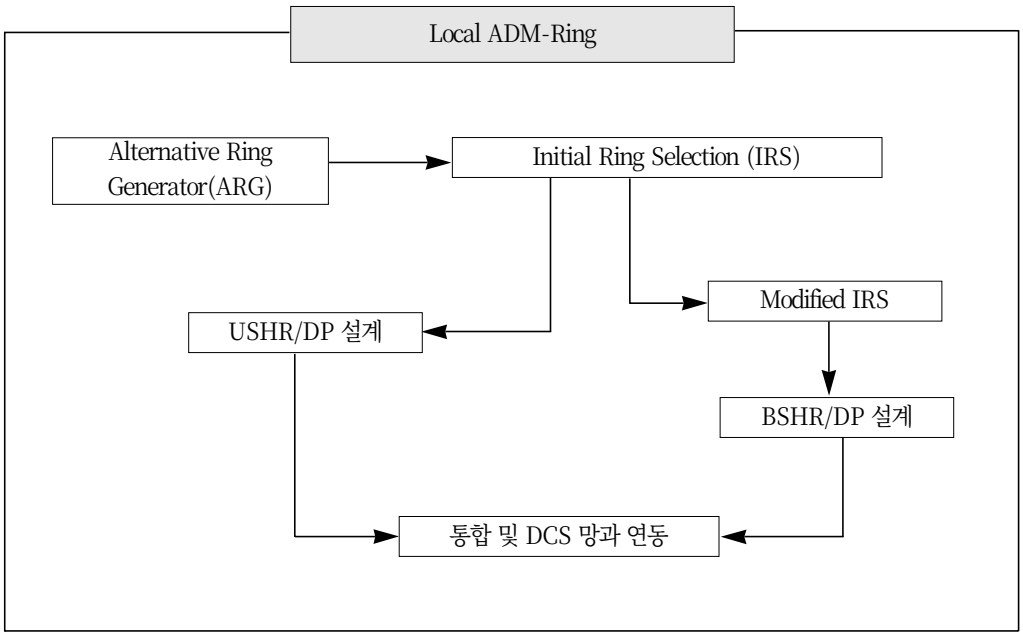


그림 4. Local ADM-SHR 설계체계

따라서, Hub 노드의 설치비용과 Hub 노드간의 연결비용이 최소가 되는 Hub의 위치선정 및 노드의 분할을 결정하여야 한다. 최적화를 위하여 Hub 망에서는 운용회선과 예비회선이 동시에 결정되어야 하지만, 일차적으로 최소비용을 갖는 운용회선을 설치하고, 이어서 생존도를 고려하여 예비회선을 설치하는 단계적 접근방법을 이용할 수 있다. 이같이 ADM-SHR이 주어진 상황에서 Hub의 위치결정과 Hub 망의 설계 및 노드분할 문제는 가상노드 및 가상아크의 도입과 적절한 Commodity의 정의를 통하여 혼합정수계획 문제로 정식화 될 수 있다. 이에 대한 자세한 과정은 Yoon의 연구[30]를 참조할 수 있다.

IV. ADM-Ring 설계문제

1. ADM SHR 설계단계

Local ADM SHR 구성 부문에서는 각 집단 내에서 ADM의 설치위치, 설치된 ADM을 포함하는 SHR의 구성, 사용될 ADM의 유형과 용량, P-t-P/DP 시스템의 설치여부를 결정하여야 한다. 만일 집단 내에 오직 하나의 Ring만 존재하여 요구되는 수요를 모두 처리할 수 있는 경우라면, 위에서 언급한 의사결정이 좀더 단순화된 형태로 이루어질 수 있다. 그러나 일반적으로는 하나의 집단내에도 여러 형태의 Ring이 존재할 수 있고, 동일한 용량을 갖는 Ring이 중첩되어 설치될 수 도 있다.

SHR을 설치하기 위한 비용요소로는 1) 설치될 전송용량에 따른 ADM의 설치비용, 2) 광단국 및 Ring의 경로에 따라 설치할 광케이블 비용, 3) ADM이 설치되지 않은 CO를 Ring 상에 놓인 ADM과 연결하기 위한 P-t-P/DP 시스템 설치비용 등으로 구성된다. 이때, BSHR의 경우에는 경로선정 기법과 ADM 설치 위치 등에 따라 설치되는 Ring의 용량이 다르게 결정되기 때문에, USHR 기법과는 다른 설계 절차가 필요하다.

USHR과 BSHR의 기본적 전제조건은 동일하게 주어지지만, USHR에서는 설치된 링에서 수요의 경로선정이 필요하지 않으므로 비교적 단순한 접근 방법을 적용할 수 있다. 반면에, BSHR의 경우에는 경로선정 방식에 따라 설치되는 링의 용량이 변화될 수 있기 때문에 매우 복잡한 문제가 된다. 즉, 양방향으로의 경로설정이 가능할 뿐만 아니라, 주어진 수요를 단일 경로로 처리할 것인지(Non-bifurcated Routing) 또는 두개의 경로로 처리할 것인지(Bifurcated Routing)에 따라서 설치되는 링의 용량이 크게 변할 수 있기 때문이다. 따라서 BSHR의 경우는 경로선정 방식이 결정된 이후에 링의 용량을 고려하여 적절한 링이 선택되도록 하는 방식으로 링을 설계한다. BSHR의 경우는 BSHR/2와 BSHR/4에 따라서 사용되는 ADM의 유형과 광케이블 수가 다르게 되지만, 이점은 설계모형의 링 설치비용에서 충분히 고려될

수 있기 때문에, BSHR/2와 BSHR/4는 동일한 설계절차로 설계될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 ADM SHR을 크게 3개의 모듈로 구분하여 설계절차를 제시한다. 즉, ARG(Alternative Ring Generator)에서는 SHR이 설치될 수 있는 여러 후보 Ring을 만들게 된다. 이것은 주어진 수요를 충족시키는 경제적인 Ring들을 모형을 통하여 결정하는 것이 매우 어려운 일이기 때문에, 미리 가능한 후보 Ring들을 만들고 이로부터 필요한 몇 개의 Ring을 결정하고자 하는 것이다. ARG에서 SHR 후보 Ring을 만드는 방법은 TSP(Travelling Salesman Problem)을 이용하거나, 노드가 공유되지 않는 두개의 경로(Node-disjoint Path)를 찾음으로써 하나의 Ring을 만들 수 있다. ARG에서 만들어진 후보 Ring들을 대상으로 각 노드의 수요를 고려하여 설치 가능한 다수의 Ring을 선정한다(IRS). 선정된 Ring을 대상으로 Drop Type 발견적 해법을 통하여 USHR/DP 또는 BSHR/DP를 설계하게 되고, DCS 망과의 연계를 위하여 통합화시키는 과정으로 설계절차가 이루어진다.

IRS(Initial Ring Selection) 부문에서는 초기에 설치될 수 있는 몇 개의 링이 선택되는데, 이때 링에 포함된 노드에는 모두 ADM이 설치되는 것으로 가정한 결과이다. 따라서, 선택된 초기의 각 링에 대하여 현실적인 면을 고려하여 불필요한 ADM의 제거를 검토할 필요가 있다. 이 과정은 USHR인 경우와 BSHR인 경우에 따라 다르게 결정된다.

IRS에서 선택된 각 링은 초기의 가능해라는 측면이 있지만, 보다 중요한 의미는 선택된 각 링에 포함된 노드와, 그 노드들에서 해당 링을 이용하는 수요량을 알 수 있다는 점이다. 즉, 하나의 링으로 구성될 수 있는 노드의 집합과 각 노드에서 처리해야하는 수요량이 계산되므로, 선택된 링에서 처리해야할 수요를 사전에 계산할 수 있다는 점이다. 이러한 노드 집합을 대상으로 ADM의 위치 선정, 실제 링의 설치 경로 및 P-t-P/DP 시스템의 설치에 관한 문제는 원래의 문제 보다 단순한 형태로 정식화 될 수 있다. 따라서, IRS에서 선택된 각 링을 대상으로 USHR/DP와 BSHR/DP 부문에서 ADM의 설치, 링 경로, P-t-P/DP 시스템의 설치 등을 결정한다.

SHR에서 모든 노드의 수요를 BSHR로 처리하는 경우에는 USHR 보다 적은 용량으로 수요를 처리할 수 있다. 따라서, USHR의 기준으로 만들어지는 Ring의 수는 적어도 BSHR에 의한 Ring의 수 보다는 많게 될 것이기 때문에, USHR의 기준으로 만들어진 Ring에 대하여 적절한 기준을 적용하면 효과적인 BSHR을 만들 수 있다. 이러한 점을 고려하여 IRS에서는 USHR을 기준으로 초기 Ring을 선정하고, USHR/DP 및 BSHR/DP 설계모듈에서 보다 엄밀한 Ring이 구현되도록 하는 절차를 따른다.

2. IRS 결정문제

ARG에서 얻어진 여러 후보 Ring으로 부터 USHR을 기준으로 초기 가능해인 다수의 Ring을 선정한다. 초기 가능해로부터 ADM이 설치될 노드의 결정과 Ring의 설계, ADM이 설치되지 않은 노드를 ADM-Ring에 연결하는 방법의 결정 등을 통하여 최종적인 ADM-SHR이 얻어지게 된다. 따라서, 최적화 모형을 통한 최적해를 초기가능해로 사용하는 경우에도, 이 최적해로부터 구한 ADM-SHR의 설계비용이 최소가 될 것이라는 보장은 할 수 없다. 이같은 이유는 전체 설계문제가 분할되는 과정에서 문제의 복잡성 때문에 IRS 문제에 여러 가지 가정이 고려되었으나, IRS로 부터 얻은 초기가능해로부터 ADM-SHR을 구하는 과정에서는 이같은 가정을 배제하였기 때문이다. 즉, IRS 문제에서는 고려되는 모든 노드에 ADM을 설치하는 것으로 가정하여 초기 Ring을 선택하지만, 실제로 설계되는 ADM-SHR에서는 특정 노드에만 ADM 장비가 설치되면서 Ring의 형태가 달라지게 된다. 따라서, 다양한 형태의 초기해로부터 여러 가지 ADM-SHR을 설계한 후, 비용 비교를 통하여 경제적인 망을 선택하여야 한다. 이같은 이유 때문에 IRS 결정문제에서는 정교한 최적화 모형의 수립이 보다는 실행가능해를 비교적 손쉽게 얻을 수 있는 모형의 개발이 더욱 중요하게 된다. 본 연구에서도 이점을 고려하여 최적화 모형을 제시한다.

SHR의 후보 고려시에 집단 내의 수요처리 방법을 고려하여야 한다. 첫째, 집단간의 수요는 Hub를 경유해서 처리할 수 있으므로 Hub를 경유하는 링을 고려한다. 둘째, 집단 내의 수요 중에서 일부는 Hub를 통하지 않는 SHR로 처리될 수 있다. 따라서, Hub를 포함하지 않는 집단 내의 링(내부링)도 SHR의 후보에 포함시켜야 한다. 셋째, 집단 내의 특정 노드 상간의 P-t-P/DP 시스템으로 수요를 처리함으로써, 전체 링 구성비용을 줄일 수 있는 경우가 발생한다. 따라서 비교적 집단내의 수요가 많은 노드 상간에는 P-t-P/DP 방식으로 수요를 처리할 수 있도록 하기 위하여, P-t-P/DP 시스템을 링의 특수한 형태로 간주하여 링의 후보에 포함시키고, 구성비용의 산출은 두 노드 상간의 최단 링크가 중복되지 않는 이중경로를 구하여 계산한다.

이상의 전제조건과 제약조건을 반영한 USHR을 기준으로 수립된 IRS의 최적화 모형은 ***(IR)***과 같이 정식화 될 수 있다. ***(IR)***모형은 혼합정수 계획문제이므로 문제의 크기가 커지는 경우 최적해를 구하기는 매우 어려운 일이다. 따라서 만족할 만한 해를 비교적 빠른 계산 시간에 구하는 것이 중요한 요소이다. 만족할 만한 해를 제시할 수 있는 해법으로 여러 가지가 고려될 수 있으나, 문제의 구조적 특성을 고려하여 Lagrangian 완화기법에 Valid Inequalities 등을 보완하면 효율적인 Algorithm을 개발할 수 있다[1],[2],[5].

IRS 의 최적화 모형

$$(IR)\ \ Min \sum_{r\in R}\sum_{t\in T} c^t_r y^t_r$$

$$s.t. \sum_{r\in R}\sum_{t\in T} a_{ir} x^t_{ir} \geq r_i, \quad i\in K$$

$$\sum_{i \in K(r)} x^t_{ir} \le q^t y^t_r, \qquad t \in T,\ r \in R$$

$$x^t_{ir} \le P_{ir}, \qquad i \in K,\ r \in R$$

$$x^t_{ir} \ge 0,\ y^t_r \in \{0,1\}, \qquad i \in K,\ r \in R,\ t \in T$$

N : 노드의 집합,
E: 아크의 집합,
K : Commodity의 집합,
R : SHR 경로 후보집합,
$K(r)$: 링 r에 포함된 Commodity의 집합,
T : 링의 설치 용량별 종류의 집합.
q^t : Type이 t인 링의 최대용량, $t \in T$,
r_i : OC단위로 환산된Commodity i의 수요,
P_{ir} : i Commodity의 수요중 링 r에 배정할 수 있는 최대수요,
c_r : ADM설치를 고려하지 않은 링 r을 구성하는 비용,
a_{ir} : Commodity i가 링 r에 놓이면 1 아니면 0 의 값을 가지는 계수,
c^t_r : 용량 t인 r링을 구성하는 비용,
y^t_r : 용량 t인 링 r의 구성을 나타내는 0,1 변수,
x^t_{ir} : 용량 t인 링 r에 Commodity i의 수요 할당량.

3. USHR/DP 문제

IRS 모듈에서 선정된 각각의 ADM-SHR에서는 모든 노드에 ADM 장비가 설치되는 것을 가정한 것이지만, 고가인 ADM 장비를 모든 노드에 설치하는 것이 경제적인지는 다시 검토해야 한다. 즉, 일부의 노드에 ADM을 설치하지 않고 (이러한 노드를 TM 노드라 하자) 인접한 ADM 노드에 P-t-P/DP 시스템으로 연결되도록 하는 것이 더욱 경제적일 수 있다. 따라서 USHR/DP는 IRS에서 선정된 각 ADM-SHR에 대하여 최종적으로 ADM이 설치될 노드를 결정하고, TM 노드를 P-t-P/DP 방식으로 ADM과 연결하여 경제적인 망을 구현하기 위한 것이다(그림 5).

USHR/DP는 링 구조와 P-t-P/DP의 결합된 2계위 계층구조를 갖는다. 즉, Hub와 ADM이 설치된 노드의 상위계층에서 USHR을 이루고, 나머지 TM 노드는 링크가 중복되지 않는 이중경로(Link Disjoint Paths)를 통해 하나 또는 두개의 ADM 노드에 접속됨으로써 하위계층을 구성한다. 이러한 망 구조는 특히 단일 링크의 고장에 대비한 100% 생존도 보장과, 고가인 ADM 비용의 절감이 동시에 요구될 때 활용될 수 있다. 이상에서 살펴 본 바와 같이 USHR/DP는 그 구조가 비교적 단순함에도 불구하고, 실제로 경제적인 방법으로 구현하는 일은 결코 용이하지 않다. USHR/DP의 경제적인 구현을 위해서는 관로 등 물리적 망 구조가 주어진 상태에서 다음의 사항들이 동시에 결정해야 한다.

1) 어느 노드에 ADM을 설치하여야 할 것인가.
2) 선택된 ADM 노드들을 Hub를 중심으로 하는 단일 링의 형태로 상호 연결하기 위해서 어떤 경로를 통하여 케이블을 설치 할 것인가.
3) 각 TM 노드를 링크가 중복되지 않는 경로를 통해 링에 접속하기 위해서는 어떤 경로를 통하여 케이블을 설치하여야 할 것인가.

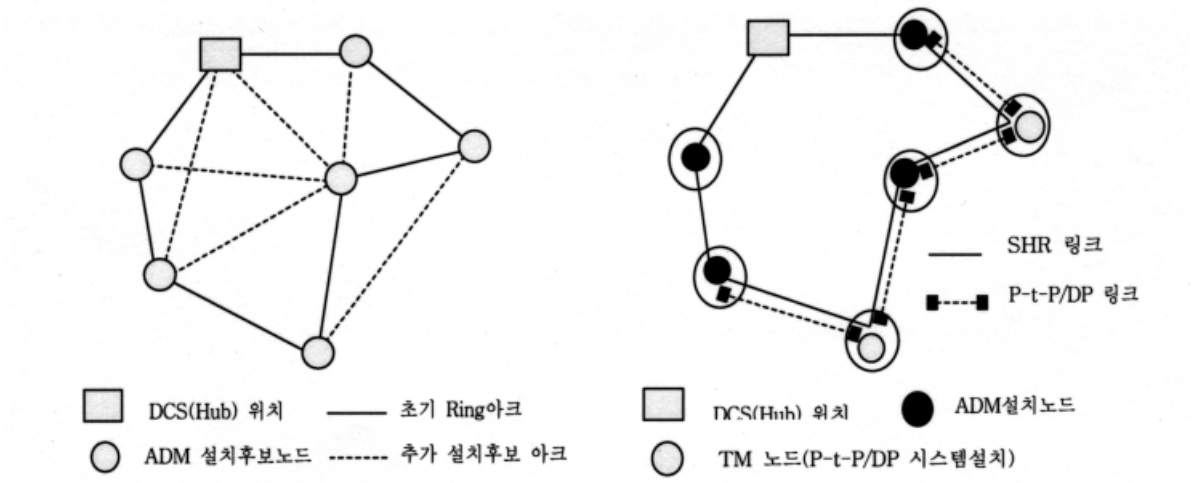
이상과 같은 결정들은 상호 밀접하게 관련되어 있으므로 하나의 모형 내에서 동시에 다루어 져야 한다. 이에 대하여 가상노드 및 아크를 고려한 망 확장기법을 통한 접근방법이 활발히 연구되고 있다.

4. BSHR 용량결정 및 BSHR/DP 배치문제

BSHR의 설계에서는 BSHR의 운용방식상의 특성을 고려하면서도 문제의 복잡성을 줄여 적절한 시간 내에 좋은 가능해를 찾기 위한 단계적 접근법이 효과적이다. 본 연구에서는 BSHR/DP의 설계방법을 그림 4에서와 같이 크게 두 단계로 구분하여 제시한다. MIRS(Modified IRS)에서는 IRS의 수행결과로 부터 출발하여 BSHR의 특성을 반영한 Ring 간에 할당된 수요의 조정과정을 통하여 각 Ring에서 처리하여야 할 노드 상간의 수요를 확정한다. IRS에서 선택된 Ring 중에는 하나의 Ring이 허용하는 최대 수요를 초과하거나, 또는 기본 설치용량에 크게 미달하는 것이 발생할 수 있으므로, 이들 Ring을 대상으로 수요 조정을 실시한다. MIRS의 결과로 얻어진 각 Ring에서 처리하여야 할 노드 상간의 수요가 결정되면, BSHR/DP에서는 각 수요의 경로선정 방법에 따른 Ring의 용량, ADM의 설치 위치, P-t-P/DP 배치를 결정한다.

BSHR에서는 링을 통과하는 모든 수요는 서로 반대 방향으로 흐르는 두개의 링에 의해 처리된다. 즉 어떤 노드 상간 수요를 처리하기 위해 반대 방향으로 운용되는 두개의 링을 이용할 수 있으므로, 링에서 처리되어야 할 각 노드 상간의 수요만이 주어진 상태에서 링의 최소용량을 산출할 수는 없다. 즉, BSHR의 수요 처리를 위해 두개의 Ring이 양방향으로 운용되므로, Ring상에 존재하는 각 노드 상간 수요는 이 두개의 경로를 통해 처리가 가능하다. 그런데 Ring은 모두 링크가 동일한 용량을 가져야 하므로, Ring의 용량은 최대의 링크 부하(Link Load)를 가지는 링크에 의해 결정된다. 따라서 Ring의 용량을 최소화하기 위해서는 최대의 링크 부하를 최소화시키는 최적화 문제가 되는데, 이를 RLP(Ring Loading Problem)이라 한다[8],[18].

BSHR에서는 어떤 노드 상간에 존재하는 두개의 경로중 하나를 통해 수요를 처리하거나, 아니면 두개의 경로를 모두 이용하여 처리할 수 있다. 전자의 경우를 수요의 분할 처리를 허용하지 않는 문제(RLP Without Demand Splitting :



(a) USHR/DP 후보문제 (b) USHR/DP 배치결과

그림 5. USHR/DP설치문제

RLPWO)라 하고 후자의 경우를 수요의 분할처리를 허용하는 문제(RLP with Demand Splitting : RLPW)라 한다. BSHR의 용량결정 문제인 RLPW와 RLPWO 문제를 해결하기 위한 최적화 모형 및 효과적인 해법이 이미 개발되어 활용되고 있다[8],[18],[23]. 따라서, MIRS로부터 얻어진 각 Ring에 대하여 용량이 결정되고 나면, Ring을 구성하고 있는 특정 노드에 ADM 대신에 P-t-P/DP 시스템을 설치하는 것을 가정하는 경우를 고려한다. 이 경우의 용량 결정은 RLPW 또는 RLPWO로 쉽게 계산될 수 있고, 이에 따른 설치비용도 계산이 가능하다. 이 같은 과정을 거쳐 최종적인 BSHR/DP를 결정하게 된다.

V. DCS를 이용한 SHN 설계문제

DCS망에서는 운용회선 뿐만아니라 망의 장애에 대비한 예비회선을 설치해야 하는데, 전체 설치비용을 최소화하기 위하여 운용회선과 예비회선을 동시에 최적화하여 설치하여야 한다. 그러나, 운용회선과 예비회선을 동시에 설치하는 WSCAP(Working and Spare Capacity Assignment Problem)는 매우 복잡하여 쉽게 해결하기 곤란한 문제이므로, 기존의 대부분의 연구는 운용회선이 설치된 경우에 대한 예비회선의 최적 설치문제를 주로 다루어 왔다[7],[12],[13],[19]. 운용회선과 예비회선의 설치는 실제 DCS망의 운영과 관련되는데 이는 다음의 두 가지 측면에서 고려되어져야 한다.

첫째, 운용회선과 예비회선을 단일 경로로 보내는 경우(Non-bifurcated Flow)와 여러 개의 경로로 보내는 경우(Bifurcated Flow)이다. 운영의 단순화를 위해서는 운용회선과 예비회선을 모두 단일 경로로 보내는 것이 유리하지만, 이 경우 전체적으로 많은 회선이 요구된다. 반대로 운용회선과 예비회선을 여러 개의 경로로 보내게 되면, 전체 필요 회선 수는 감소하지만 운영은 복잡하게 된다.

둘째, 망의 재구성은 경로복구(Path Restoration : PR) 방식과 링크복구(Line Restoration : LR) 방식으로 나누어 볼 수 있다. LR에서는 어떤 링크에 장애가 발생하게 되면 이 링크만을 우회할 수 있는 우회경로를 확보하고, 이 경로를 통해 장애를 복구하는 방식이다. 반면, PR은 어떤 링크에 장애가 발생하게 되면 이 링크를 지나던 트래픽 수요의 운용회선 경로를 미리 설정된 다른 예비회선 경로를 통해 장애를 복구하는 방식이다. 실제 광통신망의 운영에서는 트래픽 수요를 고속으로 처리하기 위해서 경유하는 노드의 수(Hop-count)에 제약을 두는 것이 일반적이다. 이러한 제약과 운용상의 특성 때문에 PR방식이 LP방식에 비하여 예비회선의 수를 적게 사용하므로 전체 사용 회선 수를 감소시킬 수 있다[2],[14].

이처럼 위의 두 가지 점을 고려할 때 운용회선은 단일 경로로 설치하는 경우의 예비회선 설치문제는 다음의 네 가지의 경우로 나눌 수 있다.

1) P_{NL} : 예비회선경로가 하나이고 LR인 경우,
2) P_{NP} : 예비회선경로가 하나이고 PR인 경우,
3) P_{BL} : 예비회선경로가 여러개이고 LR인 경우,
4) P_{BP} : 예비회선경로가 여러개이고 PR인 경우.

위의 네 가지 문제들은 운영측면에서 상호간에 장단점이 존재하지만, 예비회선의 수를 최소화한다는 측면에서 보면 P_{BP}가 가장 적절한 것으로 제시되고 있다[12],[14],[21].

표 1. SCAP와 P_{NP}의 비교

구 분	SCAP	P_{NP}
운영 방식	운용회선은 단일화 최단경로로 할당 한후 링크의 장애 발생시 여러개의 예비회선 경로를 통해 복구	운영회선과 예비회선을 모두 단일 경로를 통해 운영
장애시의 복구시간	많은 시간 소요	짧은 시간 소요
운영의 복잡성	복 잡	간 단
회선사용의 정도	적 음	많 음

그러나 P_{BP}가 NP-hard의 계산복잡도를 갖는 문제로서, 현실적인 규모의 망을 대상으로 적절한 계산시간 내에 이 문제를 해결할 수 있는 해법의 존재 가능성조차 아직 밝혀지지 않고 있다. 뿐만아니라, 실제 운영 측면에서도 다중경로의 Path Restoration을 채택하고 있기 때문에 단일경로의 Line Restoration 방식에 비하여 매우 복잡한 운용방식이 요구되는 문제점이 있다.

P_{BL}의 경우도 운용상의 문제점 외에도 운용회선과 예비회선을 동시에 설치하는 경우의 해법개발이 매우 어렵기 때문에, Sakauchi 등 [19]와 Grover 등 [11],[12]에 의해 연구되어진 예비회선 설치문제(Spare Channel Assignment Problem : SCAP)만을 고려하게 된다. 물론, SCAP에서 얻어진 전체 회선수는 실제 P_{BL}에서 요구되는 것보다는 많게 된다. SCAP은 노드간 트래픽 수요를 미리 경로선정을 통하여 링크간 수요로 전환하여야 한다는 문제점과 LR이 가지고 있는 일반적인 문제점을 가지고 있다.

P_{NL}는 앞에서 지적한 LR의 문제점 뿐만아니라, 예비회선 경로가 단일경로일 때 예비회선경로가 여러개인 경우에 비해 더 많은 예비회선을 필요로 한다. P_{NL}는 Coan 등 [7]에 의해 연구되어졌고 PR이므로 LR의 문제점들을 해결할 수 있으나, 운용 및 회선사용의 측면에서 매우 비효율적이다. 따라서 이 방식은 현실적 대안에서 배제되어 있는 것이 일반적이다.

DCS망에서의 운용회선과 예비회선의 할당은 전체회선수를 최소화하고 효율적인 운영을 고려할 때, SCAP와 P_{NP}만이 가능한 방안임을 알 수 있다. 따라서 현재까지의 대부분의 연구들도 P_{BL}의 특수한 경우인 SCAP과 P_{NP}에 대해서만 이루어지고 있다. 이와 관련된 연구들의 공통된 문제점은 모두 소규모의 망에 대해서만 사용 가능한 해법이라는 점이다. P_{NP}는 예비회선이 단일경로를 통해서만 복구된다고 가정하므로 SCAP에 비해 설치되는 예비회선의 수가 많이 사용되는 단점을 가지고 있다. 그러나 운용측면에서 본다면 SCAP의 운영회선은 단일경로를 통해 처리되는데 반하여 예비회선 경로는 여러개로 처리하므로, 링크의 장애가 발생하면 SCAP은 P_{NP}에 비해 복구하는데 많은 시간을 필요로 하게 된다. 이들 두가지 방식의 차이점은 표 1과 같다.

해법의 측면에서 살펴보면 SCAP은 선형계획법을 이용하게 되므로 선형계획법의 해법을 필요로 하며, 실제 운영이 복잡하다는 단점이 존재한다. 따라서 현실적으로 망의 운영을 단순화하기 위해서는 설치되는 회선이 많더라도 P_{NP}를 적용하는 것이 보다 타당한 대안이라 여겨진다. P_{NP} 역시 NP-hard의 계산복잡도를 갖는 문제이지만, 이에 대한 효과적인 발견적 해법이 제시되어 있다[2],[14].

VI. 결 론

본 연구는 동기식 광전송망 설계체계에 관한 연구로서, 생존도를 고려하여 광전송망의 구조 및 특성, 전송장비의 특성 등에 따라 전체 설계문제를 다루기 쉬운 문제로 분할하여 처리하는 단계적 접근법을 제시하였다. 특히, 전송망 설계문제와 관련하여 노드분할 과 Hub 위치 선정문제, ADM SHR 설계문제, DCS 망에서의 운용회선 및 예비회선 할당문제들이 핵심문제로서 제시되었고, 이들 문제를 해결하기 위한 접근방법과 설계모형을 소개하였다. 이같은 재구성이 가능한 광전송망의 설계도구 개발은 미국, 일본 및 유럽 등의 선진국에서도 연구가 활발히 진행되고 있는 분야로서, 설계도구가 개발되어 실제 광전송망의 구축에 활용하고 있다. 따라서, 광대역 통신망의 하부구조인 광전송망의 구축을 위하여 국내 기술에 의한 설계도구의 개발시 본 연구의 결과가 활용될 수 있을 것이다.

ADM, DCS 등의 전송장비의 운용방식 등이 결정되지 못함으로써 본 연구에서 고려되지 못한 부분과, 새로운 광전송장비(WDM 등)의 도입을 고려한 설계문제 등도 계속 연구되어, 본 연구결과에 반영되어야 할 것이다. 특히, 광가입자 전송망에 관한 연구는 그 중요성에도 불구하고, 체계적인 설계절차의 정립이 아직까지 제시되고 있지 못한 실정이다. 따라서, 광가입자 전송망 설계기법을 본 연구에 통합함으로써, 국간 광전송망과 함께 종합적인 광통신망 설계도구로 통합 발전할 수 있도록 해야할 것이다.

본 연구와 더불어 계속적인 연구가 필요한 분야는 다음과 같다.

1. 다양한 ADM 링으로의 확장 : Inter Cluster Ring, Dual Homing, Tree, Mesh 망 구조에 대한 경우로 확장한다.
2. 가입자 망 구조에 대하여 연구 : 생존도를 고려하여 Tree, Mesh, Double Star 등의 망 구조에 대한 설계모형 및 해법에 대한 연구가 필요하다.
3. 각 전송수요에 대한 ADM-SHR/DCS-SHN에서의 다중

화 계위결정 및 VP(Virtual Path)와 VC(Virtual Circuit) 할당에 관한 연구가 필요하다.

4. WDM-SHR에 대한 연구 : 광파기술의 급진전으로 WDM의 적용 가능성이 높아지고 있으므로, WDM을 이용한 경제적인 생존도를 보장하는 통신망의 구축에 대한 연구가 진행되어야 한다.

본 연구에서 제시하는 설계절차는 국내의 동기식 광전송망 설계도구를 개발하는데 있어 하나의 방법론으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 다만, 연구의 편의를 위하여 고려되었던 일부의 가정과, 본 연구에서 다루지 못했던 부분에 대한 계속적인 연구가 추진되어 경제적이고 효율적인 광전송망의 설계가 가능한 도구가 개발되어야 할 것이다.

본 연구의 일부는 한국통신 연구개발원 장기기초연구사업의 지원으로 이루어짐.

[참고문헌]

[1] 한국통신,“ 재구성이 가능한 통신망의 운용최적화 시스템 개발, ”1993. 12.

[2] 한국통신,“ 재구성이 가능한 통신망의 구축최적화 시스템 개발 ”, 1994. 12.

[3] 백영호, 윤문길,“ 광대역 통신망에서의 대역폭 관리기법 ”, *경영연구*, 제2권, 1호, 17- 29, 1995. 9.

[4] 윤문길, 백영호, 김대근,“ 광가입자 선로망 구성을 위한 설계모형 조사연구 ”,*경영과학*, 제11권, 3호, 103-128. 1994. 11.

[5] 윤문길,“ 생존도를 고려한 계층적 구조를 갖는 광통신망의 설비망 설계에 관한 연구 ”, *한국항공대학교 논문집*, 제32집, 441-459, 1994. 10.

[6] G. N. Brown, W. D. Grover, J. B Slevinsky and M.H. MacGregor, "Mesh/Arc Networking : An Architecture for Efficient Survivable Self-Healing Networks," *Globecom'94*, 471-477, 1994.

[7] B. Coan, W. Leland, M. Vecchi, A. Weinrib and L. Wu, "Using Distributed Topology Update and Preplanned Configurations to Achieve Trunk Network Survivability," *IEEE Transactions on Reliability*, V.40, No.4, 404-416, 1991.

[8] S. Cosares and I. Sanieei, "An Optimization Problem Related to Balancing Loads on SONET Rings," *Telecommunication Systems*, V.3, II, 1994.

[9] S. Cosares, D. N. Deutsch, I. Sanieei and O. J. Wasem, "SONET Toolkit : A Decision Support System for Designing Robust and Cost-effective Fiber-Optic Networks," *Interfaces*, Vol. 25, No. 1, 20-40, 1995.

[10] R. D. Doverspike, J.A. Morgan and W. Leland, "Network Design Sensitivity for Use of Digital Cross-connect Systems in Survivable Network Architectures", *IEEE Journal on SAC*, 12, 69-78,1994

[11] W. D. Grover, "Case Studies of Survivable Ring, Mesh and Mesh-Arc Hybrid Networks," *Globecom'92*, 633-638, 1992.

[12] W. D. Grover, T. Bilodeau and B. Venables, "Near Optimal Spare Capacity Planning in a Mesh Restorable Network," *Globecom'91*, 2007-2012, 1991.

[13] M. Herzberg, "An Optimal Spare-Capacity Assignment Model for Survivable Networks with Hop Limits," *Globecom'94*, 1601-1606, 1994.

[14] H. G. Kim, Self-healing Network Design and Analysis, Ph.D. Desertation, Department of Industrial Management, KAIST, 1996.

[15] D. Medhi, "A Unified Approach to Network Survivability for Teletraffic Networks : Models, Algorithms and Analysis," *IEEE Transactions on Comm.*, Vol. 42, No. 2/3/4, 534-548, 1994.

[16] M. Minoux, "Network Synthesis and Optimum Network Design Problems : Models, Solution Methods and Applications," *Networks*, V.19, 1989.

[17] Y. S. Myung, H. J. Kim and D. W. Tcha, "Design of Communication Networks with Survivability Constraints," *Proceedings of Korea Telecom International Symposium '94*, 1994.

[18] Y. S. Myung, H. G. Kim and D. W. Tcha, "Optimal Load Balancing in SONET Bidirectional Rings," *Operations Research*, Vol, 45, 148-152, 1997.

[19] H. Sakauchi, Y. Nishimura and S. Hasegawa, "A Self-Healing Network with an Economical Spare-Channel Assignment," *Globecom'90*, 438-443, 1990.

[20] J. Suurballe and R. Tarjan, "A Quick Method of Finding Shortest Pairs of Disjoint Paths," *Networks*, V.14, 325-336, 1984.

[21] D. W. Tcha, "Design Issues in Survivable Synchronous Optical Transmission Networks," *Proceedings of Korea Telecom International Symposium '94*, 35-41, 1994.

[22] B. Venables, W. Grover and M. MacGregor, "Two Strategies for Spare Capacity Placement in Mesh Restorable Networks," *ICC'93*, 267-271, 1993.

[23] O. J. Wasem," An Algorithm for Designing Rings for Survivable Fiber Networks," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 40, 428-432, 1991

[24] O. J. Wasem, T.-H. Wu and R. H. Cardwell, " Survivable SONET Networks -Design Methodology," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 12, No. 1, 205-212, 1994.

[25] T.-H. Wu and R. C. Lau, "A Class of Self-Healing Ring Architectures for SONET Network Applications,"

IEEE Transactions on Communications., V.40, No.11, 1746-1756, 1992.
[26] T.-H. Wu, Fiber Network Service Survivability, Artech House, 1992.
[27] T.-H. Wu, D. J. Kolar and R. H. Cardwell, "Survivable Network Architectures for Broad-Band Fiber Optic Networks : Model and Performance Comparison," *Journal of Lightwave Technology*, Vol.6, No.11, 1698-1709, 1988.
[28] T.-H. Wu, "A Passive Protected Self-Healing Mesh Network Architectures and Applications," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.2, No.1, 40-52, 1994.
[29] M. G. Yoon and J. R. Current, "Dual Based Heuristic for Hub Location and Network Design Problem," Working Paper, Dept. of Management Science, Ohio State University, 1996.
[30] M. G. Yoon, On Facility-Network Design for Broadband Communications, Ph.D. Desertation, Deptment of Management Science, KAIST, 1992.
[31] M. G. Yoon, Y. H. Baek and D. W. Tcha, "Optimal Design of a Distributed Fiber Transport Network with Hubbing Topology," *European Journal of Operational Research*, Vol. 104, No. 3, 510-520, 1998.

윤문길(尹文吉)
1981 : 한국항공대학 항공관리학과 (학사)
1984 : 한국과학기술원 경영과학과 (석사)
1992 : 한국과학기술원 (박사)
1984 ~ 1992 : 한국통신 연구원
1992 ~ 현재 : 한국항공대학교 경영학과 부교수
관심분야 : 정보통신 시스템의 최적화 및 경제성 분석,
가입자 망 및 국간 전송망 설계

차동완(車東完)
1969 : 서울대학교 전자공학과 (학사)
1972 : Northwestern University 산업공학과 (석사)
1975 : Northwestern University O.R. (박사)
1998 : 한국경영과학회장
1975 ~ 현재 : 한국과학기술원 테크노경영대학원 교수
KAIST 통신경영/정책 연구센터장
INFORMS(국제경영과학회)
2000 국제 Conference 대회장
관심분야 : 컴퓨터, 통신 시스템 설계 분석,
이동/개인 통신 시스템의 셀 계획