

Design Structure Matrix를 활용한 플랜트 설계의 최적 협업 체계에 관한 연구

윤종이* · 김정환** · 강상혁*** · 서종원****

Yun, Jong Yi*, Kim, Jeong Hwan**, Kang, Sang Hyeok***, Seo, Jong Won****

A Study on an Optimal Plant Design Collaboration System Using a Design Structure Matrix

ABSTRACT : A design collaboration system for a plant project is a set of complicated multidisciplinary processes in which a large number of various engineering fields are involved. Each subsystem is related to each other as they depend on information that other subsystems create, which leads to inefficient design iterations. This study presents an optimal design collaboration system for a plant project using Design Structure Matrix (DSM). Data regarding design subsystems, parameters, etc. were obtained by expert surveys and workshops. An automatic analysis program for DSM was developed using Visual Basic Application and Matlab to provide a partitioned DSM. A case study was conducted on a furnace project; consequently, the optimal design collaboration system with five crucial iteration groups was derived.

Key words : Design Structure Matrix (DSM), Plant Design, Design Collaboration, Crucial Iteration

초 록 : 플랜트 설계는 매우 다양한 공학 분야가 참여하는 고도로 복잡한 시스템이다. 이 방대한 시스템에 관여된 각 서브시스템은 각기 다른 서브시스템과 수시로 정보를 주고 받으며 작업을 반복하게 되는 복잡한 관계를 형성한다. 이런 복잡한 프로세스에서 체계적인 설계 관리는 성공적인 플랜트 설계를 위한 필수적인 요건이다. 이에 본 연구에서는 Design Structure Matrix를 이용하여 플랜트의 최적 설계 협업 체계를 도출하였다. 이를 위해 전문가 설문 및 워크숍을 수행하여 플랜트 설계의 주요 업무, 설계 서브시스템, 설계요소, 관련설계 요소, 그리고 그들간의 관계를 파악하였다. 효율적인 분석을 위해 Visual Basic Application과 Matlab을 이용하여 자동화된 분석 프로그램을 개발하였다. 제안된 방법과 프로그램을 소각로 설계 시스템에 적용한 결과 유효한 주요 반복작업 그룹들을 도출할 수 있었다. 도출된 결과물은 설계 협업 전략 수립에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

검색어 : 디자인 스트럭처 매트릭스, 플랜트 설계, 설계 협업, 주요 반복작업

* 삼성물산 건설부문 부장, 한양대학교 공학대학원 건설관리학 공학석사 (paper1@naver.com)

** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (kimjh0418@gmail.com)

*** 정회원 · 한국건설산업연구원 연구위원 (Corresponding Author · Construction & Economy Research Institute of Korea · shkang@cerik.re.kr)

**** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 부교수, 공학박사, P.E. (jseo@hanyang.ac.kr)

Received January 31 2012, Revised March 12 2012, Accepted October 29 2012

1. 서론

플랜트 EPC(Engineering, Procurement, and Construction) 산업이 크게 발전하고 있다. 2000년대 이후 해외 플랜트 건설시장은 급속히 확장되고 있으며 이 추세는 당분간 지속될 것으로 예상되고 있다. 이와 함께 국내 플랜트 업체들 역시 우수한 플랜트 시공 능력을 바탕으로 한 높은 수주실적으로 호황기를 누리고 있다. 2011년에는 432억 달러의 플랜트 부문 해외 수주액을 기록함으로써 해외건설공사 수주액 591억 달러 중 플랜트 부분이 약 73%를 차지하기에 이르렀다. 한편 점차 발주자의 요구조건이 많아지고 복잡해지면서 건설업체의 품질 및 공정관리를 위한 고도의 기술력이 더욱 요구되고 있다. 따라서 치열한 글로벌 건설시장에서 국내 건설업체들이 경쟁력을 확보하기 위해서는 설계 및 시공 기술력 향상을 위한 지속적인 노력이 이루어져야 한다.

플랜트 산업의 발전을 위한 연구는 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 특히 높은 부가가치 창출효과가 기대되는 설계단계에서의 연구가 활발하게 진행되었다. 구분학과 김태희(2007)는 기본설계 단계에서 사용되는 표준코드의 활용성을 극대화할 수 있는 개선방안을 제시하였다. 또한 설계 능력 향상을 위해 손재호 외(2007)는 설문조사 및 업무별 중요도를 파악하여 성공적인 설계를 위하여 중점적으로 관리되어야 할 17개의 업무를 제시하였으며, 이상엽 외(2008)는 설계 분야별 주요 업무의 체크리스트를 도출하여 설계사례를 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 개발하였다. 국외에서 수행된 플랜트 설계에 관한 연구로는 하수처리 플랜트 설계 단계에서 다양한 입력 변수를 기반으로 유전자 알고리즘을 적용하여 최적 시공비용을 추정하거나(Daniel 외 2001), 하수처리 시설의 동적 프로그래밍(Dynamic Programming) 기법을 이용하여 비용을 산출한 사례(Mhaisalkar, 1995)가 대표적이다.

그러나 이러한 플랜트 산업으로의 시장 확대와 다양한 플랜트 관련 연구에도 불구하고 첨단 기술의 개발과 다학제간의 기술 융합, 지속적으로 대형화·다양화 되는 플랜트 산업의 특성에 의하여 설계 과정에서 발생하는 정보 및 설계 요소간의 복잡한 정보 교환에 따른 업무 혼란이 끊임없이 발생하고 있는 실정이다. 특히 플랜트 설계 프로세스에서 부서간의 협업(Collaboration)의 중요성이 부각되고 있으므로, 설계 정보의 흐름을 통제하고 반복 작업을 최소화 하도록 유도하여 효율적인 설계 시스템을 이끌어 내는 최적의 협업 체계 구성에 대한 엔지니어링 업계의 니즈가 발생되고 있다. 앞서 살펴본 선행연구들은 표준화, 체크리스트, 비용 절감 등의 이슈에 대한 것들이 대부분이고 설계 협업 흐름의 최적화 문제를 해결하는 데에 한계가 있어, 본

논문에서는 최적의 플랜트 설계 협업 체계에 대한 연구를 수행하고자 한다.

이를 위해 먼저 국내의 플랜트 EPC 산업의 현황을 파악하고 설계 협업 체계 도출을 위한 Design Structure Matrix(DSM)에 대한 일반적인 내용과 DSM을 적용한 선행 연구를 조사하였다. 플랜트의 설계 단계는 크게 프로세스(Process & Utility), 기계(Mechanical), 배관(Piping), 설비(Instrument), 전기(Electrical), 토목 및 건축(Civil & Architectural engineering)으로 분류할 수 있는데, 각 분야의 플랜트 설계 회사 및 시공 전문가 설문 및 워크숍을 통하여 설계 서브시스템(Subsystem)과 설계 요소(Parameter)들을 도출하였으며, DSM 활용을 위한 설문 및 워크숍 계획과 설문지 및 분석 프로그램 개발을 수행하였다. 플랜트를 구성하는 서브시스템은 매우 광범위하여 모든 설계 요소를 분석 할 수는 없으므로, 본 연구에서는 비교적 흔한 플랜트 서브시스템인 소각로를 중심으로 최적 설계 협업 체계 구성에 관한 연구를 진행하였다. 조사된 설문 및 워크숍 데이터의 신뢰성 확보를 위한 추가 전문가 검토 과정을 거쳐 조사된 설문 자료를 DSM으로 변환하고, 분석하여 플랜트 설계단계에서 보다 효과적인 협업체계를 도출하였다(Fig. 1).

2. 플랜트 산업 현황 및 설계 업무

플랜트는 기존 건설 분야의 설비(인프라설비, 건축설비, 일반 플랜트) 중에서 엔지니어링과 구매 및 조달(Procurement) 그리고 시공(Construction), 운전(Operation) 및 유지보수(Maintenance) 등의 업무 절차와 연계하여 일괄수행 할 수 있는 설비로 정의할 수 있다. 플랜트 산업은 생산자가 목적으로 하는 원료 또는 중간재, 최종 제품을 제조할 수 있는 생산설비 산업을 뜻하며 제 2차 세계대전 후 중화학공업의 급속한 발전과 더불어 활발히

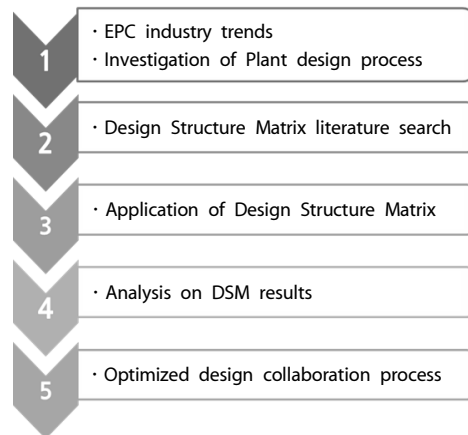


Fig. 1. Research method

전개되었다(박광순 외, 2004). 플랜트 산업의 특징은 크게 복잡한 기술 집약형 물적 시스템, 기술기준서의 산업, 관련기술의 역동적인 조화, 경험과 노하우의 중요성, 고도의 관리기법 등의 요구 등으로 요약할 수 있다.

대부분의 산업설비는 복잡한 구조를 갖는 다종의 다양한 설비 및 장치류가 집합체를 형성하고 있거나 복잡한 구조물과 연계하여 대규모로 시공되는 특성을 가지고 있는 기술 집약형의 복잡한 물적 시스템이다. 그리고 산업설비 건설 산업은 설계서, 절차서, 규격 및 표준서 등에 의해서 대부분의 업무가 수행되고 있어 기술 기준서의 산업이라고 이해하기도 하며, 통상적으로 기술 기준서는 사양(Specification), 규격(Code), 표준(Standard)으로 규정되어 사용된다. 또한 기존 기술과 첨단 기술이 조화를 이루어 역동적으로 발전하는 종합 건설 산업 분야이며, 기존에 건설된 산업설비의 설계 및 운전기록, 기술자의 경험과 경력이 중요한 역할을 하는 산업이다. 이러한 산업 설비분야는 기술자의 경험과 노하우(Know-how)가 중요한 역할을 하는 분야로서 선진 산업설비 건설회사의 선입기술자의 경우 해당 기술 분야에서 20-30년 이상의 경력을 보유하고 있다. 마지막으로 산업설비 건설사업 또한 핵심적인 기술관리 및 전체적인 사업 수행관리의 적절성에 따라 경제적인 건설이 좌우되는 산업으로서 선진업체에서는 산업 설비별 적합한 관리기법 및 도구를 개발하여 공기의 단축과 품질향상, 부가가치 향상 등을 추구하고 있다.

서론에서도 언급하였듯이 현재 해외 플랜트 건설시장은 급속히 팽창하고 있으며 이는 2015년까지 계속될 것으로 예상하고 있다. Fig. 2에 보인 바와 같이 해외 공사 공종별 수주액 중 플랜트 부문이 차지하는 비율은 2010년대 들어서 약 77%로 우리나라 건설 산업에서도 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

플랜트 EPC 업무는 크게 전적 및 계약단계, 설계단계 조달

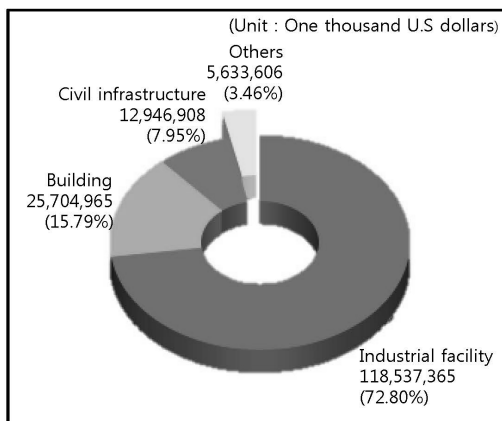


Fig. 2. The Amount of Order of Oversea Construction Project from Jan. 2010 to July 2012. (Courtesy of International Construction Information Service)

및 제작단계, 건설 및 시운전 단계와 같이 4단계로 구분할 수 있다. 플랜트 기본 설계는 대부분 해외 라이선스 업체에 의존하고 있어 이를 실시하지는 못하며 라이선스 업체에서 제작한 FEED(Front End Engineering Document) 및 BEDD (Basic Engineering Design Data)를 바탕으로 상세설계부터 실시하고 있다(손재호 외, 2007). 이를 기반으로 플랜트 상세설계를 진행하며 프로세스 설계, 기계설계, 배관설계, 전기설계, 건축설계, 토목설계 등의 서브시스템으로 구성된다(Fig. 3).

FEED와 BEDD 단계에서는 프로젝트의 기본적인 설명과 법률, 코드, 표준 등을 고려하여 파이프 및 계장(Instrument)을 설계하게 된다. 더불어 프로세스, 유틸리티, Equipment Flow와 Material and Heat Balance 등을 설계하며 이러한 기본 정보는 기계, 전기, 계장, 배관, 건축, 토목 설계 등의 상세 설계 단계에서 활용된다. 이처럼 복잡다양한 플랜트 설계 프로세스는 부서(토목건축, 전기, 제어, 공정, 배관 등)간의 협업을 통해 진행되며 상호 발생하는 정보를 수시로 교환하며 업무를 수행하고 있어 부서간 상호 의존성이 매우 높다. 특히 선행되는 정보가 없을 경우 후행 업무에 큰 차질이 발생하는 경우가 매우 많다. 또한 FEED 및 BEDD를 기반으로 상세설계를 진행하는 과정에서 사업주의 요구사항, 설계자의 단순 실수 혹은 정보 누락 등으로 인해서 수정사항이 끊임없이 발생되고 있으며 이는 플랜트 설계 업무에서 효율성에 가장 큰 영향을 준다고도 할 수 있다. 현재 상황이 이렇다보니 체계적인 업무 프로세스가 구축되어 있지 않은 상황에서 수시로 수정사항이 발생하면서 선행부서의 정보 전송 누락 혹은 후행부서의 최신 정보 관리 소홀 등의 문제가 발생하고 있으며, 설계검증단계에서 이를 확실하게 확인하지 못한다면 실제 시공단계에 미치는 영향은 비용뿐만 아니라 플랜트 EPC에서 매우 중요하게 여겨지는 일정에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 플랜트 설계에서 다양한 업무를 관리할 수 있는 프로세스를 제시할 수 있다면, 해당 업무를 진행함에 있어서 부서간 협업에 큰 도움이 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 복잡한 설계 요소간의 흐름을 직관적으

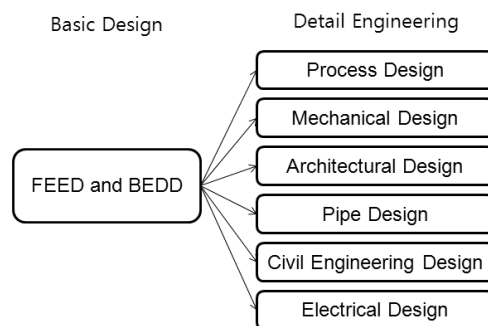


Fig. 3. Plant Design Process

로 파악할 수 있을 뿐만 아니라 최적의 설계 흐름을 분석해주는 DSM 기법을 통하여 플랜트 설계 부문의 협업 체계를 구성할 수 있는지 검토해 보고자 한다. 상세 설계 프로세스에 대한 기술은 매우 복잡하고 연구의 범위에 벗어나므로 본 논문에서는 플랜트 기본 설계 프로세스를 중점적으로 살펴봄으로써 서론에서 언급한 바와 같이, 소각로 설계 프로세스의 DSM을 중심으로 분석을 수행하기로 한다.

3. Design Structure Matrix의 개념 및 적용

앞서 살펴본 바와 같이 플랜트 설계의 프로세스 및 그 설계 시스템은 다종의 복잡하고 다양한 구조물을 하나의 모듈 결과체로 구성하기 위하여 타 산업 설계에 비하여 보다 빠르고 정확한 설계를 요구하고 있다. 본 연구에서는 DSM을 적용하여 플랜트 설계에서의 각 요소별 최적의 설계 협업 체계를 도출하기로 한다.

DSM은 하나의 시스템을 표현하는 방법이다. DSM 표현 방법은 30여 년 전에 개발되었으며, 이후 MIT, 하버드 대학교, 일리노이 대학교를 비롯한 여러 곳의 연구팀들이 복잡한 시스템의 분석에 DSM을 실제적으로 적용하는 연구를 하면서 사용법이 발전해 왔다. DSM은 주공정법이나 PERT 기법에서 표현이 불가능한 반복 순환 작업의 표현이 용이하다는 장점이 있어 보통의 건설공사에서 사용되기 보다는 설계 요소간의 의존관계가 복잡한 항공, 전자, 기계 산업에서 널리 이용되어 왔다. 건설 분야에서는 특히 공정관리 및 프로세스 개선을 위한 연구에 많은 노력이 기울어져 왔다. 특히 기존 설계 방식의 결점을 보완하기 위한 연구가 많았다. Chen 외(2003)는 협업이 요구되는 프로젝트의 공정관리를 위하여 DSM에 기반한 프로젝트 공정관리 프레임워크를 제시하였고, 제시된 방법을 통해 프로젝트가 보다 효과적으로 모니터/통제될 수 있음을 확인하였다. Fayes 외(2003)는 공정관리 기법으로서의 DSM과 주공정법(CPM)

을 다양한 시각에서 분석한 후, 기존에 CPM에서 해결하지 못하던 문제들을 DSM으로 해결하고자 하는 연구를 수행하였다. Maheswari 외(2006)와 장세훈 외(2007) 또한 공정관리기법 한계 극복의 일환으로 DSM을 공정관리에 도입하여 적용성을 평가하고 활용 방안을 제시하였다. 김찬목과 박영원(2008)의 연구에서는 Product Breakdown Structure (PBS)를 구축하기 위해 DSM을 적용하여 보다 타당한 PBS를 찾았다. 박문서 외(2010)는 DSM을 이용하여 프로젝트 관리자가 설계과정에서 시공성 지식을 효과적으로 활용할 수 있도록 하였다.

Fig. 4(a)는 DSM을 설명하기 위한 가장 기본적인 개념으로서, 각 서브시스템간의 상호관계를 나타내는 세 가지 방법을 도식적으로 보여준다. 첫째 병렬구조(Parallel)는 두 서브시스템이 상호 순차 관계없이 병렬적으로 진행되는 것을 나타내고, 순차구조(Sequential)는 하나의 서브시스템이 종료되어야 다른 서브시스템이 시작될 수 있는 순차적 구조를 나타낸다. 마지막으로 순환구조(Coupled)는 두 서브시스템이 정보를 서로 교환하는 상호의존적인 관계이다. 즉, 순환구조의 경우 요소간의 정보가 계속 반복순환되다가 어느 순간 완성이 되면 반복작업 루프에서 빠져나와 다음의 순차로 넘어가는 형태로 진행된다. Fig. 4(a)와 같이 매트릭스 상에 상호 의존도만을 표현하는 DSM을 Binary DSM이라고 하며, DSM의 구성하기 쉽고 해석이 간편하여 분석에 자주 사용되는 형태이다. Fig. 4(b)는 각 서브시스템의 의존 정도를 표현해 줄 수 있는 일반화된 DSM의 형태이다. 매트릭스의 1열을 통해 모듈 A는 모듈 C에 '7'의 의존성 세기(dependency strength of '7')로 의존적이라는 것을 알 수 있다. Austin 등(2000)의 건축 설계 프로세스에 대한 분석과 Yassine 등(1999)의 공학 설계 관리 시스템 등의 연구에서 의존도 세기를 활용하여 DSM을 구성한 사례가 있으나, 대부분의 DSM 관련 연구에서는 Binary DSM을 활용하고 있다.

일반적인 플랜트 설계에서와 같이 Fig. 5(a)와 같은 설계 데이터의 흐름이 발생한다고 가정해 보자. 단각 요소별 가중치

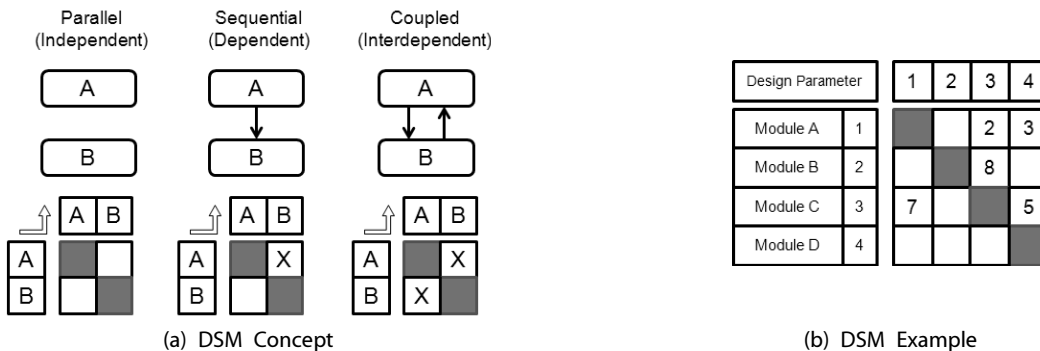


Fig. 4. Basic Concept of DSM

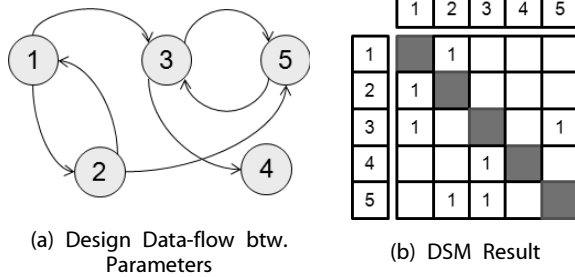


Fig. 5. DSM Application Example

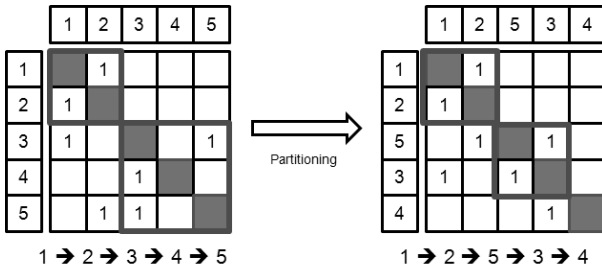


Fig. 6. DSM Partitioning

는 모두 동일하므로 ‘1’로 설정하고, Fig. 5(a)를 DSM으로 변환하면 Fig. 5(b)와 같게 된다. 대각행렬을 기준으로 위쪽에 위치한 ‘1’은 결과값이 되돌아가는 과정, 즉 순환이 되는 과정이며, 대각행렬을 기준으로 아래쪽에 위치한 ‘1’은 결과값이 보통의 순서에 따라 진행되는 정상적인 상태를 의미한다. Fig. 5의 예시를 바탕으로 DSM 재배열에 대한 내용을 설명하고자 한다.

3.1 DSM의 재배열(분할 알고리즘)

앞서 설명한 바와 같이 설계요소간의 의존관계에 대한 정의가 완료되면 DSM을 재배열(Partitioning)하는 핵심적인 프로세스를 거치게 된다. 이는 DSM의 행(Row)과 열(Column)의 순서를 최소한의 상호의존적 관계를 갖도록 함으로써 불필요한 반복적 작업을 줄이고 최적의 설계 순서를 구성하는데 그 목적이 있다. 앞서 Fig. 5의 예시에서 1, 2, 3, 4, 5의 설계 흐름을 가지는 DSM을 살펴보면 대각행렬의 위쪽에 위치한 순환 구조는 1, 2와 3, 4, 5가 있으나 이를 1, 2, 5, 3, 4의 순서로 재배열한다면 상호의존적 설계요소는 1, 2와 3, 5로 순환적 설계요소의 크기와 그 개수가 줄어들게 된다(Fig. 6). 이를 다시 설명하면, 협업 체계(또는 설계의 흐름)가 구성되지 않을 경우 4번 작업이 3번과 5번의 순환 구조내에 포함되어 불필요하게 3번 작업이 반복될 때 마다 4번 작업을 다시 수행해야 하는 매우 비효율적 흐름이 발생하게 되는 것이다. 따라서 DSM 재배열시 대각행렬 상단에 위치한 마크를 대각행렬 하단이나, 최대한 대각행렬에 가깝게 배치시킬 수 있도록 매트릭스내 설계 요소들을 재배열하

Table 1. Survey Template

No.	Design subsystem	Code	
1	Geotechnical design	G	
2	Road alignment design	R	
3	Structural Design	S	
:	:	:	
No.	Design elements	Code	Related design elements
1	Geotechnical survey data	G	2
2	Horizontal gradient	R	1
3	Cross-sectional views of the analytical data	S	1,2
:	:	:	:

는 것이 설계 요소를 가장 효율적으로 처리함과 동시에 최적의 설계 협업 체계를 구성하는 것이다.

DSM을 재배열하는 과정에서 사용할 수 있는 알고리즘은 다음의 4가지가 있다. 1) Path Searching(Gebala, 1991), 2) Powers of the Adjacency Matrix Method, 3) The Reachability Matrix Method(Warfield, 1973), 4) Triangularization Algorithm 이 있으며, 본 논문에서 이들에 대한 상세한 이론은 지면의 제약상 다루지 않는다. 이중에서 수학적으로 단순하고 프로그래밍이 쉬워 가장 널리 사용되고 있는 ‘Powers of the Adjacency’ 방법을 이용하여 DSM 재배열을 수행하기로 한다.

3.2 DSM 적용을 위한 설문

플랜트 설계의 DSM 구축을 위한 설문을 위해 MIT 설문조사 양식(Lindemann 외, 2009)을 분석한 후, 설문조사 양식 및 설문방법을 결정하였다. MIT에서 제안한 인터뷰 템플릿에는 크게 1) 설계 요소간 의존관계, 2) Interaction 주기, 3) Interaction 타입과 강도(의존 관계의 경중을 파악할 수 있도록 -2부터 +2까지의 5점 척도로 표현)가 있으나 1)을 제외한 나머지 두 가지는 DSM 구성을 위한 필수적인 요소가 아니므로 본 연구에서는 이를 제외한 Binary DSM 모델을 사용하였다. 설문지의 구성은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 1) 설계 서브시스템과 코드의 도출 및 정의와 2) 설계 요소에 대한 정의와 설계 요소간의 상호 의존 관계로 구분되며 Table 1과 같이 설계 서브시스템 및 설계요소와 관련설계요소들에 대한 내용이 정리된 설문조사 시트를 만들었다.

4. DSM 분석 및 최적 설계 협업 체계 도출

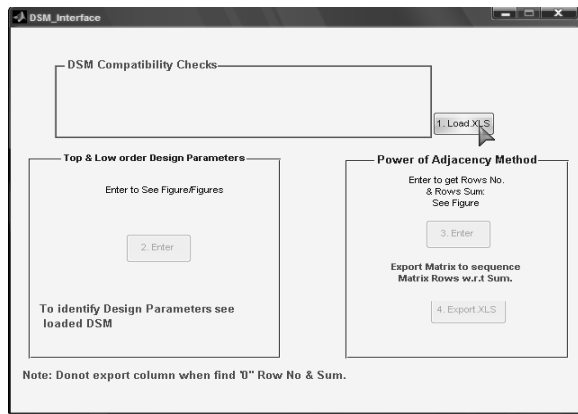
4.1 분석 프로그램 개발

DSM은 설문조사와 전문가 워크샵을 통해 얻어지며, 플랜트

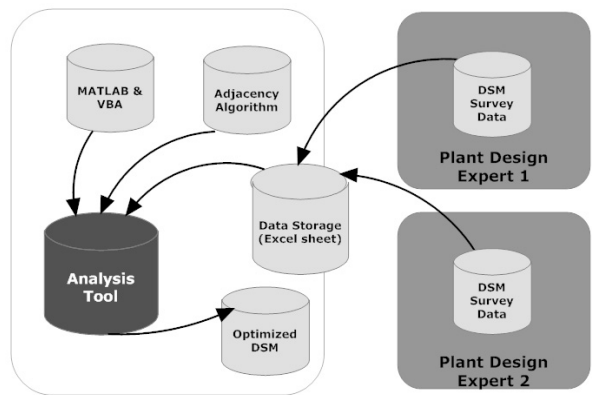
의 설계 프로세스에서 살펴본 바와 같이 플랜트 설계를 구성하는 요소는 상당히 많이 존재한다. 이를 수동적으로 분석하기에는 많은 시간과 노력이 소요되기 때문에 본 연구에서는 Matlab™과 VBA(Visual Basic for Applications) 매크로 언어를 이용한 자동 분석 프로그램을 개발하였다(Fig. 7(a)). Fig. 7(b)와 같은 프로그램 구조 설계를 바탕으로, 스프레드시트 형태로 정리된 DSM 초기 데이터를 분석 프로그램으로 로드한 후, Power of Adjacency 알고리즘을 이용하여 DSM 데이터를 재배열하고 최적 설계 협업 체계에 대한 결과값 도출한다. 그리고 그 결과값을 그룹화하여 스프레드시트 형태로 저장하여 결과를 확인 할 수 있도록 하였다. 보편적으로 사용되고 있는 MS Excel의 데이터 형식을 입·출력하는데 사용하도록 하였으며 Matlab의 인터페이스 화면에서 처리되도록 분석 프로그램을 개발하였다.

4.2 DSM 분석을 위한 설문 및 워크샵 결과

Table 1의 설문조사 양식을 바탕으로 S社의 플랜트 설계팀 전문가 4인에게 플랜트, 특히 소각로를 대상으로 설계 서브시스템, 설계요소, 그리고 그와 관련된 설계요소에 대한 설문과 워크샵을 실시하였다. 설문을 실시한다고 해서 평균값과 같은 일반적인 기술적 통계치가 DSM에 사용되는 것은 아니고, 텔과 이 분석과 같이 먼저 설문을 통하여 전문가 각 개인이 생각하는 서브시스템, 설계 요소들을 정의한 뒤, 이를 기반으로 4인의 워크샵을 통해 서로 공개하여 상호 의견을 수렴하는 용도로써 활용된다. 위의 조건에 맞추어 Table 2와 같이 소각로에서의 설계요소, 설계 서브시스템, 그리고 관련설계요소들을 도출하였다(단, Table 2의 최적설계협업흐름은 지면 관계상 5.3절의 결과를 포함하고 있는 것으로 DSM 도출 결과와는 무관함). 소각로를 구성하는 총 8개의 서브시스템과 74개의 설계 요소들



(a) Analysis Program Interface



(b) System Structure of Analysis Program

Fig. 7. DSM Analysis Program

Table 2. Design Parameter/Related Design Parameter and Analysis of DSM (Optimal Design Collaboration)

No.	Design elements	Code*	Related design elements	Optimal design collaboration system	No.	Design elements	Code	Related design elements	Optimal design collaboration system
1	Traffic	O		(1)1	38	Review of consolidation settlements	C	37	(3)23
2	Weather	O		(1)2	39	Structure foundation design	C	37,46	(3)24
3	Waste characteristics	O		(1)3	40	Review of slope stability	C	30,37	(12)59
4	Calorific value calculation	P	3	(2)14	41	Storm drain design	C	2,30	(12)60
5	Combustion amount of air	P	3,58	(2)10	42	Waste pipe design	C	30,32,52	(12)61
6	Combustion amount of gas	P	3	(2)15	43	Water pipe design	C	30,36,52,54	(11)57
7	SNCR reductant requirements	P	6	(4)29	44	Packing section calculation	C	1,2,30	(12)62
8	Semi-dry reaction tower of slaked requirement	P	7	(4)28	45	Chimney design	A	26,37,59	(8)46
9	Activated carbon spraying water	P	8,31	(5)31	46	LOAD data	A	30	(1)9

10	SCR reductant requirements	P	9	(6)37	47	Incinerator structural plan	A	46,55	(2)12
11	Incinerator flooring amount	P	3	(2)16	48	Incinerator structural design	A	46	(2)18
12	waste heat particulate	P	11	(3)21	49	Design conditions (Indoor/Outdoor conditions)	E	2	(2)19
13	Semi-dry reaction tower of particulate	P	12,8	(5)32	50	Aggregated heating and cooling loads of building	E	47,49	(3)25
14	Equation for filtration dust collector particular	P	13,9	(6)38	51	Cooling and heating equipment selection	E	50	(4)30
15	incinerator heat balance	P	3,4,5,6,11	(3)22	52	Hygienic equipment design	E	47,51	(5)34
16	SNCR heat balance	P	6,7,15	(4)29	53	Ventilation equipment design	E	33,47,51	(5)35
17	Boiler heat balance	P	7,16	(5)33	54	Fire protection design	E	47,51	(5)36
18	Semi-dry reaction tower of heat balance	P	8,17	(6)39	55	Import and supply facility design (Reservoir, Crushers, Cranes)	M	3,47	(2)13
19	Equation for fabric filters heat balance	P	9,14,18	(7)42	56	Incineration facility design (Incinerator, operation/auxiliary burner)	M	3,5	(3)26
20	Gas heater steam expressions heat balance	P	19	(8)47	57	Combustion gas and cooling equipment design	M	22,23,24	(9)50
21	SCR heat balance	P	10,20	(9)51	58	Air supply and exhaust equipment design (Indentation blowers, Induced draft fan, air preheater)	M	5	(2)11
22	Boiler steam generation	P	7,17	(6)40	59	Chimney design (High,Inner diameter)	M	2,3,10,58	(7)43
23	Air preheater, gas burner, other equipment steam consumption	P	5,20,57	(9)48	60	Reprocessing facilities	M	11,12,13,14	(7)44
24	Venting resin calculations	P	22,23,57	(9)49	61	Water supply and drainage facilities design (Tanks, pumps, Cooling towers, Pure water / Wastewater)	M	25,43,57	(11)58
25	Tanks and cooling heat balance calculations	P	24	(10)52	62	Wastewater treatment plant design	M	30,32,42,61	(13)64
26	Odor and atmospheric diffusion simulation	P	2,14,31,45,59	(8)45	63	Other utilities design	M	56,57,58,60,61	(12)63
27	Noise simulation	P	30,55,57,58,60,51	(11)53	64	Calculation of load capacity	I	52,53,54,55,56,57,58,60,61,62,63	(14)65
28	Facility operating expenses calculation	P	17	(6)41	65	Transformer capacity calculation	I	34,64	(15)67
29	Flow planning	P	1,26,27	(11)54	66	Emergency generator capacity calculations	I	64	(15)68
30	Development Placement decision	P	29	(11)55	67	Uninterruptible power supply capacity calculation	I	64	(15)69
31	Deodorization methods selected	P	3	(1)4	68	Direct current power supply capacity calculation	I	64	(15)70
32	Wastewater treatment process selection	P	3,58	(1)5	69	Capacity calculation for power factor improvement capacitors	I	64,65	(16)71
33	Heating and cooling equipment design	P	3	(1)6	70	Short-circuit current calculations	I	64,65	(16)72
34	Switchboard type selected	P	6	(1)7	71	Voltage drop calculations	I	64,65	(16)73
35	Exhaust gas analysis and facility design	P	7	(1)8	72	Building electrical calculations	I	47	(3)27
36	Landscape design	L	30	(11)56	73	Grounding calculations	I	65,37	(16)74
37	Geotechnical investigation	C	46	(2)17	74	Instrumentation and control equipment plan	I	35,47,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63	(14)66

* O : Owner, P : Process design, C : Civil infrastructure design, L : Landscape design, A : Architectural design, E : Construction equipment design, M : Mechanical design, I : Electrical, instrumentation design

이 도출되었으며 관련 설계 요소에는 해당 프로세스를 진행함에 있어 요구되는 정보들을 번호로 기입해 놓았다. 가령, 5번의 연소 공기량에 관한 설계를 위하여 3번의 폐기물 성상 데이터와 58번의 급배기 설비 설계가 필요한 것으로 해석할 수 있다.

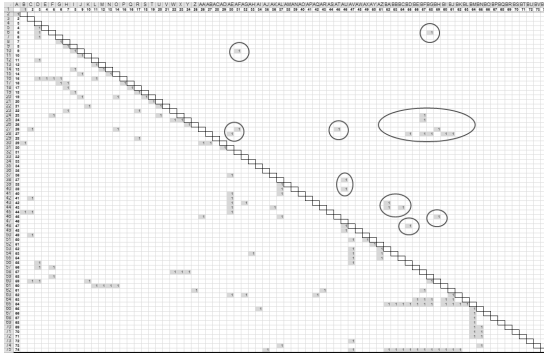
4.3 DSM 분석 및 신뢰성 검토

최적의 설계 협업 체계를 도출하기 위하여 설문조사와 워크샵을 통해 취득된 데이터를 DSM 형태로 변환할 필요가 있으므로 Table 2의 데이터를 바탕으로 Fig. 8(a)와 같이 초기 DSM으로 모델링하였다. 1번부터 순차적으로 설계를 진행하는 경우를 초기 DSM 모델링 가정사항으로 한다. 초기 DSM은 대각행렬 상단에 20개의 반복 작업이 발견되었으며 또한 대각 행렬로부터 비교적 먼 거리에 위치하고 있으므로 초기 DSM의 순차대로 설계를 진행한다면 대단히 비효율적임을 확인할 수 있다. 특히 3번 연소 공기량과 58번 급배기 설비의 경우 그 정도가 매우 심하여 설계의 순차가 재정렬 되지 않는다면 이들 사이에 연결된

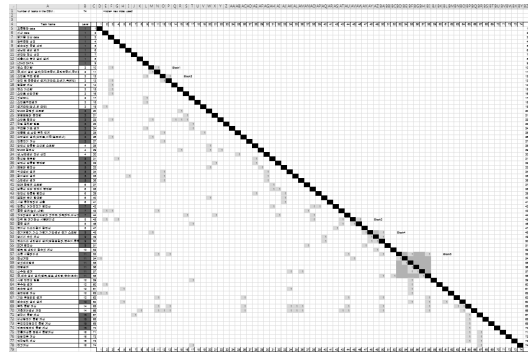
모든 설계 요소들의 재작업 또는 설계 검토 등이 이루어져야 하는 상황이다.

이러한 비효율적 협업 체계를 분석하고자 본 연구에서 개발한 분석 프로그램에 초기 DSM을 대입하여 ‘Power of Adjacency’ 알고리즘을 통해 설계 흐름을 재배열하여 분할함으로써 순환구조가 최소화 되어 반복 작업을 줄인 DSM을 얻을 수 있었다(Fig. 8(b)). 상세한 설계 협업 체계 및 흐름은 Table 2의 5번째, 10번째 열의 순서를 통해 확인할 수 있다. 분석 결과 또한 설계 요소 순서대로 16개의 그룹을 구성하여 소각로 설계 프로세스를 효과적으로 관리할 수 있도록 구분하였다(Table 2의 괄호 안의 숫자로 표현).

초기 DSM과 비교하였을 때, 대각행렬 상단에 위치한 마크의 수가 기존 20개에서 재배열 이후 7개로 현저히 감소하였으며 총 5개의 순환 구조가 발생하였다. 그 위치 또한 대각행렬의 주변에 밀집하게 결과값이 도출되었으므로 초기 DSM보다 반복되는 설계 요소가 현저히 줄어들었음을 확인할 수 있었다.



(a) First DSM



(b) DSM after partitioning



(c) Crucial Iteration A, B



(d) Crucial Iteration C, D



(e) Crucial Iteration E

Fig. 8. Result of DSM for Furnace Design and Crucial Iterations

또한 순환·반복 작업 루프의 크기가 줄어들어 빠른 시간 내에 부서간 정보를 교환하고 다음 설계 단계로의 정보 전달이 가능해진다. 기존의 구조화 되지 않은 플랜트 설계의 흐름과 부서간의 협업체계를 순차 재배열을 통하여 최적화 할 수 있어 보다 효율적인 설계가 가능해 질 것이다. 분석된 DSM에서 가장 주의해야 할 부분은 Fig. 8의 (c), (d), (e)와 같은 순환구조의 설계 요소들에 대한 관리이다. 순환적인 설계 요소 흐름에서 최대한 빠르게 루프에서 벗어나 설계를 완료 하는 것이 중요하므로 이를 주요 반복 작업(Crucial Iteration)으로써 프로젝트 관리자가 특별히 관리해야 한다.

DSM 분석 후에는 결과에 대한 신뢰성을 판단하여야 한다. 데이터의 신뢰성은 분석된 결과를 전문가가 다시 검토하여 초기 DSM을 구성할 때 발생할 수 있는 관련 설계 요소 설정에서의 실수가 있었는지 확인해 보아야 한다. 특히 효율적인 설계 관리를 위하여 중점적으로 제어해야 하는 주요 반복 작업은 관리적 측면의 중요성이 매우 높기 때문에 필수적으로 이들 설계 요소간의 의존관계가 올바르게 설정되어 있는지 실제적 유의성을 판단할 필요가 있으며 이를 통해 초기 DSM 데이터의 무결성과 최적 설계 협업 체계의 적합성을 확인할 수 있게 된다. 주요 반복 작업 이외에도 독립적/순차적인 다른 설계 요소들에 대한 검토도 이루어질 필요가 있으나 본 논문에서는 지면 관계상 주요 반복 작업 이외의 설계 요소들에 대한 검토 내용은 제외하기로 한다. 신뢰성 검토에는 앞서 언급한 설계 전문가 4인이 참여하여 피드백 의견을 바탕으로 신뢰도를 검증하였다.

Fig. 8(c)의 반복작업 A를 살펴보면, 연소 공기량에 따라 급배

기 설계에서의 컴프레서, 덕트(duct)와 같은 설비들의 용량이 결정되고 완전 연소를 위한 추가 공기량 산정 등에 영향을 줌으로써 상호 의존적임을 확인할 수 있다. 반복작업 B에서는 반입 및 공급 설비는 그 성능, 중량 등이 다르며 크게 높은 형태의 수직형(Vertical), 넓은 영역을 차지하는 수평형(Horizontal) 타입으로 나뉘는데, 설비의 크기에 따라 회전반경 및 높이가 달라진다. 이에 따라 출입문의 크기, 여유 공간 크기 등과 같은 건축설계에서의 구조 평면 설계가 이루어지며 이는 반입 및 공급설비 설계에 영향이 있으므로 반복 작업됨을 확인할 수 있다.

Fig. 8(d)의 반복 작업 C는 환경에 관련된 내용으로 굴뚝 설계시 주변 주거환경 등을 고려, 굴뚝 높이에 따른 악취 및 대기확산 시뮬레이션을 실시하며 시뮬레이션 결과에 따라 굴뚝 설계 값에 영향을 주는 상호 의존적 관계임을 알 수 있다. 반복 작업 D에서, 소각로는 폐기물을 소각하여 얻어지는 열을 활용하고 발생하는 가스는 배기가스 허용 기준치 이내로 배출하는 설비이기 때문에 열을 얻는 방법은 일반적인 보일러와 연소 가스의 열을 회수하여 얻는 방식을 통상적으로 사용하게 된다. 이때에 부식성 가스(이산화황, 이산화탄소) 제거를 위한 탈기기는 연소가스의 냉각설비의 값을 따르도록 되어 있다. 연소가스의 온도를 통상 220도까지 낮추는 설비가 냉각설비이고 냉각과정에서 발생된 폐열로 증기를 생산하며(결국 증기소모량을 고려 냉각설비 설계가 고려되어야 함), 연소가스의 온도와 양은 결국 공기에열기, 가스가열기 등의 용량에 따라 결정되므로 3가지 설계요소는 상호 연관되어 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로 Fig. 8(e)의 반복 작업 E의 5가지 설계 요소를

Table 3. Crucial Iteration in Furnace Design

Type	Design subsystem	Design elements
Major repetitive tasks A	Process design	Combustion amount of air
	Mechanical Design	Air supply and exhaust equipment design (Tanks, pumps, Cooling towers, Pure water / Wastewater)
Major repetitive tasks B	Architectural Design	Incinerator Structural Plan
	Machinery	Import and supply facility design
Major repetitive tasks C	Process design	Odor and atmospheric diffusion simulation
	Architectural Design	Chimney design
Major repetitive tasks D	Process design	Air pre-heater, gas heater, other equipment, steam consumption
	Mechanical Design	Venting equipment resin calculations Combustion gas and cooling equipment design
Major repetitive tasks E	Process design	Noise simulation
		Flow planning
		Development Placement decision
	Landscape Design	Landscape design
	Engineering design	Water pipe design
	Mechanical Design	Water supply and drainage facilities design (Tanks, pumps, Cooling towers, Pure water / Wastewater)

살펴보면, 소각장내에서 단지배치 계획에 따라 주변지역의 소음 전달정도 등이 결정되고 폐기물 반입차량의 동선이 결정되며 조정 및 상수관설계가 이루어진다. 즉 소각로에서 필요한 생활용수, 공정수, 순수, 냉각수, 재순환수 등의 공급 및 처리가 단지 내 기계설비의 배치(거리, 양정 등) 상태를 고려하여 설계되어야 한다. 그리고 단지배치 및 탱크, 펌프, 냉각탑 등의 조건에 따라 소음 시뮬레이션을 실행하여야 하므로 설계요소간의 상호 의존성이 존재하므로 본 연구에서 수행한 소각로 DSM의 분석 및 최적 설계 협업 체계가 신뢰성이 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

최근 ENR 자료(2011년 8월 29일)에 따르면 국내 상위 6개 업체의 해외 매출 중 약 80%(Power, Industrial/Petrochemical facilities)를 포함한 수치가 플랜트 관련 사업영역으로 나타났다. 또한 이런 추세는 당분간 계속될 것으로 예상되었고, 이런 시점에서 보다 효율적인 플랜트 설계 협업 체계를 도출하는 연구는 매우 시의적절한 것으로 판단된다. 이에 본 논문에서는 전문가 설문 및 워크숍을 통해 설계 서비스시스템, 설계요소, 그리고 그와 관련된 설계요소 등의 데이터를 수집하여 설계정보의 흐름 분석을 수행하였다. 이때 프로세스 관계의 구조적인 분석을 위하여 DSM 기법을 도입하였고, 그 결과 플랜트의 한 모듈인 소각로 설계에 있어 보다 합리적인 협업 설계 체계를 도출할 수 있었다. 본 연구방법은 소각로 시설과 유사한 타 분야의 복잡한 설계 단계에도 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 단, 결과의 타당성을 입증하기 위한 도구 및 장치의 개발은 본 연구에 뒤따라야 할 추가적인 연구로 판단된다.

소각로를 대상으로 한 DSM 분석 결과 소각로 설계요소간의 관계는 대부분 반복 작업 없이 순차적으로 진행되는 형태를 띠는 것으로 분석되었다. 주요 반복 작업은 총 다섯 그룹이 발생하며, 모두 설명이 가능한 유효한 분석 결과를 보였다. 소각로의 경우 여느 플랜트와는 달리 다소 단순화된 프로세스를 갖기 때문에 DSM 분석 시 재배열과 분해에 많은 노력이 요구되지는 않았으나 보다 복잡한 플랜트의 설계 프로세스에서는 이와 같은 구체적인 분석이 수반될 것으로 예상된다.

References

- Austin, S., Baldwin, A., Li, B., and Waskett P. (2000) Analytical design planning technique (ADePT): a dependency structure matrix tool to schedule the building design process, *Construction Management and Economics*, Vol. 18, Issue 2. pp. 173-182.
- Chen, C.H., Ling, S.F., and Chen, W. (2003) Project scheduling for collaborative product development using DSM, *International Journal of Project Management, International Journal of Project Management*, Vol. 21, No. 4, pp. 291-299.
- Daniel H.L., Troy A.D., Joel J.D., and Francis L. de los Reyes III (2001) System-Wide Optimization of Wastewater Treatment Plants Using Genetic Algorithms, *Proceedings of the 2001 World Water and Environmental Resources Congress*, held in Orlando, Florida, May 20-24.
- Fayez, M., Axelsson, P., Oloufa, A.A., and Hosni, Y. (2003) DSM vs CPM: Issues for planning design & construction activities, *ASCE, Proceedings of Construction Research Congress 2003*, New York, pp. 1-8.
- Gebala, D. A., and Eppinger, S. D. (1991) Methods for analyzing design procedures, *the Proceedings of 3rd International ASME Conference on Design Theory and Methodology*, Sep. 22-25, 1991, Miami, FL., pp. 227-233.
- Gu, B. H., Kim, T. H. (2007) Application System Improvement of the Codes and Standards for Plant Design, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 8, No 2, pp. 81-89.
- Jang, S., Park, M., Lee, H. (2007) A Study on Schedule Management in Construction Project Using the Dependency Structure Matrix, *Proceeding of Korean Institute of Construction Engineering and Management*, pp. 682-686.
- Kim, C. M., Park, Y. W. (2008) PBS Construction by Using DSM, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No.1, pp. 26-32.
- Lee, S., Son, J., You, Y., Han, C., Development of Engineering Checklist Model for Case-based Evaluation of Plant EPC Project, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 9, No. 3, pp. 146-152.
- Park G. S. (2004) *A study on development strategy for plant industry to achieve the amount of order of 30 billion dollar*, Korea Institute for Industrial Economics & Trade.
- Park, M., Ham, Y., Lee, H., Kim, W., (2010) Development of Design Process Management Model using Dependency Structure Matrix for Constructability, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 11, No. 5, pp. 65-74.
- Mhaisalkar V., Bassin J., Paramasivam R., and Khanna P. (1993) Dynamic Programming Optimization of Water-Treatment-Plant Design, *J. Environ. Eng.*, Vol. 119, No. 6, pp. 1158-1175.
- Lindemann U. Maurer U., Braun, T. (2009) *Structural Complexity Management*, Berlin, Springer, 2009.
- Son, J., Lee, S., Han, C., Kim, J., (2007) A Study on the Critical Success Factors for Engineering Step on Plant Project, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 8, No. 6, pp. 227-234.
- Warfield J. N. (1973) Binary matrices in system modeling, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 3, No. 5, pp. 441-449.
- Yassine, A. A., Falkenburg, D., Chelst, K. (1999) Engineering design management: an information structure approach, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 13, pp. 2957-2975.