

시나리오 모델을 활용한 수요 및 가격 불확실성이 존재하는 TFT-LCD 산업에서의 robust 생산 및 수송계획

신현준*, 유재필*

*상명대학교 경영공학과

e-mail:hjshin@smu.ac.kr

Robust production and transportation planning for TFT-LCD industry under demand and price uncertainties using scenario model

Hyun Joon Shin*, Jae Pil Ru*

*Dept of Management Engineering, Sangmyung University

요약

본 연구는 가격 및 수요 불확실성하의 강건한 (robust) 생산 및 수송 전략을 수립함으로써 수요 및 가격 불확실성이 존재하는 TFT-LCD 제조업 공급사슬망의 의사결정 문제를 해결하고자 한다. 품질로 구분되는 제품들의 생산, 재고 및 물류에 관한 의사결정을 조정하기 위해, 본 연구에서는 생산용량 제약, 해상/항공 수송 리드타임 및 용량 제약 등의 현실적인 제약조건들 이외에 시나리오 모델을 이용하여 수요 및 가격 불확실성을 함께 반영하는 확률적 혼합정수선형계획법모형들을 개발한다. 또한 이들 모형들의 효율적 솔루션을 위해 제안한 휴리스틱 알고리즘의 성능을 평가하도록 한다.

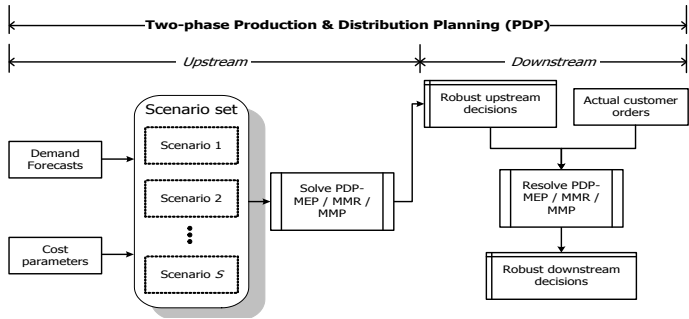
1. 서론

TFT-LCD 제조업의 주요 특성은 2단계의 하이브리드 생산체인이라는 데 있다. 일반적으로 TFT-LCD 하이브리드 생산체인은 upstream의 Array-Cell 단계와 downstream의 Module 단계로 구분될 수 있다. 생산 및 수송계획을 한층 더 어렵게 하는 TFT-LCD 생산체인만의 독특한 특징들이 있는데, 제품의 품질등급, alternative BOM, 가격변동성, 그리고 복수 시설 간의 물류 등이 이에 해당한다. TFT-LCD 제품들의 품질등급은 생산 공정의 수율과 고객이 요구한 맞춤형 규격 등으로부터 기인한다. Alternative BOM은 서로 다른 부품업체로부터 공급받는 주요 부품 또는 서로 다른 품질 등급의 Cell Glass 패널들을 이용하여 완제품을 제조하기 위해 TFT-LCD 생산체인에서 반드시 필요하다. 그러나 이것이 다양한 제품군과 제품구조의 요인이 되어 생산 및 분배계획 (PDP) 문제의 복잡도를 한층 증가시킨다. 실제로 고객 맞춤형과 제품의 품질등급은 TFT-LCD 산업의 높은 가격불확실성 및 수요불확실성의 주된 원인으로 알려져 있다. 본 연구에서 고려하고자 하는 가격 및 수요 불확실성은 전통적인 PDP 문제들에 대한 기존 연구들에서 찾아볼 수 없는 주요 특징이다. 전통적인 PDP 문제는 총비용의 최소화 또는 수요 불확실성 하에서 생산-수송 네트워크의 최적화에만 초점을 맞추고 있으나, TFT-LCD 산업에 존재하는 가격 변동성을 고려하지 못하고 있다. 본 연구는 가격 및 수요 불확실성하의 강건한 (robust) 생산 및 수송 전략을 수립함으

로써 이와 같은 문제를 해결하고자 한다. 품질로 구분되는 제품들의 생산, 재고 및 물류에 관한 의사결정을 조정하기 위해, 본 연구에서는 생산용량 제약, 해상/항공 수송 리드타임 및 용량 제약 등의 현실적인 제약조건들 이외에 시나리오 모델을 이용하여 수요 및 가격 불확실성을 함께 반영하는 확률적 혼합정수선형계획법모형들을 개발한다. 또한 이들 모형들의 효율적 솔루션을 위해 제안한 휴리스틱 알고리즘의 성능을 평가하도록 한다.

2. Robust 생산 및 수송 계획 알고리즘

TFT-LCD 생산체인에서는 서로 다른 생산 단계 및 수송 방식에 따라 리드타임상의 매우 큰 차이가 발생한다. 예를 들어 Module 조립과 항공 수송에 비해 Array-Cell 단계와 해상 운송은 상당히 긴 리드타임을 필요로 한다. 이와 같이 생산 및 수송 단계별 리드타임의 변화가 크고, 제품 품질등급에 따른 수요와 가격 불확실성이 존재하는 TFT-LCD 생산체인의 효율적인 PDP 의사결정 수립을 위해, <그림 1>과 같은 2단계 PDP 시스템 프레임워크의 개발이 필요하다.



[그림 1] 2단계 생산 및 분배 계획 (PDP) 시스템 프레임워크

이 프레임워크의 첫 번째 단계에서 얻어지는 의사결정은 Array-Cell 생산 및 해상 운송 의사결정 수립에 해당하고, 예측된 수요와 가격 정보를 기반으로 이루어진다. 따라서 첫 번째 단계에서는 모든 가능한 시나리오를 계획수립 시 고려하여 추후 어떤 시나리오가 발생하더라도 받아들여질 수 있는 robust 의사결정 결과를 도출하여야 한다. 두 번째 단계에서는 일정시간 경과 뒤 실제 고객주문이 수주되어 수요와 가격의 불확실성이 사라지면, Module 조립과 항공 수송에 관련된 의사결정들을 이익을 향상시키는 것을 목표로 재조정한다. 이 때 첫 번째 단계에서 결정한 결정변수는 고정되어 변경할 수 없고 두 번째 단계에 해당되는 변수들만을 확정된 시나리오 하에서 재 계획한다. 또한 첫 단계인 Array-Cell 제조공정에서 발생하는 수율로 인한 제품 등급은 alternative BOM의 형태로 두 번째 단계에서 고려해야 한다.

2.1. 수요 및 가격 불확실성을 고려한 확률계획법 모형

TFT-LCD 생산체인의 불확실한 수요와 가격 특성을 고려하여 수리적 계획모형을 설계하고 의사결정을 수립하기 위해서는 확률계획법, 즉 확률적 MILP 모형의 개발이 필요하다. 모형 개발의 목적은 수요 및 가격 불확실성에 robust 생산 및 수송 정책을 찾아내는 것이다. 본 연구의 대상이 되는 TFT-LCD 생산체인의 PDP 모형을 간단히 설명하면 다음과 같다.

<모형 설계 시 고려사항>

- 해상 / 항공 수송별 리드타임 구분 필요함
- Array-Cell 생산, Module 조립 그리고 항공수송에는 용량 제약이 존재함
- 주문이월은 허용되지 않고 충족되지 않은 수요에 대해서는 페널티가 부과됨
- 수요와 가격에 대해 이력에 기초한 확률분포가 주어짐
- 수요는 모두 가치하락 방향으로 대체 충족 가능함. 즉 고객의 주문은 원래의 품질등급 또는 상위 등급에 해당하는 TFT-LCD 패널로 인도 가능함

<프로토타입 모형 설명을 위한 기호 정리>

인덱스 (Indexes)

$k = 1, 2, \dots, K$ 제품그룹,

$j = 1, 2, \dots, J$ 조립 제조시설,
 $i = 1, 2, \dots, N$ Cell Glass 패널의 품질등급,
 $g = 1, 2, \dots, G$ TFT-LCD 패널(최종제품)의 품질등급,
 $s = 1, 2, \dots, S$ 수요 및 가격 시나리오,
 $t = 1, 2, \dots, T$ 계획구간,

모수 (Parameters)

모형관련

$P_{k,t}^g$ 기간 t 동안 제품유형 k , 품질등급 g 인 TFT-LCD 패널의 평균 판매가격
 $D_{k,t}^g$ 기간 t 동안 제품유형 k , 품질등급 g 인 TFT-LCD 패널의 예측수요
 $f_{k,j,t}^g$ 기간 t 동안 시설 j 에서 제품유형 k , 품질등급 g 인 TFT-LCD 패널의 수요충족량

비용관련

hC_k^i 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널의 단위 재고유지비용
 hT_k^g 제품유형 k , 품질등급 g 인 TFT-LCD 패널의 단위 재고유지비용
 $tA_{k,j}$ 제품유형 k Cell Glass 패널을 시설 j 로 항공수송 하는데 필요한 단위 운송비용
 $tS_{k,j}$ 제품유형 k Cell Glass 패널을 시설 j 로 해상수송 하는데 필요한 단위 운송비용
 hO_k^g 제품유형 k , 품질등급 g 인 TFT-LCD 패널의 단위 기회비용

재고 및 생산관련

$IP_{k,t}^i$ 기간 t 동안 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널 (Cell-Array단계)의 재고량
 $IC_{k,j,t}^i$ 기간 t 동안 시설 j 의 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널의 재고량
 $IT_{k,j,t}^i$ 기간 t 동안 시설 j 의 제품유형 k , 품질등급 g 인 TFT-LCD 패널의 재고량
 yp_k^i 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널의 생산수율, $\sum_i yp_k^i \leq 1, \forall k$
 $yT_{k,j}^{i,g}$ 시설 j 에서 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널을 품질등급 g 인 TFT-LCD 패널로 조립 시의 생산수율, $\sum_g ym_{k,j}^{i,g} \leq 1, \forall k, j, i$

용량관련

cp_k 제품유형 k Cell Glass 패널의 생산용량
 $cT_{k,j}$ 시설 j 에서 제품유형 k TFT-LCD 패널의 생산용량
 $cA_{k,j}$ 제품유형 k Cell Glass 패널을 시설 j 로 운송 시 항공수송용량

결정변수 (Decision variables)

1단계 robust 결정변수

$qP_{k,t}$ 기간 t 동안 제품유형 k 인 Cell Glass 패널의 생산량
 $qS_{k,j,t}^i$ 기간 t 동안 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널을 시설 j 로 운송하는 해상수송량

2단계 결정변수

$qC_{k,j,t}^i$ 기간 t 동안 시설 j 에서 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널의 조립생산량

$qA_{k,j,t}^i$ 기간 t 동안 제품유형 k , 품질등급 i 인 Cell Glass 패널을 시설 j 로 운송하는 항공수송량

본 연구는 가격 및 수요 불확실성이 존재하는 PDP문제의 강건한 해를 구하기 위해 일정개수 (S)의 시나리오 집합 ($\Omega = \{1, \dots, S\}$)을 사용하여 모델링하는 것을 목표로 한다. 기존의 연구에서는 PDP 문제를 해결할 때, 수요 및 가격 불확실성을 고려하지 못하는 확정적인 모형을 사용하였다. 이렇게 불확실성을 고려하지 않게 되면 PDP문제는 하나의 시나리오만 (eg. $S=1$) 존재하는 모형으로 모델링이 된다. 또한 바로 이 모형이 현재 TFT-LCD 기업들에서 사용하고 있는 PDP-D (PDP-Deterministic) 모형이다. 본 연구의 목표인 불확실성이 존재할 때 복수개의 시나리오를 사용하는 RO (robust optimization) 모형의 모델링을 위해서는 PDP-D 모형 역시 먼저 개발되어야 한다. 이를 위해 PDP-D 모형의 프로토타입을 정리해 보면 다음과 같다. 단, PDP-D 모형은 확정적으로 모델링 되므로 하나의 특정 시나리오 s 가 이미 선택되었다고 가정하고 모델링하도록 한다.

PDP-D

Maximize NP

Subject to

$$NP = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T P_{k,t}^{g,s} f_{k,j,t}^g - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h C_k^i IP_{k,t}^i - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T h C_k^g IC_{k,j,t}^g - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T h T_k^g IT_{k,j,t}^g - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T t A_{k,j} q A_{k,j,t}^{i,s} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T t S_{k,j} q S_{k,j,t}^i - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T h O_k^g (D_{k,t}^{g,s} - f_{k,j,t}^g) \quad (1),$$

$$IP_{k,t}^i = IP_{k,t-1}^i + y P_k^i q P_{k,t} - \sum_j q A_{k,j,t}^i - \sum_j q S_{k,j,t}^i, \quad \forall k, i, t \quad (2),$$

$$IC_{k,j,t}^g = IC_{k,j,t-1}^g + q A_{k,j,t}^g + S_{k,j,t-1}^g - q C_{k,j,t}^g, \quad \forall k, j, i, t \quad (3),$$

$$IP_{k,j,t}^g = IP_{k,j,t-1}^g + \sum_i y T_{k,j}^{i,g} q C_{k,j,t}^i - f_{k,j,t}^g, \quad \forall k, j, g, t \quad (4),$$

$$D_{k,t}^g \geq \sum_j f_{k,j,t}^g, \quad \forall k, g, t \quad (5),$$

$$\sum_j q A_{k,j,t}^i + \sum_j S_{k,j,t}^i \leq IP_{k,t-1}^i + y P_k^i q P_{k,t}, \quad \forall k, i, t \quad (6),$$

$$f_{k,j,t}^g \leq IT_{k,j,t-1}^g + y T_{k,j}^{i,g} q C_{k,j,t}^i, \quad \forall k, j, i, g, t \quad (7),$$

$$q P_{k,t} \leq c p_k, \quad \forall k \quad (8),$$

$$\sum_k q C_{k,j,t}^g \leq c T_{k,j}, \quad \forall k, j, t \quad (9),$$

$$\sum_t q A_{k,j,t}^i \leq c A_{k,j}, \quad \forall k, j, i, g, t \quad (10),$$

$$q P_{k,t} \geq 0; q C_{k,j,t}^g \geq 0; q A_{k,j,t}^i \geq 0; q S_{k,j,t}^i \geq 0 \quad \forall k, j, i, g, t \quad (11),$$

위 모형을 간단히 설명하면 (1)식의 NP는 총매출과 재고 유지/수송/품질 비용을 고려한 순 이익(Net Profit)을 나타내고, 제약식 (2)~(4)는 재고균형식을, 제약식 (5)~(7)은 주문 수송량에 대한 상한과 하한선을 지정한다. 그리고 제약식 (8)~(10)은 생산시설 및 수송 수단의 용량 제약에 관련된 식이다.

2.2 최적의 의사결정을 위한 RO 모형

본 연구에서 제안하는 3개의 RO 기준들은 1) max

expected profit, 2) min-max regret, 3) max-min profit 이다. 각 기준들을 설명하면 다음과 같다.

■ Max expected profit 기준 (PDP-MEP 모델)

PDP-ME 모델의 목표는 다양한 시나리오 하에서 기대이익을 최대화하기 위한 robust 의사결정 변수들을 찾아내는 것이다. PDP-MEP 모델은 확정적으로 모형화된 기본형 PDP-D의 목적함수를 변경하고 복수개의 시나리오를 반영토록 한다. PDP-MEP 모델의 기본 틀을 구상해 보면 다음과 같다.

PDP-MEP

Maximize $E[NP^s] = \sum_{s \in \Omega} \omega^s NP^s$

Subject to

$$NP^s = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T P_{k,t}^{g,s} f_{k,j,t}^{g,s} - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h C_k^i IP_{k,t}^{g,s} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T h C_k^g IC_{k,j,t}^{g,s} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T h T_k^g IT_{k,j,t}^{g,s} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T t A_{k,j} q A_{k,j,t}^{i,s} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T t S_{k,j} q S_{k,j,t}^i - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T h O_k^g (D_{k,t}^{g,s} - f_{k,j,t}^{g,s}), \quad \forall s \quad (12),$$

$$A^s X^s = B^s, \quad \forall s \quad (13),$$

$$X^s \geq 0; s = 1, 2, \dots, S, \quad (14)$$

위 모델에서 NP^s , $P_{k,t}^{g,s}$, $D_{g,t}^{g,s}$, $f_{k,j,t}^{g,s}$, $IP_{k,t}^{i,s}$, $IC_{k,j,t}^{i,s}$, $IP_{k,j,t}^{i,s}$ 는 특정 시나리오 s 하에서의 모수들이다. 그리고 설명을 간단히 하기 위해 PDP-D 모형의 (2)~(10)의 제약식은 $A^s X^s = B^s$ 의 표현으로 대체하였다. 단 이들 제약식도 모든 시나리오들 ($s \in \Omega$)을 반영하여야 한다. 또한 의사결정 변수인 x 는 본 연구의 2단계 PDP 시스템 프레임워크 내에서 $x = (x^{1st}, x^{2nd})$ 로 표현될 수 있다. 여기서 x^{1st} 와 x^{2nd} 는 각각 첫 번째 단계의 Cell Glass 패널의 생산량과 해상수송량, 그리고 두 번째 단계의 Cell Glass 패널의 조립생산량과 항공수송량의 의사결정 변수를 뜻한다. 따라서 PDP-ME 모델을 이용하여 첫 번째 단계에서는 모든 시나리오를 감안하는 robust 솔루션을 구하고, 일정시간 경과 후 두 번째 단계에서는 불확실성이 사라진 상태에서 x^{1st} 변수를 고정한 후 해당 시나리오 하에서 x^{2nd} 솔루션을 구하는 방식을 따른다.

■ Min-max regret 기준 (PDP-MMR 모델)

PDP-MR 모델의 목표는 모든 가능한 시나리오 하에서 최대 regret 값인 λ 를 최소화하는 robust 의사결정 변수들을 찾아내는 것이다. 불확실성이 존재할 때, 특정 시나리오 s 에 대해서 구한 확정적 모형인 PDP-D의 최적 목적함수 값 (총이익)을 NP^* 라고 하면 수많은 결정변수 집합 중의 하나인 결정변수 $x = (x^{1st}, x^{2nd})$ 에 해당하는 목적함수 값은 NP^s 라고 할 수 있다. 이 때, $NP^* \geq NP^s$ 가 성립한다. 여기서 regret 값 λ 를 $\lambda = NP^* - NP^s$ 라고 정의하면 다음과 같이 PDP-MEP 모델의 기본 틀을 구상해 볼 수 있다.

PDP-MMR

Minimize λ

Subject to

$$\lambda > NP^* - NP^s, \quad \forall s \quad (15),$$

제약식 (12) ~ (14)

결국 PDP-MMR 모델에서의 λ 는 모든 가능한 시나리오 중에서 가장 큰 regret 값이고, λ 를 최소화하는 것을 목적으로 솔루션을 구한다.

■ Max-min profit 기준 (PDP-MMP 모델)

PDP-MMP 모델의 목표는 모든 가능한 시나리오 하에서 최소 이익 (minimum profit)을 최대화하기 위한 robust 의사결정 솔루션을 찾아내는 것이다. 최소 이익 값 ω 를 $\omega = \min_{s \in \Omega}(NP^s)$ 라고 정의하면, 다음과 같이 PDP-MMP 모델의 기본 틀을 구상해 볼 수 있다.

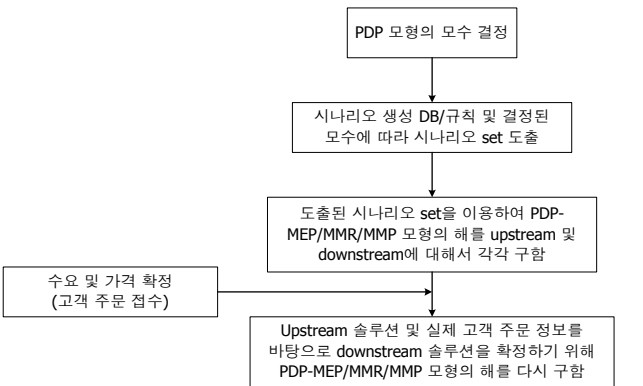
PDP-MMP

Maximize ω

Subject to

$$\omega \leq NP^s, \quad \forall s \quad (16),$$

제약식 (12) ~ (14)



[그림 2] Robust PDP 알고리즘

2.3 제안 알고리즘

제1단계에서 모든 시나리오에 대응하는 robust 의사결정이 만들어지면, 제2단계에서는 제1단계의 의사결정 (upstream의 기간별 선박운송 수량 및 생산량)을 고정하고 확정된 시나리오 하나 만에 대해 downstream의 의사결정(기간별 항공운송 및 조립생산량)을 수립한다. 본 연구에서 제안하는 Robust PDP 알고리즘의 절차는 [그림 2]와 같다.

3. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 제안한 Robust PDP 알고리즘의 성능평가 및 실제 현장에서의 적용 가능성을 타진하기 위해 다음과 같이 실험을 계획하고 그 결과를 분석하였다. 실험 계획은 [표 1]과 같이 정리할 수 있다. 즉 본 실험의 대상이 되는 TFT-LCD 생산체인은 3개의 제품군, 3곳의 제조시설 그리고 3개의 품질등급으로 구성이 된다. 또한 실험을 위한 알고리즘의 입력데이터로 사용되는 모수는 재고유지비용,

주문미충족비용, 수송비용 그리고 생산 및 수송의 용량제한 등으로 정해진 균일분포로부터 생성된다. 실제 TFT-LCD 제조회사의 영업팀 데이터를 분석해 본 결과, 수요 및 가격 데이터는 정규분포를 따른다고 할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 계획시평을 18주로 하였고, 수요 및 가격 분포와 3범주(optimistic, normal, and pessimistic cases)로 구분되는 시나리오를 기준을 이용하여 실험데이터를 산출([표 2] 참조)하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 성능을 평가하였다.

PDP-D, PDP-MEP/MMR/MMP 모형은 Lingo 10.0 패키지를 이용하여 모델링하고 Robust PDP 알고리즘은 LINGO 내부언어(연산자, 함수 등)를 이용하여 구현하였다. 실험 환경은 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU, 4GB RAM이고, 각 모형의 솔루션 모두 1분내외의 현실적인 시간 내에 구할 수 있었다.

[표 1] 실험 계획 및 모수 생성 방법

	제품군	고품질	중간품질	저품질
재고유지비용 (Cell Glass 패널)	k = 1	U[5,7]	U[4,6]	U[3,5]
	k = 2	U[5,7]	U[4,6]	U[3,5]
	k = 3	U[5,7]	U[4,6]	U[3,5]
재고유지비용 (TFT-LCD 패널)	k = 1	U[8,10]	U[7,9]	U[6,8]
	k = 2	U[8,10]	U[7,9]	U[6,8]
	k = 3	U[7,9]	U[6,8]	U[5,7]
주문미충족비용	k = 1	U[200,250]	U[150,200]	U[100,150]
	k = 2	U[300,350]	U[250,300]	U[200,250]
	k = 3	U[200,250]	U[150,200]	U[100,150]
		제조시설 1	제조시설 2	제조시설 3
생산 능력 (Upstream) 조립 능력 (Downstream)	k = 1,2,3	U[3000,2500]	U[3000,2500]	U[3500,4000]
	k = 1,2,3	U[4000,5000]	U[4000,5000]	U[4500,5500]
항공운송 능력	k = 1	U[400,500]	U[400,500]	U[450,550]
	k = 2	U[400,500]	U[400,500]	U[450,550]
	k = 3	U[300,400]	U[300,400]	U[300,400]
항공운송 비용 선박운송 비용	k = 1,2,3	U[100,150]	U[200,250]	U[100,150]
	k = 1,2,3	U[4,6]	U[4,6]	U[4,6]

[표 2] 수요 및 가격 데이터 산출 기준

	품질군	Optimistic case	Normal case	Pessimistic case
수요	고품질	U[1300,1400]	U[1100,1200]	U[900,1000]
	중간품질	U[1500,1600]	U[1300,1400]	U[1100,1200]
	저품질	U[1200,1100]	U[1000,900]	U[800,700]
	표준편차(σ)	U[8,11]	U[7,10]	U[6,9]
가격	고품질	U[1400,1500]	U[1200,1300]	U[1000,1100]
	중간품질	U[1200,1100]	U[1000,900]	U[800,700]
	저품질	U[1000,900]	U[800,700]	U[600,500]
	표준편차(σ)	U[8,11]	U[7,10]	U[6,9]

3.1 실험결과 분석

본 연구에서 제안한 Robust PDP 알고리즘의 성능 (robustness)을 평가하기 위해, 4.1절에서 기술한 실험계획에 따라 생성된 실험데이터에 대해 PDP-MEP/MMR/MMP 확률모형과 PDP-D 확정모형을 각각 이용하여 얻은 목적함수 값을 상대 비교하도록 한다. 상대 비교를 하기위한 척도로써 본 실험에서는 상대오차 값 (relative error: RE)을 사용한다.

$$RE = \frac{S_{M^*} - S_D}{S_D}, \quad (17)$$

여기서,

S_D = PDP-D 확정모형에 대해 얻은 목적함수 값,

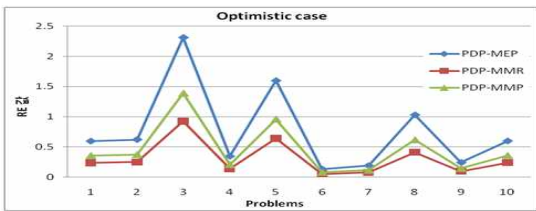
S_{M^*} = PDP-MEP/MMR/MMP 확률모형에 대해 얻은 목적함수 값

따라서 RE값이 클수록 Robust PDP 알고리즘의 성능, 즉 robustness가 강하다고 할 수 있다. 2단계로 구성되는 확률모형과 달리, PDP-D 확정모형은 계획수립 시 수요 및 가격 정보 등의 모든 모수들이 확정되므로 1단계에서 의사결정이 이루어지면 추후 변동이 되지 않는다. PDP-D 모형은 품질등급은 중간품질 그리고 normal case 시나리오를 따르도록 한다.

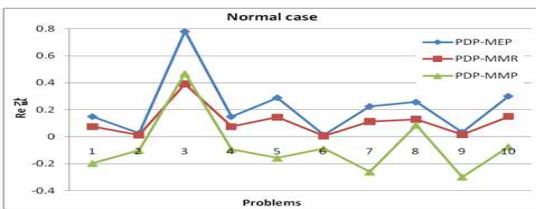
실험을 통해 2단계 시스템으로 운영되는 TFT-LCD 생산 체인은 시나리오를 반영한 확률모형으로 모델링하는 것이 매우 효율적이라는 것을 입증하였다.

참고문헌

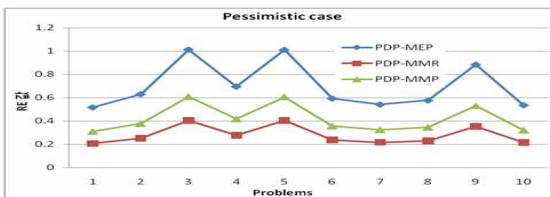
- [1] Leung, S.C.H. and Wu, Y., 2004. A robust optimization model for stochastic aggregate production planning. *Production Planning and Control*, 15 (5), 502 - .514.
- [2] Leung, S.C.H., et al., 2007. A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European Journal of Operational research*, 181 (1), 224 - .238.



[그림 3] Robustness의 상대오차값 (Optimistic 경우)



[그림 4] Robustness의 상대오차값 (Normal 경우)



[그림 5] Robustness의 상대오차값 (Pessimistic 경우)

[그림 4~5]는 PDP-D 확정모형과 비교하여 PDP-MEP/MMR/MMP 알고리즘의 robustness 정도를 보여주고 있으며, PDP-MEP, PDP-MMR, PDP-MMP 알고리즘의 성능간의 우수성도 함께 나타내 준다. 실험결과는 3개의 시나리오(Optimistic, Normal, and Pessimistic-case) 하에서 진행되었고, 각 시나리오 별로 10개의 랜덤 문제데이터를 생성하여 결과를 도출하였다. Normal case를 제외하고는 확정적 모형보다 PDP-MEP/MMR/MMP 모형이 모두 우수한 성능을 보여준 것을 알 수 있다. 특히 PDP-MEP 모형은 3 시나리오 모두에서 PDP-D 모형보다 최대 80~240% 이상의 수익을 보여주었다. 확률모형 내에서는 MEP모형이 가장 앞섰고, MMR과 MMP의 순이었다. 본