

태양광 발전 소재 생산계획을 위한 선형계획 모형*

이선종¹ · 이현철² · 김재희^{3†}

¹OCI Solar Power Ltd., ²한국항공대학교 경영학부, ³전북대학교 경영학부

A Linear Programming Model for Production Planning of Photovoltaic Materials

Seon-Jong Lee¹ · Hyun Cheol Lee² · Jaehee Kim^{3†}

¹OCI Solar Power Ltd.

²School of Business, Korea Aerospace University

³Division of Business Administration, Chonbuk National University

■ Abstract ■

This study presents a mathematical programming model to develop production planning in the manufacturing processes for photovoltaic silicon ingots and wafers. The model is formulated as a linear programming model that maximizes total growth margin, which is composed of production cost, inventory cost, shortage cost, and sales profit while considering the constraints associated with the production environments of photovoltaic materials. In order to demonstrate the utility of the model for production planning, we run operations for a planning horizon of a year for a case study. When the primary results of this mathematical programming are compared with the historical records, the model could have resulted in the considerable increase of the total growth margin by effectively reducing inventory cost if a decision maker had employed the model as a decision support system with perfect information for sales demand.

Keywords : Photovoltaic, Silicon Wafer, Production Planning, Linear Programming

논문접수일 : 2015년 11월 23일 논문게재확정일 : 2015년 12월 14일

* 이 논문은 2015년도 전북대학교 연구기반 조성비 지원에 의하여 연구되었음.

† 교신저자, jheekim@jbnu.ac.kr

1. 서 론

20세기 이후의 급격한 산업화는 석유를 중심으로 한 화석에너지의 고갈시기를 앞당기고 있다. 그로 인해 1990년 이후 미국, 유럽을 중심으로 대체 에너지 개발이 시작되었고, 현재 관련 산업이 크게 성장하고 있다. 그 중 태양광은 빛이 존재하는 장소이면 어디든지 설치할 수 있다는 장점으로 인해 가장 실용적인 대안으로 주목 받고 있다[1]. 이 때문에 2011년을 기점으로 메모리 반도체 시장 규모인 470억 불을 추월하고, 2016년까지 750억불을 넘어설 것으로 예상될 정도로 그 시장 규모가 커지고 있다[12].

이러한 성장 국면에서는 설비 확장(capacity expansion)을 통한 공급 능력의 확대가 기업의 성과를 좌우하는 가장 중요한 과제였다. 이 때문에 기존 자원을 효율적으로 활용하여 수익성을 증대하기 위한 생산 관리 기법에 대한 연구에는 상대적으로 그 관심이 적었다. 즉, 주로 고객과의 중장기적 계약, 즉 1~5년의 계약 성과를 토대로 경험적인 규칙을 활용하여 생산하는 방식을 취했다.

그러나 최근 몇 년간의 세계 경기 침체 및 생산용량의 급격한 증설로 공급 과잉 상태가 지속됨에 따라 과거와는 다른 상황이 전개되고 있다. 본 연구에서 다루는 태양광 발전 소재 생산 공정, 즉, 폴리실리콘을 원재료로 하여 태양광 발전 모듈에 사용되는 잉곳(ingot) 및 웨이퍼를 생산하는 업종 역시 예외가 아니다. 이로 인해 주요 제품 가격이 하락되고 재고가 증가하여 수익성이 악화하였고, 이에 따라 기존의 성장 위주 경영 방식을 전면적으로 재검토 하고 있다. 즉, 기존 시스템의 개선을 통한 원가 절감이 기업 경영의 핵심 과제로 대두되었다.

이 때문에 태양광 소재 산업의 생산계획을 위한 연구의 필요성이 커지고 있다. 하지만, 아직 관련 산업이 성숙하지 않은 관계로 이 문제를 다룬 연구를 거의 찾아볼 수 없다. 대신 실리콘을 원재료로 웨이퍼를 만들고 이를 활용한다는 점에서 유사성이 있는 반도체 산업에서 관련 연구를 찾아볼 수 있다. 이 분야의 연구로는 전체 공급사슬에 대한 최적화 문제에

서부터 소단위의 공정 그룹이나 설비 그룹에 대한 실시간 일정계획 등과 같은 세부 운영 문제까지 매우 다양하게 이뤄지고 있으며, 특히 웨이퍼를 공급 받은 후에 가공하는 공정(wafer fabrication)을 대상으로, 생산계획 및 통제, 물류 흐름, 용량분석, 일정계획 등을 다룬 연구가 매우 활발하다[2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13].

본 연구에서 다루고자 하는 잉곳 및 웨이퍼 생산 공정의 중장기적인 생산계획 문제 역시 반도체 산업에서 관련 연구를 찾아볼 수 있다. 대표적인 예로 Bermon and Hood[5]는 장비 제약을 고려하여 수익을 최대화하는 제품 배합을 결정할 수 있는 선형계획기반의 시스템을 소개하는 등, 다양한 생산 조건을 고려한 모형들이 제시되었다. 최근의 예로, Ponsignon and Monch[11]의 경우는 설비 용량 제약 하에서 반도체 웨이퍼 종류별 생산량을 결정하는 과정에서 분리 생산(production partitioning)을 방지하기 위한 목적으로, 생산 여부에 따라 고정비용(fixed cost)을 부여하는 혼합정수계획모형(Mixed Integer Programming)을 수립하고, 제품단위로 분할하여 문제를 풀고 유전자 알고리즘으로 해를 구하는 휴리스틱 기법을 제시하였다.

그러나 본 연구에서 다루는 잉곳 및 웨이퍼 생산을 위한 중장기 생산계획 문제의 경우 기존에 제시한 모형과 달리 두 종류의 제품이 몇 단계의 과정을 거쳐 완제품으로 만들어지고 있어 기존의 연구 모형을 그대로 사용하는 것은 불가능하다. 이에 본 연구에서는 태양광 잉곳 및 웨이퍼 생산 업종을 대상으로 하여 중장기적인 생산 일정을 수립할 수 있는 모형을 수립하고자 한다. 즉, 생산 비용, 재고관리비용, 미판매비용, 그리고 판매 수익을 모두 고려하여 전체 매출 이익을 최대화하는 선형계획(Linear Programming)형태의 모형을 수립하였으며, 이를 실제 사례 대상 기업에 적용하여 가능성을 확인해 보았다.

본 연구의 구성은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 제2장에서는 본 연구의 대상이 되는 태양광 잉곳 및 웨이퍼의 생산 공정을 소개한다. 제3장에서는 잉곳 및 웨이퍼 제조 공정의 중장기 생산계획 수립을

위해 고려해야할 주요 제약 조건을 설명하고 이 문제를 위한 선형계획 모형을 제시한다. 그리고 제4장에서는 정확한 수요를 알고 있다는 가정 하에서 최적화를 수행하고 그 결과를 실적치와 비교하여 모형의 효과를 확인하며, 끝으로 제5장에서는 결론과 향후 연구 과제를 제시한다.

2. 잉곳 및 웨이퍼 생산 공정의 개요

잉곳 및 실리콘 웨이퍼 생산은 제품 종류에 따라 단결정과 다결정 제품으로 나뉘며, 모두 <그림 1>에서 보는 바와 같이 실리콘으로부터 잉곳(ingot)을 성장(growing)시키는 단계, 잉곳을 절단하여 브릭(brick)을 만드는 단계, 그리고 브릭을 얇게 잘라 웨이퍼로 만드는 공정을 거쳐 생산된다. 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다.

• 1단계 : 잉곳 성장

단결정 잉곳은 고순도 폴리실리콘을 단결정 성장기에 투입하여 1,000℃ 정도로 용융시킨 후 안정화(stabilization)를 시킨 후 담금(dipping)한 후, 목, 목

체, 꼬리 부분을 성장시킨 후, 산화(oxidation)한 후 냉각한다. 단결정 성장 후 도가니 안에서 꺼낼 때 일부가 남기 때문에 총 폴리실리콘 투입량의 96.6%가 단결정 잉곳으로 성장된다. 다결정 잉곳의 성장공정은 단결정 잉곳과 거의 동일하나 단결정 잉곳의 경우보다 더 높은 1,400℃ 정도로 용융시키고, 단결정 잉곳의 성장 공정과 달리 도가니 안에서 꺼낼 때 잔량이 없기 때문에 폴리실리콘 투입량의 100%를 다결정 잉곳으로 얻을 수 있다.

• 2단계 : 브릭(brick) 생산

브릭 생산 과정은 단결정과 다결정 제품이 동일하다. 전 단계에서 성장된 잉곳은 상단 부분과 하단 부분을 절단(cropping)하여 브릭(brick)형태도 가공한 후, 품질을 평가한다. 이 공정에서는 브릭 가공 중에 폴리실리콘 가루가 빠져 나가기 때문에 브릭 전체 중 0.6%의 손실이 발생한다.

• 3단계 : 웨이퍼 생산

단결정 및 다결정 브릭을 절단, 세정, 검사하고 포장하는 공정으로서, 태양전지용 웨이퍼로 가공하는



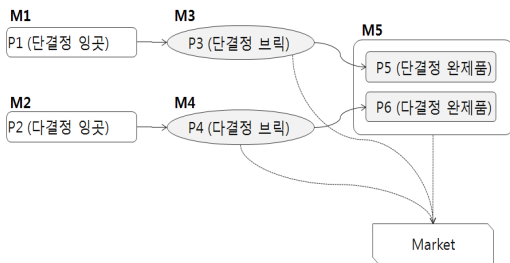
<그림 1> 태양광 웨이퍼 생산 공정

최종 공정이다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 120 μ m 직경의 와이어로 브릭을 절단하면 날장의 웨이퍼가 되고, 이를 세정하면 태양 전지용 웨이퍼가 된다.

3. 태양광 잉곳 및 웨이퍼 생산 계획을 위한 선형계획 모형

3.1 태양광 웨이퍼 제조업의 제품 공급 체계

태양광 웨이퍼를 생산하는 업종은 대개 2가지 제품군, 즉 단결정 및 다결정 제품을 다루고, 브릭(brick)형태의 반제품이나 웨이퍼 형태의 완제품을 공급한다. <그림 2>는 태양광 웨이퍼 제조업의 가장 일반적인 제품 공급 체계를 도시한 것으로, 우선 완제품(웨이퍼)인 단결정 웨이퍼 및 다결정 웨이퍼 뿐 아니라 브릭 형태의 반제품도 판매가 가능하다. 이때 브릭 제품은 국내의 외주 업체로 가공 용역을 주기 위하여 판매할 수 있지만, 대개는 후속 공정을 통한 가공을 통해 웨이퍼로 생산하여 판매하는 것이 일반적이다.



<그림 2> 잉곳 및 웨이퍼 제조업의 제품 공급 체계

태양광 잉곳 및 웨이퍼 생산 공정의 특징을 살펴 보면, 먼저 성장 및 가공 과정의 특성상 공정에서 재료의 손실이 발생할 수 있다는 점을 들 수 있다. 즉, 1단계인 성장 공정에서는 단결정 성장과 다결정 성장이 있는데, 단결정 성장에서는 도가니 안에 남은 잔여 폴리실리콘 및 단결정 성장 시 공정상 불가피하게 약 3~10%의 손실이 발생한다. 아울러 다결정 성장에서는 도가니 안에 잔여물은 없으며, 단지 다

결정 성장 시 공정의 결함으로 인하여 일부 손실이 발생할 수 있다. 그리고 2단계인 단결정 및 다결정 브릭 가공 시에는 절단 및 연마에 의하여, 폴리실리콘에 일부 손실이 발생하며, 최종 3단계 공정에서는 단결정 웨이퍼 및 다결정 웨이퍼 절단 시 폴리실리콘 손실 및 세정 시 헨들링 과정에서 일부 웨이퍼가 깨질 수가 있어서 일반적으로 10%이내의 손실이 발생할 수 있다.

또한, 1단계인 성장단계와 2단계인 브릭 가공 단계에서는 단결정과 다결정 제품 각각을 위한 전용 장비(M1, M2, M3, M4)를 사용하지만, 최종 완제품 생산 단계에서는 동종의 장비(M5)를 공유할 수 있다. 이는 브릭으로 만들어진 반제품을 동종의 절단 장비인 절단용 와이어(wire) 장비를 사용하고, 역시 동종의 1차 및 2차 세정 장비를 사용할 수 있기 때문이다.

3.2 잉곳 및 웨이퍼 생산 공정의 생산계획을 위한 수학적 모형

본 연구에서는 앞서 설명한 현실 제약을 고려하여 생산계획을 수립할 수 있는 선형계획 기반의 모형을 제시하였다. 다음은 모형수립에 필요한 기호에 해당한다.

- 기호 정의
- T : 전체 기간의 집합
- J : 전체 제품의 집합
- j : 제품을 나타내는 첨자($j=1, 2, 3, 4, 5, 6$)
- J_1 : 판매용 제품의 집합($j=3, 4, 5, 6$)
- J_2 : 공정 3단계에서 생산하는 제품의 집합($j=5, 6$)
- m : 장비를 나타내는 첨자
- M : 장비의 집합
- P_m : 장비 m 에서 생산되는 제품의 집합
- t : 기간(월)을 의미하는 첨자
- $c_{j,t}$: 기간 t 의 제품 j 의 단위당 생산비용
- $p_{j,t}$: 기간 t 의 제품 j 의 단위당 판매가격
- h_j : 제품 j 의 단위당 재고관리비용
- u_j : 제품 j 의 단위당 미판매손실비용

- $d_{j,t}$: 기간 t 의 제품 j 의 수요량
 b_j : 제품 j 의 안전재고
 r_j : 제품 j 의 수율
 k_i : 기간 t 의 생산요구량의 총합
 g_i : 장비 종류 i 의 가공 능력

• 변수 정의

- $x_{j,t}$: 기간 t 의 제품 j 의 생산량
 $s_{j,t}$: 기간 t 의 제품 j 의 판매량
 $I_{j,t}$: 기간 t 시점의 제품 j 의 재고량
 $y_{j,t}$: 기간 t 시점의 제품 j 의 공급부족량

• 목적함수

목적함수는 생산비용, 판매수익, 재고관리 비용, 그리고 공급부족에 따른 비용을 모두 더한 값으로 정의한다. 이 중 판매수익은 판매용 제품 $j \in J_1$ 에 대해서만 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{Max } & p_{j,t} \sum_{j \in J_1} \sum_{t \in T} s_{j,t} - c_{j,t} \sum_{j \in N} \sum_{t \in T} x_{j,t} \\ & - h_j \sum_{j \in N} \sum_{t \in T} I_{j,t} - u_j \sum_{j \in J_1} \sum_{t \in T} y_{j,t} \end{aligned} \quad (1)$$

• 제약식

식 (2)~식 (3)은 재고량을 계산하는 식으로 이전 기간의 재고량에 생산량을 더한 후 판매량을 뺀 값으로 정의한다. 이 식에서 N_j 은 제품 j 의 후속공정의 집합을 의미하며, 식 (2)는 판매용 제품에 대한 식, 그리고 식 (3)은 비판매용 제품에 대한 식이다.

$$I_{j,t} = I_{j,t-1} + x_{j,t} - \sum_{k \in N_j} x_{k,t}/r_k - s_{j,t}, \quad j \in J_1, t \in T \quad (2)$$

$$I_{j,t} = I_{j,t-1} + x_{j,t} - \sum_{k \in N_j} x_{k,t}/r_k, \quad j \in J \setminus J_1, t \in T \quad (3)$$

식 (4)는 공급부족량을 정의하는 식으로 수요량에서 판매량을 뺀 값이다.

$$y_{j,t} = d_{j,t} - s_{j,t}, \quad j \in J, t \in T \quad (4)$$

식 (5)~식 (6)은 판매량을 계산하는 식이다. 즉, 판매량은 수요량을 초과할 수 없고, 동시에 재고량에 생산량을 더하고 후속 공정을 위해 사용된 수량을 제외한 총 가용량을 초과할 수 없음을 의미한다.

$$s_{j,t} \leq d_{j,t}, \quad j \in J_1, t \in T \quad (5)$$

$$s_{j,t} \leq I_{j,t-1} + x_{j,t} - \sum_{k \in N_j} x_{k,t}/r_k, \quad j \in J_1, t \in T \quad (6)$$

식 (7)은 판매용 제품의 경우 일정한 안전 재고를 확보해야 함을 의미한다.

$$I_{j,t} \geq b_j, \quad j \in J_1, t \in T \quad (7)$$

식 (8)은 생산량이 일정 수준 이상을 유지해야 함을 의미한다.

$$\sum_{j \in J_2} x_{j,t} \geq k_t, \quad t \in T \quad (8)$$

식 (9)는 장비에 대한 설비 용량 제약을 의미한다.

$$\sum_{j \in P_m} \frac{x_{j,t}}{r_j} \leq g_m, \quad m \in M, t \in T \quad (9)$$

식 (10)은 후속공정의 가공량이 전 공정의 산출량을 초과할 수 없음을 의미한다.

$$\sum_{k \in N_j} \frac{x_{k,t}}{r_k} \leq I_{j,t-1} + x_{j,t}, \quad j \in J \setminus J_2, t \in T \quad (10)$$

4. 모형 적용 및 결과 분석

4.1 분석 대상

4.1.1 개요

사례 대상으로 하고 있는 N사는 태양전지용 잉곳 및 웨이퍼를 만들고 있는 회사로서 국내 및 외국으로부터 폴리 실리콘을 공급받아 잉곳 및 웨이퍼로 만들어 국내외로 공급하고 있다. 현재 고효율 웨이

퍼가 기술력을 인정받아 생산 규모로 국내 1위, 세계 5위에 위치하고 있지만, 최근의 업황 악화로 인해 채산성이 크게 떨어졌고 이에 따라 원가 절감의 필요성이 매우 큰 상황이다. 이에 따라 N사의 2011년 기준 자료를 대상으로, 앞서 수립한 수학 모형을 적용해보고 그 성과를 분석해 보았다.

4.1.2 입력 자료

먼저, 비용항목인 생산단가 및 판매단가는 실제 수치를 적용하였다. 그리고 재고관리단가는 판매단가에 대한 이자의 명목으로 내부회계 기준으로 판매단가의 6%를 적용하고, 공급부족의 경우는 내부적으로 판매단가의 5%를 적용하여 관리하고 있음을 반영하여 동일한 입력 자료를 사용하였다.

<표 1>은 각 공정에 적용되는 수율이다. 이는 앞서 3.1절에서 설명한 바와 같이 태양광 웨이퍼 생산의 특성상 전 단계의 재료 중 일부가 공정 중 손실되는 현실을 고려한 것이다. 가령 단결정 성장의 경우, 투입량 대비 3.4%의 손실이 발생한다. 그리고 다결정 성장의 경우에는 투입량의 거의 전량이 다결정 잉곳으로 성장될 수 있으며, 공정상 결함으로 0.1%의 손실이 발생한다. 아울러 단결정 및 다결정 브릭 가공 시 절단 및 연마공정에서 폴리실리콘의 0.6%가 손실 되고, 최종 완제품 생산 단계에서는 절단 와이어에 의해 표면에 기계적인 결함이 발생하고, 세정을 위한 헨들링 공정에서 발생하는 깨짐에 의거 단결정 웨이퍼 및 다결정 웨이퍼 각각 5.5%, 5.3%의 손실이 발생한다.

<표 1> 공정별 수율

품목	수율
1단계(단결정)	0.966
1단계(다결정)	0.999
2단계(단결정brick)	0.994
2단계(다결정brick)	0.994
3단계(단결정완제품)	0.945
3단계(다결정완제품)	0.947

월 최소 생산량은 인건비 및 설비 유지를 위한 월 평균 고정비용을 기준으로 생산비용과 판매비용이 같아지는 수준으로 결정하고 있으며, 분석 대상 연도에 대한 입력 자료는 <표 2>와 같다. 본 논문의 모든 제품 수량 정보는 자료 제공기업의 보안항목으로 단위를 삭제한다.

<표 2> 월 최소 생산량

품목	월 최소 생산량
2단계(단결정brick)	1.6
2단계(다결정brick)	2.0
3단계(단결정완제품)	1.3
3단계(다결정완제품)	1.9

안전재고는 <표 3>에서 보는 바와 같이 과거 4년간의 경험을 토대로, 익월 수요량에 3일 분 이상을 유지하면 적절한 것으로 판단하고 있다. 그리고 공정의 안정을 위하여 1단계의 브릭은 2단계 생산을 위한 기초 재고로서 각각 2.3과 0.7 이상을 유지하는 것으로 설정하였다. 따라서 안전재고는 <표 3>의 맨 우측 열과 같이 결정된다.

<표 3> 품목별 안전재고 설정

품목	최소 기준	안전재고
1단계(단결정)	2.3	Max(2.3, 익월의 3일분 수요)
1단계(다결정)	0.7	Max(0.7, 익월의 3일분 수요)
2단계(단결정brick)	-	익월의 3일분 수요
2단계(다결정brick)	-	익월의 3일분 수요
3단계(단결정완제품)	-	익월의 3일분 수요
3단계(다결정완제품)	-	익월의 3일분 수요

설비용량은 생산계획 수립 당월의 경우 실제 값을 적용하고, 그 이후 기간에 대해서는 실제보다 충분히 큰 값을 적용해서 설비 용량이 충분한 것으로 간주하였는데, 이는 필요할 경우 1개월여의 준비 기간을 거쳐 설비를 확충하는 것이 가능하기 때문이다. 그리고 수요량은 예측치가 아닌 실적치를 적용해서 본 모형을 통해 얻을 수 있는 성과의 최대치를 가능해 보고자 하였다.

4.2 실험 결과

<표 4>~<표 9>는 최적화 모형에서 도출된 생산

량, 판매량 및 재고량을 보여준다. 이 결과를 과거 실적치와 비교하면 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저, 생산량의 경우 최적화 모형의 월평균 생산량이 25.21로 과거 실적치의 월평균 25.95보다 0.74만큼 적는데, 이는 재고 비용과도 연관된 것이다. 즉, 불필요하게 미리 생산하여 재고비용이 유발되지 않기 위한 것으로 분석된다. 판매량의 경우에는 실제 수요량을 적용하였기 때문에 최적화 모형의 결과가 과거 실적치와 동일했다. 그리고 재고량의 경우 1단계인 단결정 잉곳 성장 및 다결정 성장 공정의 결과에서는 최적화 결과와 실적치가 동일하였고, 2단계인 단결정 브

<표 4> 생산량(모형 적용 결과)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
1단계(단결정)	1.60	1.60	2.75	3.02	3.72	3.72	3.72	4.02	4.12	4.43	4.60	4.73	42.04
1단계(다결정)	2.01	2.36	3.52	3.59	5.13	5.33	6.34	6.74	6.74	6.74	6.74	6.74	62.00
2단계(단결정brick)	1.59	1.59	2.73	3.00	3.70	3.70	3.70	4.00	4.10	4.40	4.58	4.70	41.79
2단계(다결정brick)	2.00	2.35	3.50	3.57	5.10	5.30	6.30	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70	61.62
3단계(단결정완제품)	1.36	1.69	2.19	2.40	2.69	3.46	3.18	3.66	3.85	3.92	3.75	4.27	36.42
3단계(다결정완제품)	1.93	2.66	3.32	3.31	3.50	4.64	6.68	6.84	6.27	5.78	6.63	7.03	58.60

<표 5> 생산량(실적치)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
1단계(단결정)	2.49	2.46	2.88	3.09	3.88	3.64	3.86	4.03	4.05	4.38	4.69	4.81	44.24
1단계(다결정)	2.10	3.34	4.11	4.35	5.21	5.31	6.47	6.67	5.91	6.18	6.17	6.86	62.69
2단계(단결정brick)	2.47	2.44	2.86	3.07	3.85	3.61	3.84	4.00	4.03	4.35	4.66	4.78	43.97
2단계(다결정brick)	2.09	3.32	4.08	4.33	5.18	5.28	6.43	6.63	5.88	6.14	6.13	6.82	62.31
3단계(단결정완제품)	1.40	2.10	2.30	2.60	3.50	3.50	3.90	3.80	3.70	4.30	4.00	4.10	39.20
3단계(다결정완제품)	2.00	3.10	4.30	4.20	4.70	5.20	5.90	6.30	5.50	5.70	5.70	6.40	59.00

<표 6> 판매량(모형 적용 결과)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
2단계(단결정brick)	0.01	0.01	0.05	0.67	0.51	0.29	0.90	0.44	0.44	0.44	0.45	0.34	4.55
2단계(다결정brick)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
3단계(단결정완제품)	1.36	1.69	2.19	2.40	2.69	3.46	3.18	3.66	3.85	3.92	3.75	4.27	36.42
3단계(다결정완제품)	1.87	2.59	3.32	3.30	3.40	4.41	6.66	6.90	6.33	5.75	6.07	7.45	58.05

〈표 7〉 판매량(실적치)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
2단계(단결정brick)	0.01	0.01	0.05	0.67	0.51	0.29	0.90	0.44	0.44	0.44	0.45	0.34	4.55
2단계(다결정brick)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
3단계(단결정완제품)	1.36	1.69	2.19	2.40	2.69	3.46	3.18	3.66	3.85	3.92	3.75	4.27	36.42
3단계(다결정완제품)	1.87	2.59	3.32	3.30	3.40	4.41	6.66	6.90	6.33	5.75	6.07	7.45	58.05

〈표 8〉 재고량(모형 적용 결과)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
1단계(단결정)	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	27.60
1단계(다결정)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	8.40
2단계(단결정brick)	2.4	2.2	2.6	2.4	2.7	2.5	1.9	1.6	1.2	1.0	1.2	1.0	22.74
2단계(다결정brick)	0.7	0.2	0.2	0.3	1.7	1.9	1.1	0.6	0.6	1.2	0.9	0.2	9.57
3단계(단결정완제품)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	6.00
3단계(다결정완제품)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	1.2	0.7	6.78

〈표 9〉 재고량(실적치)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
1단계(단결정)	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	27.60
1단계(다결정)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	8.40
2단계(단결정brick)	3.28	3.49	3.87	3.52	3.16	2.78	1.59	1.13	0.80	0.16	0.14	0.24	24.16
2단계(다결정brick)	0.68	0.73	0.27	0.16	0.38	0.03	0.12	0.10	0.17	0.29	0.40	0.46	3.79
3단계(단결정완제품)	0.54	0.95	1.06	1.26	2.07	2.11	2.83	2.97	2.82	3.20	3.45	3.28	26.54
3단계(다결정완제품)	0.33	0.84	1.82	2.72	4.02	4.81	4.05	3.45	2.62	2.57	2.20	1.15	30.58

릭과 다결정 브릭의 경우는 최적화 모형에서 제시한 재고량이 과거 실적치보다 많았는데, 이는 브릭의 경우 외부로 판매하거나 최종 웨이퍼 제품을 생산하기 위한 재공품 재고를 늘릴 필요가 있었기 때문으로 해석된다. 끝으로 3단계의 최종 웨이퍼 제품 재고량의 경우는 단결정, 다결정 제품 각각 최적화 모형의 결과가 6.00, 6.78로서 실적치 26.54, 30.68보다 훨씬 적게 제시되었는데, 이는 공급에 차질을 초래하지 않는 수준에서 재고 수준을 가급적 낮게 유지하고자 한 최적화 모형의 설계 의도에 따른 것으로 판단된다.

이상의 결과를 비용 측면에서 분석하면, <표 10>에서 보는 바와 같이 판매량은 동일하지만 최적화 모형을 적용한 경우가 재고 수준을 크게 낮춰, 전체적으로 연간 약 195억 원의 비용 절감이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 이는 정확한 수요량을 알고 있다는 가정 하에서 얻은 결과로, 정확한 수요 정보가 없는 실제 상황에서 기대할 수 있는 수치로 간주해서는 안 되며, 최적화 모형을 통해 얻을 수 있는 효과의 최대치 정도로 해석하는 것이 바람직하다. 이러한 확정적 모형의 한계에도 불구하고, 과거 실적에 비해 상당한 수준, 즉 순익 측면에서 최대 약

〈표 10〉 모형 수행결과와 실적치의 순익 비교

(단위 : 억 원)

	모형 적용결과	과거실적	차이
생산비용	2,983.63	3,089.91	-106.28
판매수익	3,447.49	3,447.49	-
재고관리비용	121.41	210.43	-89.02
공급부족비용	-	-	-
총 기대이익	342.45	146.98	195.47

2.33배까지 증대시킬 수 있다는 것을 확인함으로써, 실제로 최적화 모형을 활용할 경우 현행 방식보다 개선된 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

태양광 산업의 성장과 더불어 태양광 소재 산업의 생산계획을 위한 연구의 필요성이 커지고 있지만, 아직 관련 산업이 성숙하지 않은 관계로 이 문제를 다룬 연구를 거의 찾아볼 수 없었다. 이에 본 연구에서는 태양광 발전소재의 연간 생산 계획을 위한 수학 모형을 제시하였다. 즉, 잉곳 및 웨이퍼 생산 공정의 현실 제약을 고려하여 생산비용, 재고관리비용, 미판매비용, 그리고 판매수익을 모두 고려하여 전체 매출 이익을 최대할 수 있도록 선형계획 모형을 수립하였다. 이 모형의 효과를 입증하기 위해서 실제 사례를 대상으로 하여, 정확한 수요량 정보를 알고 있다는 가정 하에서 최적화 모형을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 그 결과 과거 실적치와 비교하여 전체적으로 판매량은 동일하지만, 생산량을 줄여 재고 수준을 낮춘 것으로 나타나 본 연구에서 제시한 모형의 가능성을 확인할 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 수요량에 대한 정확한 예측치를 알고 있다는 가정 하에서 모형을 적용하였다. 그러나 최근의 급변하는 시장 상황에서는 수요 예측에 더 큰 어려움이 있는 실정이고, 그 예측치의 정확도에 따라 모형의 적용 성과가 크게 달라질 수 있다. 따라서 수요량의 불확실성을 고려할 수 있는 추계학적 모형으로 개선하는 것이 보다 바람직하며, 따라서 향후 추계

학적 선형계획(Stochastic Linear Programming)모형 등을 활용함으로써 수학 모형을 통해 기대할 수 있는 실질적인 효과를 추정해 볼 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] 윤천석, 「신재생에너지」, 인피니티북스, 2009, pp.95-98.
- [2] 이근희, 홍유신, 김수영, “반도체 Wafer Fabrication 공정에서의 생산일정계획”, 『대한산업공학회지』, 제21권, 제3호(1995), pp.357-369.
- [3] 이영훈, “반도체 생산관리 연구의 동향”, 『한국생산관리학회지』, 제11권, 제3호(2001), pp.85-110.
- [4] Asmundsson, R., R.L. Rardin, and R. Uzsoy, “Tractable nonlinear production planning models for semiconductor wafer fabrication facilities,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.19, No.1(2006), pp.95-111.
- [5] Berman, S. and S.J. Hood, “Capacity optimization planning system(CAPS),” *Interfaces*, Vol.29, No.5(1999), pp.31-50.
- [6] Chou, Y. and L. Hong, “A methodology for product mix planning in semiconductor foundry manufacturing,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.13, No.3(2000), pp.278-285.
- [7] Denton, B.T., J. Forrest, and R.J. Milne, “IBM solves a mixed-integer program to optimize its semiconductor supply chain,” *Interfaces*, Vol.36,

- No.5(2006), pp.386-399.
- [8] Hung, Y. and R.C. Leachman, "A production planning methodology for semiconductor manufacturing based on iterative simulation and linear programming calculation," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.9, No.2(1996), pp.257-269.
- [9] Kacar, N.B., D.F. Irdem and R. Uzsoy, "An Experimental Comparison of Production Planning Using Clearing Functions and Iterative Linear Programming-Simulation Algorithms," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.25, No.1(2012), pp.104-117.
- [10] Kim, S. and R. Uzsoy, "Integrated Planning of Production and Engineering Process Improvement," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.21, No.3(2008), pp.390-398.
- [11] Ponsignon, T. and L. Monch, "Heuristic approaches for master planning in semiconductor manufacturing," *Computers and Operations Research*, Vol.39(2012), pp.479-491.
- [12] SolarPower Europe, *Global Market Outlook for Solar Power/2015~2019*, 2014.
- [13] Wu, J.Z. and C.F. Chien, "Modeling strategic semiconductor assembly outsourcing decisions based on empirical settings," *OR Spectrum*, Vol.30, No.3(2008), pp.401-30.