

최적 생산용량결정에 대한 연구 분석

The Research Analysis of Optimal Capacity Decision

장일환

고려대학교 산업시스템 정보공학과 (zzang7226@korea.ac.kr)

Abstract

Due to rapid technology shifts and demand uncertainty, there is a high risk that inventoried products will become obsolete. Consequently companies have to decide capacities considering product life cycle and demand variation. In this paper, I will analyze previous research, and then provide taxonomy of them and propose further research directions.

1. 서론

현대사회는 수요변동이 급격해짐에 따라 다품종 제품이 대량으로 출시되고 있다. 또한 인터넷을 통한 전자상거래, 아웃소싱 및 전략적 제휴가 활성화되면서 기업 간 경쟁이 치열해지고 그 범위가 확대되고 있다. 현대사회가 이렇게 급격히 변동함에 따라 기업들은 생산량 추가 및 감소에 대한 제빠른 의사결정을 내림과 동시에 많은 아이템들에 대한 적절한 생산용량할당을 할 수 있도록 하는 생산용량결정 모델에 대한 연구가 활발해지고 있다. 소규모의 수요하락에 생산설비를 교체하거나 소규모의 수요상승에 생산설비를 추가한다면 설비와 관련된 막대한 자본투자비용이 발생하기 때문에 고객수요 특성, 계획기간, 생산용량조정리드타임에 대한 정확한 이해가 요구된다. 반도체나 자동차 산업, 철강산업 등의 설비집약적 산업에 대해서 이러한 생산용량확장 및 축소문제는 더욱 중요하다. 예를 들어 하나의 반도체 생산공장을 건설하기위해서 대략 십억 달러의 비용이 드는 반면에 반도체 생산기계를 추가하는 비용은 400~500만 달러의 비용이 든다.

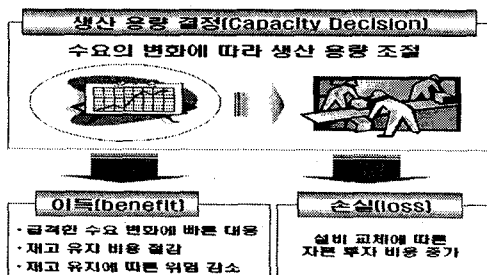


그림 1. 생산용량결정에 따른 이득과 손실

또한 급격한 기술변화로 인해 제품의 수명주기가 점점 짧아짐에 최적 생산용량 결정문제는 더욱 중요해 지고 있다. 제품 수명주기가 짧은 전자제품

의 경우 하루가 다르게 신제품들이 등장하고 있다. 따라서 기업은 많은 종류의 제품들에 대해서 재고를 다량으로 보유하는 것은 막대한 위험이 따르기 때문에 재고유지와 생산용량조정간의 상관관계를 고려한 최적의 생산용량결정이 요구된다.

생산용량 결정에 대한 문제는 오랫동안 연구되어 왔지만 시장이 불확실하고 경쟁이 치열해진 요즘사회에서는 더욱 중요하다. 우리는 본 논문에서 기존의 생산용량결정에 대한 연구 분석을 통해 모델의 특성에 따른 분류를 제시하고 이를 토대로 추후 연구 과제를 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 생산용량결정에 대한 연구내용 및 적용분야를 소개하고 3장에서 모델 별 특성에 따라 분류기준을 제시한다. 4장에서는 3장에서 분류된 기준에 따라 항목별로 기존 연구를 분석하고 마지막으로 5장에서 분석내용 요약 및 향후 연구대안을 제시한다.

2. 생산용량결정

생산용량결정에 대한 문제는 수요의 불확실성에 대응하기 위해 '언제 생산용량을 결정 또는 조정할 것인가?', '얼마나 생산용량을 조정할 것인가?', '어떤 형태로 생산용량을 확보할 것인가?'에 대한 문제와 관련된다. 생산용량은 일반적으로 기업이 생산할 수 있는 최대 생산량으로써 정의된다. 생산용량결정은 다음과 같은 다양한 연구 분야에서 적용될 수 있는데 각 분야 별로 목적에 따라 제시되는 가정 및 접근 방법의 차이가 존재한다.

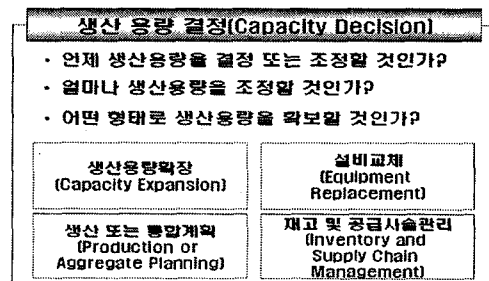


그림 2. 생산용량 결정 적용분야

• **생산용량확장(Capacity Expansion)**
생산용량확장(capacity expansion)에 관한 연구는 추가 생산용량의 규모, 시기, 구매지역을 결정하는 것과 관련이 있다. 이 분야의 초기연구는 경제성장에 따라 증가하는 고객수요를 어떻게 만족시킬 것인가에 대한 문제와 관련된다.

- **설비교체(Equipment Replacement)**
설비교체분야에 대한 연구는 수요변화와 규모의 경제 효과를 무시하고 생산용량조정을 위한 설비교체에 초점을 맞춘다. Rajagopalan (1998)은 확정적 수요를 가정한 생산용량확장과 설비교체를 통합접근 및 관련 연구동향을 제시하였다.
- **생산 또는 통합계획(Production or Aggregate Planning)**
생산 또는 통합계획에 대한 연구는 특정 계획기간 동안 고객수요를 만족시키기 위해서 어떤 생산활동들에 제한된 자원을 추가하거나 할당할 것인가에 대한 문제와 관련된다.[Grave (2002)].
- **재고 및 공급사슬관리(Inventory and Supply Chain Management)**
재고 및 공급사슬관리 분야에 대한 연구는 다단계 재고시스템(Multi-echelon Inventory System)을 통한 물류의 흐름과 관련이 있다. 통합계획에 대한 연구와는 대조적으로 이 분야는 수요불확실성을 고려하나 생산용량은 거의 다루지 않는다. 일반적으로 이 분야에서 생산용량은 확정적이고 생산량에 대한 상한한계를 나타낸다. [Van Mieghem(2003)].

3. 생산용량결정의 분류기준

생산용량결정에 관한 기존의 연구들은 각 적용분야 및 기업 특성에 따라 서로 다른 접근방법이나 가정을 제시하였다. 우리는 생산용량결정에 대한 연구 분석을 통해 다음과 같은 기준에 따라 연구를 분류하였다.

3.1 수요의 형태에 따라

생산용량결정 모델에서 고객의 수요함수에 따라 확정적인 형태와 확률적인 형태로 나눌 수 있다. 따라서 관련 연구를 고객수요특성에 따라 다음의 두 가지 경우로 분류하였다.

1) 확정적 수요(Deterministic Demand)

고객수요가 알려진 형태의 상수라고 가정하거나 수요함수의 형태가 시간에 따른 확정적 함수의 형태를 가질 경우 확정적 수요를 가진 모델로 분류한다. 확정적 수요를 갖는 모델은 일반적으로 문제해결에 대한 접근이 용이하나 현실에서의 고객 수요는 알려져 있지 않은 경우가 많기 때문에 앞서거나 이와 관련된 연구를 직접 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 따라서 확률적 수요 모델의 근사 최적해를 도출하기 위한 상한 또는 하한 한계로 적용되는 경우가 많다. 일반적으로 이런 확정적 수요를 가정한 연구는 조정시기, 조정규모, 설비의 위치 등에 관련해서 동적계획법, 수리계획법, regenerative sequence 등을 통해 접근되었다.

2) 확률적 수요(Stochastic Demand)

고객수요가 무작위 또는 확률적으로 도달하는 경우 확률적 수요를 가진 모델로 분류한다. 확률적 수요를 갖는 모델은 문제에 대한 접근이 어렵기 때문에 일반적으로 확률분포함수의 형태에 대한 가정을 적용한다. 확률적 모델에 대한 연구는 확정적 수요가 시간에 따라 증가한다는 가정을 도입함으로써 문제를 완화시키는 것으로

시작 되었다.

3.2 시간의 형태에 따라

생산용량결정 모델에서 생산용량조정에 필요한 설비구매시기의 변수형태에 따라 이산시간과 연속시간을 가지는 모델로 나뉜다. 즉 설비구매시기의 시간 형태가 이산형 속성을 가정하면 이산시간모델, 연속형 속성을 가정하면 연속시간의 모델로 구분된다.

1) 이산시간모델(Discrete Time)

이산시간모델에서는 생산용량을 구성하는 설비의 수와 총 계획기간에 따라 고려해야 하는 경우의 수가 곱의 형태로 늘어나게 되므로 문제가 상당히 복잡해진다. 일반적으로 이산형의 시간을 다룬 생산용량계획 문제는 확률계획법을 통해 접근될 수 있다. 고객수요의 불확실성은 일반적으로 고객수요의 시나리오에 의해서 표현될 수 있지만 고객시나리오의 수가 증가할수록 해에 대한 경우의 수가 지수적으로 증가하기 때문에 시나리오가 많은 경우 문제를 해결하기가 어렵다. 이산시간문제는 또한 MDPs(Markov Decision Processes)로 접근할 수 있다. 확률계획법같이 MDPs는 이미 일반적으로 널리 쓰이는 방법으로서 모델을 세우는데 있어서 유연성을 제공하지만 이런 모델 설계의 유연성이 현실 문제의 규모나 복잡성을 다루는 데 있어서 최적해를 찾기가 어렵다는 단점이 있다.

2) 연속시간모델(Continuous Time)

시간이 연속변수라면 생산용량확장문제는 최적계획문제(optimal planning problem)가 아닌 최적관리문제(optimal control problem)로 공식화될 수 있고 목적함수가 일반적으로 시간에 따른 관련비용(생산, 용량확장, 재고 등)의 적분형태로 나타난다.

3.3 결정변수로써 리드타임의 고려 여부에 따라

생산용량결정 모델에서 생산용량조정리드타임은 용량조정을 위한 설비구매 후 새로 추가된 생산용량이 가용할 때까지의 시간을 나타낸다. 고객의 확률적 수요의 영향으로 인해 이런 리드타임의 길이에 따라 생산용량부족이 야기될 수 있다. 우리는 관련 연구 분석을 통해 이런 리드타임효과를 고려하지 않은 경우, 리드타임이 일정한 상수인 경우, 리드타임이 결정변수인 경우로 분류하였다.

1) 리드타임을 고려하지 않은 경우 (No Leadtimes)

생산용량조정리드타임이 모델에 도입되는 경우 그 속성에 따라 모델의 공식화가 복잡해질 수 있다. 따라서 이런 모델들은 리드타임에 따른 생산용량부족 효과를 추가로 고려하지 않고 필요시 일시적으로 생산용량이 조정된다고 가정하였다.

2) 일정한 생산용량조정리드타임 (Constant Leadtimes)

일정한 생산용량조정 리드타임을 가진 모델에서는 리드타임을 일정한 상수라고 가정함으로써 이런 리드타임 만큼 생산용량을 미리 확장하거나 확장될 생산용량보다 더 크게 확장함으로써 리드타임에 따른 생산용량부족 문제에 접근했다.

3) 결정변수로서의 생산용량조정 리드타임 (Leadtimes as Decision Variable)

생산용량조정 리드타임을 결정변수로 고려한

모델에서는 생산용량조정리드타임이 다양한 요인들에 의해 변할 수 있기 때문에 이런 리드타임은 생산용량 조정 시기, 조정량 등과 함께 동시에 결정된다.

4. 분류기준에 따른 관련 연구 분석

본 장에서는 3장에서 제시된 분류기준에 따라 분류틀을 제시하고 각 항목들에 대한 관련 연구를 고찰한다.

<표 1> 생산용량결정 모델에 관한 분류표

	수요형태	시간형태	리드타임
Manne(1961)	확정적	이산시간	없음
Koontz와 Shipley(1975)	확률적	이산시간	없음
Freidenfelds(1980)	확률적	이산시간	없음
Rocklin et al(1984)	확률적	이산시간	없음
Bean et al(1985)	확률적	이산시간	없음
Fong과 Srinivasan(1986)	확정적	이산시간	없음
Hiller와 Shapiro(1986)	확률적	이산시간	없음
Neebe와 Rao(1986)	확정적	이산시간	없음
Davis et al(1987)	확률적	연속시간	일정
Erlenkotter et al.(1989)	확률적	연속시간	결정변수
Li와 Tirupati(1994)	확률적	이산시간	없음
Bashyam(1996)	확률적	이산시간	없음
Khmelnitsky와 Kogan(1996)	확정적	연속시간	없음
Angelus et al(1997)	확률적	이산시간	없음
Rajagopalan et al(1998)	확정적	이산시간	없음
Benavides et al(1999)	확률적	연속시간	일정
Bhatnagar et al.(1999)	확률적	이산시간	없음
Harrison과 Van Mieghem(1999)	확률적	연속시간	없음
Ryan(2004)	확률적	이산시간	일정

4.1 확정적 수요/이산시간/리드타임 없음

Neebe와 Rao(1986)는 생산용량 확장을 결정하는 문제에 대해 최단경로와 라그랑지안 완화기법을 도입했다. Fong과 Srinivasan(1986)은 수요가 시간에 따라 증가함에 따라 동시에 설비용량이 증가하는 경우를 가정한 운송문제(transportation problem)에 대해서 연구했다. 확정적 수요와 관련된 최근의 연구로 Rajagopalan et al(1998)은 설비 도착시간이 알려져 있거나 알려져 있지 않은 경우에 대해서 확정적 비감소수요(nondecreasing demand)를 고려한 설비교체문제를 연구하였다. 그들은 최적해에 대한 구조적 성질을 제시하고 동적계획법을 통한 접근을 실시하였다.

4.2 확률적 수요/이산시간/리드타임 없음

Koontz와 Shipley(1975), Freidenfelds(1980)는 Mann의 확정적 접근방식에서 벗어나 확률적 생산용량확장문제로 확장했다. 위의 연구들은 수요가 출생-소멸(birth-death)과정이나 Poisson과정이

라고 가정했고 원문제의 최적해를 구하는데 이용될 수 있는 동등한 확정적수요를 어떻게 생성시킬 것인지를 보였다. Rocklin et al.(1984)는 특정한 경우(수요가 생산용량을 초과할 때 생산용량을 적어도 그 부족분만큼 확장)와 비용합수에 대한 확실한 조건하에서 (s,S) 용량확장/축소정책의 최적성을 증명하였다. 고객수요가 브라운 운동(Brownian motion)이나 출생-소멸과정으로 변환되는 경우에 대해 Bean et al(1985)은 확정적 수요를 가질 때와 유사한 확률적 모델로 확장했다. Li와 Tirupati(1994)는 다수의 제품에 대해 유동적인 생산용량과 고정적인 생산용량확장을 고려한 휴리스틱기법을 제시했다. Angelus et al.(1997)은 상관관계가 높고 확률적으로 증가하는 고객수요와 설비비가에 대한 고정비용을 가정한 용량확장문제를 연구하였다. 그들은 최적 생산용량확장정책의 기준이 되는 (s,S)정책의 모수가 거의 최근에 관찰된 수요에 의존한다는 것을 보였다. Hiller와 Shapiro(1986)는 총 기대생산비용이 단계적 선형 함수에 의해 추정되는 학습효과를 고려한 혼합정수계획법을 제시했다. Bhatnagar et al.(1999)는 MDPs를 이용해서 설비폐기와 재고유지를 고려한 생산용량확장모델을 설계했다.

4.3 확률적 수요/이산시간/일정한 리드타임

Ryan(2004)은 지수적으로 증가하는 불확실한 수요와 일정한 생산용량조정리드타임을 고려한 생산용량확장모델을 제시했다. 그는 수요에 관한 모수와 생산용량조정리드타임이 생산용량확장시기에 영향을 미친다는 것을 수치적 결과를 통해 제시했다.

4.4 확정적 수요/연속시간/리드타임 없음

확정적 수요를 가정한 연속시간생산용량결정에 대한 연구는 이 분야의 초기연구로써 시간에 따라 증가하는 수요를 가정한 단일 제품 모델을 고려한 Manne(1961)에 의해 시작되었다. Manne는 랜덤수요가 Wiener process에 의해 모델화된다면 수요의 불확실성에 대한 효과는 이자율의 적절한 증가에 의해 정량화될 수 있다는 것을 보였다. Khmelnitsky와 Kogan(1996)은 확정적 수요에 대한 연속시간 통합생산계획에 대한 최적관리에 대한 접근법을 제시한다. 제시된 접근법은 계층적인 수준에서 통제 가능한 생산률, 초과시간, 용량 확장률에 관한 미분 방정식의 형태로 생산과 용량 확장의 프로세스를 설명한다. 이러한 접근법은 크게 변동하는 수요와 비선형의 비용합수를 고려할 때 유용하다.

4.5 확률적 수요/연속시간/리드타임 없음

연속시간에 대한 확률적 수요를 가진 생산용량결정 모델은 최근에야 연구되었다. 게임이론 기법과 관련해서 Bashyam(1996)은 두 경우에 대한 확률적 수요상황을 고려한 복잡적 시장(duopolistic market)을 모델화함으로써 이 분야의 새로운 연구방향을 제시했다. Harrison과 Van Mieghem(1999)은 현재의 연구들이 연속시간, 이산형 용량확장, 단일제품의 경우에 대한 연구가 활발한 반면에 이산시간, 연속형 용량확장, 다수의 제품을 가정한 모델을 연구했다.

4.6 확률적 수요/연속시간/일정한 리드타임

Davis et al.(1987)은 자본투자율함수로 생산용량확장률을 조정할 수 있다는 가정 하에 누적 투

자비용이 이산적 용량단위의 무작위가격(random price)에 도달하면 그 단위만큼 생산용량을 구매하는 것이 총비용을 절감시킨다는 것을 보였다. 이 논문은 일정하지 않은 제조업보다 인프라구조 산업에서 흔히 발생하는 투자율과 무작위적 생산 용량가격을 소개함으로써 전형적인 생산용량조정 모델에 대한 개념을 확장시켰다. Benavides et al(1999)은 설비그룹을 구별하지 않고 반도체산업에 대한 최적 생산용량확장시기에 대해 연구하였다.

4.7 확률적 수요/연속시간/리드타임 결정변수

Erlenkotter et al.(1989)는 생산용량확장완료기간이 고정되어있고 생산용량확장리드타임이 결정변수인 단일 자원을 갖는 모델을 제시했다. 그들은 확정적 수요를 가진 생산용량결정 모델과 비교해서 수요의 불확실성이 최적 확장기간을 줄이는 효과가 있다는 것을 보였다.

5. 결론

현대사회는 수요가 급격히 변동하고 기술변화가 빠르게 진행되면서 생산용량을 적절하게 할당하고 조정하는 문제가 기업의 핵심적인 사안이 되었다. 이에 따라 수많은 연구가 이루어졌고 관련 연구가 계속 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존의 생산용량결정모델에 대해 분석하고, 그 결과 관련 연구에 대한 몇몇 주요 특성을 도출하였고, 이 특성에 따라 관련 연구를 분류하였다.

서론에서 언급한 것처럼 생산용량결정은 다양한 문제로서 정의될 수 있고 분야별 특성에 따라 다양하게 접근할 수 있다. 그러나 현실 사례들은 규모가 크고 시스템이 복잡하기 때문에 기존의 연구들을 현실문제에 적용하는데 있어서 어려움이 많고 아직 해결되지 않은 연구 분야가 많다. 본 연구를 통해서 분석한 내용을 토대로 다음과 같은 연구 방향을 제안한다.

지금까지의 연구 결과를 보면 관련된 거의 모든 연구가 생산용량조정에 걸리는 리드타임을 알려진 상수로 가정하거나 고려하지 않았다. 실제 사례에서 기업이 생산용량 조정을 위해서 설비를 구매하거나 인력을 투입하는 데는 리드타임이 존재한다. 이런 리드타임은 생산용량조정 규모나 생산설비구매위치 등에 따라 변할 수 있다. 또한 인터넷을 통한 전자상거래환경은 이런 설비구매와 관련된 공급자의 선택에 있어서 유연성을 제공하기 때문에 다수의 공급자가 판매하는 설비에 대한 리드타임과 비용간의 상관관계를 고려해야 된다. 따라서 이에 관한 연구가 필요하다.

또한 기존 생산용량결정모델에서 고객수요가 연속적으로 증가하거나 감소하는 것에 비해 생산용량의 확장 및 축소는 이산적 속성을 가지고 있다. 따라서 생산설비구입 및 폐기 직후의 기간은 일반적으로 생산용량이 초과되어 있거나 부족한 상태에 있다. 기존의 생산용량결정모델은 이런 문제에 대해 초과생산용량을 다른 제품을 생산하는데 이용하거나 제품 랫 규모나 재고수준을 하향조정하는 방안이 제시되었다. 또한 생산용량확장비용과 재고유지비용의 차이가 큰 경우 재고 비축을 통해 생산용량확장과 관련된 자본투자를 지연시키는 대안이 제시되었다. 그러나 전자상거래의 발달에 따라 기업들은 전자상거래를 통해 부족재고를 구매하거나 초과재고를 처리할 수 있다. 하지만 이러한 전자상거래를 고려한 연구는 거의 진행되지 않았다. 따라서

전자상거래를 기존의 생산시스템에 도입하는 추가적인 대안을 고려할 수 있고, 이에 대한 연구가 필요하다.

지금까지 생산용량결정에 관해 이루어졌던 연구를 분석하고 추후 연구 방향에 대해 몇 가지 제안을 하였다. 이상에서 볼 수 있듯이 생산용량결정에 관한 연구는 지금까지 많이 진행되어왔지만, 시장환경의 변화에 따라 많은 문제들을 추가적으로 고려할 필요성이 생겨났고, 이러한 문제들을 해결하는 지속적인 연구가 가능할 것으로 보여 진다.

참조문헌

- Bashyam, T.C.A. (1996), Competitive capacity expansion under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Vol. 95: 89-114.
- Bean, J.C and R.L. Smith, (1985), Optimal capacity expansion over an infinite horizon. *Management Science*, Vol.31, No.12 : 1523-1532.
- Davis, M.H.A., M.A.H. Dempster, S.P. Sethi and D. Vermes (1987), Optimal capacity expansion under uncertainty. *Advances in Applied Probability* Vol.19: 156-176.
- Erlenkotter, D. (1974), Dynamic programming approach to capacity expansion with specialization. *Management Science*. 21, 360-368.
- Fong, C.O. and Rao, M.R. (1975), Capacity expansion with two producing regions and concave costs. *Management Science*. 2, 332-339.
- Freidenfelds, J. (1980), Capacity Expansions when Demand is a Birth-Death Process. *Operations Research*, 30, 907-947.
- Hiller, R.S. and J.J. Shapiro (1986), Optimal capacity expansion planning when there are learning effects. *Management Science*, Vol.32, No.9 : 1153-1163.
- Graves, S. C. (2002), *Manufacturing planning and control*. P. Pardalos, M. Resende, eds. Handbook of Applied Optimization. Oxford University Press, NY, 728-746.
- Khmelnitsky, E. and K. Kogan (1996), Optimal policies for aggregate production and capacity planning under rapidly changing demand conditions. *International Journal of Production Research*, Vol.34, No.7 :1929-1941.
- Koontz, W.L.G. and Shipley R.S. (1975), Application of Subscriber Pair Gain Systems in an Environment of Stochastic Demand. *In proceeding of the Sixth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation*, 315-320.
- Li, S. and D. Tirupati (1994), Dynamic capacity expansion problem with multiple products: Technology selection and timing of capacity additions. *Operations Research*, Vol.42, No 5: 958-976.
- Manne, A.S. (1961), Capacity expansions and probabilistic growth. *Econometrica* 29, 632-649.
- Neebe, A.W. and M.R. Rao (1986), Sequencing capacity expansion projects in continuous time. *Management Science*, Vol.32, No.11: 1467-1479.
- Rocklin, S.M. (1984), Stochastic Optimization Models in Evolutionary Ecology (Manuscript in preparation).
- Van Mieghem, J.A. (2003), Capacity Management, Investment, and Hedging: Review and Recent Developments, *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(4), 269-302.