creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

DRAM과 Flash 메모리 칩 가격 불확실성을 고려한 생산자의 최적 생산 용량 투자 전략 : 2 요인 실물 옵션 접근

Optimal Capacity Investment Strategy for DRAM and Flash Memory Chip Manufacturer Considering Price Uncertainty: Two-Factor Real Option Approach

2021 년 2 월

서울대학교 대학원

산업공학과

황 재 성

DRAM과 Flash 메모리 칩 가격 불확실성을 고려한 생산자의 최적 생산 용량 투자 전략 : 2 요인 실물 옵션 접근

Optimal Capacity Investment Strategy for DRAM and Flash Memory Chip Manufacturer Considering Price Uncertainty: Two-Factor Real Option Approach

지도교수 이 덕 주

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021 년 1 월

서울대학교 대학원

산업공학과

황 재 성

황재성의 공학석사 학위논문을 인준함

2021 년 2 월

위 원 장 _____ 홍 유 석 _____ (인)

부위원장 _____ 이 덕 주 _____ (인)

위 원 _____ 윤 명 환 _____ (인)

초록

메모리 반도체 산업은 생산 용량 투자 비용이 매우 크고, 투자 후 양산까지 긴 시간이 걸리기 때문에, 시장 예측을 통한 투자 전략 수립이 생산자의 핵심적인 의사 결정 행위이다. 메모리 반도체는 DRAM과 Flash로 나뉘며, 두 제품군은 가격 변동성 측면에서 서로 다른 개별 시장을 형성하고 있다. 그러나 DRAM과 Flash는 대부분 생산자가 동일하기 때문에 이윤 극대화를 위한 최적 생산 용량 투자 문제를 해결하기 위해서는 두 제품군의 시장을 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서는 두 제품군의 가격 불확실성을 동시에 반영한 2 요인 복합 실물 옵션 기법을 사용하여 생산자 이윤 극대화를 위한 최적 생산 용량 전략을 분석하였다. 분석결과, DRAM 가격의 변동성이 생산 용량 투자의 규모와 타이밍에 더 큰 영향을 주는 사실이 수치 예제를 통해 발견되었고, DRAM의 가격이 하락하지 않는 한 Flash 가격 변동과 무관하게 항상 최대 생산 용량에 투자하는 것이 최적 전략으로 도출되었다. 이는 Flash의 낮은 단위 마진이 수요 증가에 의한 이윤 확대를 상쇄시키기 때문인 것으로 해석되며, Flash 이윤의 개선을 위해서는 Flash의 수율을 95% 이상 확보해야 한다는 조건을 도출하였다. 또한, 민감도 분석을 통해 수율, 생산 용량 확대 비용, 전환 효율 등 생산자의 경영 환경 변화에 따른 최적 생산 용량과 기대 이윤의 관계를 관찰하였다. 본 연구에서는 메모리 반도체의 제조 환경에서 반드시 고려되어야 하는 상황인 DRAM과 Flash를 동시에 시장에 공급하는 생산자의 의사 결정 문제에 다세대 제품 생산에 따른 전환 효율의 변화와 같은 공학적 핵심 고려 요인을 반영한 모형을 제시하였고, 이러한 시도에서 본 연구의 주요한 차별성을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 메모리 반도체, 가격 불확실성, 2 요인, 실물 옵션, 최적 생산 용량

학번: 2019-22377

목차

초록 ii

목차 iii

표 목차 v

그림 목차 vi

제 1 장 서론 1

1.1 연구 배경 1

1.2 문제 정의 3

1.3 논문 구성 6

제 2 장 선행연구 7

2.1 고정 생산 용량에서 생산 설비 최적 할당에 관한 선행 연구 7

2.2 제품 수명 주기 고려한 수요 예측에 관한 선행 연구 8

2.3 가격, 수요 고려한 생산 용량 최적화에 관한 선행 연구 8

제 3 장 2 요인 복합 실물 옵션 모델 13

3.1 기본 가정 및 모델의 구조 13

3.2 메모리 칩 가격 변동성 추정 13

3.3 메모리 칩 수요 확산 예측 17
3.4 생산자 이윤 최적화 함수 19
3.5 2 요인 복합 실물 옵션 모델 23

제 4 장 분석 25

4.1 수치 예제 데이터 개요 25
4.1.1 복합 옵션 모형 설계 27
4.1.2 가격 변동성 추정 28
4.1.3 수요 예측 29
4.2 수치 예제 30
4.2.1 실물 옵션 분석 결과 30
4.2.2 민감도 분석 및 결과 36
4.2.3 정적 순현가법과 전략적 순현가법 비교 41

제 5 장 결론 및 향후 연구 43

참고문헌 46

Abstract 50

표 목차

표 3.1 반도체 가격 변화 정규성 검정 14
표 3.2 DRAM, Flash 가격 변동성 이항 옵션 표기 15
표 3.3 DRAM, Flash 가격 2 요인 위험 중립 확률 16
표 3.4 Norton-Bass 모델 표기 18
표 3.5 생산자 이윤 함수 표기 21
표 4.1 수치 예제 매개변수 26
표 4.2 DRAM, Flash 가격 위험 중립 확률 28
표 4.3 Norton-Bass 모델 매개변수 추정 30
표 4.4 민감도 분석 구조 37

그림 목차

그림 1.1 전세계 메모리 반도체 가격 및 판매 동향 2

그림 1.2 메모리 반도체 전환 효율 3

그림 1.3 메모리 반도체 수요 증가와 생산자 전략 4

그림 1.4 메모리 반도체 생산 용량 확대와 시장 공급 4

그림 1.5 메모리 반도체 생산자별 시장 점유 현황 5

그림 3.1 연구 Framework 13

그림 3.2 Geometric Brownian Motion 2 요인 이항 가격 변동성 모형 16

그림 3.3 복합 옵션 진로 모형 23

그림 4.1 수치 예제의 복합 옵션 의사 결정 나무 27

그림 4.2 메모리 반도체 가격 추정 28

그림 4.3 메모리 반도체 수요 추정 29

그림 4.4 이항 옵션 변동성과 옵션 매트릭스 31

그림 4.5 2 요인 이항 옵션 변동성과 옵션 매트릭스 32

그림 4.6 2 요인 복합 실물 옵션 분석 결과 33

그림 4.7 이산 시점별 생산자 이윤과 설비 세트 M 할당 35

그림 4.8 DRAM, Flash 가격과 설비 세트 M 할당 35

그림 4.9 Capex에 대한 민감도 분석 결과 38

그림 4.10 전환 효율에 대한 민감도 분석 결과 38

그림 4.11 시장 상관계수(ρ)에 대한 민감도 분석 결과 39
그림 4.12 수율에 대한 민감도 분석 결과 40
그림 4.13 전략적 순현가 가치와 정적 순현가 가치 비교 41

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

반도체 산업은 생산 라인당 투자 비용이 $10B 내외로 매우 높고, 투자 집행 후 실제 양산까지 1~3년 정도의 긴 시간이 필요하다는 특징이 있다 [1], [2]. 반도체는 크게 메모리 반도체와 비메모리 반도체로 구분할 수 있는데, 비메모리 반도체는 설계와 생산이 분리된 밸류 체인의 특성으로 인해 생산자가 제품의 가격과 수량을 미리 고객社와 계약하여 비즈니스의 불확실성을 줄일 수 있다 [3]. 반면에, 메모리 반도체는 수요와 공급에 따른 시장 원리를 통해 거래가 이루어지므로, 생산자 간 경쟁, 수요와 공급의 불일치, 국제 무역 환경 등 다양한 원인으로 인해 높은 가격 변동성을 보인다. 즉, 메모리 반도체 산업은 반도체 산업의 기본 특성에 더해, 미래 가격에 대한 높은 불확실성이라는 위험 요소를 품고 있다 [4]. 메모리 반도체는 다시 DRAM과 Flash 메모리로 나뉘는데, DRAM(Dynamic Random Access Memory)은 CPU, MPU, AP 등 프로세싱 칩의 연산을 돕는 역할을 하므로 빠른 처리 속도가 제품 성능의 핵심 조건이며, Flash 메모리는 대량 데이터의 저장이 중요하게 여겨진다. 따라서, 두 제품군은 고객사의 비즈니스 모델 또는 IT 제품의 사용성 차이에 의해 개별 시장을 형성한다. 그림 1.1[①]은 최근 10년간 DRAM과 Flash 각각 2개 주요 제품에 대한 분기별 가격과 수요에 대한 그래프이다. 먼저, 점선으로 표현된 수요는 앞 세대가 고점을 지나 저물면, 다음 세대가 증가하는 전형적인 다세대 확산 형태의 수명

---

① IDC, Korea

주기를 보여준다. 반면, 실선으로 표현된 가격은 분기별로 높은 변동성을 보이는데, 이는 앞서 언급하였듯이 가격이 수요 이외에도 다양한 요인의 영향을 받기 때문이며, 실제 메모리 가격은 이러한 요인들이 반영되어 분기별로 시장에서 결정된다. 참고로, Flash 메모리는 V-NAND가 전체 시장 거래량의 95% 이상을 차지하므로, 본 연구에서 Flash 제품의 분석은 V-NAND 데이터로 진행하였다 [5].

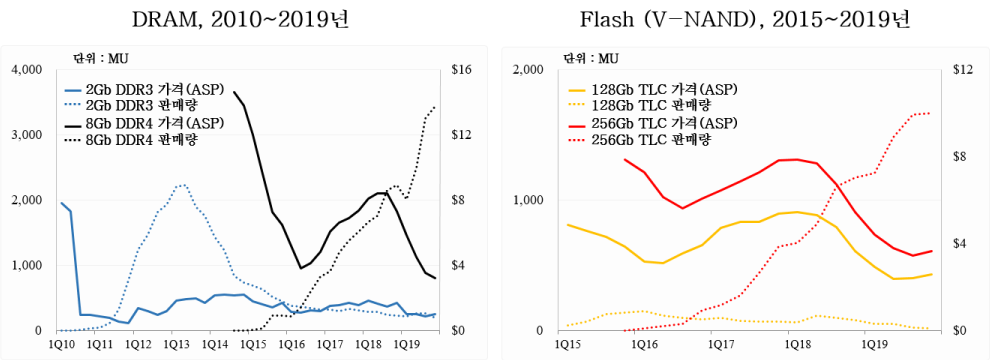

그림 1.1. 전세계 메모리 반도체 가격 및 판매 동향

21세기를 전후하여 메모리 칩은 1965년 무어의 법칙과 2002년 황의 법칙을 비교적 충실히 따르면서 매년 단위 면적당 저장용량을 약 2배씩 높여왔다 [6]. 2000년 전후 PC, 2008년 이후 스마트폰, 2016년 전후 클라우드 서버 등을 필두로 IT 산업은 폭발적으로 성장해 왔다. 이러한 전방 산업의 발전은 곧바로 성능이 개선된 메모리 칩의 수요 증가로 이어지며, 메모리 칩 생산자는 시장에서의 지위와 점유율을 유지하기 위해 성능이 개선된 신제품을 더 많이 만들어서 시장에 공급해야 한다 [7]. 또한, 메모리 칩은 기존 세대의 최대 생산량 시점에 주로 다음 세대 제품을 출시하는데, 이때 기존 세대 제품의 단위 용량당 가격은 신제품 가격의 절반 정도까지 떨어지는 경향이 있다 [8]. 제조업체는 신제품의

집적도(단위 면적당 저장 용량) 증가와 양산성 제고를 통해 기존 세대 제품의 가격 하락에 의한 이윤 감소를 극복하는데, 이렇게 축적된 기술력과 대량 생산을 통한 원가절감 현상을 learning curve라고 한다 [9], [10]. 반도체 업계에서는 이를 '전환 효율' 이라고 부르는데, 이는 그림 1.2와 같이 생산 설비에 대한 추가 투자 없이 기존보다 더 많은 저장 용량을 생산하는 것을 의미한다.

그림 1.2. 메모리 반도체 전환 효율

1.2 문제 정의

최근 DRAM과 Flash는 신제품 공정 난이도의 증가로 전환 효율의 감소가 뚜렷하게 관찰된다 [11]. 이는 시장의 수요 증가가 일정하다고 가정할 때, 그림 1.3처럼 생산자는 과거보다 생산 용량 확대에 더 많은 투자를 해야한다는 의미이다. 또한, 전환 효율의 감소는 메모리 단위 용량당 마진(가격-원가) 감소로 연결되기 때문에, 메모리 칩 생산자들은 과거에 비해 보수적 투자 전략을 견지 할

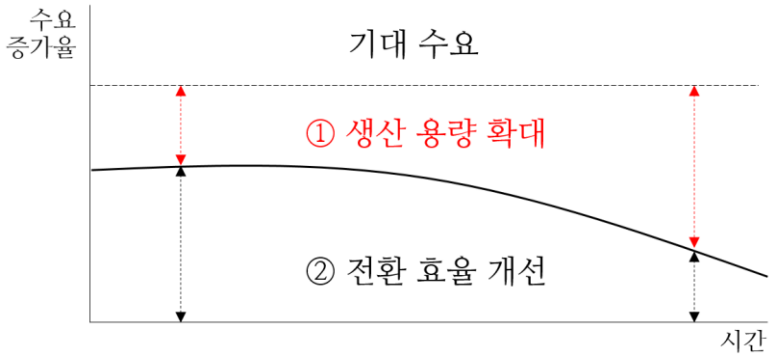

그림 1.3. 메모리 반도체 수요 증가와 생산자 전략

수 있다. 이러한 판단은 그림 1.4처럼 시장이 팽창하는 구간에서 진입 타이밍의 지연으로 이어져 이윤 극대화 실패로 이어질 가능성이 있다 [12]. 반대로, 투자 타이밍이 너무 빠를 경우에도 공급 과잉이 발생하여 경영에 심각한 타격을 받을 수 있다 [13]. 이러한 투자 의사 결정에 대한 경영 리스크로, 과거 20여개 이상의

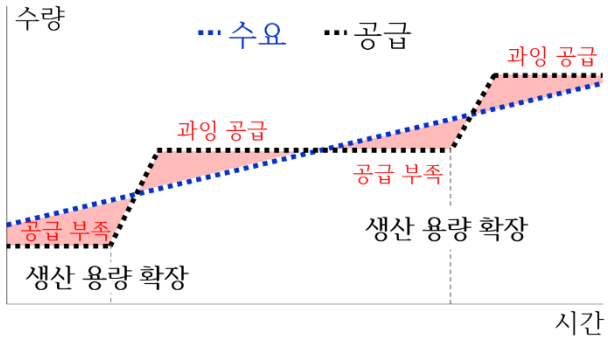

그림 1.4. 메모리 반도체 생산 용량 확대와 시장 공급

업체가 경쟁하던 메모리 반도체 시장은 그림 1.5[②]에서 보듯이 2020년 현재 DRAM 3개 업체(Samsung, Hynix, micron), Flash V-NAND 4개 업체(Samsung, Hynix, micron, Kioxia)가 과점하는 시장이 되어 있다 [14]. 그림 1.5에서 주목해야 할 부분은 Samsung, SK Hynix, Micron로 대표되는 소위 big3 업체가 DRAM과 Flash를 동시에 생산한다는 점이다. 이는 메모리 반도체 생산자의 투자 의사 결정 문제를 모델링 할 때 반드시 두 제품군의 시장을 동시에 고려해야 하는 것을 의미한다.

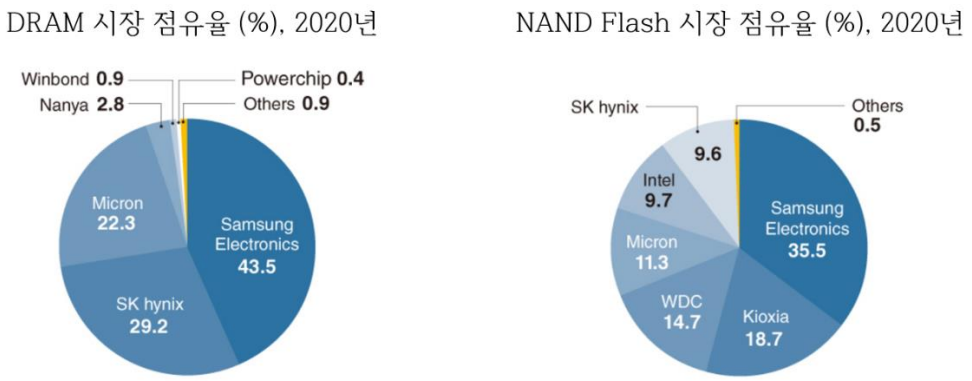

그림 1.5. 메모리 반도체 생산자별 시장 점유 현황

Geng and Jiang [15]은 반도체 생산자 이윤 극대화를 위한 다양한 최적화 기법에 대한 리뷰를 통해 생산 용량의 확대와 할당에 대한 의사 결정 문제가 경영의 핵심임을 강조하였다. 즉, 메모리 반도체 생산 용량 확대에는 막대한 시간과 비용이 소요되므로, 반도체의 미래 가격과 수요 예측을 통한 투자 의사

---

② IHS Markit, TrendForce

결정 행위는 경영의 핵심 사안이다 [12], [15]. 따라서, 본 논문은 DRAM과 Flash의 가격 변동성과 생산자의 경영 환경(수율, 전환 효율, 생산 용량 확대 비용 등)을 반영한 생산자 이윤 함수를 기반으로, 복합 실물 옵션 기법을 통해 생산자의 이윤 극대화를 위한 최적 생산 용량 투자 전략을 분석하고자 한다. 또한, 최신 시장 데이터 기반 다양한 수치 예제를 통해, 4차 산업 혁명으로 급변하는 메모리 시장에서 기업 활동에 활용 가능한 솔루션을 제시하고자 한다.

1.3 논문 구성

본 논문은 5장으로 구성된다. 제 2장에서는 선행 연구를 살펴보며, 제 3장에서는 2 요인 복합 실물 옵션 모형을 제시한다. 제 4장에서는 시장 데이터를 이용한 수치 예제와 민감도 분석을 진행하고, 끝으로 제 5장에서는 결론과 향후 연구 방향에 대해 이야기한다.

제 2 장 선행연구

반도체 분야는 지난 수십 년간 많은 연구가 진행된 분야이며, 기초과학 및 공학적 분야를 제외하면 '최적 생산 용량 계획' 측면에서 크게 3가지 관점으로 연구되어 왔다.

2.1 고정 생산 용량에서 설비 할당 최적화에 관한 선행 연구

반도체 제조 섹터에서 생산 용량 최적화 문제는 줄곧 연구의 대상이 되어왔다. 특히, 비메모리 칩의 경우 다품종 소량 생산 제조 형태가 대부분이기 때문에, 생산 설비 할당 문제는 선형 계획, 동적 계획, 혼합 정수 계획 등 다양한 최적화 기법으로 시도되었다 [16]. 과거에는 spread sheet를 활용한 설비 할당 기법이 주를 이루었지만, 2000년 전후 컴퓨팅 능력의 향상으로 Bermon and Hood [17]는 선형 계획 기반의 CAPS라는 모델을 통해 IBM社의 생산 용량 할당 문제를 풀고자 하였다. 이 모델은 고정된 수요에 대한 생산 용량 최적 할당 기법으로서, 매일 새로운 수요에 대한 선형 계획 문제를 새롭게 풀어야만 했다. 이후 Hood, Bermon et al. [18]은 4가지 생산 시나리오에 대응 가능한 확률 계획법 기반의 개선 모델을 IBM社에 제시하였다. Giegling, Verdini et al. [19]은 주어진 생산 용량을 기반으로 설비 병목 관리를 통해 최대 효율을 확보하는 CUBE라는 모델을 Motorola社에 제안하였다. 뒤에 Swaminathan [1]는 반도체 수요 불확실성을 반영한 혼합 정수 계획 기반의 생산 용량 계획 모델을 제안하였고, Barahona, Bermon et al. [20]은 복수의 수요 시나리오에 따른 공정 프로세스가 달라지는 상황을 반영하여 2단계 확률 혼합 정수 계획법을 사용하여 모든 수요

시나리오에 강건한 생산 용량 전략을 구하려고 하였다. 이러한 모델들은 단일 혹은 복수의 수요 시나리오에 대한 단기적 예측을 통해 주어진 생산 용량에서의 설비 혹은 공정 할당 문제를 다루었기 때문에, 중장기적 수요 증가에 대한 생산 용량 확대 문제에 대한 솔루션이 되지는 못했다.

2.2 제품 수명 주기 고려한 수요 예측에 관한 선행 연구

생산 용량 확대 전략을 다루기 위해서는 중장기적 수요 예측이 필요한데, 이는 기존 고객社의 반도체 교체 주기, 또는 새로운 IT 제품의 출현 등에 의한 메모리 세대별 수요 변화의 추정을 통해서 가능하다. Norton and Bass [21]는 다세대 제품 확산 모델을 통해, 신제품이 이전 세대 제품의 수요를 잠식하면서 총수요가 증가하는 DRAM의 경향을 합리적으로 추정하였다. Chien, Chen et al. [22]은 Norton-Bass 모델에 5개의 변수(시장 성장률, 가격, 반복 구매, 기술 대체, 계절 효과)를 추가하여 반도체 수요 예측을 통한 생산 용량 투자 전략을 제시하였는데, 이 모델에서 수요는 가격의 종속 변수로 두었고, 가격은 외생 변수로 설정하였다.

2.3 가격, 수요 고려한 생산 용량 최적화에 관한 선행 연구

미래의 제품 가격이나 수요 예측을 통한 최적 생산 용량 문제를 풀기 위해 다양한 최적화 방법론이 사용 될 수 있는데, 실물 옵션 기법은 그중 하나이다. 기초 자산의 미래 가치를 예측하여 단계적 투자 의사 결정을 내리는 실물 옵션 기법은 시나리오의 확률적 분석을 통한 정적인 최적화 기법에 비해 리스크를 줄일 수 있는 장점이 있는데, 이는 투자 단위가 크고, 단계적 투자 집행이 일반적인 반도체 산업의 투자 전략 수립에 적합한 기법임을 암시한다. 실물

옵션은 금융 옵션의 가치 평가 기법에 방법론적 뿌리가 있는데, 금융 옵션은 금융 투자에서 손실을 회피하기 위한 옵션 권리의 적정 가치를 찾기 위해 고안된 것이다. Black and Scholes [23]는 금융 옵션의 가치를 측정하기 위해 미래의 가격 불확실성을 확률로 반영한 Black-Scholes 모델을 제시하였고, Myers [24]는 옵션을 실물의 투자관점에서 활용할 수 있도록 실물 옵션 모델로 확장하였다. 이후 Cox, Ross et al. [25]가 실물 자산에 대한 미래 불확실성을 단순한 증가 혹은 감소라는 방향성으로 추정하는 이항 옵션 모델을 소개하여 활용성을 높였고, 현재는 여러 산업 분야에서 투자 의사 결정 문제를 다루는데 실물 옵션 기법이 활용되고 있다.

Chen, Chiang et al. [26] 은 대만의 반도체 회사 데이터를 기반으로 반도체 미래 수요의 불확실성을 실물 옵션을 통해 가치 평가하고, 전통적인 정적 순현가법과 비교하였다. 이 모델은 수요가 무한히 증가하는 경우의 수를 포함하는데, 이는 각 세대별 수명 주기를 가지는 반도체의 특성이 반영되지 않아 가치 과대 추정의 위험이 있다. Bollen [27]은 regime switch 모델을 통해 DRAM 수요의 상승 regime과 하락 regime을 확률적으로 추정하고, 각 regime의 수요 불확실성을 상승 혹은 하락의 이항 옵션으로 설정 후 중립 경로를 추가하여, 각 옵션 노드가 5개의 확률적 경로를 가지는 오항 실물 옵션 모델을 제시하였다. Bollen [27]은 오항 실물 옵션 모델을 통해 DRAM 수요의 수명 주기와 불확실성을 섬세하게 표현하였는데, 단일 세대에 대한 모델링과 수치 예제를 진행하여 다세대 제품에 대한 해법은 제시하지 않았다 [28]. Duan, Lin et al. [4]은 복합 실물 옵션 모델을 적용하여 DRAM 평균 판매 가격(ASP, Average Selling Price) 변동에 따른 단계적 생산 용량 투자 문제를 풀고자 하였다. Lukas, Spengler et al. [13]은 독일 전기차의 수명 주기를 반영한 실물 옵션 모델을 통해 전기차 배터리 공장의 투자 금액과 타이밍에 대한 분석을 시행하였다. 이 모델은 전기차의 교체 주기가 매우 길다는 이유에서 Bass 모델 기반의 단일 세대 분석을 시행하였다. 위의 3가지 선행 연구는 실물 옵션을 사용한 투자 전략 분석의

전형적인 사례이지만, 다세대 제품의 누적 수요를 고려하지 않아 장기적 총수요 증가와 다세대 간 learning curve에 의한 생산 원가 감소가 모델에 반영되지 않았다.

Chou, Cheng et al. [2]은 반도체 수요 불확실성이 GBM(Geometric Brownian Motion)을 따른다고 가정하고 실물 옵션을 활용하여 생산 용량 확대 모델을 제시하였다. 이 논문에서는 생산 원가를 고정비, 원자재비, 임금, 운영 경비로 비교적 자세하게 분류하고, 과거 데이터를 회귀적으로 추정하여 사용하였다. 다만, 반도체 가격도 과거 데이터를 활용하여 선형적으로 추정하였는데, 이러한 선형적 미래 추정으로 인해 가격 불확실성에 의해 발생할 수 있는 기업의 이윤 변화가 모델에 반영되지 못했다.

기존의 최적화 모델은 대부분 수요의 예측에 초점을 맞추고, 가격을 외생 변수로 설정하여 가격 불확실성에 의한 기업의 이윤 변화를 간과하고 있다. 반도체의 저장 용량당 가격은 장기적으로 하락한다고 볼 수 있지만, 의사 결정이 필요한 분석 기간 내에서 random walk 경향성이 관찰되며, 이는 제 3장에서 Henze-Zirkler test를 통해 실제 데이터로 증명하였다. Lepselter and Sze [8]은 DRAM 가격은 신제품의 출시와 더불어 기존 제품은 신제품의 절반까지 가격이 하락하는 것을 관찰하였고, Flamm [29]은 DRAM 가격이 컴퓨터와 같은 연관 산업 제품군의 가격에 연동해서 움직이지만, 그 진폭이 완제품 이상임을 지적하였다. 또한, Byrne, Oliner et al. [3]은 hedonic 가격 분석을 통해 2000년대 이후 MPU(Micro Process Unit) 반도체의 가격 하락 폭이 둔화됨을 확인하였다. Roy, Kim et al. [30]은 CPU 시장에 대해 가격을 전략적 변수로 취하는 leader-follower 모형이 적합함을 보임으로써 가격의 비선형성을 보였다. 다만, Roy, Kim et al. [30]은 수요를 선형 함수로 가정하고, 생산 원가를 모델에 반영하지 않았기 때문에 생산자의 이윤 모델이 불완전하다고 할 수 있다. 즉, 메모리 반도체 생산 용량 확대 최적화 문제를 풀기 위해서는 메모리 가격의 비선형적 변화, 다세대

수요의 확산, 그리고 세대별 생산 원가 하락을 모델에 반영하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 4차 산업의 본격화로 메모리 반도체 수요 증가는 쉽게 추정 가능하지만, 가격은 생산 용량 증설 시기, 경쟁사의 공급 정책 변화, 국가별 무역 관계 변화 등 수많은 내외부 변수로 인해 여전히 예측이 어렵다. 따라서, 연간 수십억 Gb가 거래되는 시장 규모를 고려할 때 가격은 생산자의 이윤을 결정하는 매우 중요한 변수라고 할 수 있다 [4], [31].

앞서 살펴본 최적화 모델들은 모두 비메모리 반도체, 또는 DRAM에 대한 생산 용량 투자 문제를 다루고 있는데, 연구 배경에서 보았듯이 DRAM과 Flash의 생산자는 대부분 동일하다. 또한, 두 제품군은 가격 변동성, 판매 수량, 신제품 출시 간격이 서로 다르므로 두 시장을 분리해서 바라보는 것이 매우 중요한데, 내가 아는 한, DRAM과 Flash의 동시 생산 상황에서 두 제품군의 가격이나 수요를 개별적으로 예측하여 최적화 문제를 푸는 선행 연구는 없었다. 반면, 이와 같은 문제에 실물 옵션을 적용하려면 DRAM과 Flash 각각의 불확실성을 반영한 2 요인 실물 옵션 모델을 사용해야 하는데, 이러한 모델은 다른 산업 분야에서 꾸준히 연구되고 있다. Boyle, Evnine et al. [32]는 복수의 기초 자산에 대한 미래 불확실성을 추정해야 하는 상황에서, 요인 간의 상관관계를 반영한 위험 중립 확률을 제시하였다. 이는 DRAM과 Flash의 가격을 2 요인으로 하는 실물 옵션 모델에 적용 가능하므로 본 논문에서도 Boyle, Evnine et al. [32]이 제시한 위험 중립 확률 식을 활용하였다. Jafarizadeh and Bratvold [33]은 장기 균형 가격과 단기 수요에 의해 변하는 단기 가격을 2 요인으로 설정하여 오일 필드 투자 모델을 제시하였다. Yu, Li et al. [34]은 중국의 지열 발전 시스템 투자 의사 결정 문제를 풀기 위해 화석 연료와 탄소배출권의 가격의 변동성을 2 요인으로 설정하여 복합 실물 옵션 기법으로 최적화 문제를 풀었다. An, Lee et al. [35]은 1 요인 복합 실물 옵션 모형과 다세대 확산 모형을 이용해 대한민국의 5세대 이동통신 서비스의 단계별 투자 전략을 연구했다. 위의 실물 옵션 연구

사례들은 ‘막대한 초기 투자 비용, 비교적 저렴한 유지 관리 비용, 수익성에 대한 높은 불확실성’이라는 측면에서 반도체 산업과 유사성이 크다.

지금까지 메모리 산업의 특성과 선행 연구 사례들을 종합해서 볼 때, 메모리 칩 생산자의 이윤 극대화 문제를 풀기 위해서는, DRAM과 Flash 두 제품의 동시 생산을 가정하고, 가격 불확실성, 다세대 수요 추정, 전환 효율 기인 생산 원가 변화 등이 생산자 이윤 함수에 반영되어야 하는 것을 알 수 있다.

제 3 장 2 요인 복합 실물 옵션 모델

3.1 기본 가정 및 모델의 구조

생산자는 충분히 넓은 물리적 공간인 팩토리를 보유하고 있으며, 현재의 시장 수요를 충족시키는 생산 용량을 팩토리 내에 보유 및 가동 중이다. 생산 용량 확대는 기존 팩토리에 신규 생산 설비 구매와 설치를 통해 가능하다. 생산자는 DRAM과 Flash 메모리 칩의 미래 가격과 수요 변화를 고려하여 이윤을 극대화하는 최적 생산 용량 확대 수준과 시점을 결정한다. 본 연구의 framework와 각 단계에서 사용하는 주요 기법은 그림 3.1과 같다.

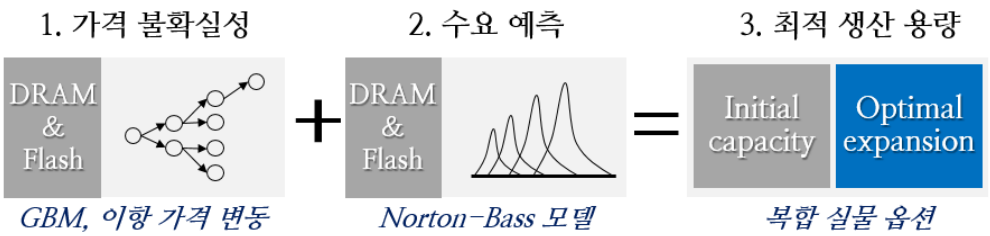

그림 3.1. 연구 Framework

3.2 메모리 칩 가격 변동성 추정

메모리 칩의 가격은 수요의 변화, 메모리 칩 생산자 간 경쟁에 의한 수급 상황, 국가 간 무역 정책, 자연 재해 등 여러 요인에 의해 높은 변동성을 보인다.

즉, 메모리 칩의 가격은 random walk 경향을 보인다고 할 수 있는데, 제 4장의 수치 예제에 사용한 데이터로 DRAM 및 Flash log 가격의 정규성 검정을 진행하였고, 표 3.1과 같이 random walk 성질을 확인하였다 [36].

	테스트	Statistic	p-value	정규성
다변량 정규성	Henze-Zirkler	0.501	0.21	YES

표 3.1. 반도체 가격 변화 정규성 검정

DRAM과 Flash 가격의 random walk 경향성이 증명되었기 때문에 두 제품군의 가격은 GBM(Geometric Brownian motion)을 따른다고 가정할 수 있고, 이를 통해 DRAM 가격과 Flash 가격 기반의 2 요인 이항 실물 옵션의 가치를 추정하고자 한다. 두 제품군의 단위는 $로 가정하였다. 2 요인 옵션에서 각 옵션 노드는 *(x, k, l)*로 표현할 수 있는데, '*x*'는 이산적 의사 결정 시점, '*k* '와 '*l* '은 각각 *x* 시점까지 DRAM과 Flash 가격의 변화를 나타낸다. 단, 가격의 하락 횟수만 '*k* '와 '*l* '에 표기한다. 예를 들어, 3번째 노드에서 DRAM의 가격이 2번 상승 1번 하락하였고, Flash는 1번 상승 2번 하락하였다면, 이 시점의 DRAM이나 Flash의 가격은 $P_D(3,1,2)$ 혹은 $P_F(3,1,2)$ 로 표현된다. 옵션 기법을 통한 가격 변동성에 관한 표기는 표 3.2에 서술하였다.

표기	의미
(x, k, l)	옵션 의사 결정 노드
P_D *(x, k, l)*	노드 (x, k, l)의 DRAM 단위 가격
P_F *(x, k, l)*	노드 (x, k, l)의 Flash 단위 가격
U_D / D_D	DRAM 가격 상승과 하락 비율
U_F / D_F	Flash 가격 상승과 하락 비율

표 3.2. DRAM, Flash 가격 변동성 이항 옵션 표기

x 시점에 가격은 최초 가격 $P^0(x=0)$ 에서 오르거나 내릴 수 있으므로, x 시점 DRAM과 Flash 가격은 $P^0(x=0)$ 에서 두 제품의 가격이 오를 확률과 내릴 확률의 곱인 (3.1)과 (3.2)로 나타낼 수 있다. 또한, 두 제품군의 가격 변동이 완전히 독립적이라고 생각할 수 없으므로 2 요인 간 상관성을 고려한

$$P_D(x,k,l) = P_D^0 \times U_D^{x-k} \times D_D^k \ , \qquad U_D = e^{\sigma_D\sqrt{d}} \qquad D_D = \frac{1}{U_D} \tag{3.1}$$

$$P_F(x,k,l) = P_F^0 \times U_F^{t-1} \times D_F^1 \ , \qquad U_F = e^{\sigma_F\sqrt{d}} \qquad D_F = \frac{1}{U_F} \tag{3.2}$$

위험 중립 확률을 표 3.3과 같이 추정하였다 [32]. 각 확률에는 두 제품군 가격의 상관성을 나타내는 상관계수 ρ 가 포함되어 있는데, 두 제품의 가격 변동 방향이 같은 경우에 ρ 가 더해져서 서로의 확률에 가중치를 부여하는 것을 볼 수 있다.

		Flash	
		상 승	하 락
D R A M	상승	$\theta_{uu} = \frac{1}{4}\left[1+\rho+\sqrt{d}\left(\frac{\mu_D}{\sigma_D}+\frac{\mu_F}{\sigma_F}\right)\right]$	$\theta_{ud} = \frac{1}{4}\left[1-\rho+\sqrt{d}\left(\frac{\mu_D}{\sigma_D}-\frac{\mu_F}{\sigma_F}\right)\right]$
	하락	$\theta_{du} = \frac{1}{4}\left[1-\rho+\sqrt{d}\left(-\frac{\mu_D}{\sigma_D}+\frac{\mu_F}{\sigma_F}\right)\right]$	$\theta_{dd} = \frac{1}{4}\left[1+\rho+\sqrt{d}\left(-\frac{\mu_D}{\sigma_D}-\frac{\mu_F}{\sigma_F}\right)\right]$

표 3.3. DRAM, Flash 가격 2 요인 위험 중립 확률

2 요인 이항 옵션을 통한 이산 시점 x별 가격 추정은 그림 3.2에서 보듯이 급수적으로 증가한다.

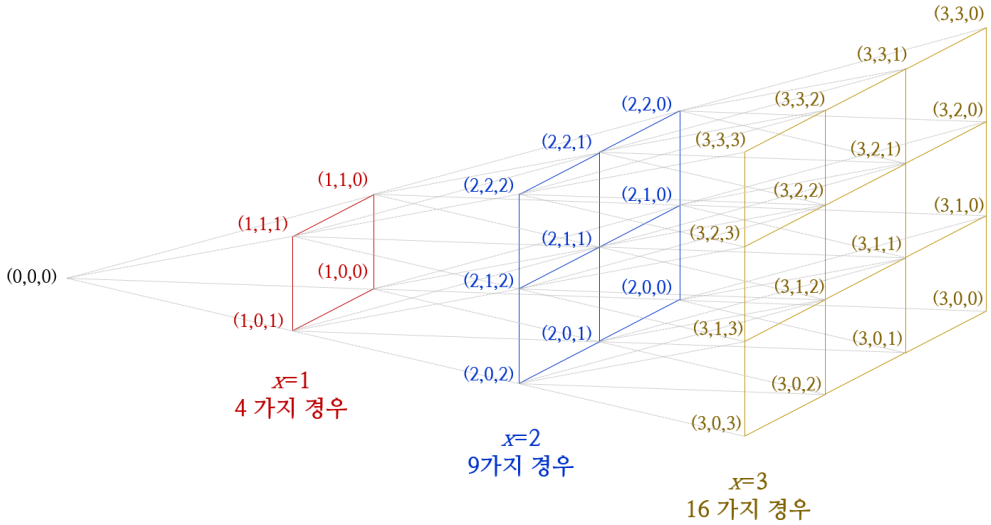

그림 3.2. Geometric Brownian Motion 2 요인 이항 가격 변동성 모형

3.3 메모리 칩 수요 확산 예측

Norton and Bass [21]는 DRAM의 수요 변화 관찰을 통해, 새로운 세대 제품이 기존 세대 제품의 수요를 잠식하면서 각 세대 수요는 수명 주기를 가지지만 전체 수요는 증가하는 경향성을 다세대 제품 확산 모델로 표현하였다. IT 산업 발전에 따른 demand pull 생태계는 현재의 메모리 시장에서도 유효하므로, 본 연구에서 메모리 칩 수요 확산 예측은 Norton-Bass 모델을 사용하였다. 다만, DRAM과 Flash는 개별 시장 생태계를 형성하는 것으로 본 연구에서 가정하기 때문에, 다음 3가지 가정을 기반으로 두 제품군의 수요는 병렬적으로 추정하여 각 시점별로 합산하였다.

1. DRAM과 Flash의 수요 증가는 각각 Norton-Bass 모델을 따른다.
2. DRAM과 Flash는 각각 고유의 수명 주기 I_D, I_F 를 따른다.
3. 수요의 단위는 Gb이다.

t=0 시점 1개 세대 제품이 이미 출시되어 있고, 이산 시간 t 동안 출시되는 제품의 누적 세대수를 $N_j(t)$, $(j = \mathrm{DRAM}, \mathrm{Flash})$ 라고 한다면, $N_j(t)$ 는 제품군별 출시 기간 τ_j^1와 수명주기 I_j로 (3.3)과 같이 표현 할 수 있다. Norton-Bass 모델에

$$N_D(t) = \left\lfloor \frac{t-\tau_D^1}{I_D} \right\rfloor + 1, \qquad N_F(t) = \left\lfloor \frac{t-\tau_F^1}{I_F} \right\rfloor + 1 \tag{3.3}$$

따른 각 세대별 예상 수요는 (3.4)부터 (3.6)으로 표현되며, 무한히 증가하는 다세대 제품의 일반적 수리 모형은 (3.7)로 표현된다. 각 식에서 m_j^i는 j 제품군의 i 세대 제품 전체 잠재 수요이다. (3.8)에서 $F_j^i(t)$ 는 t 시점 j 제품군 i 세대의

누적 확산 분포 함수인데, A는 수요의 확산 과정에서 소비자의 혁신 계수이며, B는 소비자의 모방 계수이다. 수요 함수와 관련된 전체 표기는 표 3.4에 정리하였다.

1 세대: $d_j^1(t) = F_j^1(t-\tau_j^1)m_j^1\left[1-F_j^2(t-\tau_j^2)\right]$ (3.4)

2 세대: $d_j^2(t) = F_j^2\left(t-\tau_j^2\right)\left[m_j^2+F_j^1(t-\tau_j^1)m_j^1\right]\left[1-F_j^3(t-\tau_j^3)\right]$ (3.5)

3세대: $d_j^3(t) = F_j^3\left(t-\tau_j^3\right)\left[m_j^3+F_j^2\left(t-\tau_j^2\right)\left[m_j^2+F_j^1\left(t-\tau_j^1\right)m_j^1\right]\right]$ (3.6)

N 세대: $G_k = m_k\prod_{i=k}^{n}F_i$ 일 때, 일반식 $d_j^n(t) = \sum_{k=1}^{N}G_k\,(1-F_{n+1})$ (3.7)

이때, $F_j^i(t) = \frac{1-\exp(-\left(A_j^i+B_j^i\right)t)}{1+\frac{B_j^i}{A_j^i}\exp(-\left(A_j^i+B_j^i\right)t)}$ (3.8)

표기	의미	표기	의미
t	이산 시간 (t ∈{0,1,...})	d_F^i(t)	Flash i 세대 t 시점 수요
τ_D^i	DRAM i 세대 출시 시점	F_D^i(t)	DRAM i 세대 t 시점 누적 분포 함수
τ_F^i	Flash i 세대 출시 시점	F_F^i(t)	Flash i 세대 t 시점 누적 분포 함수
$N_D(t)$	t 시점 DRAM 누적 출시 세대수	m_D^i	DRAM i 세대 잠재 수요
$N_F(t)$	t 시점 Flash 누적 출시 세대수	m_F^i	Flash i 세대 잠재 수요
d_D^i(t)	DRAM i 세대 t 시점 수요	–	-

표 3.4. Norton-Bass 모델 표기

3.4 생산자 이윤 최적화 함수

기업 이윤 추정을 위해 필요한 최소 항목은 제품의 가격, 수요, 생산 원가, 생산 수율, 단위 생산 용량 투자 비용 정도가 있다. 가격과 수요는 시장에서 거래되는 데이터를 기반으로 합리적 추정이 가능하지만, 생산 원가, 수율, 생산 용량 투자 비용은 생산자의 기술력과 관련된 부분이므로 연구의 범위와 가정에 따라 그 계산 범위와 금액이 달라질 수 있다. 필요 시 생산 원가는 R&D 비용 포함 여부, 고정비용과 가변비용 분류 등으로 세분화가 가능하다. 예를 들어, Y.-Chou, Cheng, et al. [2]은 대만의 반도체 기업 데이터를 활용하여 생산 원가를 '고정비용, 원자재 비용, 임금, 운영비'로 나누고 각각 과거의 값을 기반으로 선형으로 추정한 값을 합쳐서 미래의 원가 계산에 사용하였다. 하지만 본 연구에서는 생산 원가의 분류가 분석 결과에 영향을 미치지 않으므로 R&D 비용을 제외한 단위 용량당 생산 원가를 $/Gb으로 사용한다. 또한, Chou, Cheng, et al. [2]은 원가에 대한 선형적 추정 방식을 취하였기 때문에 세대가 바뀔 때 발생하는 전환 효율에 의한 단계적 원가 하락 포착이 어려운데, 본 연구에서는 Norton-Bass 모델에서 얻어지는 세대별 출시 시점을 기반으로 전환 효율에 기반한 세대별 원가절감을 모델에 반영하였다. 생산 용량 확대 비용은 팩토리를 신설하는 경우와 설비만 구입하는 경우에 따라 그 비용과 증산까지의 기간이 달라지는데, 본 연구에서 생산자는 충분한 크기의 팩토리가 있는 것으로 가정하였으므로 생산 용량 확대는 신규 설비 구입으로 가정한다 [2]. 또한 메모리 반도체는 생산하는 제품 종류에 따라 생산 설비 구매 비용 및 증산 반영 기간이 다를 수 있다 [18]. 일반적으로 메모리 반도체는 생산 설비는 구매 후 양산까지 6개월 정도가 소요되지만, ASML社의 노광 설비인 EUV의 경우, 양산 적용까지 1년이 넘게 소요되며, 가격도 대당 $0.1B 정도로 기존 설비에 비해 구매 비용과 증산 시점의 차이가 크다. 다만, EUV 설비는 10nm 이하 비메모리 공정에 주로

사용되는 장비로써, 본 연구에서 다루고 있는 DRAM과 Flash 제품 생산에는 필수적이지 않으므로, 생산 용량 확대에 따른 Capex 집행 금액 및 증산 소요 시간은 제품군 및 세대에 무관하게 1년으로 일반화하였다. 생산자 이윤 함수에 관해서는 아래 8가지 가정을 수립하였다.

1. 생산자는 생산 용량 확대가 가능한 충분히 넓은 팩토리를 보유하고 있다.
2. 생산자는 팩토리 내에 현재(x=0) 시장 수요를 만족시키는 생산 용량(L_0)을 소유하고 있다.
3. 생산 용량 확대는 라인 단위로 가능하며, 실제 증산은 차년도에 발생한다.
4. C Gb의 생산성을 가지는 단위 생산 라인은 생산 설비 세트 M이 r개 있으며, 각 M은 연간 C/r Gb의 DRAM 또는 Flash를 생산 할 수 있다.
5. x=0 시점에 생산자가 보유하고 있는 설비와 생산 용량 확대를 위해 신규로 구매하는 설비 세트는 DRAM과 Flash 모두 생산 가능하다. 이는 유연 생산 체제가 갖는 범위의 경제 관점에서의 이점과, 실제 반도체 생산 현장의 실정을 반영한 가정이다 [37].
6. 신제품은 기존 세대보다 전환 효율 ε 만큼 단위 용량당 생산 원가가 감소한다.
7. 실물 옵션 의사 결정 노드 (x, k, l)에서 생산자는 0부터 L_{max}까지 생산 용량 확대를 선택하는 옵션을 가진다.
8. 생산 용량 단위는 Gb이다.

메모리 칩 생산자의 기술력은 전환 효율로 포괄적 표현이 가능하지만, 양산성은 또 다른 관점의 경쟁력이므로 수율 y를 이윤 함수에 반영하였다. DRAM과 Flash는 단위 면적당 용량이 다른데, 두 제품군의 단위 생산 설비 세트 M의 연간 생산량(Gb) 차이를 W_D, W_F로 반영하였다. 생산자 이윤 함수에 관한 표기는 표 3.5와 같다.

표기	의미
$\prod^{L}(x,k,l)$	옵션 노드 *(x, k, l)*에서 생산 라인 규모 L 일 때 생산자 이윤
q_D^{iL}, q_F^{iL}	DRAM, Flash i 세대 제품의 생산 라인 규모 L 일 때 생산량
y_D, y_F	DRAM, Flash i 세대 제품 생산 수율
c_D^i, c_F^i	DRAM, Flash i 세대 제품 생산 원가
C	단위 생산 라인의 생산 용량 (Gb/년)
W_D, W_F	DRAM, Flash 연간 실제 생산 효율
M_D, M_F	DRAM, Flash 생산을 위한 설비 세트 배분

표 3.5. 생산자 이윤 함수 표기

(3.9)는 생산자 이윤 최적화 모형인데, 생산자는 이윤을 극대화 하기 위한 최적 생산량 q_D^{iL}, q_F^{iL} 구하게 된다. 이윤은 제품군별 x 시점 단위 용량당 판매 가격 P_j^i 에서 단위 용량당 생산 원가 c_j^i 를 뺀 단위 이윤에 현재의 생산 용량 L에서 생산 가능한 판매량 $q_j^i L$ 를 곱해서 구할 수 있는데, 여기서 수율 y를 곱하여 생산 loss를 반영하였다. 끝으로, $\sum_{i=1}^{N_D(x)}$, $\sum_{i=1}^{N_F(x)}$ 를 취하여 DRAM과 Flash 개별 세대의 이윤을 합산하는 생산자의 이윤 함수가 이루어진다. 또한, 생산 원가 c_j^i 는 제약식 (3.10)을 통해 세대간 전환 효율을 통한 원가 감소를 반영하였고, (3.11)과 (3.12)는 두 제품군의 생산량은 분배된 생산 용량을 초과할 수 없음을, (3.13)은 단위 생산 라인은 I개의 설비 세트로 구성되어 있음을 의미한다.

$$\max_{M_D, M_F, q_D^{i,m}, q_F^{i,m}} \prod^{L}(x,k,l)$$

$$= \left[\sum_{i=1}^{N_D(x)} P_D^i(x,k,l) y_D - c_D^i(x)) q_D^{i,L}(x,k,l) + \sum_{i=1}^{N_F(x)} P_F^i(x,k,l) y_F - c_F^i(x)) q_F^{i,L}(x,k,l) \right]$$

(3.9)

Subject to

$$c_j^i = c_j^{i-1}\epsilon, \qquad (\epsilon < 1) \tag{3.10}$$

$$\sum_{i=1}^{N_D(x)} (W_D q_D^{i,L}(x,k,l)) \le C \times M_D \tag{3.11}$$

$$\sum_{i=1}^{N_F(x)} (W_F q_F^{i,L}(x,k,l)) \le C \times M_F \tag{3.12}$$

$$M_D + M_F \le r(L_0 + L) \tag{3.13}$$

이때, $0 \le q_j^{i,L}(x,k,l) \le d_j^i(x),\ j = D, F$

$0 \le M_D, M_F \le r(L_0 + L), M_D, M_F \in Z_+$ 이때, M_D, M_F는 음이 아닌 정수

3.5 2 요인 복합 실물 옵션 모델

생산자는 3.4절의 이윤 함수 최적화를 바탕으로 메모리 칩의 가격과 수요 예측을 통한 최적 생산 용량 확대 의사 결정이 필요하다. 칩 수요는 IT 산업의 지속적 발전으로 우 상향 경향성을 예측할 수 있으므로 3.3절처럼 Norton-Bass 모델을 통하여 추정 가능하다. 반면, 가격은 다양한 변수에 의해 단기적으로 높은

불확실성을 보이며, 연평균 수십억 Gb 규모의 거래량을 고려하면 생산자의 이윤에 큰 변화를 주기 때문에 3.2절과 같이 확률로 추정하는 것이 바람직하다. 가격 추정과 수요 예측이 반영된 이윤 함수를 바탕으로 생산자는 이산 의사 결정 시기마다 이윤을 극대화 하기 위한 생산 용량 확대 의사 결정 옵션을 가진다. 단, 메모리 반도체 산업의 특성상 투자 도중에 abandon하거나 scrap하는 행위는 경영에 치명적이므로, 본 모델은 연기(wait) 또는 투자(invest) 2종류 옵션만 부여하였고, 복합 실물 옵션은 그림 3.3과 같이 도식화 할 수 있다 [2]. 복합 옵션

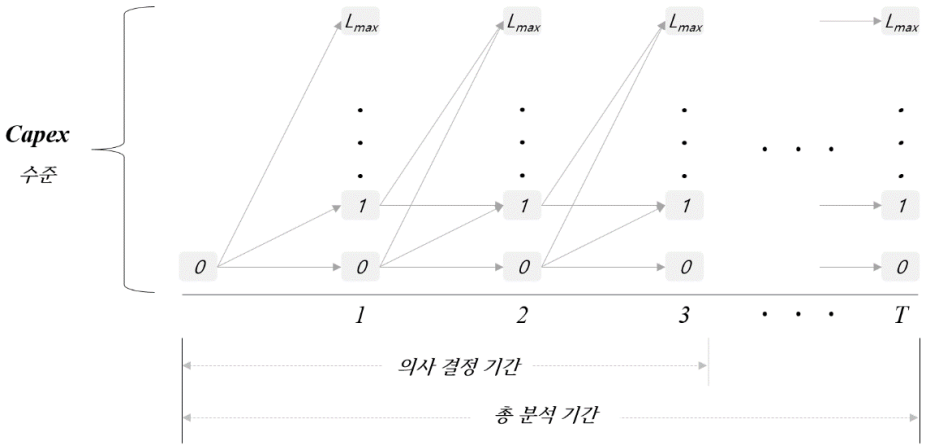

그림 3.3. 복합 옵션 진로 모형

기법은 매 이산 시점마다 유연한 투자가 가능하기 때문에 전통적인 정적 순현가법에 비해 장점이 있다. 투자의 타이밍과 전체 투자 규모를 확률적으로 확인할 수 있다는 점 역시 실물 옵션의 장점이다. (3.14)는 생산자의 옵션 가치인데, 옵션 가치는 (3.14) 좌측의 x 시점 생산 용량 L을 가진 생산자의 이윤 $\prod^{L}(x,k,l)$ 과 (3.14) 우측 대괄호 속 식을 최적화하는 생산 용량 λ 에 의한

최대값의 합으로 생각 할 수 있다. (3.14) 우측 대괄호 속의 식은 미래에 발생 가능한 확률적 옵션 가치 $\theta_{uu}V_\lambda(x+1,k,l)+\theta_{ud}V_\lambda(x+1,k,l+1)+\theta_{du}V_\lambda(x+1,k+1,l)+\theta_{dd}V_\lambda(x+1,k+1,l+1)$ 을 무위험 이자율 R_f 로 나눈 값과 생산 용량 λ 확대를 위해 집행한 Capex 값 $(\lambda-L)\cdot Capex$ 을 뺀 값인데, 이는 생산 용량 λ 확대를 통한 미래 기대 이익의 현재 가치를 의미한다.

$$V_L(x,k,l)=\prod^{L}(x,k,l)$$
$$+\max_{\lambda:L\le\lambda\le L_{max}}\left[\frac{\theta_{uu}V_\lambda(x+1,k,l)+\theta_{ud}V_\lambda(x+1,k,l+1)+\theta_{du}V_\lambda(x+1,k+1,l)+\theta_{dd}V_\lambda(x+1,k+1,l+1)}{R_f}-(\lambda-L)\cdot Capex\right] \tag{3.14}$$

제 4 장 분석

4.1 수치 예제 데이터 개요

최근 Covid-19로 인해 4차 산업 섹터의 발전이 가속화되며, 메모리 반도체의 기대 수요를 끌어올리고 있다. 이러한 시점에 너무 과거의 데이터는 미래 메모리 반도체 시장을 과소 예측 할 수 있으므로 비교적 최근 데이터인 2010년~2019년 사이 DRAM과 Flash 주요 제품의 분기별 가격과 판매량 데이터를 활용하여 수치 예제를 시행하였다. 데이터 사용 제품은 DRAM 2Gb DDR3(2010~2019), DRAM 8Gb DDR4(2014~2019), V-NAND 128Gb TLC(2015~2019), V-NAND 256Gb TLC(2015~2019)이며, DRAM은 처리 속도 변화에 따른 DDR 세대를, Flash는 V-NAND 적층 단위에 따른 용량 변화를 제품군별 세대 구분의 기준으로 정하였다.

메모리 반도체는 B2B 비즈니스 비율이 95% 정도이며, 가격은 일반적으로 제품별로 고객社와 계약을 통해 분기별로 결정된다. 이렇게 정해지는 제품의 평균 가격을 ASP(Average Selling Price)라고 하는데, 수치 예제를 위해 ASP를 Gb 당 가격으로 환산하였다. ASP는 고객社가 지불하는 모듈 ASP를 취하였는데, 모듈은 다량의 메모리 칩이 컨트롤러 등 부품 칩과 함께 PCB 기판에 조립된 형태를 말한다. 즉, 모듈의 단위 용량 가격은 칩의 단위 용량 가격보다 높을 수 있는데, 현재 메모리 칩이 거래되는 제품 형태의 비율은 '모듈:칩:웨이퍼 = 4:5:1'이며, 이 비율은 상당 기간 일정하므로 모듈 ASP 값을 그대로 취하였다. 이로 인해 ASP가 소폭 증가 할 수 있지만 용인 가능한 수준이라 판단된다. 분석을 위한 x=0 시점 가격은 DRAM 8Gb DDR4, Flash 256Gb TLC의 2019년

4개 분기 ASP 평균을 취하였고, DRAM $0.4/Gb, Flash $0.015/Gb를 얻었다.

이윤 함수 계산을 위한 매개변수는 업계에서 통용되는 일반적인 값을 활용하였다. 먼저, 생산 원가와 생산량은 2017~2019 기간 동안 업계에서 분석된 값의 평균을 취하였는데, 생산 원가는 DRAM $0.34/Gb, Flash $0.0125/Gb이며, 생산량은 DRAM 기준으로 단위 생산 라인당 연간 12,500MGb 값을 얻었다. Flash의 경우 생산 비율 차이의 반영이 필요하므로 '$W_D : W_F$ = 1:0.08'를 적용하여 업계의 일반적 수준에 맞추었다. 생산자가 기존에 보유하고 있는 라인의 수는 x=0 시점 수요에 맞추어 2개로 설정하였고, 단위 생산 라인은 5개(r=5)의 생산 설비 세트 M 으로 이루어져 있다고 설정하였다. 그러므로 단위 생산 설비 세트 $1M$은 연간 최대 DRAM 2,500MGb, Flash 31,250MGb을 생산 할 수 있다. 또한, 현재 메모리 시장을 과점 중인 생산자들의 실력치를 보수적으로 벤치마크하여, 수율 90%, 전환 효율은 $\epsilon = 0.8$ 로 설정하였다. 끝으로, 단위 생산 용량 확대에 필요한 비용은 팩토리 건설 없이 설비 세트 구입만 진행되므로, 업계 평균인 $10B으로 설정하였다. 표 4.1에 상술한 초기값을 정리하였다.

	초기 가격 ($/Gb)	생산 원가 ($/Gb)	단위 라인 생산 효율 (Gb/년)	생산 수율 (%)	설비 세트 생산 용량 (Gb/년)	단위 라인 설비 세트 수	단위 라인 확장 비용 ($)
DRAM	0.4	0.34	1	90	2,500M	5	10,000M
Flash	0.015	0.0125	0.08				

표 4.1. 수치 예제 매개변수

4.1.1 복합 옵션 모형 설계

총 분석 기간 15년, 의사 결정 기간 10년으로 설정하였고, x=0 시점부터 의사 결정이 가능하므로 11번의 의사 결정 옵션이 주어진다. 투자를 통한 생산 용량 확대는 0개부터 최대 4개 라인까지 각 이산 시점별로 유연하게 진행이 가능한 복합 옵션 모델이다. 무위험 이자율은 5%를 사용하며, 복합 옵션 의사 결정 나무는 그림 4.1과 같다.

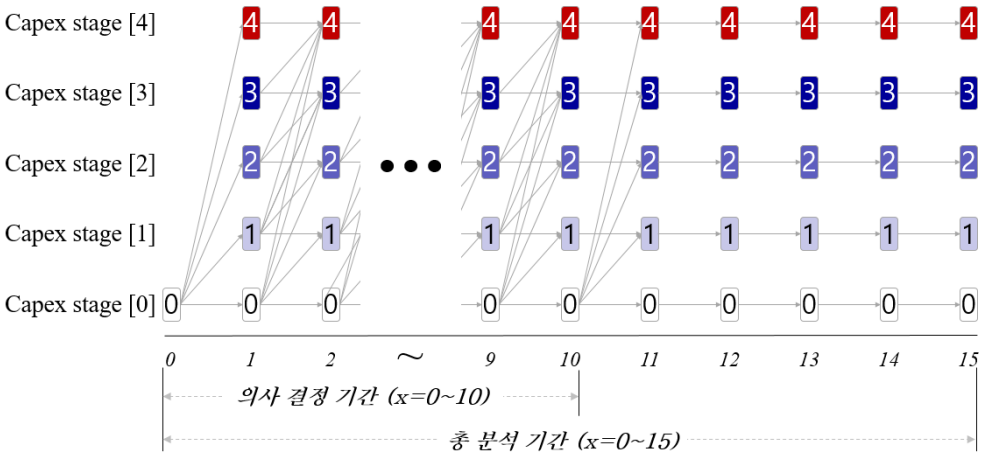

그림 4.1. 수치 예제의 복합 옵션 의사 결정 나무

4.1.2 가격 변동성 추정

그림 4.2. 메모리 반도체 가격 추정

두 제품군의 가격 변동성 반영을 위해 그림 4.2의 4개 제품이 모두 시장에서 거래되는 2016년 이후 ASP 데이터를 사용하였고, 이를 학습하여 DRAM 가격 상승 비율(U_D) 1.279, DRAM 가격 하락 비율(D_D) 0.782, Flash 가격 상승 비율(U_F) 1.108, Flash 가격 하락 비율(D_F) 0.902, 상관계수(ρ) 0.730, 위험 중립 확률을 표 4.2와 같이 각각 구하였다.

		Flash	
		상승	하락
DRAM	상승	0.378	0.111
	하락	0.024	0.487

표 4.2. DRAM, Flash 가격 위험 중립 확률

4.1.3 수요 예측

수요 예측에 사용한 데이터는 가격 변동성 학습에 사용한 제품과 동일한 4개 제품의 데이터이다. 먼저, DRAM은 속도가 가장 중요하기 때문에 IT 제품 발전에 따라 세대별 수요의 주기가 비교적 뚜렷하지만, Flash는 중저가 IT 제품이 존재하기 때문에 기존 세대의 저용량 Flash 제품이 시장에 잔류할 수 있다. 실제

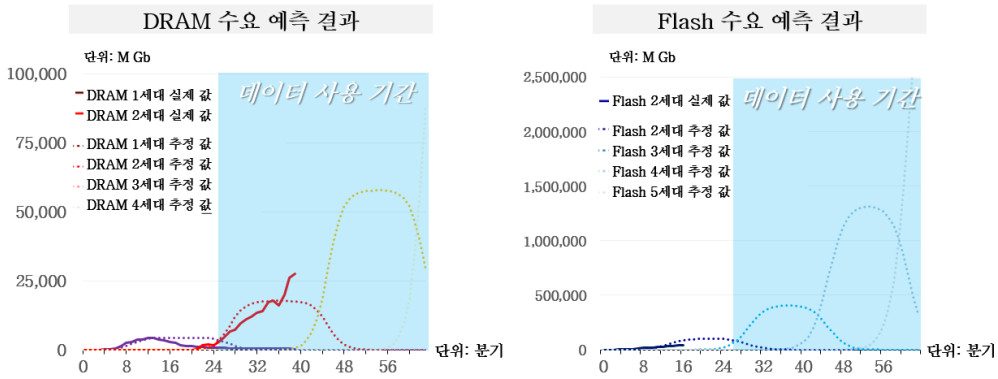

그림 4.3. 메모리 반도체 수요 추정

그림 1.1에서 보았듯이 Flash 128Gb TLC는 2010년 출시 이후 일반적인 수명 주기를 따르지 않고 시장에 잔류하는 모습을 볼 수 있는데, 이는 저사양 IT 제품에 지속 채택되고 있기 때문에 나타나는 현상이다. 본 연구에서는 Norton-Bass 모델의 일반성을 확보하기 위해 그림 4.3과 같이 Flash 2세대인 256Gb TLC만을 모델 학습에 사용하였고, 2019년 수요를 최대치로 가정하고, 세대 간 증가분은 DRAM의 값을 차용했다. IT 제품에 두 제품 중 하나만 사용되는 경우는 거의 없으므로 이러한 계산은 합리적으로 생각된다. 그림 4.3 x 축의 0 시점은 2010년 1분기인데, DRAM의 2개 세대 수요가 충분히 학습되어

사용되도록 26분기 학습 데이터부터 수치 예제에 활용하였고, 표 4.3과 같이 Norton-Bass 모델에 필요한 매개변수를 도출하였다.

매개변수	값
DRAM 혁신계수(A)	0.001158
DRAM 모방계수(B)	0.711465
Flash 혁신계수(A)	0.0003255
Flash 모방계수 (B)	0.5738097

매개변수	값
DRAM 1세대 잠재수요(m1)	1,490,016,000 Gb
DRAM 2세대 잠재수요(m2)	4,464,384,000 Gb
세대 간 성장률 (%)	2.996
Flash 1세대 잠재수요(m1)	34,432,000,000 Gb

표 4.3. Norton-Bass 모델 매개변수 추정

4.2 수치 예제

4.2.1 실물 옵션 분석 결과

본 절에서는 4.1절에서 구한 매개변수 값을 기초로 DRAM과 Flash의 가격 변동에 따른 최적 생산 용량 투자 전략을 복합 실물 옵션 기법을 통해 분석하였다. 분석 결과에 대한 이해를 돕기 위해 이항 옵션의 시각적 표현과 결과 매트릭스에 관해 짧게 설명하고자 한다. 먼저, 그림 4.4는 일반적인 이항 옵션 상황에서 x 시점별 실물 자산의 변동성을 나타낸 것이다. 이항 옵션에서는 자산의 가치가 오르거나 내리는 2가지 경우만을 가정하기 때문에 그림 4.4처럼 자산 가치의 하락과 상승을 화살표로 표현하며, 자산 가치 변화 상태에서의 의사 결정 내용을 매트릭스에 기입 할 수 있다. 따라서, 사례 1은 x=2 시점까지 가격 하락이 없었기 때문에 바로 아래 1x3 매트릭스에서 가장 좌측에 의사 결정

영역을 표기 할 수 있다. 같은 원리로 사례 2는 가격 하락이 1회 있었기 때문에 1x3 매트릭스의 좌로부터 2번째 영역, 사례 3은 2회의 가격 하락으로 인해 1x3 매트릭스에서 좌로부터 3번째 영역에 의사 결정 영역을 표기 할 수 있다.

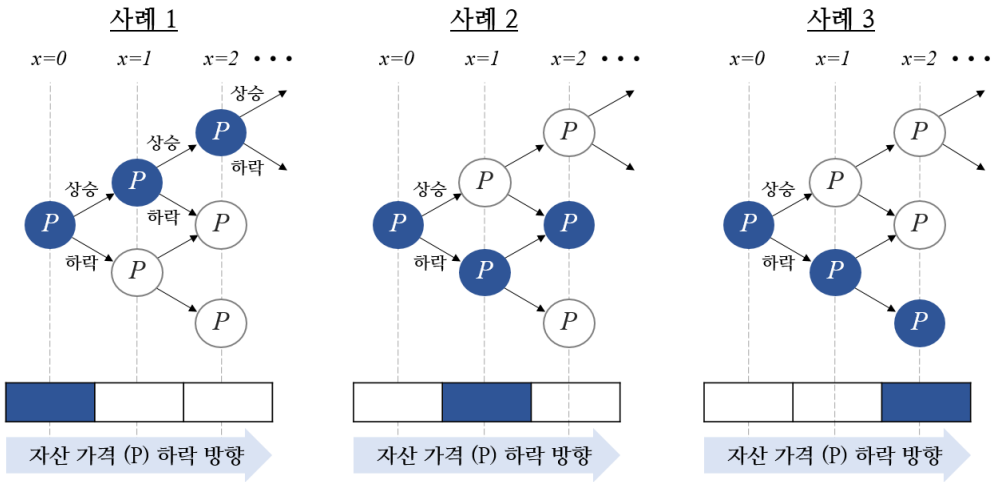

그림 4.4. 이항 옵션 변동성과 옵션 매트릭스

이번에는 2개의 요인이 의사 결정에 동시에 영향을 미치는 상황을 살펴보겠다. 2개 요인의 변동성에 의한 이항 옵션과 의사 결정을 위한 옵션 매트릭스는 그림 4.5와 같이 표현 할 수 있다. 그림 4.4와 차이점은 2요인의 변동성에 의한 의사 결정 옵션을 표현하기 위해 NxN 옵션 매트릭스가 사용되었다. 먼저, 좌측 DRAM과 Flash 가격의 이항 변동성을 보면 DRAM은 가격이 계속 올랐고, Flash는 1번의 가격 하락이 있었다. 이는 그림 4.5의 우측 3x3 옵션 매트릭스처럼 표현이 가능하다. 또한, 이것은 3.2절에서 설명한 옵션 노드 형태인 $(x, k, l) = (2, 0, 1)$ 로도 표기가 가능하다.

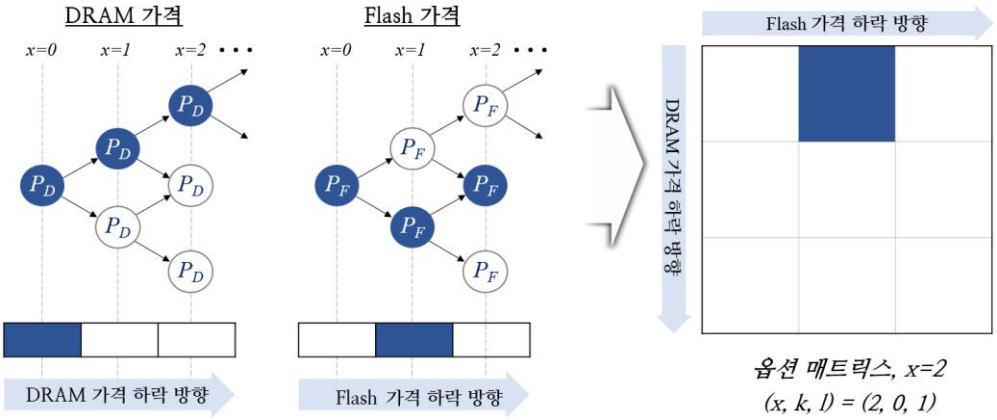

그림 4.5. 2 요인 이항 옵션 변동성과 옵션 매트릭스

이제 수치 예제의 결과를 살펴보겠다. 그림 4.6은 복합 실물 옵션 결과인데, 가로축에 x=0부터 x=10까지 각 이산 시점별 의사 결정에 대한 옵션 매트릭스가 있으며, 세로축은 Capex(0)부터 Capex(3)까지 이미 투자를 진행한 생산 용량 수준을 의미한다. 또한, 각 옵션 매트릭스에서 오른쪽 방향은 이산 시점에 대한 누적 Flash 가격의 하락 횟수이며, 아래쪽 방향은 DRAM 가격의 누적 하락 횟수이다.

먼저, 몇 개의 옵션 매트릭스에서 가로 방향으로 Capex (4) 투자 의사 결정(빨간색 박스 내 숫자 4)이 내려진 부분이 확인된다. 이는 Flash의 가격 변동에 무관하게 의사 결정이 일어난다는 의미이다. 즉, 투자 의사 결정은 DRAM의 가격 변동에 의해 결정된다고 볼 수 있다는 뜻이다. 특히, x=6, 8, 10 시점에 이러한 경향이 두드려지는데, DRAM의 가격 하락 횟수가 x의 절반, 즉, 의사 결정 시점까지 변동이 없는 수준이 되면 L_{max}인 4개 신규 생산 라인을 확장하는 것이 최적으로 확인된다. 부연하자면, n번의 의사 결정 기간 동안 2/n번

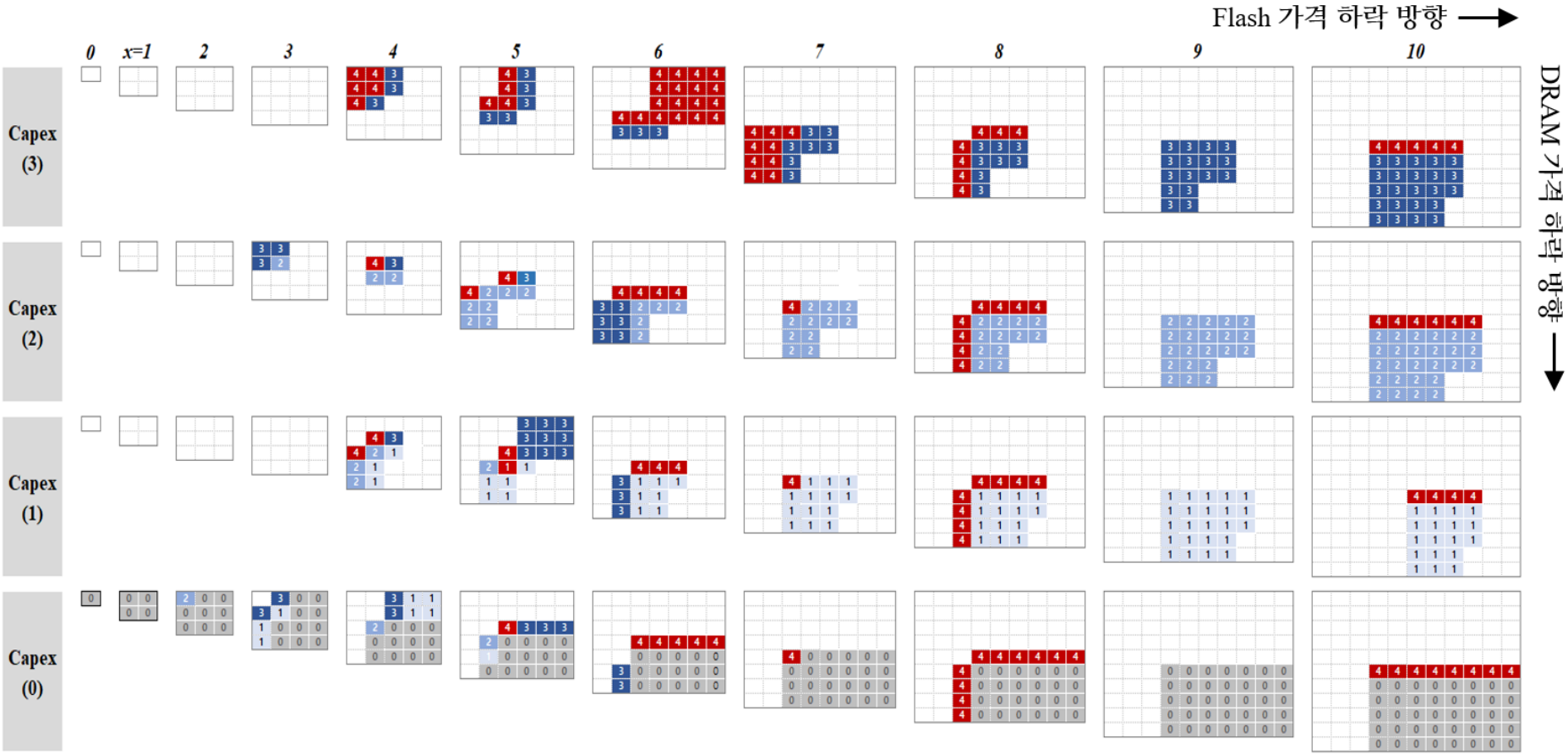

그림 4.6. 2 요인 복합 실물 옵션 분석 결과

동안 가격의 하락이 발생했다는 것은, 남은 $2/n$ 동안 가격이 상승했다는 뜻이므로, 결국 n 기간 동안 가격이 변동되지 않았다는 뜻이 된다. 이러한 결과는 수요의 증가가 어느 정도 담보되어 있는 상황에서 ASP의 변화가 생산자의 이윤에 극적인 영향을 미칠 수 있는 메모리 반도체 생태계를 잘 반영한 결과라고 해석 할 수 있겠다.

x=6 시점을 통해 조금 더 구체적인 의사 결정 내용을 살펴 보자면, x=6의 Capex (0) 옵션 매트릭스에서 DRAM 가격의 하락 발생이 3번 이하일 경우, Flash 가격 변동과 무관하게 L_{max}인 4개 신규 생산 라인을 확장하는 것으로 의사 결정이 내려진다. 또한, Flash 가격이 2번 이하로 떨어질 경우 DRAM 가격과 무관하게 3개 라인을 짓는 것이 최적이라는 결과를 얻을 수 있는데, 이를 통해 Flash 보다 DRAM의 가격 영향이 큰 것을 재확인 할 수 있다. 끝으로, DRAM 가격이 5번 이상, Flash 가격이 3번 이상 떨어질 경우에는 아예 투자를 하지 않는 것이 최적인 것으로 나타난다.

옵션 매트릭스를 통해서 확인한 최적 투자 결과에 대해 생산자의 이윤과 생산 용량 할당 측면에서 살펴 볼 수 있다. 그림 4.7은 이산 의사 결정 시점 x별 생산자 이윤과 설비 세트 M의 할당 결과이다. 생산자 이윤은 그림 4.6에서 실제 투자가 발생하는 x=2 시점부터 x=5 시점까지 Capex 비용 증가로 인해 0 근처에서 횡보하다가 x=6 시점부터 급증하는 경향을 보인다. 이 시점은 DRAM의 특정 세대 제품이 양산 확보를 진행한 시점으로 확인되며, 조금 뒤 그 증거를 찾아 보겠다. 할당 M 역시 투자를 시행하는 x=2 시점부터 꾸준하게 증가 후 x=8 시점부터 완만한 상승세를 보인다. 다만, x=11 이후는 투자 의사 결정이 발생하지 않고 신제품 개발에 따른 전환 효율에 의한 원가 절감으로 할당 M의

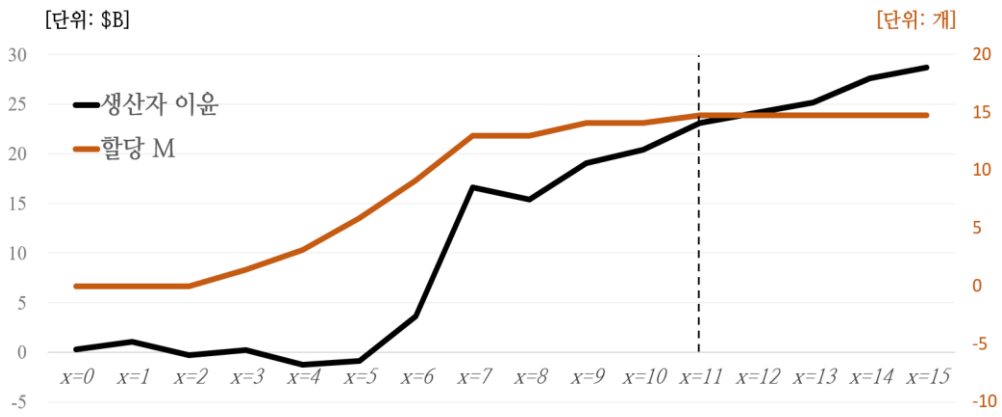

그림 4.7. 이산 시점별 생산자 이윤과 설비 세트 M 할당

변화 없이도 생산자의 이윤이 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 전환 효율이 생산자 이윤 함수에 잘 반영된 결과이다. 그림 4.8은 DRAM과 Flash 가격의 변화와 할당 M을 살펴 본 것인데, 이를 통해 각 제품군이 생산자 이윤에 기여하는 상황을 확인 할 수 있다. 먼저, 두 제품군의 그래프 뒤편 회색 그래프는

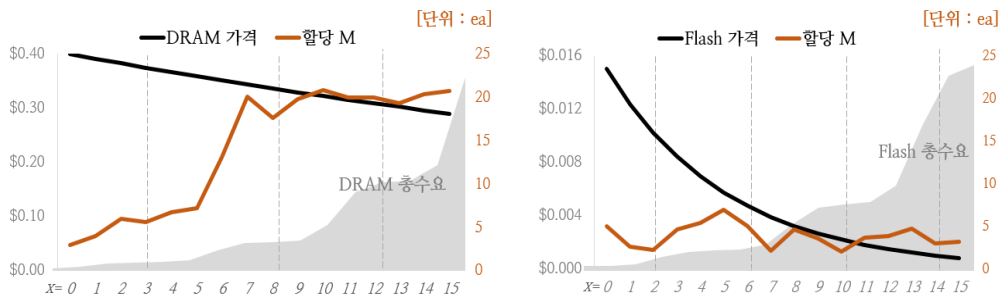

그림 4.8. DRAM, Flash 가격과 설비 세트 M 할당

해당 제품군의 총 수요이며, 세로 점선은 세대 전환이 발생하는 시점이다. 앞서 4.1.2절에서 본 것처럼 DRAM은 Flash보다 가격 변동성의 폭이 크고, 가격 하락 확률 0.511로서 Flash는 가격 하락 확률 0.598보다 작다. 이러한 가격 변동성의 차이로 인해 그림 4.8 좌측의 DRAM 가격의 하락 정도는 우측 Flash 가격의 하락 정도보다 훨씬 완만하며, 이것은 해당 제품군의 수요 증가가 이윤의 증가로 이어질 수 있게 해준다. 반면, Flash 가격의 가파른 하락은 꾸준히 증가하는 수요로 인한 이윤의 증가를 상쇄시킬 것으로 예상되어 결국 할당 M을 늘리지 못하는 결과로 이어진다. 즉, 그림 4.6의 할당 M은 대부분 DRAM으로 집중되는 것임을 알 수 있다. 이는 앞서 옵션 매트릭스에서 보았던 Flash 가격 변동성이 투자에 영향을 덜 미치는 결과를 뒷받침한다.

4.2.2 민감도 분석 및 결과

2010년 이후 메모리 시장 상황을 기반으로 진행한 수치 예제에 대해 생산자 입장에서의 내외부 요인들에 변화를 주어, 최적 의사 결정 변화와의 관계 및 그 영향 수준을 확인하고자 한다. 표 4.4는 민감도 분석에 대한 구조이다. 먼저 외부 요인으로 단위 라인 확장에 따른 Capex 비용 크기와 DRAM과 Flash 시장의 상관계수 ρ이다. 두 값의 변동성은 무역 환경, 고용 시장 안정성, 고객社 수급 변화 등 생산자가 조절 할 수 없는 영역이다. 내부 요인은 전환 효율과 각 제품군의 양산 수율인데, 이는 생산자의 신제품 개발 역량 및 양산 역량에 따라 결정되는 값이다. 전환 효율의 감소는 각 세대별 생산 원가의 하락폭이 감소하는 것이며, 수율의 감소는 전 세대에 걸쳐 같은 수준의 생산성 하락을 의미하는

것으로 두 지표는 미묘하게 생산자의 이윤에 다른 영향을 끼칠 것이다. 또한, 수율의 경우 한 제품의 수율은 90%로 고정하고 나머지 제품의 수율만 85%, 90%, 95%로 변경하면서 분석하였다. 표 4.4에서 하늘색으로 표기된 부분은 기존 수치 예제에서 사용한 값이다.

			민감도 범위				
외부 요인	1. 단위 라인 당 Capex		$5B	$7.5B	$10B	$12.5B	$15B
	2. 시장 상관계수 (ρ)		-	0	0.73	1	-
내부 요인	3. 전환 효율		0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
	4. 수율	Flash 수율 90%	-	DRAM 85%	DRAM 90%	DRAM 95%	-
		DRAM 수율 90%	-	Flash 85%	Flash 90%	Flash 95%	-

표 4.4. 민감도 분석 구조

1. 그림 4.9는 '단위 라인당 Capex 비용' 변화에 따른 최적 투자 라인 수와 그때의 기대 이윤과 사용하지 않는 설비 세트인 비가동 M을 나타낸다. 좌측 라인 수는 Capex 변화에 따라 최소 2.33개에서 최대 3.43개까지 변화한다. 반면에, 중앙의 이윤은 최대값과 최소값의 차이가 $2B로 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 우측 비가동 M의 차이가 작다는 것을 통해 각 Capex 상황별 확대된 용량이 대부분 생산에 사용된다고 판단 할 수 있다.

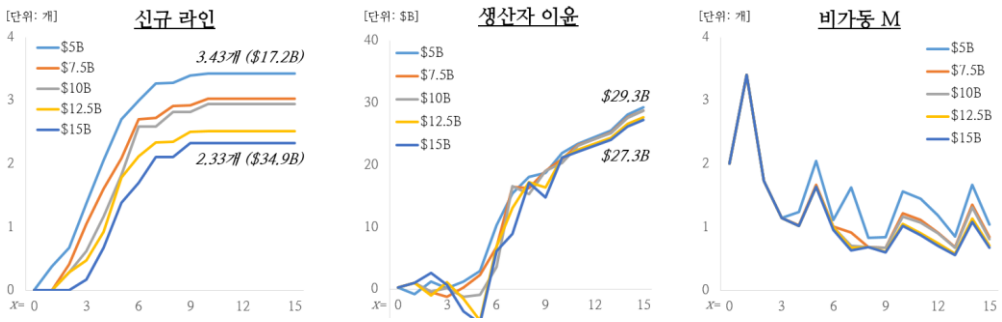

그림 4.9. Capex에 대한 민감도 분석 결과

2. 그림 4.10은 '전환 효율' 차이에 의한 최적 투자 라인 수와 그때의 기대 이윤과 사용하지 않는 설비 세트인 비가동 M을 나타낸다. 좌측 라인 수는 최저 2.33개에서 최대 3.28개까지인데, 앞서 Capex 변화에 의한 변화량과 유사한 범위임을 알 수 있다. 하지만 중앙의 이윤은 최대값과 최소값의 차이가 $9.1B로 Capex 에서 보았던 차이인 $2B보다 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 최대값이 $32.6B로 Capex $5B 일 때의 최대값 $29.3B보다 크다. 이는 매년 수백억 칩이 거래되는 메모리 시장의 특성상, 생산자의 기술력에 의한 단위 제품당 마진이

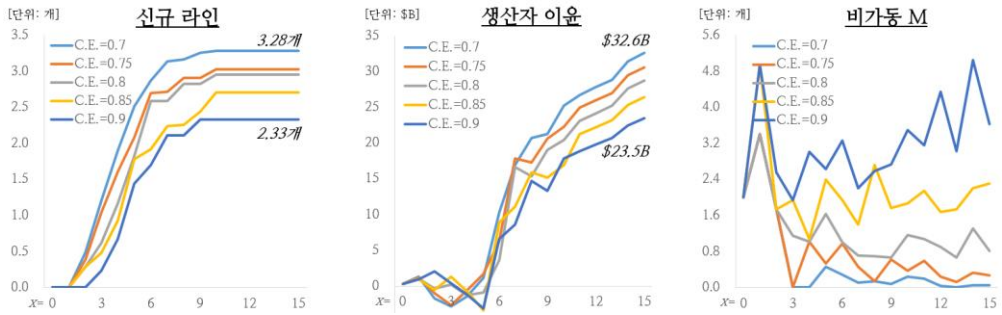

그림 4.10. 전환 효율에 대한 민감도 분석 결과

일회성 비용인 Capex의 차이보다 훨씬 생산자 이윤에 중요한 변수임을 보여주는 결과이다. 또한, 이윤의 차이는 투입되는 머신 세트 M의 차이에 기인하는 것이라 추론 할 수 있으므로 우측 비가동 M의 변동폭도 예상 가능한 범위이다.

3. '시장 상관계수 (ρ)'는 생산자의 사전 지식에 영향을 줄 수도, 받을 수도 있다. 수치 예제에서 학습된 ρ 는 최근 10년간 두 제품군의 가격 변동성에 기반한 상관계수이다. 즉, 이 값은 분석 시점에 따라 변할 수 있으며, 실제 두 시장의 인과 관계를 설명하지 못한다. 따라서, 생산자가 시장에 대해 뛰어난 직관이 있는 경우, 분석을 통해 얻어진 ρ는 얼마든지 수정될 수 있다. 이러한 이유로 수치 예제에서 얻어진 ρ 역시 DRAM과 Flash 시장의 상관성을 적절하게 표현한다고 할 수 없다. 먼저, 분석은 두 시장이 전혀 상관없는 시장인 $\rho = 0$인 경우와, 완전한 상관성을 가지는 $\rho = 1$의 두 경우를 상정하였고, 그림 4.11과 같이 민감도에 따른 라인 수, DRAM의 이윤, 그리고 Flash의 이윤을 분석하였다.

먼저, 좌측의 라인 수와 중앙의 DRAM의 이윤에는 큰 변화가 없지만, 우측 Flash의 이윤은 두 시장의 상관성에 따라 큰 차이를 보이는 것을 볼 수 있는데,

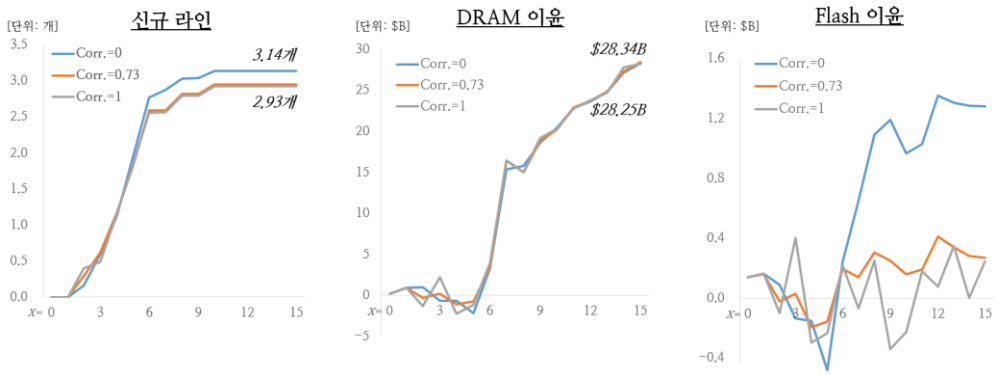

그림 4.11. 시장 상관계수(ρ)에 대한 민감도 분석 결과

이는 3.2절의 표 3.3에서 보았던 것처럼 두 제품의 변동성 방향이 같을 때 ρ가 가중치를 부여하기 때문에 발생하는 것이다. 즉, $\rho = 1$ 인 경우에는 Flash 가격 하락에 가속도가 붙어 이윤의 악화가 나타나지만, $\rho = 0$ 이 되어 가격 하락의 확률이 감소하면 미래 수요 증가로 인한 이윤의 개선을 기대 할 수 있는 것으로 분석된다. 이 분석 결과는 생산자의 시장에 대한 사전지식과 경험에 따라 시장 상관성을 매우 다양하게 해석 할 수 있다는 것을 보여준다.

4. '수율'의 변화는 생산 원가, 고정비, Capex 비용 등 생산자의 비용 지출에 영향을 주지 않는다. 특히, 전환 효율의 고정으로 인해 그림 4.12에서 보듯이 신규 라인의 숫자는 그림 4.9의 Capex 변화에 따른 결과와 달리 거의 변화가 없다. DRAM과 Flash의 이윤 변화는 수율 개선에 따라 단조적 증가를 보인다. 특히, 그림 4.12 우측에서 Flash의 수율이 95%를 넘으면 비로소 모든 이산 시점에서 Flash의 이윤이 양의 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 다른 제조 산업과 마찬가지로 기업이 일정 수준의 기술력을 보유하고 있는 경우, 시장 상황에 나빠져도 어느 정도 해자를 가질 수 있음을 보여준다.

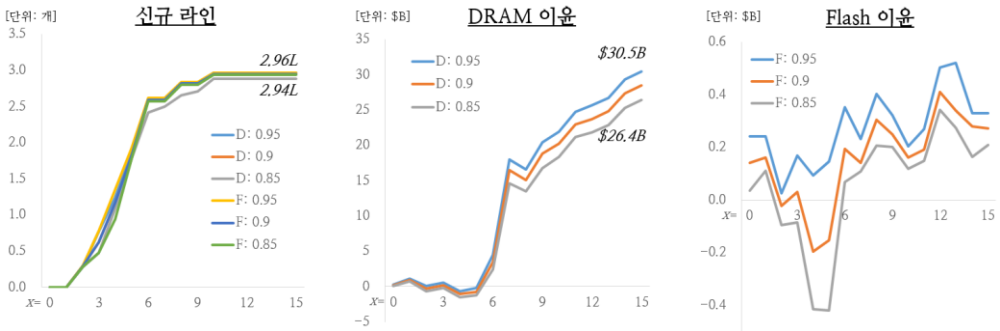

그림 4.12. 수율에 대한 민감도 분석 결과

4.2.3 정적 순현가법과 전략적 순현가법 비교

논문에 표기하지 않았지만, 4.2.2절에서 수행한 모든 민감도 분석에서 정적 순현가법의 가치는 L_{max}, 즉, Capex (4)에서 최대값을 가지는 것을 확인하였는데, 이는 메모리 산업이 기본적으로 상당히 높은 이윤을 약속하는 산업 섹터라는 점을 시사하는 결과라고 생각된다. 모든 민감도에서 L_{max}가 최대값을 가지므로 본 분석에서는 정적 순현가 가치 L_4에서 정적 순현가 가치 L_0를 뺀 값을 'A'라는 값으로 정의하고자 한다. 'A' 값이 커질수록 두 순현가 가치의 차이가 커지는데, 이는 정적 순현가법의 민감도가 커진다고 해석 할 수 있다. 그리고, 전략적 순현가 가치에서 정적 순현가 가치 L_4를 뺀 값을 'B'라는 값으로 두고자 하는데, 이 값은 옵션 가치를 의미한다. 그림 4.13은 4.2.2절에서 시행한 모든 민감도 분석 결과를 위에서 언급한 'A'와 'B' 값으로 표시한 것이다.

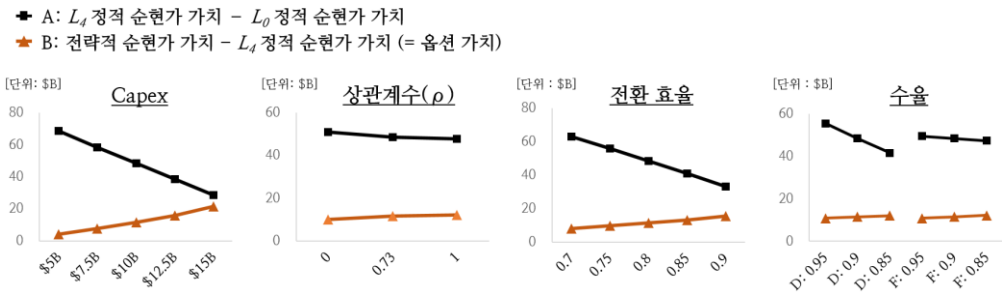

그림 4.13. 전략적 순현가 가치와 정적 순현가 가치 비교

상관계수(ρ)를 제외한 모든 민감도 분석에서 Capex 비용의 증가, 전환 효율의 하락, 수율 하락, 즉, 경영 환경이 악화되는 방향에서 'A' 값은 떨어지며, 'B' 값은

올라가는 현상을 볼 수 있다. 이는 경영 상황이 어려울수록 전통적인 정적 순현가법의 민감도가 떨어지기 때문에 현명한 투자자라면 실물 옵션과 같은 대안적 방법론을 통한 최적 투자 전략을 점검하는 것이 필요하다는 것으로 해석할 수 있다. 특히, 복합 실물 옵션은 메모리 생산자가 실제 취할 수 있는 생산 용량 투자 의사 결정과 유사한 구조적 대안을 제시하므로 옵션 가치가 경영 환경 악화에 따라 크게 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 결과를 통해 메모리 반도체 섹터에서의 최적 생산 용량 분석 문제에 실물 옵션 모델을 적용하는 것이 적절한 선택이라는 것을 재확인 할 수 있다.

제 5 장 결론 및 향후 연구

수치 예제를 통해 메모리 칩 생산자의 생산 용량 투자 의사 결정은 Flash의 가격보다 DRAM의 가격 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 특히, 장기적 이산 의사 결정 과정에서 DRAM의 가격이 하락하지 않으면 언제나 최대 생산 용량을 확보하는 것이 생산자의 이윤을 극대화 시킨다는 결과는 해당 산업의 시장 평균 값으로 반영한 풍부한 미래 수요와 상대적으로 높은 DRAM의 단위 마진이 이윤 함수에 포함되어 있기 때문이라고 해석 할 수 있다. 또한, 수치 예제 데이터 학습 기간인 2010년부터 2019년 사이 Flash 가격의 하락 확률이 0.598로 상승 확률보다 높았기 때문에 Flash 제품을 통한 기대 이윤이 거의 증가하지 않고, 설비 세트 M의 할당 역시 거의 증가 하지 않았다. 하지만 DRAM과 Flash 가격의 변동성에 대한 상관성이 없거나($\rho=0$), Flash의 수율이 95% 이상일 때는 Flash 생산을 통한 이윤이 발생하며, 이윤이 꾸준히 증가 할 수 있음을 확인 하였다. 먼저, 상관계수(ρ)는 데이터를 분석 하는 시점별로 달라 질 수 있고, 상관계수(ρ) 값에 따라 분석 결과가 크게 바뀔 수 있기 때문에, 생산자의 시장에 대한 이해는 투자의 성패에 매우 중요한 요인이라는 점이 흥미롭다. 그리고 Flash의 수율이 95% 이상일 때는 모든 이산 시점에서 이윤이 발생하는 결과가 확인되는데, 이는 생산자가 일정 수준 이상의 기술력을 보유하면 시장 상황과 무관하게 항상 이윤을 취할 수 있는 해자를 가질 수 있음을 보여준다.

‘신규 라인’ 수와 ‘생산자 이윤’은 투자 의사 결정 수준을 보여주는 대표적인 지표라고 할 수 있다. 전환 효율은 두 지표에 모두 큰 영향을 미치지만, 수율은

‘생산자 이윤’의 변화에, Capex 비용은 ‘신규 라인’ 수에만 영향을 미치는 것으로 나타났다. 수율은 전체 세대에 동일하게 적용되므로 이윤의 향상은 기대 할 수 있지만, 그 향상이 선형적이므로 생산 용량 확대로 이어지지는 못하는 것으로 추측 할 수 있고, Capex 비용의 경우 거대한 메모리 칩 시장의 규모에 의한 매출이 일회성 투자 비용에 비해 훨씬 크기 때문에 중장기적으로 이윤의 변화에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. 반면에, 전환 효율은 ‘생산자 이윤’과 ‘신규 라인’ 수라는 두가지 투자 의사결정 지표에 모두 영향을 주는 것으로 확인되는데, 이는 전환 효율의 개선은 제품의 세대가 거듭될수록 생산 원가를 낮추는 효과가 있어, 생산자의 경쟁력이 장기간 우상향하기 때문이다.
전통적인 정적 순현가법과 전략적 순현가법의 가치 비교를 통해 경영이 악화 될 수 있는 상황에서 정적 순현가법의 민감도가 매우 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 현명한 투자자라면 다양한 최적화 기법을 통해 투자 의사 결정에 대안을 모색해야 하는 것을 시사한다. 복합 실물 옵션의 경우, 투자 로직 관점에서 실제 메모리 생산자의 투자 방식과 유사성이 많기 때문에 경영 환경이 악화되는 민감도 분석 상황에서 옵션 가치가 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다.

본 논문은 시장 데이터를 기반으로 DRAM과 Flash 각각의 가격과 수요를 개별적으로 추정하여, 두 제품군을 동시에 생산하는 생산자가 이윤을 극대화 하기 위한 최적 생산 용량을 찾는 모델을 제시하였다. 내가 아는 한 DRAM과 Flash를 동시에 생산하는 생산자 모델은 기존에 없었으며, 이는 현재의 메모리 칩 제조 생태계를 고려할 때 반드시 반영되어야 할 부분이라는 점에서 차별점을 가질 수 있다고 생각한다. 또한, 기존에 선형 함수 또는 상수로 취급하던 메모리 칩 가격에 GBM을 따르는 변동성을 부여하여 메모리 시장의 생태계를 충실히 반영하려고 노력하였다. 수요 예측에서는 Norton-Bass 모델을 통해 두 제품군에 대한 특정 시점의 수요를 세대별로 분류하였으며, 이를 통해 세대별 생산 원가를 차별적으로 적용해 생산자 이윤 함수의 합리성을 극대화하고자 하였다. 끝으로,

최근 10년 이내 시장 주도 제품 데이터를 사용하여, 미래 수요 및 가격 변동 예측에 대한 오류를 최소화 하고자 노력하였다.

본 연구에서는 단일 생산자를 가정하여 생산자 간의 경쟁 상황을 고려하지 못했다. 그리고 생산자가 충분히 큰 팩토리를 소유하고 있다는 가정을 통해 실제 팩토리 건물에 대한 투자 옵션을 제거하였는데, 팩토리 투자는 Capex 비용, 실제 증산 반영 시기 등에서 단위 라인 투자와는 차이를 보이기 때문에 생산자의 현실을 모두 반영하지 못했다는 한계점이 존재한다. 또한, DRAM과 Flash의 수요를 동일한 Norton-Bass 모델로 학습하여 제품군별로 실제 수요 예측에 대한 정합성 부족 이슈가 잔존한다. 상술한 모든 부분을 모델에 반영하는 것은 어떤 면에서 학술적 의미를 퇴색시킨다고 할 수 있지만, 향후 본 연구의 모델을 바탕으로 반영되지 못한 부분들을 개선하여 추가 연구를 시행하고자 한다.

참고 문헌

[1] J. M. Swaminathan, *Tool capacity planning for semiconductor fabrication facilities under demand uncertainty*, Eur. J. Oper. Res., 120 (2000), pp. 545–558.

[2] Y.-C. Chou, C.-T. Cheng, F.-C. Yang, and Y.-Y. Liang, *Evaluating alternative capacity strategies in semiconductor manufacturing under uncertain demand and price scenarios*, Int. J. Prod. Econ., 105 (2007), pp. 591–606.

[3] D. M. Byrne, S. D. Oliner, and D. E. Sichel, *How fast are semiconductor prices falling?*, Rev. Income Wealth, 64 (2018), pp. 679–702.

[4] C.-W. Duan, W. T. Lin, and C. F. Lee, *Sequential capital budgeting as real options: the case of a new DRAM chipmaker in Taiwan*, Rev. Pacific Basin Financ. Mark. Policies, 6 (2003), pp. 87–112.

[5] H. Kim, S.-J. Ahn, Y. G. Shin, K. Lee, and E. Jung, *Evolution of NAND flash memory: From 2D to 3D as a storage market leader*, in *2017 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2017, pp. 1–4, pp. 1–4.

[6] M. L. Barnett, W. H. Starbuck, and P. N. Pant, *Which dreams come true? Endogeneity, industry structure and forecasting accuracy*, Ind. Corp. Chang., 12 (2003), pp. 653–672.

[7] W. Kim and J.-D. Lee, *Measuring the role of technology-push and demand-pull in the dynamic development of the semiconductor industry: the case of the global DRAM market*, J. Appl. Econ., 12 (2009), pp. 83–108.

[8] M. P. Lepselter and S. M. Sze, *DRAM pricing trends—the π rule*, IEEE Circuits Devices Mag., 1 (1985), pp. 53–54.

[9] N. M. Victor and J. H. Ausubel, *DRAMs as model organisms for study of*

technological evolution, Technol. Forecast. Soc. Change, 69 (2002), pp. 243–262.

[10] H. Gruber, *The learning curve in the production of semiconductor memory chips*, Appl. Econ., 24 (1992), pp. 885–894.

[11] K. Flamm, *Measuring Moore's law: evidence from price, cost, and quality indexes*, in *Measuring and Accounting for Innovation in the 21st Century*, University of Chicago Press, 2019.

[12] S. D. Wu, M. Erkoc, and S. Karabuk, *Managing capacity in the high-tech industry: A review of literature*, Eng. Econ., 50 (2005), pp. 125–158.

[13] E. Lukas, T. S. Spengler, S. Kupfer, and K. Kieckhäfer, *When and how much to invest? Investment and capacity choice under product life cycle uncertainty*, Eur. J. Oper. Res., 260 (2017), pp. 1105–1114.

[14] D. Asmat, *Collusion along the learning curve: Theory and evidence from the semiconductor industry*, Available SSRN 3470229, 2019.

[15] N. Geng and Z. Jiang, *A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry*, Int. J. Prod. Res., 47 (2009), pp. 3639–3655.

[16] O. Takagi, T. Iizuka, T. Honda, and T. Honda, *Method for manufacturing multi-kind and small quantity semiconductor products in a mass-production line and system thereof.* Google Patents, 01-Mar-2005.

[17] S. Bermon and S. J. Hood, *Capacity optimization planning system (CAPS)*, Interfaces (Providence)., 29 (1999), pp. 31–50.

[18] S. J. Hood, S. Bermon, and F. Barahona, *Capacity planning under demand uncertainty for semiconductor manufacturing*, IEEE Trans. Semicond. Manuf., 16 (2003), pp. 273–280.

[19] S. Giegling, W. A. Verdini, T. Haymon, and J. Konopka, *Implementation*

of overall equipment effectiveness (OEE) system at a semiconductor manufacturer, in *Twenty First IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium Proceedings 1997 IEMT Symposium*, 1997, pp. 93–98, pp. 93–98.

[20] F. Barahona, S. Bermon, O. Günlük, and S. Hood, *Robust capacity planning in semiconductor manufacturing*, Nav. Res. Logist., 52 (2005), pp. 459–468.

[21] J. A. Norton and F. M. Bass, *A diffusion theory model of adoption and substitution for successive generations of high-technology products*, Manage. Sci., 33 (1987), pp. 1069–1086.

[22] C.-F. Chien, Y.-J. Chen, and J.-T. Peng, *Manufacturing intelligence for semiconductor demand forecast based on technology diffusion and product life cycle*, Int. J. Prod. Econ., 128 (2010), pp. 496–509.

[23] F. Black and M. Scholes, *The pricing of options and corporate liabilities*, J. Polit. Econ., 81 (1973), pp. 637–654.

[24] S. C. Myers, *Determinants of corporate borrowing*, J. financ. econ., 5 (1977), pp. 147–175.

[25] J. C. Cox, S. A. Ross, and M. Rubinstein, *Option pricing: A simplified approach*, J. financ. econ., 7 (1979), pp. 229–263.

[26] C.-C. Chen, Y.-S. Chiang, and C.-F. Chien, *Real option analysis for capacity investment planning for semiconductor manufacturing*, in *2007 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 2007, pp. 1–3, pp. 1–3.

[27] N. P. B. Bollen, *Valuing options in regime-switching models*, J. Deriv., 6 (1998), pp. 38–50.

[28] N. P. B. Bollen, *Real options and product life cycles*, Manage. Sci., 45

(1999), pp. 670–684.

[29] K. Flamm, *Measurement of DRAM prices: Technology and market structure*, in *Price measurements and their uses*, University of Chicago Press, 1993, pp. 157–206.

[30] A. Roy, N. Kim, and J. S. Raju, *Assessing new empirical industrial organization (NEIO) methods: The cases of five industries*, Int. J. Res. Mark., 23 (2006), pp. 369–383.

[31] K. Schwab, *The fourth industrial revolution*. Currency, 2017.

[32] P. P. Boyle, J. Evnine, and S. Gibbs, *Numerical evaluation of multivariate contingent claims*, Rev. Financ. Stud., 2 (1989), pp. 241–250.

[33] B. Jafarizadeh and R. B. Bratvold, *Two-Factor oil-price model and real option valuation: An example of oilfield abandonment*, SPE Econ. Manag., 4 (2012), pp. 158–170.

[34] S. Yu, Z. Li, Y. M. Wei, and L. Liu, *A real option model for geothermal heating investment decision making: Considering carbon trading and resource taxes*, Energy, 189 (2019), p. 116252.

[35] D. An, D.-J. Lee, T. Kim, and J.-H. Park, *Real Options Analysis of Next-Generation Frequency Spectrum License*, in *2019 Wireless Telecommunications Symposium (WTS 2019)*, 2019.

[36] N. Henze and B. Zirkler, *A class of invariant consistent tests for multivariate normality*, Commun. Stat. Methods, 19 (1990), pp. 3595–3617.

[37] 이덕주, 범위의 경제를 고려한 유연생산기술의 최적 용량투자 및 생산계획, 대한산업공학회지, 31 (2005), pp. 135–142.

Abstract

Optimal Capacity Investment Strategy for DRAM and Flash Memory Chip Manufacturer Considering Price Uncertainty : Two-Factor Real Option Approach

JaiSung Hwang
Department of Industrial Engineering
The Graduate School
Seoul National University

In the memory semiconductor industry, since the investment cost of production capacity is very high and it takes a long time to mass-produce after the investment, establishing an investment strategy through market prediction is the most important decision-making activity of the manufacturer. Memory semiconductors are classified into DRAM and Flash, and the two products form individual markets in terms of price volatility. However, since most DRAM and Flash manufacturers are the same, it is necessary for manufacturers to consider the both markets at the same time in order to solve optimal production capacity investment problem to

maximize profits. In this study, the optimal production capacity strategy for maximizing manufacturer's profits was analyzed using a two-factor compound real option technique that simultaneously reflected the price uncertainty of both products. As a result of numerical examples, the volatility of DRAM prices has a greater effect on the size and timing of investment in production capacity. It was derived as an optimal strategy to invest in the maximum production capacity as long as the price of DRAM does not decline, regardless of Flash price fluctuations. It is interpreted that the low unit margin of Flash offsets the increase in profits generated by the increase in demand, and the condition that the yield of Flash must be secured over 95% was derived to generate and maintain Flash profits. In addition, through the sensitivity analysis, the relationship between the optimal production capacity and expected profits according to changes in the manufacturer's business environment such as yield, production capacity expansion cost, and conversion efficiency has been observed. This study attempts to presents a decision making model that reflects memory chip manufacturers' situation that they simultaneously supply DRAM and Flash to the market and their key engineering conditions such as changes in conversion efficiency due to the production of multi-generation products. It is expected that the main contribution point of this study can be found in these attempts.

Keywords: Memory semiconductor, price uncertainty, real option, optimal capacity

Student Number: 2019-22377

감사의 글

서울대학교 산업공학과의 모든 식구들께 감사드립니다.