



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](#)

공학석사 학위논문

다중 요구사항의 상충관계를
고려한 설계변경 관리 방법론

A conflict resolution methodology for handling
multiple functional requirements in
engineering change management

2023년 8월

서울대학교 대학원

산업공학과

유재상

다중 요구사항의 상충관계를 고려한 설계변경 관리 방법론

A conflict resolution methodology for handling
multiple functional requirements in
engineering change management

지도 교수 홍유석

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023 년 6월

서울대학교 대학원
산업공학과
유재상

유재상의 공학석사 학위논문을 인준함
2023 년 7 월

위 원 장 _____ 장 우 진 (인)

부위원장 _____ 홍 유 석 (인)

위 원 _____ 이 덕 주 (인)

초 록

기업이 제품의 다양성을 높여 소비자들의 지속적인 관심을 이끄는 것은 자연스러운 현상이다. 제품 개발 프로세스를 처음부터 진행하여 신제품 출시를 하기 보다, 기존 제품의 특정 사양을 업그레이드하는 전략을 취함으로써 기업은 출시기간 단축과 비용절감이라는 효과를 얻을 수 있다. 학계에서 이러한 설계변경관리에 대한 연구가 계속해서 진행되고 있으나, 단일 기능적 요구사항을 해결하는 것에 초점을 두고 있다. 때문에 다양한 기능적 요구사항을 충족한 신제품을 출시하는 과정에서 발생하는 각 요구사항들의 상충관계(conflict relation)에 대한 분석과 제품 내에서의 변경전파(change propagation)상의 상충관계에 대한 분석이 부족하다.

이러한 문제 상황을 해결하기 위해 본 논문은 다중 요구사항을 동시에 충족하는 과정에서의 상충관계를 정의하고, 이를 최소화하는 방법론을 도출하는 최적화 모델을 제안한다. 이는 각 요구사항 사이에서의 독립성과 제품 내에서의 독립적인 변경전파를 가정하여, 단순 합산으로 비용, 시간, 복잡도를 고려한 기존 연구와는 차별성을 갖는다. 이때 상충관계를 크게 두가지로 나눠 분석한다. 직접적 상충관계는 기능적 요구사항과 설계변수 사이에서 발생하는 상충관계를, 간접적 상충관계는 설계변수의 변화로 인한 제품 구조 내의 변경전파 과정에서의 상충관계를 분석한다. 본 연구의 모델은 각 요구사항마다 어떤 설계대안을 선택할지에 대한 의사결정과 각 설계변수의 재설계로 인한 변경전파 상에서의 경로를 최적화하여 상충관계를 해결하고자 한다. 이를 통해 충돌로 인해 예상치 못한 악효과를 줄일 수 있어 기업에 실무적인 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 설계변경 관리, 설계변경 대안, 설계변경의 파급효과, 변경전파 경로, 상충관계

학 번 : 2021-28863

목 차

초록	i
목차	ii
표 목차	iv
그림목차	v
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 논문구성	4
제 2 장 선행연구	5
2.1 설계변경관리	5
2.2 설계변경 대안	8
2.3 설계변경의 파급효과	9
2.4 변경전과 경로	10
2.5 다중 요구사항에서의 효과와 상충관계	12
2.6 관련 연구의 한계	13
제 3 장 모델	16
3.1 연구 프레임워크 및 문제상황	16
3.2 기능적 요구사항의 계층적 분해	20
3.2.1 기능적요구사항과설계대안의관계	20
3.2.2 설계대안과 설계변수 관계	21
3.2.3 설계변수의 변경전과 경로탐색	22
3.3 다중 요구사항의 상충관계 해결 방법론	25
3.3.1 Notation	25
3.3.2 단계별 상충관계 해결 프로세스	26
제 4 장 사례 연구	32
4.1 제품의 정보사항	32
4.2 설계변경 대안탐색	34
4.3 변경전과 경로 탐색	35
4.4 설계변경 대안 평가	38
4.5 재설계 정도를 고려한 설계변경 대안 평가	39

제 5 장 결론 및 향후 연구 방향	43
5.1 결론	43
5.2 한계점 및 향후 연구 방향	45
참고문헌	48
Abstract	54

표 목차

표 2.1	설계변경관리의 선행연구와 본 연구의 비교	15
표 3.1	최종 전파경로 행렬	24
표 4.1	최종 경로 조합에 따른 상충관계 정도	38
표 4.2	재설계 정도를 고려한 최종경로의 상충관계 정도	42

그림 목차

그림 1.1	설계변경 관리의 상충관계 증가	3
그림 2.1	설계변수 사이의 논리적 관계	11
그림 3.1	상충관계 해결 방법론 프레임워크	16
그림 3.2	자전거의 직접적 상충관계 예시	17
그림 3.3	자전거의 간접적 상충관계 예시	19
그림 3.4	기능적 요구사항과 설계 대안 사이의 관계	21
그림 3.5	설계 대안과 설계변수 사이의 관계	22
그림 3.6	전과 경로 탐색 유도과정	22
그림 3.7	AND/OR 로직 관계 도출	24
그림 3.8	변경된 OR 게이트를 활용한 상충관계 진단	28
그림 3.9	각 설계변수의 변경전과 과정에서의 상충관계	39
그림 3.10	설계변수의 변경전과 경로 탐색	30
그림 4.1	기능적 요구사항과 관련된 계층적 분해관계	32
그림 4.2	각 설계변수 별 변경전과경로	33
그림 4.3	설계 대안과 설계변수에서의 상충관계 사례	34
그림 4.4	최종적으로 선택된 설계 대안과 설계변수	34
그림 4.5	설계변수의 첫번째 변경전과 경로	35
그림 4.6	수리적 계산을 위한 전처리과정	36
그림 4.7	설계변수의 변경전과 경로	37
그림 4.8	변경 정도를 고려한 경로 행렬	39
그림 4.9	변경 정도를 고려한 최종경로	40

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

현대 기업은 계속해서 새로운 제품을 출시하여 소비자들의 지속적인 관심을 유도하고 있다 (Allada et al., 2002; Takeuchi et al., 1986). 이 과정속에서 제품 개발 프로세스(product development process)를 처음부터 진행하여 신제품개발(new product development)을 하기 보다, 기존 제품에서 소비자의 요구사항을 반영하여 출시기간의 단축과 비용절감의 효과를 얻고자 하는 전략을 취하고 있다 (Jarratt et al., 2011; Tavcar & Duhovnik, 2005).

하지만 이러한 설계변경관리(engineering change management)에 대한 효과가 점차 낮아지고 있다. 그 이유는 첫째로 경쟁가속화로 인한 여러 기능적 요구사항(functional requirement)을 동시에 고려한 신제품 출시의 필요성 증가이다 (Cooper, 1990; Sbragia, 2000). 그동안 학계에서는 단일 기능적 요구사항을 반영하는 설계변경관리에 대한 방법론을 주로 다뤘다. (1) 요구사항을 다룰 수 있는 여러 설계변경 대안들 중 어떤 대안을 선택해야 하는지에 대한 의사결정, (2) 제품 내의 파급효과를 분석한 의사결정, (3) 다양한 변경진과 경로가 존재할 때, 각 경로에 따른 재설계 효과 분석한 의사결정이 바로 이러한 예시이다. 그러나 여러 기능적 요구사항을 다루는 것은 단일 요구사항을 연속적으로 다루는 것과 다르다. Suh (1998)는 제품 디자인에서 각 기능적 요구사항은 서로 독립적으로 이루어져 있고, 이에 독립적으로 기능적 요구사항과 설계변수의 관계가 형성될 수 있다고 주장한다. 하지만 실제 제품이 각 기능적요구사항을 온전히 독립적인 관계를 유지한 채 설계되는 것은 (1) 기능 추가로 인한 제품의 복잡성 증가, (2) 무게, 크기와 같은 변수 전체에 영향을 주는 전역적 요구사항, (3) 각 요구사항에 대한 다수의 설계변경 옵션 존재 등의 이유로 현실적으로 어려운 상황이다. 그러므로,

기능적 요구사항은 설계변수(design parameter; DP)을 매개로 하여 서로 커플링(coupling)되어 있다고 볼 수 있다. 이에 독립적으로 각 요구사항을 반영할 경우, 변경된 설계변수를 다시 반대방향으로 조정이 필요한 경우가 발생하며, 이는 앞서 처리한 기능적 요구사항에 대한 효과가 미비해지거나 오히려 악화될 수 있는 경우를 초래할 수 있다. 따라서 여러 기능적 요구사항을 반영하여 신제품을 출시하는 경우, 각 요구사항 사이에서의 상충관계를 고려한 분석이 필요하다 (Zhao, 2001).

두번째 원인으로서는 제품의 기능 다양화로 인한 복잡성 증가가 변경전과 과정 내에서의 어려움을 유발하는 경우이다 (Cooper, 1990; Meyer & Utterback, 1995). 앞서 언급했듯, 기업은 새로운 기능을 추가하거나 기존 기능을 업그레이드하며 계속해서 소비자의 관심을 유도하고 있으나, 이는 설계 변수 사이의 관계를 더욱 복잡하게 만든다. 설계변수 사이의 복잡성 증가는 설계변경의 파급효과에서 더 많은 전과가능성(likelihood)과 더 높은 재설계 정도(impact)를 야기하여 결과적으로는 재설계과정에서의 추가적인 비용과 기간, 그리고 복잡성과 반복(iteration) 증가라는 악효과를 발생시킨다 (Rebentisch et al., 2017; Bauer et al., 2015). 여러 기능적 요구사항을 반영해야 할 경우 재설계 변경을 야기하는 설계변수들의 수가 상대적으로 많아지게 되는데, 이는 설계변경관리에서 전과과정에서의 악영향을 최소화하는 것이 더욱 중요하다는 것을 보여준다. 또한 여러 변수들을 변경해야 할 경우, 전과과정 내에서도 특정 설계변수를 서로 다른 방향으로의 조정이 필요한 상충관계가 발생할 수 있다. 이러한 설계변수는 기능적 요구사항과 직접적으로 연관되어 있기 보다는, 제품의 새로운 안정점을 찾기 위한 과정속에서의 상충되는 설계변수라고 볼 수 있다 (Tang et al., 2016). 소비자가 원하는 요구사항과는 관련이 없는 설계변수일지라도 각 변수의 상충되는 정도가 커지게 되면, 제품의 안정된 점을 찾기가 점차 어려워지기 때문에 이 역시 변경전과 내에서의 충돌을 최소화하는 분석이 필요하다. 즉, 제품 내부에서 어떤 변경전과경로를 통해 연쇄적인 변화를 흡수할 것인지를 분석함으로써 상충정도를 최소화하는

방법론 또한 필요하다.

이처럼 여러 기능적 요구사항을 반영하여 신제품을 출시해야 하는 경우, (1) 여러 요구사항이 특정 설계변수에 서로 다른 방향으로의 조정이 요구가 됨에 따른 실현 불가능성에 대한 분석이 필요하며 (2) 제품 내의 변경전과 과정속에서 발생한 간접적인 충돌로 인한 악효과에 대한 분석이 필요하다. 즉, 본논문에서는 기능적 요구사항을 어떤 설계 대안을 통해 해결할 것인지에 대한 의사결정과 어떤 변경전과 경로를 선택할지에 대한 분석을 다룬 end-to-end 방법론을 제시하고자 한다. 이는 다중 기능적 요구사항을 반영해야 하는 기업 입장에서 상충관계를 최소화할 수 있는 각 단계별 의사결정을 제시할 수 있다는 점에서, 실무적으로 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

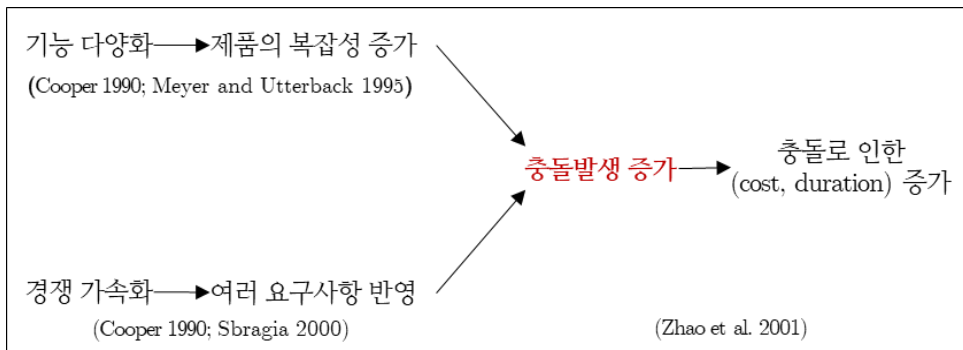


그림 1.1 설계변경 관리의 상충관계 증가

1.2 논문구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있다. 2장 선행연구에서는 그동안 설계변경관리와 관련하여 어떤 연구들이 진행되었는지를 각 파트별로 정리하여 살펴보고, 관련 연구가 여러 기능적 요구사항을 반영하는 과정속에서의 상충관계에 대한 특성을 반영하는데 미진했다는 점을 지적한다. 제 3장에서는 본 연구에서의 모델 부분이며, 크게 (1) 기능적 요구사항과 설계변수와의 상충관계를 고려한 조합선정 문제와 (2) 제품 내부 변경전파(change propagation)과정에서의 상충관계를 최소화할 수 있는 변경전파 경로 최적화문제, 이렇게 크게 2가지의 문제를 푸는 상충관계 해결 방법론을 제시한다. 제 4장에서는 사례연구를 통해, 본 연구에서 제안한 방법론을 적용하여 상충관계를 최소화하면서 여러 기능적 요구사항을 반영할 수 있는 설계대안 선정과 각 변수의 변경전파 경로를 제시한다. 제 5장에서는 본 연구의 의의와 한계를 바탕으로 향후 연구 방향에 대해서 논의한다.

제 2 장 선행연구

2.1 설계변경관리

기업의 생산방식은 기존의 대량생산을 통한 비용감소전략에서 다품종 소량생산을 통한 시장 점유율을 늘리는 전략으로 이동하고 있다. (Tseng & Jiao, 2001) 이는 기업 중심에서 소비자 중심의 제품 설계 방식으로 바뀌고 있음을 의미한다. 이에, 기업은 계속해서 신제품 출시를 통해 소비자의 관심을 유도하여야 하는 압박을 받는다 (Brown & Karagozoglu, 1993; Mcdonough & Barczak, 1991).

신제품을 출시하는 방법은 크게 두가지이다. 첫째는 제품 개발 프로세스를 처음부터 진행하여 새로운 제품 아키텍처를 제시하는 것이고 두번째는 기존 제품이 주어진 상황에서 특정 요구사항만 반영하여 출시하는 방법이다. 두 방법 모두 장단점이 존재한다. 먼저 첫번째의 경우 기존 제품 구조 속에서 새로운 기능을 추가하거나, 제품구조를 바꾸는 것이 기존 제품의 기술적 노후화로 인해 어려운 경우가 바로 그러하다 (Kang et al., 2012; Broeke et al., 2021). 혹은 바뀌어야 하는 요구사항이 많은 경우 기존의 제품구조를 따르는 것 보다, 새로운 아키텍처를 제안함으로써 이를 더욱 효과적으로 해결할 수 있다. 하지만, 기존 제품구조의 변경이 가능한 경우에 새로운 프레임워크를 제시하는 것은 생산과정 뿐만 아니라, 여러 구조가 다른 제품을 관리한다는 점에서 비효율성을 제고한다 (Oh et al., 2022).

두번째는 본 연구에서 바라보고 있는 상황으로, 기존 제품구조 내에서 더 빠른 기간과 더 효율적인 비용으로 제품을 출시할 수 있다는 장점이 있다 (Erckert et al., 2004; Cohen et al., 2000). 더 나아가 여러 제품에서 공용된 부품을 사용하는 제품 플랫폼 전략을 사용하는 제품군을 형성할 수 있어, 전체 제품군을 생산하고 관리하는 과정속에서 많은 이점을 볼 수 있다 (Martin & Ishii, 2002; Simpson et al., 2001).

기존 제품 구조가 주어진 상황속에서 부품, 도면 혹은 소프트웨어를

변경함으로 인해 발생하는 변경사항을 설계변경이라고 정의한다 (Jarratt et al., 2011). 설계변경은 크게 외부적 요인으로 인한 설계변경과 내부적 요인으로 인한 설계변경으로 나눌 수 있는데, 내부적 요인은 외부로 인한 설계변경이 발생한 이후, 제품의 안정점을 찾는 과정에서 제품 내부에서 변화하는 과정을 의미한다 (Tang et al., 2016). 외부적 요인은 주로 불안정한 시장, 소비자의 요구사항, 정부의 정책으로 인해 제품의 변경사항이 필요한 상황을 의미한다 (Jarratt et al., 2011). 그리고 이를 어떻게 엔지니어 관점에서 시행할 것인지를 의사결정 하는 것을 설계변경관리라고 한다.

구체적으로 설계변경관리를 하는 단위는 크게 부품 혹은 설계변수의 단위로 나눌 수 있고, 제품의 구조가 너무 복잡한 경우, 모듈 단위로의 분석을 진행하기도 한다. 이때 주로, 설계변경관리는 차후의 내부적 설계변경도 이뤄지게 되므로 부품단위로의 분석을 하는 것이 일반적이다. 그러나 부품이라고 할지라도 정확히 어떤 속성 및 설계변수를 바꿔야 하는지를 구체적으로 엔지니어에게 제시하지 못하기 때문에 실무적인 도움에 한계가 있을 뿐더러, 어떤 설계변수를 건들지에 따라 변경되는 과정에서의 영향도 상이할 수 있다는 한계가 있다 (Zheng et al., 2020). 따라서 설계변수 단위의 분석에 대한 연구에 대한 필요성이 증가하고 있다.

외부적 요구사항 중에서도 특히 소비자의 기능적 요구사항을 설계변수단위로의 매핑하는 과정에 대한 연구도 다양하게 시도되고 있다. 먼저 Suh (1998)는 기능적 요구사항과 설계변수단위의 연결을 계층적 분해를 통해 서로 연결한다. 기능적 요구사항들 사이에서는 서로 독립적이며, 기능적 요구사항을 다룰 수 있는 설계대안은 하나라는 가정을 취하고 있다. 두번째로 품질기능전개(QFD, quality function deployment)는 소비자의 요구사항에서 설계변수 사이의 관계에서 제품속성을 추가하여 연결관계를 제시하였다 (Hauser & Clausing, 1988). 이는 소비자는 구체적인 설계변수를 알지 못하고, 엔지니어는 소비자의 요구사항이 구체적으로 어떤 속성을 변경해야 하는 것을 알지 못하기

때문에, 제품의 속성을 사이에 두고 서로 의사소통이 가능하게 하는 논리적인 방법을 제시하였다. 추가적으로 각 설계 대안 및 설계 변수는 서로에게 연관이 되어있어, 독립적으로 변경을 시행하지 못할 수 있다는 것도 제시하였다. 그 외에도 (Chua & Hossin, 2012)는 변경 정도(change degree)를 고려한 대처방안을 제시하였고, 정서영(2019)는 기능 구조 다이어그램을 활용하여, 소비자와 엔지니어의 도메인을 연결하였다.

2.2 설계변경 대안

Suh (1998)은 공리적 설계를 주장하며 각 요구사항과 설계변수의 대응관계를 유일하고 독립적으로 설계해야 한다고 주장하였다. 처음 제품 설계를 모듈화 된 형태로 설계했다 할지라도, 기능을 추가하고 업그레이드 함에 따라 제품은 점차 통합형(integral) 제품이 될 수 있다 (Inman et al., 2014). 또한 실제 제품이 정확히 모듈형식으로 독립적인 형태로 존재할 수 없으며, 이에 대한 기준도 모호하다. 따라서 Jarratt et al. (2011)을 시작으로, 실제 기능적 요구사항을 반영할 수 있는 여러가지 설계대안이 존재하고 각 대안들마다 효과가 다르기 때문에 이를 비교하는 연구가 등장했다. Jarratt는 (1) 어떠한 설계 변경에 대한 요구사항이 들어오면, (2) 가능한 설계 대안(redesign option)을 찾고, (3) 각 대안들마다 위험과 영향 (risk and impact)를 비교하는 과정을 걸쳐 (4) 최종 설계 대안을 찾는 과정을 전체 설계변경 관리 프로세스라고 칭한다. Ahmad (2009)는 소비자가 요구하는 기능적 요구사항은 아직 구체적인 수치가 아니기 때문에 여러 제품의 속성을 조절함으로써 이를 반영할 수 있다고 주장하고, 이는 곧 여러 설계 대안이 존재한다는 것을 보여준다. 자전거의 예시를 들어, 조향성을 향상하기 위한 설계 속성으로는 휠 베이스, 관성, 포크 오프셋, 회전 각도 등이 존재하고 그에 상응하는 각 설계변수들이 존재한다는 것을 예시로 들었다. Koh (2012)는 비행기 들어가는 제트 엔진 팬(jet engine fan)을 예시로 들어, 설계대안을 걸쳐 영향을 받는 부품 그리고 각 부품들 사이의 관계를 통해 각 설계대안을 선택하고 평가하였다. 기능적 요구사항과 설계대안 그리고 설계변수들 사이의 관계를 일종의 품질기능전개 행렬을 사용하여 순환하였다. Ullah et al. (2017)는 변화를 유발하는 설계변수의 변경 가능도와 정도를 고려하여, 각 설계대안마다 제품 내 파급효과를 분석하는 과정을 시뮬레이션을 통해 진행하였다. Ullah et al. (2017)는 여러 설계대안은 주어져 있고, 설계변수마다 변경 가능도와 정도가 다른 것을 토대로 각 대안을 비교하였다.

2.3 설계변경의 파급효과

설계변경의 파급효과를 분석하는 것은 앞선 3.1에서 언급한 내부적 설계변경을 관리하는 것을 의미한다. 구체적으로는 특정 요구사항을 반영하기 위한 변수를 재설계하는 과정을 거쳐, 최종적으로 제품 내에서 연쇄적인 변경을 분석하는 과정을 의미한다 (Schach et al., 2000). 제품 내의 연쇄적인 변경과정은 설계변경의 추가적인 비용과 기간을 야기하기 때문에 분석이 필요하다. Clarkson et al. (2004)는 제품의 부품 단위에서 변화를 야기하는 설계변수가 바뀌었을 때, 제품 내에서 그 변경으로 인한 전파과정이 어떻게 진행되는지를 가능성과 정도를 고려하여 위험(risk)로 정의하여 계산한다. 이때, 단순 연결된 부품 사이의 전파뿐만 아니라, 다른 부품을 경유해서 발생하는 간접적인 파급효과까지도 분석 하였는데, 이를 행렬을 활용한 CPM(change prediction model)을 제시하였다. Rouibah et al. (2003)는 부품단위의 분석에서 더 나아가 설계변수단위의 설계변경의 전파관리에 대해서 연구하였다. Hamraz et al. (2013)는 가능성과 정도를 사전에 주어진 것이 아닌 제품의 인터페이스를 바탕으로, 두 변수간 관용정도(tolerance)를 반영하여 변경에 따른 정도와 가능성을 분석하였다. Yang et al. (2005)는 설계변수의 연결관계를 네트워크로 표현하여 전파양상을 표현하여 분석하였다. Lee et al. (2017)는 베이지안 네트워크를 활용하여 서로 연결된 설계변수사이의 여러 조건을 고려하여 변경전파를 분석하였다. 이는 모든 경우에서의 변경이 아닌, 인접한 설계변수에 대한 영향을 분석할 수 있어 분석에 필요한 사이즈가 많을 경우에도 효율적으로 작동할 수 있다는 장점이 있다.

2.4 변경전과 경로

2.3에서의 설계변경의 과급효과에서는 내부적 설계변경을 판단하는 방법론에 대해서 언급하였으나 모두 단일한 경로를 갖고 있다는 한계가 있다. 2.4에서는 변경전과 과정속에서 여러 경로가 존재하고, 이 중 어떤 경로를 선택해야하는가에 대해 연구한 선행연구에 대해서 서술하고자 한다.

기능적 요구사항을 다룰 수 있는 물리적 설계 대안이 다수인 것처럼, 실제 제품 내의 변경 전과과정에서의 경로 또한 다양하다 (Li et al., 2012; Li et al., 2014; Hamraz et al., 2012). 이 때 여러 설계 변경 경로가 있을 때 어떤 경로로 설계변경을 진행해야 하는가를 비교하는 것이 필요하다. 이 때, 목적함수는 다양할 수 있는데 설계변경의 시간, 비용, 복잡성, 변경이 필요한 부품 및 설계변수의 수 등을 최소화하는 것을 주로 목표로 한다 (Tang et al., 2016; Yin et al., 2022). Ni et al. (2022)는 이러한 여러 목적함수를 동시에 충족할 수 있는 변경경로를 찾는 연구를 진행하였다. Ullah et al. (2017)는 시뮬레이션을 활용하여 각 설계 변수의 변경 가능도와 정도를 고려하여, 어느 설계 대안을 선택하고, 각 설계 변수들마다 어떤 경로로 변경전과를 흡수해야 하는가를 결정하였다.

각 변경전과 과정마다 여러가지 경로가 존재하고 이미 주어진 상황에서 문제를 접근하는 연구도 존재하지만, 내부적 변경전과 과정에서의 다양한 설계경로를 단순 처음부터 존재하고 주어졌다고 하는 것은 한계가 존재한다 (Gan et al., 2021). 따라서, 제품의 구조 및 부품 간의 연결관계를 통해 논리적으로 각 변경전과를 도출하고자 하는 노력이 다양하게 시도되고 있다. 부품 간의 관계를 AND/OR 논리적 관계를 이용해, 부품의 변화의 관계에 주목하여 변화 양상을 비교한 연구들이 대다수이다 (Yan et al., 2022; Gan et al., 2021). AND는 변경 전과 과정속에서 여러 변수들이 동시에 변경이 필요한 관계를, OR은 특정 경로로 전과가 선택될 수 있는 관계를 의미한다.

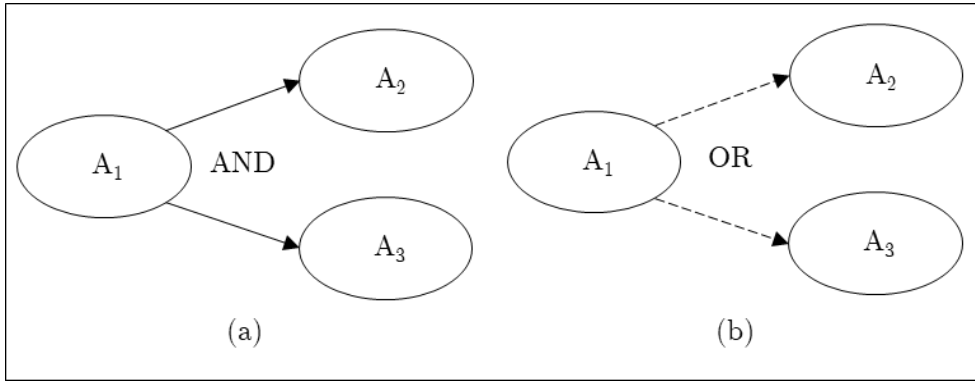


그림 2.1 설계변수 사이의 논리적 관계

그림 2.1은 Tang et al. (2012)이 제시한 AND/OR의 논리적 관계를 표현한 한 예시이다. 이 외에도 더 다양한 if-then 규칙으로 여러 조건들을 반영하여 각 변수들 사이의 관계를 정리하는 연구들도 존재한다. Haibing (2019), Yang et al. (2012), Ma et al. (2016)을 비롯한 연구는 제품이 충족해야 하는 주요한 제약조건이 존재하고, 설계변수의 변화로 인해 다시 제약조건을 충족하는 과정을 변경전파라고 정의하였다. 이 과정속에서 다시 제약조건을 충족할 수 있는 경우는 다양하게 존재하기 때문에 각 설계변수마다의 전파되는 경우의 수가 상이하다는 것을 주장한다. 그 외에도 Yin et al. (2022)은 개미집단(Ant colony) 알고리즘, Gan et al. (2021)은 페트리 넷(Petri net) 알고리즘을 활용하여, 복잡한 제품 내에서의 전파경로를 휴리스틱을 활용하여 탐색하는 과정을 다뤄 내부적 설계변경관리의 다양한 경로를 반영하여 연구를 진행하였다.

2.5 다중 요구사항에서의 효과와 상충관계

설계변경관리에서 여러 요구사항을 동시에 충족하는 방안을 도출하는 방법은 (1) 연속적으로 단일 요구사항을 다루는 방안과 (2) 동시에 여러 요구사항을 다루는 방안이 존재한다. Schuh (2010, 2013, 2016, 2017)은 여러 요구사항이 주어진 상황속에서, 어느 요구사항을 동시에 반영하는지에 따라, 노동력과 비용의 효과를 얻을 수 있을지를 연구하였다. 구체적으로 공통된 부품의 변경이 여러 요구사항을 동시에 충족할 수 있다면, 이는 동시에 반영할 때 얻을 수 있는 효과라고 보고 이를 계산하여 기능적 요구사항의 조합을 선정하였다. 그러나 모든 동일한 부품일지라도 요구되는 정도가 다를 수 있고, 재설계가 필요한 부품 내의 설계변수가 다를 수 있고, 심지어 다른 방향으로 조절이 필요할 수도 있기에, 항상 효과를 가져온다는 주장에 한계가 있다. Cohen et al. (2000)는 여러 요구사항을 반영하는 순서에 주목하여, 요구사항을 반영하는 순서에 따라 기존 제품의 구조가 바뀌게 되고 이는 곧 다음 요구사항을 반영할 경우 발생하는 연쇄적인 관계를 주목하였다. 민감도 분석으로 활용하여, 어떤 요구사항을 변경했을 때 어느 정도의 변화가 필요한지를 행렬의 계산을 통해 유도하였다. Ostrosi et al. (2012)는 여러 요구사항을 동시에 충족하기 위해 합의(consensus)라는 중간 단계를 두어, 상충관계 바탕으로 동시에 진행할 수 있는 여러 요구사항들의 조합 및 설계변수의 조합을 계산하였다. 이는 상충관계를 해결하기 보다는, 상충관계를 바탕으로 가능한 조합을 선별한 과정을 의미한다. Marques et al. (2013)는 상충되는 요구사항과 설계변수의 관계를 더 낮은 레벨의 하위 요구사항(sub-FR)과 하위 설계변수(sub-DP)로 나뉘, 상충관계를 해결하였다. 앞서 언급한 다양한 설계대안의 존재하는 것을 통해 다른 대안을 선택함으로써 여러 기능적 요구사항을 반영하는 과정으로 이해할 수 있다.

2.6 관련 연구의 한계

- 각 단계에서의 여러 경우의 수를 고려한 end-to-end 설계변경 방법론 미비

그간 설계변경 관리에 대한 연구는 특정 한 부분에 대한 다양성에 집중되어 왔다. 다양한 설계 대안에 대해서 고려를 하거나 (Jarratt et al., 2011; Ullah et al., 2017), 다양한 변경전과 경로에 대해서 고려를 하는 연구는 있으나 (Li et al., 2012; Li et al., 2014; Hamraz et al., 2012), 이 둘을 동시에 고려하는 연구는 미비하다. 그러나 설계변경관리의 개념에서 볼 수 있듯, 외부적 설계변경의 관리와 내부적 설계변경의 관리가 동시에 충족되어야 효율적인 대안을 제시할 수 있다. 이는 기능적 요구사항을 반영하는 외부적 설계변경 과정에서는 효율적일지라도, 설계 전과의 파급효과를 분석했을 때에는 제품 구조 내에서 많은 악효과를 볼 수 있기 때문이다. 따라서, 다양한 조합을 반영하여 전체적인 설계변경관리를 하는 것이 필요하다.

- 방향성을 고려한 설계변경의 상충관계 분석 부재

모든 요구사항 사이에서 혹은 제품 내의 설계변수 사이에서 독립성이 보장이 된다면, 서로의 상관관계에 대한 영향을 분석할 필요가 없다. 하지만 많은 제품이 서로 연관되어 있기 때문에, 이로 인해 발생하는 상충관계에 대한 분석이 필요하다. Schuh (2016, 2017)처럼 동시에 고려가 되어야 하는 설계변수가 때면 좋은 협력관계(synergy)를 불러오진 않는다. 제품 설계의 방향성을 고려하여, 같은 설계변수가 영향을 받았다 할지라도 서로 다른 방향으로의 조절을 요구한다면, 이는 개별적으로 시행했을 때보다 더 큰 문제가 될 수 있다. 따라서, 설계 변경의 방향성을 추가적으로 고려하여, 여러 요구사항을 동시에 반영했을 때 발생하는 역효과를 분석하고 이를 최소화 하는 방법론을 도출하는 과정이 필요하다.

다중 기능적 요구사항, 다양한 설계 대안, 여러 전파 경로 탐색 그리고 상충관계를 종합적으로 고려하여 end-to-end의 방법론을 도출한 본 논문은 타 설계변경관리의 연구와 차별점을 갖는다. 설계변경관리에서의 선행연구와 본 연구의 비교사항은 표 2.1과 같다. 방향성을 고려하여 상충관계를 최소화 하고자 했던 본 연구의 핵심 아이디어는 설계변경관리에서의 의도치 않은 추가적 비용을 분석하는데 도움을 줄 수 있다.

표 2.1 설계변경관리 의 신행 연구와 본 연구의 비교

	Ahmad. et al. (2009)	Jarratt (2011)	Ostrosi, et al. (2012)	Koh, et al. (2012)	Yang, et al. (2012)	Tang, et al. (2016)	Ullah, et al. (2017)	Alireza et al. (2022)	This
Conflict resolution			○	○				○	○
Path search	○	○		○			○		○
Multi paths					○	○	○		○
Multi candidates					○		○		○
Multi FR			○					○	○

제 3 장 모델

3.1 연구 프레임워크 및 문제상황

본 연구의 전체 프레임워크는 고객의 요구사항을 공학적 설계와 관련된 기능적 요구사항으로 매핑한 정보로부터 시작하여 설계 대안, 설계 변수들의 집합 그리고 각 설계변수의 변경전과 경로 상에서의 분석까지의 end-to-end 분석을 목표로 한다. 전체 프로세스는 각 단계 사이의 주어진 정보로부터 도출되는 연결관계를 통해 순차적으로 진행되고, 최종 목표는 상충관계를 최소화 할 수 있는 설계대안 선정과 각 설계변수마다의 변경전과 경로를 최적화 하는 것이다. 하나의 예시로서 각 단계의 의사결정을 그림 3.1에 담아 전체 방법론의 프레임워크를 표현하였다.

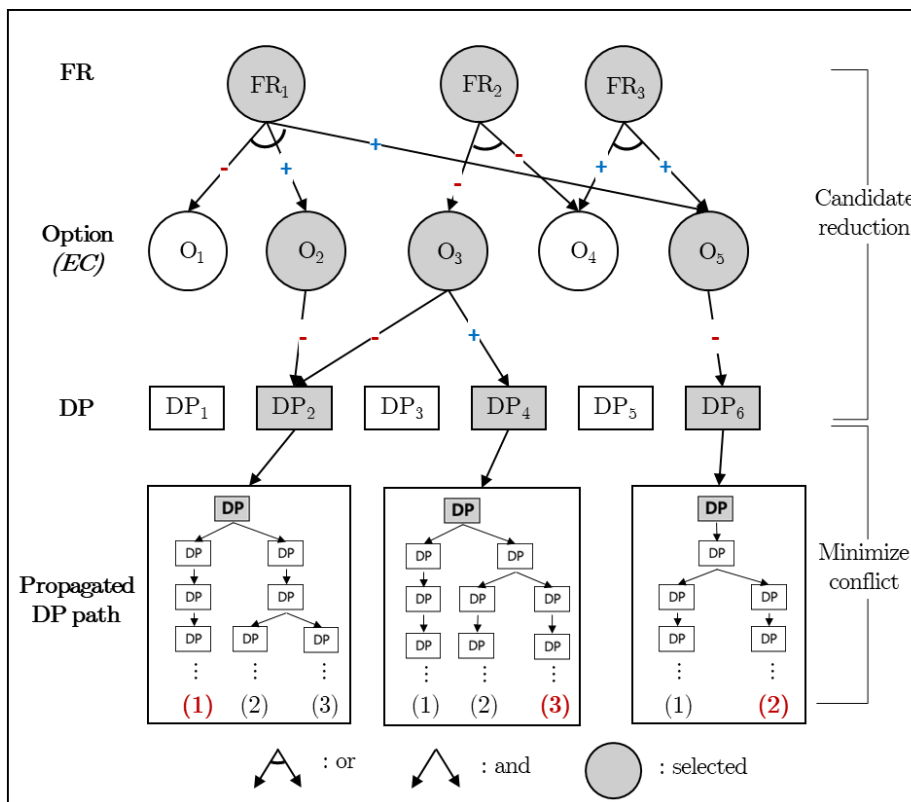


그림 3.1 상충관계 해결 방법론 프레임워크

모델에 필요한 정보는 크게 3단계로, (1) 기능적 요구사항과 물리적인 설계대안의 연결관계, (2) 설계대안과 설계변수의 대응관계 그리고 (3) 설계 변수의 변경전과 경로 탐색을 위한 경로 행렬 (Path matrix)로 이루어져 있다. 그림 3.1에서 볼 수 있듯, 각 단계는 계층적으로 이루어져 있어 앞 단의 결과가 뒤의 의사결정에 영향을 끼치는 과정이다. 또한, 기능적 요구사항과 직접적인 관련이 있는 물리적 설계대안 그리고 설계변수까지의 계층적 분해과정을 불가능한 선택지 제거(candidate reduction) 단계라고 한다. 설계 변수에서 각 설계변수의 변경전과 과정에서의 파급효과를 분석하는 과정을 상충관계 최소화(conflict minimization)이라고 하여, 최종적으로는 2개의 큰 목표를 동시에 만족하는 해결책을 찾기 위해 탐색한다.

FR₁) 조향성 (two options)

- (A) Trail 길이 ↓
- (B) Wheelbase 길이 ↓

FR₂) 안전성 (two options)

- (A) Trail 길이 ↑
- (C) BB drop ↓

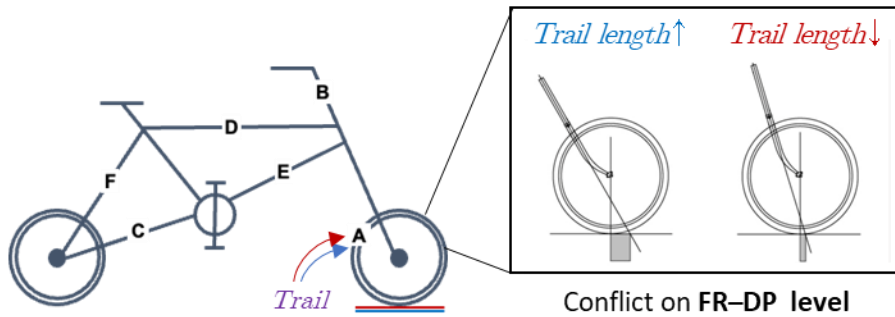


그림 3.2 자전거의 직접적 상충관계 예시

여러 기능적 요구사항을 반영해야 하는 상황에서 기업은 동시에 진행했을 때 발생하는 악효과를 최소화하고자 한다. 각 기능적 요구사항마다 다수의 설계대안들이 존재하고, 설계대안마다 일정한 방향성을 가진다. 그림 3.2의 자전거의 사례를 통해 구체적으로 설명하고자 한다. 자전거의 안전성과 조향성 두가지의 기능적 요구사항을 반영해야 하는 업무가 있다고 할 때, 자전거의 안전성을 향상하기 위한 대안들은 트레일(Trail)과 휠 베이스(Wheel base) 조절을 하는 두가지 재설계 대안이 존재하고, 조향성을 향상하기 위한 대안은 트레일과 비비드롭(BB drop)을 조절하는 두가지 대안이 존재한다. 트레일 길이라고 하는 동일한 설계대안 옵션을 공유하고 있으나, 조향성을 위해서는 트레일 길이를 줄여야하고, 안전성을 위해서는 트레일 길이를 늘리는 방향으로의 설계대안을 시행하여야 한다. 이렇듯 어떤 요구사항을 반영할지에 따라 각 설계 대안의 일정한 방향성이 부여된다. 또한 여러 요구사항이 동일한 설계대안을 공유할 수 있지만 방향성이 다른, 즉 동시에 충족할 수 없는 상충관계가 발생할 수 있다.

물리적 설계 대안은 설계변수의 집합 그리고 각 설계변수의 방향성으로 설명할 수 있는데, 이는 설계 대안을 반영하기 위해서 각 설계 변수를 일정한 방향으로 조절이 필요하다는 의미이다. 즉, 관련 있는 설계변수들을 일련의 방향으로의 재설계가 모두 충족이 되는 경우에만 설계대안을 반영할 수 있다. 그러므로 이 역시, 서로 다른 설계 대안을 선택하여 설계변경관리를 진행한다 할지라도, 설계변수 단위에서 재설계가 필요한 변수가 겹칠 수 있고, 각기 다른 방향으로의 조절로 인한 상충관계가 발생할 수 있다. 설계변수 단위에서의 상충관계 역시 여러 요구사항을 동시에 충족할 수 없는 조건이 되므로 불가능한 설계대안 조합이 된다.

마지막으로, 각 재설계가 필요한 설계변수들은 연쇄적인 파급효과를 일으키면서 제품 내의 다른 설계변수들의 변화를 야기한다. 이

과정속에서 각 설계 변수들의 파급효과 사이에서의 상충관계가 발생할 수 있다. 그림 3.3은 휠베이스와 트레일 길이를 조절하여 요구사항을 충족하는 과정에서 각 설계변수의 변경전파에서 간접적인 영향을 받은 사례를 보여준다. 이 때, B(head tube)와 F(seat stay)가 서로 상이한 방향으로의 조절을 필요로 하는 간접적인 설계변수이다. 요구사항과는 직접적인 관련이 없기에 불가능한 경우는 아니나, 변경전과 과정에서의 상충관계는 재설계 기간, 노동력, 비용에서 악효과를 끼치기에 변경전과 과정에서의 간접적 상충관계 역시 최소화하여야 한다.

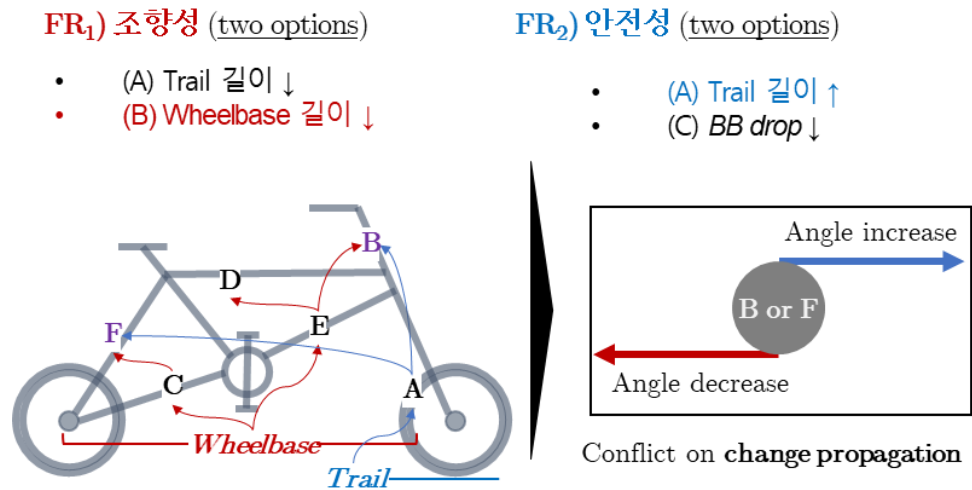


그림 3.3 자전거의 간접적 상충관계 예시

3.2 기능적 요구사항의 계층적 분해

2절에서는 각 단계별 필요한 관계정보에 대해서 더 상세히 서술하고자 한다. 연구 프레임워크에서 언급했듯이, 모델은 크게 3단계로 구성되어 있으며, 기능적 요구사항, 설계대안, 설계 변수 그리고 그에 대한 변경전과 총 4가지 단계를 거쳐가는 중간 연결관계에 주목한다. 제 1항에서 3항은 그에 필요한 각 단계를 연결하는 정보를 상세히 서술하여 논리적인 계층적 분해관계를 도출하고자 한다.

3.2.1 기능적 요구사항과 설계 대안의 관계

기능적 요구사항이란, 소비자의 요구사항 중 엔지니어가 설계변수의 조정으로 해결할 수 있는 요구사항을 의미한다. 또한 설계 대안 (redesign option)이란, 기능적 요구사항을 충족할 수 있는 제품의 속성단위 대안을 의미한다. 설계변경관리에서 기능적 요구사항을 충족할 수 있는 대안은 유일하지 않고 다양하게 존재한다. 그림 3.4는 전체 m 개의 전체 설계 대안이 존재하고 그 중에 특정 기능적 요구사항은 각 설계대안과 어떠한 관계를 갖는지를 표현하였다. +로 연결된 부분은 요구사항을 만족하기 위해 설계 대안을 양의 방향으로의 조절이 필요한 경우를 의미하고, -로 연결된 부분은 음의 방향으로 설계대안의 조절이 필요한 경우를 의미한다. 마지막으로 설계대안과 점선으로 연결되어있는 경우엔, 특정 요구사항과 설계대안 사이는 관련이 없다는 것을 보여준다. 따라서, 이러한 관계를 통해 엔지니어는 관련이 있는 설계대안들 중에서 하나의 대안을 선택함으로써 요구사항을 충족하고자 한다. 이때에 있어 요구사항과 설계 대안 사이에서는 OR logic의 개념이 포함된다.

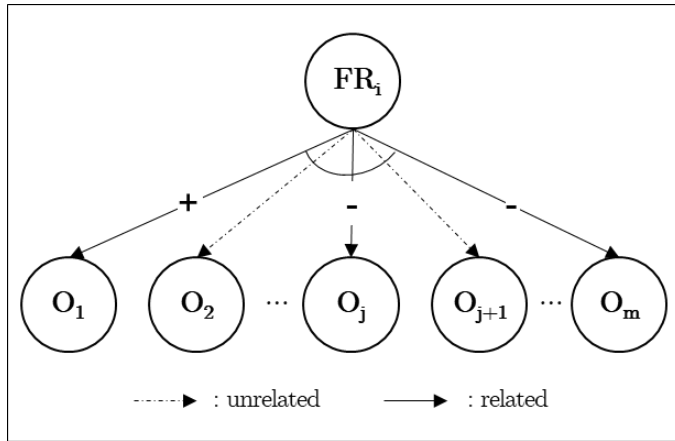


그림 3.4 기능적 요구사항과 설계 대안 사이의 관계

3.2.2 설계 대안과 설계 변수 관계

각 설계 대안은 일종의 제품의 속성(attribute) 단위라고 볼 수 있다. 따라서, 이를 실제 엔지니어가 다룰 수 있는 제품의 설계변수 단위까지 분석이 필요하다. 제 1항의 기능적 요구사항과 설계대안의 관계와 같이, 설계 대안 역시 설계 파라미터들 과의 관계로 설명이 가능하다. 이는 설계 대안을 충족하기 위해서, 어느 설계변수를 어느 방향으로 조절이 필요한지에 대한 의미를 갖는다. 따라서 +는 양의 방향으로 설계변수의 변경을 -는 음의 방향으로 설계변수의 변경을 의미한다. 또한 점선은 특정 설계옵션과 설계변수 사이의 관계가 없는 경우를 의미한다. 다만 제1항의 관계와 다른 점은, 가능한 설계 변수 사이에서 하나를 선택하는 것이 아닌, 연결되어 있는 모든 설계변수를 요구한 방향으로의 조정이 필요한 경우에만 설계 대안을 충족할 수 있다는 AND logic의 개념이 들어간다. 이는 설계변수를 충족할 수 있는 최소한의 설계변수 조합이라고 볼 수 있으며, 하나라도 충족되지 않는 설계변수가 존재하는 경우 그것은 물리적인 설계대안을 충족하지 못한다고 가정한다 (Suh, 1998; Marques et al., 2013). 그림 3.5에서 전체 1개의 설계변수와 특정 설계대안 사이의 관계를 보여준다.

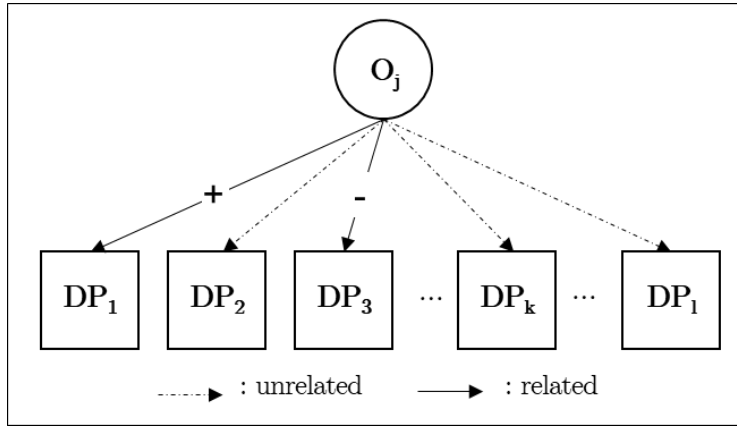


그림 3.5 설계 대안과 설계변수 사이의 관계

3.2.3 설계변수의 변경전과 경로 탐색

특정 변수가 변화함에 따른 연쇄적인 변경양상을 분석하는 것을 제품의 변경전과 과정이라고 한다. 그리고 변경전과의 목표는 제품의 새로운 안정적인 상태를 유지하기 위한 각 설계변수들의 재조정 과정이다. 이 때, 제품 아키텍처가 안정하다는 것은 제품이 충족해야 하는 주요한 성능 및 제약조건과 관련이 있다 (Ma et al., 2016; Yang et al., 2012).

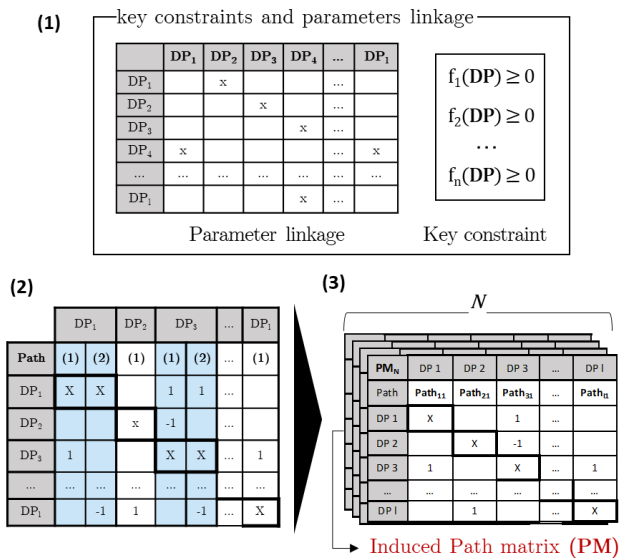


그림 3.6 전과 경로 탐색 유도과정

설계변수의 변경은 제품의 주요한 제약조건에 영향을 미치고, 이를 다시 충족하기 위한 일련의 과정을 기존에 단순 설계 변수의 전과양상으로 간단화 할 수 있다. 하지만, 변경전과에서 설계변수 사이의 관계는 단순히 주어진 것이 아니고 주어졌다고 할 수 없기 때문에, 제품의 내부의 제약조건과 설계변수의 관계를 통해 유도할 필요가 있다. 그리고 이 과정속에서 다양한 변경 전과경로가 존재할 수 있다 (Li et al., 2012; Li et al., 2014; Hamraz et al., 2012). 제품이 갖춰야 하는 주요한 제약조건들을 설계 변수들의 수리적 모형으로 표현하고, 이를 충족할 수 있는 논리적인 관계로 접근하여 표현할 수 있는데 그 일련의 과정을 그림 3.6에서 정리하여 최종적으로 전과 경로 행렬로 표현한다.

자세한 유도방안은 다음과 같은 프로세스를 통해 계산할 수 있다. (1) 먼저 제품의 충족해야 하는 주요한 제약조건을 찾는다. (2) 각 설계변수들의 관계를 바탕으로 제품의 제약조건을 설계변수의 수학적 형식으로 표현한다. (3) 논리적인 AND/OR 관계를 사용해 각 제약조건을 분해한다. (4) 각 설계변수 별 가능한 변경전과 경로를 통해 경로 행렬을 만든다. 그림 3.7은 앞서 2개의 주요 제약조건을 3개의 설계변수를 통해 도출한 식을 토대로 하여, 논리적 관계를 도출하는 예시이다. 물리적 설계변수인 DP1의 경우엔 DP2와 DP3의 둘 중 하나를 음의관계로 도출하는 논리적 관계를 보이지만, 다른 설계변수의 경우엔, 두가지가 모두 충족이 되는 조건만 해당한다. 따라서, 발생할 수 있는 경우는 총 2가지로, 설계변수 DP1으로부터 파생되는 두가지의 경로를 갖춘 전과경로 행렬을 도출할 수 있다. 또한, 각 설계변수 사이에서 어떤 관계를 보이는지도 한번에 파악할 수 있어서, AND/OR의 논리적인 구조 뿐만 아니라, 설계변수 사이의 방향성도 파악 할 수 있다는 장점이 있다.

Parameter equation

$$DP_1 + DP_2 + DP_3 \leq k_1$$

$$DP_2 - DP_3 \leq k_2$$

Logical relation (AND/OR)

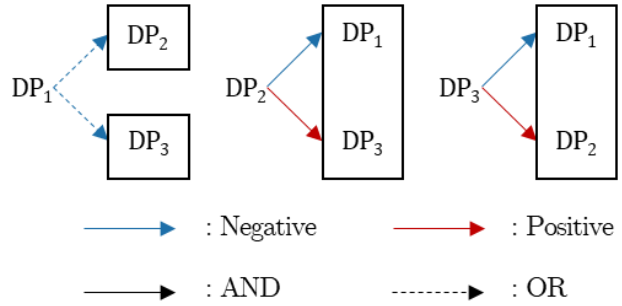


그림 3.7 AND/OR 로직 관계 도출

표 3.1 최종 전파경로 행렬

PM ₁	DP 1	DP 2	DP 3	PM ₂	DP 1	DP 2	DP 3
Path	Path ₁₁	Path ₂₁	Path ₃₁	path	Path ₁₂	Path ₂₁	Path ₃₁
DP 1	X	-1	-1	DP 1	X	-1	-1
DP 2		X	1	DP 2	-1	X	1
DP 3	-1	1	X	DP 3		1	X

3.3 다중요구사항의 상충관계 해결 방법론

3.3.1 Notation

본 모델에서 사용되는 파라미터, 변수, 결정변수, 결과값은 표 3.2로 정리한다. 크게 2개의 의사결정 모델이 하나로 합쳐진 방법론으로, 첫번째 모델의 경우 결정변수는 각 요구사항들마다 어떤 물리적 설계대안을 선택할지를 선택하는 것이다. 즉 전체 n 개의 기능적 요구사항이 들어오면, n 개의 각 대안 선택을 진행한다. 두번째 모델의 경우, 결정변수는 각 설계변수의 변경전과 과정마다 어떤 변경전과 경로를 선택할 지이다. 따라서, 총 T 개의 전파경로 프로세스를 따른다면, 각 변경을 유발하는 설계변수마다 어떤 경로를 따를지를 총 T 번에 걸쳐서 결정한다.

Nomenclature

- Parameter

n	: number of FR	i	: index of FR
m	: number of option	j	: index of option
l	: number of DP	k	: index of DP
N	: number of path matrix	q	: index of path matrix
T	: Total propagation stage	t	: index of propagation stage

- Matrix

PFO : Possible FR-Option matrix
OD : Option-DP relation matrix
PM : Path Matrix

- Decision variable

x_{ij} : whether Option j is used to handle FR i
 y_q^t : whether Path matrix q is used at stage t

- Output

Opt : selected Option list with sign

DP : selected DP list

Path^t_k : selected path matrix at t stage when DP_k is initiated

TP_{k1k2} : sign of DP_{k2} when initiated DP_{k1} is propagated

CD : conflict degree (or number)

3.3.2 단계별 상충관계 해결 프로세스

본 모델의 절차는 크게 2가지의 단계로 이루어져 있고, 최종적으로는 상충관계의 정도(CD; conflict degree)를 최소화하는 목적함수를 갖고 있다. 여기서의 상충관계의 정도는 단순 설계변수의 상충되는 개수 일 수도 있고, 지표를 참고하여 상충되는 값의 중요도(weight)을 고려하여 판단할 수도 있다. 제 3장 모델에서는 간단히 상충되는 개수로 상충관계의 정도를 정의하였다. 제 4장에서는 서로 상충되는 정도의 중요도를 계산할 수 있는 지표를 활용하여 계산하는 과정을 추가하였다.

(3.1)과 관련된 내용은 기능적 요구사항에서 설계변수 사이의 연결관계와 관련된 식을 의미하며, (3.2)는 변경전과 과정에서의 간접적 상충관계와 관련된 식을 의미한다. 기능적 요구사항을 계층적으로 분해하는 과정이므로, 각 단계는 연속성을 띄고 있다. 따라서, 전체 방법론의 프로세스를 두개의 분리된 문제로 나눠서 서술할 수 있고, 순서를 바탕으로 각 단계1과 단계2에서 상세히 서술하고자 한다. 단계1에서의 의사결정은 어떤 설계 대안을 선택할지에 대한 과정을 다루고, 단계2에서는 앞선 단계에서 재설계가 요구되는 설계변수로 인한 제품 내 변경전과 경로를 탐색하는 과정 및 최종적으로 상충관계를 최소화하는 각 변경전과 경로의 조합을 탐색하는 단계이다. 따라서, 단계2에서 필요한 일부 정보는 단계1에서 도출된 값을 활용한다.

단계1 직접적 상충관계 - 선택지 제거

직접적 상충관계에서 필요한 제약조건은 크게 2가지로 나뉜다.

먼저 첫째로, 제약조건에 대해서 (3.1.1)과 (3.1.2)의 식은 각 요구사항마다 관련된 물리적 설계대안 중에서 하나의 대안만 선택하는 제약조건을 의미한다. 이는 요구사항을 충족하기 위해서 한 개 이상의 설계대안 옵션을 선택하는 것은 그만큼 더 많은 설계대안을 재설계하는 것이기 때문에 더 많은 비용과 시간을 요구하기 때문에 제한하였고 이는 그림 3.4에서 연관된 하나의 설계대안을 선택하는 것과 같다.

$$\sum_{j=1}^m PFO_{ij} * x_{ij} \neq 0 \quad (3.1.1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad (3.1.2)$$

그 다음 제약조건 (3.1.5)과 (3.1.6)은 부호가 서로 다른 경우가 하나라도 발생할 경우 상충관계가 발생하기 때문에, 그것을 제거하는 제약식을 의미한다. 그림 3.8은 설계 대안 및 설계변수 단위에서의 상충관계는 기능적 요구사항과 직접적으로 연관 되어있기 때문에, 하나라도 상충이 되는 경우 특정 요구사항을 반영하는데 있어서 문제가 발생하는 것을 보여준다. 따라서 이 제약 조건에서는 상충관계를 최소화하는 것이 아닌, 상충되는 조합을 불가능한 해로 산정하여 제거하는 제약조건을 제시하였다. 마지막으로 상충관계는 설계 대안 과정에서 발생할 수 있고, 설계 대안에서는 발생하지 않지만 설계 변수에서 발생할 수 있기에 각 (3.1.5)과 (3.1.6)로 나눠 표현하였다.

$$DP_k = \text{sgn} \left(\sum_{j=1}^m Opt_j * OD_{jk} \right) \quad (3.1.3)$$

$$Opt_j = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^n PFO_{ij} * x_{ij} \right) \quad (3.1.4)$$

$$\sum_{i=1}^n |PFO_{ij} * x_{ij}| = \left| \sum_{i=1}^n PFO_{ij} * x_{ij} \right| \quad (3.1.5)$$

$$\sum_{j=1}^m |Opt_j * OD_{jk}| = \left| \sum_{j=1}^m Opt_j * OD_{jk} \right| \quad (3.1.6)$$

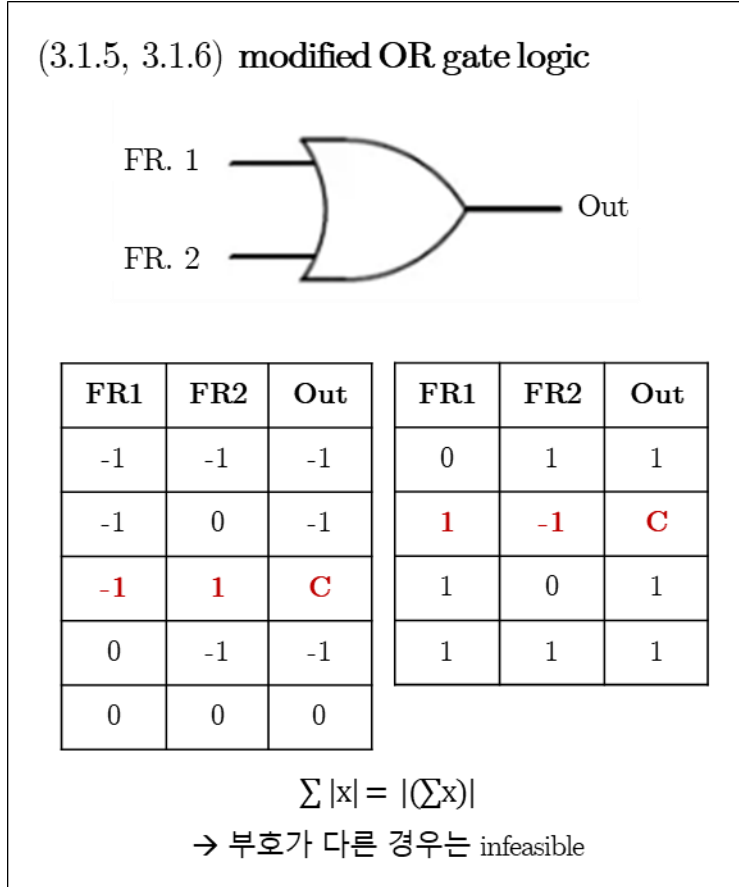


그림 3.8 변경된 OR 게이트를 활용한 상충관계 진단

단계2 간접적 상충관계 - 상충관계 최소화

제 4항에서는 제 3 항에서 걸러진 상충관계가 없도록 형성된 설계 대안 집합을 받아서 전과경로를 분석하는 과정을 설명한다. 앞서 제 2항에서 말한 상충관계를 최소화 하기 위해, 각 설계변수의 경로를 선택하는 의사결정을 한다. 그림 3.9은 설계변수 2와 설계변수 5가 기능적 요구사항을 반영할 수 있는 설계변수 집합으로 선정된 상황속에서 발생할 수 있는 모든 전과경로와 그에 대한 비교를 보여준다. 설계변수 2는 3가지의 경로를 토대로 설계변경을 진행할 수 있고, 설계변수 5는 2가지의 경로를 가지고 있다. 어떤 변경전과의 경로를 선택하는지에 따라서, 설계변경의 최종 파급효과가 다를 수 있다. 3번째 경로를 선택한 설계변수 2와 1번째 경로를 선택한 설계변수 5의 종합적인 파급효과를 분석하면, 2곳에서 간접적 상충관계가 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 다른 경로를 선택하게 될 경우, 변경전과 과정에서의 상충되는 경우를 막을 수 있기에, 각 설계변수마다의 최적의 경로를 선택하는 것이 중요하다.

Conflict on DP_2 and DP_5 propagation path

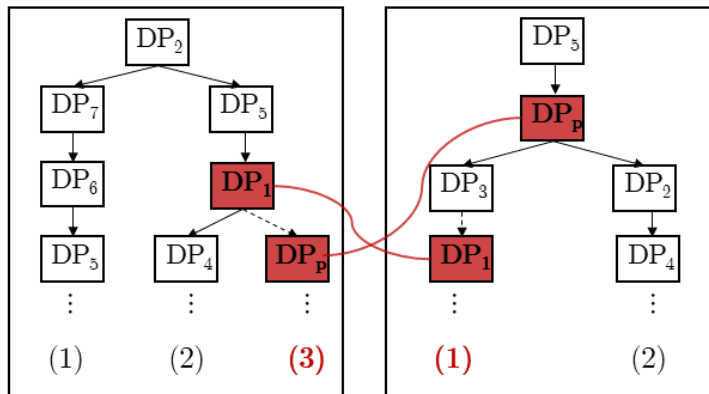


그림 3.9 각 설계변수의 변경전과 과정에서의 상충관계

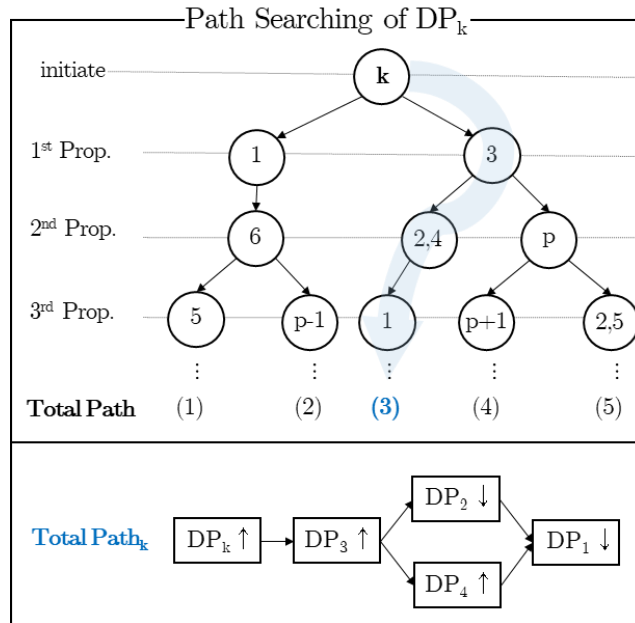


그림 3.10 설계변수의 변경전과 경로 탐색

최종적인 경로를 선택하기에 앞서, 각 설계변수마다 어떤 경로를 토대로 제품의 변경 사항을 반영할지에 대한 가능한 경로를 탐색하는 과정이 중요하다. 이는 제 2절 3항에서 표현한 경로 행렬을 바탕으로 탐색하는 과정을 거친다. 그림 3.10은 설계변수 k 의 각 전과 단계별 경로 탐색하는 과정을 보여준다. 설계변수는 각 단계마다 어떤 경로를 통해 변경전과를 흡수할지에 대한 의사결정을 따른다. 이렇듯, 분석하고자 하는 총 T 개의 전과양상동안 어떤 경로 행렬을 사용할지에 대한 의사결정을 (3.2.1), (3.2.2), (3.2.3) 제약조건에서 확인할 수 있다. 이러한 제약식은 특정 설계변수 하나에 해당하는 의사결정이기 때문에, 첫번째 단계에서 총 1개의 설계변수의 조절이 필요하다면, 전체 $1 \times T$ 개의 의사결정이 필요하다. 일반적으로 변경전과의 경우, 발생할 가능성은 전과될수록 낮아지게 된다. Clarskon (2004)는 보통 3단계정도의 전과를 거치면 충분히 변경전과의 양상을 분석할 수 있다고 주장한다. 따라서, 휴리스틱(heuristic)을 통해 1×3 개의 의사결정으로 축약될 수 있다.

$$TP_{kj} = \text{sgn} \left(\sum_{t=1}^T Path_{kj}^t \right) \quad (3.2.1)$$

$$Path_k^t = f(x) = \begin{cases} Path_k^{t-1} * \left(\sum_{q=1}^N PM_q * y_q^t \right) & (if \ t \neq 0) \\ DP_k, & (if \ t = 0) \end{cases} \quad (3.2.2)$$

$$\sum_{q=1}^N y_q^t = 1 \quad (3.2.3)$$

마지막으로 그림 3.9에서의 예시와 같이, 상충적인 관계는 동일한 전과 단계에서 발생하지 않고 단계를 걸쳐서 발생할 수 있다. 따라서, 전체 T개의 전과양상동안 발생한 모든 설계변수의 재설계를 하나로 묶어 최종경로(TP, total path)라고 정의하였다. 그리고 1개의 선택된 최종경로를 모아서, 최종적으로 설계변수의 방향성이 다른 경우의 수를 합쳐 최종적인 상충관계 정도를 계산한다. 그에 대한 목적함수는 (3.3)과 같다.

$$\min \quad CD = \sum_{k2=1}^l I \left(\sum_{k1=1}^l |TP_{k1k2}| \neq \left| \sum_{k1=1}^l TP_{k1k2} \right| \right) \quad (3.3)$$

제 4 장 사례 연구

4.1 제품의 기능적 요구사항의 계층적 분해 관계

임의의 사례를 예시로 들어 본 연구의 모델을 반영하여 상층관계 최소화 방법론을 적용해보고자 한다. 먼저 요구된 기능적 요구사항의 수는 2개이며, 각각 2개의 설계대안 방법이 존재한다. 그에 대한 정보 및 구체적인 설계대안 방향성은 그림 4.1(a)와 같다. 또한, 각 설계대안을 반영하기 위해서는 구체적으로 어떤 물리적 설계변수와 연관되어 있는지와 관련된 정보는 그림 4.1(b)와 같다. 마지막으로, 그림 4.2을 통해, 설계변수 사이에서의 변경전과 경로의 정보를 얻을 수 있다. 이는 제품의 주요한 제약조건과 설계변수의 연결관계를 통해 유도된 것으로 주어졌다고 가정한다. 그리고 설계전파의 단계는 3단계로 한정하였다.

		Option		
FR	candidates	Opt. 1	Opt. 2	Opt. 3
FR ₁	1-1	1		
	1-2		1	
FR ₂	2-1		-1	
	2-2			1

(a) FR – Option level

Design parameter						
options	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6
Opt. 1	1					
Opt. 2			1			
Opt. 3	-1					-1

(b) FR – Option level

그림 4.1 기능적 요구사항과 관련된 계층적 분해관계

	DP1		DP2		DP3	DP4	DP5	DP6
Path	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)
DP1	X	X		1				
DP2			X	X			1	
DP3	1				X			
DP4	1			1		X		1
DP5					1		X	
DP6		-1	1		1	1		X

그림 4.2 각 설계변수 별 변경전파경로

4.2 설계변경 대안 탐색

설계변경 대안 탐색은 각 기능적 요구사항마다 하나의 설계대안을 선택하는 과정이다. 설계대안 선택과정에서의 상충관계 뿐만 아니라, 설계변수 단위에서의 상충관계를 찾는 단계이다. 그림 4.3(a)는 각 기능적 요구사항이 동일한 설계대안에서의 상충관계를 보여주는 예시를 보여주고, 그림 4.3(b)는 설계변수에서 상충관계가 발생한 예시를 보여준다. 설계변경 대안 탐색과정에서, 상충관계가 발생하지 않는 설계대안의 조합과 구체적인 설계변수의 방향성은 그림 4.4와 같다. 첫번째 요구사항은 대안 1을 높이는 방향으로, 두번째 요구사항은 대안 2를 높이는 방향으로 조절하여, 최종적으로는 설계변수 1 과 설계변수 3을 일정방향으로의 조절을 요구한다는 결과를 도출한다.

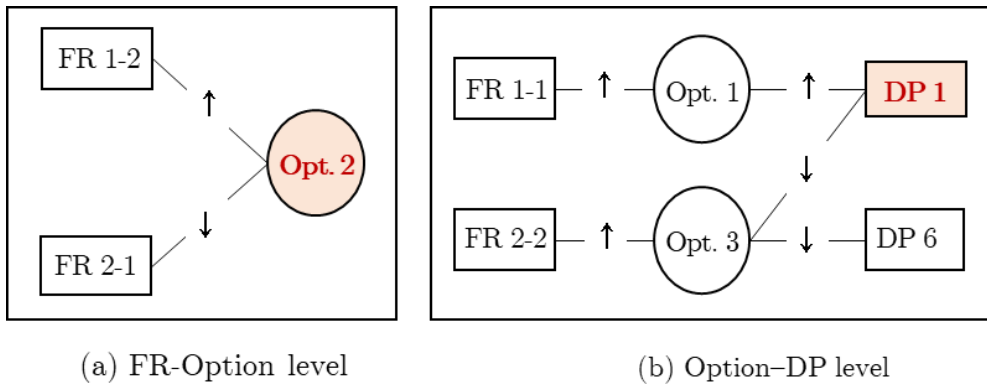


그림 4.3 설계 대안과 설계변수에서의 상충관계 사례

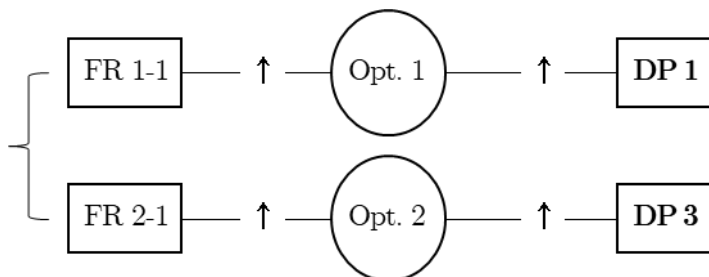


그림 4.4 최종적으로 선택된 설계 대안과 설계 변수

4.3 변경전파 경로 탐색

제 2절에서 최종적으로 선택된 설계변수의 첫번째 변경전파 과정은 표 4.2의 정보를 통해 유도할 수 있고, 그에 대한 결과는 그림 4.5와 같다. 설계변수 1의 경우엔 2가지 경로를 통해 전파가 되며, 설계변수 3의 경우엔 한가지 경로로 두가지 변수의 영향을 미친다. 다만 설계변수 3의 시작 방향이 낮추는 방향이었기 때문에, 정비례 관계를 갖고 있는 설계변수 5와 6은 동일하게 낮추는 방향으로의 조절을 요구한다.

이와 같은 방식으로 계속해서 전파과정의 양상을 계산할 수 있으나, 좀 더 수리적인 형태로 전체 전파경로를 탐색하는 과정이 필요하다. 따라서 행렬의 곱을 이용한 계산을 하기 위해 주어진 정보들을 전처리 하는 과정이 필요하고 그에 대한 정보는 그림 4.6와 같다. 그림 4.6(a)의 경우엔, 2차원으로 정리된 행렬을 n개의 전파경로를 가진 정방행렬로 전환될 수 있다. 이때, 설계변수 1과 설계변수 2의 전파경로가 각 2개이므로, 나올 수 있는 총 경로의 조합은 4개이다. 따라서 기존 행렬의 (6×8) 의 행렬을 $(4 \times 6 \times 6)$ 크기의 행렬을 재정의할 수 있다. 그림 4.6(b)의 경우엔 앞단에서 변경이 필요한 설계변수 집합을 One-hot encoding을 하여, 각 설계변수마다의 전파경로를 탐색한다.

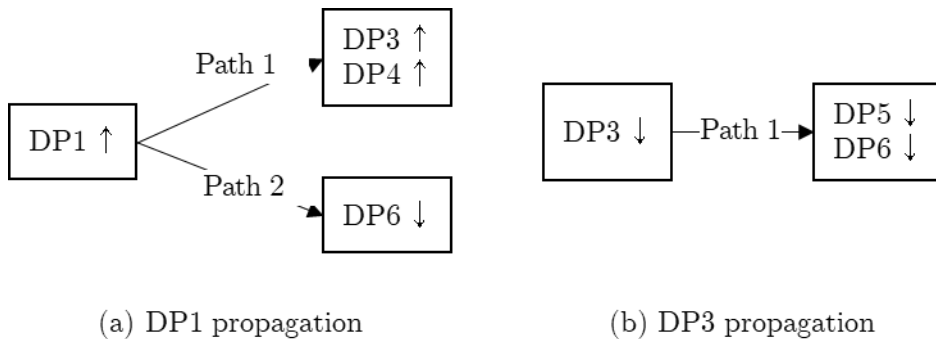


그림 4.5 설계변수의 첫번째 변경전파 경로

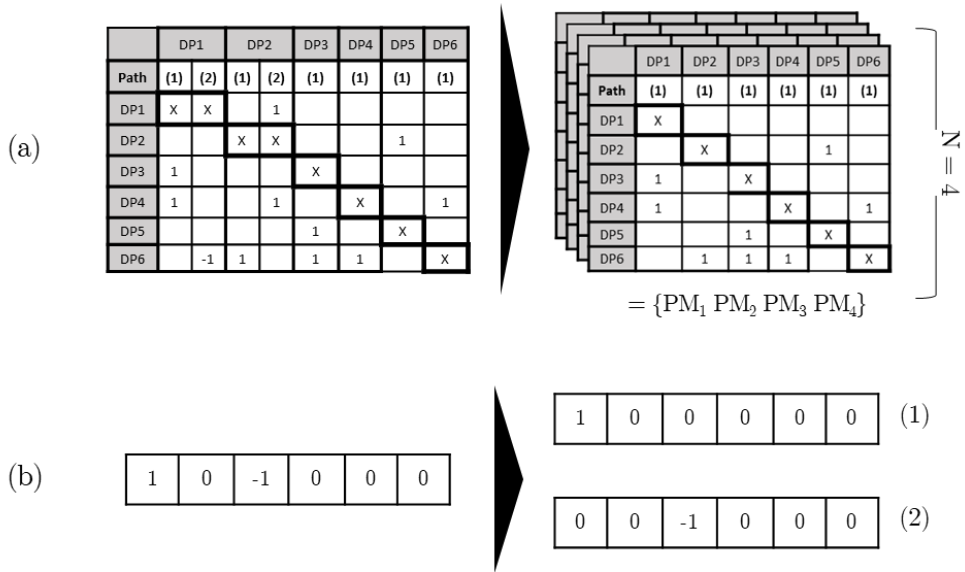


그림 4.6 수리적 계산을 위한 전처리과정

전 처리를 거친 경로 행렬과 설계변수들은 수식 (4.1)을 이용하면, 총 T번째 변경전과까지 탐색이 가능하다. 이때, 변경전과를 탐색하는 과정은 처음 시작하는 설계변수에서 T개의 변경 행렬을 곱하는 방법으로 표현이 가능하며, 반대로 T-1 시점의 전과된 경로에서 하나의 변경전과를 진행하는 것으로도 설명이 가능하다. 따라서, 동일한 방식으로, 설계변수 1과 설계변수 3의 변경전과 경로를 탐색하는 결과는 그림 4.7과 같다.

$$Path_k^T = Path_k^{T-1} * \left(\sum_{q=1}^N PM_q * y_q^T \right) = DP_k * \prod_{t=1}^T \left(\sum_{q=1}^N PM_q * y_q^t \right) \quad (4.1)$$

설계변수 1은 3번째 전과까지 2가지의 설계변경 경로를 갖고 있고, 설계변수 3 역시 동일하다. (1-1)경로의 경우, 두번째 전과과정에서 설계변수 5와 6을 높이는 방향으로의 조절이 필요하다. 그러나 설계변수 3의 첫번째 전과과정에서 동일한 설계변수 5와 6을 반대 방향으로 조절을 요구하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서, 설계변수 1의 첫번째 경로는 모든 과정에서 많은 상충관계를 보이기 때문에 적합한 경로가

아니라는 것을 볼 수 있다. 다음 4절에서는 그에 대한 최종 평가와 변경 경로를 선택하는 과정을 다룬다.

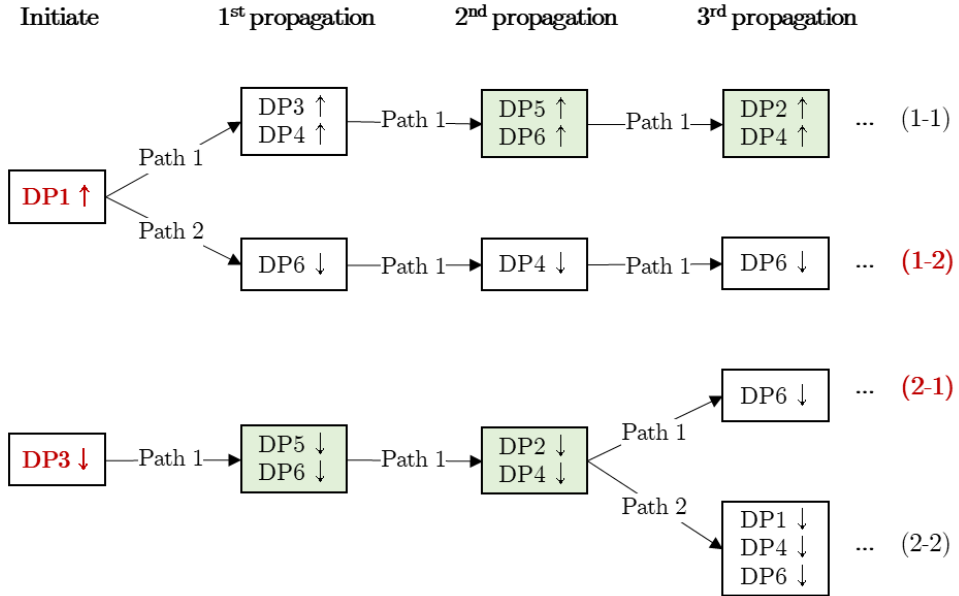


그림 4.7 설계변수의 변경전과 경로

4.4 설계변경 대안 평가

경로탐색을 마치면, 각 선택된 경로마다 최종적으로 영향을 받은 설계변수들의 방향을 표 4.1과 같이 정리할 수 있다. 이는 변경전과를 야기하는 설계변수부터 각 전과과정에서 영향을 받은 설계변수를 하나로 통합하여 정리한 최종경로이다. 따라서 각 최종경로의 조합을 바탕으로, 간접적인 충돌을 야기하는 설계변수의 개수를 상충 정도(conflict index)로 정의하였고 수식은 (4.2)와 같다. 그리고 최종적으로 상충 정도를 최소화할 수 있는 각 설계변수의 최종경로 조합은 3번째와 같고, 설계변수 1은 2번째 전과경로, 설계변수 3은 1번째 전과경로를 선택하였을 시에, 간접적인 상충관계가 존재하지 않은 가장 최적의 경우가 된다.

$$CI = \sum_{i=1}^N I(\text{sign}(DP_{i1}) \neq \text{sign}(DP_{i2})) \quad (4.2)$$

표 4.1 최종 경로 조합에 따른 상충관계 정도

Alter.	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	Conflict Index
1-1	1	1	1	1	1	1	5
2-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	
1-1	1	1	1	1	1	1	6
2-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
1-2	1	0	0	-1	0	-1	0
2-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	
1-2	1	0	0	-1	0	-1	1
2-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	

4.5 재설계 정도를 고려한 설계변경 대안 평가

최종경로를 계산하는 과정에서 각 변경전과 단위에서 동일한 수준으로 설계변수의 변화양상을 비교하는 것은 정확한 상충관계를 비교하고 계산했다고 보기엔 부정확할 수 있다. 그림 4.7에서의 설계변수 1의 두 번째 변화경로를 보면, 처음 변화하는 설계변수 1의 재설계 정도와 최종 3번째 전과과정에서 설계변수 6이 변화하는 정도는 다르게 정도를 판단해야 한다. 이는 변화 정도(change impact)가 전과가 진행될수록 낮아진다는 기본 변경전과의 파급효과를 분석하는 연구에서 참고할 수 있다. 따라서, 단순 방향성을 1과 -1로 표현한 기존의 경로 행렬에서, 각 인자 값을 -1 부터 1사이의 연속적인 값으로 재정의 하여 나타냄으로써 이를 반영하고자 한다. 부호는 설계변수들 간의 상관관계의 방향성을, 숫자는 설계가 필요한 변화 정도를 의미한다. 재설계 정도를 고려한 경로행렬은 그림 4.8과 같다.

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6
Path	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
DP1	X					
DP2		X			0.7	
DP3	0.3		X			
DP4	0.4			X		0.3
DP5			0.4		X	
DP6		0.5	0.4	0.5		X

{PM₁, PM₂, PM₃, PM₄}

그림 4.8 변경 정도를 고려한 경로 행렬

$$\square \text{ Path}_1 = \sum_{i=0}^3 DP_1 * (PM_1^i)^T$$

$$\square \text{ Path}_3 = \sum_{i=0}^N DP_3 * (PM_1^i)^T$$

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6
Direct	1	0	0	0	0	0
1 st	0	0	0.3	0.4	0	0
2 nd	0	0	0	0	0.12	0.32
3 rd	0	0.08	0	0.1	0	0
Path₁	1	0.08	0.3	0.5	0.12	0.32

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6
Direct	0	0	-1	0	0	0
1 st	0	0	0	0	-0.4	-0.4
2 nd	0	-0.28	0	-0.12	0	0
3 rd	0	0	0	0	0	-0.2
Path₃	0	-0.28	-1	-0.12	-0.4	-0.6

How to compare conflict degree?

그림 4.9 변경 정도를 고려한 경로 최종경로

변경 정도를 고려한 최종경로의 결과는 그림 4.9와 같다. 이때 최종 경로의 값은 -1에서 1사이를 가질 수 있는데, 이는 최종적으로 각 설계 변수가 얼마나 설계변경 정도와 방향성을 보여줄 수 있어 더욱 자세한 정보를 가진다. 또한, 단순 방향성만을 기준으로 상충관계를 비교했을 때보다 더욱 정확하게 상충관계를 비교할 수 있다. 그림 4.7에서의 설계 변수 2에서 발생하는 상충관계의 정도와 설계변수 6에서 발생하는 상충 관계 정도는 다르게 판단되어야 한다. 부호가 다른 전파경로의 값을 비교하여 상충관계의 정도를 계산할 수 있는 지표가 필요한데, 이는 (4.3), (4.4), (4.5)의 식을 사용하여 값을 계산한다.

$$\text{if } A \text{ or } B = 0) \quad CI = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{if } |A| \geq |B|) \quad CI = [1 - (A + B)] + \frac{(A - B)}{2} = 1 - \frac{A}{2} - \frac{3B}{2} \quad (4.4)$$

$$\text{if } |B| \geq |A|) \quad CI = [1 + (A + B)] + \frac{(A - B)}{2} = 1 + \frac{3A}{2} + \frac{B}{2} \quad (4.5)$$

지표는 크게 4가지 조건을 만족하는 조건을 반영하였다. 특정 변수의 상충 정도를 계산할 때, 양의 방향으로의 설계변경 정도를 A, 음의 방향으로의 설계변경 정도를 B라고 할 때,

- (1) 둘 중 하나 이상의 경로에서 재조정이 필요하지 않는 경우, 상충정도는 0으로 한다. ($A = 0$ or $B = 0$)
- (2) 상충관계가 발생하고 그에 대한 정도는 동일한 경우, 정도가 높을수록 상충정도는 높다. ($|A| = |B|, |A| \propto CI$)
- (3) 상충관계가 발생하고 한 방향으로의 설계변경 정도를 고정한 경우, 다른 방향으로의 변경정도가 낮을수록 상충정도는 높다.
- (4) 상충이 발생하고, 두 설계변경 정도의 절대값 편차가 동일한 경우, 절대값 편차가 적을수록 상충정도는 높다. ($|A - B| = c, |A + B| \propto CI$)

지표를 활용하여 계산된 최종 경로들의 상충정도를 계산한 결과는 표 4.2와 같다. 최종적으로 선택된 조합은 상충관계가 발생하지 않았기에 4절에서의 의사결정과 동일한 결과값을 보이지만, 만약 상충관계를 피할 수 없는 경우, 각 설계변수들의 재설계정도를 바탕으로 한 계산을 통해 보다 정확한 상충정도를 계산할 수 있다.

최종적으로 본 모델을 활용한 사례연구에서 상충정도를 아예 해결할 수 있는 방법론이 존재하며, 그에 대한 결과값은 다음과 같다. 두가지 요구사항을 설계대안 1과 2를 통해 반영하고 있으며, 구체적으로는 설계변수 1을 증가하고 설계변수 3을 낮추는 방향으로 만족할 수 있다. 또한 변경전과 과정에서 각 설계변수마다 두번째 경로와 첫번째 경로를 선택함으로써 제품 내 파급효과 속에서 상충관계를 최소화할 수 있다. 이렇듯, 각 과정마다 의사결정을 보여줌으로써 엔지니어에게 구체적인 설계변경 방안을 제시할 수 있다.

표 4.2 재설계 정도를 고려한 최종 경로의 상충관계 비교

Alter.	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	Conflict Index
1-1	1	0.08	0.3	0.5	0.12	0.32	4.99
2-1	0	-0.28	-1	-0.12	-0.4	-0.6	
1-1	1	0.08	0.3	0.5	0.12	0.32	5.61
2-2	-0.08	-0.28	-1	-0.18	-0.4	-0.46	
1-2	1	0	0	-0.21	0	-0.8	0
2-1	0	-0.28	-1	-0.12	-0.4	-0.6	
1-2	1	0	0	-0.21	0	-0.8	0.62
2-2	-0.08	-0.28	-1	-0.18	-0.4	-0.46	

제 5 장 결론 및 향후 연구 방향

5.1 결론

본 논문은 설계변경관리의 주제 중 하나로, 다중 기능적 요구사항을 모두 반영해야 하는 방안 중 상충관계를 최소화 하는 방안을 제시하였다. 기능적 요구사항을 반영할 수 있는 설계변수까지의 과정과 설계변수의 제품 내 전과과정을 나눠, 각 직접적인 상충관계와 간접적인 상충관계를 나눠 분석하였다. 이때에 있어, 설계변경관리에서 상충된다는 의미는 동일한 설계대안 혹은 설계변수가 서로 다른 방향으로의 재설계를 요구하는 상황에서 발생하는 것으로 정의하였다. 상충관계를 최소화 하는 첫번째 과정에서는, 후보지를 제거하는 조합을 선별하였다. 이는, 각 설계 대안 및 설계변수는 기능적 요구사항을 충족할 수 있는 최소단위로의 계층적 분해과정이기 때문에, 하나라도 충돌이 발생한 경우 불가능한 조합으로 결정하였다 (Suh, 1998; Marques et al., 2013).

두번째 과정은 앞선 과정에서 유도된 일종의 가능한 설계변수들의 집합을 받아, 각 설계변수마다 변경전과 경로를 탐색하는 과정과 각 최종경로의 조합을 통해, 간접적인 설계변수의 상충관계가 존재하는지를 파악하였다. 그리고, 상충되는 설계변수의 수가 가장 최소화 되도록 최종경로를 선택하는 것으로 마무리한다. 또한 본 연구는 end-to-end로 설계변경관리 속에서 발생하는 여러가지 분야에 대해서 전체적으로 다루었다. 다양한 기능적 요구사항, 여러 설계대안과 변경전과의 복수의 경로를 고려함으로써 제품의 변경관리 과정속에서 실제 엔지니어가 고려해야하는 각 단계별 핵심사항들을 모두 제안하였다.

상충관계를 최소화 하는 이유는 다양하게 존재한다. 의도치 않는 설계변경관리에서 발생하는 비용을 감소하는 이유이다 (Ferna et al., 2017). 여기서의 비용은 단순 금전적인 것 뿐만 아니라, 시간, 복잡성, 제품설계의 반복과정, 퀄리티 감소 등도 포함된다 (Li et al., 2017). 여러

요구사항을 동시에 반영하고자 할 경우, 설계변경관리 과정에서 협력 작용(synergy)가 발생할 수도 있고, 독립적일 수 있고, 마지막으로 오히려 역효과가 날 수 있다. 이는 제품이 어떻게 설계 되어있고, 어떤 기능적 요구사항을 다루는지에 따라서 상이하다. 본 연구에서는 단순 상충관계를 최소화하는 방안을 도출하는 것에 앞서, 각 기능적 요구사항과 제품 내부의 파급효과 내에서 각 과정들이 어떻게 유기적으로 연결되어 있으며, 어떤 영향을 주는지를 파악하였다. 이는 상충관계가 필연적으로 발생하는 경우 뿐만 아니라, 기존 제품에서의 설계변경관리 과정속에서 반영할 수 있는 다양한 조합을 탐색하고 분석함에 있어 적용될 수 있다.

기존 연구의 경우, 설계변경에 영향을 받은 부품 및 설계변수를 선택하고, 이에 대한 변경전과 과정에서의 재설계 정도(impact)와 가능성(Likelihood)를 기준으로 최적의 대안을 주로 분석하였다. 그러나 제품 설계 및 설계변경관리 과정속에서, 프로세스가 진행하는 와중에 불가능한 해가 되거나 예상보다 더 많은 시간과 비용이 필요하는 경우가 빈번히 발생한다 (Honecher et al., 2016; Bercerril et al., 2016). 따라서, 설계변수 과정속에서 발생하는 상충관계를 주목하여, 변경의 방향성을 추가적으로 고려함으로써 이를 해결하고자 했다는 점에서 타 연구와의 차별성을 갖는다. 이는 실무적으로, 각 부서를 독립적으로 관리하는 수준에서 벗어나 전체 부서의 협업 및 상관관계를 이해할 수 있어, 제품 내 전체를 조율하는 프로덕트 매니저(product manager) 및 설계변경 관리를 조율하는 의사결정자에게 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

5.2 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 둘 이상의 기능적 요구사항을 반영하는 과정에서 각 요구사항 마다 하나의 설계 대안 선정 및 각 설계변수마다의 변경전과 경로를 선택하는 모델을 제안하였다. 하지만 본 연구에서 활용한 모델은 다음의 몇가지 한계점과 개선점을 갖고 있다.

첫째로 설계변수는 모두 연속변수라는 가정의 한계이다. 설계변경의 방향성을 고려한다는 의미는 연속변수로서 양의 방향과 음의방향성 이 두가지를 바탕으로 분석한다는 것을 의미한다. 하지만, 제품의 부품 및 설계변수는 단순 연속변수 뿐만 아니라 부품의 타입과 같은 범주형 변수부터 개수와 같은 이산변수처럼 다양하게 존재한다 (정서영, 2019). 따라서, 연속변수만 가지고 상충관계를 분석하기엔 한계가 있기 때문에, 설계변수의 속성이 변수들을 추가적으로 고려하여 상충관계를 분석하는 연구가 필요하다.

두번째는 경로행렬을 만드는 과정속에서의 부정확성이 존재한다. 경로행렬을 만드는 과정에서 제품의 주요한 제약조건과 설계변수 사이의 연결관계를 사용한다고 하였지만, 각 설계변수마다의 전과 경로는 설계변수의 값에 따라서 상이할 수 있다. 이는 Hamraz et al. (2013)가 주장한 부품을 연결하는 인터페이스 상에서 부품의 주요한 속성 및 값이 어느 위치에 있는지에 따라서 전과가 필요할 수도 있고, 혹은 전과의 방향성이 상이할 수 있다는 내용을 포함한다. 단순 모든 값에 대하여 동일한 전과경로를 가지는 것이 아닌, 각 설계변수들의 값의 분포에 따라서 동적으로 각 경로들이 변경될 수 있다 (Lee & Hong, 2017). 이는 데이터가 충분히 있을 경우 의사결정 나무와 같은 데이터 기반의 학습을 통해, 값에 따른 경로를 유추할 수 있다.

세번째는 각 설계대안을 동일한 중요도로 가정하고, 각 설계변수의 변화도 동일하다고 보았다. 특정 기능적 요구사항을 해결할 수 있는 여러 대안이 있을 때, 각 대안들마다 비용 및 변화정도 등이 상이하다 (Schuh, 2013; Schuh, 2017). 따라서, 어느 대안을 선택할지에 따라서

상충관계를 고려하더라도 더욱 효율적인 방법이 될 수 있다. 하지만 본 논문에서는 각 설계대안마다 동일한 비용으로 시작하고, 각 설계변수들도 동일하게 1만권의 변화를 요구한다는 가정을 두고 있다. 물론 상충관계를 평가할 때, 재 변경 정도(impact)를 고려하였으나, 설계대안 그리고 각 설계 대안 별 설계변수를 각 어느정도 재설계가 필요한지를 상이하게 설정한 종합적인 평가가 필요하다.

제품이 통합형(integral) 제품이 아닌 모듈식(modular)제품의 경우 효과가 미비할 수 있다. 모듈식 제품은 각 부품 및 모듈의 영향을 최소화 함으로써 독립적으로 관리할 수 있는 제품을 의미한다. 이는 기능적 요구사항과 부품의 관계는 복잡하지 않고, 기능적 요구사항 사이에서의 복잡한 관계가 형성되지 않을 수 있다. 따라서, 이러한 상충관계에 대한 분석보다는 기존에 비용 및 시간을 최소화할 수 있도록 연속적으로 혹은 독립적으로 각 요구사항을 수행하는 과정이 더욱 효과적일 수 있다.

기능적요구사항과 설계 대안 사이의 관계, 설계대안과 설계 변수 사이의 관계 등, 주어진 정보가 실제 산업에서 유효할 정도의 데이터셋이 아닐 수 있다. 물론 설계변경관리는 기존 제품이 있다는 가정하에서 진행되는 것이기 때문에, 데이터셋을 갖고 있다는 가정하에 진행하였고, 전문가의 인터뷰를 통해 각 관계를 도출할 수 있다는 논문들이 많다. 그러나, 그런 기반이 약한 초창기 기업의 경우, 이러한 관계를 보여줄 데이터나 전문가가 부족하여, 모든 관계를 도출하기 어려울 수도 있다. 따라서, 이를 보완하기 위해 신제품설계(new product development) 단계부터 계층적 관계를 미리 확인하고 설계할 필요가 있다.

마지막으로 위 문제는 모든 경우의 수를 계산하고 비교하는 NP문제이다. 이는 기능적 요구사항의 수, 설계 대안, 설계 변수 그리고 전과 경로의 수가 많을 수록, 기하급수적으로 계산에 필요로 하는 시간이 증가한다는 것을 의미한다. 시뮬레이션을 통해 인위적으로 각 개수와 관계를 설정하여 분석한 결과 기능적 요구사항이 5개까지는

일정시간 내에 최적의 해를 보여준다. 이는 제품의 설계변경관리 과정속에서 충분한 사이즈라고 볼 수 있으나, 보다 최적화된 방법을 도출할 필요가 있다. 또한, 사례 연구에서 적용한 예제와는 다르게, 자동차 및 핸드폰과 같이 실제 제품의 경우 설계변수와 부품을 넘어 모듈 단위까지 분석이 필요할 정도로 실제 제품에 적용할 수 있을 만큼의 설계공간(design space)를 다룰 필요가 있다. 본 논문에서의 변경 전과 경로를 탐색할 때, 전체 전과 과정까지 모두 구한 뒤에, 각 최종 경로를 선별하여 분석하는 과정을 거친다. Li et al. (2014), Songhua et al. (2017), Lian et al. (2017)와 같은 연구들은 이를 해결하기 위해, 각 단계별로 선택하고 경우의 수를 줄이는 휴리스틱 알고리즘을 고안하여 문제의 크기를 줄일 수 있었다. 따라서, 이러한 휴리스틱을 고안하여 변경전과 경로를 탐색하는 과정에서의 시간 복잡도를 줄이는 연구가 필요하다.

참고 문헌

- Ahmad, N., Wynn, D. C., & Clarkson, P. J. (2009). Estimating the process cost of implementing engineering change alternatives. In *2nd Nordic Conference on Product Lifecycle Management, NordPLM'09*.
- Allada, V., & Lan, J. (2002). New modules launch planning for evolving modular product families. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 36231, pp. 349-358).
- Bauer, W., Bosch, P., Chucholowski, N., Elezi, F., Maisenbacher, S., Lindemann, U., & Maurer, M. (2015). Complexity costs evaluation in product families by incorporating change propagation. In *2015 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) Proceedings* (pp. 37-43). *IEEE*.
- Becerril, L., Sauer, M., & Lindemann, U. (2016). Estimating the effects of Engineering Changes in early stage product development. In *Proceedings of the 18th International DSM Conference*.
- Broeke, M. V. D., Devoldere, B., Creemers, S., & Boute, R. (2021). Product platform replacement: impact of performance objectives, innovation speed, and competition. *International Journal of Technology Management*, 85(1), 21-41.
- Brown, W. B., & Karagozoglu, N. (1993). Leading the way to faster new product development. *Academy of Management Perspectives*, 7(1), 36-47.
- Clarkson, P. J., Simons, C., & Eckert, C. (2004). Predicting change propagation in complex design. *J. Mech. Des.*, 126(5), 788-797.
- Cohen, T., Navathe, S. B., & Fulton, R. E. (2000). C-FAR, change favorable representation. *Computer-aided design*, 32(5-6), 321-338.
- Cooper, R. G. (1990). Stage-gate systems: a new tool for managing new products. *Business horizons*, 33(3), 44-54.
- Eckert, C., Clarkson, P. J., & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in engineering design*, 15, 1-21.
- Ferna' ndez, M. G., Panchal, J. H., Allen, J. K., & Mistree, F. (2005). Concise interactions and effective management of shared design spaces: Moving beyond strategic collaboration towards co-design. In *International Design Engineering*

Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 4742, pp. 231-248).

- Gan, Y., He, Y., Gao, L., & He, W. (2021). Propagation path optimization of product attribute design changes based on petri net fusion ant colony algorithm. *Expert Systems with Applications*, 173, 114664.
- Haibing, R., Ting, L., Yupeng, L., & Jie, H. (2021). Multi-source design change propagation path optimisation based on the multi-view complex network model. *Journal of Engineering Design*, 32(1), 28-60.
- Hamraz, B., Caldwell, N. H., & Clarkson, P. J. (2012). A matrix-calculation-based algorithm for numerical change propagation analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 60(1), 186-198.
- Hamraz, B., Hisarciklilar, O., Rahmani, K., Wynn, D. C., Thomson, V., & Clarkson, P. J. (2013). Change prediction using interface data. *Concurrent Engineering*, 21(2), 141-154.
- Hauser, J. R., & Clausing, D. (1988). The house of quality.
- Honecker, S. L., Groebel, D. J., & Mettas, A. (2016). Practical Methods for Analyzing Reliability Test Data in the Presence of an Unexpected Failure Mode (No. 2016-01-0274). *SAE Technical Paper*.
- Inman, R. R., & Blumenfeld, D. E. (2014). Product complexity and supply chain design. *International Journal of Production Research*, 52(7), 1956-1969.
- Jarratt, T. A. W., Eckert, C. M., Caldwell, N. H., & Clarkson, P. J. (2011). Engineering change: an overview and perspective on the literature. *Research in engineering design*, 22, 103-124.
- Jarratt, T. A. W., Eckert, C. M., Caldwell, N. H., & Clarkson, P. J. (2011). Engineering change: an overview and perspective on the literature. *Research in engineering design*, 22, 103-124.
- Kang, C. M., Hong, Y. S., & Huh, W. T. (2012). Platform replacement planning for management of product family obsolescence. *IIE Transactions*, 44(12), 1115-1131.
- Koh, E. C., Caldwell, N. H., & Clarkson, P. J. (2012). A method to assess the effects of engineering change propagation. *Research in Engineering Design*, 23, 329-351.
- Lee, J., & Hong, Y. S. (2017). Bayesian network approach to change propagation

- analysis. *Research in Engineering Design*, 28, 437-455.
- Li, K., Zhao, K., & Li, S. (2017). A concept-ontology-based model for resource conflict and task scheduling in concurrent engineering. *Concurrent Engineering*, 25(2), 163-173.
- Li, Y., & Zhao, W. (2014). An integrated change propagation scheduling approach for product design. *Concurrent Engineering*, 22(4), 347-360.
- Li, Y., Zhao, W., & Shao, X. (2012). A process simulation based method for scheduling product design change propagation. *Advanced Engineering Informatics*, 26(3), 529-538.
- Li, Y., Zhao, W., Ma, Y., & Hu, L. (2014). Scheduling of changes in complex engineering design process via genetic algorithm and elementary effects method. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 169097.
- Lian, X., Yang, Y., & Wang, J. (2017). Research on complex product design change propagation based on complex networks. In *2017 6th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)* (pp. 80-84). *IEEE*.
- Ma, S., Jiang, Z., & Liu, W. (2016). Evaluation of a design property network-based change propagation routing approach for mechanical product development. *Advanced Engineering Informatics*, 30(4), 633-642.
- Marques, P. A., Requeijo, J. G., Saraiva, P. M., & Guerreiro, F. F. (2013). Value-based axiomatic decomposition (part I): theory and development of the proposed method. *Proceedings of ICAD2013*, 1725.
- Martin, M. V., & Ishii, K. (2002). Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. *Research in engineering design*, 13, 213-235.
- McDonough III, E. F., & Barczak, G. (1991). Speeding up new product development: The effects of leadership style and source of technology. *Journal of Product Innovation Management*, 8(3), 203-211.
- Meyer, M. H., & Utterback, J. M. (1995). Product development cycle time and commercial success. *IEEE transactions on engineering management*, 42(4), 297-304.
- Ni, J., & Zhao, H. (2022). Multiobjective Optimization of Propagation Path in Automotive Product Design Change Based on MOPSO. *Mobile Information Systems*, 2022.

- Oh, K., Lim, J., & Hong, Y. S. (2022). Variation architecture for reducing unnecessary variants in modular product family design by domain mapping and variant-level planning. *Concurrent Engineering*, 1063293X221137831.
- Ostrosi, E., Haxhiaj, L., & Fukuda, S. (2012). Fuzzy modelling of consensus during design conflict resolution. *Research in Engineering Design*, 23, 53-70.
- Rebentisch, E., Schuh, G., Riesener, M., Breunig, S., & Hoensbroech, F. (2017). Assessment of changes in engineering design using change propagation cost analysis. In *DS 87-4 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 4: Design Methods and Tools, Vancouver, Canada*, 21-25.08. 2017 (pp. 069-078).
- Rouibah, K. J. C. A. S. K. E. Y., & Caskey, K. (2003). A workflow system for the management of inter-company collaborative engineering processes. *Journal of Engineering Design*, 14(3), 273-293.
- Sbragia, R. (2000). The interface between project managers and functional managers in matrix organized product development projects. *The key to prosperity in the 3rd millennium*.
- Schach, S. R., & Tomer, A. (2000). A maintenance-oriented approach to software construction. *Journal of Software Maintenance: Research and Practice*, 12(1), 25-45.
- Schuh, G., Aleksic, S., & Arnoscht, J. (2013). Module based release planning for technical changes. In *2013 Proceedings of PICMET'13: Technology Management in the IT-Driven Services (PICMET)* (pp. 1604-1617). *IEEE*.
- Schuh, G., Arnoscht, J., & Rudolf, S. (2010). Integrated development of modular product platforms. In *PICMET 2010 Technology Management for Global Economic Growth* (pp. 1-13). *IEEE*.
- Schuh, G., Riesener, M., Tönnies, C., & Aleksic, S. (2017). Technical change management for the maintenance of product platforms. *Procedia CIRP*, 60, 458-463.
- Schuh, G., Rudolf, S., Tönnies, C., & Aleksic, S. (2016). Release frequency for technical changes of modular product platforms: How to synchronise technical changes and product releases during the lifecycle of a product platform. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1045-1050). *IEEE*.

- Simpson, T. W., Maier, J. R., & Mistree, F. (2001). Product platform design: method and application. *Research in engineering Design*, 13, 2-22.
- Songhua, M. A., JIANG, Z., Wenping, L. I. U., & Huang, C. (2017). Design Property Network-Based Change Propagation Prediction Approach for Mechanical Product Development. *Chinese Journal of Mechanical Engineering= Ji xie gong cheng xue bao*, 30(3), 676-688.
- Suh, N. P. (1998). Axiomatic design theory for systems. *Research in engineering design*, 10(4).
- Takeuchi, H., & Nonaka, I. (1986). The new new product development game. *Harvard business review*, 64(1), 137-146.
- Tang, D. B., Yin, L. L., Wang, Q., Ullah, I., Zhu, H. H., & Leng, S. (2016). Workload-based change propagation analysis in engineering design. *Concurrent Engineering*, 24(1), 17-34.
- Tavčar, J., & Duhovnik, J. (2005). Engineering change management in individual and mass production. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 21(3), 205-215.
- Tseng, M. M., & Jiao, J. (2001). Mass customization. *Handbook of industrial engineering*, 3, 684-709.
- Ullah, I., Tang, D., Yin, L., Hussain, I., & Wang, Q. (2018). Cost-effective propagation paths for multiple change requirements in the product design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(9), 1572-1585.
- Yang, F., & Duan, G. J. (2012). Developing a parameter linkage-based method for searching change propagation paths. *Research in Engineering Design*, 23, 353-372.
- Yang, M. C., Wood, W. H., & Cutkosky, M. R. (2005). Design information retrieval: a thesauri-based approach for reuse of informal design information. *Engineering with computers*, 21, 177-192.
- Yin, L., Sun, Q., Tang, D., Xu, Y., & Shao, L. (2022). Requirement-driven engineering change management in product design. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108053.
- Zhao, Y., Cha, J., & Zhang, J. (2001). Conflict Elimination of Product Concurrent Design Based on Blackboard Model. In *International Design Engineering*

Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 80234, pp. 1355-1359). American Society of Mechanical Engineers.

Zheng, Y. J., Yang, Y., & Zhang, N. (2020). A model for assessment of the impact of configuration changes in complex products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 501-527.

정서영. (2019). 외부적 요인으로 인한 설계변경에 대처하기 위한 대안 생성 및 평가 프레임워크

Abstract

A conflict resolution methodology for handling multiple functional requirements in engineering change management

Jaesang Yu

Department of Industrial Engineering

The Graduate School

Seoul National University

It is a natural phenomenon for companies to increase the diversity of their products to attract continuous consumer demand. Rather than proceeding with the product development process from scratch to launch a new product, company can achieve shortened release cycles and cost savings by adopting a strategy of upgrading specific specifications of existing products. Research on this design change management has continued to be conducted in academia, it primarily focuses on addressing individual functional requirements. As a result, there is a lack of analysis regarding the conflicting relationships between various requirements that arise during the process of launching a new product that deals with diverse functional requirements simultaneously, as well as the analysis of conflicting relationships in change propagation within the product.

To address this issue, this paper proposes an optimization model that defines conflicting relationships in the process of simultaneously satisfying various functional requirements and derives a methodology that minimizes them. This approach differs from previous studies that simply consider cost, time, and complexity through simple summation, by assuming independence between requirements and independent change propagation within the product. Conflicting relationships can be divided into direct conflicts occurring between functional

requirements and design parameters, and indirect conflicts occurring in the change propagation process within the product structure due to changes in design parameters. The proposed model in this study aims to optimize the decision-making process of selecting design alternatives for each requirement and the paths in the change propagation caused by each initiated design parameters, in order to resolve conflicts and minimize unforeseen adverse effects such as increased costs and time caused by conflicts. It is expected that this research will provide practical assistance to companies by reducing the negative effects of conflicts and contributing to the reduction of unexpected costs and time, ultimately benefiting practical operations in the industry.

Keywords: engineering change management, redesign option, change propagation, change propagation path, conflict relation

Student Number: 2021-28863