

갯폼 재해의 FTA를 통한 정량적 위험성 산정에 관한 연구

함영종* · 기정훈** · 박종일***†

Quantitative Risk Assessment based on Fault Tree Analysis for Gangform Accident

Young Jong Ham* · Jung Hun Kee** · Jong Yil Park***†

†Corresponding Author

Jong Yil Park

Tel : +82-2-970-6508

E-mail : jip111@seoultech.ac.kr

Received : June 8, 2020

Revised : June 16, 2020

Accepted : August 4, 2020

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Although gangform has good workability due to the integration of outer wall forms and working platforms, 22 workers were died from 21 gangform related accidents during 2012 to 2016. Quantitative risk assessment is required for evident based prevention measure selection. In this study, based on 52 accident data from 2004 to the first half of 2019, FTA is conducted for probabilities of direct causes and their contribution to accidents. Three stages are considered: gangform installation, dismantling and lifting, and using. The effectiveness of countermeasures is evaluated through minimum cut set, RAW and RRW. Complete assembly of gangform on the ground level, detailed planning, and fall prevention device are suggested as prevention measures for installation, dismantling and lifting, and using stages, respectively.

Key Words : gangform, FTA, risk assessment, accident at construction site

1. 서론

갯폼은 외벽 거푸집과 작업발판이 일체화 되어 작업성이 높아 건축 구조물에서 다수 적용되고 있다. 고소 작업 및 대형이라는 갯폼의 특성상 사고 발생 빈도는 높지 않지만, 발생 시 강도는 크며, 사고 장면도 드라마틱하여 위험성이 높게 인지되고 있다. 또한, 최근 입면 변화가 많고 골조가 복잡한 형태의 건축 디자인이 유도되고 있어 위험성은 더욱 커지고 있는 실정이다.

갯폼을 포함한 작업발판 일체형 거푸집의 경우 산업안전보건법 제 71조의 3항에서는 건설공사의 수급인이 해당 구조물이 붕괴·낙하하는 등 재해발생 위험이 높다고 판단할 경우 도급인에게 설계변경을 요청할 수 있으며¹⁾, 건설기술진흥법 제 101조의 2에서는 구조적 안전성을 관계 전문가에게 확인받도록 규정²⁾하고 있는 등 설계, 구조적 안전성을 확보할 수 있는 근거를 갖고 있으나, 갯폼 운영단계에서 사고를 막기 위한 안전장치를 확보 한다거나 작업자의 실수를 막기 위한 예방

적 조치들은 여전히 부족하다.

제도 또는 관리의 효율성을 높이기 위해서는 사고 분석과 실제 위험성 정도가 도출되어야 한다. 본 연구에서는 갯폼 작업 중 발생한 재해를 Fault Tree Analysis(FTA)를 기반으로 사고의 원인을 갯폼 설치부터 해체·인양, 사용단계로 구분하여 파악하고, 정량적 위험성을 도출함으로써 갯폼 사고 방지 대책의 효과에 대해 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

갯폼의 정량적 사고분석 사례는 지극히 한정적³⁾이다. 갯폼 관련 재해는 대부분 중대재해로 이어져 재해 당사자 면담을 통한 상세 정보 확보가 어렵다. 또한, FTA에서 중간 사상의 확률(공중 별 재해 발생 확률)은 직접 도출이 가능하나, 기본 사상(직접 원인)의 확률은 직접 도출이 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 연구 방법을 사용한다.

*삼성물산(주) 품질안전실친그룹 수석 (Samsung C&T Corporation, Quality Safety Execution Group)

**서울과학기술대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

***서울과학기술대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

작업공정을 자재 반입부터 최초 설치, 해체·인양, 사용단계별로 분류하고, 안전보건공단, 언론기사 및 건설사 자체 조사보고서를 토대로 2004년부터 2019년까지 발생한 갱폼 관련 중대재해를 분석하고 이를 기반으로 FT도를 작성한다. FT도에서 사용되는 확률은 단위 작업 시간 당 발생 확률^{4,5)}로 정의한다. 단위 작업 시간은 건설공사 표준품셈과 공동주택현황 자료를 바탕으로 산출한다.

중간 사상의 확률은 공정 별 재해 확률 값을 사용하며, 기본 사상의 확률은 FT도, 중간 사상의 확률, 사고 분석을 통한 빈도값을 기반으로 베이지안 추론⁶⁾을 사용하여 산출한다.

기본 사상이 재해 확률에 미치는 영향을 파악하기 위해 중요도 지수를 분석한다. 일반적으로 사용되는 Birnbaum 중요도⁷⁾, Fussell-Vesely 중요도⁸⁾, Risk Achievement Worth (RAW), Risk Reduction Worth (RRW)⁹⁾ 중 RAW와 RRW를 적용한다. 각 공종 별 대표적인 예방 대책을 수립하고 적용 시 효과를 정량적으로 제시한다.

3. 갱폼 재해의 FTA

3.1 갱폼 작업공정 분석

작업공정 별 재해 유형과 확률 산출을 위해 Fig. 1과 같이 현장에 자재가 입고되는 시점부터 반출까지 설치, 해체 인양, 사용 3단계로 구분한다.

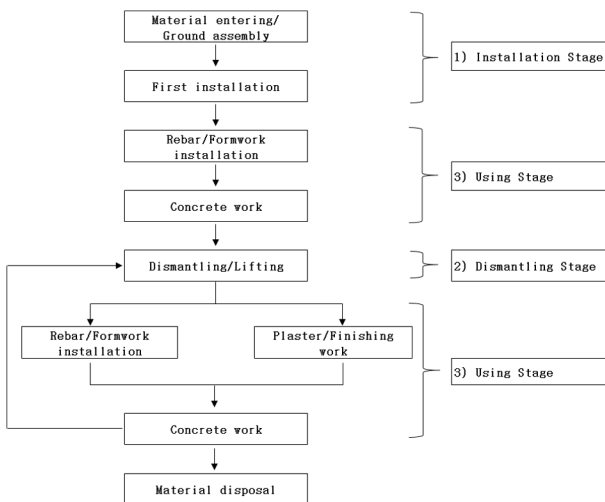


Fig. 1. Work Sequence of gangform work.

3.1.1 설치 단계 특성

입고/지상 조립에서는 갱폼의 자재 및 부속품을 차량으로 현장에 반입하여 야적장에 하차하고 조립한다.

자재 하역 및 조립시 자재 이동을 위해 지게차, 크레인 등 중장비를 사용한다.

최초 설치에서는 제작된 갱폼을 크레인을 사용하여 콘크리트 타설면에 수직으로 붙여 볼트로 고정한다. 지상에서 조립 완료 후 설치가 이루어져야 하지만, 작업공기, 현장 여건에 따라 일부만 조립한 후 외벽에 갱폼을 고정한 채, 안전난간대, 작업발판, 승강사다리 등이 나중에 설치되는 경우가 많아 고소작업이 발생한다.

3.1.2 사용 단계

철근·거푸집 설치에서는 갱폼 내부에 벽체 철근을 설치한 후 내측 거푸집을 설치한다. 이후 슬라브 거푸집과 그 위에 수평 철근, 전기 배선 및 설비용 개구부가 위치한다. 갱폼을 인상한 후 고정하기 위한 앵커볼트도 설치하게 되므로 규격과 위치를 준수하고 있는지 확인이 필요하다.

콘크리트 타설에서는 저층부의 경우 펌프카를 사용하지만, 골조가 높아지면 갱폼의 발판에 구멍을 뚫고 콘크리트가 이동할 배관을 설치하게 된다. 평상시 작업하던 발판에 구멍이 생기게 되므로 개구부가 발생한다.

미장/건출에서는 철근 및 거푸집을 설치하는 동시에 아래층의 콘크리트면 마감을 위하여 하부 케이지 발판에서 건출 작업이나 미장 작업을 한다. 갱폼의 하부 케이지는 외벽 마감작업을 위한 발판 및 안전난간대로 구성되어 있으므로 추락 위험은 낮다. 다만, 골조 단면이 저층부에서 고층부로 올라가면서 변화가 생기는 구간은 갱폼 발판과 벽체 사이에 추락할 수 있는 공간이 존재한다.

3.1.3 해체·인양 단계

크레인에 갱폼의 인양고리를 체결한 후 타이볼트 및 앵커볼트를 해체하여 인양 한 후 다시 볼트로 고정하는 작업이 이루어진다.

3.2 작업공정 별 분석

작업공정 별 재해유형과 발생원인을 파악하고자 안전보건공단에서 2004년부터 2019년 상반기까지 최근 15년 동안 조사된 총 52건의 재해사례^{10,11,12)}를 분석하였다.

3.2.1 설치 단계에서 직접 원인

52건 중 7건의 사고가 설치 단계에서 발생하였으며, 재해 유형은 갱폼에 맞음(3건), 발판위에서 작업자 떨어짐(3건), 갱폼 자재에 깔림(1건)으로 나타났다. Table 1과 같이, 사고 직접원인으로 입고 시 차량 위 자재를

Table 1. Cause of gangform accident in the installation stage

Direct causes	Count number
Damaged rigging rope	2
Not using hook safety latch	2
Rapid gangform decent due to poor communication	2
Safety handrail not installed	2
Platform not secured	2
Vertical ladder not installed	2
Unsecured lashing of gangform material on the truck	2
Lifeline not installed	1
Damaged safety harness	1
Damaged welding parts of platform support	1
The worker within dangerous zone	3
Signalman working/standing under gangform	2
Safety harness not used while moving	2
Standing on unsecured material stacked	2

고정하지 않거나, 비규격 줄걸이 로프 사용, 미고정된 발판 등의 불안정한 상태가 있고, 통제조치가 되지 않아 작업자가 위험한 구역에 들어가거나 안전대를 사용하지 않고 작업하는 등의 불안정한 행동이 있었다. 한 사고 당 직접 원인이 다수 존재할 수 있으므로 사고 당 1개 이상의 직접원인을 도출하였다.

3.2.2 사용 단계에서 직접 원인

52건 중 10건의 재해가 사용 중 단계에서 발생하였다. 재해 유형은 발판과 함께 추락(4건), 발판 개구부로 추락(2건), 갱폼 측면 단부로 추락(2건), 틈새로 추락(2건)으로 나타났다. Table 2와 같이, 작업발판을 불량하게 설치하여 탈락되는 발판과 함께 추락하거나 사용 중 타워크레인의 지지대 설치를 하거나 콘크리트 타설용 압송관 작업을 위해 일부 절단한 곳에 안전난간대, 개구부 덮개 등의 안전조치를 하지 않아 발생한 사고

Table 2. Cause of gangform accident in the using stage

Direct causes	Count number
Safety handrail not installed on one side of gangform	4
Safety handrail not installed after modification of platform	4
Cutting platform support for installing tower crane support	3
Opening for pump tube not secured	3
No protection for opening of tower crane support	3
Gap between concrete wall and platform	3
Damaged safety harness	2
Platform not secured	2
Damaged welding parts of platform support	2
Lifeline not installed	1
Safety harness not used	10

이다. 사용 단계에서는 형틀공 뿐만 아니라 갱폼의 하부 케이지에서 작업발판을 이용하여 미장 또는 견출 작업을 하는 작업자도 포함되는 특징이 있다.

3.2.3 해체 · 인양 단계에서 직접 원인

52건 중 35건의 사고가 해체 인양 단계에서 발생하였다. 재해 유형은 갱폼과 함께 떨어짐(26건), 작업자만 떨어짐(8건), 크레인 붐대에 깔림(1건)으로 나타났다. 해체 인양 단계는 갱폼 설치 후 골조 작업이 끝날 때까지 매 층마다 반복적으로 이루어지고 있어 작업빈도가 높다고 볼 수 있다. 대부분의 사고는 타워크레인에 갱폼의 인양고리를 지지하지 않은 채 앵커볼트를 해체하다가 갱폼과 같이 떨어지거나, 인접한 갱폼에 대기 중에 인양하는 갱폼이 충격을 주어 기울어진 갱폼에서 떨어지거나 균형을 잃는 경우로 나타났다. Table 3은 직접원인의 종류와 횟수를 나타낸다.

Table 3. Cause of gangform accident in the dismantling and lifting stage

Direct causes	Count number
Gangform not secured by tower crane	26
Anchor bolt of adjacent gangform removed	6
Anchor bolt of gangform not fixed	1
Vertical ladder not installed	2
Anchor bolts missing	4
Worker hit by the gangform	2
Damaged safety harness	2
Safety handrail not installed on the edge	4
Struck by gangform while lifting	4
Gust of wind during lifting	2
Lack of Concrete strength	2
Lifting beyond allowable crane's load	2
Lifeline not installed	1
Worker boarding on the gangform	26
Behavior of removing the bolts	19
Safety harness not used while moving	9
Standing under crane's boom	2

3.3 작업 공정 별 FT도

정상 사상은 갱폼 재해로 하며, 정상 사상 밑으로 설치, 해체 및 인양, 사용 단계 별 재해를 중간 사상으로 OR 게이트로 연결 하였다. 각 공정 별로 사고를 분석하여 FT도를 작성하고 직접원인을 기본사상으로 한다.

3.3.1 설치 중 재해 FT도

3.2.1장에서 분석된 양중시 갱폼에 맞음, 발판위에서 떨어짐, 자재에 깔림 재해를 중간사상으로 구성하고

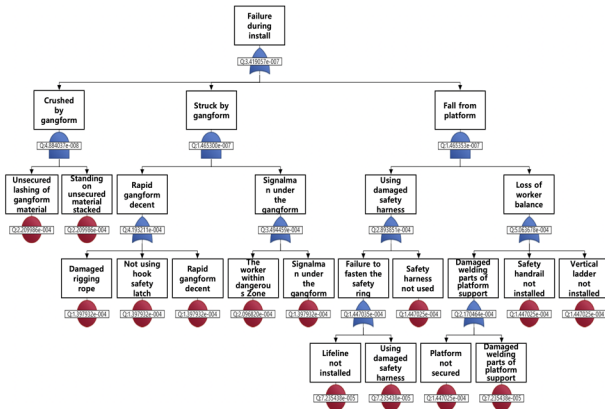


Fig. 2. Fault tree for installation stage.

각 유형별 원인을 논리적으로 Fig. 2(각 사상 별 확률 산정은 3.4장에서 설명)와 같이 도출하였다.

양중시 갱폼에 맞는 재해는 갱폼이 하강하는 중간사상과 작업자가 하부에 위치하고 있는 중간사상이 동시에 발생하여야 나타나므로 AND 게이트로 연결 하였다. 갱폼의 급격한 하강 중간사상은 줄걸이 로프 파단, 후크해지장치 미사용, 신호 미숙의 기본사상으로 구성 된다. 갱폼 하부에 작업자가 위치하는 중간사상은 크레인의 위험반경 내에 근로자가 위치하는 경우와 하역 중 신호수가 하부에 위치하는 기본사상으로 구성된다.

발판 위에서 떨어지는 재해의 경우 안전대를 착용하지 않은 상태에서 작업자가 균형을 잃어야지만 발생한다. 안전대가 기능을 상실한다는 것은 고리를 걸 수 없는 중간사상(안전대를 체결하는 고정점인 안전대 걸이 시설이 없거나 안전대를 착용하여도 짐줄이나 고리가 훼손되어 제 기능을 하지 못하는 경우)과 안전대를 사용하지 않는 기본사상 중 하나가 발생하여야 한다. 작업자가 균형을 상실하는 경우는 작업발판이 탈락하는 중간사상(미고정된 작업발판을 밟거나 발판을 지탱하고 있는 지지대의 용접부가 탈락하는 경우)과 발판에 안전난간대를 설치하지 않거나 수직통로를 누락하는 기본사상으로 구성된다.

자재에 깔리는 재해는 갱폼 자재를 고정하지 않고, 미고정된 자재위에 위치할 때만 발생한다.

3.3.2 사용 중 재해 FTD

사용 중 재해는 발판 위에서 떨어지는 재해만 존재하며, 안전대가 기능을 상실하고 작업자가 균형을 상실하여야만 발생한다.

안전대 기능 상실의 경우 설치 중 재해의 분석 결과와 동일하다. 작업자가 균형을 상실하는 경우는 작업 발판이 탈락되고 단부 보호 조치를 누락한 경우에만

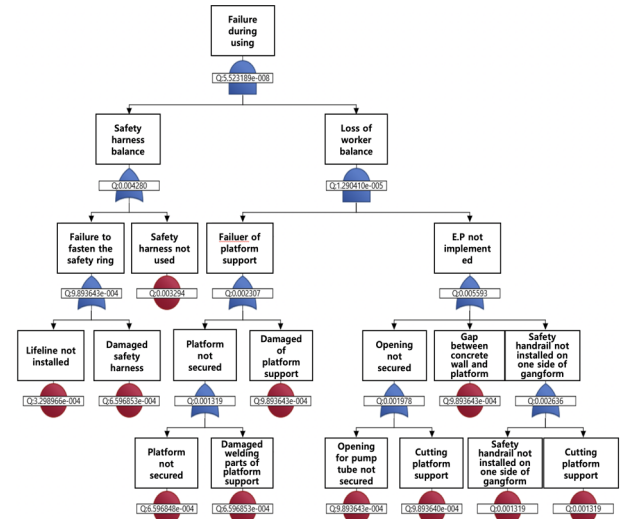


Fig. 3. Fault tree for using stage.

발생한다. 작업발판 탈락 중간사상은 기 설치된 발판이 탈락되는 중간사상(발판을 고정하지 않았을 때나 발판 지지대의 용접부가 탈락되는 경우)과 타워 지지를 위해 발판의 지지부를 절단하여 탈락되는 기본사상으로 분류하여 OR 게이트를 적용하였다.

단부 보호 조치 미실시의 경우 개구부에 대하여 안전조치를 하지 않는 중간사상(압송관이 지나가는 구간의 개구부 안전 미조치와 타워지지대 설치를 위해 간섭이 되는 발판을 절단한 경우), 갱폼 측면에 안전난간을 설치하지 않는 경우(기존 갱폼 측면에 안전난간을 설치하지 않은 경우와 절단한 발판 단부에 설치하지 않은 경우), 또는 벽체와 발판사이의 틈새가 있는 경우로 구성된다.

이를 종합하면 사용 중 재해 FTD는 Fig. 3과 같다.

3.3.3 해체 및 인양 중 재해 FTD

중간사상은 갱폼과 작업자가 함께 떨어지는 경우와 작업자만 떨어지는 경우 그리고 하강한 크레인 붐에 깔리는 경우로 구분된다.

갱폼과 함께 떨어지는 중간사상은 2개의 기본사상(크레인에 갱폼 미지지, 갱폼에 작업자 탑승)과 1개의 중간사상(볼트 고정 실패)으로 구성하였다. 볼트 고정 실패의 경우에는 4개의 기본사상(콘크리트 양생강도 미확보, 볼트 해체 행위, 볼트가 해체된 갱폼, 볼트가 미고정된 갱폼)으로 이루어진다.

작업자만 떨어지는 중간사상은 안전대의 기능이 상실되는 중간사상과 갱폼이나 작업자가 균형을 잃는 중간사상이 모두 발생해야 한다. 안전대 기능 상실은 앞서 언급한 설치 단계와 같다. 갱폼이나 근로자가 균형

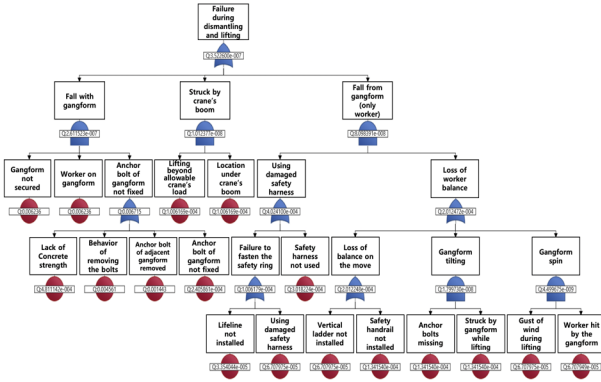


Fig. 4. Fault Tree for dismantling and lifting stage.

을 잃는 경우는 3가지 중간사상(이동 중 균형 상실, 갱폼 기울어짐, 갱폼 회전)으로 분류하였다. 이동 중 균형 상실은 수직통로를 미설치 하거나 안전간간을 설치하지 않은 경우에 발생한다. 갱폼의 기울어짐은 볼트가 일부 제거된 갱폼에서 작업자가 대기 중일 때 인양 중이던 갱폼이 충격을 가해야만 발생한다. 갱폼 회전에 의한 균형 상실은 갱폼을 인양 중일 때 돌풍으로 회전하는 갱폼이 근로자에게 충격을 가할 때만 발생한다.

하강한 크레인의 붐에 깔리는 중간사상은 인양 시 크레인의 허용하중을 초과로 붐이 하강하는 경우에 근로자가 붐대 하부에 있는 경우에 발생한다.

이를 종합하면 해체 및 인양 중 재해 FT도는 Fig. 4와 같다.

3.4 기본사상 발생 확률

각 사상 별 확률을 도출하기 위해 우선 재해 유형별 중간사상의 발생 확률을 도출하고 직접원인 별 발생 비율을 사용하여 기본 사상의 확률을 유추하였다.

중간사상의 발생 확률을 위해서는 기본적으로 근로자의 공정별 작업 시간이 요구된다.

우선 갱폼의 크기와 관련해서 본 연구에서는 일반적인 아파트를 기준으로 층 당 높이를 2.4 m, 측벽 길이 10 m, 전면 및 후면 발코니 길이를 4세대 기준 40 m, 20층을 가정하였다. 또한 갱폼 외벽 거푸집 높이는 3.8 m, 전면 발코니의 경우 거실의 창문, 계단실 창 등을 고려하여 거푸집 면적을 20%로, 후면 발코니의 경우 창문을 고려하여 60%로 가정한다.

사용단계에서 내측의 벽체 거푸집은 표준 높이인 2.4 m로, 건축 및 미장공이 작업하는 면적은 1개 층마다 슬라브 두께 20 cm를 포함하여 2.6 m를 적용하여 갱폼의 외벽 거푸집 면적을 산출하였다. 갱폼 작업시 콘크리트 공, 보통인부 등도 필요하지만 실제 사고가 발생한 직종인 형틀목공과 건축공 및 미장공만을 대상

Table 4. Workforce of each stage of gangform work

Stage	Worker	Standard estimate (man/10 m ²)	1 Floor (man)	1 Building (man)	Ratio
Installation	Form worker	1.89	37.35	37.35	7%
	Euroform work for the wall	1.0	12.48	237.12	
Using	Finishing worker	0.14	1.89	35.96	60%
	Plaster	0.22	2.97	56.51	
Dismantling and Lifting	Form worker	0.48	9.48	180.21	33%

Table 5. Gangform working hours for last 15 years(2004~2019)

Stage	Working Hours (hr)
Installation	20,470,415
Using	180,638,391
Dismantling and lifting	98,767,695
Total	299,876,501

으로 한정한다. 갱폼 사용 단계 작업에 필요한 형틀목공도 유로폼을 이용하여 내측 벽체 거푸집을 설치하는 작업을 대상으로 하였다. 이러한 가정을 통해 표준폼셈¹³⁾을 활용하여 단계 별 투입 인력을 Table 4와 같이 산출하였다.

대한주택건설협회의 공동주택현황¹⁴⁾에 따르면 2004년부터 2019년 6월까지 건설된 동수는 54,807동(평균연간 3,425동)이다. 이 값과 Table 4를 조합하여 Table 5와 같이 재해 발생 기간 중 투입된 시간을 추정하였다.

투입시간과 재해 발생횟수를 바탕으로 유형 별 재해 발생 확률을 계산하면 Table 6과 같다.

기본사상의 발생 확률은 중간사상(재해 유형별 발생 확률)과 기본사상의 발생 비율(Tables 1~3) 값을 근거로 FT도(Figs. 2~4)와 베이지안 추론을 통해 도출하였다(Table 7).

Table 6. Probability of accident per hours for each gangform stage

Stage	Intermediate event	Probability per hours
Installation	Crushed by gangform	4.89E-08
	Struck by gangform	1.47E-07
	Fall from platform	1.47E-07
Dismantling and lifting	Fall with gangform	2.63E-07
	Struck by crane's boom	8.10E-08
	Fall from gangform(only worker)	1.01E-08
Using	Fall from platform	5.54E-07

Table 7. Probability of basic event

Stage	Basic event	Probability per hours
Installation	Damaged rigging rope	1.40E-04
	Not using hook safety latch	1.40E-04
	Rapid gangform decent due to poor communication	1.40E-04
	The worker within dangerous zone	2.10E-04
	Signalman working/standing under gangform	1.40E-04
	Unsecured lashing of gangform material	2.21E-04
	Standing on unsecured material stacked	2.21E-04
	Lifeline not installed	7.24E-05
	Using damaged safety harness	7.24E-05
	Safety harness not used	1.45E-04
	Platform not secured	1.45E-04
	Damaged welding parts of platform support	7.24E-05
	Safety handrail not installed	1.45E-04
	Vertical ladder not installed	1.45E-04
Dismantling and lifting	Gangform not secured by tower crane	6.26E-03
	Workers on gangform	6.26E-03
	Lack of Concrete strength	4.81E-04
	Behavior of removing the bolts	4.57E-03
	Anchor bolt of adjacent gangform removed	1.44E-03
	Anchor bolt of gangform not fixed	2.41E-04
	Lifting beyond allowable crane's load	1.01E-04
	Location under crane's boom	1.01E-04
	Lifeline not installed	3.35E-05
	Damaged safety harness	6.71E-05
	Safety harness not used	3.02E-04
	Vertical ladder not installed	6.71E-05
	Safety handrail not installed on the edge	1.34E-04
	Anchor bolts missing	1.34E-04
	Struck by gangform while lifting	1.34E-04
	Gust of wind during lifting	6.71E-05
	Worker hit by the gangform	6.71E-05
Using	Lifeline not installed	5.54E-09
	Damaged safety harness	1.11E-08
	Safety harness not used	5.54E-08
	Platform not secured	1.11E-08
	Damaged welding parts of platform support	1.11E-08
	Cutting platform support for installing tower crane support	1.66E-08
	Opening for pump tube not secured	1.66E-08
	No protection for opening of tower crane support	1.66E-08
	Gap between concrete wall and platform	1.66E-08
	Safety handrail not installed on one side of gangform	2.21E-08
	Safety handrail not installed after modification of platform	2.21E-08

3.5 FT 중요도 분석

Minimal Cut Set, RAW, RRW을 구하기 위하여 Relyence Fault Tree SW를 사용하였다. 안전조치의 우선순위는 2가지로 크게 분류할 수 있다. 첫째는 사고의 원인인 해당 기본사상이 일어날 때, 사고 발생확률의 증가를 산정하여 가장 크게 증가하는 기본사상을 개선 조치하는 것이다. 정상사상에 가장 큰 영향을 미치는 값, 즉 RAW가 큰 기본사상이 발생하지 않도록 예방조치를 집중해야 한다¹⁵⁾. 두 번째는 정상사상이 발생할 확률을 최대한으로 감소시키는 즉, RRW가 큰 기본사상을 우선적으로 개선조치 하여야 한다.

3.3.1 설치 중 기본사상 중요도 및 대책

설치 중 재해의 경우 19개의 Minimal Cut Set이 도출되었으며 이 중 상위 5개를 살펴보면 Table 8과 같다. RAW와 RRW는 Table 9와 같다.

RAW에 따른 개선해야 할 기본사상의 우선순위는

Table 8. Minimal cut set for installation stage

Probability	Events
4.884037e-008	Standing on unsecured material stacked, Unsecured lashing of gangform material on the truck
2.931213e-008	The worker within dangerous zone, Damaged rigging rope
2.931213e-008	The worker within dangerous zone, Not using hook safety latch
2.931213e-008	The worker within dangerous zone, Rapid gangform decent due to poor communication
2.093882e-008	Safety harness not used while moving, Platform not secured

Table 9. RAW and RRW of basic events for installation stage

Event	RAW	RRW
Lifeline not installed	1481.587102	1.119990
Safety harness not used while moving	1481.587102	1.272711
Damaged safety harness	1481.587102	1.119990
The worker within dangerous zone	1226.994450	1.346118
Signalman working under gangform	1226.994450	1.206869
Rapid gangform decent	1022.624871	1.166638
Damaged rigging rope	1022.624871	1.166638
Not using hook safety latch	1022.624871	1.166638
Platform not secured	846.960034	1.139511
Vertical ladder not installed	846.960034	1.139511
Safety handrail not installed	846.960034	1.139511
Damaged welding parts of platform support	846.960034	1.065205
Unsecured lashing of gangform material	647.229921	1.166653
Standing on unsecured material stacked	647.229921	1.166653

걸이시설 미설치, 안전대 미사용, 안전대 손상, 위험반경내 위치, 하부 신호수 위치에 대한 조치이며, RRW에 따른 우선순위는 위험반경내 위치, 안전대 미사용, 하부 신호수 위치, 갱폼자재 미고정, 미고정 자재 위치이다. 특히, RAW와 RRW에서도 우선순위가 높아 중복되는 기본사상인 안전대 미사용, 위험 반경내 위치, 하부 신호수 위치 3가지는 가장 우선적으로 조치되어야 한다.

저감 대책으로 갱폼을 지상에서 조립 완료하면 안전대 미사용, 발판 미고정, 지지용접부 탈락 등 7개를 기본사상을 개선 할 수 있다. 만약 해당 7개의 기본사상의 발생 확률이 현재 대비 50%만 발생하는 것으로 가정하면, 기존의 설치 시 재해발생 확률은 3.42E-07에서 2.32E-07로 32% 개선 가능하다.

3.3.2 사용 중 기본사상 중요도 및 대책

Minimal Cut Set은 모두 45개로 나타났으며 이 중 상위 5개는 Table 3.10와 같다. RAW와 RRW는 Table 3.11와 같으며 발판 미고정, 발판지지부 절단, 지지용접부 탈락의 기본사상이 재해에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

저감 대책으로 관리자가 계획단계에 안전시설, 공사방법 등을 도면, 각종계획서에 빠짐없이 반영할 것을 제안한다. 난간대 시설은 틈새가 있는 갱폼 내측 및 측면에 모두 반영하고, 타워크레인, 압송관 등 작업 중간섭이 예상되는 항목은 위치 변경 및 일정 조정을 통해 사전에 제거되어야 한다. 이를 적용하면 발판 지지부 절단, 지지 용접부 탈락 등 8개의 기본사상을 개선시킬 수 있다. 이를 통해 기본사상의 발생 확률을 50% 감소시키는 경우 재해 발생 확률은 75% 감소된다.

Table 10. Minimal cut set for using stage

Probability	Events
4.298461e-009	Safety harness not used, Cutting platform support for installing tower crane support, Safety handrail not installed after modification of platform
4.298461e-009	Safety harness not used, Cutting platform support for installing tower crane support, Safety handrail not installed on one side of gangform
3.224378e-009	Safety harness not used, Cutting platform support for installing tower crane support, Opening for pump tube not secured
3.224378e-009	Safety harness not used, Gap between concrete wall and platform, Cutting platform support for installing tower crane support
3.224378e-009	Safety harness not used, Cutting platform support for installing tower crane support, No protection for opening of tower crane support

Table 11. RAW and RRW of basic event in using stage

Event	RAW	RRW
Safety harness not used	233.634990	4.326193
Cutting platform support for installing tower crane support	433.464442	1.749134
Damaged welding parts of platform support	433.464442	1.399539
Platform not secured	433.464442	1.399538
Safety handrail not installed on one side of gangform	178.779907	1.306830
Safety handrail not installed after modification of platform	178.779907	1.306830
Gap between concrete wall and platform	178.779907	1.213685
Opening for pump tube not secured	178.779907	1.213685
No protection for opening of tower crane support	178.779907	1.213685
Damaged safety harness	233.634990	1.181429
Lifeline not installed	233.634990	1.083155

3.3.3 해체 및 인양 중 기본사상 중요도 및 대책

Minimal Cut Set은 모두 17개로 나타났으며, 이 중 상위 5개는 Table 12와 같다. RAW와 RRW는 Table 13

Table 12. Minimal Cut Set for dismantling and lifting Stage

Probability	Events
1.774023e-007	Worker on gangform, Gangform not secured, Behavior of removing the bolts
5.610944e-008	Worker on gangform, Gangform not secured, Anchor bolt of adjacent gangform removed
4.049069e-008	Safety harness not used, safety handrail not installed
2.024617e-008	Safety harness not used, Vertical ladder not installed
1.871216e-008	Worker on gangform, Gangform not secured, Lack of Concrete strength

Table 13. RAW and RRW of basic event in dismantling and lifting Stage

Event	RAW	RRW
Gangform not secured	119.134231	3.866414
Worker on gangform	119.134231	3.866414
Behavior of removing the bolts	110.669645	2.010140
Safety harness not used	572.073094	1.208335
Anchor bolt of adjacent gangform removed	110.669645	1.188274
Safety handrail not installed	1143.136272	1.180976
Vertical ladder not installed	1143.136272	1.082977
Lack of Concrete strength	110.669645	1.055731
Damaged safety harness	572.073094	1.039836
Location under crane's boom	286.603761	1.029590
Lifting beyond allowable crane's load	286.603761	1.029590
Anchor bolt of gangform not fixed	110.669645	1.027107
Lifeline not installed	572.073094	1.019529
Anchor bolts missing	1.153202	1.000021
Struck by gangform while lifting	1.153202	1.000021
Worker hit by the gangform	1.076609	1.000005

과 같다. RAW가 큰 기본사상은 단부 난간 미설치, 수직통로 미설치 순이며, RRW의 경우 갱폼 미지지, 갱폼에 근로자 탑승으로 도출된다.

저감 대책으로 갱폼 떨어짐 방지 안전장치를 설치하면 우선순위가 높은 갱폼 미지지, 갱폼 근로자 탑승, 볼트 해체 행위 등 8개의 기본사상을 개선할 수 있다. 기본 사상 저감 효과를 50%로 가정하면 해체 중 재해가 65%가 감소되는 것으로 나타났다. 현재 갱폼의 떨어짐을 막기 위한 안전장치가 여러 가지 형태로 현장에서 시도는 되고 있으나 규격이 존재하지 않고 법적 의무사상이 아님으로 제한적으로 적용되고 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 2004년부터 2019년 까지 발생한 52건의 갱폼 재해를 FTA 기법으로 분석하였다. 총 42개의 기본사상을 도출하고, 각 기본사상의 시간당 발생 확률을 중간사상의 발생 확률, 작업 투입 시간, 기본사상의 발생 비율을 기반으로 도출하였다. 이를 통해 공정 단계별로 재해의 경로를 파악할 수 있는 Minimal Cut Set, 개선 우선 순위를 위한 RAW, RRW를 계산하였다.

개선 대책으로, 설치단계에서는 모든 갱폼 자재의 조립을 지상에서 완료하는 것(32% 재해 감소 효과), 사용 단계에서는 계획단계에 안전시설, 공사방법 등을 도면, 각종 계획서에 반영하는 것(75% 재해 감소 효과), 마지막으로 해체/인양 단계에서는 갱폼 떨어짐 방지 안전장치(65% 재해 감소 효과)를 제안한다.

본 연구에서는 갱폼 사고원인을 분석하면서 근본원인을 포함하지 않았다. 향후 이에 대해 추가적으로 분석하면 더 효과적으로 예방 대책이 수립 될 것으로 기대된다.

References

1) Ministry of Employment and Labor of Korea, Occupational Safety and Health Act, 2019.

2) Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korea, Construction Technology Promotion Act, 2019.
 3) K. S. Son and S. O. Kim, "Analysis of Efficient Investment for Apartment Gang Form Work by FTA Technique", J. Korean Soc. Saf., Vol. 17, No. 1, pp. 87-93, 2002.
 4) O. N. Aneziris, E. Topali and I. A. Papazoglou, "Occupational Risk of Building Construction", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 105, pp. 36-46, 2012.
 5) O. Aneziris et al., "The Quantification of Occupational Risk, The Development of a Risk Assessment Model and Software", RIVM report 620801001, 2008.
 6) J. J. Woo, M. H. Kim, C. Y. Chu and J. B. Baek, "Synthesizing Failure Data of Pump in PCB Manufacturing using Bayesian Method", J. Korean Soc. Saf, Vol. 35, No. 1, pp. 79-86, 2020.
 7) Z. W. Birnbaum, On the Importance of Different Components in a Multicomponent System, Washington Univ Seattle Lab of Statistical Research, 1968.
 8) W. E. Vesely et al., "Measures of Risk Importance and Their Applications", Battelle Columbus Labs, 1983.
 9) M. C Cheok, G. W. Parry and R. R. Sherry, "Use of Importance Measures in Risk-informed Regulatory Applications", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 60, No. 3, pp. 213-226, 1998.
 10) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Statistics Information of the Status of Industrial Accidents", 2007~2018.
 11) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Domestic Disaster Cases", 2004~2017.
 12) Korea Occupational Safety & Health Agency, Incheon Regional Headquarters, "Industrial Accident Cases", 2019.
 13) Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, "2019 Standard of Construction Estimate", 2019.
 14) Korea Housing Builders Association, "Apartment Housing Status", 2004~2019.
 15) Relyence, "Relyence Fault Tree Importance Measures", 2018.