

인적 결함에 의한 구조적 실패 (붕괴)

D · E Allen, National Research Council
Canada,
Division of Building Research
Ottawa, Canada

孫基詳
건설안전기술사
공학박사
한국산업안전공단 산업안전교육원 교수

그간 많은 세미나에서 건설안전 확보대책으로써 근원적 안전확보방안으로 “설계시부터의 안전”을 제창하고 있지만 이를 위한 구체적인 제시를 하지 못하고 있었으며 필자가 “건설안전설계 프로세스”를 출판해 내면서 건축설계사는 물론 구조담당 엔지니어들의 임무수행시에도 각종 결함가능성을 확인하고 이미 수년전부터 관심을 갖고 연구해 왔고, 또 교류중이던 호주 The Univ. of Newcastle 토목공학과 Prof. Melchers의 논문을 연구하던 차에 많은 내용 중에서 이해와 접근이 용이한 본 논문을 그대로 제시한다.

- 필자註 -

1. 실패가 우리에게 말해주는 것은 무엇인가?

캐나다에서 실패에 관한 정보(Allen 1974)에 의하면 몇가지 구조적 실패들은 정상적인 과다하중이나 강도부족 (회오리 바람 손상 등)에 기인하고 몇가지는 우발적인 하중이나 취약 (화재, 폭발 등)에 기인하지만 대부분은 인적 결함 때문이다.

열화를 제외한 대부분의 구조적 실패가 되는 설계 결함은 구조거동 특히 상세사항에 관한

그리고 발생하는 각종 하중과 영향들에 관한 고려부족이나 오해에 (잘못된 생각) 기인한다. 구조적 실패에 기인한 대부분의 건설결함은 부적절 가새보강, 생략, 부적절 위치, 생산불량 및 과다하중재하 등과 같은 부정확한 절차 방법들에 기인한다.

실패정보는 또한 대부분의 골칫거리 즉 오해, 고려부족-실책, 부정확정보, 오류해석 등을 일으키는 것이 인적결함 부류임을 확인하게 된다.

이들 결함의 대부분은 어떤 방식으로든 매개 변수들의 편차에 관계될 수는 없다.

2. 인적 결함에 의한 실패를 우리는 어떻게 방지하는가?

아침에 일어나거나 신문을 읽는 누구나가 인적결함은 생활 현실이므로 제거될 수 없는 것임을 알고 있다. 그러나 우리가 할 수 있는 것은 여러가지 조치를 하여 바람직하지 못한 인적결함의 영향을 최소화하는 것이다. 정상적인 생활과 관련한 이러한 많은 조치들은 직관적이고 대부분 경험과 통찰력에 근거한 상식적인 문제들이다.

계획, 설계, 시공, 사용 등을 포괄하는 건물 프로세스는 상이한 기술을 가진 다양한 사람들에 의해 수많은 결정과 활동을 바탕으로 하고 있다. 건물프로세스중에 인적결함으로부터 생긴 건물 손상부는 보수하는데 불편하고 비용이 많이 들 수 있으며 때로는 위험스럽기도 하다. 영향을 받는 사람들은 일반적으로 결함을 일으키는 사람들이 아니다.

인적 결함에 의한 실패를 피하기 위한 일상 생활에 대해서 보다는 좀더 조직적인 조치들을 건물프로세스를 위해 해야한다. 이러한 조치들로는 진단, 검색, 의사소통, 적절한 프로젝트 수행 조직 등이고 품질보증의 일반적 추진방향에 따라 취해진다. 예로서는 표1에 제시된 “전문적인 무지 주장의 방지”에 관한 안내지침들은 엔지니어에 의해 시행되는 품질보증 조치들에 직접 관계된다. 설계안전인자들은 약간의 완충효과가 있지만 이 인자들은 인적결함에 의한 대부분의 실패들에 대해서 분명히 비효과적이다.

건물 프로젝트는 점점 더 복잡해지고, 대안적 해결법은 좀 더 많아지고, 실패결과는 좀 더 미치는 범위가 커지고 있다. 그러므로 인적 결함과 그 영향의 통제에 관한 확실한 이해에 근거하여 품질보증 조치를 하는 것이 바람직 하다.

3. 인적 결함에 관한 연구 목표는 무엇인가?

인적 결함에 관한 연구 목표는 좀 더 개선된 품질보증조치들을 고안하고 우리가 좀더 효율적으로 적용하는 것들을 만드는 것이다. 좀 더 직접적으로 말해서, 인적 결함에 의한 실패들을 방지하고자 하는 것이다. 또 하나의 가능한 잇점은 좀더 발전된 인적결함의 이해를 바탕으로한 프로젝트의 개선된 작업조건들이다. 그러나 이러한 잇점에도 불구하고 연구수행 결과로써 뭔가 유용한 것이 나오지에 관하여 서는 회의가 있다.

4. 지금까지의 결함 연구

지금까지의 대부분 연구는 실제 구조적 실패들에 관한 연구를 바탕으로 하고 있다. 다수의 주요구조물 붕괴들을 연구함으로써 Pugsley(1973)는 8개 인자들을 증명했는데 (표2) 이것들은 프로젝트실패의 가능성에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 이러한 인자들에 가중치를 적용하고 그 합계를 결정하면, 엔지니어는 소위 결함경향이라는 조치를 예측할 수 있다. 즉 이방법은 취약부분과 보통의 경우에 비교되는 실패의 가능성을 나타내는 프로젝트에 적용될 수 있다. Blockley(1977)와 Fox(1983)는 33개와 16개인자들을 각각 사용하여 유사한 연구들을 수행하였다. 결함부담법의 곤란성 한가지는 프로젝트에 참여한 사람들에게 의해 실패전에 부여된 가중치가 실패 후에 전문가들에 의해 부여된 가중치들과는 아주 달라질 수 있다는 것이다. 이 곤란성을 극복하기 위하여, Pugsley는 전문가 위원회가 프로젝트의 초기에 이 방법을 적용하는 것을 권장했다. 또 하나의 결점은 결함부담기능이 프로젝트에 참여한 사람들로 하여금 발견되게 할 수 없고 결함들을 수정하도록 할 수 없다는 것이다. 그러나, 품질보증전략들을 평가하기 위한 체크리스트를 제공해 줄 수 있다.

Matousek and Schnider(1978)는 800가지 실패들을 연구했고 건물 프로세스 중에서 나중에 대두되는 사람들에 의한 좀 더 분명한 결함들의

표 1. 전문적인 무지주장의 방지

원 활 한 의 사 전 달	<ul style="list-style-type: none"> * ① 효과적인 실습, 복잡하지 않은 구두진행, 서면의사 전달 * ② 간략하고 사실에 입각 전달 * ③ 모든 통신은 최고책임자에 의해 체크하도록 한다. ④ 시방서에서 정확한 정의를 사용한다. ⑤ 모든 서류는 주의깊게 정독한다. ⑥ 분명하고 간단한 도면을 작성한다 ⑦ 각 치수, 수량이나 용량을 한번만 도시한다. ⑧ 아주 간단한 도면 개정 시스템을 도입한다. ⑨ 효과적인 화술과 문장기법을 갖도록 동료사이에 복돋아 준다. ⑩ 중요한 문제를 구두 소개하지 않도록 한다. ⑪ 중요한 전화 대화를 쪽지로 보관하고 분배한다.
인 적 결 함	<ul style="list-style-type: none"> ① 서면일지나 규칙적인 노트를 계속한다. ② 건전한 공학적 판단을 개발한다. ④ 주의깊은 예정표 작성으로 설계와 서류작업의 지연을 피한다. ④ 불가한 완료시간을 배제하고 “지름길”을 피한다. ⑤ 설계한 도면작성자를 임시직으로 채용치 않도록 한다.
재 정 작 용	<ul style="list-style-type: none"> ① 회사능력에 맞는 한도내에서 작업을 착수한다. ② 의뢰고객의 재정지원을 체크한다. ③ 전문적 팀에 각 일원들의 능력을 조사한다. ④ 초기에 적절한 전문수수료 권을 협상한다. ⑤ 서면으로 모든 계약범위를 확인한다. ⑥ 여유있는 건적을 준비하고 그 범위를 한정한다. ⑦ 부분적인 설계용역과 관계할때 부수적인 감리진영과 적절한 의사소통을 확보한다. ⑧ 능력있는 인사만을 채용한다. ⑨ 기술적 지식을 최신 정보로 꾸준하게 대체해 나간다.
기 술 적 절 차	<ul style="list-style-type: none"> ① 강력하고 주의깊은 체크시스템을 조작한다. ② 시방서에 시도했고 시험한 조항들만을 이용한다. ③ 표준도면상세를 가능한 모든 곳에 이용한다. ④ 시공도면을 신속히 검토한다. ⑤ 책임한계를 한정하기 위하여 주의깊게 “검토인”을 날인한다. ⑥ 시도했고 시험한 항목의 장비를 특기한다. ⑦ 크던 작던 모든 프로젝트를 똑같이 중요한 것으로 취급한다. ⑧ 시공자의 업무를 하거나 시공자의 책임을 지는 것을 피한다.
실 책 처 리	<ul style="list-style-type: none"> ① 의뢰인에게 즉시 통보한다. ② 해결책을 제시하고 사죄하지 않는다. ③ 얼굴을 맞대고 의뢰인을 대하고 연락한 뒤에 숨지 않는다. ④ 특출한 수수료 청구를 신속하게 토의하고 매듭짓는다.

검색을 포함하여 검색 및 검진 등과 같은 정사
적인 품질보증 방법들이 수행되었다면, 대부분의

실패는 피할 수 있었다. Matousek (1983)는 인적
결함에 따른 실패들을 피하는데 적용될 수 있는

표 2. 결함부담인자 (Pugsley 1973)

- | |
|------------------------------|
| 1. 새로운 이상한 재료 |
| 2. 새로운 혹은 비상한 시공법 |
| 3. 새로운 혹은 이상한 유형의 구조물이나 구성부재 |
| 4. 설계 및 시공팀의 경험 및 조직 |
| 5. 연구 및 개발배경 |
| 6. 산업풍토 |
| 7. 재정풍토 |
| 8. 정치풍토 |

조치들을 서술하고 있다.

이 조치들은 다수의 유용한 체크리스트를 포함하고 있다. 이것은 가야할 방향으로 하나의 중요한 단계이다.

Murphy 법칙은 만약 뭔가 잘못될 수 있다면, “그것은 잘못될 것이다” 라고 진술할 수 있다. 프로젝트가 잘못되거나 실패할 수 있는 다양한 방식들은 “위험 시나리오”라고 부르고 이들 시나리오들을 품질보증행위의 통합적부분으로 간주하는 것이 중요하다(Society of Swiss Engineers and Architects 1979) 비록 “위험 시나리오 (hazard scenario)” 개념은 검색을 위한 적절한 태도를 창출해 낼 수 있을지라도, 사실상 잘못되어 갈 수 있는 모든일을 예측하는 것은 아주 어려운 일이다. 이것이 바로 새로운 개념이나 적용이 일반적으로 경험의 실험을 거친것보다 더욱 결함 부담이 되는 이유이다. 해결책은 변화에 저항하는 것이 아니라 변화를 확인하고 결함발생시 좀 더 많은 예시력(forethought) (위험시나리오 고려)을 적용하는 것이다.

신뢰도법은 설계 안전인자들을 최적화하는데 사용되어 왔다. 이것들은 또한 품질보증방법을 최적화하는데 유용할 수 있다.

- 1) 어느 방법들이 비용면에서 효율적인가?
- 2) 품질 보증을 위해 비용을 얼마나 써야하는가?
- 3) 언제 이 방법이 시행되어야 하는가?

몇가지 노력들이 이 분야에서 시작 (Allen

1981) 되었지만 아직은 그에 대한 데이터가 부족한 실정이다.

수학적으로 인적 결함에 관한 영향을 모델화하려는 시도가 많았었다. 설계계산에 사용된 물리적 매개변수들에서 편차가 있는 인적결함 영향에 초기시도들은 관련되었지만, 이 그림은 보다 앞서 서술된 실패정보와 맞지 않는다. 이것들의 효율성을 예측해내기 위한 간단한 검색 프로세스를 고찰하는 몇가지 시도들이 있었다. (Melchers 1978, Lind 1983)

정보의 흐름이나 결함의 탐지에 관련한 기타 모델들이 제안되었다. Franz knoll (1982)은 적합한 품질보증조치를 평가하는 도구로써 사용되는 건물 프로세스에 관한 모델링을 제안했다. 건물프로세스가 다수의 상호관련 인간과 물리적이고, 절차적인 인자들을 조정하기 때문에 그런 모델링은 쉬운일이 아니다.

아마도 우리는 거의 사람이 없는 단순프로젝트의 모델링은 시작할 수 있다고 본다. 그러나 우리가 인적결함의 기본특성과 건물과정에서 그 역할에 관하여 좀더 알기까지는 어떤 것을 모델링 할 가치가 있는지 필자도 잘모르겠다.

5. 인자들은 무엇을 포함하고 있는가

모델링의 주요한 어려움은 인자들의 정의였다. 최근 IABSE(스위스엔지니어 협회) 품질보증 워크숍에서 Niels Lind는 문기를 “품질 보증에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 무엇인가?” 라고 했다. 참가자들의 대부분들에 의해 주어진 답은 인적행위였다. 인적 행위는 다수의 인자들(훈련 및 경험, 작업조건들, 사회적 숙련 등)을 의미한다. 우리가 인적결함에 관한 연구와 어딘가에서 관계되고자 하면 인적행위에 관련한 인자들을 잊어서는 안된다.

품질보증에 영향을 미치는 건물프로세스에 관한 기타 인자들은 프로젝트의 복잡성과 새로운 경험 (처음 대하는것), 실패의 결과, 프로젝트

수행조직, 품질보증절차의 협의, 자원, 시간 등에 관한 것들이다. Franz Knoll (1982)은 71개 항의 인자들을 목록화 했다. 이것은 구조공학에서 사용된 분명히 정의된 인자들과는 훨씬 더 확장된 주장이다. 불과 2~3개의 기본 매개 변수들을 확인하는 가능성은 있는가?

6. 구조공학의 역사로부터 우리는 무엇을 배울 수 있는가?

인적결함의 제안된 연구에 관한 우선 목표는 사람들로 하여금 인적 결함에 따른 실패를 피하도록 하는 것이다. 수백년 뒤로 거슬러 올라가는 전통적인 구조공학연구의 우선 목표는 사람들로 하여금 기술적 원인으로 인한 실패를 피하도록 하는 것이었다. 이것은 그러한 실패들을 방지토록 하는것은 의심의 여지가 없다.

아마도, 원리는 이것으로부터 무언가를 배울 수 있다고 본다. 전통적인 구조연구의 대부분은 실패의 결과로써 시작되는 것을 유의하는 것은 흥미있는 일이다.

구조공학의 실제에 관한 구조연구의 가장 성공적인 적용은 원리들과 실제규칙들에 관한 건전한 지식기반을 세우는 것이다. 이 기본 원리들은 엔지니어의 정신에 간직되고 프로젝트 즉

개념, 설계, 진단, 검사 그리고 변경등에 어느때나 적용된다. 상황이 비록 변할지라도, 기본 원리들은 변치 않으므로 기억하고 적용하기 쉽다.

지루한 위원회 회의나 논문 발표에서 구조엔지니어들은 누군가 실패(붕괴)에 관한 이야기를 시작하면 긴장하는 것을 느끼게 된다. 내가 앞으로 유사한 실책을 피할 수 있도록 하기 위하여 이 실패는 기본 원리에 어떻게 관련되는가? 이 지식기반 없이 나는 구조엔지니어가 프로젝트에 효과적으로 기여할 수 있다고 믿지 않는다.

표3은 기술적 요인에 의한 실패를 피하는데 사용되는 방법을 따르면서 인적 결함에 의한 실패들이 어떻게 피해질 수 있는가를 제시하고자 하는 시도이다. 우리가 관련된 기본 원리들이나 인자들에 관한 이해가 부족한 것 같다. 아마도 이들 원리나 인자들은 인적행위와 관리등과 같이 다른 규제에서의 사람들에 의해 더 잘 알려져 있으리라 본다.

더 나은 관련원리나 인자들에 관한 이해는 좀더 효율적인 모델링 접근은 물론 좀더 효율적인 품질보증조치들을 결정하는데 도움이 될 것이다.

아마도 우리는 제조과정 항공우주산업, 의료 실무 등과 같은 다른 분야들에서도 무언가를 배울 수 있을 것이다. 그러나 중요한 차이들이

표 3. 구조적 실패를 방지키 위한 원인

구 분	기술적 원인	인 적 결 함	비 고
1. 기본원리적용	<ul style="list-style-type: none"> - 하중 혹은 영향들 - 하중전이 혹은 정하중 - 재료특성 - 이 동 - 공 명 	원리들 혹은 인자들은 분명히 정의되어 있는가?	
2. 실제적인 규칙적용	<ul style="list-style-type: none"> - 처짐 $\leq \frac{\text{스팬길이}}{360}$ - 장방향 응력블록 - 상호작용 공식들 - Miner법칙들 	<ul style="list-style-type: none"> - 조직정비 및 구축 - 체크방법들 - 검사방법들 	

여기에 있다 예를 들면, 생산품 제조는 초기실험단계 중에 변경될 수 있는 꾸준한 프로세스인데 비해, 건물 프로젝트는 특유하여 일반적으로 사용전에 시험될 수 없다.

항공모함이나 우주차량의 설계, 개발 및 생산은 이들 두가지 극단적인 경우 중간의 프로세스라고 본다. 그러나 건물 프로세스는 반복적인 특징을 갖는다. 의료실체는 원인, 치유, 보수(수술) 등에 대한 질병 (도면의 설계를 검색하는 것보다 상당히 다른) 행위 등의 진찰을 포함한다. 그럼에도 불구하고 이들 분야는 숙고할 가치가 있다.

7. 결론

건물 프로세스는 최종 생산품의 실패에 기여할 수 있는 아주 다양한 인적, 물리적 방법론적 인자들을 포함하는 복잡한 상호작용 행위이다.

그러므로, 인적결함에 관한 연구는 “엄격한 물리과학”은 물론 “유연한” 인적과학들을 포함하는 다규제적 접근을 필요로 한다. 인적결함에

관한 연구의 목표는 최소의 노력으로 관련 당사자들이 인적결함에 의한 건물 실패를 하지 않도록 하는 것이다. 앞서의 토의를 근거로 다음과 같은 연구 프로그램이 권장되고 있다.

- 1) 인적 결함에 의한 실패의 원인에 대한 기본 원리를 혹은 인자들을 확립한다. 역사와 실패사례 정보는 이것들을 확립하는데 도움이 된다.
- 2) 기본 원리와 인자들을 이용하여 기존 품질보증방법들과 도구를 평가하고 새로운 것들을 조사한다. 도구들을 체크리스트가 물리적 측정장치를 포함한다. 사람들로 하여금 결점을 확인하는데 도움이 되는 새로운 기구는 유용한 것으로 판명될 수 있다.
- 3) 조치를 취함에 있어서 효율적 사용을 가능케하는 실패정보와 수학적 모델링을 이용한다.

새로운 분야에 착수하는 연구자들은 상이한 노선을 추종하는것이 인간본연의 특성이다. 이것은 우리가 그렇지 않으면 모든것을 잘못된 방향으로 지향하기 때문에 이치있는 말이다. 그러나 이것은 초기단계에서 연구자들이 서로 자기접근방법들을 토론하는 것이 중요하다. ㉞

○ 거푸집 지보공의 안전조치 (I)

거푸집 지보공을 조립할 때에는 다음 사항을 준수하여야 한다.

- 깔목의 사용, 콘크리트의 타설, 말뚝박기등 지주의 침하를 방지하기 위한 조치를 할 것.

