

03

기후변화 대응 농업시설물의 신뢰성
기반 설계

이상익
경북대학교 농업토목공학과
/ 조교수
sangik@knu.ac.kr



이종혁
서울대학교
농업생명과학연구원
/ 선임연구원
leejh314@snu.ac.kr



최원
서울대학교 조경·지역시스
템공학부 지역시스템공학전
공, 글로벌스마트팜융합전공,
농업생명과학연구원 / 부교수
fembem@snu.ac.kr

1. 머리말

올해 여름은 유난히 더웠고, 겨울은 무척이나 추울 예정인가 보다. 특히 올해 9월은, 하늘이 높고 공기가 바삭해져야 할 시기에 기온이 내려갈 줄 모르고 기상 관측 이래 가장 더운 가을로 기록되었다. 평균기온, 폭염 일수, 열대야 일수 모두 역대 최고치를 경신한 9월이었다. 이렇게 기후변화는 우리 일상에 깊이 다가오게 되었으며, 이상기후 현상은 그 빈도와 강도가 과거보다 더욱 심각해지고 있다. 그로 인한 자연재해 피해 또한 증가하는 추세이다. 한편, 시설농업은 이러한 이상기후와 극한 기상 조건을 극복하고, 기상 변화가 극심한 국내 환경에서 안정적 식량 공급과 고품질의 농산물 생산을 위해 발전되어 왔다. 하지만 농업시설물은 대체로 경량 구조물이며 비교적 낮은 안전율로 설계되기에 자연재해 피해가 지속해서 발생하고 있다. 더불어, 2027년까지 농업생산의 30%를 스마트농업으로 전환하겠다는 정부의 「스마트농업 육성 및 지원에 관한 법률」(2023.7. 제정) 시행에 따라 농업시설의 대형화와 현대화가 빠르게 진행되고 있다. 이로 인해 농업시설물에 관한 기존의 설계법과 설계기준을 그대로 적용할 경우, 대형 비닐하우스 등의 시설은 더욱 큰 자연재해 피해가 발생할 가능성이 높아지고 있다. 따라서 본 고에서는 기후변화 및 이상기후에 효과적으로 대응하고 안정적 식량 공급을 지원하기 위해, 농업시설물에 관한 기존의 사후 복구 중심 패러다임에서 벗어나 피해 예방과 위험 관리를 목표로 한 신뢰성 기반의 설계법과 그 적용 방안에 대해 논의하고자 한다.

2. 기후변화와 식량안보, 그리고 농업시설

기후변화에 따른 이상기후 현상은 과거보다 빈도와 강도가 분명 심화되고 있다. 전 지구 평균기온은 지속해서 증가하고 있으며, 이러한 지구온난화로 인해 이상기후 발생과 자연재해 피해가 급증하고 있다 (관계부처합동, 2023). 코페르니쿠스 기후변화서비스 (Copernicus Climate Change Service, C3S)에 따르면, 2022년 전 지구 평균기온은 평년 (1991~2020년) 대비 약 0.3°C 상승했으며, 산업화 이전 (1850~1900년) 대비 약 1.2°C 상승하였다. 국내에서는 지난 100년간 한반도의 이상기후 발생 빈도와 강도가 지속적으로 증가해 왔으며, 이러한 추세는 기후변화로 인해 더욱 강화될 것으로 전망된다 (국립기상과학원, 2018).

한편, 기후변화와 더불어 글로벌 기후위기와 국제정세 불안정에 따라 농산물의 수급 불확실성이 증대되고 있으며, 한국의 식량자급률과 곡물자급률은 계속해서 하락하고 있다. 2020년 시작된 COVID-19와 그 이후 국제정세 불안정으로 인해 국제 곡물 가격은 극적인 변동 추이를 나타냈으며, 특히 2022년 러시아와 우크라이나의 전쟁으로 밀, 옥수수, 대두 가격이 급등하였다. 이러한 배경하에 국제 사회는 장기간 곡물 가격 상승이 지속되는 식량 슈퍼사이클로 진입할 가능성이 있다고 보고하고 있다. 한국의 2022년 식량자급률은 49.3%, 곡물자급률은 22.3%로, 여전히 많은 식량과 곡물을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이처럼 낮은 자급률로 인해 한국의 식량안보 수준은 OECD 주요 국가 중 최하위권에 해당하며, 유

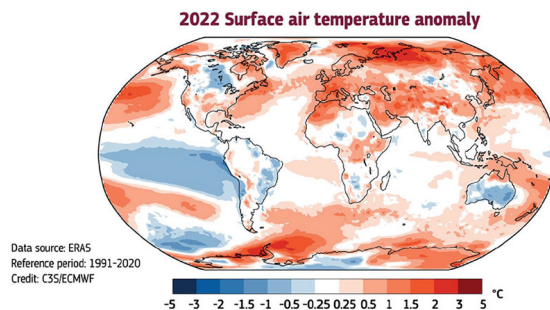


그림 1. 2022년 전 지구 기온 평년 (1991~2020) 편차 분포 (코페르니쿠스 기후변화서비스 (C3S), 2023)

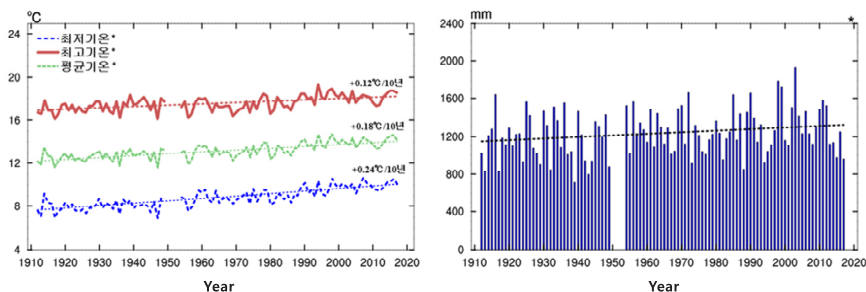


그림 2. 한반도 연평균기온 및 연강수량의 변화 (국립기상과학원, 2018)

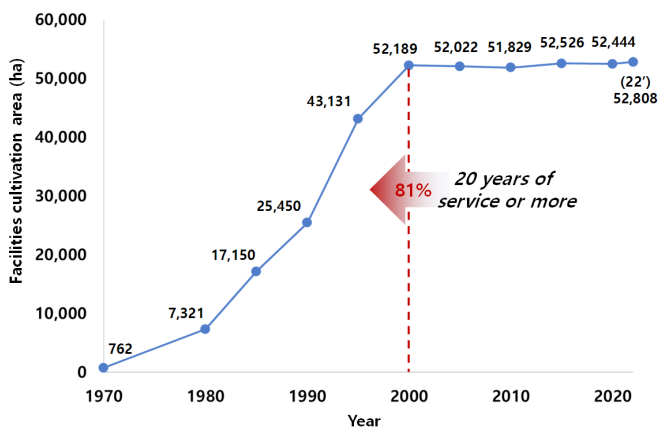


그림 3. 국내 시설재배 면적 변화 (농림축산식품부, 2023)

사 위기 상황 시 심각한 식량안보 위기가 발생할 가능성이 있다고 분석된다 (FAO, 2024). 이러한 상황 속에서 생산성 증대와 식량안보 강화를 위한 시설농업의 확산이 중요해지고 있다.

시설농업은 이상기후와 극한 기상 조건에 효과적으로 대응할 수 있는 방법으로, 사계절이 뚜렷한 국내 기상 조건에서 생산성을 높이는 데 기여하고 있다. 국내 시설재배 면적은 1990년 25,450 ha에서 2022년 52,808 ha로 크게 증가하였으며, 그중 99.2%는 비닐하우스가 차지하고 있다 (농림축산식품부, 2023). 그러나 이러한 농업시설물은 대체로 경량 구조물로서 낮은 안전율로 설계되기 때문에 자연재해에 취약하며, 이로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 지난 20년간 총 9,547억 원의 비닐하우스 피해액과 261,023 ha의 피해 면적이 발생하였으며, 연간 최대 3,399억 원의 피해액을 기록하기도 하였다 (행정안전부, 2024). 더불어, 현재 약 81% 이상의 시설이 사용연수 20년 이상 된 것으로 추정되며, 노후화로 인해 재해에 특히 취약한 시설이 다수 존재하는 실정이다. 이에 따라 비닐하우스 피해 복구를 위해 매년 막대한 정부 지원금과 보험료가 낭비되

고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 농업시설에 특화된 구조설계 방법의 개발과 설계기준의 개선이 시급하다.

3. 건축구조 및 농업시설물의 설계기준

구조물의 설계에 있어 전 세계적으로 허용응력 설계법 (allowable stress design method)과 같은 전통적으로 사용되어 오던 결정론적 방법에서, 한계상태설계법 (limit state design method)과 같이 신뢰성 기반의 확률론적 방법으로 발전하고 있다. 강구조물에 관한 설계의 경우, 국내에서는 1973년 허용응력설계법을 기반으로 한 「강구조계산기준」이 최초 제정되었으며, 1983년 1차 개정 이후 약 20년간 지속해서 사용되어왔다. 2003년에는 미국의 기준을 바탕으로 「허용응력설계법에 의한 강구조설계기준」으로 개정되었으나, 2006년 이후에는 구조 시스템의 하중 특성과 비선형성을 충분히 반영하지 못한다는 한계로 인해 한계상태 설계법 기반의 설계기준으로 대체되었다 (KSSC, 2021). 이후 허용응력설계법은 2019년 「KDS (Korean Design Standard) 14 30: 2019」 (그림

4. (a))에 따라 제한적으로만 적용되어 오고 있다 (국토교통부, 2019). 한편, 미국 AISC (American Institute of Steel Construction)에서 1986년 하중저항계수설계법 (load and resistance factor design method)을 최초 도입한 이후, 1993년 제2 개정과 1999년 제3 개정을 거치고, 허용강도설계법 (ultimate strength design method)과 통합되며 현재까지 지속적인 개정이 이루어지고 있다. 이를 바탕으로 국내에서는 1998년 「한계상태 설계기준」이 처음 제정되었으며 여러 차례 개정이 이루어져 왔다. 2005년에는 「건축구조설계기준」이 신규 제정되었고, 2016년 「건축구조기준 2016」을 거쳐 현재는 2022년 개정된 「건축물 강구조 설계기준 KDS 41 30: 2022」(그림 4. (b))이 활용되고 있다 (국토교통부, 2022). 이처럼 전세계적으로 탄성론을 바탕으로 한 전통적 설계방법에서 신뢰성과 확률론 기반의 설계방법으로 발전해 나가고 있다.

한편, 농업시설물의 자연재해 피해를 경감하기 위해 국내에서는 「원예특작시설 내재해형 규격 설

계도 및 시방서」(농림부 고시 제2007-19호)가 2007년 최초 제정되고, 2007년 2차 개정, 2008년 3차 개정, 2010년 4차 개정, 2013년 5차 개정, 그리고 2014년 6차 개정 (농림축산식품부 고시 제2014-78호)을 통하여 내재해형 비닐하우스 시설 규격 35종 (연동 5종, 단동 19종, 광폭 8종, 과수 3종), 내재해형 간이버섯재배사 규격 2종, 내재해형 인삼재배시설 규격 20종 (철재 5종, 목재 15종), 내재해형 민간전문업체 개발 규격시설 10종 (단동 5종, 연동 2종, 광폭 3종)을 고시하였다. 또한, 기존 표준규격 시설로 농가지도형 단동비닐하우스 13종 (A~K형), 농가보급형 자동화 비닐하우스 1-2W형 5종이 있으며, 「원예·특작 시설 내재해 설계기준 및 내재해형 시설규격 등록 등에 관한 규정」(농림축산식품부, 2019)에 따라 지속적으로 신규 규격이 심의를 거쳐 등록되고 있다. 해당 규격서는 설계도 및 시방서를 포함하며, 내재해 안전설계기준으로 각 규격시설의 적설심과 풍속에 관한 설계강도를 제시하고 있다. 또한, 30년 빈도의 지역별 내재해 적설심 및 풍속 설계



그림 4. 강구조 건축구조기준 및 농업시설물 설계기준

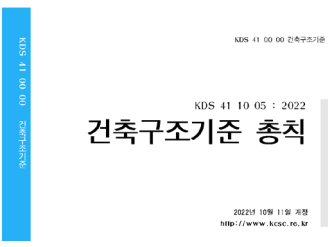

기준을 제시하며 해당 지역별 기준강도 이상인 시설에 한해 내재해형 규격으로 인정하고 있다 (농림축산식품부, 2014). 더불어, 비닐하우스와 온실의 구조 설계기준으로는 1995년 「원예시설의 구조안전기준(안)」이 제정되었고, 1999년 「온실구조설계기준 및 해설」이 발간되었으며, 2015년 「온실구조설계기준(안)」(그림 4. (c))이 발간되어 활용되고 있다 (농촌진흥청, 2015). 허용응력설계법을 바탕으로 한 해당 기준은 발간된 이후 현재까지도 특별한 개정 없이 계속해서 활용되고 있다.

허용응력설계법은 선형탄성이론에 기반하여 구조물에 실제 하중이 작용할 때 발생하는 실응력을 계산하고, 재료에 적절한 안전율 또는 안전계수를 고려한 허용응력 이내로 되도록 설계하는 방법이다. 이 설계법은 탄성설계법이라고도 불리며, 안전율과 안전계수는 구조물의 파괴, 붕괴, 과도한 변형, 진동, 처짐 등의 위험 요소와 건축시설물의 중요도를 고려해 산정된다. 반면, 한계상태설계법 혹은 하중저항계수설계법은 특정 신뢰도와 하중

의 불확실성을 확률적으로 고려해 결정된 각 하중에 관한 계수로 하중조합을 구성하며, 부재의 설계강도가 소요강도 이상이 되도록 구조 요소를 설계하는 방법이다. 이때 구조물의 항복, 소성힌지의 형성, 골조 또는 부재의 안정성, 인장파괴, 피로파괴 등 안전성과 최대하중 지지력에 관한 강도 한계상태와, 구조물의 외형, 유지 및 관리, 내구성, 사용자의 안락감 등을 유지하기 위한 구조물의 능력에 미치는 사용한계상태로 구분하여 각 한계상태에 관한 설계를 진행한다 (KSSC, 2021).

현재 운용되고 있는 건축구조기준은 고정하중, 활하중, 풍하중, 적설하중, 지진하중, 횡압력 등의 설계하중과 이들의 하중저항계수를 고려한 하중조합을 바탕으로 한계상태설계법이 적용되고 있다 (표 1). 하중 재현기간으로는 대상 건축물의 중요도에 따라 100년 혹은 200년 빈도 등이 적용된다. 풍하중 산정을 위해서는 건축물을 밀폐형, 부분개방형, 개방형 등으로 구분하고 그 특성에 따른 풍압 작용 형태를 고려하며, 적설하중 산

표 1. 건축물 및 온실의 구조 설계기준 비교

설계기준	KDS 41 건축구조기준 (2022)	온실 구조설계기준(안) (2015)
설계기준서		
설계하중	고정하중, 활하중, 풍하중, 적설하중, 지진하중, 횡압력, 온도하중, 유체압, 강우하중 등	고정하중, 설비하중, 작물하중, 풍하중, 적설하중 등
설계법	한계상태설계법 (하중저항계수법)	허용응력설계법
하중 재현기간	~100년, 200년 등	30년, 45년, 60년 등
안전설계강도	-	안전풍속 (m/s), 안전적설심 (cm)
풍하중 설계 구조 종류	밀폐형, 부분개방형, 개방형 등	밀폐형
적설하중 설계 고려사항	설계적설심, 노출계수, 지붕경사도계수, 중요도계수 등	설계적설심, 노출계수, 지붕경사도계수

정을 위해서는 설계적설심, 노출계수, 지붕경사도 계수, 중요도계수 등을 고려하고 있다. 「온실 구조설계기준(안)」의 경우에는 설계하중으로 고정 하중, 풍하중, 적설하중이 주요한 하중으로 산정되며, 온실 특성에 따라 설비하중 및 작물하중을 일부 적용한다 (표 1). 또한 설계하중에 관한 단순 하중조합과 일정한 안전율을 바탕으로 한 허용 응력설계법을 적용하고 있다. 하중 재현기간으로는 온실의 특성과 규모에 따라 30, 45, 60년 등의 빈도가 적용되고 있다. 특히 일반 건축구조기준과 달리 시설규격의 보급을 위해 해당 규격이 버틸 수 있는 최대 강도를 나타내는 안전풍속과 안전적설심에 관한 설계강도를 제시하고 있다. 풍하중 산정을 위해서는 기본적으로 밀폐형의 구조 특성을 고려하며, 적설하중을 위해서는 설계적설심, 노출계수, 지붕경사도계수 등을 고려하고 있다.

이처럼 농업시설에 대해서는 여전히 고전적인 결정론적 방법이 적용되고 있어 그 합리성과 타당성에 관한 의문이 지속적으로 제기되고 있다. 또한, 최근 스마트팜에서와 같이 농업시설물이 대형화되고 있으며, 기존 농업시설의 노후화가 지속됨에 따라 설계변수의 불확실성을 고려할 필요성이 커지고 있다. 이러한 시설구조뿐만 아니라 현대의 농업 시스템은 보다 복잡한 형태로 발전해 가고 있어 구성 요소들에 관한 합리적인 설계와 유지관리가 필요하다. 한편, 비닐하우스의 구조해석을 위한 모델링에 있어 서까래 파이프를 지반에 매립하고 줄기초를 이용해 연결하기에, 경계조건 설정에 있어 여전히 많은 의문점이 제기되고 있다. 지반에 매립된 파이프는 완전한 고정이나 핀 지지의 경계조건이 아니라, 특정 범위 내에서는 변위와 회전에 저항하지만, 극한하중이 가해질 경우 주변 환경에 따라 경계조건이 변할 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라, 현재 「온실 구조설계기준(안)」의 적

설하중과 풍하중에 관한 산정 방법에는 지속적인 개정이 이루어져야 할 필요가 있다. 특히 기후변화로 인해 극한 기상 하중의 빈도와 강도가 증가하고 있기에, 이러한 기후변화 불확실성을 반영한 신뢰성 기반의 설계 방법이 도입되어야 한다.

4. 농업시설물의 신뢰성 평가 및 설계

신뢰성은 현대 공학과 기술 분야에서 중요한 요소로 주목받고 있으며, 이는 분석, 설계, 유지보수 과정에서 합리적인 의사결정을 지원하는 역할을 한다. 신뢰성 해석은 이러한 신뢰성 기반 설계를 위한 이론적 기초를 제공하며, 다양한 설계 변수의 확률적 불확실성을 반영하여 시스템의 파괴 확률을 평가하는 방식으로 진행된다. 특히 농업 시스템의 경우, 다양한 기상 조건과 극한 환경에 노출되는 등 높은 수준의 불확실성을 포함하고 있기에 이에 대응하고 합리성을 확보하기 위한 신뢰성 기반의 설계가 필요하다. 신뢰성 해석에서는 하중과 저항을 설계 확률변수로 모델링하고, 이들 간의 관계를 바탕으로 대상 시스템의 한계상태를 정의하며, 수학적 또는 수치적 접근을 통해 파괴확률을 산정한다. 신뢰성 해석을 통한 파괴확률은 식 (1)과 같이 적분의 형태로 나타낼 수 있으며, 산정된 파괴확률과 표준정규분포를 바탕으로 신뢰성 지수를 식 (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$P_f = \int_{g(\mathbf{X}) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (1)$$

$$\beta = \phi^{-1}(1 - P_f) \quad (2)$$

여기서, P_f 는 파괴확률, $g(\mathbf{X})$ 는 한계상태함수, $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ 는 n 개의 확률변수에 관한 결합 확률밀도함수, β 는 신뢰성 지수, $\phi(\cdot)$ 는 표준 정규 누적분포

함수이다. 그러나 차원과 대상 시스템의 복잡성이 증가함에 따라 구체적인 한계상태함수 $g(\mathbf{X})$ 를 정의하고 식 (1)의 적분에 관한 닫힌 해를 직접 찾는 것은 매우 곤란하다 (Melchers and Beck, 2018; Zhou et al., 2019). 이에 본 고에서는 유한요소법 기반의 비선형 극한 해석을 통해 대상 시스템의 한계상태를 탐색하고, 이를 바탕으로 신뢰성 해석을 수행할 수 있는 프레임워크를 적용하였다 (그림 5). 해당 방법론에서는 시스템의 저항에 해당하는 임계하중계수와, 실제 작용되는 하중에 해당하는 외부하중계수를 통해 한계상태함수를 구성하며, 각각은 설계 확률변수로서 저항과 하중에 관한 불확실성을 반영하게 된다. 또한, 극한 해석을 통하여 구조 시스템이 저항할 수 있는 한계인 임계하중계수를 산정하고, 이를 바탕으로 샘플링 시뮬레이션을 통한 파괴확률을 산정한다 (이상익, 최원, 2024).

신뢰성 해석 프레임워크를 활용하여 내재해형 규격 시설 비닐하우스 10-단동-1형에 관한 신뢰성 지수를 산정한 결과는 표 2와 같다. 외부하중으로는 설계강도로 고시된 안전적설심 및 안전풍속을 적용하였으며, 해당 기준에 따른 규격시설의 신뢰성 지수 해석 결과는 각각 1.951, 1.933으로 나타났다. 동일 규격에 대해서도 적설하중과 풍하중에 대해 상이한 신뢰도가 나타났으며, 특히 불확실성을 더욱 크게 내포하고 있는 풍하중에 대해 더 낮은 신뢰도 수준이 분석되었다. 한편, 동일한 도면 치수이지만 내재해형 조리개와 KS규격 부재

가 사용되지 않는 비규격 시설의 경우, 안전적설심 및 안전풍속 기준에 대해 각각 1.725, 1.619의 저하된 신뢰도가 나타났다. 이때 비규격에 따른 신뢰도의 저하된 정도는 적설하중에서보다 풍하중에서 크게 나타났다. 이처럼 신뢰성 해석 결과, 기존 허용응력설계법을 통해 동일한 안전율로 설계되었을지라도, 하중과 부재의 불확실성에 따라 그 신뢰도 수준이 상이하다는 것이 분석되었으며, 규격시설 대비 비규격 시설의 저하된 신뢰도 수준의 정도를 정량적으로 평가할 수 있었다.

한계상태설계와 신뢰성 기반 설계에서 신뢰도 수준의 설정 문제는 여전히 논의 중이다. 미국 건축구조기준은 예상되는 인명 피해와 지역사회에 대한 위험 수준에 따라 구조물의 중요도 및 위험 범주를 I ~ IV단계로 구분하고, 각 단계에 대해 2.50, 3.00, 3.25, 3.50의 신뢰성 지수를 제안하고 있다 (ASCE, 2010). 유로코드에서는 사회기반시설에 대해 한계상태의 종류 (사용성, 피로, 극한 한계상태)에 따라 각각 1.50, 1.50~3.80, 3.80의 신뢰도 수준을 제시한다 (CEN, 2005). 국내에서는 적정 신뢰도 수준에 관한 논의가 아직 미흡한 실정이며, 미국의 기준을 참고해 건축구조기준에 하중저항계수로서 일부 적용되고 있지만, 여전히 완전한 의미의 신뢰성 기반 설계가 이루어지지 못하고 있다. 특히 농업시설물의 경우, 상대적으로 예상되는 인명 피해가 적고, 구조물의 중요도가 낮기 때문에, 단순히 내구성을 강화하기보다는 비용 효율적이고 합리적인 설계기준을 마련

< Limit state function >	
$g(\mathbf{X}) = \lambda_{cri} - \lambda_{ext} = FEMNL(\mathbf{X}_R) - \frac{L_{ext}}{L_{ref}}$	λ_{cri} : Critical load factor λ_{ext} : External load factor L_{ext} : External load condition L_{ref} : Reference load condition \mathbf{X}_R : Random variables related to resistance \mathbf{X}_Q : Random variables related to load $FEMNL(\cdot)$: FEM-based nonlinear limit analysis function
$L_{ext} = \mathbf{X}_Q$	
$L_{ref} = \mu_{L_{ext}}$	

그림 5. 비선형 극한 해석을 통한 신뢰성 해석 프레임워크

표 2. 10-단동-1형 내재해 규격 및 비규격 비닐하우스의 신뢰성 해석 결과

Standard type	Snow load (Design snow depth of 41 cm)		Wind load (Design wind speed of 32 m/s)	
	Failure probability	Reliability index (β)	Failure probability	Reliability index (β)
Disaster-resistance standard	2.554×10^{-2}	1.951	2.655×10^{-2}	1.933
Non-standard	4.223×10^{-2}	1.725	5.278×10^{-2}	1.619

하는 것이 중요하다. 따라서 농업시설의 중요성과 경제성을 반영하여 합리적인 신뢰도 수준을 설정하고, 이를 기반으로 한 구조설계를 통해 효율성을 극대화할 필요가 있다. 또한, 기후변화로 인한 극한 기상 조건을 반영한 구조적 개선과 체계적인 위험 관리 방안 마련은 장기적으로 자연재해 피해를 최소화하고 안정적인 농식품 공급을 확보하는데 중요한 역할을 할 것이다.

5. 결론

기후변화로 인한 이상기후와 기상 조건의 불확실성은 점차 심화되고 있다. 또한, 농업시설물은 매년 빈번하게 피해가 발생하는 구조물임에도 불구하고, 그 중요도와 예상되는 인명 피해가 비교적 적다는 이유로 설계기준의 중요성이 간과되고 있다. 현재 농업시설물에 적용되고 있는 설계법은 전통적인 결정론적 방법을 기반으로 하고 있으나, 기후변화에 따라 미래 자연재해의 불확실성이 더욱 증가하기에 이를 합리적으로 반영할 수 있는 확률론적 기술 개발이 시급하다. 뿐만 아니라, 기존의 사후 복구 중심 패러다임을 탈피하여 시설물의 피해를 예방할 수 있는 시스템으로의 전환이 필요한 시점이다. 본 고에서는 농업시설물의 신뢰도 수준을 평가할 수 있는 방법론을 활용하여 규격 및 비규격 시설에 관한 신뢰성 지수를 평가하였다. 온실의 적절한 유지보수와 설계의 타당성을 확보하기 위해 적절한 신뢰도 수준을 보장하는 표준 모델 개발은 필수적이며, 본 연구에서 도출된

신뢰성 수준과 방법론을 활용하여 보다 합리적 설계기준으로 개선할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 농업시설물의 설치 지역에 따라 발생하는 적설심와 풍속이 상이하기 때문에, 이에 따라 파괴 확률과 신뢰성 지수는 크게 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서의 방법론을 활용하여 파괴확률 변화에 따른 예상 피해 비용을 정량적으로 평가하고, 이는 농업시설의 재해 보험료 산정 시 합리적인 의사결정 자료로 활용될 수 있을 것이다. 아울러, 극한 기상 조건에서도 미래 식량 공급의 안정화를 위해 다양한 기후변화 시나리오를 반영한 농업시설물의 설계 기술이 개발되어야 하며, 농업생산자, 협동조합, 공공기관, 보험사 등 수요처의 요구사항과 수용성을 함께 고려한 합리적 설계기준이 마련되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 관계부처합동, 2023. 2022년 이상기후 보고서. 발간등록번호: 11-1360000-001109-10.
2. 국립기상과학원, 2018. 한반도 100년의 기후변화. 발간등록번호: 11-1360620-000132-01.
3. 국토교통부, 2019. 강구조 설계 일반사항 (허용응력설계법). KDS 14 30 05: 2019.
4. 국토교통부, 2022. 건축물 강구조 설계기준. KDS 41 30 10: 2022.
5. 농림축산식품부, 2014. 원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서. 농림축산식품부 고시 제 2014-78호.

6. 농림축산식품부, 2019. 원예·특작시설 내재해 설계기준 및 내재해형 시설규격 등록 등에 관한 규정. 농림축산식품부 고시 제2019-44호.
7. 농림축산식품부, 2023. 2022 시설채소 온실 현황 및 채소류 생산실적. 발간등록번호: 11-1543000-000051-10.
8. 농촌진흥청, 2015. 온실 구조설계기준(안). 발간 등록번호: 11-1390802-001030-01.
9. 이상익, 최원, 2024. 신뢰성 기반 시스템 설계의 실용화를 위한 Active Deep Learning 메타모델 전략. 한국농공학회지, 66(2), 30-38.
10. 행정안전부, 2024. 2022 재해연보(자연재난). 발간등록번호: 11-1741000-000002-11.
11. ASCE (American Society of Civil Engineers), 2010. ASCE/SEI 7-10: Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA.
12. CEN (European Committee for Standardization), 2005. EN 1990:2002/A1:2005: Eurocode: Basis of structural design. Brussels, Belgium.
13. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2024. The state of food security and nutrition in the world, Rome, Italy: FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO.
14. KSSC (Korean Society of Steel Construction), 2021. KSSC-21-02: Steel structure design. Seoul, Korea: Goomibook.
15. Melchers, R. E., and A. T. Beck, 2018. Structural reliability analysis and prediction. John Wiley & Sons.
16. Zhou, T., Y. Peng, and J. Li, 2019. An efficient reliability method combining adaptive global metamodel and probability density evolution method. Mechanical Systems and Signal Processing, 131, 592-616.