

해외 교량의 기후변화 영향

- 세계도로협회(PIARC) 교량분과위원회 자료를 기반으로 -

최현호 | 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원

길흥배 | 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구위원

1. 서론

기후변화에 의한 고온, 집중호우, 태풍 등에 의한 피해가 대형화되고 있으며, 우리의 일상생활뿐만 아니라 도로 인프라에도 큰 위험요인으로 작용하고 있다. 도로교통 전문가들의 국제기구인 세계도로협회(PIARC)에서는 기후변화가 도로교통에 미치는 영향과 피해사례 및 대응방안들을 수집·공유하기 위해 2008년부터 다양한 조사와 연구를 하고 있다. 2014년에는 도로 인프라를 위한 기후변화 적응체계(PIARC Climate Change Adaptation Framework)를 발간하였다. 2020년부터 시작된 이번 회기(2020년~2023년)에서도 기후변화는 도로 네트워크의 주요한 위험요인으로 선정되었으며, 도로 네트워크의 기후변화와 회복탄력성(Resilience)에 대한 조사 연구를 위해 기술위원회(Technical Committee, TC)가 별도로 운영되고 있다. 특히, 교량위원회(TC 4.2 Road Bridges)에서는 기후변화 워킹 그룹을 구성하고 기후변화가 교량에 미치는 영향을 파악하기 위한 문헌조사, 피해 및 적응성 향상 사례 등을 조사하였다. 최근에 교량기술위원

회는 “Measuring for Increasing the Adaptability of Road Bridges to Climate Change”기술보고서 발간을 위해 회원국의 기후변화 현황, 교량 피해 현황, 기후변화 대응 정책 등에 대해 설문 조사를 수행하였다. 본 기사에서는 설문 조사의 응답 결과를 중심으로 기후변화가 세계 각국의 교량에 미치는 영향 및 대응 동향 등을 소개하고자 한다.

2. 기후변화 영향 설문조사

TC 4.2 교량위원회에는 총 79여명의 위원이 소속되어 있다. 위원들 대상으로 교량의 기후변화 영향 관련 설문지를 배포하여 총 14개국에서 15개 설문조사 답변 및 총 11개국 19개 사례(Case Study)를 수집 할 수 있었다. 설문에 대한 응답은 주로 유럽 국가들을 중심으로 제출되었지만 아프리카, 아시아, 북미 및 남미에서도 의미있는 설문결과가 도출되었다. 제한된 숫자의 응답이지만, 세계 각국의 기후변화 동향과 영향, 대응방안 등을 파악할 수 있는 자료로 판단된다.

주요 설문내용으로는 <표 1>에 나타난 바와 같이 각

국가에서 지난 10년간 경험한 기후변화의 종류, 기후변화가 교량에 미치는 영향, 탄소저감을 위한 재생 재료(Recycle material) 적용 사례, 기후변화를 고려한 교량 설계기준 및 지침, 기후변화에 대응하는 연구 현

황 등 총 17개 문항에 대한 설문을 진행하였다. 교량의 안전과 성능에 영향을 미치는 주요한 기후 변화 현상으로는 일간 온도변화, 폭우/홍수, 해수면 상승, 강풍/태풍, 눈/얼음, 화재 등으로 제시되었다.

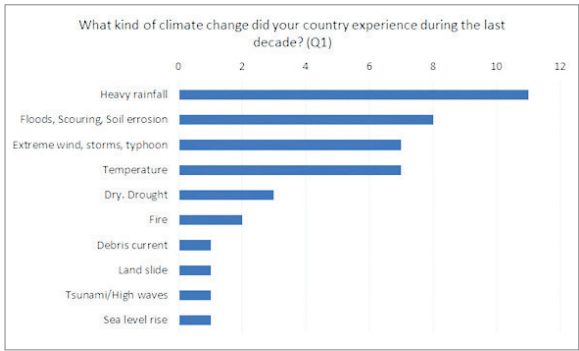
<표 1> 설문지 문항 및 내용

QUESTION 1 _	What kind of climate change did your country experience during the last decade?
QUESTION 2 _	Does your country have concerns about the impact of climate change on your transportation system especially on the bridge stock? (Yes or No)
QUESTION 3 _	Does your country define climate change effects on your transportation system especially on the bridge stock? (Yes or No) If so, how do you define climate change effects on the bridge stock?
QUESTION 4 _	Has your country been impacted by one of the following effects (unexpected intensity and/or frequency): Temperature changes, rainfall, floods, sea level rise, wind/tornados, snow/ice, fire/fire storms, tropical cyclones, others?
QUESTION 5 _	Temperature: Have there been signs of impact on bridges due to extreme temperature differences i.e., day-time to night-time temperature differences exceeding the limits assumed during design?
QUESTION 6 _	Rainfall/floods: Have there been signs of impact on bridges due to the occurrence of unexpected rainfall? Floods? Mudslides? Scour?
QUESTION 7 _	Sea level rise: Have there been signs of impact on bridges due to increasing in the sea level rise? Tidal waves?
QUESTION 8 _	Wind/tornados: Have there been signs of impact on bridges due to the occurrence of severe wind conditions during construction or service in the last decade? Are the frequencies of severe wind events increasing in areas that were less prone to wind?
QUESTION 9 _	Snow/ice: Have there been signs of impact on bridges due to the unexpected occurrence of avalanches? Have there been signs of impact due to increasing de-icing products?
QUESTION 10 _	Fire/Fire storm: Have there been signs of impact on bridges due to the unexpected occurrence of fire? Fire storms?
QUESTION 11 _	Others: Have there been signs of impact on bridges due to effects of climate change other than listed above?
QUESTION 12 _	Do you use recycled materials so as to reduce the carbon footprint (total CO2) of the construction? How do you reduce the carbon footprint (total CO2) in your bridge construction project?
QUESTION 13 _	Has climate change affected the behaviour of bridges in your country? If yes, how and which elements of the bridge construction did they affect? Superstructure? Substructure? Bridge components (e.g., bearings, expansion joints)?
QUESTION 14 _	Are there any government policies in place with regard to climate change?
QUESTION 15 _	Have you specific bridge design codes referring to climate change, if yes: Please provide a copy or a link. When were these implemented? Are there similar regulations for management of the existing bridge stock?
QUESTION 16 _	Are there specific bridge research programs running in your country on the subject of climate change?
QUESTION 17 _	Are there any specific case studies associated with issues on road bridges due to climate change that you can share? If so, please fill out the attached template including the repair/rehabilitation methods and/or inspection/monitoring techniques used to mitigate the effects of climate change. (Please refer to the attached example)

3. 기후변화 대응 설문결과

총 17개 설문 문항에 대한 설문지를 바탕으로 주요 결과를 정리하였다. 우선 해외 기후변화 대응에 관한 해외동향을 살펴보면 <그림 1>과 같다. 각 국가에서 지난 10년간 각국에서 경험한 기후변화의 종류는 어떤 것이 있는지에 대한 설문 결과이다. <그림 1>을 보면 주로 폭우(Heavy rainfall), 홍수 및 세굴(Flood, Scoring and soil erosion), 강풍 및 태풍(Extreme wind, storms and Typhoon), 온도 변화(Temperature) 등이 주된 기후 변화가 초래한 기상 현상임을 알 수 있다. 특히 폭우 관련 응답으로는 헝가리(상당한, 예상치 못한 호우), 일본(단기간의 집중 호우 발생 빈도 증가), 네덜란드(국부적인 호우), 노르웨이(국부적인 호우 증가) 등과 같은 국부적이고 집중적인 호우가 기후변화와 연결되어있는 것으로 조사되었다.

<그림 1> 지난 10년간 각 국에서 경험한 기후변화의 종류



기후변화가 도로교통시스템 및 교량에 직접적으로 미치는 영향과 기후변화의 정의에 대한 설문 조사도 수행되었다. 설문에 응한 15개 국가 중 11개 국가에서 기후변화가 도로교통시스템 및 교량에 직접적으로 영향을 미치는 것에 대한 우려를 하고 있다고 응답하였다. 특히 중국 베이징에서는 기후변화로 인한 홍수로 인해 매년 천여 개의 교량이 붕괴되고 있다고 조사되었으

며, 따라서 중국 베이징에서는 사전경고시스템, 네트워크 기반의 모니터링 시스템이 필요하다고 응답하였다. 또한 기후변화로 인해 북쪽 지방에서의 제설, 해안가 지역 염해로 인한 콘크리트 교량 피해로 대규모 보수가 불가피하다고 응답하였다. 유럽의 경우에는 벨기에, 헝가리, 독일, 네덜란드, 노르웨이에서는 기후변화 영향에 대해 크게 우려하고 있는 것으로 대답하였다. 각국에서 제출한 결과는 <표 2>에 요약 정리되어 있다.

교량 관점에서 기후변화 영향에 대한 정의는 일부 국가에서만 갖고 있는 것으로 조사되었다. 또한 <표 2>에 있는 것과 같이 각국의 지리적인 위치와 기후 차이에 의해 기후변화가 교량에 미치는 영향에 대한 정의도 약간의 차이를 갖고 있었다. 온도변화, 홍수 및 폭우는 대부분의 국가에서 기후변화 영향으로 정의하고 있지만, 해수면 상승, 눈/얼음, 강풍 등은 일부 국가에서만 고려하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 설문에 응한 다수의 국가에서 교량의 직접적인 손상은 주로 폭우나 홍수에 의한 침식, 세굴, 파괴 등인 것으로 보고하였다. 온도 변화나 온도 차이에 의한 교량 손상은 노후화된 교량의 신축이음장치에서 주로 발생하는 것으로 일부 국가에서 응답하였다.

도로나 교량 건설에 있어 탄소 저감을 위한 재생 재료 이용에 대한 설문 조사도 수행되었다. 오스트리아, 중국, 헝가리, 슬로베니아에서는 탄소 저감을 위해 재생 골재를 포장 재료로 활용하고 있는 것으로 조사되었지만, 오스트리아, 독일, 헝가리에서 재생 재료를 교량에는 거의 사용하지 않는다고 응답하였다. 일부 콘크리트 구조물에 석면 등이 포함되어 있거나 강재의 도장이 오염되어있어 재생골재로 활용하기 어려운 경우도 있는 것으로 지적되었다. 또한 일부 국가에서는 재생 재료를 사용하도록 정책적 장려하고 있다고 응답하였다. 특히 오스트리아에서는 건설현장으로

<표 2> 기후변화가 교량에 직접적으로 미치는 영향

	온도 변화	폭우	홍수	해수면 상승	강풍	눈/얼음	화재/화재 폭풍	태풍
오스트리아		○	○					
벨기에	○	○	○				○	
칠레	○	○	○					
중국 베이징	○	○	○	○	○	○	○	○
중국 우한		○			○			
헝가리		○	○					
프랑스	○	○	○	○	○	○	○	○
독일	○	○	○					
일본	○	○	○	○	○			○
네덜란드	○	○	○	○				
니제르	○	○	○					
노르웨이	○	○	○	○	○			
포르투갈			○				○	
슬로베니아			○					
미국(유타주)	○	○	○	○	○	○	○	○
Total	10	13	14	6	6	3	5	4

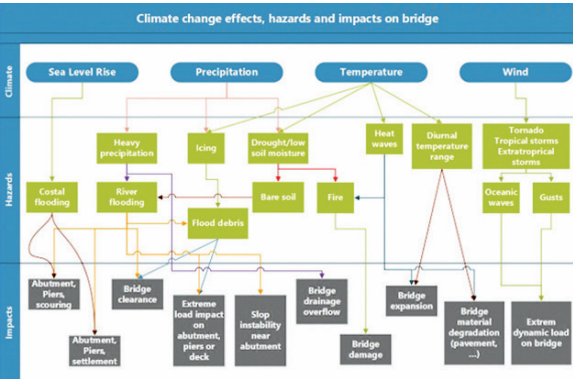
의 이동을 포함하여 아스팔트 생산, 철근 생산의 공정에서 온실가스 국제기준을 맞추도록 강제하고 있다고 응답하였다. 네덜란드에서는“Making Concrete More Sustainable”라는 방침을 통해 폐콘크리트를 파쇄하고, 신규 콘크리트 생산에 활용될 수 있게 처리하도록 규제하고 있다고 응답하였다. 포르투갈 또한 모든 공공건설 프로젝트 수행시 최소한 10% 이상을 재사용하거나 재생골재를 이용하도록 규정하고 있다고 응답하였다.

기후변화의 설계기준 반영 여부 조사 결과, 아직까지는 기후변화 영향을 설계기준에 직접적으로 반영한 국가는 없는 것으로 조사되었다. 헝가리, 네덜란드 및 독일에서는 새로운 교량 설계기준에 기후변화를 포함할 예정인 것으로 응답하였다. 또한 많은 국가에서 기후변화가 교량에 미치는 영향에 대한 관련 연구를 진행하고 있어, 향후 설계기준에 반영될 것으로 판단된다. 일본에서는 기후변화에 따른 세굴을 고려한 교량 점검

매뉴얼을 준비 중이며, 포르투갈에서는 교량관리시스템(BMS)에 수중 점검 결과를 포함한 것으로 응답 하였다.

이와 같은 설문조사와 문헌조사를 통해 보고서에서는 교량에 영향을 미치는 주요 이상기후 현상, 재난 유형 및 영향 사이의 인과관계를 <그림 2>와 같이 제시하였다.

<그림 2> 기후변화 현상과 교량 영향 관계도



4. 기후변화 피해 사례 및 원인

기후변화에 의한 구체적인 교량 파손 사례를 수집 및 공유하기 위한 설문 조사도 수행되었다. 전체적인 발생 현황 및 원인과 함께 이상기후 현상, 위험 요인, 교량 피해 현황, 복구 방법 등을 조사한 결과, <표 3>에

있는 것과 같이 총 19개 파손 사례가 수집되었다. 대표적인 사례는 <그림 3> 및 <그림 4>에 있는 벨기에와 독일의 교량으로 강우에 의해 발생한 것으로 보고되었다. 벨기에의 교량은 0.5~1.3m 정도 수평으로 이동하여 원위치로 복원되었지만, 독일의 교량은 손상이 심각하여 개축되었다.

<그림 3> 교량 피해 사례 (벨기에(1) 교량)



<그림 4> 교량 피해 사례 (독일 교량)



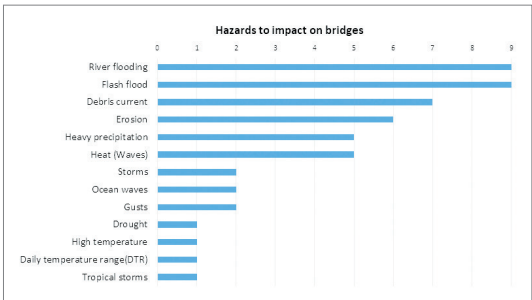
<표 3> 기후변화로 인한 교량 손상 사례

국가	발생 현황	이상기후	위험 요인	교량 영향
벨기에(1)	홍수에 의해 교각 수평 이동(0.5~1.3m)	강우	강 범람, 돌발 홍수, 토석류	세굴, 극한 충격하중
벨기에(2)	아치교의 중앙 교각 부분 붕괴	강우	강 범람, 돌발 홍수, 토석류	세굴, 극한 충격하중
칠레	충적토에 의해 교량 이동	강우	강 범람, 돌발 홍수, 토석류	세굴, 극한 충격하중
중국	폭우에 의해 사면 불안정 및 교각 수평 이동	강우	폭우	사면 안정성
프랑스(1)	조위(tidal level)에 의해 파형강판 암거 부식	강우, 폭염	폭우, 가뭄, 폭염	재료 열화
프랑스(2)	폭풍에 의한 홍수로 교각 침하(1m)	강우	강 범람, 돌발 홍수, 침식, 토석류	침하, 세굴, 극한 충격하중
프랑스(3)	고교각 전체에 수직 균열 발생	폭염	고온, 폭염	온도 경사
프랑스(4)	해수면 상승 및 높은 파도 대비 기초 보호공	해수면 상승	폭풍, 파도	세굴, 극한 충격하중, 동적하중
독일	홍수로 인한 교각 침식 및 교량 손상	강우	강 범람, 돌발 홍수, 침식, 토석류	침하, 세굴, 극한 충격하중
일본(1)	교각 기초 세굴	강우	강 범람, 돌발 홍수, 침식, 토석류	세굴
일본(2)	태풍에 의해 선박 교량 충돌	바람	태풍, 돌풍, 파도	선박 충격하중

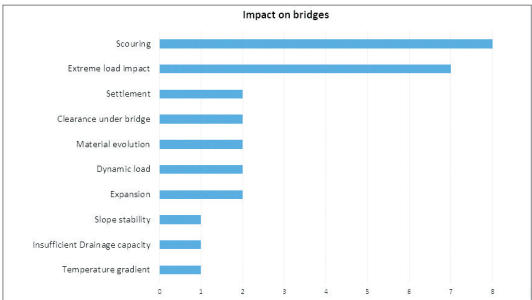
국가	발생 현황	이상기후	위험 요인	교량 영향
네덜란드(1)	홍수위 확보를 위한 교량 승상	강우, 폭염	폭우, 강 범람, 돌발 홍수, 토석류, 침식	여유고 부족
네덜란드(2)	열 팽창과 예상치 못한 침하	온도	폭염	교량 변형 및 팽창
니제르	교량 하부 토사 적토	강우	폭우, 강 범람, 돌발 홍수, 침식	여유고 부족
노르웨이	침식 방지 토석 소실	강우	강 범람, 돌발 홍수, 토석류, 침식	세굴
포르투갈(1)	사장 케이블 풍우 진동	강풍	폭풍, 돌풍	동적 하중
포르투갈(2)	극단적인 온도 차이의 교량 영향	폭염	폭염	교량 팽창
포르투갈(3)	폭우 및 배수량 증가	강우	폭우	배수용량 부족
스위스	교면포장 및 방수재 변형	폭염	폭염, 일교차	재료 열화

대부분의 교량 손상은 여러 위험요인(Hazard)이 동시에 작용하여 발생한 것으로 조사되었으며, 위험 요인에 대한 분석 결과는 <그림5>와 같다. 강 범람(River flooding)과 돌발 홍수(Flash flood)가 가장 빈번한 위험 요인(각 9건)으로 나타났다. 토석류(Debris current), 침식, 폭우 및 폭염도 교량에 파손을 초래한 주요 위험요인으로 분석되었다.

<그림 5> 교량에 영향을 미치는 기후변화 위험요인



<그림 6> 기후변화에 의한 교량 손상



5. 맺음말

기후변화에 의한 폭우, 홍수, 태풍, 폭염 등의 이상기후 현상 발생 빈도가 증가하고 있으며, 인명피해와 더불어 교량과 같은 사회 기반시설물의 손상이나 파손을 초래하고 있다. 기후변화가 교량에 미치는 영향과 기후변화에 대비한 회복탄력성 향상 대책을 파악하기 위한 설문조사와 피해사례 조사가 PIARC의 교량 기술위원회(TC)에 의해 수행되었다. 설문문에 응답한 대부분의

국가에서 강우, 온도변화, 바람, 해수면 상승 등의 이상기후 현상이 발생하는 것으로 조사되었다. 이들 이상기후에 의한 홍수, 세굴이 교량에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 각국의 기후변화 대응전략 및 사례를 바탕으로 향후 우리나라 교량의 기후변화 대응 피해점검 및 유지관리와 관련된 기술 개발, 예산 투자, 및 정책 방향 등을 수립하는데 있어 본 기고가 기초자료로 활용될 수 있기를 기대한다.