

극저온 물성을 고려한 콘크리트 구조물의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Concrete Structure at Extremely Low Temperature

곽효경¹⁾ 송종영²⁾ 이병국³⁾ 이광모⁴⁾
Kwak, Hyo-Gyoung Song, Jong-Young Lee, Byung-Kook, Lee, Kwang-Mo

ABSTRACT

A brief review of previous studies on the behaviour of concrete at extremely low temperature is presented in this paper. In addition, to describe temperature dependent behaviour of concrete, simple piecewise linear stress-strain relation is introduced. The proposed curve shows good agreement with experimental stress-strain curves at various temperature conditions. Moreover, numerical analyses for two PC beams are conducted to verify the influence of extremely low temperature to the structural behaviour.

1. 서론

현재 천연가스는 세계경제의 상승세, 에너지 시장에서의 경쟁력 확보, 국제교역량 증가 등에 따라 에너지 소비 증가세를 주도하고 있다. 뿐만 아니라 천연가스는 석유에 비하여 매장량이 풍부하고 환경 친화적이며, 발전시 열효율이 높은 장점을 가지고 있다. 천연가스는 지리적, 물리적인 특성으로 인하여 수송 형태별로 장거리 파이프 라인을 통한 PNG(pipeline natural gas)와 해상수송에 주로 의존하는 LNG(liquid natural gas)로 구분할 수 있다. PNG와 LNG의 경제성을 비교하여 보면 일반적으로 1000~2000 마일 이상에서는 LNG가 보다 경제적인 것으로 간주되고 있다. 우리나라의 천연가스 도입 및 공급과정은 원산지에서 뽑아 올린 천연가스를 수송 및 저장 등을 위하여 -162℃로 냉각하여 그 부피를 1/600로 줄여 해상 수송을 거친 뒤에 국내 주요기점에 설치된 인수기지를 통하여 도시가스 및 발전용 연료로 공급하는 LNG 수송이다.

최근 우리나라의 경우, 이러한 LNG의 점진적인 수요 증가로 인하여 LNG 인수기지의 건설이 증가하고 있다. 이러한 LNG 인수 기지는 극저온의 LNG로 인한 구조 재료 거동 특성 등으로 인하여 해석, 설계에 많은 어려움이 존재하게 된다. 따라서 깨끗하고 안전한 에너지로 인식되는 LNG의 장기적인 안정적 공급을 위해서는 LNG 교역을 위한 저장 탱크의 구조적인 안전성을 확보하는 것이 무엇보다 중요한 일이다. 일반적으로 LNG 저장 탱크는 그림 1에서 보는 바와 같이 크

-
- 1) 한국과학기술원 토목공학과 부교수
 - 2) 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
 - 3) 한국과학기술원 토목공학과 석사과정
 - 4) 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

계 지붕층, 벽체와 바닥 슬래브, 슬러리 월, 그리고 히터로 구성된다. 탱크 내부의 극저온 LNG와 는 스텐레스 스틸 멤브레인(SUS 304)이 직접 접촉하게 되며, 폴리우레탄 폼(PUF)으로 구성된 단 열층 외부에 콘크리트 벽체가 위치하게 된다. 본 연구에서는 온도 의존적인 콘크리트 재료 물성의 일반적인 거동 특성을 살펴본 뒤에 이를 바탕으로 콘크리트의 온도 의존적인 응력-변형률 관계를 제시하였다. 나아가 제안된 응력-변형률 관계를 극저온 상태의 PC 보 부재에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 향후 우리 나라에서 천연가스는 우선적으로 1차 에너지원으로 사용됨은 물론 자동차 연료, 연료 전지, 흡수식 냉 온방기, 석유화학의 기초 원료 및 기타 화공약품의 원료 등으로 사용될 것이며, LNG의 냉열을 이용하여 저온 분쇄기술, 냉열 발전 등 다양한 분야에 폭넓게 활용될 것으로 전망되며 본 연구에서 제안된 응력-변형률 관계는 LNG 저장탱크와 같은 극저온하에 사용되는 콘크리트 구조물의 비선형 해석을 수행하는데 도움이 되리라 사료된다.

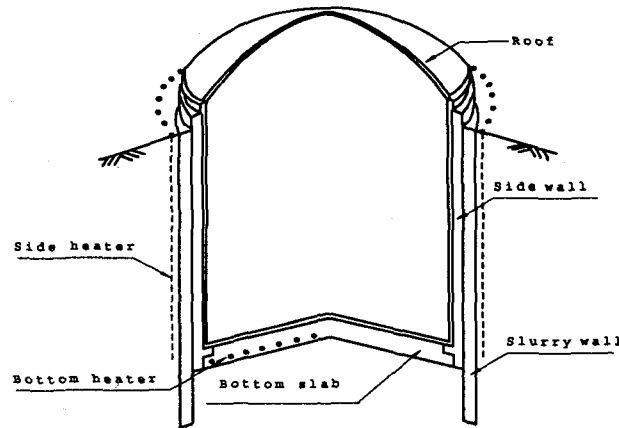


그림 1 LNG 저장 탱크의 구조 개요

2. 극저온하의 콘크리트 거동 특성

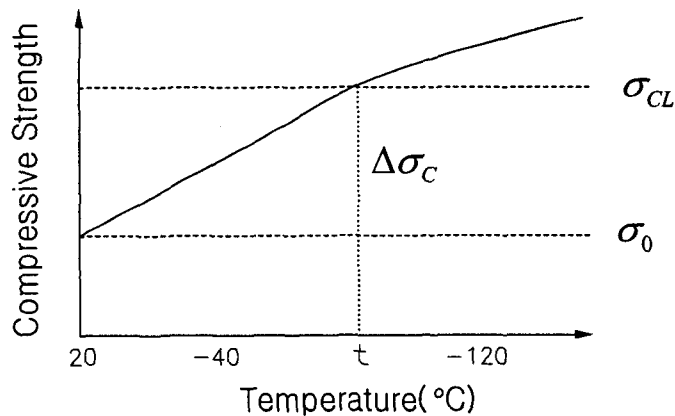


그림 2 콘크리트 압축 강도 증가량과 온도관계

일반적으로 콘크리트의 역학적 물성 가운데에 중요한 압축강도는 온도가 낮아질수록 콘크리트 내의 수분이 상변화를 일으키어 압축 강도의 크기도 증가하게 된다. 즉, 저온 상태에서의 압축 강도값은 다음 식에서 나타나는 바와 같이 상온에서의 압축 강도값에 온도저하에 의한 압축강도 증가량을 더한 값이 된다.

$$\sigma_{CL} = \Delta\sigma_C + \sigma_{CO} \quad (1)$$

여기서, σ_{CL} 은 저온에서의 압축강도값을, $\Delta\sigma_C$ 는 압축강도 증가량을, σ_{CO} 는 상온에서 압축강도값을 각각 의미한다.

Goto 와 Miura 등은 극저온에서 콘크리트의 함수량이 압축 강도 증가량에 미치는 영향을 실험한 결과를 바탕으로 다음과 같은 관계식을 제안하였다[3].

$$\Delta\sigma_c = \left\{ 120 - \frac{1}{270}(T+180)^2 \right\} \cdot w \quad , -120^\circ\text{C 이상인 경우} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_c \leq 107 \cdot w \quad , -120^\circ\text{C 이하인 경우} \quad (3)$$

여기서, $\Delta\sigma_c$ 는 압축강도 증가량, T는 콘크리트의 온도, w는 콘크리트의 함수량을 의미하고, 이를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.

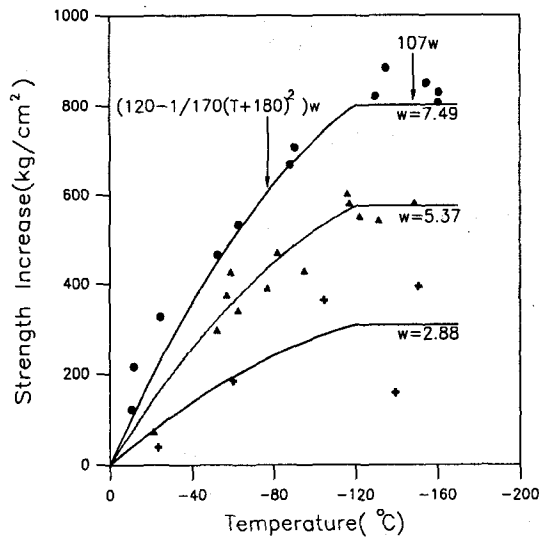


그림 3 온도변화에 따른 압축강도 증가량

여러 가지 경우의 함수량을 갖는 콘크리트 시험체의 온도변화에 따른 압축강도 증가량과 제안된 압축강도 증가식과의 관계는 그림 3과 같다. 또한 상온 상태에서 철근 콘크리트 구조물의 구성요소인 철근과 콘크리트는 선팽창 계수가 거의 같아 온도 변화에 선형적인 거동 특성을 나타내는데 반하여 극저온상태가 되면, 철근은 선형 거동 특성을 나타내는데 비해 콘크리트는 구성요소인

모르타르, 콘크리트, 페이스트, 골재 등이 그림 4에서 보는 바와 같이 각각 다른 거동특성을 보이게 된다. 이와 같이 온도변화에 따라 비선형 비가역적인 거동 특성을 나타내는 원인은 콘크리트, 모르타르, 페이스트 등에 포함된 수분의 거동 특성에 기인한 것이다. 압축강도와 마찬가지로 콘크리트의 인장강도도 온도저하에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 인장강도는 압축강도와 달리 -60°C까지는 증가하다가 그 보다 낮은 온도에서는 증가량이 크지 않는 거동 특성을 나타낸다.

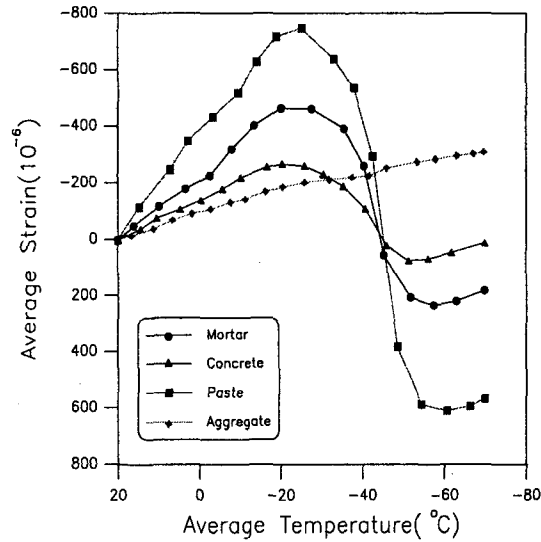


그림 4 온도변화에 따른 구성 요소별 거동 특성

3. 온도 의존적인 콘크리트의 응력-변형률 관계

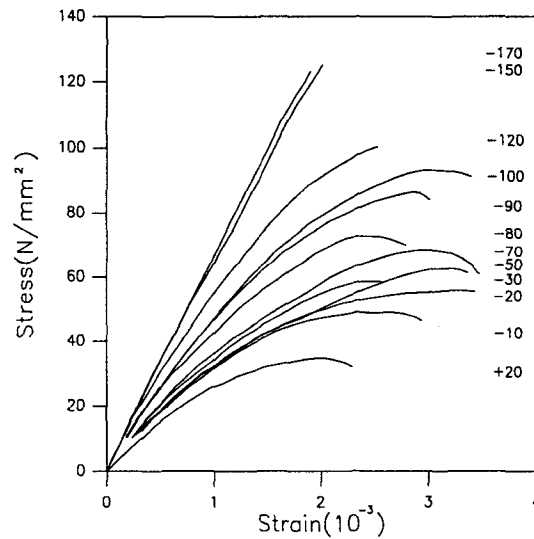


그림 5 온도에 따른 응력-변형률 곡선[6]

그림 5는 Rostasy등이 실험한 극저온에서의 콘크리트 시험체의 응력-변형률 관계를 나타낸다. 위의 실험값을 바탕으로 온도저하에 의한 압축강도 증가량과 Goto/Miura 식을 비교한 결과는 다음 그림과 같다.

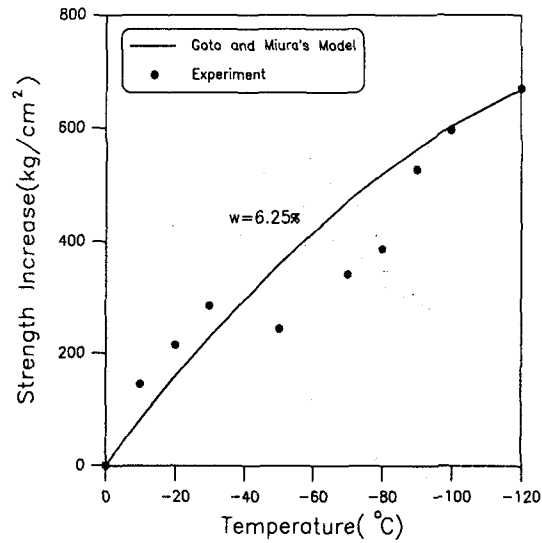


그림 6 콘크리트 압축강도 증가량과 온도 관계

본 연구에서는 Goto/Miura의 압축강도 증가식과 Hognestad의 모델식을 수정하여 다음과 그림과 같은 온도 의존적인 응력-변형률 관계식을 제안하였다.

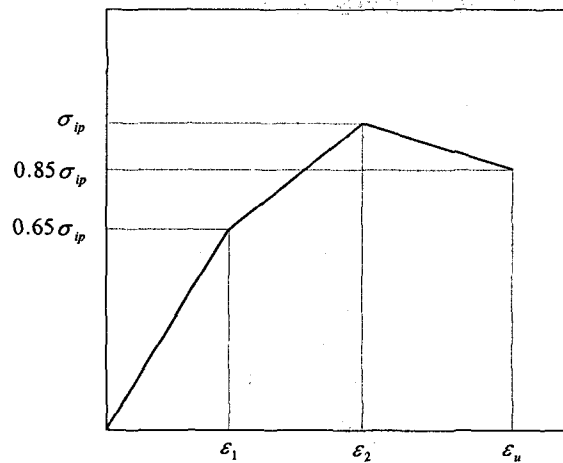


그림 7 제안된 응력-변형률 관계

그림에서 압축강도 σ_{ip} 는 식 (2),(3)에 의하여 ϵ_1, ϵ_2 는 각각 다음 식 (5), (6)에 의하여 산정되며 극한 변형률 ϵ_u 는 0.0035로 가정하였다

$$\epsilon_1 = \frac{0.65 \sigma_{ip}}{15000 \sqrt{\sigma_{ip}}} \quad (4)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 + \frac{\epsilon_u}{3} \quad (5)$$

$$\epsilon_u = 0.0035 \quad (6)$$

제안된 응력-변형률 모델을 적용하여 그림 5의 온도 -30°C , -90°C , -100°C , -120°C 에서 콘크리트 응력-변형률 관계를 비교한 결과는 다음과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 모델이 온도 의존적인 응력-변형률 관계를 효과적으로 모사함을 알 수 있다.

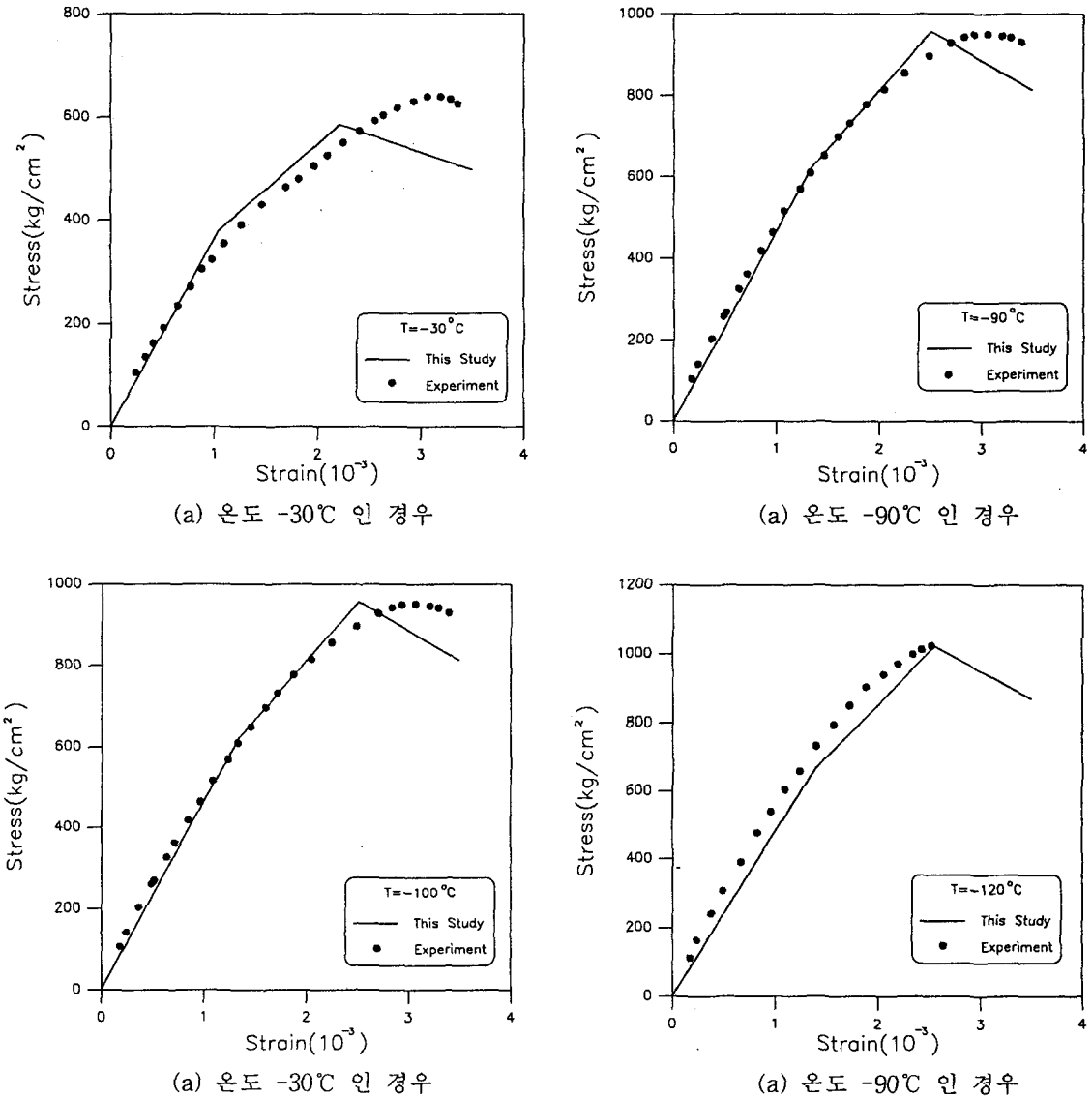


그림 8 제안식과 실험값의 비교

4. 극저온 PC 보 부재의 적용

앞 장에서 제안된 응력-변형률 관계를 이용하여, 다음 그림 9와 같은 형상을 갖는 PC 보 부재에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 구조 해석은 8절점 감절점 요소를 이용하여 수행되었다.

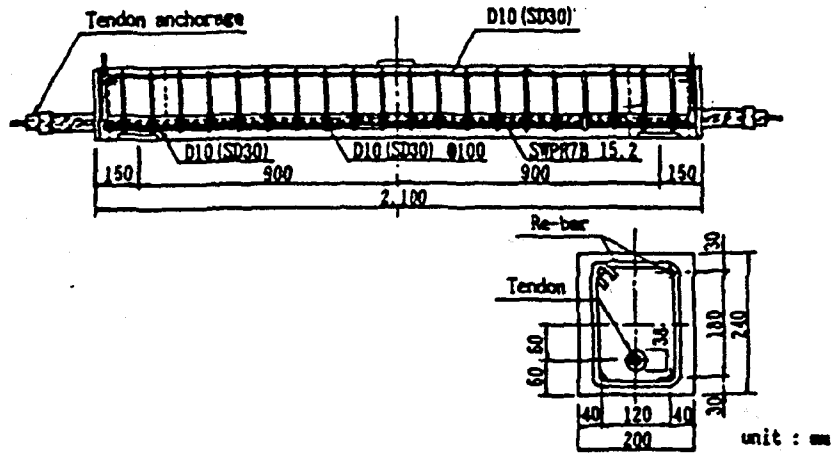


그림 9 PC 보 부재의 극저온 실험[1]

상온과 -60°C 에서의 보 중앙부에서의 하중-변위 관계는 다음과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안된 응력-변형률 관계를 이용하여 수행된 비선형 해석의 결과가 실험값과 거의 일치함을 알 수 있다.

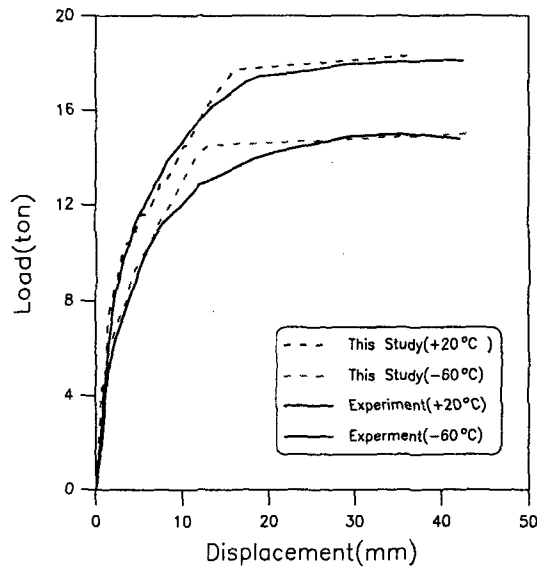


그림 10 하중-변위 관계

5. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 온도 조건하에 수행된 콘크리트 시험체의 응력-변형률 관계와 기존에 제안된 압축 강도 증가방식을 바탕으로 콘크리트의 온도 의존적인 응력-변형률 관계를 제안하였다. 또한 제안된 응력-변형률 관계식을 이용하여 PC 보 부재의 비선형 해석을 수행하였다. 그 결과 제안된 모델은 온도 의존적인 콘크리트의 거동을 효과적으로 모사함을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안된 콘크리트 응력-변형률 관계는 LNG 저장 탱크 구조물과 같은 극저온 환경의 콘크리트 구조물의 비선형 해석에 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. 岡田 武二의 2인, “저온하의 프리스트레스트 콘크리트 부재의 휨특성”, 청수건설연구소보 제29호, 1978, pp.41-49.
2. 김생빈, 이도현, “극저온에서의 콘크리트의 거동”, 콘크리트학회지, 제9권, 4호, 1997, pp.31-41.
3. 三浦 尙, “극저온하의 콘크리트의 물성”, 콘크리트공학(일), Vol.22, No.3, 1984, pp.21-28.
4. 일본가스공사, “Recommended Practice for LNG Inground Storage”, Committee on LNG Inground Storage, 1979.
5. 後藤幸正, 三浦 尙, “극저온하의 철근콘크리트 부재의 성질에 관한 연구”, 토목학회논문집(일), 1979, pp.121-134.
6. Rostasy, F.S., and Wiedemann, G., “Stress-Strain Behaviour of concrete at extremely low temperature”, Cement and concrete Research, Vol.10, No.4, 1980, pp.565-572.
7. Hognestad, E., “A Study on Combined Bending and Axial Load in RC Members”, Univ. of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399, Bulletin No. 1, 1951.