

공기량 및 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 동결융해
특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Freezing and Thawing Characteristics of Concrete
Influenced by Air Content and Water Cement Ratio

*오 병 환 **한 승 환 **박 상 현 ***이 용 호

요약

본 연구의 목적은 콘크리트의 열화손상을 주는 요인중 특히 수분의 공급이 충분한 동결융해작용에 대한 영향인자에 대한 실험적 연구이다.

콘크리트의 열화에 영향을 주는 여러 영향인자 중에서 주로 공기량 및 물-시멘트비를 다루었다.

The purpose of this experimental study are to produce a durable concrete and to investigate the various factors that can deteriorate the concrete when freezing and thawing activity with the external supply of water is given.

Among the various factors that can influence the frost resistance of concrete, this study examined mainly the relationship of the frost resistance with the water-cement ratio and air-content

*서울대학교 토목공학과 교수

**서울대학교 토목공학과 박사과정

***서울대학교 토목공학과 석사과정

1. 서론

콘크리트는 여러가지 환경조건에 의해서 내구성을 잃는 경우가 많은데 이중의 하나는 콘크리트구조물이 상온과 저온의 반복작용을 받는 경우를 생각할 수 있으며 이와 같은 환경에 노출되는 구조물은 많이 산재해 있다. 이들 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 일반적으로 공기량이나 기포분포의 영향을 크게 받으며 또 콘크리트의 강도나 수밀성과 물-시멘트비와도 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 알려졌다.

콘크리트가 저온에 노출되어 있을 때의 콘크리트의 성질은 상온의 경우와 비교할 때 상당히 변화하는데 이와 같은 콘크리트의 성질의 변화는 주로 콘크리트 중의 수분의 성질이 변화함에 따른 것으로 생각한다. 콘크리트의 강도는 일반적으로 저온일수록 증가하는 경향이 있는데 이와 같은 강도의 증가는 콘크리트 중의 수분이 동결함에 따라 강도를 갖는 얼음으로 변화하기 때문으로 생각된다.

콘크리트의 강도만을 중시 한다면 공기량이 적은 것이 가장 밀실한 콘크리트가 되어 효과적이거나 동해에 의한 내구성문제가 뒤따르므로 공기연행제의 첨가가 불가피한 경우가 많다.

따라서, 본 연구에서는 이와 같은 상황을 고려하여 콘크리트를 상온과 저온의 되풀이되는 혹독한 환경하에서 열화에 영향을 주는 요인들을 각 영향인자에 따라 분석하고자 하였다.

2. 동결융해 기구

자연적인 혹은 인위적인 온도의 상승, 강하로 인하여 콘크리트 내부의 온도가 간극수의 동결점 아래에서 그 이상으로, 동결점 이상에서 그 이하로 떨어지는 온도변화가 있을 때 콘크리트 구조물은 성능저하의 원인이 되는 동결융해 작용을 받게 된다.

이 연구들을 종합적으로 분석하여 동결융해 작용에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하를 살펴보면 크게 다음 두 가지의 가설로서 그 원인이 설명되고 있다.

① Hydraulic pressure hypothesis

② Frost action hypothesis

이 두 가설을 중심으로 동결융해작용의 발생 기구를 살펴보면 다음과 같다.

젖어있는 상태의 경화된 콘크리트의 온도가 낮아지면 시멘트 모르타르의 모세관극 안에 있는 간극수가 얼게 되는데 이때 약 9.1% 정도의 체적이 증가하게 된다. 간극에 따른 간극수의 상이한 빙점에 의해 얼지 않은 부분의 간극수가 동결부분의 수분이 소실되는데 대한 저항력으로 간극수압이 발생하고 모세관 작용으로 동결부분의 간극은 점진적 팽창을 한다. 또 연속적인 간극수의 동결과 융해가 일어나는 경우 체적변화가 심화되고 반복되는 동결융해는 누적효과를 나타낸다. 이 작용은 주로 시멘트 경화체(Cement Paste)에서 일어나고 콘크리트 배합시에 간극이 공기로 채워지면 이로 인해 동결융해작용은 점진적으로 진행되는 손상의 누적과정으로 이는 부분적으로 콘크리트의 열전달율에 기인하고, 또 부분적으로 얼지 않은 간극수에 용해된 알칼리성분의 점차적인 집중에 기인하며, 그리고 부분적으로 간극의 크기에 따른 동결점의 다양함에 기인한다.

간극안의 얼음체에 표면인장력은 체적이 작을수록 크게 되며, 따라서 동결은 큰 간극으로 부터 시작하여 작은 간극으로 전개된다. 간극이 매우 작은 경우의 겔 간극(Gel pores)는 -78°C 이상에서는 그 크기가 너무 작아 얼음결정을 이루기가 힘들므로 실제로는 얼음결정이 형성되지는 않으나 온도가 강하함에 따라 gel상태의 간극수와 얼음체의 엔트로피(Entropy)차이로 인하여 겔 간극수(gel water)는 얼음이 형성된 간극으로 이동할 수 있는 에너지 장을 받게 된다. 이는 동결된 얼음 결정을 크게하고 체적의 팽창을 발생시킨다.

동결융해 반응에 대한 초기의 연구는 이 간극수압가설(hydraulic pressure hypothesis)이 지배적인 견해였으나 이후 Power, Helmholtz 등의 연구에 의해 이 가설이 반드시 시험결과

와 일치하지 않음을 발견하였다. 시멘트경화체의 동결도중 간극수의 이동이 전적으로 동결부분의 외부로 이동하는 것이 아니라 동결부분으로 간극 사이의 물이 이동하는 경우도 발생하고 또한, 체적팽창(dilatation)이 동결속도가 증가함에 따라 감소하는 것도 발견하였다. 따라서 원래 흙의 동상(frost action)을 설명하기 위한 가설인 Collins의 이론이 적용가능성을 검토하였다. 따라서 두 가지 요인에 의한 팽창압력이 존재하게 된다. 첫째는 간극수의 동결에 의한 약 9.1%의 체적팽창이다. 그리고 잉여의 수분이 간극 밖으로 밀려나가는데 동결속도는 얼음체의 선단에 의해 밀려 외부로 유출되는 물 간극수의 속도를 결정한다. 이때 발생하는 간극수압은 이 흐름에 대한 저항 즉 잉여의 수분을 수용할 수 있는 공기간극(air void) 와 인공동(freezing cavity) 사이의 투수성과 경로의 길이에 따라 결정된다. 두번째 힘은 상대적으로 작은 갭수의 얼음결정체의 성장에 따른 간극수의 확산에 기인한 것이다.

수많은 연구에 의하면 후자의 동결용해반응 성능저하 기구가 콘크리트의 동결용해에 손상에 중요한 요인으로 믿어지고 있다. 이 확산(Diffusion)은 용해액에서 동결되는 순수한 물에 의해 집중되는 용질의 국부적인 상승으로 발생하는 삼투압의 작용에 의해 발생한다. 콘크리트의 온도가 동결온도 이하로 떨어졌을 때 먼저 super cooling 의 초기단계가 일어나고 이후 비교적 큰 모세관에서 얼음결정을 형성하고, 이는 얼지 않은 부분의 알카리 함유분을 증가시키고, 동결된 공동의 용액으로 주위의 얼지 않은 부분의 물 분자를 확산시키게 하는 삼투장(osmotic potential)을 형성한다. 얼음결정체에 인접한 간극수의 묽음(dilution)은 얼음의 크기를 더욱 크게하고(ice accretion) 반면 얼지 않은 부분으로 부터의 간극수의 이동은 이 부분을 수축하게 한다.

결국 이러한 원인에 의해서 콘크리트의 팽창압력이 인장강도를 넘었을 때 이 손상의 정도는 표면의 층분리로 부터 시작되어 구조물 두

께로 진전되는 얼음층에 의하여 완전한 붕락까지 다양하다.

3. 동결용해특성 실험

3.1 실험개요 및 변수

콘크리트의 동결용해 저항성에 큰 영향을 미치는 인자인 공기량, 시멘트량, 물-시멘트비에 대한 영향성을 실험실내 제작시편은 통해 분석하는 실험을 수행하는 것이다.

한편, 영향인자 분석을 위한 실험실 시편은 콘크리트의 동결용해 저항성에 영향을 미치는 인자중 그 영향이 큰 시멘트량(cement content), 공기연행량(entrain air content), 물-시멘트비(water-cement ratio)에 중점을 둔다. 단 공기연행량은 인위적으로 정확히 조절할 수 없으므로 예비실험을 통하여 수행된 자료를 바탕으로 공기연행체의 양을 추정하여 배합하고 공기량을 측정한다.

시멘트량은 단위체적당(m^3) 350kg, 450kg의 두가지로 하는데 450kg은 원전구조물에 사용되는 약 $400kg/cm^2$ 의 강도를 갖는 콘크리트를 대표하는 값이고 350kg은 일반 건설구조물의 시멘트량으로 시멘트량의 변화에 따른 영향과 아울러 구조물에 사용되는 콘크리트와 비교하기 위한 것이다. 공기량은 공기연행체의 첨가량에 따라 시멘트량의 0%, 0.02%, 0.04%, 0.6%로 변화시키면서 공기량을 변화시킨다. 이 첨가량은 시험배합에 의해 공기량 2%, 3%, 6%, 9%에 해당하는 값이다.

물-시멘트비는 0.4, 0.5 을 변수로 변화시킨다.

위에서 기술된 시멘트량, 공기량, 물-시멘트비의 변수를 요약해서 표1에 나타내었다.

3.2 실험시편의 제작 및 양생

변수에 따른 배합은 실험실내의 골재비중과 함수량에 따라 다음 표2 와 같은 배합비로 배합되어 제작된다. 각 종류에 첨가되는 공기연행체의 양이 시멘트량에 따라 조절되어 첨가된다.

표1 실험시편 및 변수

변수 시편	물-시멘트비	시멘트 (kg)	배합수 (kg)	공기량 (%)
MC1A0	0.4	350	140	0
MC1A1				3
MC1A2				6
MC1A3				9
MC2A0	0.4	450	180	0
MC2A1				3
MC2A2				6
MC2A3				9
HC1A0	0.5	350	175	0
HC1A1				3
HC1A2				6
HC1A3				9
HC2A0	0.5	450	225	0
HC2A1				3
HC2A2				6
HC2A3				9

표2 동결융해 실험시편의 배합비(단위kg/m³)

종류	물-시멘트 비	시멘트 량	배합수 량	굵은 골재량	잔 골재량
MC1	0.4	350	169	1115	743
MC2	0.4	450	206	1006	670
HC1	0.5	350	193	1062	707
HC2	0.5	450	249	937	624

굵은 골재비중 2.59
 잔골재 비중 2.59
 잔골재율 40%
 시멘트비중 3.15
 굵은골재 함유량 1.48%
 잔골재 함유량 1.63%

3.3 실험방법 및 측정

실험방법은 KS F 2456 : 급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법과 ASTM(666:

resistance of concrete to rapid freezing and thawing)에 근거한다. 콘크리트를 인위적인 온도조작, 즉 간극수 동결점이하의 온도와 간극수 동결점 이상의 온도를 반복시키면서 콘크리트 시편내의 동결융해작용을 유발하여 이에 의한 손상과 성능저하를 측정한다.

콘크리트 시편에 가해지는 동결융해환경은 두가지 형태가 있는데, 방법A는 습윤상태에서 동결융해 환경이 가해지는 것이고, 방법B는 공기중 동결과 수중융해 방법이다.

두 방법모두 특정한 절차에 의해 콘크리트의 성질에 따른 동결융해저항성의 변동, 상대적인 차이를 구할 수는 있으나, 직접적으로 어떤 임의의 콘크리트의 사용수명을 정량적으로 구할 수는 없다.

따라서 충분한 비교검토가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 방법 A를 동결융해환경으로 하는데 시편을 수중에 침수시킬때 시편함을 사용하고 시편주위의 물이 동결되어 콘크리트에 가해지는 응력이 되도록 작게 하기위하여 3mm 정도의 물에만 둘러싸이도록 한다.

4. 실험결과

콘크리트가 동해에 의하여 내구성을 잃는 것은 콘크리트가 노출된 외적인 요인인 환경조건에 의하는 경우, 또는 콘크리트 자체의 내적요인에 기인하는 경우가 있다. 외적요인으로 물리적, 혹은 화학적작용 등을 들 수 있는데, 특히 기상 작용이나 심한 온도변화의 영향과 더불어 콘크리트가 물에 접해 있을때 콘크리트의 내구성에 큰 문제가 생기게 된다. 앞에서 설명 했듯이 동결융해를 되풀이 받고 있는 콘크리트가 물의 공급을 받게되면 물의 공급을 받지 않은 경우보다 더 많은 동해를 받게 되는데, 이때 콘크리트의 내적요인으로 콘크리트 자체의 수밀성이 좋지 못하면 함유량이 자연히 증가되어 동해는 한층 더 커진다.

한편, 콘크리트의 열화는 공기량과 물-시멘트비의 영향이 크다고 보는데, 일반적으로 공기량이 많을 수록 열화의 정도는 적어진다. 그러나 공기량이 커지면 강도가 얼마간 떨어지므로 AE 콘크리트의 경우에도 적당량의 공기 함유량

이 필요하다. 또한, AE 콘크리트의 내구성에 미치는 물-시멘트비의 영향이 큰데, 이는 물-시멘트비에 따라 콘크리트내의 수분양이나 내부의 공기분포가 크게 변화하기 때문이다.

콘크리트의 동해는 모세관수의 영향이 크다고 보는데, 물-시멘트비 40%에서 모세관수는 존재하지 않기 때문에 이 경우 동결융해에 외부로부터의 새로운 수분의 공급이 없으면 열화는 일어나지 않는 결과가 된다.

AE 콘크리트의 경우 동해로부터 보호를 받기 위한 공극의 최소값이 필요한데, Klieger는 이 공극의 체적이 모르타르 체적의 9%에相当해야 하고, 또 공기가 시멘트풀 전체에 고루 분포되어 있어야 함이 중요하다는 사실을 발표하였다.

실제적으로 지배적인 인자는 공기포의 간격, 즉 간격계수이며, 이 기포의 간격계수는 물-시멘트비에 따라 크게 변하는데, AE제의 사용에 의해 이를 작게할 수 있다.

본 연구에서는 외부로부터 물의 공급을 받는 콘크리트의 동결융해에서 공기량과 물-시멘트비가 동결융해 저항성에 미치는 영향을 알아 보았다.

다음은 본 연구에서 콘크리트의 각 경우별 동결융해특성을 규명하기 위하여 제작된 시편의 압축강도 결과와 동결융해 실험결과를 기술하기로 한다. 이를 정리하면 다음의 표3 과 같다.

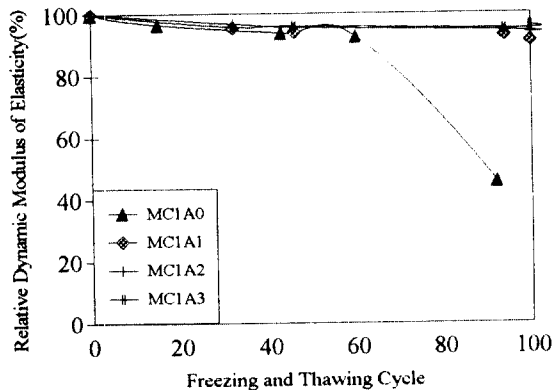


그림 1 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수

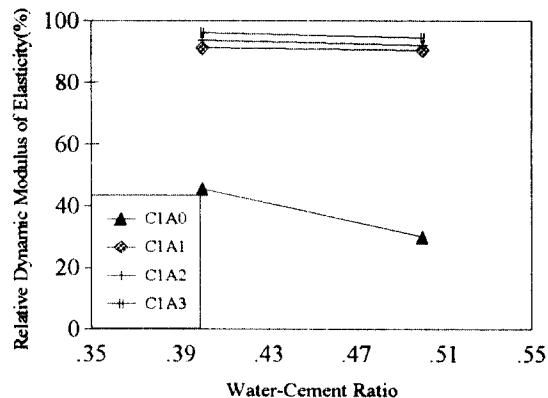


그림 2 물-시멘트비에 따른 상대동탄성계수

표3 동결융해 실험결과

공시 계 기호	W/C (%)	S/a (%)	공기량 (%)	Cycle 수	중탕 변화율	초기 동탄성 계수	상대 동탄성 계수
MC1A0	40	40	0.9	92	3.12	468745	45.6
MC1A1			3.8	100	0.26	458172	91.19
MC1A2			4.5	100	0.26	453766	93.73
MC1A3			6.5	100	0.39	436594	96.00
MC2A0	40	40	2.5	79	9.11	442126	34.47
MC2A1			3.2	100	1.90	405024	95.34
MC2A2			6.3	100	0.93	419561	97.56
MC2A3			7.2	100	0.27	380592	98.12
HC1A0	50	40	3.5	45	5.78	424406	39.06
HC1A1			4	100	5.44	425070	90.34
HC1A2			5.5	100	0.54	396001	92
HC1A3	8	100	-	351137	94.5		
HC2A0	50	40	1.7	49	1.7	371081	56.8
HC2A1			5.7	100	0.23	327663	96.34
HC2A2			7.5	100	0.56	359071	92.39
HC2A3			9	100	0.43	338537	94.27

압축강도에서 cement양이 450kg인 경우가 350kg인 경우와 차이가 별로 없는 것은 시멘트량에 따른 물-시멘트비의 영향으로 물의 절대량이 증가했기 때문이고, 같은 cement양일 경우 물-시멘트비에 따라 강도차이가 큰 것을 볼 수 있다. 동결융해의 실험결과도 강도와 비슷한 경향을 나타낸다.

본 연구의 실험결과 대체적으로 공기함유량이 증가함에 따라 중량감소율이 줄어들었고, 상대동탄성계수도 증가하는 경향을 나타내었다.

각 실험시리즈 모두 공기량 4%이상에서는 내구성이 크게 좋아지는 경향을 나타내었다.

5. 결론

콘크리트 구조물에 발생하는 성능저하현상(열화현상) 가운데 중요한 것이 동결융해 작용에 의한 손상이다. 이러한 손상은 콘크리트내에 침투한 수분이 동결함으로써 체적팽창을 일으켜 콘크리트내에 팽창압력으로 인한 손상을 주게되며 이것이 융해된 후 다시 얼게됨으로써 팽창압력에 의한 손상은 더욱 커지게 된다. 이와 같은 작용이 바로 동결융해작용이며 본 연구에서는 이들에 대한 영향과 특성을 규명하기 위하여 포괄적인 연구를 수행하였다.

실험의 주요변수로는 물-시멘트비, 단위시멘트량, 공기량 등 주요변수를 포괄적으로 고려하였으며 이들의 영향을 분석하고자 하였다. 이들 일련의 실험연구로 부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 콘크리트내의 공기함유량이 많아질 수록 동결융해에 대한 저항성은 커지는 것으로 나타났으며 소요의 내구성을 확보하기 위한 공기량은 4% 이상인 것으로 나타났다.
- (2) 동결융해 저항성에 대한 물-시멘트비의 영향은 물-시멘트비가 증가함에 따라 동결융해저항성이 나빠지는 것으로 나타났고 이것은 콘크리트의 물-시멘트비에 따른 강도변화의 특성과 유사한 것으로 나타났다.
- (3) 단위시멘트량에 따른 동결융해저항성에 대해서는 시멘트량의 증가에도 불구하고 같은 물

-시멘트비에서 동결융해저항성에 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이것은 같은 물-시멘트비에서는 동결융해 특성이 거의 비슷한 결과를 보여주기 때문인 것으로 사료된다. 강도실험결과에서도 같은 물-시멘트비에서는 시멘트량이 증가에도 불구하고 강도의 증진은 거의 없었다.

- (4) 결과적으로 동결융해저항성을 확보하기 위하여 소요의 공기량을 연행시키고 물-시멘트비도 적절히 최소화 시키는 것이 바람직한 것으로 사료된다.
- (5) 공기량의 함유에 따라 콘크리트의 압축강도는 약간씩 저하하나 이것은 워커빌리티의 향상으로 어느정도 상쇄시킬 수 있으며 또한 내구성이 크게 요구되는 구조물에서는 우선적으로 내구성에 중점을 두어야 할 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

1. 콘크리트 표준시방서, 건설부, 1988.
2. 한국공업규격, 한국공업규격협회.
3. ACI Manual of Concrete Practice, 1992.
4. Annual Book of ASTM Standard, 1989.
5. 오병환외, 최신 콘크리트공학, 기문당, 1992.
6. Neville, A.M., Properties of concrete, 3rd edition, 1981.
7. Mindess, S., Young, J.F., Concrete, 1981.
8. Cordon, W., A., Freezing and Thawing of Concrete-Mechanism and Control, Monograph No.3, ACI/Iowa State University Press, Detroit, 1966, 99pp.
9. Powers, T.C., "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete," ACI Journal, Proceedings V. 41, No. 4, Feb. 1945, pp. 245-760.