

# 탄산화 및 동결융해 현상이 콘크리트 중의 염소이온 확산에 미치는 영향 연구

김동백<sup>†</sup> · 권기준<sup>\*</sup> · 정상화<sup>\*\*</sup> · 복 훈<sup>\*</sup>

한경대학교 토목공학과 · <sup>\*</sup>한경대학교 안전공학과 · <sup>\*\*</sup>한국건설자재시험연구원  
(2007. 3. 30. 접수 / 2007. 6. 12. 채택)

## Influence of Carbonation and Freezing-thawing on the Chloride Diffusion in Concrete

Dong-Baek Kim<sup>†</sup> · Ki-Jun Kwon<sup>\*</sup> · Sang-Hwa Jung<sup>\*\*</sup> · Hoon Bok<sup>\*</sup>

Department of Civil Engineering, Hankyong National University

<sup>\*</sup>Department of Safety Engineering, Hankyong National University

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Construction Materials

(Received March 30, 2007 / Accepted June 12, 2007)

**Abstract** : Recently, the corrosion of concrete structures has received great attention related with the deterioration of sea-side structures, such as new airport, bridges, and nuclear power plants. In this regards, many studies have been done on the chloride attack in concrete structures. However, those studies were confined mostly to the single deterioration due to chloride only, although actual environment is rather of combined type. The purpose of the present study is, therefore, to explore the influences of carbonation and freezing-thawing action to chloride attack in concrete structures. The test results indicate that the chloride penetration is more pronounced than the case of single chloride attack when the carbonation process is combined with the chloride attack. It is supposed that the chloride ion concentration of carbonation region is higher than the sound region because of the separation of fixed salts. Though the use of fly ash pronounces the chloride ion concentration in surface, amounts of chloride ion penetration into deep region decreases with the use of fly ash. The small reduction of relative dynamic elastic modulus induced from freezing-thawing increases the chloride ion penetration depths much. The present study allows more realistic assessment of durability for such concrete structures which are subjected to combined attacks of both chlorides and carbonation or freezing-thawing but the future studies for combined environment will assure the precise assessment.

**Key Words** : chloride ion diffusion, carbonation, freezing-thawing, fly ash

### 1. 서 론

콘크리트는 건설재료로서 탁월한 내구저항성을 지니고 있으므로 대부분 사람들의 주거 및 활동, 산업 생산시설을 보호하는 공간을 구성하는 기반구조물에 가장 많이 사용되고 있다. 콘크리트 구조물에 있어서 궁극적인 목표는 구조물이 성능을 유지하면서 기대 수명동안 존재하는 것이다. 그러나 가설직 후부터 구조물의 특성, 노출환경 등에 따른 여러 가지 물리적, 화학적 유해 환경조건에 노출되어 직·

간접적인 영향을 받아 손상 즉, 구조물의 열화(deterioration)를 일으키게 된다<sup>1,2)</sup>.

현재까지 국내·외 설계기준에서 콘크리트구조물에 대한 내구성 확보방안은 내구성 설계과정을 구조 설계의 일부분으로 보고 콘크리트 품질확보를 위해 콘크리트 품질, 시멘트 종류, 단위시멘트량, 물-시멘트비, 양생, 피복두께 등을 제한하는 정성적인 방법을 사용하고 있다. 그러나, 1960년대 이후 구미 각국 및 일본에서 알칼리-골재 반응, 동해, 화학적 침식 등의 콘크리트 자체의 열화나 철근부식 및 이에 따른 균열과 같은 개개의 열화요인에 의한 철근 콘크리트 구조물의 수명저하가 보고되었으며, 이에

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
dbkim@hknu.ac.kr

따라, 정성적인 방법 이외에 철근콘크리트 구조물의 내구수명을 정량적으로 보장하기 위한 새로운 개념의 연구의 필요성이 대두되었고 1980년대와 1990년대를 거치면서 활발한 연구활동을 수행되었다<sup>3-5)</sup>.

우리나라에서도 1990년대 초반부터 해상 장대교량이나 구조물, 지하구조물과 같이 열악한 환경에 노출된 구조물의 장기적인 내구성 확보에 대한 필요성에 따라, 염해나 중성화, 황산염침투 등에 의한 성능저하에 대하여 일부연구자들에 의하여 기초적인 연구가 수행되어왔다<sup>6,7)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 염소이온 확산에 의한 내구성 저하과정을 분석하고, 탄산화 및 동결융해에 의한 염소이온 확산 특성의 영향을 검토하여 충분한 내구저항성을 확보할 수 있는가에 대한 실험연구를 수행하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1. 사용재료 및 실험변수

본 연구는 국내 S사에서 생산된 1종 및 5종 시멘트(비중 : 3.15)와 보령화력에서 생산된 플라이애시(비중 : 2.1)를 사용하여 시멘트 종류(1종, 5종, 플라이애시 20%혼입) 및 물/결합재 비 (0.38, 0.42)를 주요 실험변수로 실험을 수행하였다. 본 연구에서 5종 시멘트에 대한 실험을 중점적으로 수행한 이유는 현재 우리나라 해양환경구조물 등에 사용되고 있기 때문이며, 플라이애시의 경우는 이미 국내 레미콘의 경우 상당량 실용화되어 있기 때문에 전체 시멘트량의 20%를 5종 시멘트에 혼입하여 실험을 수행하였다. 한편, 골재는 비중 2.63, 조립율 6.7의 쇄석 굵은골재 및 비중 2.55, 조립율 2.6의 강사를 사용하였다. Table 1에는 사용된 시멘트 및 플라이애시의 화학조성이 나타나있다.

Table 1. Chemical components of cement(%)

| Cement Type | SiO <sub>2</sub>  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO              | MgO     |
|-------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---------|
| Type 1      | 21.01             | 6.40                           | 3.12                           | 61.33            | 3.02    |
| Type 5      | 22.37             | 3.87                           | 4.67                           | 62.77            | 2.54    |
| Fly ash     | 61.75             | 23.97                          | 4.81                           | 3.41             | 0.82    |
| Cement Type | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O               | SO <sub>3</sub>                | F-CaO            | Ig.loss |
| Type 1      | 0.12              | 0.78                           | 2.14                           | 1.12             | 1.61    |
| Type 5      | 0.09              | 0.54                           | 1.75                           | 0.57             | 1.40    |
| Fly ash     | 0.50              | 1.11                           | 0.66                           | -                | 2.97    |
| Cement Type | C <sub>3</sub> S  | C <sub>2</sub> S               | C <sub>4</sub> AF              | C <sub>3</sub> A |         |
| Type 1      | 42                | 28                             | 9                              | 12               |         |
| Type 5      | 53                | 24                             | 14                             | 2                |         |

Table 2. Mixture proportions for test series

| Test series | Cement Type | W/B  | Cement kgf/m <sup>3</sup> | Fly ash kgf/m <sup>3</sup> | Water kgf/m <sup>3</sup> | Fine agg. kgf/m <sup>3</sup> | Coarse agg. kgf/m <sup>3</sup> |
|-------------|-------------|------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| H1 FA00     | I           | 0.38 | 450                       | -                          | 171                      | 621                          | 1034                           |
| H1 FA20     | I           | 0.38 | 360                       | 90                         | 171                      | 609                          | 1014                           |
| H5 FA00     | V           | 0.38 | 450                       | -                          | 171                      | 621                          | 1034                           |
| H5 FA20     | V           | 0.38 | 360                       | 90                         | 171                      | 609                          | 1014                           |
| N5 FA00     | V           | 0.42 | 405                       | -                          | 170                      | 636                          | 1058                           |

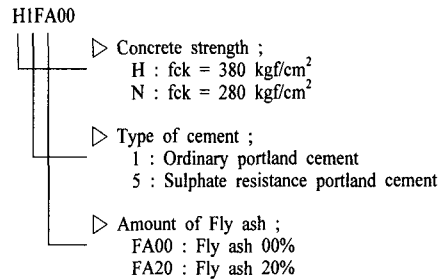


Fig. 1. Test series identification.

Table 2에는 본 연구에서 사용한 실험변수와 배합 설계 내용이 요약되어 있다. 또한, 본 배합의 목표 슬럼프는 15 ± 2.5cm 목표 공기량은 4.5 ± 1.5%로서 이를 위해 시험배합을 통해 AE감수제를 적절히 혼입하였다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 탄산화에 따른 염소이온 확산영향 실험

연구는 콘크리트 중의 염소이온 확산성에 미치는 탄산화의 영향을 알아보기 위해 1주간 25°C로 유지된 5% 염화나트륨(NaCl) 용액에 대한 침지와 1주간 CO<sub>2</sub>농도 10%, 온도 40°C, 상대습도 60%조건에서의 촉진탄산화 실험을 반복하여 실시한 후 침지 시간(5주, 15주, 30주, 56주) 및 표면으로부터의 깊이 에 따른 산 가용성 및 수용성 염소이온 침투량을 ASTM C1152-97 및 ASTM C1218-97에 제시된 방법에 따라 분석하였다<sup>8,9)</sup>. 또한, 상기 실험결과와의 비교를 위해 1주간 5% 염화나트륨 용액침지와 1주간 공기 중 노출을 반복한 후 동일한 방법으로 염소이온 침투량을 분석하였다. 단, 분석은 침지시작 후 각각 4주, 12주, 28주 및 52주가 지난 시점에서 실시하여 두 실험사이의 분석시점이 다소 차이가 생겼다.

염소이온 확산에 대한 탄산화 영향 실험은 모든 실험시편을 28일간 수중양생 후 수행하였으며, 표준 시편으로는 길이 10cm, 직경 10cm의 원주형 시편을 사용한 후 염소 이온의 일 방향 침투를 보장하기 위해 표준 시편의 측면을 불투수성 에폭시로 코팅하였다.

2.2.2. 동결융해에 따른 염소이온 확산 영향 실험

동결융해에 따른 염소이온 침투특성 영향 실험은 동결융해작용을 받은 시편을 16주간 염수에 침지한 후 염분침투깊이를 측정하여 이를 동결융해작용을 받지 않은 건전 시편의 염분침투깊이와 비교하였으며, 또한, 외부로부터 염소이온이 침투함에 따

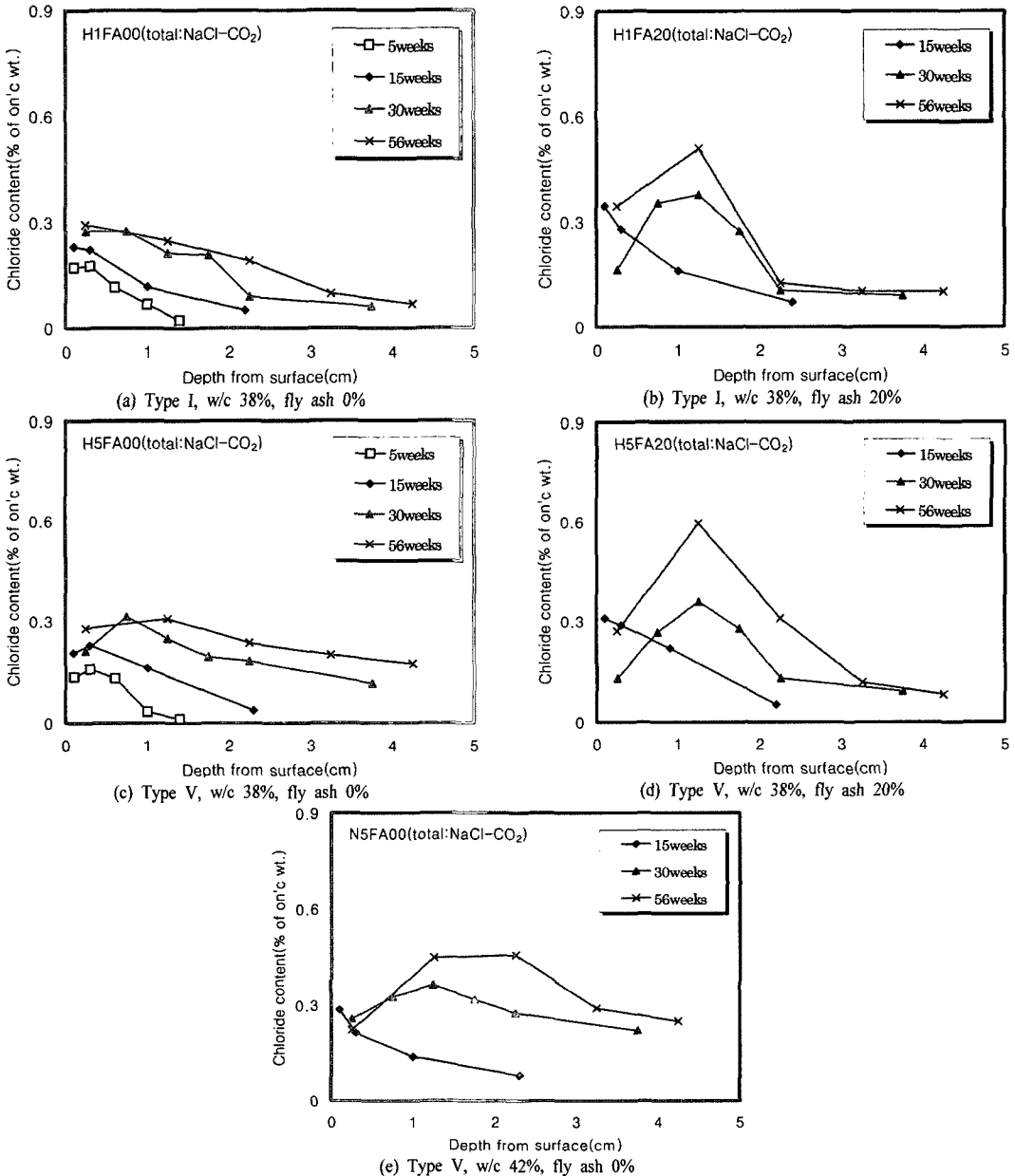


Fig. 2. Chloride profiles for various mixtures under cyclic one-week in chloride solution and one-week in carbonation(case of acid soluble).

른 동결융해 저항성의 변화를 알아보기 위해 염수에 16주간 침지한 시편과 침지하지 않은 시편에 대해 200사이클의 동결융해 시험을 실시한 후 상대동탄성계수의 변화를 측정하였다.

본 연구의 실험변수는 물-시멘트비를 0.38로 고정된 상태에서 시멘트 종류 및 플라이애시 치환 여부에 따라 4개로 정하였다. 시험체는 8×10×40cm의 크기로 각 변수에 대해 2개씩의 시편을 제작하였으며 측정결과는 그 평균치를 택하였다. 또한, 콘크리트의 상대동탄성계수는 KS F 2530의 방법에 의해 측정하였으며<sup>10)</sup>, 염소이온 침투깊이는 0.1 N AgNO<sub>3</sub> 용액을 절단면에 분무하여 어두운 곳에 1시간 동안 방치한 후 형광등에 수 시간 놓아 하얗게 변색된 부분의 평균깊이를 측정하여 구했다<sup>11)</sup>.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 탄산화에 따른 염소이온 확산영향 실험

Fig. 2에는 5% 염화나트륨 용액 침지와 CO<sub>2</sub> 농도 10% 촉진 탄산화를 1주씩 반복한 경우에 대한 시간에 따른 산가용성 염소이온 침투 정도가 나타나 있으며 Fig. 3에는 동일한 시편에 대한 수용성 염소이온 침투 정도가 나타나 있다. 이 경우 침지시간의 증가에 따른 염소이온 침투량은 전반적으로 증가하였으며, 침투경향은 산가용성 및 수용성 염소이온에 대한 실험에서 모두 유사하게 나타났다. Fig. 2 및 3에 의하면 콘크리트 중으로의 염소이온 침투량은 H1FA00 배합의 경우가 시간의 경과 및 깊이에 따른 침투량 및 변화정도가 가장 작게 나타나고 있으며, H5FA00 배합의 경우는 H1FA00 배합의 경우에 비해 시간이 지남에 따라 2cm 이상의 깊이에 대한 염소이온 침투량이 커지고 있는 것을 알 수 있다. N5FA00 배합은 H1FA00 및 H5FA00 배합에 비해 시간에 따른 염소이온 침투량이 매우 큰 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 이들 배합 사이의 물-시멘트 비 차이는 그다지 크지 않지만 설계기준강도의 차이가 크기 때문에 콘크리트의 조직구조가 다소 큰 차이를 보이기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 플라이애시를 혼입한 H1FA20 및 H5FA20 배합의 경우는 플라이애시를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 매우 다른 염소이온 침투 경향을 보이고 있는데, N5FA00의 경우와 유사하게 시간이 지남에 따라 표면에서 1cm 이내의 염소이온 침투량이 표면에서 1~2cm 부분의 염소이온 양에 비해 작게 나타나고 있으며

표면으로부터 2cm 이상 떨어진 부분의 염소이온 침투량은 플라이애시를 혼입하지 않은 경우에 비해 급격히 작아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 플라이애시를 혼입한 경우에는 콘크리트 조직구조 및 탄산화에 따른 특성이 혼입하지 않은 경우와 비교하여 다소 달라지는 것을 나타내고 있다고 판단된다.

Fig. 4 및 5에는 건습반복작용을 받은 경우의 염소이온 프로파일과 1주 염화나트륨 용액침지와 1주 촉진탄산화를 반복한 경우의 염소이온 프로파일을 비교한 결과가 나타나 있다. 이 경우 비교시점이 다소 차이가 있지만, 이러한 비교를 통해 탄산화 현상이 염소이온의 침투에 미치는 영향을 파악할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 4. 및 5를 보면 촉진탄산화를 시행한 시편의 경우가 단순 건습반복을 받은 경우보다 시간경과에 따라 콘크리트 내부로 침투된 염소이온이 많은 것을 알 수 있다. 또한, H5FA00 시편의 경우 30주 이상 실험을 실시한 경우 깊이에 따른 염소이온 침투량의 변화가 완만하여 표면으로부터 1cm 이내의 경우에는 건습반복을 받은 시편의 경우에 비해 염소이온 양이 작은 것을 알 수 있다. 이것은 콘크리트의 탄산화가 진행되는 경우 시멘트 수화물에 Friedel 염 등으로 고정된 염화물 이온이 세공용액 중에 유리되어 염화물 이온 농도가 높아진다는 기존의 연구결과와 관련된 것으로 판단된다<sup>12)</sup>. 즉, 탄산화의 진행에 따라 탄산화된 영역의 염화물 이온 농도가 높아지는 경우에는 탄산화 영역과 비탄산화 영역 사이의 염화물 이온 농도구배가 커지기 때문에 염화물 이온의 비탄산화 영역으로의 이동이 촉진되어 비탄산화 부분의 염화물 이온 농도가 오히려 탄산화 부분에 비해 커지게 되는 경향이 나타나게 된 것으로 판단된다.

한편, 플라이애시를 혼입한 Fig. 5의 경우를 살펴보면 촉진탄산화 시행여부에 따른 염소이온 침투 경향이 다양하게 변화함을 알 수 있다.

① 단순 건습반복 실험의 경우 : 30주까지는 플라이애시 혼입에 따른 염소이온 침투 경향 변화가 크지 않지만 50주가 넘는 경우 표면에서부터 1cm까지의 영역의 염소이온 농도는 매우 높고 표면에서부터 2cm가 지난 영역의 염소이온 농도는 플라이애시를 혼입하지 않은 경우에 비해 매우 낮다.

② 탄산화 촉진실험 실험을 병행한 경우 : 초기에는 단순 건습반복 실험의 경우와 큰 차이를 보이지 않으나 30주 이상 염화나트륨 용액 침지와 촉진탄산화를 수행하는 경우 염소이온 침투 경향이 플

탄산화 및 동결융해 현상이 콘크리트 중의 염소이온 확산에 미치는 영향 연구

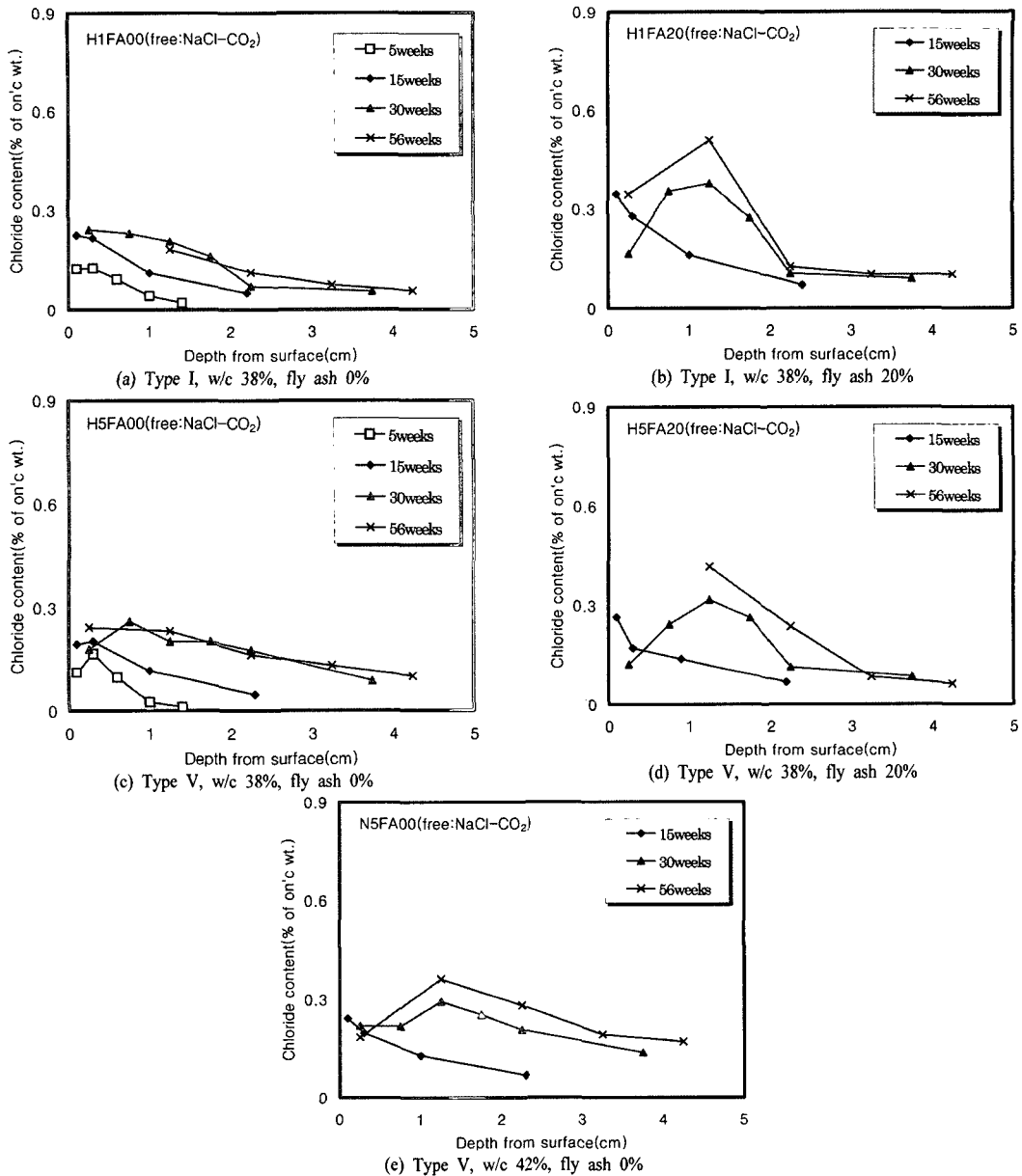


Fig. 3. Chloride profiles for various mixtures under cyclic one-week in chloride solution and one-week in carbonation(case of water soluble).

라이에시를 혼입한 경우 큰 변화를 나타낸다.

- 플라이애시 혼입 여부에 관계없이 축진탄산화 실험을 병행한 경우에는 단순 건습반복 실험의 경우에 비해 내부로 침투되는 염소이온 양이 증가한다.
- 플라이애시를 혼입한 경우에는 축진탄산화 실험을 장기간 병행한 경우 내부로 침투되는 염소이온

양이 크게 증가하여 56주의 경우 대략 표면으로부터 1~3cm 사이의 염소이온 농도가 단순 건습반복 및 플라이애시를 혼입하지 않은 경우에 비해 매우 높게 나타난다.

- 플라이애시를 혼입한 경우에는 장기간 축진탄산화 실험을 병행한 경우 표면으로부터 1cm 정도 깊이의 염소이온 농도가 다음 영역에서의 염소이온

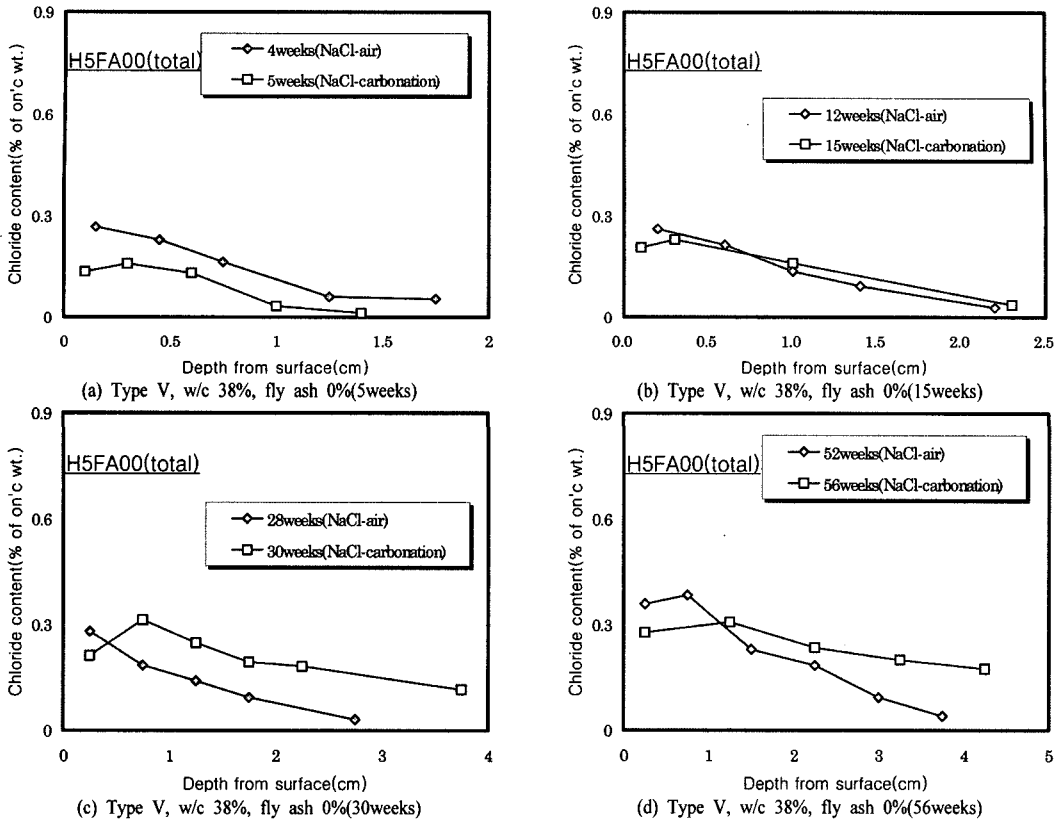


Fig. 4. Comparison of chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week in carbonation with chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week in dry condition(case of acid soluble).

농도보다 작은 경향이 매우 뚜렷하게 나타난다.

- 플라이애시를 혼입한 경우에는 염화나트륨 용액에 대한 단순 건습반복 실험의 경우 미혼입한 경우에 비해 콘크리트 내부의 염소이온 농도가 매우 낮게 나타나며, 탄산화 촉진실험을 병행한 경우에는 염소이온 농도가 매우 높은 영역을 지난 부분에서 염소이온 농도가 급격히 낮아지지만 플라이애시를 미혼입한 경우와 비교한 염소이온 농도는 유사한 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과로부터 탄산화과정 및 플라이애시의 혼입이 콘크리트 중의 염소이온 확산에 미치는 영향을 추론할 수 있다.

① 콘크리트가 탄산화 되는 경우 고정된 Friedel 염 등의 유리로 인한 농도구배의 상승으로 인해 내부로의 염소이온 확산이 증가하며, 표면의 탄산화 부분의 염소이온 농도는 상대적으로 낮다.

② 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 경우 장기재령시 조직의 밀실화로 인해 내부로 침투하는 염소

이온이 급격히 감소한다. 그러나, 탄산화에 의한 영향이 있는 경우 이에 따른 내부로의 염소이온 확산 증가 경향이 더욱 뚜렷이 나타나며 이로 인해 탄산화 영역에 인접한 부분의 염소이온 농도는 급격히 증가한다. 다만, 염소이온 농도가 급격히 증가하는 영역을 지나면 침투된 염소이온 양은 플라이애시를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 크지 않다.

### 3.2. 동결융해에 따른 염소이온 확산영향 실험

#### 3.2.1. 동결융해 후 염소이온 침투깊이 변화

본 연구에서는 동결융해에 따른 염소이온 확산 영향을 살펴보기 위해 동결융해를 200사이클 실시한 시편 및 동결융해를 시행하지 않은 시편에 대해 16주간 5%의 염화나트륨 용액에 침지한 후 AgNO<sub>3</sub> 용액을 이용하여 염소이온 침투 깊이를 분석하였다. Table 3 에는 이에 따른 실험결과가 나타나 있으며 동결융해 작용을 받은 시편의 경우 염소이온 침투깊이가 약 40~70% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

탄산화 및 동결융해 현상이 콘크리트 중의 염소이온 확산에 미치는 영향 연구

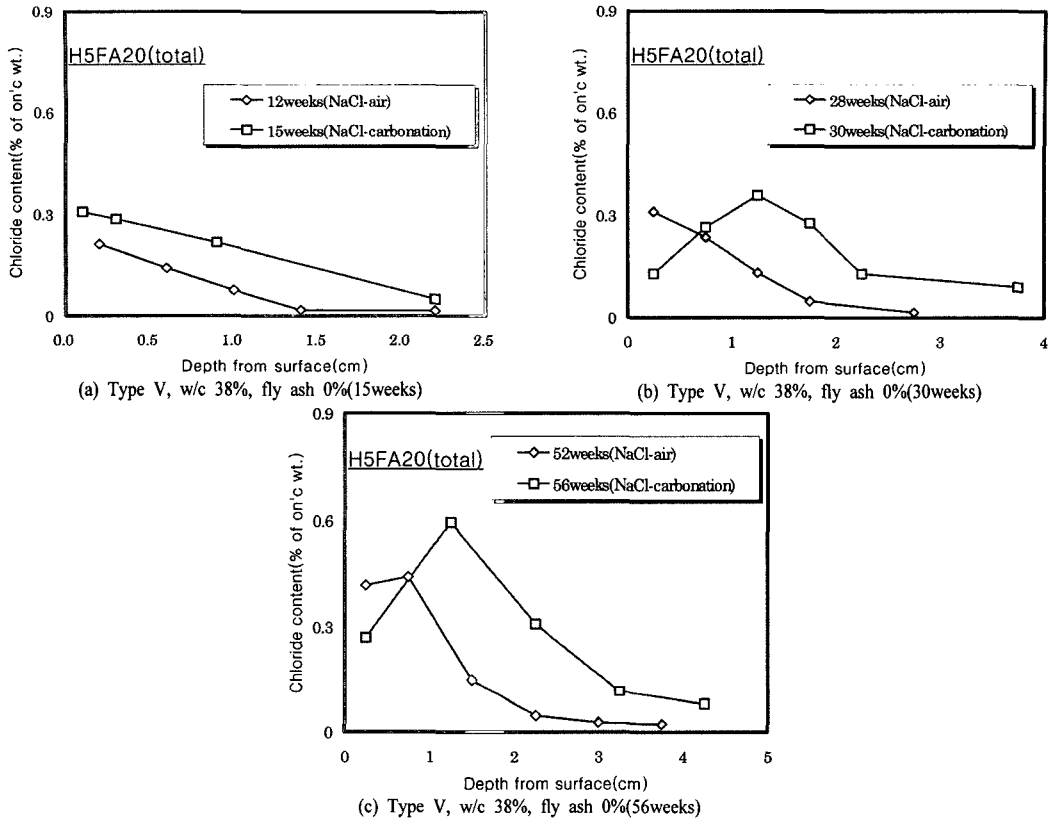


Fig. 5. Comparison of chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week carbonation with chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week in dry condition(case of acid soluble, using fly ash).

Table 3. Chloride penetration depth due to freezing thawing action

| Test series | Chloride Penetration Depth(mm) |                  |
|-------------|--------------------------------|------------------|
|             | Sound Specimen                 | Freezing-Thawing |
| H1FA00      | 14.3                           | 20.8 (86.4)      |
| H1FA20      | 11.7                           | 19.3 (77.7)      |
| H5FA00      | 15.8                           | 22.3 (75.6)      |
| H5FA20      | 11.5                           | 20.3 (98.7)      |

주) ( )는 동결융해작용 후의 상대동탄성계수 측정치이며 단위는 %이다.

이 경우 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받으면 콘크리트 내부의 간극수압에 의한 팽창압력이 발생하여 콘크리트 조직의 밀실성이 떨어지기 때문에 염소이온의 침투가 증가하는 것은 예측 가능한 사항이지만, Table 3에 따르면 본 연구에 사용된 시편에 대해 동결융해를 200사이클 실시한 후의 상대동탄성계수는 75.6~98.7%로 상대적으로 성능저하가 크지 않은 것을 감안할 경우 동결융해 작용에 따른 염소이온 확산성의 증가는 매우 큰 것으로 판단된다.

3.2.2. 외부 염소이온 침투에 따른 동탄성계수 변화

Table 4는 5% 염화나트륨 용액에 16주 동안 침지한 시편과 보통의 수중침지를 실시한 시편에 대해 각각 동결융해 작용을 200사이클 실시한 후 콘크리트 시편의 상대동탄성계수 측정결과를 나타낸 것이다. 이에 따르면, 수중 양생한 경우 1종 시멘트, 플라이애시를 20% 치환한 것과 5종 시멘트, 플라이애시 치환하지 않은 배합이 기타의 경우에 비해 상대적으로 큰 상대동탄성계수 값을 보이고 있고, 염화나트륨 용액에 침지한 경우는 그 반대의 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 개별적인 배합을 비교할 경우 염화나트륨 용액에 침지할 경우 동결융해 저항성의 변화 경향은 뚜렷이 나타나지 않았으며, 다만 각 배합에 따른 상대동탄성계수를 침지조건에 따라 평균한 결과는 염화나트륨 용액에 침지한 경우가 동결융해작용에 따른 동탄성계수 감소율이 수중 양생한 경우 보다 약간 큰 것으로 나타났다.

**Table 4.** Relative dynamic elastic modulus(%)

| Kinds   | Water curing | Immersion with NaCl solution |
|---------|--------------|------------------------------|
| H1FA00  | 72.51        | 83.89                        |
| H1FA20  | 94.23        | 71.28                        |
| H5FA00  | 96.01        | 72.39                        |
| H5FA20  | 75.69        | 90.70                        |
| Average | 84.61        | 79.56                        |

#### 4. 결론

본 연구는 콘크리트 중으로의 염소이온 침투특성을 규명하기 위해 시멘트 종류 및 물-시멘트 비율 주요 실험변수로 하여 5% 염화나트륨 용액에 대한 침지실험을 수행하였으며, 특히 탄산화 및 동결융해가 복합적으로 작용한 경우에 대한 실험을 실시하여 이들 영향 요인에 따른 복합열화와 관련된 기초적인 실험자료를 확보하였다.

본 연구로부터 도출된 주요 연구결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

1) 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우 콘크리트 내부로의 염소이온 침투는 가속된다. 이것은 탄산화된 부분의 프리텔 염이 유리되어 염소이온의 농도 구배가 커지기 때문에 염소 이온의 확산성이 커지는 것으로 판단되며 이 경우 표면으로부터 1cm이내의 영역의 염소 이온 농도는 동일 조건의 비탄산화 시편보다 낮아지는 경향을 보인다.

2) 플라이애시를 혼입하는 경우 단일조건에서의 염소이온 침투억제에 매우 효과적이다. 다만, 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우 일정 깊이까지의 염소이온 농도는 매우 높은 경향을 나타내지만 특정한 한계깊이 이상의 영역에서는 침투된 염소이온 농도가 급격히 낮아지므로 탄산화가 복합된 경우에도 플라이애시 혼입에 따른 철근부식 증가 영향은 적을 것으로 판단된다.

3) 동결융해에 따른 콘크리트의 성능저하가 미세한 경우에도 내부로 침투되는 염소이온 농도는 매우 크게 나타났으며 이에 따라 해양구조물의 경우 동결융해에 따른 철근부식 영향에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 환경대학교 2006학년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

#### 참고문헌

- 1) R. F. M. Bakker, "Corrosion of steel in concrete", report of the technical committee 60-CSC, RILEM, 1988.
- 2) Kdroff, J., Hilsdorf, H. K., "Performance Criteria for Concrete Durability", Rilem report 12, E & FN Spon, London, 1995.
- 3) James R. Clifton, Lawrence I. Knab, "Service Life of Concrete", ISTIR 89-4086, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, 1989.
- 4) James R. Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete", NISTIR 4712, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, 1991.
- 5) New Approach to Durability Design, CEB Bullitin d'Information No238, May. 1997.
- 6) 김은겸, "콘크리트 구조물의 염화물 이온 침투 거동 해석", 한국콘크리트학회 논문집, 제9권, 제6호, pp. 233~241, 1997.
- 7) 문한영 외, "해수 침식을 받은 콘크리트의 성능저하 원인 규명", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제1A호, 1, pp. 171~179, 2002.
- 8) ASTM C1152-97, "Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete", 1997.
- 9) ASTM C1218-97, "Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete", 1997.
- 10) KS F 2530.
- 11) N. Otsuki, S. Nagataki, K. Nakashita, "Evaluation of AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials", ACI M. J., pp. 587~592, 1992.
- 12) "해양환경하에 폭로한 탄산화된 콘크리트의 염화물 침투에 관한 고찰", 콘크리트공학 연차논문집, 제9권, 제1호, 1995.