# 養生條件이 輕量骨材 콘크리트의 ASR에 미치는 影響

## Effect of Curing Conditions on the ASR of Lightweight Aggregate Concrete

成 瓚 鏞*·金 成 完*·閔 正 基*
Sung, Chan Yong·Kim, Sung Wan·Min, Jeong Ki

## Summary

This study is to analyze effect of exposure environment and mode of ASR on the engineering properties of synthetic lightweight aggregate concrete, such as dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity.

The results of this study are summarized as follows;

1. The expansion rate of each exposure environment in 38℃ and NaCl 4% solution was shown higher than in 20℃ and normal water. The expansion rate of each exposure mode was largely shown in order of full immersion, wetting/drying, half immersion.

2. The dynamic modulus of elasticty and ultrasonic pulse velocity of each exposure environment in 38℃ and NaCl 4% solution was shown less than in 20℃ and normal water. The dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity of each exposure mode was shown smaller in order of full immersion, wetting/drying, half imersion.

3. The relation between dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity was highly significant. The dynamic modulus of elasticity was increased with increase of ultrasonic pulse velocity. The decreasing rate of the dynamic modulus of elasticity was shown 2.1~3.4 times higher than the ultrasonic pulse velocity at each age, exposure environment and mode, respectively.

4. The expansion of each exposure environment and mode was increased with increase of curing age. The dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity of those concrete was increased with increase of curing age. At the curing age 28 days, the highest

* 忠南大學校 農科大學

키워드 : ASR, Fused Silica, 輕量骨材, 動彈性係數, 超音波振動速度, 養生環境과 方法, 膨脹

properties was showed at each type concrete, it was gradually decreased with increase of curing age.

Specially, at the curing age 98 days of full immersion, the rate of expansion of type D was shown 3.95 times higher than the type A. But the dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity was decreased 17% and 8.3%.

## I. 緖 論

콘크리트는 複合體로서 그 性能은 構成要素에 의해서 많은 影響을 받는다. 이와같은 性能은 본래 設計된 狀態로 維持되어야 하나, 그 構成要素의 質이나 養生環境은 콘크리트 性質에 큰 影響을 준다. 일반적으로 콘크리트 構造物의 性能弱化 原因은, 외부적으로는 철근의 腐蝕을 가져오는 鹽化物의 浸透이고, 내부적으로는 콘크리트의 龜裂을 助長하는 알칼리 실리카 反應(Alkali Silica Reaction : ASR)과 같은 化學作用으로 대별할 수 있다. 이같은 콘크리트의 性能低下는 콘크리트의 環境에 따라 크게 좌우되는데, 鹽化物이나 물의 浸透로 부터 콘크리트가 보호되면, 콘크리트의 性能은 設計한 대로 維持될 것이다.

콘크리트는 建設材料로서 세계적으로 가장 많이 이용되어 왔고, 그 品質向上을 위하여 많은 硏究가 遂行되어 왔다. 그 중에서도 콘크리트의 알칼리 실리카 反應은 많은 關心을 끌고 있는 分野이다. 콘크리트의 알칼리 실리카 反應은 1940년대 부터 硏究되기 시작하였으나,[4] 국내의 경우 이에 대한 硏究가 거의 없는 실정이다. 알칼리 실리카 反應은 콘크리트 속에 있는 알칼리와 骨材속에 있는 실리카의 內部化學反應으로써, 콘크리트의 비정상적인 膨脹의 原因이 되며,[8,11] 龜裂을 擴張시켜 強度의 低下는 물론 콘크리트 構造物에 매우 해로운 作用을 하는 것으로 알려져 있다.[3]

따라서, 본 硏究는 ASR에 의한 耐久性 實驗의 일환으로 養生環境과 方法에 따라 變化하는 人工輕量骨材 콘크리트의 膨脹, 동탄성 계수, 초음파진동속도 등의 工學的 性質을 규명하는데 있다.

## II. 材料 및 方法

### 1. 使用材料

#### 가. 시 멘 트

시멘트는 알칼리-실리카 반응을 촉진시키기 위하여 고 알칼리 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 화학성분은 Table-1과 같다.

**Table-1. Chemical composition of normal portland cement(%)**

| $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $K_2O$ | $Na_2O$ | $Fe_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21.09 | 4.84 | 63.85 | 3.32 | 3.09 | 1.13 | 0.29 | 2.39 |

#### 나. 細 骨 材

세골재는 직경이 4.75mm 이하인 천연모래와 알칼리를 거의 함유하지 않은 입경이 0.15~0.6 mm인 인공규사(fused silica)를 사용하였다. 인공규사의 사용량은 팽창과 균열이 가장 크게 나타나는 골재 전체의 양의 15%를 잔골재량으로 대치 하였으며,[8] 천연골재의 물리적 성질은 Table-2와 같고, 인공규사의 화학성분은 Table-3과 같다.

#### 다. 組 骨 材

조골재는 직경이 13.2mm 이하인 인공 경량골재를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table-4와 같고 주요 화학성분은 Table-5와 같다.

**Table-2. Physical properties of natural sand**

| Specific gravity | Maximum size(mm) | Absorption rate(%) | Fineness modulus | Unit weight ($t/m^3$) | Organic content |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.50 | 4.75 | 5.00 | 2.74 | 1.56 | Nil |

**Table-3. Chemical composition of fused silica(%)**

| $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | $K_2O$ | MnO | $TiO_2$ | MgO | $Na_2O$ | $P_2O_5$ | $SO_3$ | Loss on ignition |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 99.71 | 0.15 | 0.35 | 0.04 | 0.03 | <0.01 | 0.03 | <0.05 | <0.1 | <0.01 | <0.02 | 0.1 |

**Table-4. Physical properties of synthetic lightweight coarse aggregate**

| Fineness modulus | Unit weight ($t/m^3$) | Water absorption(%) | Type | Color | Pore size(mm) | Thickness (mm) | Maximum size(mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.98 | 0.83 | 13.1 | Honycomb | Gray brown | 0.001~0.15 | 0.15~0.50 | 13.2 |

**Table-5. Main chemical composition of synthetic lightweight coarse aggregate (%)**

| $SiO_2$ (silica) | $Al_2O_3$ (alumina) | CaO (lime) | Carbon in the form of unburnt fuel |
|---|---|---|---|
| 30~60 | 15~30 | 1~7 | <8 |

## 2. 供試體 製作

### 가. 콘크리트 配合

모든 공시체는 재령 28일의 압축강도가 460 $kg/cm^2$, 슬럼프가 75~100mm가 되도록 제조하였으며,[6] 그 배합설계 결과는 Table-6과 같다.

**Table-6. Mix design of concrete($kg/m^3$)**

| Cement | Sand | Lightweight coarse aggregate | Fused silica | Free water |
|---|---|---|---|---|
| 335 | 441 | 715 | 204 | 217 |

### 나. 供試體 製作

팽창시험 공시체는 75×75×300mm, 동탄성계수와 초음파 진동시험 공시체는 100×100×500mm로 제작하였다.

### 다. 供試體의 養生

공시체의 양생은 Table-7 및 Fig. 1과 같이 양생상자(20℃, 습도 96±2% 이상)에서 24시간 정치후 탈형하여 재령 7일까지는 20℃의 수중에서 양생하였으며, 양생환경(environment)과 방법(mode)을 다르게 하여 양생하였다. 양생환경은 20℃와 38℃의 물과 NaCl 4% 용액으로 하였으며, 양생방법은 완전침수(full immersion), 반침수(half immersion), 7일 간격으로 습윤/건조(wetting/drying) 상태로 하였다.

**Table-7. Exposure environment and mode of test variables**

| Curing age (days) | Exposure environment | Exposure mode |
|---|---|---|
| 1 | Humidity curing (20±1℃, 96±2% RH) | Humidity curing (20±1℃, 96±2% RH) |
| 2~7 | Full immersion (20℃/Water) | Full immersion (20℃/Water) |
| 8~98 | 20℃/Water<br>38℃/Water<br>20℃/NaCl 4%<br>38℃/NaCl 4% | Full immersion<br>Half immersion<br>Wetting/drying<br>(7days/7days) |

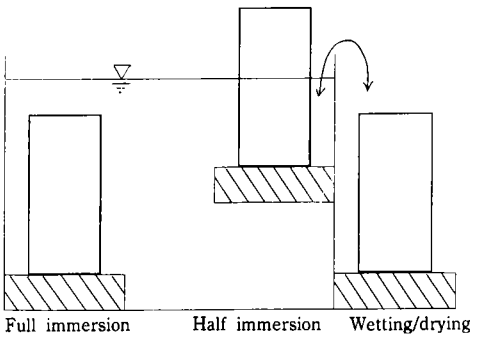


**Fig. 1. Exposure mode of test variables**

### 3. 試驗方法

#### 가. 膨脹試驗

소정의 재령에서 마이크로 메타로 측정하여 팽창율을 다음 식으로 산출하였다.[2)]

$$E.P. = \frac{1}{L} \times 100$$

여기서, E.P. = 팽창율(%)
L = 공시체 길이(mm)
I = 공시체의 증감 길이(mm)

#### 나. 動彈性試驗

소정의 재령에서 동탄성시험기로 측정하여 동탄성계수를 다음식으로 산출하였다.[5)]

$$D.M. = 40.81632n^2l^2\rho \times 10^{-12}$$

여기서, D.M. = 동탄성계수(kg/cm$^2$)
n = Hz
I = 공시체 길이(mm)
ρ = 공시체 밀도(kg/m$^3$)

#### 다. 超音波振動試驗

소정의 재령에서 초음파 진동 시험기로 측정하여 초음파 진동속도를 다음식으로 산출하였다[7)]

$$P.V. = \frac{L}{D \times 10^{-6}sec}$$

여기서, P.V. = 초음파진동속도(m/sec)
D = 측정치
L = 공시체 길이(m)

## Ⅲ. 結果 및 考察

### 1. 膨 脹

인공경량골재 콘크리트의 팽창시험결과를 나타내면 Table-8 및 Fig. 3과 같고, 팽창이 가장 크게 나타난 완전침수의 재령과 팽창율과의 관계를 도시하면 Fig. 2와 같다. Table-8과 Fig. 2 및 3에서 보는 바와 같이, 각 콘크리트의 팽창율은 재령이 증가함에 따라 증가하였으며, 각 재령에서 다같이 NaCl 4% 용액에서 양생한 콘크리트의 팽창율이 가장 크게 나타났다. 재령 98일에서 각 콘크리트의 팽창율은 완전침수, 반침수, 습윤/건조에서 다같이 Type D, B, C, A 순으로 크게 나타났으며, 가장 크게 나타난 Type D는 가장 작게 나타난 Type A 보다 3.95~5.28배의 팽창율을 보였고, 20℃ 보다 38℃에서, 수중에서 보다 NaCl 4% 용액에서 팽창율이 더 크게 나타났다.

공시체의 표면에 나타난 균열은 팽창이 큰 공시체에서 더 조밀하게 나타났고, 팽창이 증가함에 따라 균열폭도 증가되었다.

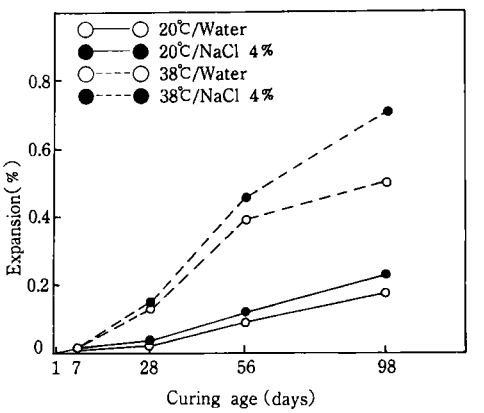


**Fig. 2. Relation between curing age and expansion(full immersion)**

**Table-8. Expansion under different environments and modes at each age(%)**

| Curing age (days) | Mode / Environment | Full immersion | Half immersion | Wetting/ drying | Remark |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Humidity | 0.000 | 0.000 | 0.000 | |
| 7 | 20℃/Water | 0.019 | 0.019 | 0.019 | |
| 28 | 20℃/Water | 0.028 | 0.021 | 0.024 | Type A |
| | 38℃/Water | 0.144 | 0.093 | 0.134 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 0.038 | 0.029 | 0.031 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 0.148 | 0.128 | 0.135 | Type D |
| 56 | 20℃/Water | 0.099 | 0.054 | 0.066 | Type A |
| | 38℃/Water | 0.401 | 0.268 | 0.384 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 0.131 | 0.101 | 0.110 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 0.458 | 0.402 | 0.424 | Type D |
| 98 | 20℃/Water | 0.179 | 0.121 | 0.146 | Type A |
| | 38℃/Water | 0.598 | 0.435 | 0.520 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 0.239 | 0.188 | 0.204 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 0.707 | 0.629 | 0.664 | Type D |

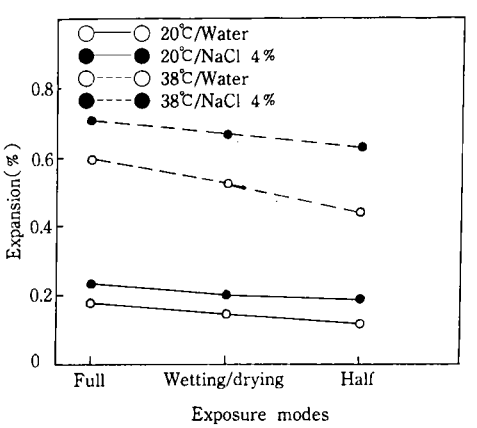


**Fig. 3. Relation between exposure modes and expansion at age of 98 days**

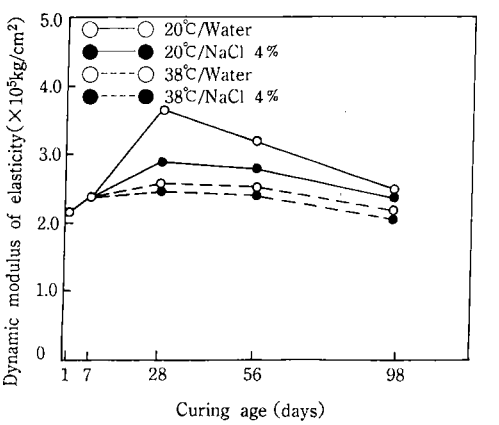


**Fig. 4. Relation between curing age and dynamic modulus of elsticity(full immersion)**

또한, 콘크리트의 ASR에 기인한 균열을 발생시키기 위해서는 수분과 적당한 온도를 필요로 한다는 사실을 알게 되었으며, 노출된 부분에서는 폭넓은 균열이 발생하였고, 보호된 부분에서는 아주 작거나 거의 없는 매우 다양한 균열 형태를 나타내었다.

ASR에 기인한 팽창을 억제하기 위한 방법으로는 무반응 골재의 사용, 알칼리 함량이 적은 시멘트 사용, 포졸란과 광물질과 같은 혼화제를 사용함으로써 팽창을 억제할 수 있을 것이다.[11] 한편, ASTM C-227[1]과 비교하여 보면, 무반응 골재를 사용한 재령 90일과 180일에서의 팽창한도를 0.05%와 0.1%로 규정하고 있으나, 본 실험에서는 팽창촉진을 위해 반응골재를 첨가하였던 바, 재령 98일의 팽창율이 양생환경과 방법에 따라 다르나 0.121~0.707%의 팽창율을

보여, 온도와 NaCl이 콘크리트의 팽창율을 증가시키는 요인으로 나타났다.

## 2. 動彈性 係數

인공경량골재 콘크리트의 동탄성 시험결과를 비교하면 Table-9 및 Fig. 5와 같고, 동탄성계수가 가장 작게 나타난 완전침수의 재령과 동탄성계수와의 관계를 도시하면 Fig. 4와 같다. 여기서 보는 바와 같이, 각 콘크리트의 동탄성계수는 재령이 증가할수록 증가하여 재령 28일에서 최대치를 나타내었다. 그 이후부터는 점차 감소하였는데, 완전침수, 습윤/건조, 반침수 순으로 작게 나타났으며, 각 재령과 양생방법에서 다같이 Type D, B, C, A의 순으로

**Table-9. Dynamic modulus of elasticity under different environments and modes at each age** ($\times 10^3 kg/cm^2$)

| Curing age (days) | Mode / Environment | Full immersion | Half immersion | Wetting/ drying | Remark |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Humidity | 216 | 216 | 216 | |
| 7 | 20℃/Water | 239 | 239 | 239 | |
| 28 | 20℃/Water | 369 | 428 | 409 | Type A |
| | 38℃/Water | 257 | 298 | 286 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 289 | 335 | 321 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 254 | 295 | 282 | Type D |
| 56 | 20℃/Water | 321 | 372 | 356 | Type A |
| | 38℃/Water | 250 | 290 | 277 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 280 | 324 | 310 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 245 | 284 | 272 | Type D |
| 98 | 20℃/Water | 248 | 287 | 275 | Type A |
| | 38℃/Water | 217 | 251 | 241 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 235 | 273 | 261 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 206 | 239 | 229 | Type D |

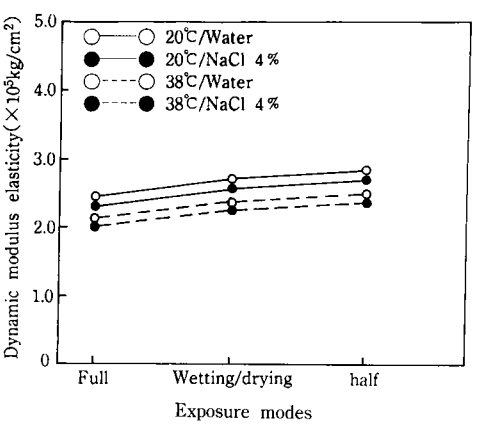


**Fig. 5. Relation between exposure modes and dynamic modulus of elasticity at age of 98 days**

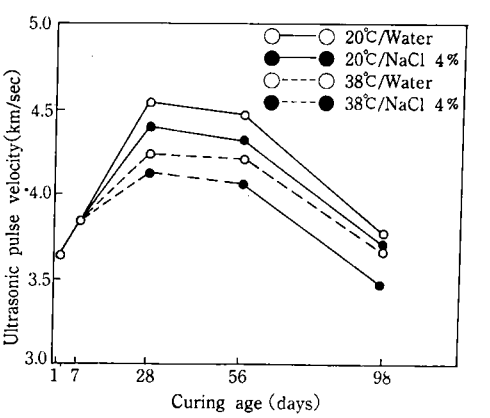


**Fig. 6. Relation between curing age and ultrasonic pulse velocity(full immersion)**

작게 나타났다.

또한, Table-9에서 보는 바와 같이, 동탄성계수의 저하량이 가장 크게 나타난 완전침수의 Type D에서는 Type A에 비하여 재령 28일, 56일, 98일에서 각각 30.1%, 23.7%, 16.9%의 저하량을 보여줌으로써, 단기재령일수록 손실율이 크다는 결과를 얻었다.

이는 동탄성계수가 팽창으로 인하여 초기재령에서 매우 예민한 반응을 나타냈다는 보고[9]와 같은 결과라 하겠다. 이와같은 결과로 동탄성계수의 손실속도와 양은 골재의 성질 및 양생환경과 방법에 크게 좌우되며, 이는 콘크리트의 균열특성과 내구성에 미치는 중요한 변수가 된다는 사실을 확인할 수 있었다.

## 3. 超音波振動速度

인공경량골재 콘크리트의 초음파진동속도 시험결과를 비교하면 Table-10 및 Fig. 7과 같고, 초음파진동속도가 가장 작게 나타난 완전침수의 재령과 초음파속도와의 관계를 도시하면 Fig. 6과 같다. 여기서 보는 바와 같이, 각 콘크리트의 초음파진동속도는 재령이 증가할수록 증가하여 재령 28일에서 최대치를 나타내었다. 그 이후부터는 점차 감소하였고, 완전침수, 습윤/건조, 반침수 순으로 작게 나타났으며, 각 재령과 양생방법에서 다같이 Type D, B, C, A 순으로 작게 나타났다.

그리고 Table-10에서 보는 바와 같이, 초음

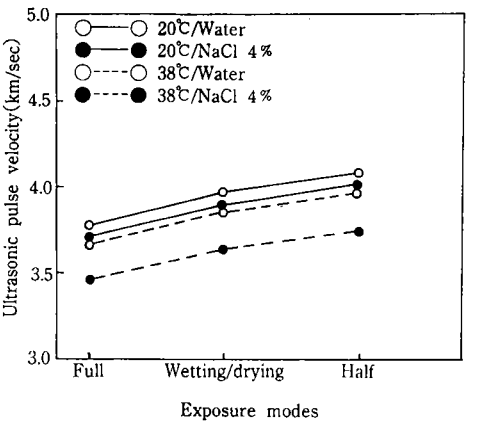


**Fig. 7. Relation between exposure modes and ultrasonic pulse velocity at age of 98 days**

**Table-10. Ultrasonic pulse velocity under different environments and modes at each age (km/sec)**

| Curing age (days) | Mode / Environment | Full immersion | Half immersion | Wetting/ drying | Remark |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Humidity | 3.644 | 3.644 | 3.644 | |
| 7 | 20℃/Water | 3.843 | 3.843 | 3.843 | |
| 28 | 20℃/Water | 4.537 | 4.899 | 4.763 | Type A |
| | 38℃/Water | 4.238 | 4.577 | 4.449 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 4.397 | 4.748 | 4.616 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 4.143 | 4.474 | 4.350 | Type D |
| 56 | 20℃/Water | 4.461 | 4.817 | 4.684 | Type A |
| | 38℃/Water | 4.197 | 4.532 | 4.406 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 4.313 | 4.658 | 4.528 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 4.046 | 4.369 | 4.248 | Type D |
| 98 | 20℃/Water | 3.771 | 4.072 | 3.959 | Type A |
| | 38℃/Water | 3.678 | 3.972 | 3.861 | Type B |
| | 20℃/NaCl 4% | 3.686 | 3.980 | 3.870 | Type C |
| | 38℃/NaCl 4% | 3.458 | 3.734 | 3.630 | Type D |

파진동속도의 저하량이 가장 크게 나타난 완전침수의 Type D에서는, Type A에 비하여 재령 56일과 98일에서 각각 9.4%와 8.3%의 저하량을 보여줌으로써, 동탄성계수의 성질과 유사하게 단기재령에서 손실율이 크다는 결과를 얻었다. 이와같은 현상은 초음파진동속도가 장기재령보다 단기재령에서 손실율이 크게 나타났다는 연구보고[10]와 같은 결과라 하겠다.

이러한 결과로 미루어 볼 때, 초음파진동속도는 동탄성계수와 같이 알칼리 실리카 반응에 있어서 골재의 성질과 양생환경 및 방법에 크게 좌우된다는 사실을 알 수가 있었다.

## 4. 動彈性係數와 超音波振動速度와의 關係

동탄성계수와 초음파진동속도와의 관계를 도시하면, Fig. 8과 같이 고도의 유의성을 보였으며, 이는 특성상 서로 밀접한 상관관계가 있다는 연구보고[9]와 같은 결과라고 하겠다.

Table-9와 10에서 보는 바와 같이, 동탄성계수와 초음파진동속도는 다같이 ASR에 의한 콘크리트 내부구조에서 나타나는 변화에 매우 민감함을 알 수 있다. 이러한 결과들은 ASR에 의해 발생하는 화학적 반응에 기인한 공학적 성질의 변화를 추정할 수 있는 매우 유용한 비파괴 시험방법으로서, 콘크리트 성능을 검증하는데 좋은 방법이라 할 수 있다.

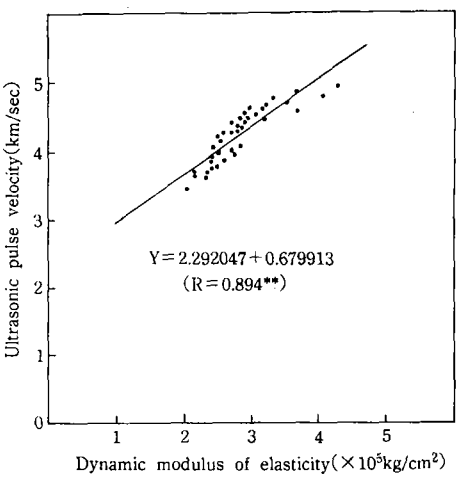


**Fig. 8. Relation between dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity**

한편, 재령 및 양생환경과 방법에 관계없이 동탄성계수는 초음파진동속도가 증가할 수록 증가하였다. 또한, 동탄성계수의 감소율은 초음파진동속도 감소율보다 2.0~3.5배 정도 크게 나타났는데, 이러한 결과는 콘크리트 파괴시 초음파진동속도 보다 동탄성계수의 감소율이 크다는 것을 입증해 주는 것이다.

## 5. 動彈性係數, 超音波振動速度와 膨脹과의 關係

팽창과 동탄성계수, 초음파진동속도와의 상호관계는 Table-8, 9 및 10에서 보는 바와 같이 팽창은 재령이 증가함에 따라 증가하였다. 동탄성계수와 초음파진동속도는 재령 28일까지는 증가하였으나 그 이후 부터는 점차 감소하였으며, 그 감소율은 완전침수, 습윤/건조, 반침수 순으로 크게 나타났다.

재령 28일과 98일 사이에서 팽창율이 가장 크게 나타난 완전침수의 공학적 성질 변화에서, 20℃ 수중양생에 비하여 이 기간 동안의 팽창율은 395~528%까지 증가된 반면, 동탄성계수는 17.0~31.2%, 초음파진동속도는 8.3~8.7% 감소되어 팽창율의 증가에 비하여 완만한 감소추세를 보였다. 이는 ASR에 의해 콘크리트에서 나타나는 공학적, 물리적 성질 변화는 서로 모순된 2가지의 현상, 즉 시멘트 페이스트의 계속적인 수화와 팽창 반응에 의한 영향 때문이라고 하겠다.

따라서, 알칼리 실리카 반응이 일어난 콘크리트 구조물은 대기보다는 수중에서, 수중에서도 온도가 높을수록 더 많은 균열과 큰 팽창을 발생시킴으로써, 여러가지 물리적, 역학적 성질을 저해하므로, 이러한 저해요인을 차단함으

로써 콘크리트의 내구성과 여러가지 성능저하를 방지할 수 있을 것이다.

## Ⅳ. 結 論

본 연구는 양생환경과 방법에 따른 알칼리-실리카 반응이 인공경량골재 콘크리트의 팽창, 동탄성계수, 초음파진동속도 등의 공학적 성질에 미치는 영향을 분석하고자 시도된 것으로서, 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 팽창율은 각각의 양생환경에서 다같이 20℃ 보다 38℃에서, 수중에서 보다 NaCl 4% 용액에서 더 크게 나타났으며, 양생방법에서도 완전침수, 습윤/건조, 반침수 순으로 크게 나타났다.

2. 동탄성계수와 초음파진동속도는 각각의 양생환경에서 다같이 20℃ 보다 38℃에서, 수중에서 보다 NaCl 4% 용액에서 더 작게 나타났으며, 양생방법에서도 완전침수, 습윤/건조, 반침수 순으로 작게 나타났다.

3. 동탄성계수와 초음파진동속도는 서로 밀접한 상관관계가 인정되었으며, 동탄성계수는 초음파진동속도가 증가할 수록 증가하였다. 또한, 동탄성계수의 감소율은 초음파진동속도 감소율보다 각각의 재령, 양생환경과 방법에 따라 다르나 2.1~3.4배 크게 나타났다.

4. 모든 양생환경과 방법에서 다같이 팽창율은 재령이 증가함에 따라 증가하였고, 동탄성계수와 초음파진동속도는 재령 28일까지는 증가하였으나, 그 이후 부터는 점차 감소하였다. 특히, 재령 98일 완전침수에서 Type D는 Type A보다 팽창율은 3.95배 증가한 반면, 동탄성계수와 초음파진동속도는 각각 17%와 8.3%의 감소율을 나타내었다.

## 參 考 文 獻


1. ASTM C 227-81. 1986. Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations(mortar bar-method). ASTM, Philadelphia : 157-162.
2. BS 1181. 1970. Methods of testing hardened concrete for other than strength. British Standards Institution.(Part 5) : 38.
3. Lenzner, D. and U. Ludwig. 1979. The detection of alkali-silica reaction in concrete structures. Zement-kalk-Gips. 10 : 222-226.
4. Stanton, T. E. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. ASCE : 1781-1811.
5. Swamy, R. N. and G. Rigby. 1971. Dynamic properties of hardened paste, mortar, and concrete. RILEM. 4(19) : 13-40.
6. Swamy, R. N. and G. H. Lambert. 1983. Mix design and properties of concrete made from PFA coarse aggregate and sand. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. 5(4) : 263-275.
7. Swamy, R. N. and A. H. Al-Hamed. 1984. The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete. Journal of the ACI. 81(2) : 247-276.
8. Swamy, R. N. and M. M. Al-Asali. 1988. Expansion of concrete due to alkali-silica reaction. ACI Materials Journal. 85(1) : 33-40.
9. Swamy, R. N. and M. M. Al-Asali. 1988. Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction. ACI Materials Journal. 85(5) : 367-374.
10. Swamy, R. N. and M. M. Al-Asali. 1989. Effect of alkali-silica reaction on the structural behavior of reinforced concrete beams. ACI Structural Journal. 86(4) : 451-459.
11. Swamy, R. N. 1990. Alkali-silica reaction and concrete structures. Structural Engineering Review. 2 : 89-103.