

알칼리 골재반응성 평가시험 방법의 이모저모

이 중 열 (주)리에 상임고문

(번역자 註) 콘크리트에서 알칼리골재반응은 내구성에 악 영향을 주는 일종의 암이라고 표현할 수 있다. 잠복기간이 길고, 균열이 나타나는 시기도 매우 오래 걸리기 때문이다. 이러한 현상이 1940년대 알려지면서, 미국 ASTM에는 1950년에 모르타르봉 시험방법이, 1952년에 화학법이 각각 시험방법 규격으로 제정되었다. 국내에서는 한국도로교통연구원을 비롯한 전문연구기관 등에서 화학법 및 모르타르봉 방법으로 연구한 결과, 화학법에서는 일부 골재가 반응성이 있는 것으로 보고 되었으나, 모르타르봉 방법에서는 대상 골재에서 유해가능성이 낮은 것으로 보고되었다. 또한, 그동안은 구조물에서 알칼리골재반응에 의한 피해사례도 보고되지 않았고, 골재의 품질도 양호한 것으로 알려져 왔다. 그러나, 최근 들어 서해안 고속도로 일부 구간에서 알칼리골재반응에 의한 포장노면에 균열 및 스폴링 등 심각한 피해사례가 보고되면서 국내에서도 관심이 높아지기 시작하였다. 특히 일본에서는 제63회 시멘트기술대회(2009년 5월 22일)에서 팽창기구의 재검토에 대한 이야기가 패널토의에서 제기되었고, 일부 시험방법의 이야기도 나왔다. 그동안의 골재는 현재의 규격만으로도 설명이 가능했는데, 최근의 골재들은 설명이 잘 안 되는 경우가 종종 있다는 이야기다. 이런 이야기들은 일본 지인들과 기술교류를 하면서 많은 이야기를 나누었고, 또한 우연히 문헌들을 독해하던 중 이런 이야기들을 경험한 문헌인 일본 태평양시멘트에서 발간되는 CEM'S 자료를 찾았기에 발췌 정리한 것이다.

1. 서론

알칼리골재반응은 콘크리트중의 알칼리와 골재가 반응하여 콘크리트가 팽창 열화하는 반응으로, 알칼리실리카반응과 알칼리탄산염반응으로 구분된다. 일본에서 보면 알칼리골재반응은 알칼리실리카반응이며, 알칼리와 골재중에 있는 어떤 종류의 실리카 광물이 반응, 알칼리실리카 겔을 생성하며, 이 겔이 흡수 팽창하므로써 콘크리트가 균열 열화하는 것으

로 설명된다. 관련 전문서적들을 읽다 보면, 키워드로 나오는 단어들인 실리카, 알칼리, 물 3개로 비교적 단순해서 쉽게 해결될 수 있다는 마음도 생기곤 한다. 또한, 골재의 반응성 판정은 「무해」와 「무해하지 않다」로 2개로 나누어져, 이것 또는 분명하게 되어 있기도 하다.

그러나, 실제로는 골재의 반응성을 평가하는 시험 방법으로 기타의 것들이 제안되어 있고, 실제로 골재의 반응성을 평가해서 보면, 이해할 수 없는 경우

가 종종 발견되기도 한다. 따라서 여기에서는 골재의 반응성 평가시험 방법에 대해서 그동안 종합된 자료들을 살펴보고자 한다.

2. 알칼리실리카 반응성 평가시험 방법의 변천

알칼리실리카반응은 미국에서 1940년에 Stanton T.E.:Expansion of concrete Through reaction between Cement and Aggregate, Proceedings American Society of Civil Engineers, Vol. 66, pp. 1781 ~ 1811, 1940에 의하면, ① 골재중에 특정 광물의 원인으로 나타나고, ② 이 광물과 알칼리와의 화학반응이 있고, ③ 팽창해서 콘크리트를 열화시키는 현상으로 나타나는 것이 확인되었다.

이것으로부터 골재의 반응성을 평가하는 방법은 크게는 화학법과 모르타르 bar법(팽창을 측정함)으로 대별되고, 먼저 모르타르 바 방법은 1950년에 ASTM C-227 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Mortar-bar Method)로서, 계속해서 화학법이 1952년 ASTM C-289 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Chemical Method)」로서 제정되었다.

일본에서는, 1980년대에 알칼리골재반응 피해사례 조사결과들을 현실적으로 받아들여, 앞서의 ASTM의 시험방법을 기초로 하여 1986년 JIS A 5308 「레디믹스트 콘크리트」의 부속서 7에 화학법이, 부속서 8에 모르타르 바 방법이 평가시험 방법으로 각각 제정되었다. 골재의 반응성의 판정은 부속서 1에 기술되어 있고, 주로 모르타르 바 방법의 결과를 우선하도록 기술되어 있다. 그러나 모르타르 바 방법은 판정하는데 6개월이 소요되고, 결과가 나올 무렵이면, 이미 제품은 사용된 결과가 되기 때문에, 2002년 8월 1일 국토교통성의 통달에는, 골

재의 반응성을 JIS A 1145 골재의 알칼리실리카 반응성 시험방법(화학법)으로 평가하는 것을 원칙으로 하고 있고, 또한 JIS A 1146 골재의 알칼리실리카 반응시험(모르타르 바 방법)에 의한 경우에는, JIS A 1804 「콘크리트 생산공정관리용 시험방법-골재의 알칼리실리카 반응성 시험방법(신속법)」으로 확인하는 것으로, 판정의 즉시성을 중시하여 변천하여 왔다.

3. 화학법, 모르타르 바 방법, 신속법의 비교

화학법, 모르타르 바 방법, 신속법, 어느 경우도 골재의 알칼리실리카 반응성을 평가하는 시험방법들이지만, 시료 조정법, 반응법, 판정법은 크게 다르다. 화학법은, 미분쇄한 골재를 NaOH용액으로 끓이고, 용출한 실리카량과 용출하는데 필요한 NaOH량의 비에 따라 판정하는 방법으로, 생성한 알칼리실리카 겔의 알칼리 실리카 비율이 겔의 팽창과 밀접한 관계의 개념을 기초로 한 것이다. 모르타르 바 방법은, 반응을 직접 팽창율로서 측정하는 방법으로, 반응의 촉진요건은 약간의 고온, 고알칼리 상태로 하는 것이다.

이 때문에 촉진효과는 약하여 판정하는데 6개월이 소요된다. 신속법은 현저하게 높은 고온, 고알칼리로서 반응을 촉진시켜 단기간에 판정을 가능하게 한 것이며, 또한 패시엄(Passium)을 고려하고 있다. 각 시험방법간 차이점과 개요를 <표-1>에 나타내었다.

4. 각 시험법간 판정과 상관성

<그림-1>에는, ASTM C 289 및 JIS A 1145의 해설에 기술되어 있는 모르타르 바 방법과 화학법의 판정의 관계를 나타내었다.

ASTM의 구분은 시멘트의 알칼리량 1.38%의 모

〈표-1〉 화학법, 모르타르 바 방법, 신속법의 차이

시험법 항목	JIS A 1145 화학법	JIS A 1146 모르타르 바 방법	JIS A 1804 신속법
채취 골재량	40kg	40kg	특별한 규정이 없음
분쇄입도 조정	<ul style="list-style-type: none"> 10kg 을 축분채취 5mm 이하로 분쇄, 이것으로부터 1kg 을 축분 채취. 미분쇄해서 150 ~ 300μm 정도를 채취. 수세건조. 1시료 25g 	조골재는 분쇄, 세골재는 체통과해서, 5 ~ 2.5mm 10% 2.5 ~ 1.2mm 25% 1.2 ~ 0.6mm 25% 0.6 ~ 0.3mm 25% 0.3 ~ 0.15mm 15%로 한 것의 1시료 1,350g	분쇄해서, 수세건조, 1시료 5 ~ 2.5mm 60g 2.5 ~ 1.2mm 150g 1.2 ~ 0.6mm 150g 0.6 ~ 0.3mm 150g 0.3 ~ 0.15mm 90g의 합계 600g과 JIS 표준사 600g
시멘트 R ₂ O조정	-	R ₂ O = 0.65 ± 0.05% Na ₂ O : K ₂ O = 1 : 2 ± 0.5%의 시멘트 600g NaOH용액을 이용한 R ₂ O = 1.2%로 조정	R ₂ O = 0.65 ± 0.05% Na ₂ O : K ₂ O = 1 : 2 ± 0.5%의 시멘트 600g NaOH용액을 이용한 R ₂ O = 2.5%로 조정
물량 NaOH농도	25ml 1N	300g 0.77N*	300g 1.61N*
NaOH/시료	1mmol/g	0.17mmol/g*	0.81mmol/g**
반응온도 시간	80°C 24시간	40°C 6개월	127°C(오토클레이브) * 4시간
「무해」 판정	Rc > Sc	팽창 ≤ 0.01%	팽창율 ≤ 0.01% 상대동탄성계수 ≥ 85% 초음파전달 속도율 ≥ 95%

* R₂O = 1.2%, 2.5%가 전 NaOH로서 혼련수 300g에 용출한 것으로 계산

** R₂O = 1.2%, 2.5%를 NaOH로 환산하여, 시료중량에서 제외한 값

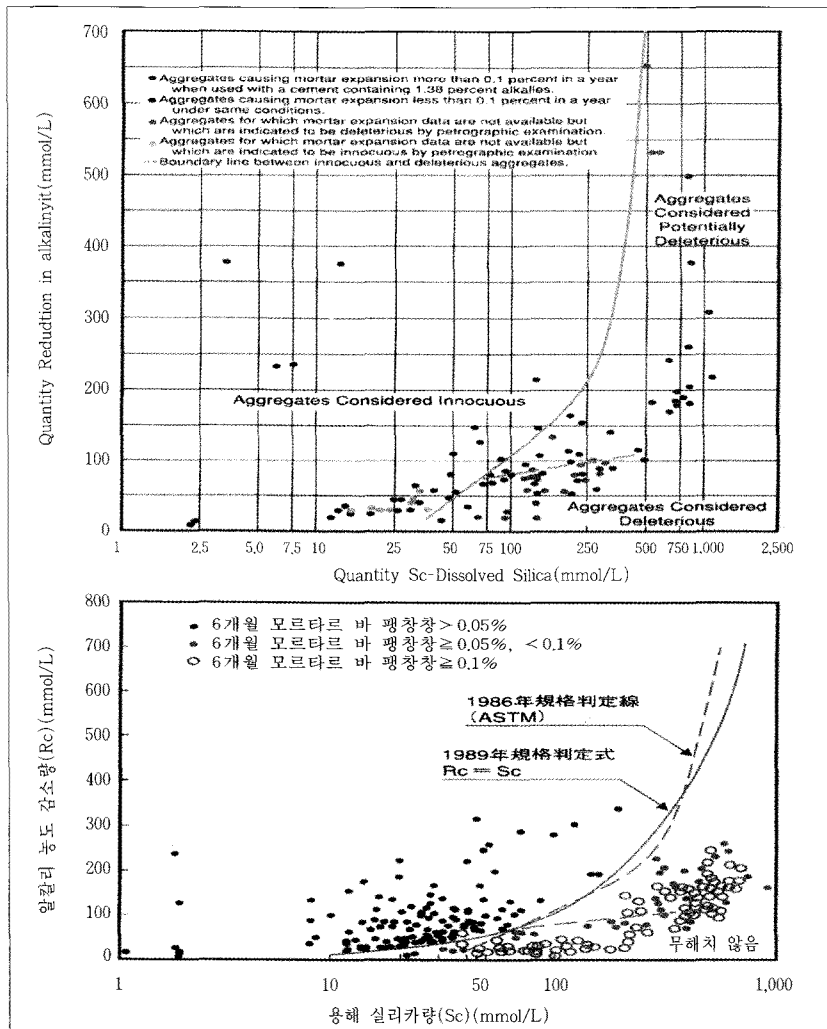
르타르 바의 팽창이 ● 0.1% 이상의 것, ○ 0.1% 이하의 것, 광물학적 관찰에 의해 X-ray 반응광물만 인정할 수 있는 것 ◎ 반응광물이 인정되지 않는 것으로 되어, 판정선에서는 거의 「무해」와 「무해하지 않다」로 나누어진다. 이것에 대해서, 일본의 골재에서는 화학법으로 「무해」로 판정된 것 중, 모르타르 바 방법에서는 「무해하지 않다」로 판정된 것이 하나의 일례이고, 반대로 화학법에서 「무해하지 않다」로 판정되었는데, 모르타르 바 방법에서는 「무해」로 판정된 것이 다수 있다.

〈그림-2〉에 JIS A 1804의 해설의 화학법, 신속법, 모르타르 바 방법의 관계 및 신속법과 모르타르 바 방법의 길이변화의 관계를 나타내었다. 화학법에서 「무해」로 판정된 것이, 신속법에서는 「무해하지 않

다」로 판정된 것은 기술되어 있지 않다.

이 결과로만 생각해 본다면, 반응조건의 엄격한 순서는, 화학법 > 신속법 > 모르타르 바 방법이라고 말할 수 있다. 그러나 모르타르 바 방법의 길이변화와 신속법의 길이변화와의 관계를 보면 상관계수도 낮고 1:1로 대응이 되지 않는 것이 알려져 있다. 이것은, 반응성광물의 종류에 따라, 온도감응성과 알칼리농도 감응성이 각각 다른 것에 의한 것이라고 생각된다.

中村은, 사암, 찻트, 안산암 3종류의 쇄석(20 ~ 13mm) 각 1kg을 온도농도를 변화한 500ml의 NaOH용액에서 24시간 끓이고, 용액중의 용출 용해 실리카량을 측정하여 결과를 〈그림-3〉에 나타내었다. 여기에서 보면 사용한 찻트는, 80°C에서는



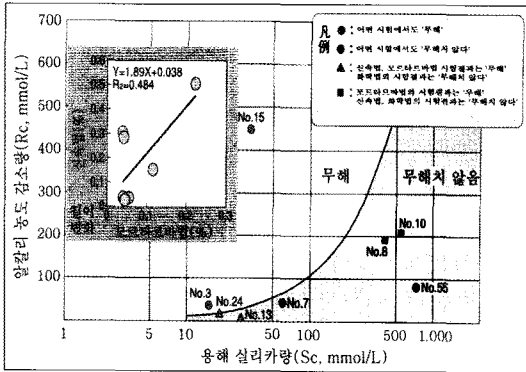
〈그림-1〉 ASTM C-289 및 JIS A 1145의 해설의 화학법과 모르타르 바 법의 판정 상관성

NaOH 농도에 대한 감응성이 둔감하고, 98℃에서는 0.5N, 1.0N, 2.0N로 비례해서 감응도가 증가하고 있다. 이것에 대해서, 안산암은, 80℃에서는 0.5N과 1.0N에서 감응도가 다른데 대해, 98℃에서는 농도에 대한 감응도의 변화가 거의 보이지 않는 등 골재에 따라 온도 및 알칼리농도에 대한 감응성이 다른 것을 확인한바 있다. 다양한 골재 중에는, 다른 온도, 알칼리농도에서 실시된, 각각 시험의 결과가 반드시 앞서의 순위와 일치하지 않는 것이 다수 존재

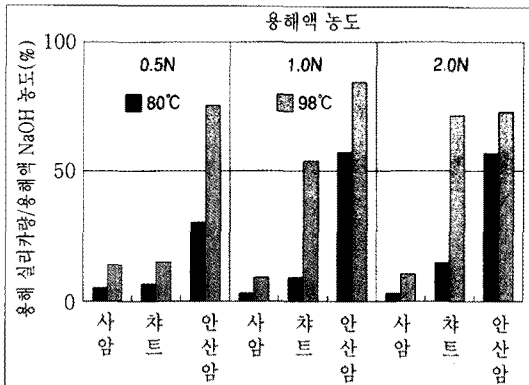
하고 있을 가능성이 있다.

5. 시험오차

반응성의「무해」, 「무해하지 않다」의 판정은 준엄하게 1회의 시험결과가 1mmol/L, 0.01%를 어긋나면, 그 골재는 판정이 다르게 된다. 시험조작에서 일어나는 오차나 반복정도가, 판정에 어느 정도 영향을 미치고 있는지에 대해서 경험적인 사항들을 기술



〈그림-2〉 화학법, 신속법, 모르타르 바 방법의 관계 (JIS A 1804해설)



〈그림-3〉 각종 쇄석으로부터 NaOH용액으로의 용해 실리카량

하고자 한다.

(1) 화학법

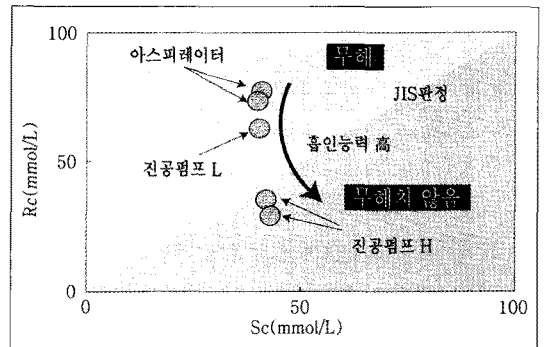
화학법에서 오차를 크게 가져오는 과정은, 여과조작에 있다고 지적되고 있다. 石川 등은 반응용기 바닥의 잔사에 함유되어 있는 간극수 및 상등수의 알칼리 감소량과 실리카 용출량을 측정해 보면, 각각의 값들이 큰 차이가 있다고 지적하고 있다.〈표-2〉 또한, 中村은 과도한 흡인이 여액의 농축을 가져와 Rc가 적게 되는 것을 경험했다.〈그림-4〉

이와 같은 것에 주의를 기울이면서 시험한 예는, 모래에 대한 경험은 풍부하지만 분석기술을 계통적으로 배울 수 없는 사람이 7회 시험한 결과를 〈그

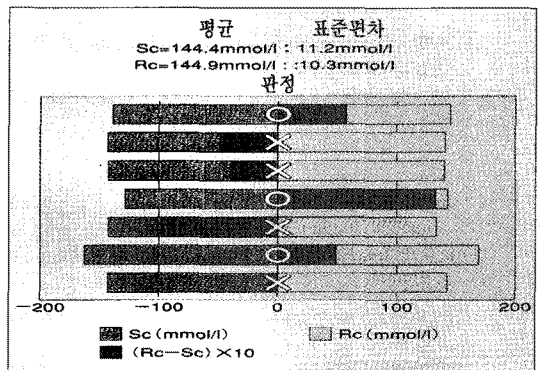
〈표-2〉 간극수와 상등수의 차이

시료	측정값	Rc(mmol/l)	Sc(mmol/l)
유문암	상등수	27	28
	간극수	20	59
파이렉스 유리	상등수	69	488
	간극수	-125	1,190

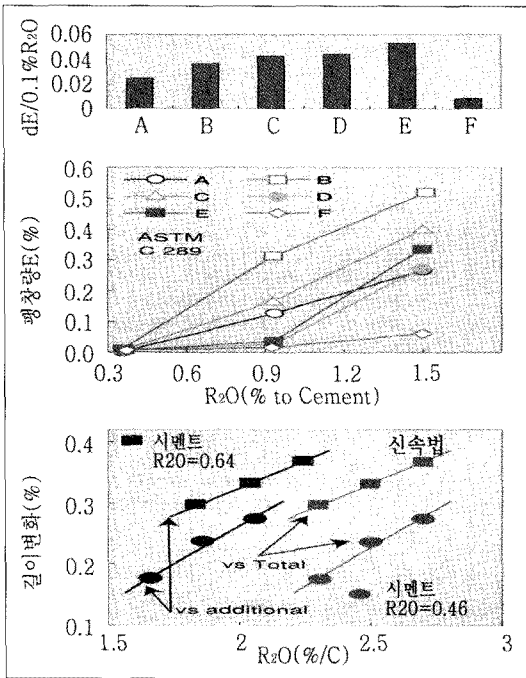
림-5)에 나타내었다. 판정은 「무해」 3회, 「무해하지 않다」 4회, 7회 평균치는 「무해」라는 미묘한 결과가 나왔다. 판정은 「무해」가 「무해하지 않다」로 2개중 1개를 선택하는 것이 아니고, 그 판정에 의해 마치 천국과 지옥의 차이가 있으니까 고민되는 것이다. 이와 관련하여, 이 모래는 신속법에서는 「무해하지 않다」로 판정되어 엄한 서열인 화학법·신속법에도 반하는 것이었다.



〈그림-4〉 흡인펌프 차이에 의한 화학법 결과의 차이



〈그림-5〉 화학법의 반복시험 오차

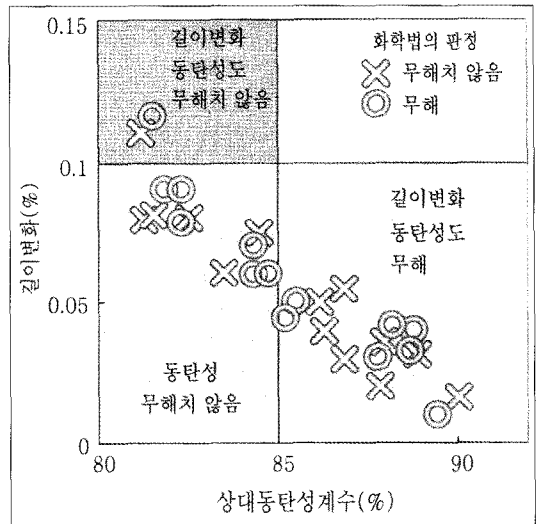


〈그림-6〉 팽창량에 미치는 알칼리의 영향

(2) 신속법·모르타르 바 방법

신속법 및 모르타르 바 방법은, 시멘트와 골재의 상호작용이며, 언제든지 시멘트는 동일한 것이 아니라면 당연히 시험결과가 산포를 하게 된다. 시멘트의 알칼리량이 팽창량을 크게 좌우하는 것은 잘 알려져 있다. 이 때문에 시험에 이용한 시멘트의 알칼리량은 $R_2O=0.65 \pm 0.05\%$ 이고, $Na_2O:K_2O=1:2 \pm 0.5$ 로 규정되어 있다.

과연 이 변동에서는 어느 정도 팽창량이 움직일 것인가? 〈그림-6〉에 ASTM C 289법에서의 시험결과이지만, 알칼리량과 팽창량의 관계를 나타내었다. 모르타르 바 방법에서의 알칼리량은 1.2%이므로, 이 그림의 약 0.9~1.5% 사이의 팽창량(dE)/알칼리량 변화(0.1% R₂O)로 정리한 것을 우측에 나타내었다. 가장 큰 차이를 나타낸 것은 E로, 알칼리량 0.1% 변화에 따라 팽창량이 약 0.05% 차이가 난다. 신속법에서의 알칼리량과 팽창량의 관계에서도, 알칼리 0.1% 변화에 따라 팽창량이 0.25% 정도 변화



〈그림-7〉 신속법의 시험결과

한다. 또한 시멘트를 변화했을 때, 알칼리량의 변화만에서는 팽창량의 변화가 설명 안되고, 시멘트 이외의 요인도 팽창량에 영향을 주는 것이라고 생각된다. 규격은 시험의 전체 알칼리량을 일정하게 했기 때문에, 시멘트의 알칼리량의 영향은, 용해 알칼리량 차이만이므로 변동은, 꽤 적다고 예상되지만, 규정된 알칼리농도 영역에서의 알칼리 감응성이 높은 골재의 경우, 그 차이가 판정에 영향을 미치는 경우도 생각할 수 있다.

신속법에서는, 오차는 아니지만 측정법이 3종류이며, 각각의 일치성이 문제가 된다. 동일 양종이 있는 채석장에서 28개의 샘플을 채취하여 신속법과 화학법으로 시험을 하여 상관성을 파악해 본 결과를 〈그림-7〉에 나타내었다. 화학법의 28개 샘플의 평균 Sc는 71mmol/L, Rc는 64mmol/L이며, 「무해」의 것이 14개 샘플, 「무해하지 않다」의 것이 14개 샘플이었다. 신속법의 결과는 길이변화·동탄성도 「무해」의 것이 14개, 내화학법 「무해」것이 7개, 길이변화·동탄성도 「무해하지 않다」의 것이 2개, 내화학법 「무해하지 않다」의 것이 1개, 길이변화 「무해」·동탄성 「무해하지 않다」의 것이 12개, 내화학법 「무해」가 6개였다. 화학법과 신속법 결과의 상관

성은, 전혀 보이지 않아 웬지 고민스런 결과가 나왔다. 신속법의 측정법내, 동탄성과 길이변화 측정치에서 강한 상관을 보이는 것 같지만, 판정라인은 동탄성의 쪽이 가혹한 결과로 나왔다.

6. 결론

알칼리실리카 반응의 평가판정 시험방법에 대해서 이런저런 이야기들을 많이 기술해 보았다. 시험방법은, 여기에서 특별히 언급한 화학법, 모르타르바 방법, 신속법 이외에도 다종 다양한 시험방법이

제안되어 있고, 각각의 시험방법에 의한 평가가 상호 완전 일치하는 것은 아니라는 것도 잘 알려져 있다. 또한 엄한 서열에 대해서도 골재에 따라 다양하다. 오히려 많은 시험방법은 판정을 혼란스럽게 하기도 한다. 그러나 알칼리실리카 반응은 온도, 농도, 시간의 요인 영향이 골재에 따라 각각 다른 반응을 하는 것이다. 따라서 시험의 반응조건을 다양하게 하는 것 보다도 지금까지 해온 시험방법에 따라 얻은 결과에 속도론적인 평가를 포함시킨 판정방법을 개발해서 가는 것이 중요하지 않나 하는 생각을 해 본다. ▲

시사 용어 해설

▶ SSD(Solid State Disk 또는 Solid State Drive)

1980년대에 등장한 SSD는 Solid State Disk 또는 Solid State Drive를 일컫는 말로써 NAND 플래시 또는 DRAM 등 초고속 반도체 메모리를 저장매체로 사용하는 대용량 저장장치를 뜻한다. 여기서 말하는 초고속 반도체 메모리는 휴대폰, MP3, 메모리 카드, 디지털카메라 등에 사용되는 데이터 저장용 반도체 소자를 가리킨다. SSD는 기본적으로 메모리 카드와 동작방식이 유사지만, HDD를 대체하기 위한 것이기 때문에 용량이 메모리 카드에 비해서 훨씬 크다. 보통 메모리 카드는 2~8G 정도의 용량을 사용하지만, SSD는 32G~1TB(1,000GB) 정도의 대용량을 필요로 한다. 또한 기계적 장치인 HDD와는 달리 반도체를 이용해 정보를 저장한다. 임의접근을 하여 탐색 시간 없이 고속으로 데이터를 입출력할 수 있으면서도 기계적 지연이나 실패율이 현저히 적다. 외부의 충격으로 데이터가 손상되지 않으며 발열·소음과 전력소모가 적고 소형화·경량화 할 수 있다는 것도 장점이다. 그러나 아직까지는 가격경쟁력이 부족하여 고도의 안정성과 높은 데이터 처리속도가 요구되는 군사, 항공우주, 선박과 같은 특수 분야에서 주로 사용되고 있다. 비싼 가격 문제가 해결된다면 HDD를 대신할 차세대 저장장치가 될 것으로 전망된다.