

化學藥品溶液에 浸漬한 콘크리트의 劣化에 대한 研究

A Study on the Erosion of Concrete Immersed in Chemical Solution

文翰英* · 金成秀**

Moon, Han Young · Kim, Seong Soo

Abstract

The cement pastes, mortar and concrete specimens were immersed in artificial seawater and five kinds of chemical solution and tested the change of compressive strength and weight. The reaction products and microstructure were looked over by using X-ray, SEM and EDS. The results show that the formation of ettringite and gypsum because of penetration of SO_4^{2-} ion are the reason for deterioration in sulfuric acid and sulphate solution. In the chlorid solution, it is found that the attack of Cl^- ion on the concrete plays an important role of the deterioration of concrete.

요 지

인공해수 및 5종류의 약품용액에 시멘트풀, 모르타 및 콘크리트 공시체를 침지하여 강도 및 중량 변화를 측정하고 X-ray, SEM 및 EDS로서 반응생성물과 미세구조를 분석 고찰하였다.

연구결과 황산 및 황산염용액에서는 SO_4^{2-} 이온의 침투로 인한 ettringite와 석고의 생성이 열화의 원인이 되었다. 염화물용액에서는 Cl^- 이온의 침투가 콘크리트를 열화시키는 중요한 요인이 되었음을 알 수 있었다.

1. 서 론

콘크리트는 耐久性이 우수한 점을 인정받아 건설 재료 가운데 빼놓고 생각할 수 없을 만큼 으뜸의 위치에 있다고 하겠다.^(1~11) 그러나 근년에 와서 구조물의 기능이 多樣化 됨으로써 콘크리트 구조물도 용도에 따라 高性能, 高品質의 콘크리트가 요구되고 있는 추세이다.

우리나라의 경우 최근 建設景氣의 급격한 호황으로 인하여 양질의 콘크리트용 골재를 구하기가 쉽

지않을 뿐만 아니라 지역에 따라서는 염분을 충분히 제거하지 않은 海砂 및 오염된 강이나 하천에서 채취한 골재를 사용하는 경우 또는 下水 및 工場 廢水의 영향을 받는 곳에 콘크리트 구조물을 축조할 경우에 발생하는 콘크리트의 耐久性 문제가 종종 사회적으로 물의를 일으키고 있는 실정이다.^(4,11)

이 외에도 海洋環境下에서 海水의 영향을 받는 콘크리트 구조물의 경우 海水中の 염분성분이 콘크리트속에 침투하므로써 콘크리트를 침식, 열화시키고 철근을 부식시키므로써 耐久性을 저하시키는 요인이 되고 있다.^(4~10)

본 연구에서는 酸 및 鹽類와 같은 각종 化學藥

* 정희원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

品溶液에 콘크리트를 浸漬했을 때 발생하는 劣化의 정도 및 浸蝕機構를 규명하기 위한 연구의 일환으로 모르타르와 콘크리트의 강도 및 중량변화를 재령 91일까지 측정하였다.

한편 시멘트풀로 제조한 시험편을 재령 60일 및 1년간 약품용액에 침지한 후 劣化部位를 채취하여 X-ray, SEM 및 EDS로서 관찰, 분석하므로써 콘크리트의 浸蝕 및 劣化에 대한 대책수립을 위한 계기를 마련하고자 하였다.

압축강도를 측정하였다. 한편 모르타르 및 콘크리트의 중량변화를 알아보기 위하여 수중에서 7일간 양생시킨 후 중량을 측정한 다음 각 시험용액에 침지하여 재령별로 침지후의 중량을 측정하였다.

(2) 走査型電子顯微鏡(SEM): 시멘트풀 시험편을 각 시험용액에 재령 60일 및 1년간 침지한 후 각 시험편 중에서 침식된 부위를 채취하여 3,000배로 촬영하였다. 그리고 이 시료들의 구성원소를 Energy Dispersive X-ray Spectrometer(EDS)를 사용하여

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

(1) 시멘트: 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

(2) 골재: 잔골재는 한강산 강모래와 KS L 5100의 표준모래이며, 굵은 골재는 한강산으로 물리적 성질은 표 2와 같다.

(3) 시험용 시약: 모르타르 및 콘크리트용 실험에 사용된 화학약품 5종류의 용액농도는 표 3과 같으며, 인공해수 용액은 ASTM D 1141에 의해 표 4와 같은 농도를 만들었다.

2.2 실험기구 및 방법

(1) 공시체 제조: 모르타르용으로 5 cm 입방체와 콘크리트용 10 cm의 원주형공시체를 제작 1일 후 탈형으로 7일간 수중에서 표준양생한 후 각각 재령별로 시험용액에 침지하여 KS F 2405에 의하여

표 3. 시험용 시약의 농도

약품명	농도(%)	비 고
H ₂ SO ₄	5	황산
Na ₂ SO ₄	5	황산염
Na ₂ SO ₄	10	〃
MgSO ₄	10	〃
CaCl ₂	5	염화물
CaCl ₂	10	〃
MgCl ₂	10	〃
인공 해수	—	〃

표 4. 인공해수의 조성 (g/l)

NaCl	24.53
MgCl ₂ ·6H ₂ O	5.20
Na ₂ SO ₄	4.09
CaCl ₂	1.16
KCl	0.695

표 1. 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질

화 학 성 분 (%)							비 중	비표면적 (cm ² /g)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig·loss		
21.80	5.84	3.56	60.62	3.54	2.58	0.95	3.15	3,422

표 2. 골재의 물리적 성질

항목 종류	굵은골재 최대치수 (mm)	비 중	흡수율 (%)	조립률 (F.M.)	유기 불순물	단위용적 중량(kg/m ³)	실적률 (%)
잔골재	—	2.62	1.50	2.50	양호	1,620	61.8
굵은골재	25	2.68	0.90	7.0	—	1,734	64.7

검출하였다.

(3) X선회절분석 : 각 시험용액에 침지시킨 시멘트 경화체 시료를 粉末法에 의하여 X선회절분석 하였다. 이 때 측정조건은 CuK(Ni filter) : 30KV, 20mA, Scanning Speed 6 min, Full Scale; 500cps, 2θ: 5~60°로 정하였다.

3. 실험 결과

시험용액 8종류(표 3 및 표 4 참조)에 침지한 모르터 및 콘크리트의 압축강도 및 침지전후의 중량 변화를 측정하여 정리한 것이 각각 표 5 및 표 6이며 이때 시험재령은 각각 28, 60 및 91일로 정하였다.

4. 실험결과에 대한 고찰

4.1 황산 및 황산염용액에 침지한 시멘트 硬化 体の 浸蝕

(1) 모르터 및 콘크리트의 劣化에 대하여 포틀랜드 시멘트로 제조한 모르터 및 콘크리트를 황산 및 황산염용액에 각각 재령 28, 60 및 91일간 침지시킨 후 압축강도와 중량변화를 측정하여 정리한 것이 그림 1 및 그림 2이다.

그림 1은 모르터나 콘크리트를 황산용액(5% H₂SO₄)에 침지했을때 황산염용액에 침지한 경우와 비교해서 압축강도가 크게 감소됨을 알 수 있다. 특히 모르터의 경우 재령 91일간 수증양생한 표준

표 5. 시험용액에 침지한 모르터 및 콘크리트의 압축강도(Kg/cm²)

용액	종류 재령(일)	모르터			콘크리트		
		28	60	91	28	60	91
	수중	306(100)	324(100)	336(100)	253(100)	260(100)	264(100)
	5% H ₂ SO ₄	165(54)	168(52)	128(38)	204(81)	200(77)	193(73)
	5% Na ₂ SO ₄	306(100)	349(108)	343(102)	—	—	—
	10% Na ₂ SO ₄	309(101)	311(96)	319(95)	248(98)	244(94)	256(97)
	10% MgSO ₄	263(86)	262(81)	252(75)	227(90)	220(85)	219(83)
	5% CaCl ₂	294(96)	305(94)	279(83)	—	—	—
	10% CaCl ₂	269(88)	288(89)	239(71)	233(92)	234(90)	235(89)
	10% MgCl ₂	275(90)	240(74)	215(70)	222(88)	212(82)	201(76)
	인공 해수	251(82)	262(81)	255(76)	258(102)	249(96)	206(78)

()는 각 재령별 수증양생에 대한 압축강도비

표 6. 시험용액에 침지한 모르터 및 콘크리트의 중량비

용액	종류 재령(일)	모르터			콘크리트		
		28	60	91	28	60	91
	5% H ₂ SO ₄	80.6	76.8	72.8	96.2	96.1	89.1
	5% Na ₂ SO ₄	99.6	99.3	98.4	—	—	—
	10% Na ₂ SO ₄	98.9	98.9	98.6	99.9	99.6	99.1
	10% MgSO ₄	101.1	100.7	102.3	100.4	100.3	101.1
	5% CaCl ₂	98.9	98.3	98.5	—	—	—
	10% CaCl ₂	98.9	98.2	98.9	99.4	99.1	99.8
	10% MgCl ₂	101.1	102.7	105.1	100.0	101.0	101.4
	인공 해수	100.7	100.0	101.2	100.1	100.1	100.6

$$\text{중량비} = \frac{\text{침지후 중량}}{\text{침지전 중량}} \times 100(\%)$$

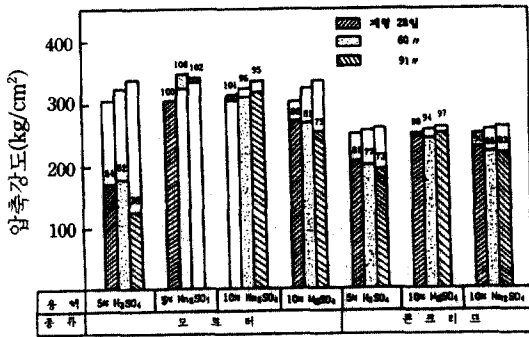


그림 1. 모르터 및 콘크리트의 압축강도(kg/cm²)

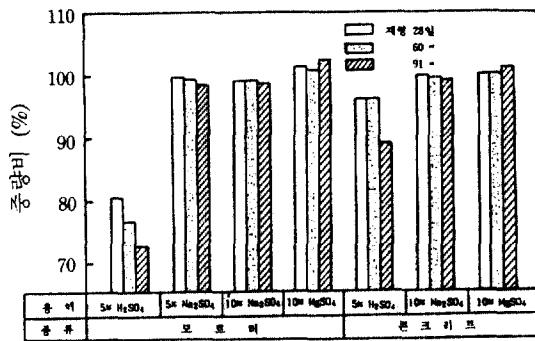


그림 2. 모르터 및 콘크리트의 중량비

공시체의 압축강도에 비해 38%에 지나지 않는 현저한 감소현상을 나타내었으며 콘크리트보다는 훨씬 큰 감소현상을 나타내었다. 반면 5% 및 10% Na₂SO₄ 용액에서 모르터는 재령에 따라 오히려 압축강도가 증가하는 현상을 나타내었으나 10% MgSO₄ 용액에서는 모르터나 콘크리트 다 같이 약간 감소됨을 알 수 있다.

이와같은 결과는 MgSO₄ 용액에서는 ettringite의 생성으로 인한 팽창, 균열 뿐만 아니라 석고와 동시에 생성되는 Mg(OH)₂의 용해도가 작음으로 인하여 용액중의 pH가 낮아 수화시 생성되는 칼슘실리케이트가 분해되기 때문에 다른 황산염에 비해 황산마그네슘의 침식작용이 크다는 연구내용과 대체로 일치하는 결과로 생각된다.⁽⁷⁾

한편 콘크리트 구조물의 耐藥品性을 평가하기 위한 수단으로 약품용액에 모르터나 콘크리트공시체를 침지시켜 중량 및 강도의 변화를 측정하여 耐久性指數로 삼고자하는 연구가 발표되고 있다.⁽¹²⁻¹⁶⁾

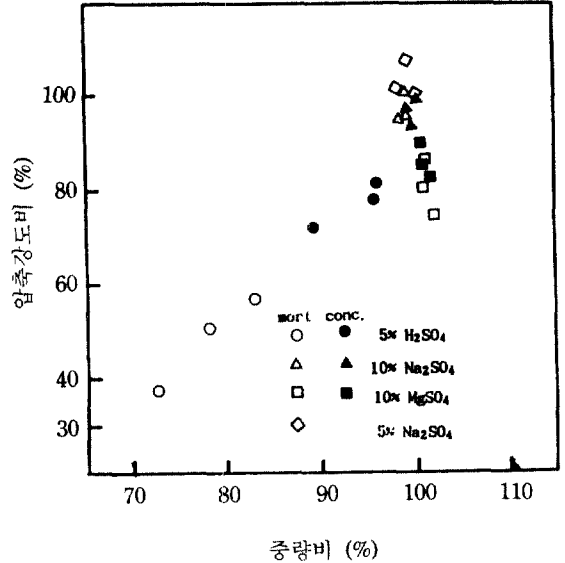


그림 3. 모르터 및 콘크리트의 중량비와 압축강도비와의 관계

본 연구에서는 황산 및 황산염용액에 침지한 모르터 및 콘크리트의 중량을 측정하여 침지전후의 중량비로 정리한 것이 그림 2이며 중량비와 압축강도비와의 관계로 정리한 것이 그림 3이다.

그림 2의 5% H₂SO₄ 용액에서 재령 91일에 모르터 및 콘크리트의 중량이 약 28% 및 10% 정도 감소되었으나, 10% MgSO₄ 용액에서는 압축강도와는 달리 오히려 중량이 약간 증가되었다.

반면 10% Na₂SO₄ 용액의 경우, 중량이 약간 감소하는 경향을 나타내었으며 전체적으로 콘크리트보다 모르터의 중량 감소율이 약간 큼을 알 수 있다.

그림 3에 의하면 5% H₂SO₄ 용액에 대한 중량비와 압축강도비와의 사이에는 상관관계가 있음을 알 수 있으나, 황산염용액에 대한 중량비와 압축강도와의 사이에는 압축강도비의 변화는 있으나 중량비의 변화폭이 거의 없을 뿐만 아니라 10% MgSO₄ 용액에서는 중량비와 강도 사이에는 오히려 역비례 관계가 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해보면 약품용액의 종류에 따라 중량비가 증가 하더라도 강도비는 오히려 감소하는 결과를 나타내므로써 강도비와 중량비 사이에는 반드시 비례관계가 성립되지 않음을 알 수 있었다.

(2) 反應生成物 및 微細構造에 대하여

모르타나 콘크리트 공시체를 황산용액에 침지했을 때 강도가 감소되고 중량이 변화하는 원인을 규명하기 위한 한 방법으로 시멘트풀로서 시험편을 제조하여 5% H₂SO₄ 용액에서 재령 60일 및 1년간 침지하여 생긴 반응생성물과 구조를 관찰한 결과를 정리한 것이 그림 4 및 그림 5이다.

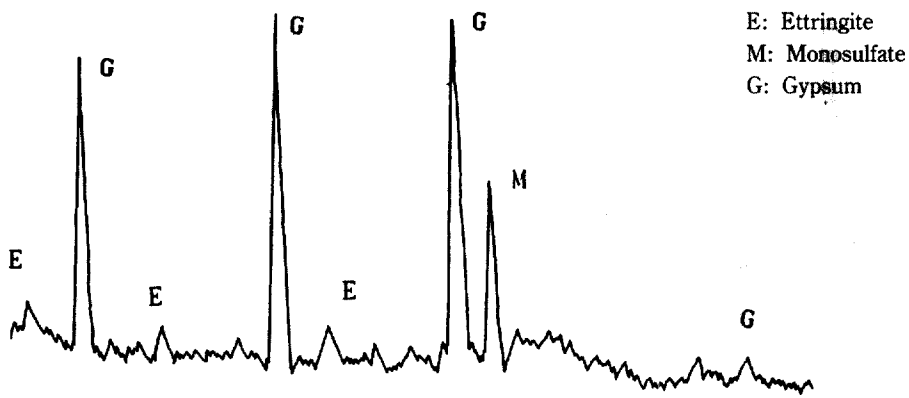
먼저 그림 4에서 재령 60일에서는 SO₄²⁻ 이온의 침투로 생성된 피크가 가장 컸으며 monosulfate (3CaO Al₂O₃ CaSO₄ 2H₂O)의 피크와 소량의 ettringite가 나타났으나, 재령 1년에서는 석고의 피크가 상대적으로 작아지고 monosulfate가 없어진 대신 ettringite가 많이 생성되었음을 알 수 있다.

한편 그림 5의 SEM 사진을 살펴보면 A부위와 같은 형태의 물질이 대체적으로 많았으며 이 부분을

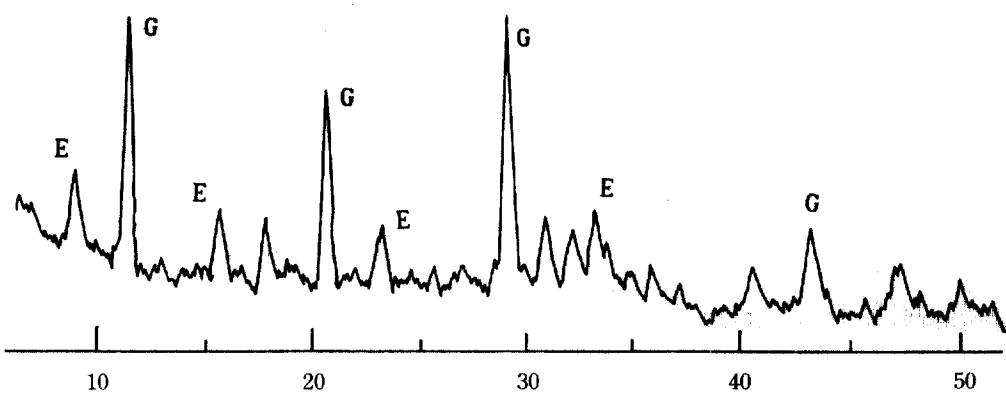
EDS로서 點分析(Point analysis)해 본 결과 S와 Ca가 주된 원소인 석고였으며, 침상형태를 한 B부위는 ettringite였으며, ettringite가 생성되고 있는 침상형태의 주위는 팽창으로 인한 작은 균열이 발견되었으나 Ca(OH)₂와 같은 生成物은 발견되지 않았다.

이상에서 황산용액에 침지한 모르타 및 콘크리트의 압축강도와 중량이 감소되는 원인은 SO₄²⁻ 이온과 칼슘알루미늄에이트계 수화물이 반응하여 ettringite와 석고의 생성으로 팽창, 붕괴를 일으켰으며 한편으로는 석고로 인한 시멘트풀의 軟化 등에 기인되었다고 생각되었다.

이번에는 황산염용액에 침지한 시멘트 경화체의 반응생성물과 미세구조를 나타낸 것이 그림 6 및 그림 7이다.

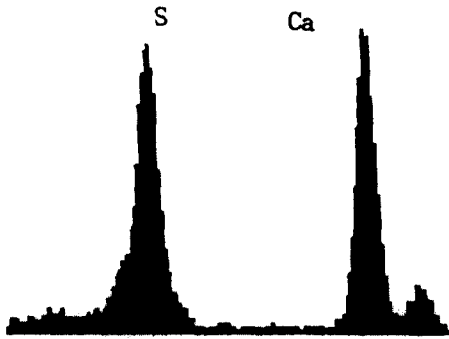
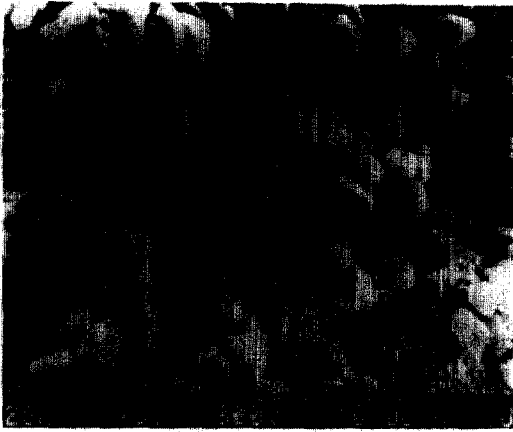


(a) 재령 60일

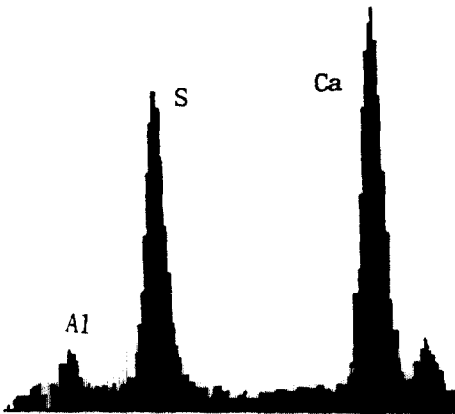


(b) 재령 1년

그림 4. 시멘트 경화체의 X선회절분석(5% H₂SO₄용액)



(a) Point analysis



(b) Point analysis

그림 5. 시멘트 경화체의 SEM 및 EDS분석 (5% H₂SO₄용액)

그림 6에서는 수산화칼슘과 칼슘실리케이트 수화물만 생성되었으며 SO₄²⁻ 이온의 침투에 의한 반응생성물은 발견되지 않았다. 그러나 재령 1년간 10% MgSO₄ 용액에 침지한 시멘트 경화체의 X선회절분석결과 Ca(OH)₂를 비롯하여 ettringite, 석고 및 Mg(OH)₂가 생성되었다. 한편 10% Na₂SO₄ 용액에서는 Ca(OH)₂, ettringite 및 석고가 생성되었으나, Na⁺ 이온에 의해 생성된 NaOH는 가용성물질로 용출되어 시멘트 경화체 내부에서는 발견되지 않았다. 그림 7의 (a)에서 10% MgSO₄ 용액에서의 반응생성물은 針狀構造로써 전형적인 ettringite 모양을 나타내며 이 부분을 원소 분석해 본 결과 SO₄²⁻ 이온의 침투로 인하여 S와 Mg가 있으며 주로 ettringite가 검출된 점으로 보아 劣化의 원인은 SO₄²⁻ 이온의 침투로 생각된다.

그림 7의 (b)에서는 多面體의 결정이 겹쳐있는 현상을 나타내며 이러한 현상은 Ca(OH)와 반응한 Na⁺ 이온이 수용성인 NaOH가 되어 용출되므로써 多孔化 상태로 나타났다고 생각된다.

이상에서 황산용액에 침지한 모르터 및 콘크리트의 압축강도의 감소원인을 X선회절, SEM 및 EDS 분석결과로 유추해 볼때 Ca(OH)₂와 반응하여 생성된 NaOH와 Mg(OH)₂의 용출에 따른 多孔化現象과 SO₄²⁻ 이온의 침투에 의한 ettringite와 석고의 생성으로 내부가 팽창되어 균열이 발생되었기 때문으로 생각된다.

한편 황산나트륨용액에서 중량이 감소하는 이유는 반응생성물인 NaOH가 가용성으로 용출되기 때문에 모르터 및 콘크리트가 多孔化된 탓으로 생각된다.

반면 황산마그네슘 용액에서는 반응생성물인 Mg(OH)₂가 용해도가 낮아 모르터나 콘크리트 표면에 결정상태로 존재하기 때문에 중량의 변동이 적으며 오히려 증가되었다고 생각된다.

4.2 염화물용액에 침지한 시멘트 硬化体の 浸蝕

(1) 모르터 및 콘크리트의 劣化에 대하여

海洋環境下에서 콘크리트 구조물을 축조할 경우 해수속의 Cl⁻ 이온과 SO₄²⁻ 이온 등이 콘크리트내부에 침투하여 콘크리트를 침식, 열화시키는 주된 요인이 된다고 한다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 그래서 염화물용액 4종류에 재령 28, 60 및 91일간 침지한 모르터 및 콘크

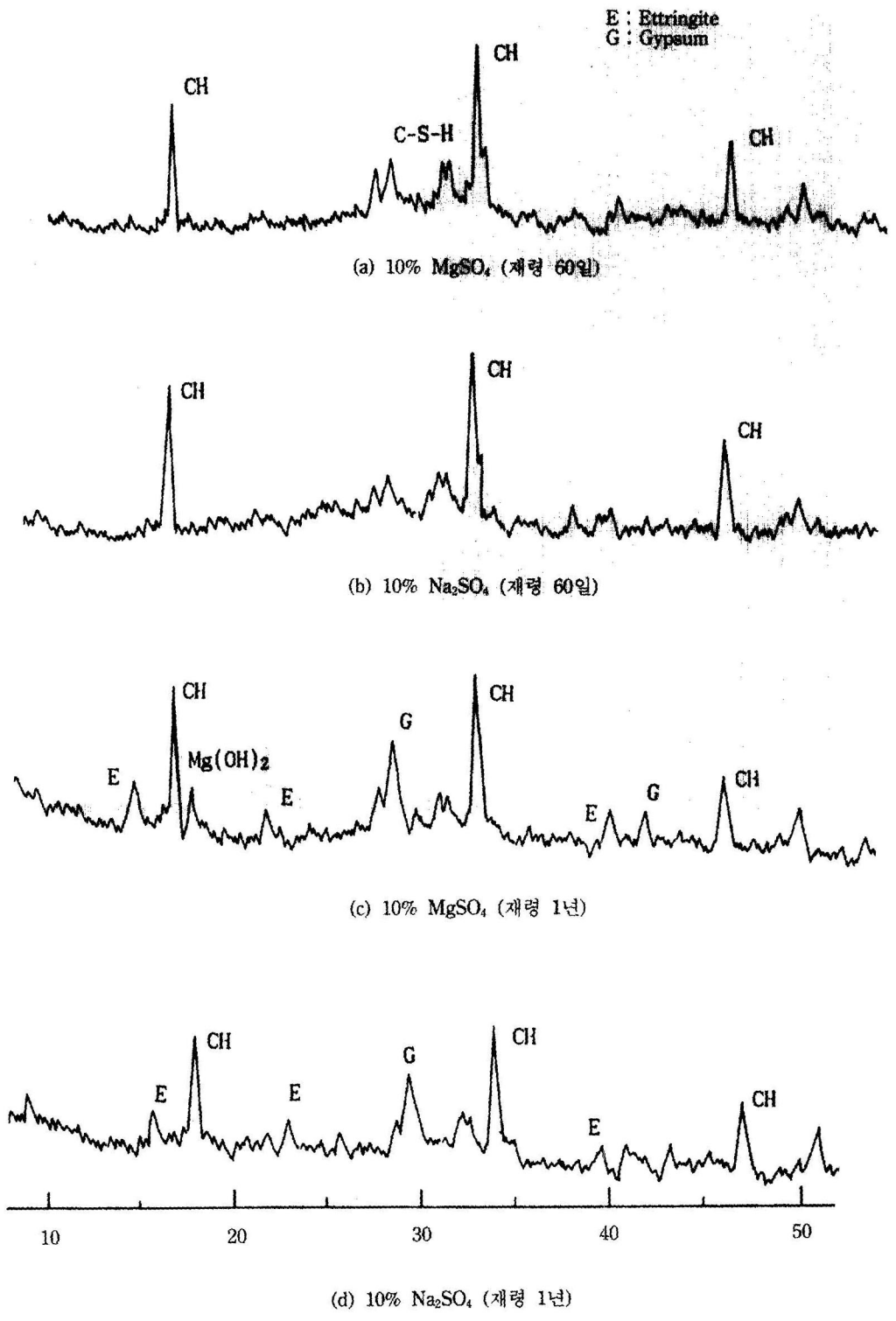
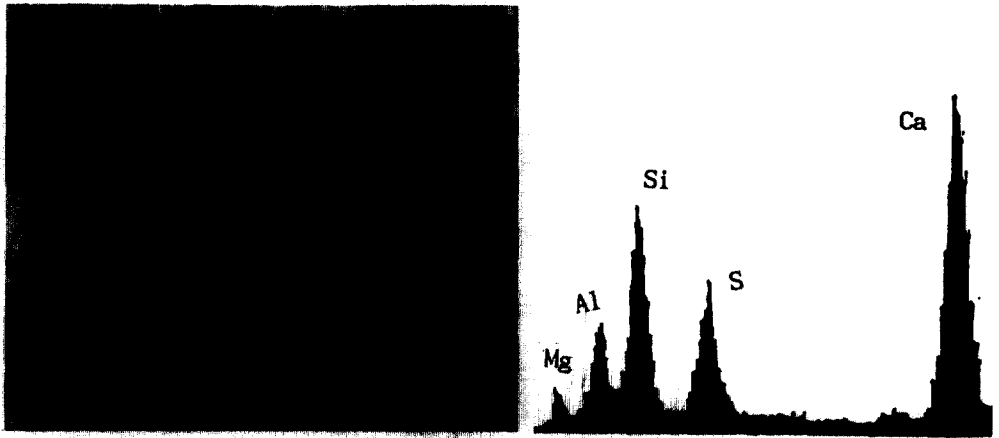
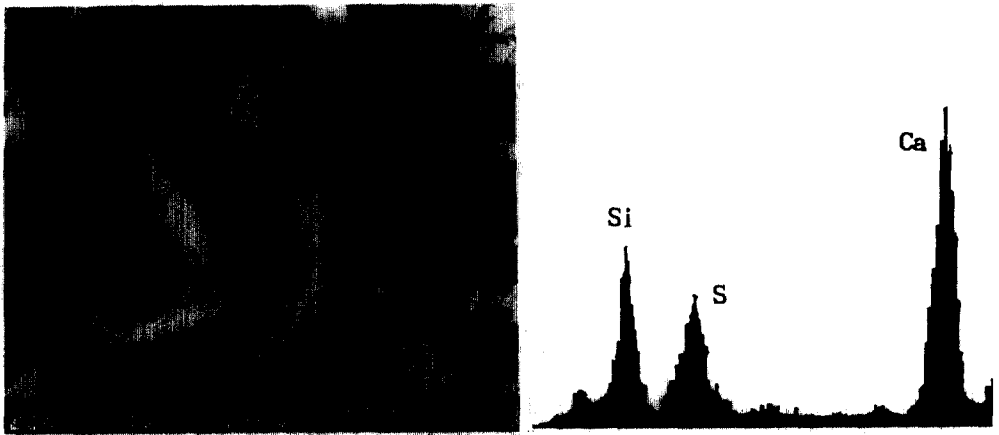


그림 6. 시멘트 경화체의 X선 회절분석(황산염 용액)



(a) 10% $MgSO_4$



(b) 10% Na_2SO_4

그림 7. 시멘트 경화체의 SEM 및 EDS분석(황산염 용액)

리트의 열화의 정도와 원인을 규명하기 위하여 압축강도와 중량변화를 측정하여 정리한 것이 그림 8 및 그림 9이다.

그림 8에서 10% $MgSO_4$ 용액에 침지한 모르터 및 콘크리트의 압축강도가 가장 크게 감소되었으며, 재령 91일에 모르터 36%, 콘크리트 24%의 감소현상을 나타내었다. 모르터의 경우 농도가 높을수록 강도감소가 크게 나타났다.

한편 그림 9에서 모르터 및 콘크리트의 중량변화를 살펴보면 10% $CaCl_2$ 용액에서 약간 감소하는 경향을 나타내었으나, 10% $MgCl_2$ 용액 및 인공해수의 경우에는 재령과 더불어 중량이 얼마간 증가

함을 알 수 있다.

(2) 反應生成物 및 微細構造에 대하여

염화물용액에 침지한 모르터 및 콘크리트공시체의 강도가 감소되고 중량이 변화하는 원인을 알아보기 위하여 시멘트 경화체 시료를 1년간 염화물용액 3 종류에 침지하여 열화된 부위를 X선회절분석과 SEM 및 EDS분석한 결과를 정리한 것이 그림 10 및 그림 11이다.

그림 10에서 시멘트수화시 생성된 수산화칼슘(CH) 및 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H) 및 피크가 있으며, Cl^- 이온의 침투로 인해 생성된 Friedel's염 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$, F로 약함)도 약간 생성

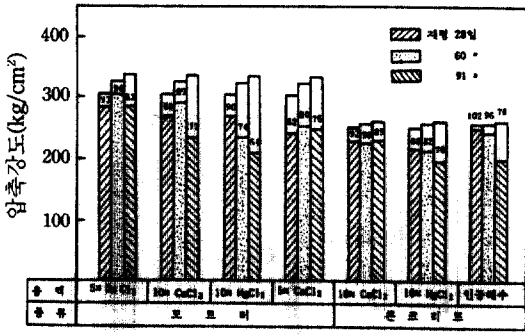


그림 8. 모르타르 및 콘크리트의 압축강도

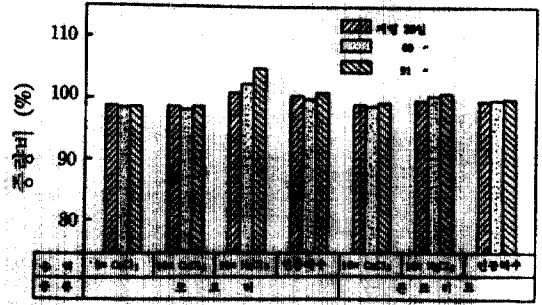


그림 9. 모르타르 및 콘크리트의 용량비

E: Ettringite
G: Gypsum
F: Friedel's salt

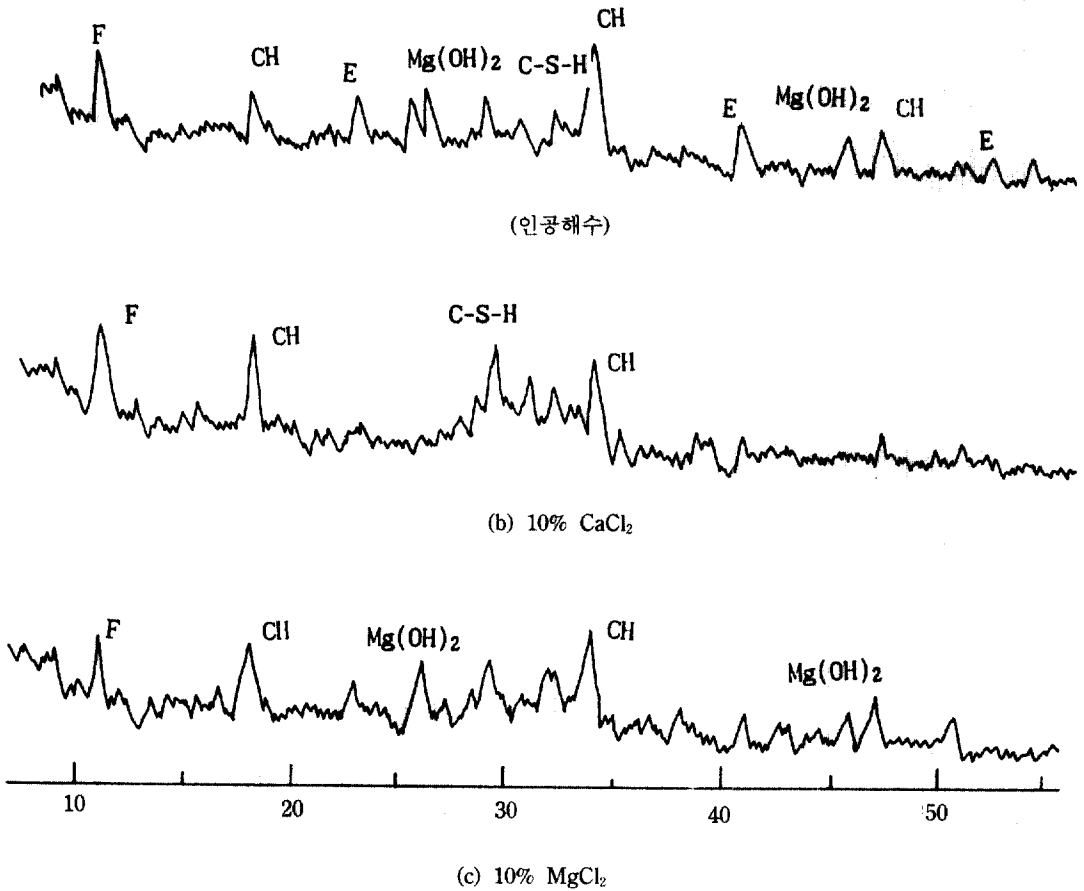
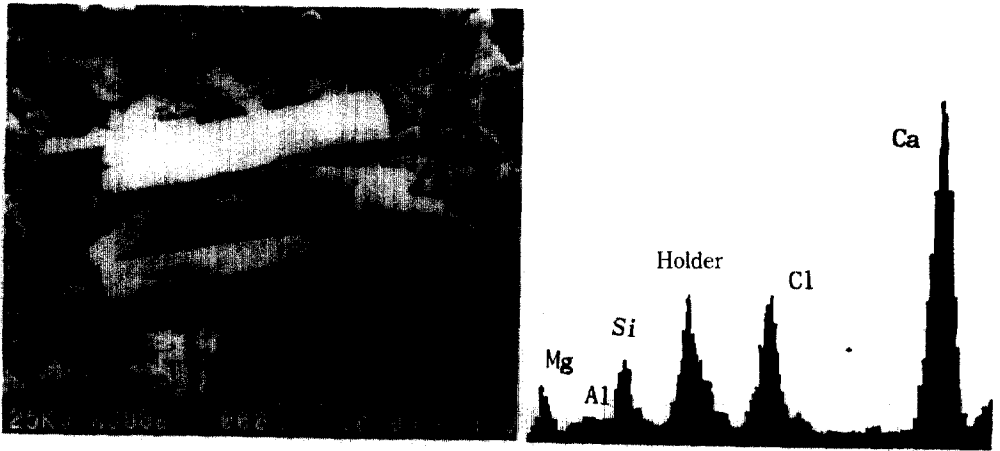
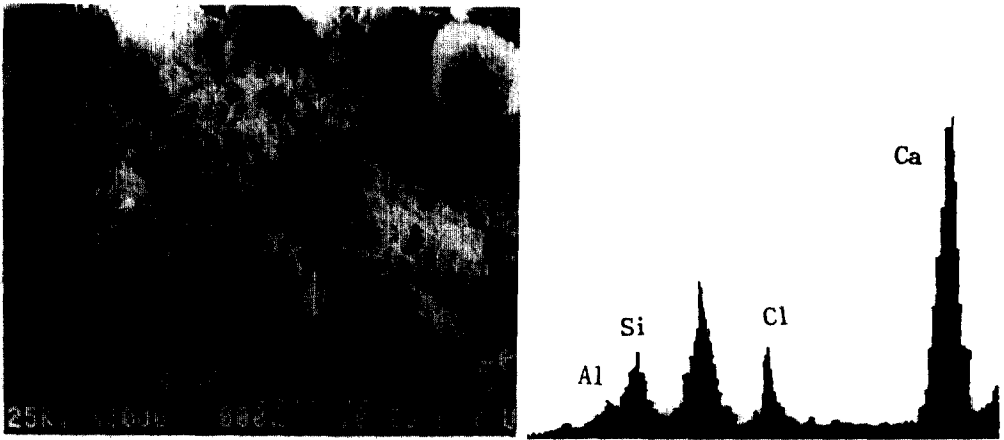


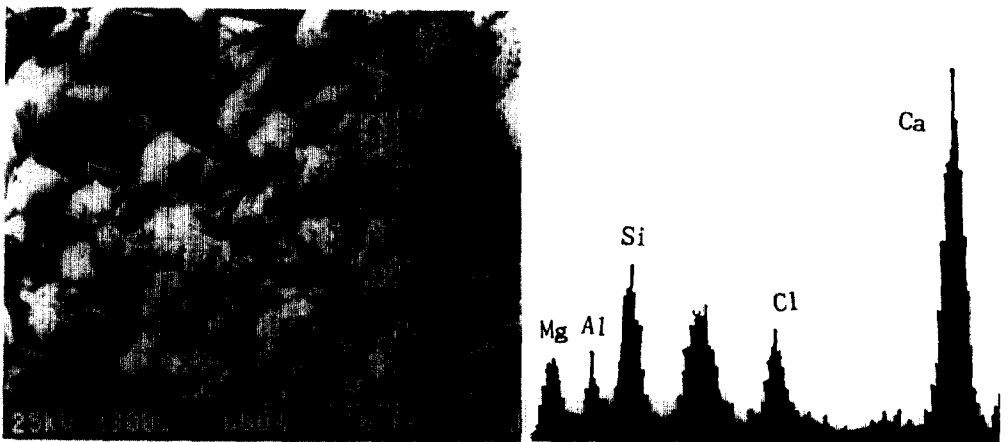
그림 10. 시멘트 경화체의 X선회절분석(염화물 용액)



(a) 인공해수



(b) 10% CaCl_2



(c) 10% MgCl_2

그림 11. 시멘트 경화체의 SEM 및 EDS분석(염화물 용액)

되었다. 그런데 $MgCl_2$ 와 $Ca(OH)_2$ 와의 사이에는 $Ca(OH)_2 + MgCl_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaCl_2$ 와 같은 화학반응을 일으켜 생성되는 $CaCl_2$ 는 可溶性物質이므로 시멘트 경화체 조직의 多孔化를 촉진시키며 $Mg(OH)_2$ 는 시멘트 경화체 표면에 고체상태로 부착되어 있지만 강도발현에는 기여하지 못하고 중량만 약간 증가시킨다고 한다.^(13,14)

한편 人工海水에 침지한 경우 약간의 $Mg(OH)_2$ 와 SO_4^{2-} 이온의 침투로 ettringite도 생성되었음을 알 수 있다.

그림 11에서 인공해수 용액에 침지한 경우 시멘트 수화물 주위에 棒狀의 結晶이 많이 보이므로 이 부분을 EDS로 분석해 본 결과 주원소가 Ca이므로 전형적인 $Ca(OH)_2$ 인 것으로 생각되며 내부에는 균열이 발생되고 있어 그 균열주위를 관찰해 보면 ettringite로 보이는 針狀物質이 나타났다. 이 ettringite의 팽창으로 인하여 균열이 발생하여 인공해수에 침지한 콘크리트의 침식, 열화를 일으키는 원인이 된다고 생각되었다.

한편 10% $CaCl_2$ 용액에 침지한 경우, SEM에서 알 수 있듯이 시멘트 경화체 내부가 多孔化現象을 나타내며 특별한 수화생성물은 보이지 않았다. 그래서 원소분석을 해보면 Cl원소의 침투가 확인되었으며 다공화현상은 Cl^- 이온의 침투로 인한 것으로 생각되었다.

그리고 염화마그네슘 용액에서는 針狀형태의 물질이 다량 생성되었다. 이 물질의 주성분은 Ca 및 Si로 나타났으며 Mg^{2+} , Cl^- 이온의 침투도 확인할 수 있었다. 이상의 염화물용액에 대한 浸蝕, 劣化의 주원인은 Cl^- 이온의 침투로 인한 多孔化現象으로 생각되며 여러 종류의 염성분이 섞여있는 人工海水 용액에서는 SO_4^{2-} 이온에 의한 ettringite의 생성이 주로 内部龜裂을 유도하였다고 생각되었다.

5. 결 론

1) 황산용액에 침지한 모르타 및 콘크리트의 재령 91일의 압축강도는 각각 62%와 27% 정도 크게 감소되었으며 중량도 각각 28% 및 10% 정도 감소되었다. 그 원인은 시멘트 경화체 내부에 ettringite가 생성되어 균열이 발생되고 석고로 인한 시멘트풀의 軟化現象 때문으로 생각되었다.

2) 황산마그네슘용액에 침지한 모르타 및 콘크리트의 압축강도의 감소가 황산나트륨용액에서 보다 크게 나타났으나 모르타의 중량은 황산마그네슘용액에서 오히려 증가되었다. 황산나트륨용액에서 중량이 감소되는 원인은 可溶性의 NaOH의 용출에 의한 시멘트 경화체 내부의 多孔現象 때문으로 생각되었다.

3) 염화마그네슘용액에 침지한 모르타 및 콘크리트는 재령이 증가하는데 따라 압축강도는 감소하는 반면 중량은 오히려 약간 증가하였다. 한편 염화칼슘용액에서는 가용성의 $CaCl_2$ 의 용출에 의해 압축강도 및 중량이 감소되었다. 이러한 현상은 Cl^- 이온이 많이 침투되어 콘크리트를 浸蝕, 劣化시키는 주원인이 되었다고 생각된다.

4) 人工海水에 침지한 모르타 및 콘크리트의 압축강도는 약간 감소하였으며, 재령 28일의 콘크리트의 경우 얼마간 증가하였으나 중량에는 거의 변동이 없었다. 이러한 현상은 인공해수의 각종 염류중 SO_4^{2-} 이온의 침투로 인하여 ettringite와 Cl^- 이온에 의한 Friedel's 염도 생성되어 膨脹, 龜裂 및 多孔化現象이 원인이 되었다고 생각된다.

參 考 文 獻

1. J. Skalny, Concrete Durability -An Issue of National Importance-, Edited by Katharine and Bryant Mather, *International Conference* 1986.
2. P. K. Metha, Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete, *Cement and Concrete Research*, 13, 1983.
3. 鈴川論一, 硫酸鹽抵抗性, セメント化学雜論, セメント協會, 1985. 6.
4. 福手勤 外 2名, 海洋環境に 20年間 暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究 *日本土木学会論文集*, No. 422, 1992. 2.
5. G. L. Kalousek 外 1名, Mechanism of Seawater Attack on Hydrated Cement Pastes, *ACI Journal*, 1975.
6. Rasheeduzzafar 外 4名, Influence of Cement Composite on the Corrosion of Reinforcement and Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Journal* 1990.
7. 岡田清, 콘크리트의 耐久性, 朝倉書店, 1986.
8. 西林新藏, 콘크리트의 耐海水性, *セメント・コンクリート*, No. 410, 1981.
9. 文翰英 外 2名, 鹽溶液에 침지한 콘크리트의 劣化에

- 대한 연구, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 1989. 11.
10. 文翰英 外 2名, 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 人工海水에 대한 抵抗性, 大韓土木學會 學術發表會 概要集, 1989. 10.
 11. 文翰英 外 2名, 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 耐藥品性에 관한 研究, 大韓土木學會 論文集, 第8卷, 第1號, 1988. 3.
 12. 西晴哉 外 2名, 세멘트파스트硬化체의耐硫酸鹽, 耐硫酸性에 對한 一考察, 세멘트技術年報 35, 1980.
 13. 小林和一 外 1名, 세멘트의化學抵抗性에 關한 研究, 세멘트技術年報, 30, 1979.
 14. P. K. Metha, Evaluation of Sulfate-Resisting Cements by a New Test Method, *ACI Journal*, 1975.
 15. 池永博威, 種類와 濃度의 異なる 酸および 鹽의 溶液에 浸漬した 콘크리트의 劣化, 세멘트技術年報, 37, 1983.
 16. 依田彰彦, 草津溫泉及び 鹽類, 硫酸, 硫酸나트륨 溶液中에 浸漬した 콘크리트, 세멘트技術年報, 37, 1983.
 17. 鈴川論一 外 2名, 各種 세멘트의 鹽化物抵抗性에 關한 研究, 세멘트·콘크리트, No. 345, 1975.

(接受: 1992. 3. 17)