

승례문 구성 석재의 암석학적 및 광물학적 특징

박찬수¹ · 이상현^{2,*}

¹한국기초과학지원연구원 서울분소, ²강원대학교 자연과학대학 지질학과

Petrological and mineralogical characteristics of the rocks constituting the Sungryemun (South Gate)

Chan-Soo Park¹ and Sang Hun Lee^{2,*}

¹Seoul Branch, Korea Basic Science Institute, Seoul, 136-701, Korea

²Department of Geology, Kangwon National University, Chunchun, Kangwondo 200-701, Korea

요약: 승례문(남대문, 국보 1호)을 구성하고 있는 석재와 보수재료에 대한 암석화학적 및 광물학적 특징과 이들의 보존실태를 보고하고자 한다. 승례문 석재의 구성암석은 칼크-알칼리 계열의 조립질 화강암으로서 비교적 다량의 코발트를 함유하고 있다. 광물조성은 석영, 페사이트, 사장석 및 흑운모가 주성분이며 부구성 광물로는 정장석, 백운모, 녹니석 그리고 견운모 등이 산출되며 페사이트는 심한 변질작용에 의해 견운모화 되어있다. 원암의 풍화정도를 알아보기 위해 원암과 풍화암에 대해 석영-K-장석-사장석의 삼각도표에 도시한 결과 원암은 화강암 영역의 중간에 도시되는 반면 풍화석재는 석영쪽에 근접한 화강암 영역에 도시되어 K-장석 및 사장석의 풍화에 의해 상대적으로 석영이 부화된 결과를 나타내어 장석의 풍화작용이 상당히 진행되었음을 알 수 있었다. 승례문 석재의 표면은 대기 중에 노출되어 불리, 화학적 풍화작용에 의한 흑화 및 박리현상으로 쉽게 떨어져 나가며 석구조조물의 하부는 하중에 의한 균열이 발생하여 전체적으로 심각한 손상과 파손으로까지 위협받고 있는 실정이다. 또한 1960년대 초반 대규모 보수공사시 석재간의 충전과 접합용으로 사용된 시멘트와 쇠못은 오히려 석재의 보존에 심각한 악영향을 미치고 있으며 보수재료의 풍화 또한 심각한 상태로 전면적인 보존대책 수립이 시급한 상태이다. 결론적으로 승례문의 현 상태는 석재의 풍화와 균열, 그리고 보수공사 때 사용된 자재의 약화 등 전체적으로 훼손이 심해 시급히 과학적인 보존대책을 마련해야 한다.

핵심어: 승례문, 화강암, 보수재료, 풍화, 흑화

Abstract: The geochemical and mineralogical investigation on the rocks and repair material comprising of the Sungryemun (The 1st National Treasure) has been made. Rock of the Sungryemun is highly weathered coarse-grained calc-alkali granite. The rock consists mainly of quartz, perthite, plagioclase and biotite with small amounts of orthoclase, muscovite, chlorite and sericite, which are major weathering products from perthite. For obtaining informations about degree of weathering, mineral composition of the original rock calculated by CIPW norm and weathered rock composition determined by XRD quantitative analysis were plotted on a ternary diagram of quartz-potash feldspar-plagioclase. Original rock compositions are plotted on the central granite area, whereas weathered ones are plotted on the granite area close to quartz. The result means that quartz is more abundant in weathered rock, due to selective chemical weathering of potash feldspar and plagioclase over quartz. On the whole, surface of the rocks were black-coated, exfoliated and highly fractured due to the physical and chemical weathering and heavy load has made the cracks in the lower parts of the stone construction. Also, cement and nails, which was used as repair material, during the repair work in the early 1960's, has accelerated the weathering process. Furthermore, weathered conditions of repair materials are very severe. Therefore, it is very urgent to establish of the conservation plan for the Sungryemun.

Key words: Sungryemun, granite, repair material, weathering, black-coat

*Corresponding author: Tel. 82-33-250-8553, E-mail. lsh@cc.kangwon.ac.kr

서 론

승례문은 조선 태조 5년(1396년)에 축조되어, 세종 29년(1447년)과 성종 10년(1479년)에 개수공사를 하였다. 1961년에서 1963년 사이에는 붕괴의 위험이 있다고 판단하여 문루와 홍예를 헐고 부서진 석재와 썩은 목재만 새것으로 교체하는 해체수리공사를 실시하여 옛날의 모습으로 완전히 복원하였다.

일반적으로 화강암의 풍화속도는 아주 느린 것으로 알려져 있으나 일단 풍화가 진행되면 박리 또는 박락 작용이 활발히 진행되며(Lee, 1993) 지표면에서 벽개가 발달한 광물은 광물종류 및 성분에 관계없이 광범위한 변질이 진행된다(정기영과 이병윤, 1998). 승례문을 구성하는 석재는 조립질 화강암으로서 600여년에 걸쳐 물리적, 화학적 풍화에 노출되어 보수공사 때 새로 바뀐 끼운 석재를 제외한 축조시의 석재는 거의 모든 부분이 지의류나 대기오염 등에 의하여 검게 변색되어 있다. 또한 석재표면은 심한 풍화작용으로 인하여 질리와 균열이 발생하여 쉽게 부서러지는 상태이다.

국내에 분포하는 석조문화재에 대한 지질 및 암석학적 특징과 풍화에 관한 연구(이상헌, 1998, 1999; 좌용주 외, 2000; 최석원 외, 1999, 2000)는 이제 시작 단계에 있다. 본 논문은 석조문화재의 보존 방안에 대한 올바른 대책을 세우기 위해서는 석조문화재를 구성하는 암석의 성질과 특성 등에 대한 깊은 이해가 있어야 한다는 관점에서 승례문 구성 석재 및 보수자재의 암석학적, 광물학적 특징을 고찰하고자 한다.

현황 및 연구방법

현황

승례문은 우리나라 국보 제1호로 지정되어 있는 한

양도성의 정문이다. ‘남대문(南大門)’이라는 명칭은 방위를 표시하는 보통명사임에도 불구하고 지금은 한양도성의 중문을 뜻할 정도로 고유명사처럼 굳어버렸으나 원래는 승례문(崇禮門)이라고 불러야 옳다. 승례문은 화강암으로 쌓은 기단 위에 건립되었는데 견고하고 아름다우며, 현존하는 우리나라 성문 중에서 가장 규모가 크다. 2층 누각 아래에는 화강암으로 석축한 중앙에 홍예문이 있고, 철갑을 씌운 문이 있다. 홍예문 위에는 벽돌을 쌓아 여장을 돌리고 양쪽 끝에 조그마한 협문을 달아서 성곽으로 통하는 길을 내어 계단을 통해 오르내릴 수 있게 했다. 이 건물은 전형적인 다포양식의 건물로 창건연대를 알 수 있을 뿐만 아니라 견실한 목조 건축물의 수법을 보이고 있는 한국건축사상 중요한 건물중 하나이다. 승례문 주위의 성벽은 일본이 을사조약 후 시가지 확대사업과 일본 황태자의 조선 방문을 위해 파괴해 버렸다.

승례문의 석재는 60년대 초 보수공사 시에 시멘트와 쇠못을 사용하여 석재사이의 균열면을 보강하여 놓았는데 최근(2002년 9월) 승례문의 석축 한가운데 홍예문 석재 일부가 풍화를 견디지 못해 떨어져 나간 사건이 발생하였다.

석조문화재 보수에는 적잖은 딜레마가 따른다. 보수를 하려다 오히려 훼손을 빚을 수 있기 때문이다. 따라서 승례문의 지질학적 및 생물학적 풍화를 방지하고 과학적인 보존대책 수립을 위한 심도 있는 연구가 시급한 상태이다.

연구방법

시료는 승례문이라는 문화재적 특성상 석재를 훼손하지 못하고 박리현상이나 풍화에 의해 떨어져 나간 시편을 암석화학적 및 광물학적 분석에 이용하였으며

Table 1. Description of rock and cement samples from the Sungryemun.

Sample	Sampling point	암종
NT01-04	문내부 하단 기단석	화강암
NT01-05	문 북측 우하단	화강암 (흑화)
NT01-06	문 북측 우하단	시멘트 (흑화)
NT01-07A	북쪽 우측계단 최상부	시멘트 (표면, 흑화)
NT01-07B	북쪽 우측계단 최상부	시멘트 (내부)
NT01-08	북쪽 우측계단 최상부	화강암 (흑화)
NT01-09	북쪽 우측계단 최상부 망루 기단석	화강암
NT01-11	남쪽 좌측벽 하단 벽석	화강암 (보수 교체)
NT01-12A	남쪽 좌측벽체	시멘트 (표면, 흑화)
NT01-12B	남쪽 좌측벽체	시멘트 (내부)
NT01-13	남쪽 우측계단 기단석	화강암
NT01-15	남측 우측하단 벽체	화강암 (흑화)

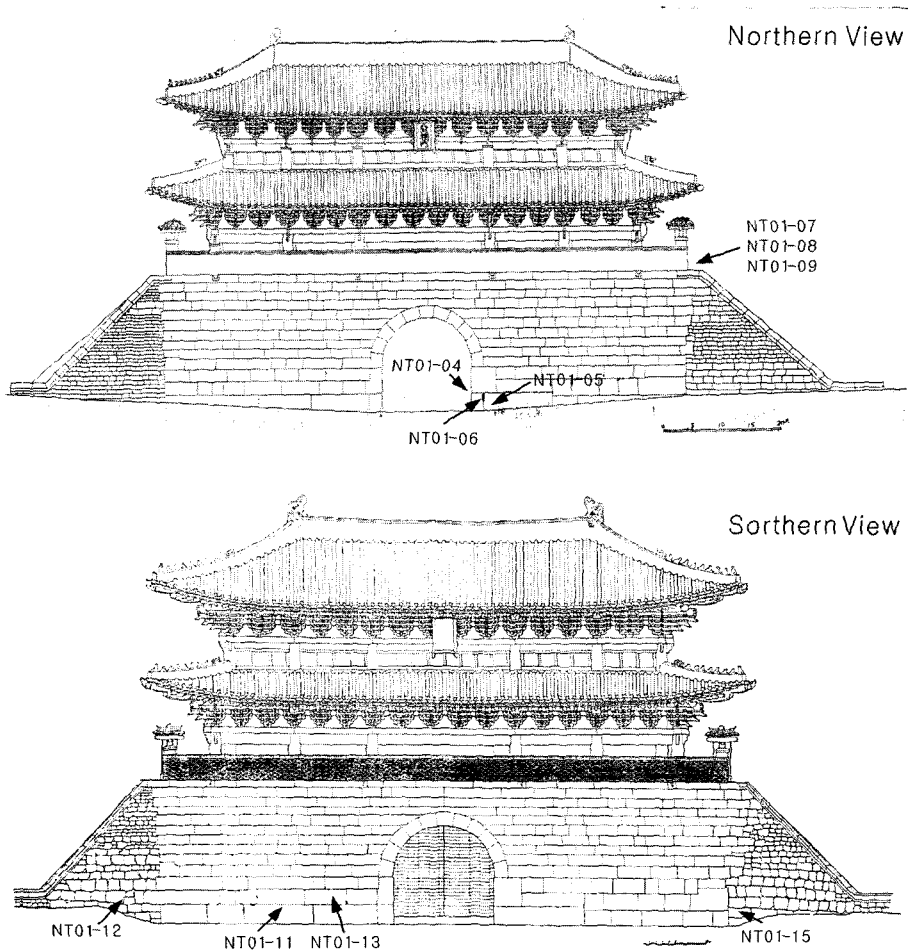


Fig. 1. Sampling point of the Sungryemun.

(Table 1) 채취된 시편의 위치는 Fig. 1에 도시하였다.

주원소 및 미량원소에 대한 암석화학적 분석은 X-선 형광분석기(XRF)를 이용하였다. 주성분을 분석하기 위해 약 2g의 잘 분쇄된 분말시료를 준비하여 백금도 가나에 시료를 용제(Li₂B₄O₇)와 1:5의 비율로 혼합하여 1200°C 정도의 버너에서 가열하여 완전히 용융시켜 유리구(glass bead)를 제작한다. 미량성분을 분석하기 위해 약 5g의 분말시료를 액상경화제와 혼합하여 가압성형기로 20톤의 압력 하에서 원판형의 디스크로 제작하여 분석에 이용하였다. 준비된 유리구와 디스크는 한국기초과학지원연구원 서울분소에서 가동 중인 XRF(Philips PW2404)를 이용하여 USGS 및 MBH에서 구입한 20개의 암석표준물질로 검정선을 구한 후 분석하였다.

석재의 광물조성, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화

에 의한 변질광물의 생성을 관찰하기 위하여 편광현미경을 사용하였으며 조암광물의 상대적 함량비는 X-선 회절분석기(XRD)로 측정된 분말 회절 패턴에 대해 Rietveld법에 기초한 결정질 조성 정량분석 program인 SIROQUANT를 이용하여 구성광물의 정량분석을 실시하였다.

비교적 최근에 개발된 Rietveld refinement 등의 profile analysis 방법(Rietveld 1969, Young *et al.* 1977, Young 1993)의 개발은 구조해석에 대한 X-선 분말 회절 결과의 효용성을 비약적으로 증대시켰다. 이 방법은 분말 패턴의 profile fitting에 기반을 두는데 각각의 Bragg angle에 대해 계산된 X-선 강도는 실험적으로 측정된 값과 비교되어 계산된 강도와 측정된 강도와의 일치성을 goodness of fit index(GOF)로 나타낸다.

결정질 물질의 혼합상에서 분말회절패턴은 개개의

Table 2. Chemical composition of major, trace element and CIPW normative composition of the granite from the Sungryemun. (unit: wt%)

Sample	NT01-04	NT01-05	NT01-08	NT01-09	NT01-11	NT01-13	NT01-15
Al ₂ O ₃	13.71	12.03	12.92	13.23	11.51	13.03	13.21
CaO	0.82	0.61	0.97	1.14	0.58	0.60	1.42
Fe ₂ O ₃ *	0.85	0.69	1.22	1.04	0.63	0.86	1.02
K ₂ O	5.28	4.56	4.24	4.30	3.84	4.66	4.44
MgO	0.14	0.14	0.25	0.26	0.10	0.12	0.29
MnO	0.06	0.05	0.06	0.05	0.02	0.07	0.05
Na ₂ O	2.79	2.88	2.65	3.81	2.91	2.82	3.66
P ₂ O ₅	0.09	0.09	0.10	0.05	0.03	0.03	0.04
SiO ₂	75.10	77.94	75.43	75.82	79.27	75.91	74.83
TiO ₂	0.10	0.09	0.18	0.15	0.06	0.12	0.14
L.O.I.	0.76	0.57	0.53	0.22	0.60	0.40	0.49
Total	99.69	99.63	98.54	100.09	99.54	98.61	99.60
Co	0.11	0.16	0.21	0.06	0.16	0.32	0.23
S	0.22	0.02	0.27	-	0.06	0.14	-
Cl	0.20	0.07	0.82	-	-	0.21	-
CIPW norm							
Q	37.34	42.86	42.44	34.58	46.84	41.03	33.58
Or	31.57	27.22	25.59	25.47	22.95	28.06	26.50
Ab	23.83	24.57	22.85	32.25	24.86	24.27	31.21
An	3.58	2.52	4.31	5.37	2.73	2.85	6.52

Fe₂O₃*: total FeO.

결정질상의 회절패턴의 합이다. 따라서 각각의 결정질 물질에 대한 scale factor(Bish and Post 1988, Hill and Howard 1987, O'connor and Raven 1988)를 이용하면 혼합 상에서 각각의 결정질 상에 대한 정량적 함량을 계산할 수 있다. 분석기기는 한국기초과학지원연구원 서울분소에 보유중인 Philips X'pert MPD를 이용하여 step scan(step size: 0.02° 2θ, step time: 10초)으로 측정하였으며 사용된 X-선은 Cu-Kα이다.

석재

암석화학

승례문 벽체를 구성하는 화강암 및 보수공사에 사용된 시멘트의 화학조성을 알아보기 위해 화강암 석재 시료 7점에 대한 주성분 및 미량원소 분석을 XRF를 이용하여 실시하였다(원래의 화강암 석재는 동일한 채석장에서 동일한 노두에서 채취한 것으로 전제함). 주성분 원소의 분석결과와 CIPW norm 광물조성은 및 미량성분 분석결과는 Table 2와 같다.

마그마의 분화경향을 살펴보기 위하여 SiO₂를 횡축으로 잡은 산화물 변화도를 작성하였다(Fig. 2). SiO₂의

변화폭은 74.83~79.27 wt%로서 Al₂O₃, K₂O, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, TiO₂ 등은 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 이들 조성이 감소하는 경향을 보인다. 따라서 본 화강암은 이 원소들을 선택적으로 농집하기 쉬운 광물의 분별결정작용을 겪은 것으로 보인다.

AFM 도표상에 도시해보면 이들 화강암류는 극단적으로 분화된 양상을 잘 보여주고 있다(Fig. 3). 이처럼 분화의 진행정도가 심한 화강암질암인 경우 마그마 계열을 알기 어려우나, 주성분 원소의 변화양상으로부터 본 화강암류는 칼크-알칼리 계열의 마그마의 분화 말기 산물인 것으로 판단된다.

CIPW norm 계산에 의한 석영-알칼리 장석-사장석 분류도에 의하면 이들은 모두 화강암 영역의 조성을 가지고 있음을 알 수 있다(Fig. 4).

미량원소의 경우 특징적으로 0.06~0.32 wt% 정도 비교적 다량의 코발트를 함유하고 있는데 이 원소를 많이 함유하고 있는 암석시료를 유리구로 제작할 경우 유리구가 코발트색을 띠게 된다.

광물조성

현미경하에서의 특징: 현미경하에서의 관찰(Fig. 5)

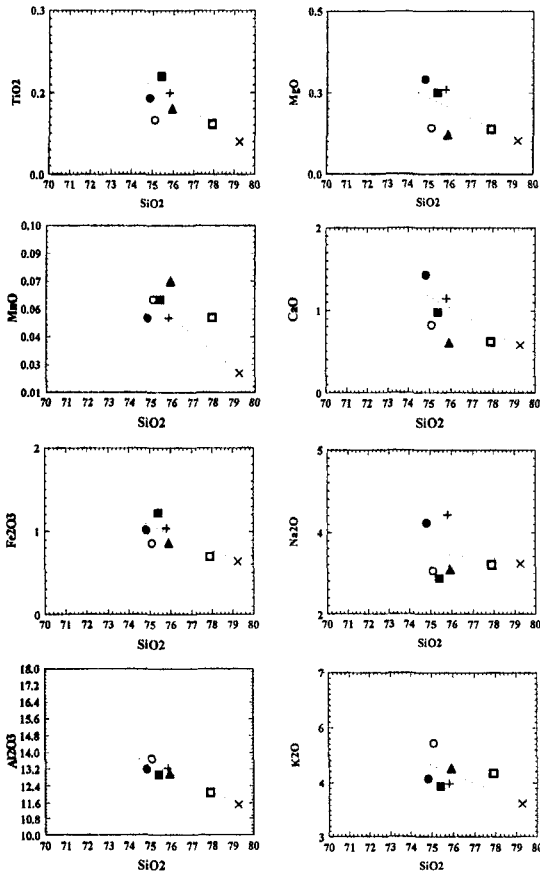


Fig. 2. Correlation between SiO₂ and other oxides of the Sungryemun Wall Granite. Symbol: NT001-04 ○, NT001-05 □, NT001-08 ■, NT001-09 +, NT001-11 ×, NT001-13 ▲, NT001-15 ●.

에 의하면 암석시료들은 주로 석영(35.0% 이상), 퍼사이트(28.6~35.0%), 사장석(8.2~11.7%) 및 흑운모로 이루어져 있으며, 부구성 광물로는 정장석, 백운모, 녹니석 그리고 견운모 등이 산출된다(Table 3). 석영은 중립 내지 조립으로 대부분 파동소광을 보이며 봉합상 조적을 보이기도 한다. 석영 입자내에 미립의 흑운모나 백운모가 포획되어 있기도 하며 견운모화된 사장석내에 미립의 석영이 산출되기도 한다. 퍼사이트는 대체로 큰 결정으로 산출되며 심한 견운모화 작용을 받은 것이 대부분이다. 대부분의 사장석은 누대구조를 보이고 누대구조의 일부는 견운모화 되어 있음을 보여준다. 견운모화 작용을 심하게 받은 장석류 주위에는 미르메카이트가 발달하기도 한다. 흑운모는 담갈색에서 갈색의 다색성을 보이며 때로는 부분적으로 방향성을 보이며 배열되어 있기도 한다. 백운모는 대체로 흑운

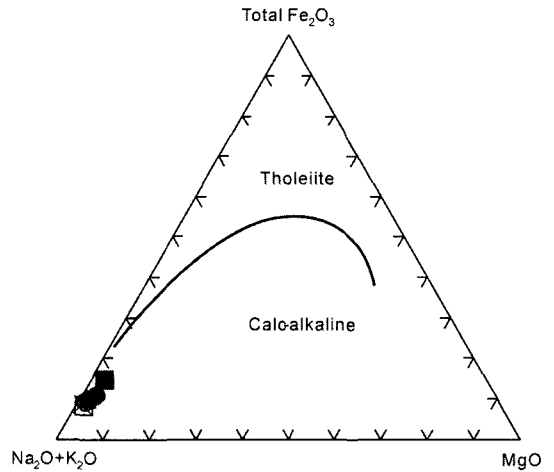


Fig. 3. AFM plotting of the Sungryemun Wall Granite. Symbols are the same as in Fig. 2.

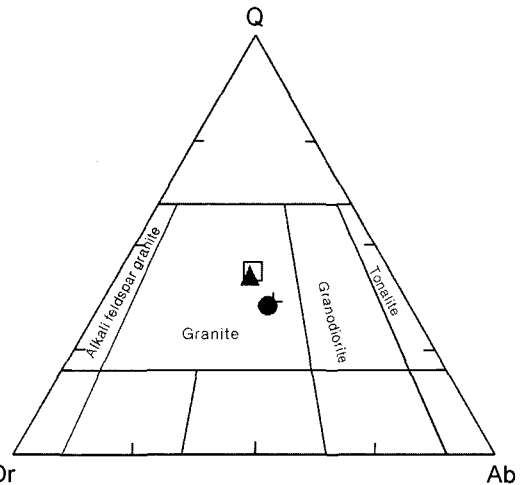


Fig. 4. Mineral compositions of the rocks from the Sungryemun by CIPW NORM calculation. Symbols are the same as in Fig. 2.

모와 함께 산출되는 것이 보통이다. 녹니석은 흑운모의 벽개면을 따라 산출되는 것이 보통으로 흑운모의 변질물로 생각된다. 이러한 장석류의 심한 견운모화 현상과 흑운모의 녹니석화 작용 등은 이 화강암들의 풍화가 상당히 진전되었음을 의미한다. 일반적으로 화강암류의 풍화는 쌍정과 벽개가 잘 발달된 장석과 운모류의 변질에서부터 시작된다(김수진 외, 1994).

X선 회절 분석: 승례문 석재의 구성광물을 알아보기 위해 채취된 석재시편의 분말 X선 회절분석을 실시하

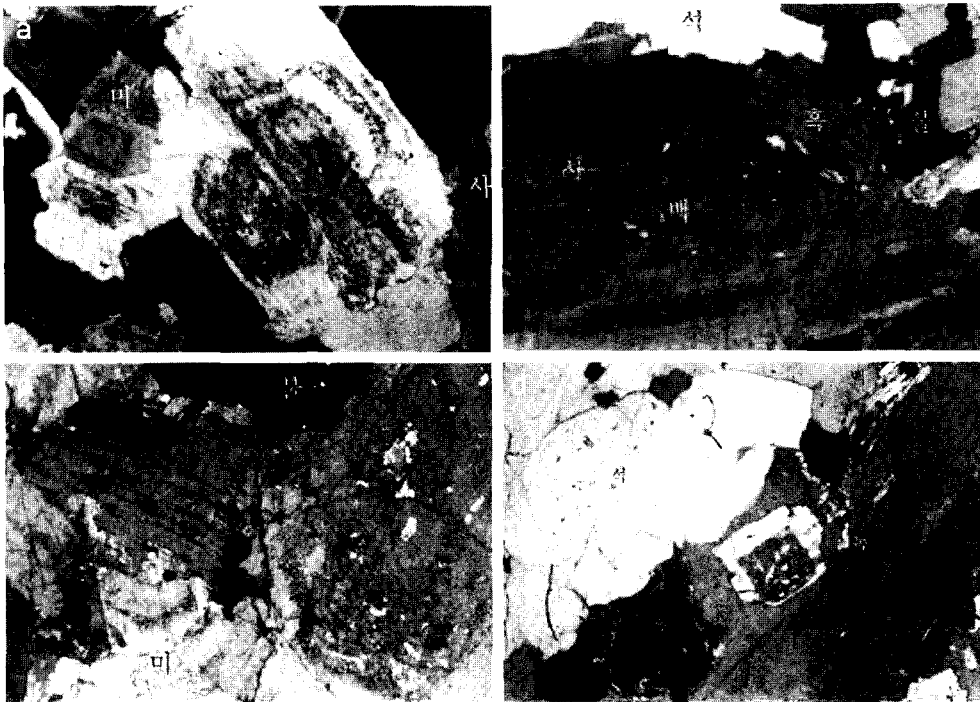


Fig. 5. Alterations of feldspar (a) Plagioclase showing zoned texture and partly sericitization. Myrmekite developed along the rim of plagioclase (b) Plagioclase showing zoned texture. Along the cleavage plane of biotite, chlorite developed due to alteration (c) In perthite, Small crystal of muscovite developed by sericitization (d) Along the cleavage plane of biotite and muscovite, chlorite produced by alteration.

Table 3. Modal analyses of the granite from the Sungryemun. (unit: vol%)

number/mineral	9-1	4	9	13
Quartz	35	35.7	36.1	35
Plagioclase	11.7	10.7	8.2	8.3
Orthoclase	5	3.6	3.3	5
Perthite	33.3	28.6	32.8	35
Biotite	6.7	8.9	9.8	8.3
Muscovite	3.3	5.4	6.6	5
Chlorite	1.7	1.8	1.6	1.7
Sericite	3.3	5.3	1.6	1.7
Total	100	100	100	100

였다. 구성광물 비율을 알아보기 위해 각 시료의 X-선 회절선에 대해 SIROQUANT를 이용하여 결정된 주조성 광물 비율은 다음과 같다(Table 4). SIROQUANT에 의한 광물조성의 정량분석 결과의 신뢰도를 알아보기 위해 실시된 단일 시료에 대한 화학성분의 norm 계산에 의한 광물조성비와 X-선 정량회절분석에 의한 광물 조성비의 부합성은 박찬수 외(2002)에 의하여 보고 되었으며 혼합비율을 달리한 각각의 광물 이성분계 분말 시료의 혼합비와 X-선 회절 정량분석결과의 상관관계

가 송윤섭 외(2001)에 의해 발표된 바 있다.

원암의 풍화정도를 알아보기 위해 풍화되기 전 원암의 광물조성으로 볼 수 있는 CIPW norm 계산에 의한 석영-K-장석-사장석의 삼각도표와 풍화된 상태의 광물 조성인 X-선 회절 정량분석에 의한 삼각도표와 비교해 보았다(Fig. 6).

분석된 모든 화강암류를 삼각도표에 도시해보면 norm 계산에 의한 결과는 화강암 영역의 중간에 도시되는 반면 X-선 정량회절분석에 의한 풍화된 석재의 광물

Table 4. XRD Quantitative analysis of granite from the Sungryemun. (unit: wt%)

sample	NT01-05	NT01-09	NT01-13	NT01-15
Quartz	43.8	44.4	41.6	49.1
Plagioclase	22.3	27.9	25.5	30.9
K-feldspar	20.5	15.1	15.5	16.4
Biotite	7.1	9.5	15.1	2.5
Muscovite	4.7	-	-	-
Clays	1.6	3.0	2.3	1.3

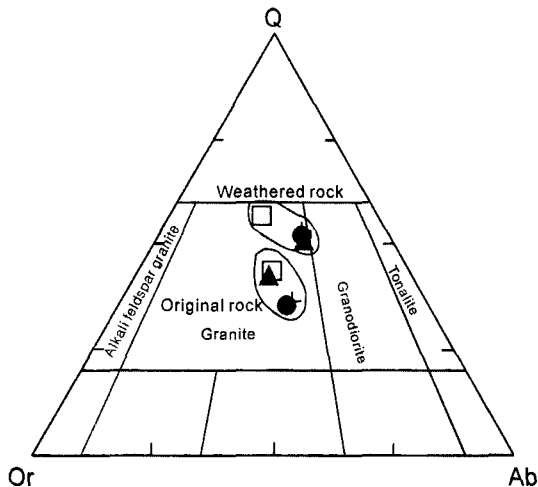


Fig. 6. Mineral compositions of the granite from the Sungryemun between original rock and weathered rock. Symbols are the same as in Fig. 2.

조성에 대한 결과는 석영쪽에 가까운 화강암 영역에 도시되어 K-장석 및 사장석의 풍화에 의해 상대적으로 석영이 부화된 결과를 나타낸다. 화강암 구성광물 중에서도 장석류는 석영에 비해 상대적으로 빠르게 풍화되는 광물이다(Lasaga, 1984). 따라서 이 결과는 장석의 풍화작용이 상당히 진행된 결과로 볼 수 있다. 풍화의 결과로 견운모나 점토광물 등이 생성된 것으로 추정되나 보다 정확한 확인을 위해서는 전자현미경 관찰과 점토광물에 대한 정확한 XRD 분석이 선행되어야 하겠다.

보수자재

시멘트

승례문은 축조 후 몇 차례의 보수공사가 이루어졌는데 석재의 균열과 이탈을 저감시키기 위해 시멘트를 석재의 틈간 접촉에 이용하였거나 쇠못을 석재사이에 박아 넣었다.

시멘트 내에서는 알칼리-골재반응에 의해 시멘트의 알칼리 성분(Na⁺, K⁺)과 석영, 장석이 주성분인 골재의 계면에서 화학적으로 반응이 일어나 점토광물이 반응 생성물로 정출되며 이러한 광물은 수분의 흡수와 방출에 의하여 부피의 팽축이 거듭됨으로써 시멘트 구조물에 심각한 손상을 야기 시킨다. 또한 시멘트 내에 항상 존재하는 알칼리 황산염은 시멘트가 수화작용을 받음으로써 쉽게 용해되어 알칼리 이온이 유리된다. 알칼리-골재반응은 주로 석영, 장석 등이 시멘트와의 전체적인 계면 혹은 국부적인 균열을 따라 일어난다(하성호 외, 1990).

승례문 보수에 사용된 시멘트 1점(NT01-07B)에 대한 X-선 회절 정량분석의 결과는 석영이 51.1%, 장석 28.6%로서 시멘트의 79.7%가 알칼리-골재반응에 쉽게 반응하는 광물로 구성되어 있음을 보여주고 있다. 또한 보수공사에 사용된 시멘트의 주성분은 CaO, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, MgO 및 황, 염소 등이다(Table 5). 시멘트에 다량 함유된 황과 염소들은 산화물 또는 염화물로 존재하며 대기나 빗물 속에서 용해되어 석재를 공격하여 반응을 일으켜 새로운 광물을 형성시키며 그 결과 부피의 팽창을 수반하여 석재의 풍화를 촉진시키는 역할을 한다.

우리나라에서 생산되는 시멘트는 고알칼리 시멘트에 해당되며(하성호 외, 1990) 승례문 석재로 사용된 화강암의 주광물 조성이 석영 사장석, 정장석임을 고려할 때 시멘트를 사용한 석재의 보수는 오히려 보수부위의 알칼리-골재반응을 촉진시키는 요인이 된다.

시멘트의 풍화는 그 입자가 공기와 접촉하여 수분이거나 탄산가스를 흡수하여 원만한 수화반응과 탄산화가 진행되어 입자 표면에 CaCO₃의 얇은 막을 만들게 된다. 풍화의 진행에 따라서 수산화석회와 탄산석회가 생성됨으로써 시멘트의 강열감량은 증가하고 비중은 저하한다. 2점의 시멘트 시료 (NT01-07, NT01-12)에서 시멘트 표면(NT01-07A, NT01-12A)의 강열감량이 시멘트 내부(NT01-07B, NT01-12B)에 비해 상대적으로 높게 나타나 시멘트 표면에서의 풍화정도가 상대적으로

Table 5. Chemical composition of cements from the Sungryemun.

(unit : wt%)

Sample	NT01-06	NT01-07A	NT01-12A	NT01-12B
Al ₂ O ₃	8.67	6.17	8.63	10.74
CaO	15.23	14.29	21.52	0.49
Fe ₂ O ₃ *	1.81	0.88	0.92	0.71
K ₂ O	2.23	2.59	2.46	3.84
MgO	1.55	1.11	3.40	0.11
MnO	0.34	0.02	0.04	0.05
Na ₂ O	0.99	1.21	0.29	2.71
P ₂ O ₅	0.24	0.10	0.07	0.02
SiO ₂	55.21	60.88	42.78	62.09
TiO ₂	0.24	0.11	0.04	0.10
L.O.I.	12.24	12.57	19.56	18.30
Total	98.75	99.93	99.70	99.18
S	5.86	4.42	6.42	4.27
Cl	2.13	-	9.30	12.01

Fe₂O₃*: total FeO.

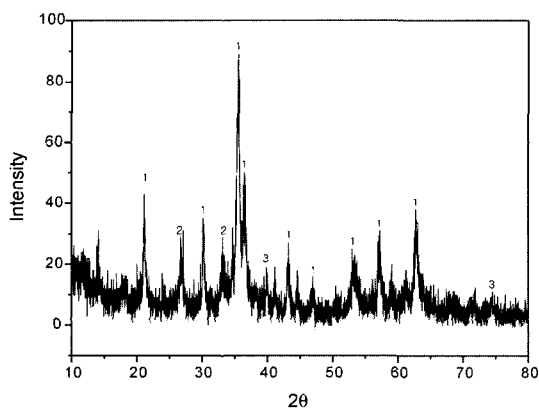


Fig. 7. XRD pattern for weathered nail used for repair material. 1. Iron oxide (Fe₃O₄), 2. Iron Fluoride (FeF₂), 3. Iron oxide hydrate (Fe₂O₃ · 2H₂O)

로 심함을 알 수 있다.

쇠못

보수에 이용된 쇠못의 X-선 회절분석(Fig. 7)에 의하면 주조성이 Fe₂O₃ · H₂O, Fe⁺³O(OH)와 Fe₃O₄로서 이들은 모두 철심의 산화작용에 의한 산물이다. 이는 쇠못의 철이 대기 중의 산소에 의하여 산화되었음을 뜻한다. 철 성분중 Fe⁺²는 자유산소와 만나게 되면 쉽게 반응하여 Fe⁺³로 변하게 된다. 즉 FeO로부터 Fe₂O₃(적철석)로 변하거나 또는 물을 흡수하여 Fe₂O₃ · H₂O(갈철석)으로 변한다. 즉 광물내에 있는 Fe⁺²성분이 유리

되어져 나와 적철석이나 갈철석을 형성하게 됨으로 원래의 광물은 화학적으로 분해되어 버린다. 최근 승례문 석축 한가운데 홍예문 석재일부가 떨어져 나간 것은 균열된 석축을 지지하고 있던 쇠못이 산화에 의해 강도가 저하되어 일어난 것이다.

흑화현상의 특징

승례문 석재의 표면은 흑화현상에 의해 대부분 검게 변색되어 있다. 이 흑색층은 일반적으로 공기오염물질, 유기물, 철과 망간 등의 유색광물의 이동과 침착의 현상에서 생성될 수 있다(Leysen *et al.*, 1989). 흑화부위는 여러 기원의 물질들의 복합체로서 석조물을 구성하는 석재의 종류와 주변환경에 따라 성분이 달라질 수 있다(도진영, 2002; 장세정 외, 2002).

석재 표면의 흑화부분을 채취, 분말화하여 전자현미경(SEM)으로 분석한 결과 흑화표면은 대부분 석고로 구성되어 있음을 알 수 있었다(Fig. 8). 흑화표면에서 관찰된 석고를 구성하는 Ca²⁺의 경우 승례문을 구성하는 석재는 화강암이며 전반분석에 의한 결과를 보면 CaO는 1.4 wt% 미만의 미량으로 전반적으로 흑화된 승례문 석재표면을 감안할 때 화강암이 Ca²⁺의 주된 기원으로 볼 수 없으며 장기간에 걸친 대기분진이나 보수자재로 사용된 시멘트의 주구성광물인 방해석에서 유리된 Ca²⁺ 등이 석재표면이나 공극에 침착한 후 SO₄²⁻와 같은 음이온과의 결합에 의해 형성되었을 것으로 판단된다. 특히 보수자재로 사용된 시멘트 표면의 전

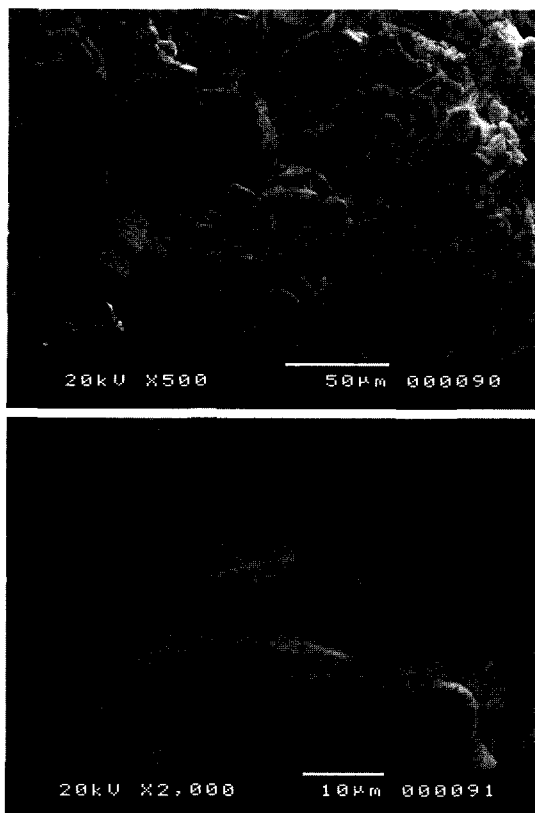


Fig. 8. SEM images of black layer on Sungryemun Wall Granite. Typical form of gypsum crystal is observed.

자현미경 관찰 결과 방해석이 분해되어 거의 대부분 충식구조를 나타내고 있으며 시멘트 표면에는 석고를 형성하지 않고 있어 석재표면으로의 주된 Ca^{2+} 이온의 공급처임을 잘 보여주고 있다(Fig. 9).

석고를 형성한 SO_4^{2-} 의 기원 또한 기체형태의 SO_2 및 산성비 등의 환경적 요인이나 박테리아 같은 생물학적 요인을 들 수 있으나 보수 시멘트의 전압분석 결과 대부분이 비교적 다량(4.27~6.42 wt%)의 황을 함유하고 있음을 고려할 때 주로 시멘트에서 유래되었을 것으로 판단된다.

토의 및 결론

송례문 벽체를 구성하는 석재 및 보수공사시 사용된 시멘트의 암석학적, 광물학적 조성을 알아보기 위해 석재 시료 7점에 대해 현미경 감광과 전압분석, 그리고 X-선 회절분석을 실시하였다. 현미경관찰 결과 이들의 광물조성은 석영, 퍼사이트, 사장석 및 흑운모가 주성

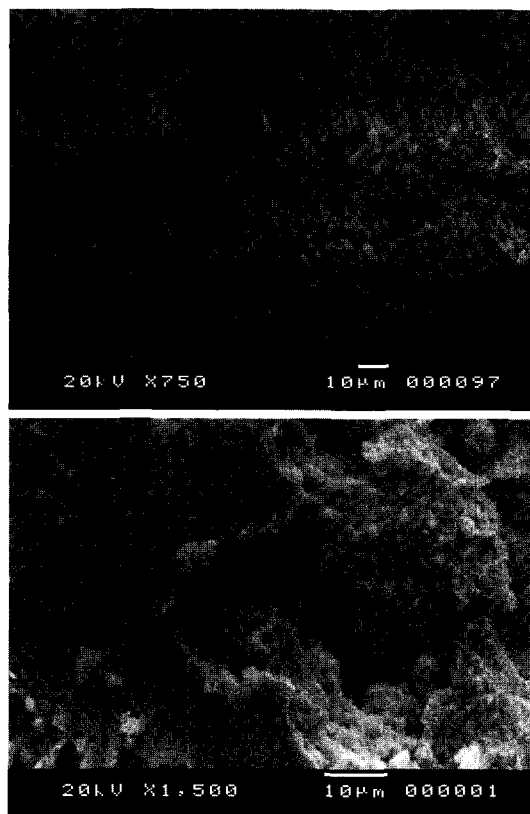


Fig. 9. SEM images of altered cement for repairing Sungryemun. All the grains of calcite show worm-eaten structure owing to chemical weathering.

분이며 부구성 광물로는 정장석, 백운모, 녹니석 그리고 견운모 등이 산출되며 퍼사이트는 대체로 큰 결정으로 산출되며 심한 견운모화 작용을 받은 것이 대부분이다. 전압분석 결과 이들은 모두 화강암 영역의 조성을 가지고 있으며 주성분 원소의 변화양상으로부터 본 화강암류는 칼크-알칼리 계열에 속한다. 미량원소의 경우 비교적 다량의 코발트를 함유하고 있다.

원암의 풍화정도를 알아보기 위해 풍화되기 전 원암의 광물조성으로 볼 수 있는 CIPW norm 계산에 의한 석영-K-장석-사장석의 삼각도표와 풍화된 상태의 광물조성인 X-선 회절 정량분석에 의한 삼각도표와 비교해 보았다. 이 결과 norm 계산에 의한 결과는 화강암 영역에 도시되는 반면 X-선 회절 정량분석에 의한 풍화석재의 광물조성에 대한 결과는 화강섬록암쪽에 가까운 화강암 영역에 도시되어 K-장석 및 사장석의 풍화에 의해 상대적으로 석영이 부화된 결과를 나타낸다. 따라서 이 결과는 장석의 풍화작용이 상당히 진행

된 결과로 볼 수 있다.

승례문 보수에 사용된 시멘트에 대한 X-선 회절 및 전자현미경 분석 결과 대부분의 광물조성이 알칼리-골재반응에 취약한 광물로 구성되어 있음을 보여주고 있다. 즉 시멘트에 다량 함유된 칼슘, 황과 염소들은 산화물 또는 염화물로 존재하며 대기나 빗물 속에서 용해되어 환경의 변화에 따라 석고로 재침전하여 대기 중의 오염물질 등과 함께 석재표면에 침착하여 흑화현상을 나타내게 된 것이다.

결론적으로 승례문의 현 상태는 석재의 풍화와 균열, 그리고 보수공사 때 사용된 자재의 약화 등 전체적으로 훼손이 심해 시급히 과학적인 보존대책을 마련해야 한다. 특히 최근 들어 발생한 승례문의 석축 한가운데 홍예문 석재 일부가 풍화를 견디지 못해 떨어져나간 것은 보존대책의 시급성을 여실히 드러내는 것이다.

국내 석조문화재는 국보 64기, 보물 442기(이상 국가 지정)와 시도지정문화재 637기가 있다. 삼국시대부터 조선시대말까지의 석탑 석불 부도 석등 등으로 대부분 1,000년 이상 야외에서 풍화에 노출돼 강도가 많이 약해져 있는 상태이다. 따라서 문화재 담당 국가 기관의 석조문화재 보존처리전문가를 양성해 석조 문화재 훼손 실태를 정기적으로 점검하고 광물학, 암석학 전공자들이 석조물 보존에 적극 참여케 하여 석조 문화재를 구성하는 암석의 성질과 특성 등에 대한 깊은 이해가 있어야 보존 방안에 대한 올바른 대책이 나올 수 있다.

사 사

조사를 허락해 주신 승례문 안전진단의 주관기관인 중구청 및 윤원규 박사를 비롯한 한국건설안전기술원 관계자들에게 사의를 표한다. 또한 이 논문의 심사를 맡아 건설적인 비평을 해주신 익명의 심사위원께 심심한 감사를 드리는 바이다..

참고문헌

김수진, 이민성, 김원사, 이수재, 1994, 서울지역의 자연환경변화에 관한 연구; 남산화강암의 풍화에 관한 환경광물학적 연구. 지질학회지, 30, 284-296.
 도진영, 2002, 석조물 표면의 흑화현상 고찰-흑색층의 구성 광물 및 흑색에 영향을 끼치는 기타성분, 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 77-80.
 박찬수, 김상기, 이연숙, 2002, 조선백자 원료광물 조성분 석 및 화학분석결과를 이용한 원료광물 조성 환산법 개발, 한국기초과학지원연구원 자체연구개발사업보고서

(KBSI-2002-2111-0132-0233), 32 p.
 송윤섭, 박찬수, 여상진, 2002, Siroquant 프로그램을 이용한 X-선 회절분석법의 정량화 연구, 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회.
 이상현, 1998, 국내 석조문화재의 보존대책수립을 위한 지질학적 고찰, 보존과학회지, 7, 9-18.
 이상현, 1999, 석굴암을 이루는 암석의 풍화현상, 보존과학회지, 8, 1-9.
 장세정, 김수진, 정기영, 도진영, 조현구, 2002, 석회동굴 흑색 피복물의 광물학적 특성 연구, 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 74-76.
 정기영, 이병윤, 1998, 팔공산 화강암내 사장석의 풍화, 지질학회지, 34, 44-57.
 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, 2000, 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여, 지질학회지, 36, 335-340.
 최석원, 윤용혁, 서만철, 김광훈, 이찬희, 1999, 충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책, 충청남도, 조사연구보고서, 425 p.
 최석원, 이찬희, 2000, 부여 대조사 화강암 미록보살입상의 물리적 및 화학적 풍화, 지질학회지, 36, 559-574.
 하성호, 김경수, 김무한, 정지근, 1990, 시멘트 골재용 각종 암석의 알칼리-골재반응에 대한 연구, 한국광물학회지, 3, 18-33.
 Bish, D. L., and Post, J. E., 1988, Quantitative analysis of geological materials using X-ray powder diffraction data and the Rietveld refinement method, Geol. Soc. Am. Abstr. Programs, 20, A223.
 Hill, R. J., and Howard, C. J., 1987, Quantitative phase analysis from neutron powder diffraction data using the Rietveld method, J. Appl. Crystallogr., 20, 467-474.
 Jercher, M., Pring, A., Jones, P. G. and Raven, M. D., 1998, Rietveld X-ray diffraction and X-ray fluorescence analysis of Australian aboriginal ochres, Archaeometry, 40, 2, 383-401.
 Lasaga, A. C., 1984, Chemical kinetics of water-rock interaction, Journal of Geophysical Research, 89, 4009-4025.
 Lee, S.G., 1993, Weathering of granite, Journal of the Geological Society of Korea, 29, 396-413.
 Leysen, L., Roekensand, E. and Van Grieken, R., 1989, Air-pollution-induced chemical decay of a Sandy-Limestone cathedral in Belgium, The Science of the Total Environment, 78, 263-287.
 O'Connor, B. H. and Raven, M. D., 1988, Application of the Rietveld refinement procedure in assaying powdered mixtures, Powder Diffraction, 3(2), 2-6.
 Potts, P. J., 1987, Handbook of silicate rock analysis, Blackie, Glasgow.
 Rietveld, H. M., 1969, A profile refinement method for nuclear and magnetic structure, J. Appl. Crystallogr., 2, 65-71.
 Young, R. A., Mackie, P. E., and Von Dreele, R. B., 1977, Application of the pattern-fitting structure refinement

method to X-ray powder diffractometer patterns, J. Appl. Crystallogr., 10, 262-269. (2003년 7월 31일 접수, 2003년 11월 13일 채택)

Young, R. A., 1993, The Rietveld method, IUCr, Oxford Univ. Press, Oxford.