

복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 내압구조에 대한 반복하중의 역학적 영향평가

천대성¹⁾, 박찬^{2)*}, 정용복¹⁾, 박철환²⁾, 송원경²⁾

Mechanical Properties of a Lining System under Cyclic Loading Conditions in Underground Lined Rock Cavern for Compressed Air Energy Storage

Dae-Sung Cheon, Chan Park*, Yong-Bok Jung, Chulwhan Park, Won-Kyong Song

Abstract In a material, micro-cracks can be progressively occurred, propagated and finally lead to failure when it is subjected to cyclic or periodic loading less than its ultimate strength. This phenomenon, fatigue, is usually considered in a metal, alloy and structures under repeated loading conditions. In underground structures, a static creep behavior rather than a dynamic fatigue behavior is mostly considered. However, when compressed air is stored in a rock cavern, an inner pressure is periodically changed due to repeated in- and-out process of compressed air. Therefore mechanical properties of surrounding rock mass and an inner lining system under cyclic loading/unloading conditions should be investigated. In this study, considering an underground lined rock cavern for compressed air energy storage (CAES), the mechanical properties of a lining system, that is, concrete lining and plug under periodic loading/unloading conditions were characterized through cyclic bending tests and shear tests. From these tests, the stability of the plug was evaluated and the S-N line of the concrete lining was obtained.

Key words Fatigue, Cyclic loading, Creep, Compressed air energy storage (CAES), S-N line

초 록 피로파괴는 반복적인 하중에 의해 재료 내에 균열이 발생하고, 진전함에 따라 재료의 물성이 약화되어 최종적으로 파괴에 이르는 현상을 말하며, 일반적으로 반복적인 하중이 가해지는 기계나 구조물 등은 피로파괴를 고려한다. 암반구조물의 경우 일반적으로 동적인 반복하중에 의한 피로파괴보다는 정적인 크립에 의한 피로파괴를 경험하는 경우가 대다수이다. 그러나 압축공기와 같은 물질을 지하에 저장하는 경우 물질의 압출에 의한 내부 압력의 변화가 발생하기 때문에 지하저장시설이 위치하는 암반과 내부 콘크리트의 동적 피로파괴 특성을 검토해야한다. 본 연구에서는 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 내부에 설치되는 콘크리트 라이닝의 반복굴곡하중에 대한 물성변화와 플러그가 설치된 경계에서의 반복전단하중에 대한 물성변화를 실험적인 방법에 의해 알아보았다. 반복전단시험을 통해 적절한 수직응력에서 평면 인터페이스의 플러그도 역학적인 안정성을 확보할 수 있음을 알 수 있었다. 반복굴곡시험에서는 반복재하에 따른 콘크리트 라이닝의 강도저하 현상을 확인하였으며, 이로부터 S-N 곡선을 구하였다.

핵심어 피로파괴, 반복하중, 크립, 압축공기에너지저장, S-N 곡선

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* Corresponding Author: chan@kigam.re.kr

Tel: +82-42-868-3245

Address: KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

Received: February 21, 2012

Revised: April 6, 2012

Accepted: April 6, 2012

1. 서론

대용량 에너지저장기술로서 압축공기 형태로 전력을 에너지를 지하공동에 저장하였다가 필요시 저장된 압축공기에너지를 활용하여 전력에너지를 공급하는 압축공기에너지저장(Compressed air energy storage, CAES) 기술이 최근 주목을 받고 있다(김형목 외, 2009; 한국지

질자원연구원, 2009; 김형목 외, 2011; 박도현 외, 2011). 압축공기에너지 저장공동은 기밀시스템의 설치유무에 따라 복공식과 무복공식으로 구분되며, 복공식 압축공기에너지저장 시스템의 경우 압축된 공기의 누출 방지와 역학적 안정성을 향상시키기 위해 콘크리트 라이닝(또는 복공판)을 포함한 기밀시스템을 설치한다.

저장 압축공기의 내압을 지지하는 기밀시스템의 내압구조는 복공판, 복공판과 암반의 간극을 채우는 뒷채움 콘크리트로 구성된다. 복공판은 압축공기에 의한 내압작용 시 저장공동 주변장의 증가에 따라 세그먼트 연결부에 자유롭게 변위가 발생할 수 있도록 되어있다(Fig. 1).

복공식 압축공기에너지 저장시스템의 경우 일단위로 최고압력과 최저압력의 변화가 발생하며 이는 라이닝과 멤브레인 등으로 구성된 내압구조와 플러그 및 암반에 반복적인 하중을 가하게 된다. 이러한 주기적 하중에 의해 재료의 강도보다 낮은 수준에서 파괴가 발생하는 것이 피로파괴이며, 파괴를 유도하지 않는 특정한 하중수준을 피로한도(fatigue limit) 또는 내구한도라고 한다. 피로파괴는 일반적으로 반복적인 하중이 가해지는 기계나 구조물 등에서 고려되며, 암반구조물의 경우 일반적으로 동적인 반복하중에 의한 피로파괴보다는 정적인 크립에 의한 피로파괴를 경험하는 경우가 대다수이다.

압축이나 인장하중 상태에서의 구조물의 피로에 대한 연구는 콘크리트나 금속 분야에서는 많은 연구가 진행되고 있다(Zhang et al., 1999; Badge & Petros, 2009; Xiao et al., 2010). 암반분야에서도 발파, 지진, 양수발전소의 주기적 하중 증감에 의한 충격 및 진동형상에 의한 불연속면의 거동에 대한 관심이 증가하면서 주기(cyclic) 및 동적(dynamic) 전단거동과 같은 특성에 관한 연구가 수행되었다(이희석, 1999; 박병기와 전석원, 2006a; 박병기와 전석원, 2006b). 또한 일부에서 암반절리면 크립 등에 대한 연구를 수행한 적이 있다(Amadei & Curran, 1980). Jafari et al.(2003)은 모르타르를 이

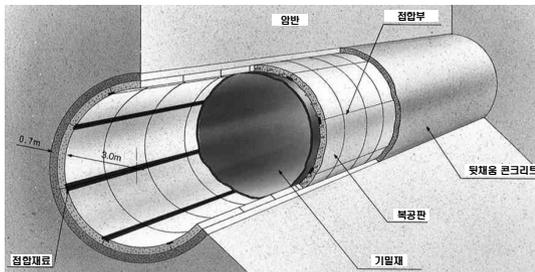


Fig. 1. Components in a lined rock cavern for CAES.

용한 복제(replica) 시료를 사용하여 반복하중을 받는 전단면의 거동을 연구했으며 이로부터 전단변위속도, 반복하중 수 및 전단응력크기 등의 요인이 반복전단강도와 관련성을 제시하였고, 실험결과를 사용한 수학적 모델도 제시하였다. 또한 유류 지하저장공동의 플러그 안정성 평가를 위해 암반과 콘크리트 인터페이스에 대한 전단거동 특성에 대한 연구도 수행이 되었으나 대부분 일방향 거동에 대한 것이었다(박의섭, 2000; 홍창우 외, 2002).

따라서 주기적으로 일정한 하중을 받는 복공식 압축공기에너지 저장공동의 경우 안정성과 기밀성을 확보하기 위해서는 내압구조의 콘크리트 라이닝과 암반절리, 암반과 콘크리트의 인터페이스에 대하여 단순한 반복하중이 아니라 실제 압력 거동을 고려한 피로파괴 성능평가가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 무근 라이닝에 대한 반복굴곡시험과 암석/콘크리트 사이의 인터페이스에 대한 반복전단시험을 수행하여 주기적 하중 재하에 따른 이들의 역학적 특성과 장기 안정성을 평가하였다.

2. 반복하중에 의한 암석과 콘크리트 인터페이스 전단시험

2.1 시험방법

피로하중용 전단시험장치는 암반 내 존재하는 개별 불연속면이나 암반과 라이닝 인터페이스 등의 반복하중 하에서의 전단거동을 평가하기 위한 장치를 말한다. 일반적인 전단시험 장치는 일방향으로만 전단하중을 가하도록 되어 있으나 본 연구에 사용된 시험장치는 전단력을 양방향으로 가할 수 있도록 제작되었다(Fig. 2)

본 시험에서는 가장 보수적인 판단을 위해 평면절리

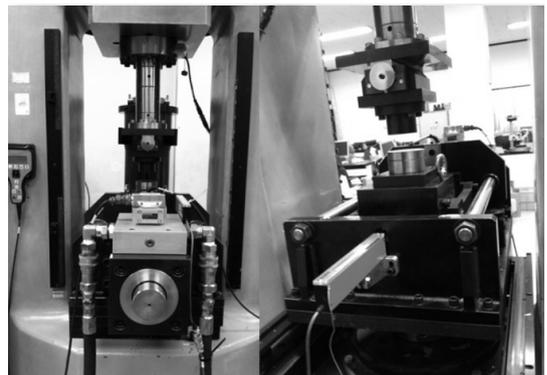


Fig. 2. Cyclic shear test apparatus.

사용하여 양방향으로 반복하는 반복전단시험을 수행하였다. 즉, 하부 전단상자에는 압석시험편을, 상부 전단상자에는 라이닝 시험편을 장착하여 반복전단시험을 수행하였다. 전단면적은 12 cm x 12 cm이며 전단변형이 발생해도 하중을 받는 면적이 일정하도록 하부 시험편의 크기가 더 크게 하여 실험을 수행하였다. 먼저 1, 2, 3, 4, 5 MPa의 수직응력조건에서 양방향 전단시험을 수행하여 인터페이스의 기본마찰각을 구하였다. 이 값을 기준으로 Mohr-Coulomb 파괴강도식을 기초하여 수직응력을 재하할 때 예상강도 기준으로 전단응력을 변화시키면서 반복전단하중을 가하였다.

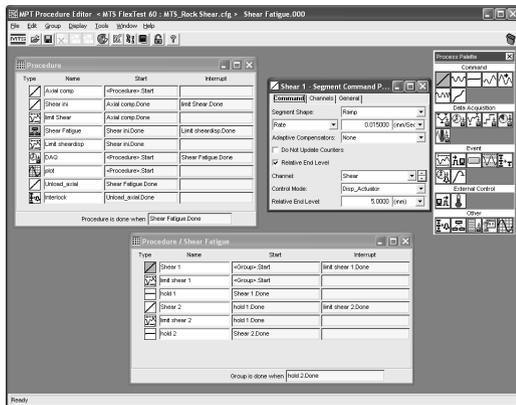
세부적인 시험절차는 MTS 시스템의 MPT(Multi-Purpose Testware)를 이용하여 제어하였다(Fig. 3(a)). 먼저 수직하중을 제어변수로 설정하여 초기수직응력을 수동으로 가한 뒤 0.015 mm/sec의 속도로 각 단계별로 지정한 수직응력까지 도달하도록 한다. 이후 전단변위로 제어변수를 변환한 뒤 전단응력을 1 MPa까지 재하한다. 시험상의 안전 및 장비 보호를 위하여 ±0.015 mm/sec 속도의 변위제어방식을 선택하였으며 전단변위를 이용한 선형 재하 및 제하 과정에서 지정한 응력수준(최대 2

MPa, 최소 1 MPa)에 도달하면 10초간 하중을 유지한 뒤 다시 재하 및 제하를 반복하도록 설정하였다. 최대 500회의 반복전단하중을 가하였으며 재하 및 제하과정에서 5 mm 이상 전단변위가 발생하면 시험을 자동으로 종료하도록 설정하였다. MPT에서 정의한 방식으로 시험을 할 경우 전단하중-시간 프로파일은 Fig. 3(b)와 같다. 하중을 제어변수로 할 경우 급격한 시료 파괴시 장비 및 계측기에 무리를 줄 수가 있어 위와 같은 방식으로 시험을 수행하였다.

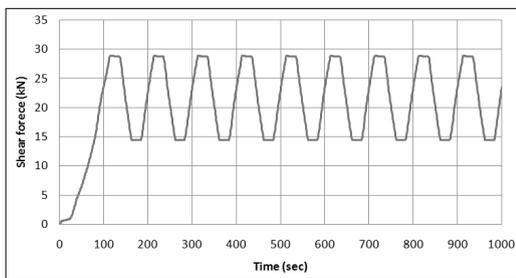
2.2 시험결과

압석/라이닝 인터페이스에 대하여 1~5 MPa의 수직응력 조건에서 1회 왕복전단시험을 수행하여 기본마찰각을 구하였다. 1회 왕복전단 시 거칠기가 없는 평면 인터페이스이기 때문에 전단방향에 관계없이 일정한 정점 전단강도값을 보여주었다. 5회의 시험에서 구한 수직응력-전단강도 값에 대한 선형회귀 결과 32.83°의 기본마찰각이 구해졌다(Fig. 4). 인터페이스의 기본마찰각을 적용한 Mohr Coulomb 파괴기준을 근거로 할 때 예상전단강도가 2 MPa이 되는 수직응력은 3.1 MPa이다. 본 절에서는 수직응력을 변화시켜서 전단하중/강도 비가 94~123% 범위에서 반복전단시험을 수행하였다.

시험결과는 Fig. 5와 같이 전단응력/강도=100% 이하에서는 미끄러짐이 발생하지 않았으나, 전단응력/강도=116%에서부터 미끄러짐이 발생하기 시작하였다. 그러나 이 경우에도 약하게 경화(hardening)현상이 발생한 뒤 다시 주어진 하중범위 내에서 선형거동을 하는 것으로 나타났다. 그러나 전단응력/강도=123%부터는 연속적인 미끄러짐이 발생하였으며 전단응력도 2 MPa에 도달하지 못했으며 전단강도가 약간씩 감소하는 연화(softening) 현상이 발생하였다. 완벽한 평면절리일 경우



(a)



(b)

Fig. 3. MPT (Multi-Purpose Testware) procedure (a) and shear load profile in MPT (b).

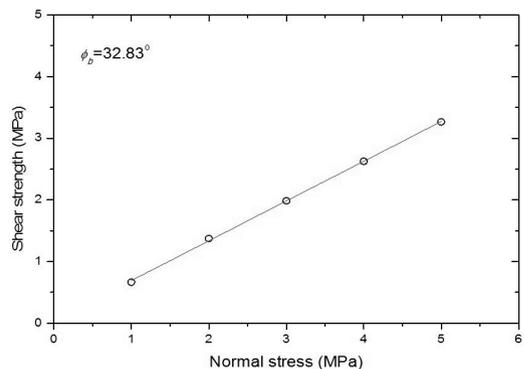


Fig. 4. Basic friction angle of the interface between rock and concrete lining.

연화나 경화현상이 없어야 하지만 본 실험에서는 시료의 평편도 오차로 인해 이러한 현상이 발생한 것으로 판단되며 예상강도보다 큰 전단하중(100%~116%)에서도 미끄러짐이 발생하지 않은 것은 겉보기 접착력(0.045 MPa), 절단면 편평도 및 측정 오차 등에 기인한 것으로 판단된다.

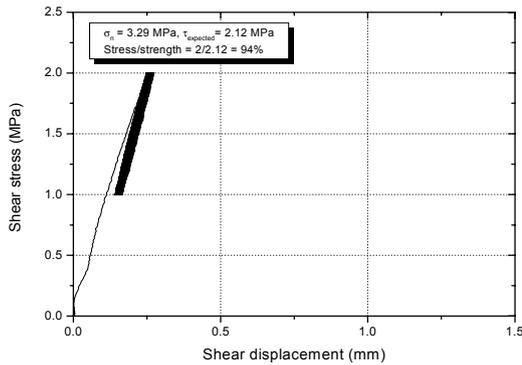
이상의 반복전단시험 결과는 풍화와 같은 장기간 강도감소요인을 배제할 경우 암반-플러그 인터페이스에 공동 심도 및 방향을 조절하여 적절한 수직응력($\sigma_n > \tau_{expected} / \tan\phi$)을 가할 경우 플러그의 평면 인터페이스도 안정성을 확보할 수 있음을 의미한다. 더구나 실제 시공에 있어서 플러그는 썸기 또는 테이퍼 형태로 대부분 시공되므로 공동내부에서 압축력이 작용할 경우 플러그는 암반과 자동적으로 맞물림이 발생한다. 따라서 플러그 재료 자체의 강도가 내부저장압력에 대하여 충분하다면 압축공기에너지 저장공동내 플러그 인터페이

스의 안정성은 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

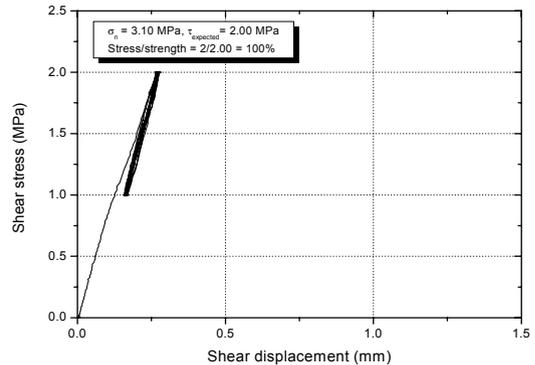
3. 반복하중에 의한 콘크리트 재료 굴곡시험

3.1 시료의 물리적, 역학적 특성

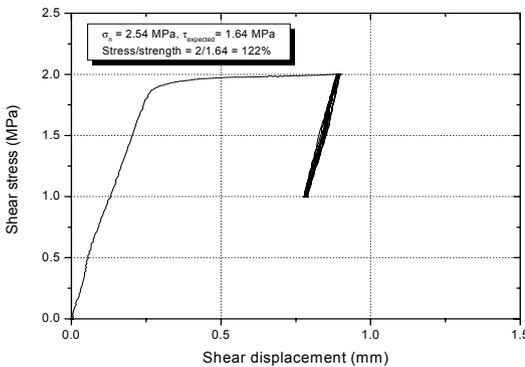
시험에 사용된 시료는 균질성을 확보하기 위하여 콘크리트 전문업체에 의뢰하여 설계강도 약 42 MPa의 3종 콘크리트로 제작하였다. 장기간의 시험시간과 양생 시간에 따른 강도변화를 고려하여 시료 성형 후 약 1 년의 양생기간을 거친 후 시험을 수행하였다. 시료는 일반적인 4점 굴곡시험 시료형태인 150 mm × 150 mm × 550 mm의 각주로 제작하였다. 제작된 시료는 물(5.7%), 3종시멘트(16.8%), 모래(30.0%), 자갈(잔골재, 7.2%), 혼화재(0.3%) 등으로 구성되어 있으며, 반복굴곡시험을 수행하기 전 건조, 습윤상태의 시료에 대해 각 5회씩 기본물성시험을 수행하였다. 측정된 시험결과는 Table 1 과 같이 나타났다.



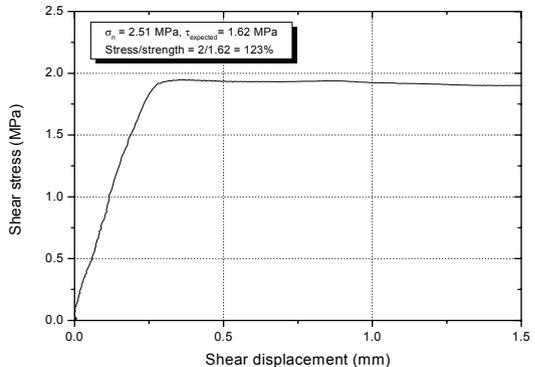
a) shear stress/strength = 94%, no slip



b) shear stress/strength = 100%, no slip



c) shear stress/strength = 122%, two faces matched after hardening



d) shear stress/strength = 123%, continuous slip and softening

Fig. 5. Shear behavior with the ratio of shear stress to shear strength.

Table 1. Physical and mechanical properties of concrete used for 4- point bending test.

Specimen	Density (g/cm ³)	Absorption Ratio (%)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	E (GPa)	Poisson's Ratio
			S-wave	P-wave			
Dry condition	2.37	2.92	1,110	4,420	56	21.2	0.12
Wet condition					39	17.7	0.11

3.2 시험방법

본 시험은 압축공기의 입출입에 따른 콘크리트 라이닝의 인장 피로파괴 특성을 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 4점 굴곡시험(4-point bending test)을 수행하였으며, 하중재하는 사인파(sin wave) 형태의 반복재하방식을 채택하였다. 반복재하하중의 최소값은 일반굴곡시험(이하 ‘굴곡시험’으로 표현)에서 측정된 평균 최대지지하중의 50%를 선택하였으며, 최대값은 최대지지하중의 95, 90, 85, 80, 70%를 재하하여 각 하중 단계마다 5개 시료에 대하여 시험을 수행하였다. 반복재하속도는 시험장비와 시료의 변위 폭을 고려하여 2 Hz의 속도로 사인파 형태의 하중이 재하되도록 시험을 수행하였다.

굴곡시험을 먼저 수행하고 그 측정결과에 따른 최대 지지하중을 고려하여 반복재하하중을 결정하였으며, 파괴가 발생할 때까지 최대 50,000회의 반복재하시험을 실시하였다. 50,000회 반복 후에도 파괴가 발생하지 않은 시료에 대해서는 굴곡시험을 다시 수행하여 최대 지지하중의 감소를 측정하였다.

파단이 예상되는 시료의 하부에 파단선에 직교하도록 스트레인게이지를 부착하고, 상부 하중 작용대와 일치하는 시료의 측면 중앙에는 미소파괴음(acoustic emission, AE) 센서를 설치하여 굴곡시험 시 발생하는 변형과 미소파괴음을 측정하였다. 미소파괴음은 재료의 손상과 관련된 갑작스런 변형에너지가 방출할 때 발생하는 탄성파로서, 일반적으로 재료의 파괴에 앞서 미소파괴음 발생이 현저해지는 경향을 보인다(천대성 외, 2008; PAC, 2009). 본 시험에서 사용된 미소파괴음 장치는 미국 PAC사의 PCI/Disp 시스템으로, 2 채널을 통해 측정이 수행되었다. 시간 파라미터인 PDT, HDT, HLT는 각각 200µsec, 500µsec, 800µsec로, 신호취득속도는 10MHz로 설정하였다. 트리거 수준은 45dB로 설정하였다.

3.3 시험결과

굴곡시험에서는 Fig. 7과 같이 전형적인 하중-처짐 관계곡선을 얻었다. 굴곡시험에서 측정된 자료인 최대하중(F_{max})과 시료 지지대와 하중 작용대 사이의 거리(l_{sc}),

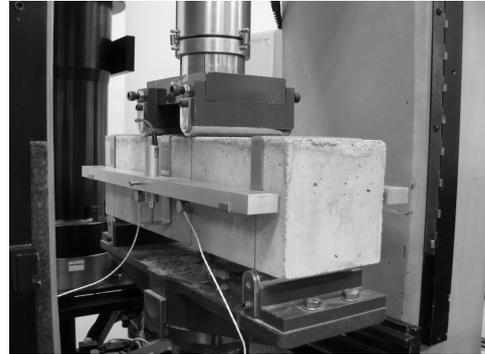


Fig. 6. 4-Point bending test.

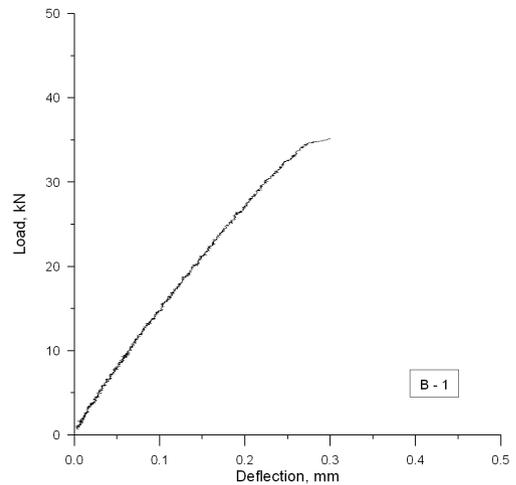


Fig. 7. Typical load-deflection curve in a bending test.

시료의 높이(h) 등을 이용하여 식 (1)과 같이 휨 모멘트 (M_B)와 식 (2)와 같은 굴곡강도(σ_{bB})를 계산 하였다.

$$M_B = \frac{l_{sc}}{2} \cdot F_{max} \tag{1}$$

$$\sigma_{bB} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max}}{h^2} \tag{2}$$

굴곡시험에서 시료는 재하하중이 약 36.8 kN일 때 인장파괴가 발생하였으며, 약 0.29 mm의 처짐이 발생하였다. 인장파괴는 시멘트 자체, 골재와 시멘트의 경계, 그리고 골재 자체에서 발생하였으며, 이로 인해 약간의 굴곡을 갖는 파단면이 형성되었다.

굴곡시험 및 반복굴곡시험의 결과를 Table 2에 제시하였다. Table 2에서와 같이 최대재하하중이 85, 90, 95%인 경우는 반복횟수가 50,000회 이내에서 파괴가 발

생하였으나, 70%와 80%의 최대재하하중이 작용한 경우에는 50,000회 이내에서 파괴가 발생하지 않았다. 전술한 바와 같이 50,000회 반복시험동안 파괴가 발생되지 않은 시료에 대해 추가적으로 굴곡시험을 일회 수행하여 최대하중, 휨모멘트 등을 산출하였다. 그 결과 80% 최대재하하중에서 50,000회의 반복재하하중을 받은 시료는 반복재하로 인해 내부의 손상이 발생한 것으로 추측되며, 이로 인해 반복재하를 받지 않은 원 시료 대비

Table 2. Results of cyclic bending tests.

Specimen No.	No. of cycle	Max. Load, F_{max} (kN)	Bending moment, $M_B(kN \cdot mm)$	bending strength, $\sigma_{bB}(MPa)$	Remark
B - 1		35	2,625	2.33	Normal bending test
B - 2		37	2,775	2.47	
B - 3		36	2,700	2.40	
B - 4		39	2,925	2.60	
B - 5		37	2,775	2.47	
average		36.8	2,760	2.45	
B(95) - 1	59				50-95%
B(95) - 2	1,981				
B(95) - 3	559				
B(95) - 4	421				
B(95) - 5	3,058				
average	1,216				
B(90) - 1	713				50-90%
B(90) - 2	2,748				
B(90) - 3	26,434				
B(90) - 4	5,296				
B(90) - 5	2,051				
average	7,448				
B(85) - 1	3,072				50-85%
B(85) - 2	30,957				
B(85) - 3	2,473				
B(85) - 4	17,904				
B(85) - 5	40,295				
average	18,940				
B(80) - 1		35	2,625	2.33	50-80%
B(80) - 2		33	2,475	2.20	
B(80) - 3		35	2,625	2.33	
B(80) - 4		34	2,550	2.27	
B(80) - 5		35	2,580	2.33	
average		34.4	2,580	2.29	
B(70) - 1		36	2,700	2.40	50-70%
B(70) - 2		39	2,925	2.60	
B(70) - 3		35	2,625	2.33	
B(70) - 4		34	2,550	2.27	
B(70) - 5		34	2,550	2.27	
average		35.6	2,670	2.37	

6.6%의 강도저하를 보였다(Fig 8).

Fig. 9는 반복굴곡시험에서 파괴가 발생하였던 반복 횟수와 최대재하하중을 의미하는 응력수준(stress level)과의 관계를 그래프로 도시한 것이다. 비록 분산이 크지만 S-N 관계를 직선으로 가정하고, 반복하중의 주기가 재료의 안정성에 미치는 반복하중 재하 횟수와 관계 없다고 가정한 후, 현재의 결과를 외삽하면 80%의 최대재하하중이 작용할 때, 내압구조의 콘크리트 라이닝에서 인장파괴가 발생하려면 약 140만회(일일 운영주기를 가정하면 약 3,835년에 해당)의 반복재하가 이루어져야 함을 의미한다. 그러나 위와 같은 예측은 분산이 큰 선형회귀로부터 산출된 결과이기 때문에 보다 정확한 피로수명 예측을 위해서는 추가 시험이 수행되어야 할 것이다.

반복하중에 의한 강도저하와 함께 피로거동을 알아보고자 변위, 변형률 및 미소파괴음을 측정하였다. Fig. 10은 최대재하하중이 95%인 시료의 반복굴곡시험에서 측정된 처짐, 미소파괴음 그리고 변형률에 대한 그래프이

다. 반복굴곡시험에서 처짐과 변형률은 최대, 최소 하중 범위구간에서 반복재하로 인해 이 값들 역시 반복적으로 변화하는 양상을 보였다. 그러나 미소파괴음의 경우 시료 내부의 균열이나 손상이 발생할 때 방출되는 신호이기 때문에 이러한 반복현상이 나타나지 않고 지속적으로 증가하는 모습을 보였다. 굴곡시험에서 재하하중이

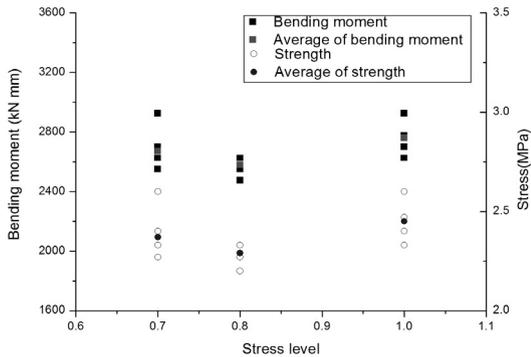


Fig. 8. Degraded mechanical properties due to cyclic loading.

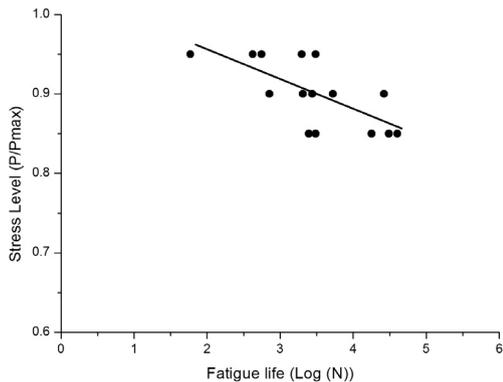
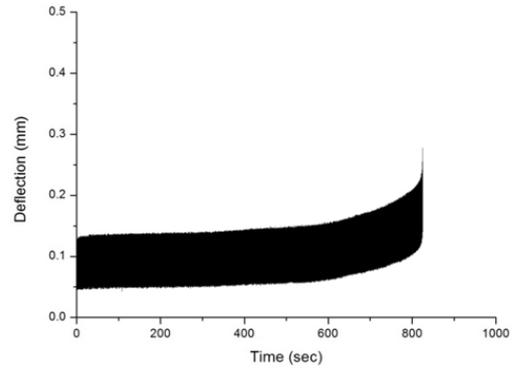
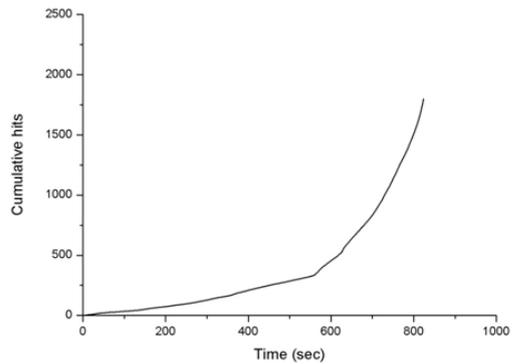


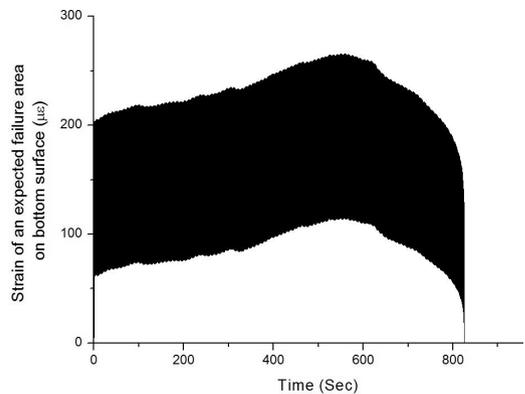
Fig. 9. S-N line for a concrete lining.



a) Deflection vs. time



b) AE cumulative hits vs. time



c) Strain vs. time

Fig. 10. Deflection, AE hits and strain with time in a cyclic bending test at 95% loading condition.

50%가 가해진 경우 약 0.145 mm의 처짐이 발생하였고 (Fig. 7), 이후 추가적으로 0.145 mm의 처짐이 발생한 후 파괴에 이르렀다. 그러나 최대재하하중이 95%인 시료의 반복굴곡시험에서는 파괴가 발생할 때까지 추가적으로 발생한 처짐은 약 0.12 mm로서 굴곡시험 결과에 비해 처짐이 적게 발생한 상태에서 파괴가 발생함을 알 수 있다. Fig. 10의 처짐곡선의 경우 3차 피로거동의 시작점을 약 600 sec가 지난 후에 알 수 있는 반면, 미소파괴음 누적곡선의 경우 이보다 약 50 sec(반복횟수 100 회에 해당)가 빠른 550 sec에서 미리 인지가 가능함을 보였다. 변형률-시간곡선 역시 약 550 sec에서 경향이 바뀌고 있음을 알 수 있으며, 이는 파단면의 발생으로 인해 스트레인게이지의 값에 영향을 준 것으로 판단된다. 스트레인게이지의 경우 3차 피로거동으로 발전을 지시 하기는 하지만 이들이 부착된 극히 일부지역의 정보만을 제공할 수 있기 때문에 실제 현장적용에서는 한계성을 갖는다. 이에 반해 미소파괴음 측정의 경우 센서가 설치된 지점을 포함한 주변 영역을 모두 계측가능하기 때문에 콘크리트 라이닝의 반복하중재하에 따른 파괴를 예측하는 데 있어 변위와 변형률 계측보다 미소파괴음 계측이 안정성을 판단하는 데 보다 효율적임을 알 수 있다.

Fig. 11은 재하하중의 크기와 반복횟수에 따라 센서 한 개당 발생한 미소파괴음 누적곡선을 나타낸 것이다. 반복굴곡시험에서의 미소파괴음 누적곡선은 일반적인 크립거동과 같이 3단계로 구분되어짐을 알 수 있으며, 또한 Xiao et al.(2009)이 구분한 곡선유형과 유사함을 보였다. 미소파괴음 누적곡선에 의한 피로거동의 경우, 재하하중에 따라 곡선의 모양이 달라지며, 재하하중이 작을수록 2차 단계의 미소파괴음의 발생속도가 낮아짐을 보였다. 따라서 미소파괴음의 발생속도를 분석하는 경우 장기적인 안정성을 판단하는 추가적인 인자로 사

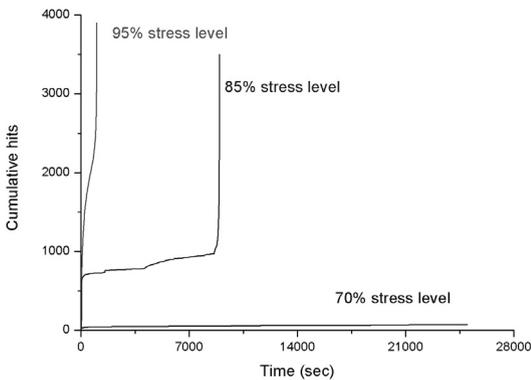


Fig. 11. Classification of AE cumulative hits with different stress levels.

용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

반복전단시험결과 풍화와 같은 장기간 강도감소요인을 배제할 경우 적절한 수직응력조건에서 평면 인터페이스도 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 더구나 플러그의 경우 췌기 또는 테이퍼 형태로 대부분 시공되므로 플러그는 공동내부에서 압축력이 작용할 경우 암반과 자동적으로 맞물림이 발생한다. 따라서 플러그 재료 자체의 강도가 내부저장압력에 대하여 충분하다면 압축공기에너지 저장공동의 안정성은 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

반복굴곡시험에서는 재하수준에 따른 강도저하 현상을 확인하였으며, 개략적인 피로수명을 산정할 수 있었다. 85%의 최대재하하중을 받은 시료의 경우 약 18,940 회 반복재하 후 파괴가 발생하였으나 80%의 최대재하하중을 받는 경우는 약 140만회의 반복재하 후에 파괴가 발생할 것으로 추정되었다. 반복굴곡시험에서 측정된 처짐량과 미소파괴음 발생누적양상은 정적인 크립거동과 같이 3단계로 구분된 거동을 보였으며, 미소파괴음 측정이 변형이나 변위측정에 비해 장기적인 안정성을 평가하는 데 효율적인 계측방법임을 확인할 수 있었다. 또한 최대재하하중이 작을수록 피로거동의 2차 단계에서 미소파괴음 발생속도가 작아짐을 알 수 있었으며, 미소파괴음 발생은 피로파괴가 발생하기 전에 급격하게 발생함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 ‘지하 암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Amadei B. & Curran J. H., 1980, Creep behaviour of rock joints, 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, 146-150.
2. Badge M. N. and Petros, V., 2009, Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading, 46, 200-209.
3. Byung-Ki Park and Seokwon Jeon, 2006, Dynamic Frictional Behavior of Artificial Rough Rock Joints under Dynamic Loading, Journal of Korean society for rock, 16, 166-178.
4. Byung-Ki Park and Seokwon Jeon, 2006, Dynamic Fric-

tional Behavior of Saw-cut Rock Joints Through Shaking Table Test, Journal of Korean society for rock, 16, 58-72.

- Chang-Woo Hong, Seokwon Jeon and Hae-Moon Choi, 2002, Shear Deformation and Failure Characteristics of Rock-Concrete Interfaces, Journal of Korean society of civil engineers, 22(6-c), 673-680.
- Dae-Sung Cheon, Eui-Seob Park, Yong-Bok Jung, Chulwhan Park and Joong-Ho Synn, 2008, Monitoring Technique using Acoustic Emission and Microseismic Event, Journal of Korean society for rock, 18, 1-9.
- Dohyun Park, Hyung-Mok Kim, Dong-Woo Ryu, Joong-Ho Synn and Won-Kyong Song, 2011, Numerical Study on the Optimal Shape of Concrete Plug for Compressed Air Energy Storage Caverns, Journal of Korean society for rock, 21, 164-173.
- Euiseob Park, 2000, Mechanical behaviour of a concrete plug in storage cavern: by experimental and numerical method, PhD Thesis.

- Hee-Suk Lee, 1999, A study for the mechanical and hydraulic behavior of rock joints under cyclic shear loading, PhD Thesis.
- Hyung-Mok Kim, Dong-Woo Ryu, So-Keul Chung and Won-Kyong Song, 2009, State of the Art for the Underground Unlined Rock Cavern Storage Technology for Compressed Air Energy Storage (CAES), Journal of the Korean society for geosystem engineering, 46, 614-624.
- Hyung-Mok Kim, Jonny Rutqvist, Dong-Woo Ryu, Choon Sunwoo and Won-Kyong Song, 2011, Sensitivity Analysis of Design Parameters of Air Tightness in Underground Lined Rock Cavern (LRC) for Compressed Air Energy Storage (CAES), Journal of Korean society for rock, 21, 287-296.
- Jafari, M. K., Hosseini K. A., Pellet F., Boulon, M, Buzzi, O., 2003, Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading, Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 23, 619-630.
- KIGAM, 2009, Development of Underground Energy Storage System in Lined Rock Cavern, Research Paper.
- PAC, 2009, Acoustic emission level 1 course note.
- Xiao, J. Q., Ding, D. X., Jiang, F. L., Xu, G., 2010, Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 47, 461-468.
- Zhang, J., Stang, H., Li, V. C., 1999, Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load, Int. J. Fatigue, 21, 1033-1049.

천대성



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 042-868-3248
 E-mail: cds@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

정용복



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사
 Tel: 042-868-3097
 E-mail: ybjung@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

송원경



1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1966년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3247
 E-mail: songwk@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

박찬



1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 수원대학교 공과대학 토목공학과 공학석사
 2006년 충남대학교 공과대학 토목공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3245
 E-mail: chan@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

박철환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3244
 E-mail: cwpark@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원