

# 이축압축 조건에서 실험체/재하판 경계면상의 마찰저항 감소를 위한 롤러 지지된 피스톤 형태의 하중재하판의 개발

사공명<sup>1\*</sup>, 김세철<sup>2</sup>, 이준석<sup>3</sup>, 박두희<sup>4</sup>

## Development of a roller supported piston type loading platen reducing the frictional restraint along the interfaces between the specimen and platens under the biaxial loading condition

Myung Sagong, Se-Chul Kim, J. S. Lee, Du-Hee Park

**Abstract** Multi-axial compression tests have been frequently adopted for the evaluation of material properties of rock cores and rock fracture model tests. Special care has to be applied on the boundary condition between the specimen and loading platen to draw the precise test results of the multi-axial compression tests. With the use of dry steel platen, the stress rotation will occur, due to the frictional restraint from the boundary between the specimen and loading platen. The restraint will deviate the expected test results under the conditions of the given external pressures. Various methods have been applied to reduce the side restraint along the specimen/loading platen interface. The steel brush type loading platen is one example of the attempts. In this paper, a new type of loading platen is introduced to overcome the limitation caused by the use of the brush type loading platen, which requires some internal space for the installation of the brushes. The new type of loading platen, roller supported steel piston type loading platen, is constituted of short steel pistons which have sufficient stiffness to deliver the external pressure and the shaft type roller installed at the rear of the pistons. The pistons are designed to follow the local deformation of the specimens. In this paper, structural details of the loading platen are presented and frictional and biaxial compression tests results are shown to verify the required functions of the loading platen. Furthermore, calibration process is followed by a comparison between the test results and numerical analyses.

**Keywords:** Multi-axial compression test, roller supported loading platen, frictional restraint, loading platen

**요 지** 암석의 물성평가 및 파괴모델 실험을 위하여 다축압축 실험이 자주 사용된다. 다축압축 실험을 통한 암반의 거동 평가시 정확한 결과의 산출을 위하여 실험체와 가압판 경계면에서의 경계조건에 대한 주의를 기울일 필요가 있다. 일반적으로 철판으로 된 일체형 가압판의 사용시 실험체의 경계면과 하중재하판 사이에서 발생하는 마찰저항으로 인하여 실험체 경계면에서부터 응력회전 현상이 발생하여 경계면에서부터 작용하는 외력의 방향은 회전하게 된다. 이와 같은 실험체/하중재하판 경계면 사이에서 발생하는 마찰저항을 감소시키기 위하여 다양한 방법이 제시되었다. 그 중 대표적인 예가 빗살구조의 하중재하판이다. 본 논문에서는 빗살구조의 하중재하판의 단점을 극복하고 하중재하판의 공간이 상대적으로 덜 차지하는 롤러로 지지된 피스톤 형태의 하중재하판을 소개하고 있다. 롤러로 지지된 피스톤 형태의 하중재하판은 지지강성이 충분한 짧은 피스톤 후면에 샤프트 형태의 롤러를 설치하여 실험체의 변형과 동시에 각 피스톤이 동반하여 거동하도록 구성되었다. 본 논문에서는 롤러 지지된 피스톤의 구조 상세 및 요구되는 기능에 대한 검증을 위하여 측면부 마찰저항 실험과 이축압축 실험이 수행되었으며 실험결과와 수치해석 결과의 비교를 통하여 장비의 적용성에 대한 검증이 이루어 졌다.

**주요어:** 다축압축실험, 롤러 지지된 하중재하판, 마찰저항, 재하판

## 1. 서 론

다축압축 조건에서의 암석에 대한 실험은 구속압 조

건에 따른 암석의 파괴거동에 대한 분석 및 다양한 경계 조건에서의 모델실험을 통한 암반의 거동분석을 목표로 하고 있다. 실내실험을 통한 다축압축 실험은 다양한 경계조건의 적용이 가능하므로 비록 제한적이긴 하나 원 지반에서 대상 암반에 작용된 응력이력의 적용이 가능하므로 현재까지도 활발히 사용되고 있는 실험방법이다 (배성호 등, 2005, 천대성 등, 2007, Meglis et al. 1995, Labuz et al. 1996, Fakimi et al. 2002). 다축압축조건이

<sup>1</sup>정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원

<sup>2</sup>한양대학교 학연연수생

<sup>3</sup>정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원

<sup>4</sup>정회원, 한양대학교 토목공학과 전임교수

\*교신저자: 사공명 (rockcore@krii.re.kr)

적용되는 지반재료로는 흙, 암석 그리고 콘크리트 재료를 들 수 있는데, 흙의 경우에는 재료 자체의 강도가 암석이나 콘크리트에 비해 크지 않으므로 일반적으로 구속압이 가해지는 방법은 셀내 충전된 유체를 구속시키는 방식으로 사용하고 있다. 이에 비해 콘크리트와 암석의 경우에는 실린더 형태의 실험체에 대해서는 흙과 같은 조건으로 삼축압축실험을 수행하는 경우도 있으나 입방체 형태의 공시체의 경우 다축의 액츄에이터를 이용하여 다축압축 실험이 수행된다. 이러한 실험방법은 특히 암반지반 조건에서 각 방향별 서로 다른 크기의 주응력에 대한 모델링이 가능하므로 다양한 경계조건에서의 암반의 거동에 대한 실험이 가능하다는 장점이 있다.

입방체를 이용한 다축압축 실험의 경우 재료의 강도 특성이 실험체와 하중재하판 경계면 상에서의 마찰특성으로 인하여 동일한 재료에 대한 실험이 수행된 경우에도 상이한 강도특성이 관측되었다(Gerstle 등, 1976). 하중재하판과 실험체의 경계면상에서의 마찰저항으로 인하여 주응력의 형태로 작용하는 외부압력은 하중재하판과 실험체 경계면상에서 마찰저항의 발생으로 인하여 그림 1과 같은 응력전이가 발생할 것이다. 그림 1에서 점선으로 표현된 요소는 회색으로 표현된 실험체 요소에 대하여 경계면에서 마찰저항이 발생 할 경우 응력회전(아칭)이 발생하는 상황을 개념적으로 나타낸 것으로서 점선이 나타내고 있는 것은 원형으로 가정된 최소주응력의 궤적이다. 즉 경계면상에서의 마찰저항으로 인하여 실험체 내부에서 최소주응력의 방향은 점선과 같은 방향으로 회전이 발생할 것이다. 이러한 마찰저항의 발현은 응력전이 현상의 일부로서 비록 방향성은 다를

수 있으나 응벽과 뒷채움재 사이에서 발생하는 마찰(백규호와 사공명, 2004) 그리고 암반근입 된 현장타설말뚝과 원지반 사이에서 발생하는 마찰(Sagong 등, 2007)의 형태와 유사할 것으로 판단된다. 따라서 경계면상에서의 마찰저항으로 인하여 실험체 내부에서 주응력의 방향은 마찰저항이 작용하지 않는 조건과 상이한 방향으로 작용할 것이다. 따라서 경계면상에서 마찰저항이 크게 걸리는 조건의 경우 응력집중의 방향 및 파괴진전의 방향이 당초 예상과 다르게 진행될 수도 있다. 따라서 정확한 실험결과를 위해서는 재하판 자체가 외부 하중을 전달하기 위하여 적절한 강성을 가지며 경계면에서 마찰저항을 감소시킬 수 있는 하중재하판의 사용이 필수적이다.

일반적으로 경계면에서의 마찰저항 감소를 위하여 콘크리트 분야에서는 다양한 시도가 이루어져 왔다. 특히 Gerstle 등(1976)은 6 종류의 상이한 경계면을 적용하여 실린더 및 입방체 형태의 실험체에 대한 일축 및 이축실험을 수행한 결과를 제시하고 있다. 실험 결과에 따르면 여러 재하판의 종류 중 빗살구조 하중재하판의 경우 일축 및 이축압축 강도가 상대적으로 크게 나타남이 확인되었다. 빗살구조 하중재하판은 빗살의 형상비(빗살의 폭/길이)가 작은 철제 빗살을 통하여 하중을 전달하는 형태로서 빗살구조의 각 기둥은 외압을 전달할 수 있을 정도의 강성과 함께 실험체의 변형시 힘이 발생할 수 있는 연성도를 확보하여야 한다. 이러한 빗살구조의 하중재하판은 콘크리트 재료에 대해서 Kupfer 등(1969), 그리고 Hussein과 Marzouk(2000) 등이 사용한 사례가 있다.

암석분야에 있어서는 Brown과 Gonano(1974)가 빗살구조 하중재하판을 이용하여 실린더 형태의 실험체에 대한 일축압축 실험을 수행하였다. 실험에서 적용된 실험체의 형상(높이/직경)의 범위는 0.25~3.0이었으며 이때 적용된 직경은 51 mm 였다. 실험결과 주어진 범위내에서는 실험체의 형상에 상관없이 일정한 압축강도를 보이는 것으로 확인되었다. 이후 Masod와 Lerau(1980), Bobet(2001)에 의해 이축압축 조건에서 빗살구조 하중재하판이 사용된 사례가 있다.

Bobet(2001)에 의하면 빗살구조 재하판의 경우 좌굴에 견딜수 있는 충분한 강성을 가지고 있어야 하며 또한 사공명 등(2007)이 제안한 바와 같이 실험체의 변형에

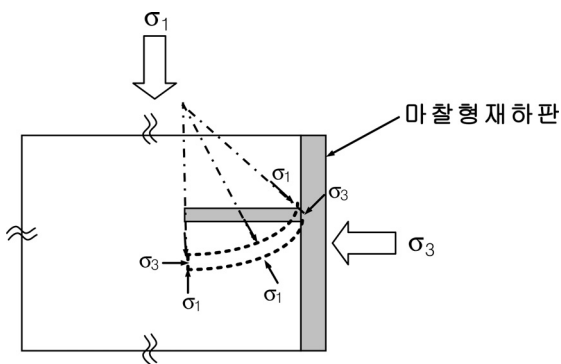


그림 1. 재하판 마찰저항으로 인한 실험체 내부의 응력변이

따라 빗살구조의 휨이 발생하여야 하므로 각 빗살의 적절한 길이 및 단면의 확보가 요구된다. 특히 이축압축의 경우 최소주응력이 작용하는 방향으로서는 일반적으로 별도의 액츄에이터를 설치하여 가압을 하는 형태를 많이 취하고 있는데 이러한 조건에서 빗살의 길이를 고려한 하중가압판을 사용한다면 실제 UTM 장비 내부공간의 한계성으로 인하여 공시체의 크기는 상당히 제한적일 수밖에 없다(연압 정도의 경우 빗살의 길이는 10~15 cm 사이이므로 빗살을 위하여 양쪽을 고려하면 약 30 cm의 UTM 내부 공간이 필요함). 따라서 본 논문에서는 하중재하판으로서의 충분한 강성과 마찰저감 능력을 가지면서 다양한 크기의 실험체에 대한 실험이 가능한 형태의 하중재하판의 개발 및 검증 내용을 소개하고자 한다.

## 2. 롤러로 지지된 철제 피스톤 형태의 하중 재하판

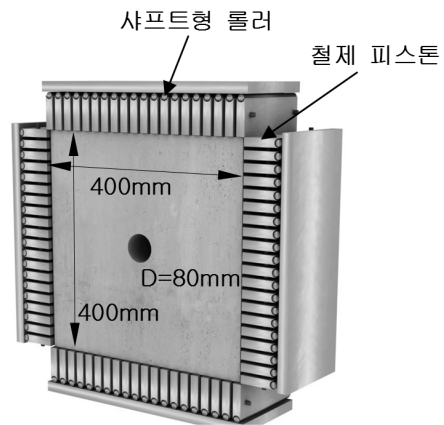
본 논문에서 신형식의 하중재하판을 개발하게 된 배경은 그림 2에서와 같이 이축압축 조건에서 공동주변의 손상을 파악하기 위하여 시작되었다. 실제 가압에 의한 공동주변 손상의 범위를 정량적으로 탐지하기 용이하지 않으므로 가급적 실험체의 크기를 크게 하는 것이 실험 결과의 도출에 있어 유리한 상황이었다. 그림 2(a)의 최소주응력(수평방향) 방향의 가압 액츄에이터는 매달린

형태를 취하고 있어 가압중에 최소주응력 방향으로의 이동 및 회전에 대한 자유도가 확보된 조건이라 할 수 있다(Van Mier, 1997). 또한 매달린 형태의 액츄에이터의 구성은 수직 하중이 작용하더라도 수평방향의 액츄에이터는 실험체에 대하여 일정한 위치에서 가압이 진행됨을 알 수 있다. 일반적으로 UTM을 이용하여 가압을 하는 경우 바닥에 있는 UTM 테이블이 상승하게 되는 반면 상부에 있는 크로스헤드는 고정 경계조건을 형성하게 된다. 따라서 그림 2(a)와 같이 매달린 형태의 경우 수평방향 액츄에이터 또한 가압방향(상향)으로 이동이 된다. 이러한 장비의 이동으로 인하여 결국 실험체와 액츄에이터 가압부의 상대위치가 일정하게 유지될 수 있다.

공동주변 손상영역의 측정을 위하여 사용한 실험체의 크기는 400×400×100 mm이며 중앙에 있는 공동의 직경은 80 mm이다. 실험체는 초조강시멘트를 사용하여 제작되었으며 물/시멘트 중량 비율은 50:50으로 하였으며 14일간의 양생기간을 유지하였다. 14일 간의 양생기간을 적용하여 실험체는 일정한 압축강도를 나타내었다. 이상의 절차를 통하여 제작된 실험체의 경우 일축압축 강도는 평균 28 MPa이며 탄성계수는 약 8.0 GPa를 보였다(그림 3 참조). 그림 3에서의 두 곡선은 실험의 재현성을 확인하기 위하여 각기 다른 실험 결과를 나타내고 있다.



(a) 매달린 형태의 이축압축장치



(b) 롤러로 지지된 피스톤 형태의 하중재하판

그림 2. 이축압축장치 및 롤러로 지지된 피스톤 형태의 하중재하판

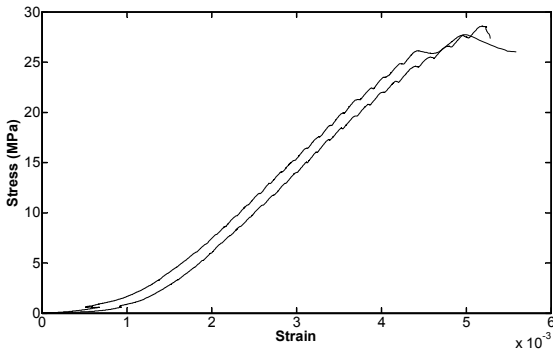


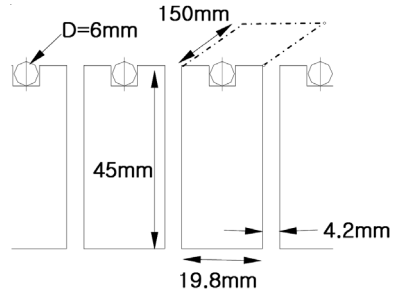
그림 3. 실험체의 일축압축 특성

본 논문에서 제안하는 하중재하판의 세부적인 형태 및 구조는 그림 4와 같다. 롤러로 지지된 피스톤 형태의 하중재하판의 세부 구조는 그림 4(a)와 같다. 각 피스톤의 길이는 45 mm 이며 폭은 19.8 mm 두께는 150 mm 를 적용하였다. 각 피스톤간의 간격은 4.2 mm로서 실험체의 최대압축응력 작용시 발생 가능한 변형량을 고려하여 결정하였다. 또한 피스톤의 후방에 한 번이 6 mm 정도인 정사각형 홈을 파서 그 안에 샤프트 형태의 롤러를 설치하였다. 여기서 사용한 롤러의 직경은 6 mm 이다. 결국 설치된 롤러의 작용으로 인하여 실험체의 국부적인 변형에 따라 피스톤이 동반하여 같은 방향으로 움직일 수 있도록 고안되었다.

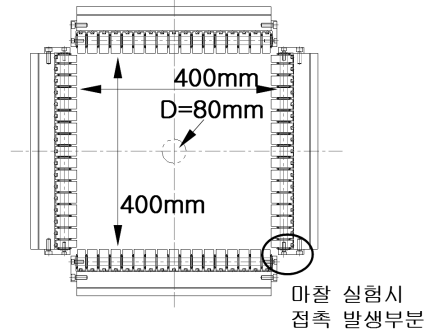
실험체의 변형 특성을 고려하여 각 면에서 피스톤을 통하여 하중을 가하는 길이는 396 mm 이다. 따라서 실험체의 한 변당 17개의 피스톤을 설치하였으며 가장자리에 위치한 피스톤의 폭은 16 mm로 설정하였다(그림 4(b), (c) 참고). 피스톤 사이 일정한 공간확보를 위하여 가압 이전에는 피스톤 사이에 4.2 mm에 해당하는 스페이서를 삽입하여 각 피스톤의 초기 위치를 확보하였으며 실험과 동시에 삽입한 스페이서는 제거되었다.

### 3. 제안된 하중재하판의 검증

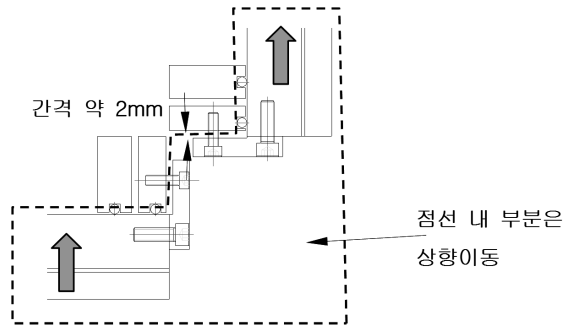
본 절에서는 앞서 소개한 롤러로 지지된 철재 피스톤 형태의 하중재하판의 성능에 대한 검증을 소개하고자 한다. 본 논문에서는 경계면 상에서 위치별 마찰저항에 대한 예측이 불가능하므로 실험체와 각 위치에서 피스톤의 변위측정을 통하여 마찰저항 발생 유무를 유추하



(a) 피스톤 및 샤프트형 롤러의 형태 및 제원



(b) 실험체 및 하중재하판의 제원과 형태



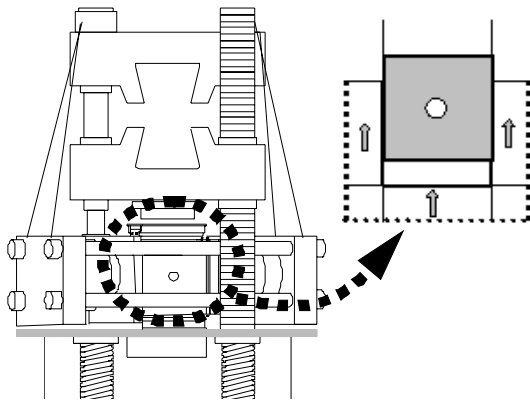
(c) 마찰실험시 접촉 발생부분 확대 그림

그림 4. 롤러로 지지된 철재 피스톤 하중재하판의 세부 및 설치 전경

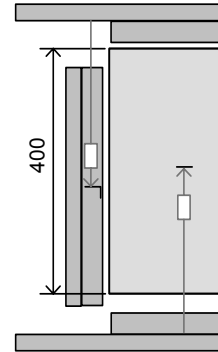
고자 한다. 또한 비교를 위하여 일체형의 철재 하중재하판의 마찰저항 정도를 측정하여 결과를 소개하고자 한다.

#### 1) 일체형 하중 재하판 적용시 경계면상에서 마찰저항 측정

일체형 하중재하판은 일반적으로 자주 사용되는 형태의 하중재하판으로서 사공명 등(2007)이 주장하는 바와



(a) 측면부 마찰실험 개략도



(b) 실험체의 활동량 측정을 위한 LVDT 배치도

그림 5. 일체형 하중재하판의 마찰실험 전경

같이 크기가 작고 실험체 내부에 공동이나 불연속면등 응력 집중이 발생될 수 있는 조건에서의 다축압축실험의 경우 실험체의 경계면과 중앙부 사이에서 응력경사(stress gradient)가 상당히 크게 발생할 수 있으므로 일체형 하중재하판의 경우에는 재하판의 영향으로 인하여 중앙부에서 작용하는 응력의 크기는 일부 저감될 수 있는 구조이다. 이상의 특징을 가진 일체형 하중재하판에 대하여 경계면상에서의 마찰실험을 수행하여 실제 일체형 재하판과 시멘트로 제작된 실험체의 경계면상에서 발생하는 마찰저항을 측정하였다.

마찰저항을 측정하기 위하여 실험체의 바닥을 UTM 테이블로부터 약 5 cm 이격시킨 상태에서 측압을 가하여 고정시켰다. 이후 하중을 가하여 실험체와 일체형 하중재하판 상에서 발생하는 마찰저항을 측정하는 방식으로 수행되었다. 이때 측정된 마찰저항은 실험체 양 측면에서 작용하므로 측정된 절반의 값을 적용하여 마찰계수를 산정하였다. 실험조건은 앞서 설명한대로 가압은 하부에서 상부로 UTM 테이블이 진행하면서 이루어지며 상부의 크로스헤드는 고정단 역할을 한다(그림 5 참조).

이상의 조건을 바탕으로 구속압 조건에 따른 마찰저항실험을 수행한 결과 그림 6과 같은 결과가 관측되었다. 실험결과에 따르면 구속압이 증가할수록 초기 미끄러짐이 발생하는 시점에서의 수직가압은 증가함을 알 수 있다. 또한 초기 활동이 발생한 이후에도 하중이 증가하는 양상을 보이고 있는데 이는 하중재하판과 장비 내부에서 발생 가능한 공차로 인한 것으로 판단된다. 그

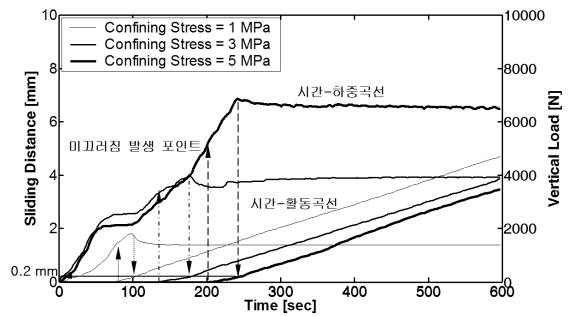


그림 6. 일체형 가압판을 적용한 조건에서의 구속압에 따른 마찰저항

림 6을 살펴보면 각 구속압 조건(1, 3, 5 MPa)에서 초기 활동이 발생한 시점과 최대 하중이 작용한 구간 사이에서 발생한 활동량을 살펴보면 거의 0.2 mm 정도로 일정한 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 활동의 발생에 따른 구속압 별 마찰계수의 변화를 나타내고 있다. 여기서 마찰계수는 마찰을 유발하는 수직가압/2과 경계면에 법선방향으로 작용하는 수평구속압과의 비로 정의된다. 그림 6에서 침투하중이 발생한 시점부터 고려를 하면 구속압이 적을수록 초기 마찰계수는 더 크게 발생함을 알 수 있다. 재하판과 시멘트 재료간의 마찰계수는 평균 0.19에서 0.23의 값을 보이며 이 값의 범위는 Vonk(1992)가 관측한 마찰계수 값과 유사한 결과임을 알 수 있다. 또한 활동진행에 따라 마찰계수 값은 변하는 양상을 보인다. 이러한 관측

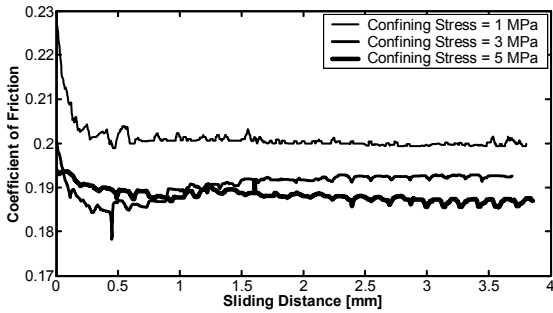


그림 7. 일체형 가압판을 적용한 조건에서 활동에 따른 마찰계수의 변화

결과는 실제 일체형 가압판을 사용할 시 실험체의 변형에 따라 실험체/재하판 경계부에서 상이한 마찰특성을 보이는 것으로 유추할 수 있다.

## 2) 롤러로 지지된 철제 피스톤 형태 하중재하판의 경계면상에서의 거동

일체형 하중재하판에 적용한 방법과 동일한 방법으로 롤러로 지지된 철제 피스톤 형태의 하중재하판에 대한 마찰특성 실험을 수행하였다. 다만, 각 피스톤이 일체형 재하판과 달리 개별적으로 움직일 수 있으므로 그림 8과 같이 상, 중 하단에 있는 피스톤의 움직임을 LVDT를

이용하여 계측하였다.

LVDT 설치 위치는 상부에서부터 두번째(크로스 헤드에서 40 mm), 중앙(200 mm) 그리고 하단에서 두 번째(360 mm) 위치의 피스톤에 설치되었다. 측면부 마찰 실험을 수행한 결과는 그림 9와 같다. 그림 9의 결과는 구속압이 5 MPa 조건인 경우에 대한 결과를 나타내고 있다.

그림 9에서 점선은 작용한 수직하중을 나타내고 있으며 실선은 실험체의 마찰활동 양과 세 위치에서 측정된 피스톤의 활동양상을 보이고 있다. 본 논문에서 의미하는 마찰실험은 앞 절에서 설명한 바와 같이 일정 구속압이 작용한 상태에서 수행되는 상황으로서 그림 2(a)에 있는 크로스 헤드를 제외한 수평방향 액츄에이터, 가이드 프레임이 상향으로 이동한다. 따라서 그림 9에서 표시된 바닥판의 이동량은 결국 액츄에이터의 상향 이동과 동일한 물리량임을 알 수 있다. 이때 그림 9에서는 하단 피스톤의 움직임만이 도시되었는데, 측정 결과 중앙과 상단 피스톤의 움직임은 관측되지 않았다. 하단 피스톤 위치에서 측정된 활동은 약 1250초(실험체는 2 mm 활동 발생) 경까지 별 다른 변화가 없음을 알 수 있다. 고정단에 설치된 LVDT에서 변위가 발생되지 않았으므로 이러한 측정결과 의미는 각 위치에서의 피

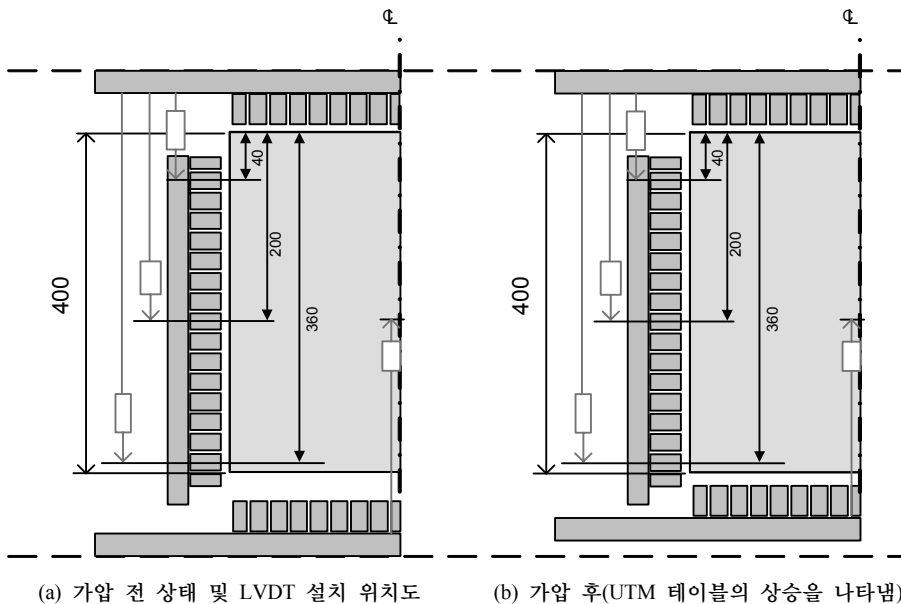


그림 8. 피스톤의 움직임을 계측하기 위하여 설치된 LVDT 위치도

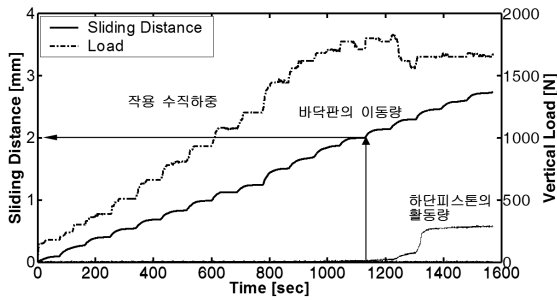


그림 9. 롤러 지지된 철제형 피스톤 형태의 하중재하판에 대한 마찰실험 결과(구속압 5 MPa, 상단과 중앙피스톤의 활동량은 관측되지 않음)

스톤은 액츄에이터가 상향으로 움직임에도 불구하고 제 자리에 있음을 알 수 있다. 이러한 관측은 결국 피스톤 후면에 있는 샤프트가 롤러로서의 제 기능을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 약 1250초 경과시점은 액츄에이터가 2 mm 정도 상향으로 이동한 상태이며 이때 하단에 설치된 LVDT에서 활동이 측정되고 있는데, 이 측정의 의미는 피스톤 하단과 피스톤을 지지하는 가장자리와의 접촉이 이루어지는 순간이다(그림 4(c) 참고). 피스톤 하단과 지지부의 가장자리와의 간격이 약 2 mm이기 때문에 이 허용간격만큼의 상향이동이 발생한 후 하단피스톤과 지지부의 가장자리가 접촉된다. 피스톤 하단과 지지부 가장자리의 접촉으로 인하여 하단에 있는 피스톤이 액츄에이터와 동일한 방향으로 이동하므로 순간적인 변위가 발생하였다.

### 3) 이축압축 조건시 철제 피스톤 형태의 하중재하판 거동 및 내부응력

마찰실험을 통하여 롤러의 기능이 제 역할을 하고 있음을 확인하였다면 실제 이축압축 조건에서 각 피스톤은 어떠한 거동을 나타내고 있는지에 대한 검증이 필요할 것이다. 앞서 마찰실험에서와 같이 롤러가 제 역할을 하고 있다면 피스톤 자체의 거동은 피스톤이 접하고 있는 실험체 특정부위의 변형특성과 동일하게 반응하여야 할 것으로 판단된다. 왜냐하면 일정한 구속압이 작용하고 있는 상황에서 롤러가 제대로 작동을 한다면 실험체와 피스톤 전면 경계면상에서 발생하는 마찰저항력은 피스톤 자체를 이동시키기에 충분한 크기이므로 각 위치에서 실험체의 운동학적 변위 특성은 피스톤과 동일

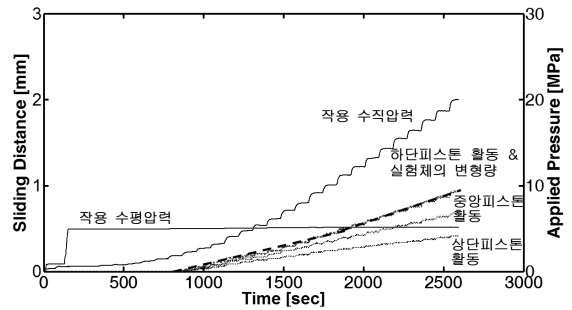


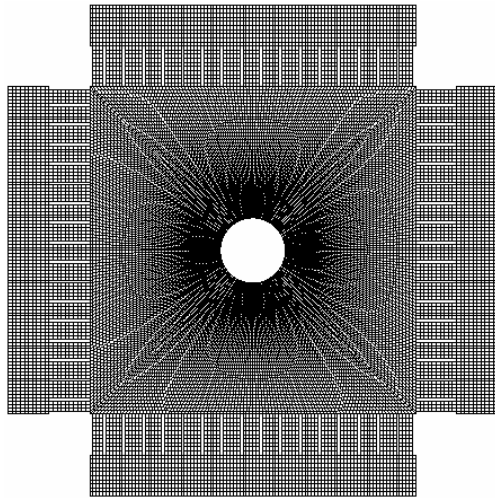
그림 10. 이축압축조건에서 재하곡선과 피스톤의 움직임

하게 나타나야 할 것으로 기대된다.

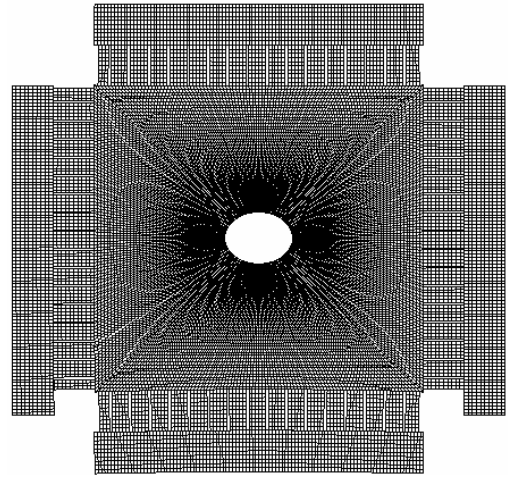
이러한 여러 가정들을 확인하기 위하여 그림 4(b)와 같은 조건을 가진 실험체를 대상으로 실험이 수행되었다. 수평방향으로 5 MPa가 가압이 되었으며 실험체가 파괴되기 이전 단계까지 수직압(20 MPa)이 가해졌다. 피스톤의 활동거리를 관측하기 위하여 그림 8(a)와 같은 위치에 LVDT를 설치하였다.

실험결과(그림 10 참고)를 살펴보면 하단부에 위치한 피스톤의 움직임은 실험체의 변형량과 거의 동일함을 알 수 있다. 피스톤의 움직임에 대한 측정시 수평 및 수직압의 가압으로 인하여 초기 측정값이 다소 불연속적으로 관측되는 부분이 있는데 그 부분을 제외하고 하단부 피스톤이 움직이기 시작하는 시점부터의 값을 그림 10에 나타내었다. 또한 중앙과 상단에 위치한 피스톤의 경우에는 상단으로 갈수록 피스톤의 활동량이 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 상단에 위치한 피스톤의 경우 고정단으로 작용하는 크로스헤드와 근접한 위치에 있으므로 실제 실험체의 변형이 크게 발생하지 않기 때문이다. 이러한 관측결과는 본 논문에서 제안하는 피스톤 형태의 하중재하판이 실험체의 경계면상에서 국부적으로 상이한 변형특성을 나타내더라도 개별 피스톤이 그러한 거동과 동반하여 움직일 수 있음을 나타내고 있다. 결국 이상의 실험을 통하여 개별 피스톤이 각 위치에서 실험체의 변형 특성과 동일하게 거동하고 있으므로 재하판/실험체 경계면 상에서 발생가능한 마찰저항을 충분히 감소시킬 수 있을 것이며, 실험체의 국부적인 변형 특성 또한 허용할 수 있음을 알 수 있다.

그림 11에서는 수치해석을 통하여 각 위치에서 피스톤의 움직임을 조사하였으며 실험결과와 비교 분석하였



(a) 해석 모델



(b) 변형 발생후

그림 11. 수치해석을 통한 롤러로 지지된 피스톤 형태 하중재하판의 거동 분석

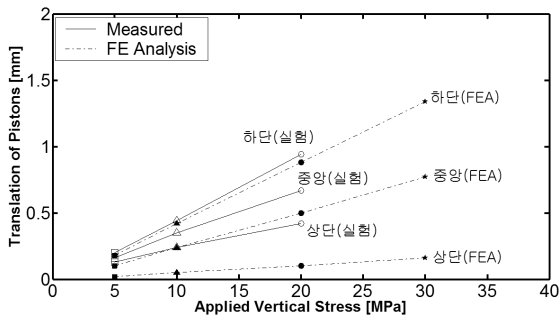


그림 12. 피스톤의 활동에 대한 실험 및 수치해석 결과 비교

다. 해석 프로그램은 ABAQUS를 사용하였으며 해석모델은 수직 및 수평방향으로 고정단이 존재하여 대칭조건이 아니므로 실험체 전체가 모델링 되었다. 또한 피스톤은 실제 크기와 유사한 크기로 모델링 되었으며 피스톤과 50 mm 두께의 후방 지지판 사이에는 스프링 요소를 사용하였다. 스프링 요소의 강성도는 가압 방향의 강성도를 상당히 크게 하고 가압방향과 수직방향으로의 강성도는 거의 영에 가까운 값을 입력하여 롤러와 유사한 거동이 발생할 수 있도록 하였다. 가압방향으로 적용한 강성도는  $2 \times 10^{12}$  N/m 이며 가압 방향과 수직방향으로는 2 N/m를 적용하였다. 탄성해석이 수행되었으며 입력 변수로는 철의 탄성계수  $2 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>, 포아송

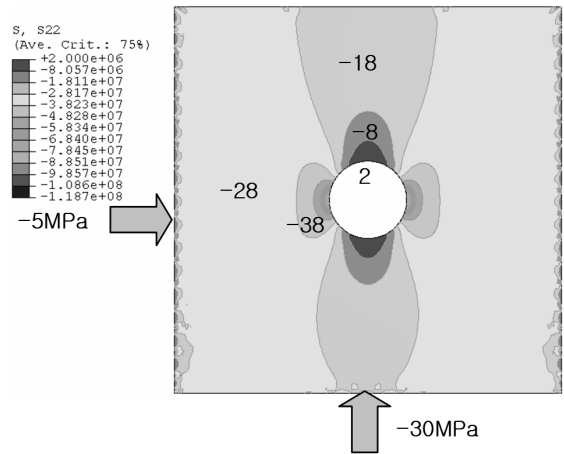


그림 13. 수직응력 분포도(그림 내 응력분포의 단위는 MPa, 범례내 부호 (-) 압축, (+) 인장)

비 0.3, 실험체의 탄성계수  $8 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>, 포아송비 0.17을 적용하였다. 그림 8(a)와 동일한 위치에서 측정된 변위와 실험결과의 비교는 그림 12에 도시되었으며 수직응력의 분포는 그림 13에 나타내었다.

수평압이 5 MPa 가압중인 상태에서 수직압력 5, 10, 20 MPa 조건에서 피스톤의 움직임 측정된 실험결과와 해석결과가 비교되었는데, 우선 중앙과 하단에서 관측된 수치해석 및 실험결과는 상당히 근사한 결과를 보



이는 것으로 확인되었다. 다만 상단(고정단 근처)에서 관측된 실측값과 해석값에 다소 차이가 있는 것으로 확인되었는데 이러한 원인은 앞서 언급한 장비상의 공차에서 기인된 것으로 판단된다. 이상의 결과를 바탕으로 가압조건에 따른 각 피스톤의 거동을 비교해볼 때 현재 적용한 경계조건을 활용하여 향후 수치해석과 실험결과와의 비교 분석이 가능할 것으로 판단된다.

또한 각 피스톤간 4.2 mm의 공간을 두고 있으므로 그 구간내에서 응력집중 및 교란이 발생할 수 있다. 이러한 점을 확인하기 위하여 수직응력을 도시한 결과 피스톤에 의한 재하시 응력의 교란정도는 피스톤 폭의 범위를 벗어 나지 않는 것으로 확인되었다(그림 13 참고). 따라서 관심영역인 공동주변에 대해서는 피스톤의 가압으로 인한 응력교란은 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 피스톤 사이 구간에서 발생하는 주응력을 확인한 결과 압축응력이 발생하였으며 압축응력의 범위는 재료의 허용구간 이내임이 확인되었다. 최종적으로 수치해석을 통하여 실험체 내부에 작용하는 수직응력 계산한 결과 공동주변을 제외한 영역에서 외부응력과 그 크기가 어느 정도 유사한 수직응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 이축압축실험시 실험체와 하중재하판 경계면에서 발생하는 마찰저항을 제거하기 위하여 롤러로 지지된 철제 피스톤 형태의 하중재하판을 개발하고 그 적용성을 검증하였다. 특히 마찰저항 감소를 위하여 기존에 사용했던 철제 빗살구조 형태의 하중재하판의 경우 이축으로 설치된 액츄에이터 내부에 많은 공간이 필요하게 되므로 이러한 단점을 극복하고자 강성도가 충분한 짧은 길이의 철제 피스톤과 롤러가 결합된 형태의 하중재하판을 개발하였다.

개발된 하중재하판의 성능에 대한 검증을 위하여 단순 마찰실험을 통한 피스톤의 거동과 일체형 하중재하판에 대한 마찰실험 결과와의 비교, 이축압축 조건에서 각 위치별 피스톤의 움직임에 대한 계측 및 실험과 동일한 조건에 대한 수치해석 결과와의 비교가 수행되었다.

마찰실험결과 일체형 하중재하판의 경우 실험체의 활동시 까지 측면부 마찰계수가 0.19에서 0.23의 범위임

이 관측되었으며 롤러로 지지된 피스톤 형태의 하중재하판의 경우 특별한 움직임이 관측되지 않았다. 또한 다축압축조건에서 롤러 지지된 피스톤 형태의 하중재하판의 경우 실험체의 변형과 더불어 피스톤의 병진운동이 발생하는 것이 확인되어 실험체와 하중재하판간의 운동학적 불연속성은 발생되지 않는 것이 판단된다. 이러한 관측결과는 하중재하판과 실험체의 경계면상에서 마찰저항이 발생하지 않았음을 나타내고 있다.

또한 일반적으로 실내실험에서 수행되는 다축압축 실험의 경우 실험장비의 안전성을 위하여 각 방향으로 고정된 경계면이 존재하게 된다. 이와 같은 고정단의 존재로 인하여 하중을 가하는 방향에서 고정단 쪽으로 변위가 발생하게 되며 이러한 변위의 분포는 실험체 내에서 균등하게 발생하지 않는다. 따라서 공간적으로 불균등한 변위의 분포와 동반하여 하중재하판 또한 거동하여야 할 것이다. 본 논문에서 논의한 하중재하판은 실험체와 하중재하판의 경계면을 중심으로 수직방향 위치에 따라 실험체의 변형과 동반하여 피스톤의 병진운동(수직방향)이 발생하는 것이 확인되었으며 이러한 병진운동은 수치해석 결과와 어느 정도 일치하는 것으로 확인되었다.

다만 본 논문에서 제안하고 있는 형태의 하중재하판에 대한 한가지 단점은 기존의 일체형 재하판에 비해 제작에 있어 다소 복잡한 과정을 거쳐야 하며, 실험개시 이전에 요구되는 준비작업이 다소 복잡하다는 점이다. 이러한 단점에 대해서는 추가적인 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술 연구)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

#### 참고문헌

1. 배성호, 전석원, 박익섭 (2005), “축소 모형시험과 개별 요소 해석에 의한 원형 공동 주변의 점진적 취성파괴 특성에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 제15권 제4호, pp.

250-263.

2. 백공명, 사공명 (2004), “정점을 중심으로 회전하는 강성옹벽에 작용하는 주동토압”, 한국지반공학회논문집, 제20권 제8호, pp. 181-191.
3. 사공명, 이준석, 김성수 (2007), “다축압축 실험에 적용되는 철제 빗살 재하판의 설계”, 한국터널공학회논문집 제 9권 제 4호, pp. 351-359.
4. 천대성, 박찬, 박철환, 전석원 (2007), “취성파괴수준과 파괴개시시점에 관한 진삼축 모형실험연구”, 터널과 지하공간, 제17권 제2호, pp. 128-138.
5. Bobet, A. (2001), “Influence of the loading apparatus on the stresses within biaxial specimens”, American Society for testing and materials, Vol. 24, No. 3, pp. 256-272.
6. Brown, T. B. and Gonano, L. P. (1974), “Improved compression test technique for soft rock”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, No. GT2, pp. 196-199.
7. Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T. and Labuz, J. F. (2002), “Simulation of failure around a circular opening in rock”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, pp. 507-515.
8. Gerstle, K. H., Linse, D. L., Bertacchi, P., Kotosovos, M. D., Ko, H., Newman, J. B., Rossi, P., Schikert, G., Taylor, M. A., Traina, L. A., Zimmerman, R. M. and Bellotti, R. (1976), “Strength of concrete under multiaxial stress state”, Douglass McHenry International Symposium of Concrete and Concrete Structures, Toulouse, France, pp. 103-131.
9. Hussein, A. and Marzouk, H. (2000), “Finite element evaluation of the boundary conditions for biaxial testing of high strength concrete”, Materials and Structures, Vol. 33. pp. 299-308.
10. Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. and Rusch, H. (1969), “Behavior of concrete under biaxial stresses”, American Concrete Journal, Vol. 66, pp. 656-666.
11. Labuz, J. F., Dai, S. F. and Papamichos, E. (1996), “Plane-strain compression of rock-like materials”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 33(6), pp. 573-584.
12. Masod, J. C. and Lerau, J. (1980), “Mechanical behavior of Darney sandstone in biaxial compression”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 17, pp. 109-115.
13. Meglis, I. L., Chow, T. M. and Young, R. P. (1995), “Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet granite - I. Acoustic emission source location and velocity measurements”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 32(8), pp. 741-750.
14. Sagong, M., Paik, K. and Kim, D. (2007), “A new approach to estimate side resistance of rock socketed drilled shafts”, Soils and Foundation, Vol. 47(2), pp. 421-427.
15. Van Mier, J. G. M. (1997), “Fracture processes of concrete”, CRC Press. p. 174.
16. Vonk, R. A. (1992), “Softening of concrete loaded in compression”, Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, p. 39.



**사 공 명**

한국철도기술연구원  
철도구조연구실  
선임연구원

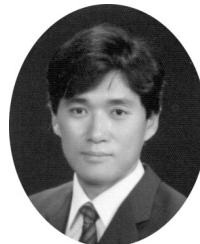
E-mail: rockcore@krri.re.kr



**김 세 철**

한양대학교  
학연연수생

E-mail: killy79@krri.re.kr



**이 준 석**

한국철도기술연구원  
철도구조연구실  
책임연구원

E-mail: jslee@krri.re.kr



**박 두 희**

한양대학교  
토목공학과  
전임교수

E-mail: dpark@hanyang.ac.kr