

# 다축압축 실험에 적용되는 철제 빗살구조 재하판의 구조 설계 기법

사공명<sup>1\*</sup>, 이준석<sup>2</sup>, 김성수<sup>3</sup>

## Structural design method of the steel brush type loading platen adopted in multi-axial compression experiments

Myung Sagong, Jun S. Lee, Sung-soo Kim

**Abstract** Multi-axial compression tests have been frequently conducted to evaluate the in situ properties of rock masses and the mechanical behaviors of rock strata through the model tests. Without the proper boundary condition for the model tests, the mechanical behavior of rock mass would deviate, as can be expected, from the in situ conditions. The boundary condition will affect the internal stress distribution of the specimens and cause some distortion on the measurement. In this study, a design process regarding the steel brush, which has been employed for multi-axial compression test to reduce the frictional restraint along the specimen/loading platen interface, is introduced. The individual brushes are regarded as a simple column and beam to calculate the cross-sectional size and length of the brushes in consideration of the buckling capacity and the allowable deflection.

**Keywords:** Multi-axial compression test, Steel brush loading platen, Boundary conditions, Steel brush design, Buckling, Deflection

**요 지** 지반재료종의 하나인 암반의 물성평가 및 원지반상에서의 역학적 암반거동 평가를 위하여 다축(이축 혹은 진삼축) 압축실험이 수행되고 있다. 이러한 다축압축 실험의 경우에는 적용되는 경계조건에 따라 실험체내의 내부 응력이 예상과 다르게 작용하게 되며 결국 실험결과와 왜곡을 발생시킬 수 있으므로 적절한 경계조건 설정은 필수적이다. 본 연구에서는 기존에 하중재하판과 실험체의 경계면상에서 발생할 수 있는 마찰저항을 감소시키기 위하여 사용된 철제 빗살구조의 재하판에 대한 구조 설계 방법을 제안하고자 한다. 각 빗살의 길이 및 단면의 계산을 위하여 각 빗살은 고정단에 지지된 단순보와 고정단에 지지된 기둥의 형태로 가정되었으며 좌굴과 실험체의 변형에 따른 빗살의 처짐을 고려하는 방법이 적용되었다.

**주요어:** 다축압축실험, 철제 빗살재하판, 경계조건, 철제 빗살 설계, 좌굴, 처짐

### 1. 서 론

암석과 관련된 실내실험은 원지반의 물성값 측정을 위한 압축실험과 암반상에 시공되는 지반구조물의 거동 분석을 위한 모델 테스트로 구분할 수 있을 것이다. 원지반의 물성값 측정을 위하여 공시체의 크기는 원지반 특성을 포함함과 동시에 암석의 입자, 층리, 엽리 등 암석의 특성을 포함할 수 있어야 할 수 있을 정도로 커야 할 것이다. 또한 모델 테스트의 경우에는 크기가 클수록 유리하나 장비의 한계 및 실험체 제작상의 한계 등으로 인하여 실험체의 크기에도 한계가 있다.

원지반의 물성평가를 위한 실내실험의 경우에는, 예를 들면 삼축압축실험과 같이 실린더 형태의 공시체에 대

한 다축압축 실험의 경우, 구속압의 적용에 있어 직접 가압하는 것이 아니라 유압을 통하여 구속압을 적용하므로 공시체 경계면상에서 발생할 수 있는 응력의 교란 정도는 적을 것이다. 그러나 모델 실험이나 콘크리트 실험에서 사용되고 있는 입방체 형태의 실험체를 사용하는 경우 실험체와 가압장비의 경계면 상에서 발생하는 재료의 불연속성으로 인하여 응력의 교란이 발생한다. 가압되는 재료와 철제 재하판 사이에서의 변형특성(Poisson 비의 차이)의 차이로 인하여 마찰저항이 발생하며, 또한 상당히 견고한 철제 가압판을 사용할 시 비록 균등한 변위의 재하는 가능하나 경계면에서 발생하는 응력의 분포는 불균등한 조건이 발생할 것이다. 이것은 강성의 기초가 연약지반 위에 설치될 당시에 발생할 수 있는 변위 및 응력의 양상과 유사한 패턴이 될 수 있다. 그중 경계면사이에서 발생하는 마찰저항은 실험결과에 상당한 영향을 미칠 수 있으므로 마찰저항의 감소를 위하여 다양한 시도 및 실험이 수행되었다.

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원

<sup>2</sup>정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 본부장

<sup>3</sup>정희원, 삼성물산 국내토목영업팀 부장

\*교신저자: 사공명 (rockcore@krii.re.kr)

Jaeger과 Cook (1979)은 암석역학 분야에 있어 초기에 시도된 경계면의 마찰저항을 위한 시도를 소개하고 있다. 시도된 여러 가지 방법으로는 선단부를 깔대기 형태로 만들어서 실험하는 방법, 경계면에 흑연, 몰리브덴, 종이, 납등의 연성이 있는 재료의 삽입, neck 형태의 가공 실험체 사용, 실험체 직경과 동일한 철제 가압판의 사용 등을 들 수 있다. 그중 가장 효과적인 것으로는 그림 1(d)와 같이 실험체와 가압판의 동일직경을 사용하는 방법으로 언급되고 있다.

이와 같은 일축압축조건의 경우 가압판과 접촉이 되는 부분이 양 선단 두 곳이므로 상대적으로 다축 압축 실험에 비해 마찰저항이 발생할 확률이 적다. 그러므로 경계면에서의 마찰저항 저감에 대해서는 다축압축 실험 조건에서 보다 다양한 시도가 이루어져 왔다.

다축압축 실험의 경우에는 입방체의 콘크리트 실험체에 대해서 Gerstle 등 (1976)이 다양한 형태의 재하판에 대한 실험을 수행하였으며, Vonk (1992)와 Lee 등 (2004)은 테플론을 이용하여 상당히 얇은 두께의 윤활막 형태의 재료를 재하판 앞쪽에 설치하여 마찰저항을 감소시킨 사례가 있다. Gerstle 등 (1976)의 실험에서는 일체형의 철제 재하판, 윤활패드 + 철제 가압판, 빗살형 철제 가압판, 유체 쿠션, 철제 피스톤 + 유연 지지대 그리고 실린더형 실험체를 사용하였다. 각 종류의 재하판에 대한 구조적 형태는 그림 2와 같다. 이상 각 종류의 재하판은 경계면에서의 마찰제약과 요구되는 재하판의 강성을 기준으로 구분될 수 있다. 그림 3에서는 각 재하판 형태에 따라 강성도 및 발생 가능한 마찰저항의 정도를

정성적으로 표시하고 있다. 그림 3에서의 분류를 살펴보면 빗살구조의 재하판의 경우 가장 우수한 강성도와 마찰저항의 감소를 나타내고 있음을 알 수 있다.

암석역학 분야에서도 특히 모델실험을 위한 다축압축 실험의 경우 빗살구조의 하중재하판을 사용하고 있다 (Bobet, 2001). 빗살구조의 하중재하판은 처음 Hilsdorf (1965)에 의해 개발되었으며 Brown과 Gonano (1974)에 의해 암반 재료에 적용되었다. 적용결과 실험체의 길이와 직경 비율에 상관없이 일정한 압력-변형을 곡선을 나타내는 것으로 관측되었다. 이러한 결론은 실험체의

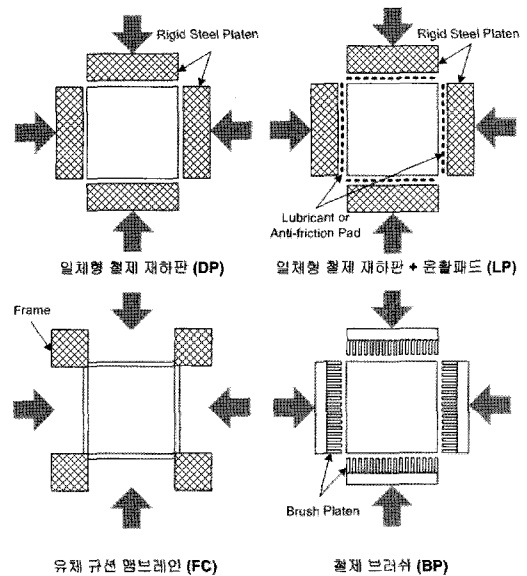
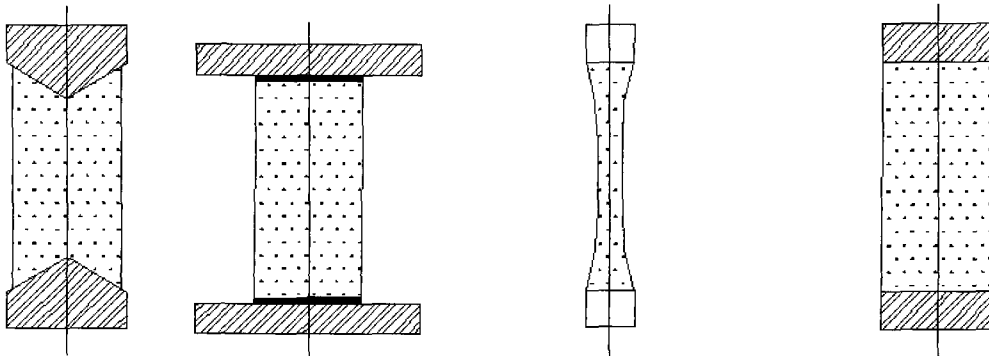


그림 2. Gerstle 등(1978)에서 적용된 여러 형태의 하중재하판



(a) 깔대기형 하중가압판 (b) 윤활재료 삽입 (c) neck 형태의 가공실험체 사용 (d) 실험체와 재하판의 동일 직경적용

그림 1. 일축압축 실험조건에서의 경계면 마찰저항 감소를 위한 실험방법 (revised from Jaeger and Cook, 1979)

크기에 상관없이 일정한 경계조건이 작용하고 있는 것으로 판단할 수 있을 것이다.

모델실험에 빗살구조 하중 재하판을 적용한 Bobet (2001)은 탄성이론을 바탕으로 좌굴응력을 고려한 각 빗살의 제원을 설계하는 방법을 제시하고 있다. 여기서 계산된 값은 상한 값으로 계산된 값을 기준으로 이보다

적은 값을 사용하면 된다. 그러나 각 빗살의 설계시 좌굴응력 뿐만 아니라 실험체의 변형에 따라 각 빗살의 변형특성 또한 고려되어야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 구조적으로 안전하면서 실험체의 변형을 충분히 허용할 수 있으며 마찰저항을 충분히 저감할 수 있는 형태의 빗살구조의 하중재하판의 각 빗살의 구조적 설계에 대한 내용을 다루고자 한다.

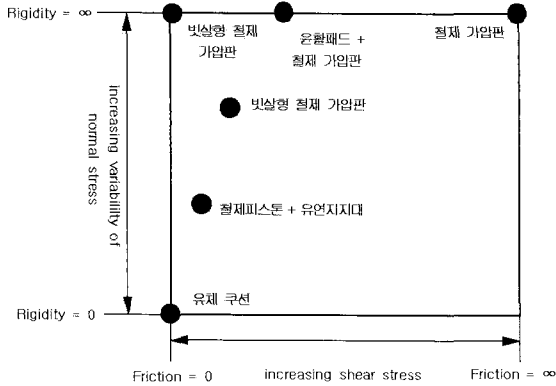
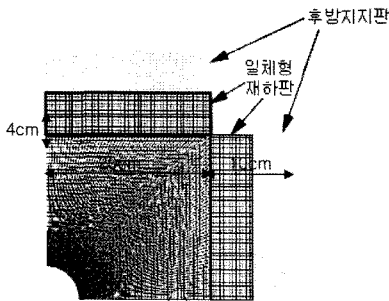


그림 3. 하중재하판의 분류 및 그에 따른 마찰저항과 수직응력의 변화정도 (Gerstle 등, 1976)

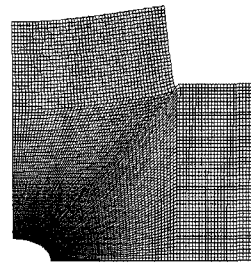
## 2. 이축압축실험에 있어 하중재하판의 영향

앞 절에서 언급한바와 같이 경계면에서의 마찰저항 감소를 위하여 사용하는 하중재하판의 경우에는 모델 실험을 수행하기 위하여 자주 사용한다. 본 논문의 작성 또한 공동주변의 손상 평가를 위한 실험 수행 과정에 이루어 졌다. 따라서 실내실험을 통한 모델 실험의 경우 특정 조건에서의 암반상의 거동 관측을 위한 목적으로 이해할 수 있다. 공동을 포함한 실험체의 이축압축 조건에서 일체형 철제 재하판과 빗살구조 하중 재하판의 영향에 대하여 수치해석을 통하여 검토하고자 한다.

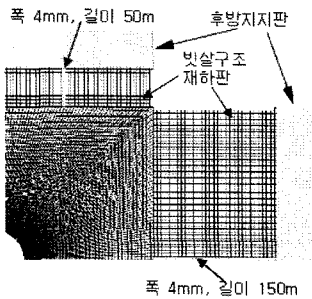
그림 4는 일체형 재하판과 빗살구조 재하판의 수치해



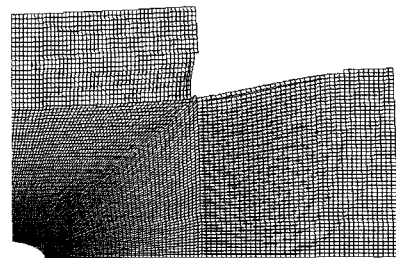
(a) 일체형 철제 재하판 모델



(b) 일체형 철제 재하판 적용시 변형



(c) 빗살구조 재하판 모델



(d) 빗살구조 재하판 모델 적용시 변형

그림 4. 일체형 및 빗살구조 하중재하판 수치해석 모델 및 해석결과

석 모델을 나타내며 각각의 제원은 다음과 같다. 수치해석 모델은 이축압축 실험을 모사하고 있으며 실험체의 크기는 400×400 mm이며 중앙에 있는 공동은 직경 80 mm이다. 해석에 있어 이와 같은 크기의 실험체를 적용한 이유는 현재 모델링한 사이즈와 동일한 크기의 실험체를 바탕으로 실험식의 하중재하판을 이용하여 이축압축 실험이 수행되고 있는 상태이므로 실제 실험에 미치는 영향을 간접적으로 파악하기 위함이다. 모델작성은 X와 Y축의 축대칭 조건을 이용하였다. 작용하중은 수평방향으로 5 MPa, 수직방향으로 10, 20, 30 MPa를 적용시켰다. 일체형 철재 재하판의 경우에는 50 mm 두께의 철재 하중재하판을 모사하고 재하판을 지지하는 두께 50 mm의 후방 지지판을 별도로 추가하여 실제 재하조건과 유사한 조건으로 모델링 하였다. 일체형 재하판의 경우 후방재하판과 일체화된 형태로 모델링이 되었으며 빗살구조 재하판의 경우 각 빗살구조가 개별적으로 모델링 되었으며 이때 각 빗살의 폭은 4 mm이며 수직방향으로 설치된 빗살의 길이는 50 mm이며 수평방향 빗살의 길이는 150 mm를 적용하였다 (개별적으로 모델링된 빗살이 표현된 그림 4(c) 참고). 빗살구조에 있어 각 요소의 폭은 4 mm를 적용하였는데 이는 실험체 내 요소의 크기와 동일하다. 또한 빗살 재하판과 실험체 사이 경계면 그리고 빗살 재하판과 후방 지지판 사이 경계면에서는 각 위치에서 빗살과 실험체를 모델링하는 요소가 공유하는 노드 그리고 빗살과 후방지지대 요소가 공유하는 노드 상에서의 강결 조건으로 가정하였다. 일체형 재하판 조건에서도 실험체와 재하판이 공유하는 노드는 강결조건으로 가정하였다. 이러한 가정은 실제 조건보다 다소 보수적인 결과를 보일 것으로 판단된다. 왜냐하면 실제 실험체와 하중 재하판사이에서는 어느 정도의 활동이 발생할 것이므로 강결조건에서 가정하는바와 같이 실험체

와 하중재하판의 경계면상에서 공유하는 절점의 동일한 거동이 아니라 마찰활동으로 인하여 운동학적 불연속성이 발생하기 때문이다.

각 방향으로 빗살의 길이는 Bobet (2001)이 제안하는 방법에 의해 각 빗살의 좌굴응력을 고려하여 계산되었다. 실험체의 경우에는 연암조건을 모델링하였으며 실제 적용된 물성값은 이축압축 수행을 위하여 시멘트로 제작한 유사암의 물성을 사용하였다. 전체적으로 적용된 가압판과 실험체 물성값 및 제원은 표 1에 나타내었다.

해석결과와 비교를 위하여 중앙에 공동이 없는 조건에서 각 경계면상 일체형 가압판을 적용한 케이스를 추가 해석 하였으며, 해석결과는 그림 5와 표 2에 나타내었다. 그림 5에서는 각 조건별로 3 종류의 선이 있는데 이는 외부에서 작용하는 수직 압력이 10, 20, 30 MPa (기호의 크기가 클수록 큰 압력 조건임) 조건인 경우이며 수평압력은 5 MPa로 일정한 가압조건이 유지되었다.

해석결과를 살펴보면 우선 공동이 중앙부에 없는 조건의 경우 관측되는 실험체의 중앙부에서 발생하는 내부응력의 크기는 외부에서 작용하는 압력의 크기와 거

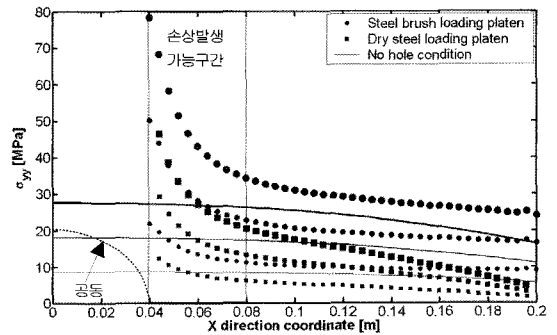


그림 5. 경계조건 및 공동유무에 따른 실험체내의 응력변화 비교

표 1. 해석을 위하여 적용된 실험체 및 가압판의 단면 및 적용 물성값

	실험체	가압판		구속압
		일체형	빗살구조	
탄성계수 (N/m <sup>2</sup> )	8 × 10 <sup>9</sup>	2 × 10 <sup>11</sup>		수평압 5 MPa, 수직압 10, 20, 30 MPa 적용
Poission 비	0.17	0.3		
크기	400 × 400 mm, 중앙에 80 mm 공동위치	두께 50 mm로 수평 및 수직방향 동일 제원 적용	전체 빗살의 두께 4 mm, 수직 빗살길이 50 mm, 수평 빗살길이 150 mm	

표 2. 공동에서부터 거리에 따른 수직응력의 변화

중앙에서 부터의 거리			6 cm	10 cm	15 cm	19 cm
수직압 10MPa, 수평압 5MPa	일체형 가압판	공동 없음	8.5	8.1	7.2	6.0
		공동 존재	7.8	5.3	3.6	1.9
	빗살구조가압판 (공동존재)		13.5	10.3	9.4	9.1
수직압 20MPa, 수평압 5MPa	일체형 가압판	공동 없음	17.7	16.8	14.6	11.9
		공동 존재	17.4	11.4	7.5	3.8
	빗살구조가압판 (공동존재)		28.3	20.6	18.3	16.9
수직압 30MPa, 수평압 5MPa	일체형 가압판	공동 없음	26.9	25.4	21.9	17.5
		공동 존재	27.1	17.5	11.5	5.1
	빗살구조가압판 (공동존재)		43.0	30.9	27.3	24.8

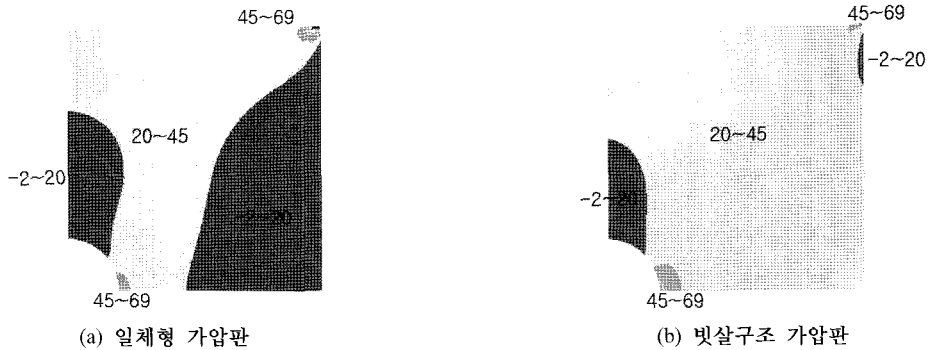


그림 6. 수직응력 분포 (단위 MPa)

의 비슷한 수준임을 알 수 있다(발생하는 내부응력은 작용하는 외부 압력의 90%). 그러나 이러한 응력은 일체형 가압판이 작용하는 경계면 쪽으로 이동함에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있으며 작용외력이 클수록 응력의 감소폭도 크다(수직압이 10, 20, 30 MPa일 때 각각 6.0(60%), 11.9(59.5%), 17.5(58.3%) MPa 감소).

이에 비해 공동이 있는 경우에는 상당히 급격한 응력의 변화를 보이고 있으며 경계조건에 따른 응력의 변화는 더욱 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 비록 본 논문에서 수행한 해석이 탄성해석이므로 실제로는 발생 가능하지 않은 응력이 관측된 부분도 있으나 이러한 부분을 제외하더라도 빗살구조의 재하판과 일체형 재하판의 영향은 분명히 확인할 수 있다.

빗살구조의 재하판의 경우 경계면 근처에서 관측되는

응력의 크기는 외부 압력이 10, 20, 30 MPa시 9.1(91%), 16.9(84%), 24.8 MPa(82.7%) 수준임을 알 수 있다. 이에 비해 일체형 가압판의 경우에는 외부 압력에 따라 1.9(19%), 3.8(19%), 5.1 MPa(17%)가 발생함을 알 수 있다. 또한 이러한 내부 응력의 차이는 공동 주변 손상 평가를 목표로 하는 실험과 같이 공동 주변의 응력분포 상태의 파악을 대상으로 하는 실험의 수행시 가압판의 종류에 따라 실험 결과의 차이를 보일 수 있다. 공동 주변 소성구간을 공동의 가장자리에서 약 20 mm로 볼 때 (소성구간의 발생은 여러 조건에 의존적이므로 개략적으로 가정시) 발생하는 내부응력의 크기 또한 많은 차이가 있을 수 있음을 알 수 있다. 또한 일체형 재하판의 경우에는 그림 6에서 확인할 수 있듯이 하중 재하판과의 경계면 특성으로 인하여 균등한 수직응력이 분포하지

않으므로 특히 관심영역과 경계면 사이 거리가 가까운 작은 크기의 실험체가 사용될 경우 실험결과의 왜곡 정도는 더욱 심할 것으로 판단된다.

따라서 모델 실험에 있어 마찰저항을 저감 시킬 수 있는 가압판의 사용은 필수적이라 할 수 있을 것이다. 이상 적절한 가압판의 필요성을 바탕으로 다음 절에서는 빗살구조 가압판의 설계기법에 대하여 논의 하고자 한다.

### 3. 철제 빗살형태의 가압판에 대한 설계

빗살구조 가압판의 기능은 실험체의 변형에 따라서 각 빗살들에서 충분한 변형이 발생하게 함으로써 경계면상에서의 마찰저항을 감소시킨다. 따라서 각 빗살은 재료의 강도에 따라 가해지는 외력을 충분히 지지할 수 있어야 하며 동시에 마찰저항을 감소할 만큼 변형이 발생하여야 한다. 외력에 대한 지지 부분에서는 좌굴에 대한 지지력을 의미하며 변형의 발생은 유연도를 의미할 것이다. 따라서 본 절에서는 각 빗살을 기둥과 단순보의 형태로 가정하여 빗살자체의 구조적 안정성과 마찰저항 저감을 위한 변형(처짐)의 발생한계를 바탕으로 각 빗살의 길이 및 단면을 설계하는 방법을 논의하고자 한다. 구조적 안정성 부분에서는 기둥과 단순보의 가정을 바탕으로 좌굴에 대한 검토를 할 것이며 하중에 따른 발생 변위를 바탕으로 빗살의 단부(자유단)에서의 처짐을 고려하고자 한다. 각 부분에 대한 설계 절차는 다음과 같다.

#### 1) 좌굴영향의 검토

좌굴에 대한 설계기법은 Bobet(2001)에서 기 제시되어 있다. 그림 7에서와 같이 각 빗살을 기둥으로 가정하여 단부조건이 자유단인 조건에서 작용하는 축력과 전단력을 고려한 평형식은

$$EIy'' + M = 0 \quad (1)$$

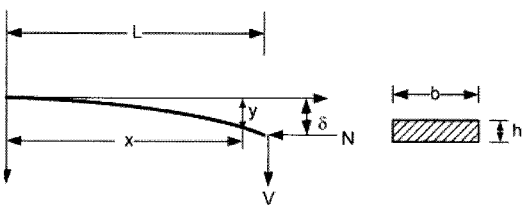


그림 7. 좌굴검토를 위한 빗살의 단순모형도

$$EIy'' = N(\delta - y) + V(L - x) \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 축력  $V$ 는 횡력  $\delta$ 은 선단부 변형  $y$ 는 처짐을 나타낸다.

식 (2)에서 일반해를 구하면

$$y = C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{N}{EI}}x\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{N}{EI}}x\right) + \delta + \left(\frac{V}{N}\right)L - \left(\frac{V}{N}\right)x \quad (3)$$

다음의 경계조건을 적용하면

$$y(0) = 0 \quad y(L) = \delta \quad y'(0) = 0$$

이를 바탕으로 아래 식을 구할 수 있다.

$$\tan\sqrt{\frac{N}{EI}}L = \left(\delta + \frac{V}{N}L\right)\frac{N}{V}\sqrt{\frac{N}{EI}} \quad (4)$$

식 (4)는 아래 조건 만족시 해가 발생하는 특이해 조건이므로 각 빗살에서 발생하는 임계하중 값은 식 (5)와 같다.

$$\tan\sqrt{\frac{N}{EI}}L = \frac{\pi}{2} \quad \text{이때 } \delta = \infty$$

$$\text{따라서 } N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (5)$$

결국 식 (5)를 바탕으로 빗살의 단면 및 강성 ( $EI$ )과 길이를 결정할 수 있다. 좌굴을 통해서 계산된 빗살의 길이는 상한값이 되므로 처짐조건을 고려하여 하한값을 결정할 수 있다.

#### 2) 처짐의 검토

처짐의 검토는 식 (4)의 조건에서 식 내에 포함된  $\delta$ 의 값을 실제 발생 가능한 값으로 대입하여 빗살이 실험체의 변형에 따라 발생하는 처짐을 허용할 수 있는 한계 길이를 구할 수 있다. 일반적으로 최대 변형의 값을 기준으로  $\delta$ 값을 설정할 수 있을 것이며 암반의 경우 실험체 크기의 1%정도가 적당할 것으로 판단된다.  $V$  값 또한 마찰로 인하여 경계면상에서 발생하는 전단력이므로 일반적으로 관측된 철제와 콘크리트 사이에서 발생하는 마찰계수의 값을 적용하여  $V$ 를 계산할 수 있다. Vonk (1992)에 의하면 마찰계수는 축력에 의존적인 경향을 보이는 것으로 관측되었으나 일반적으로 매끈한 철제면

의 경우 마찰계수가 0.2를 넘지 않는 것으로 관측되었다. 따라서 보수적인 값으로 마찰계수를 0.2를 적용하여  $V$ 를 정할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 식 (4)를 정리하면

$$\tan \sqrt{\frac{N}{EI}} L - \sqrt{\frac{N}{EI}} L - \delta \frac{N}{V} \sqrt{\frac{N}{EI}} = 0 \quad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{N}{EI}} \text{ 일 때}$$

$$\tan(kL) - kL - \delta k \frac{N}{V} = 0 \quad (7)$$

식 (7)은 해석적으로 풀리지 않는 형태의 식이므로 길이값의 점진적인 증가 혹은 감소를 통해 식 (7)의 조건을 만족시키는 해를 찾아 빗살의 길이를 방법을 적용할 수 있다. 이때 계산한 값은 하한값으로 계산된 값 이상의 빗살 길이를 사용할 수 있다. 따라서 최종적으로 빗살의 길이는 좌굴응력을 바탕으로 구한 상한값과 처짐을 바탕으로 구한 하한값 사이의 값을 선택할 수 있을 것이다.

#### 4. 설계 적용 예제

이상의 설계과정에 대한 이해를 위하여 예제를 바탕으로 설명하고자 한다. 적용예제는 Bobet(2001)과 본 논문에서 수행한 해석에 대한 실험조건을 바탕으로 한다. Bobet(2001)은 암석 절리면의 개시, 진전 및 연결에 대한 관측을 위하여 수행된 실험으로서 실험체의 크기는 76.2×152.4×30 mm이다. 이때 30 mm는 실험체의 두께를 나타내며 평균값을 사용하였다. 빗살이 실험체에 접촉하는 단면은 수직방향 빗살의 경우 76.2×30 mm이며 수평방향 빗살의 경우에는 152.4×30 mm이며 실험체의 폭 방향(30 mm 두께) 방향으로 빗살을 다소 두꺼운 형태를 취하였다. 따라서 수평방향 빗살의 경우 빗살의 조립체의 단면은 152.4×38.1 mm이며 수직방향 빗살의 경우 76.2×38.1 mm를 적용하였다(그림 8 참조).

각 방향 빗살의 제원을 살펴보면 수평방향의 경우 각 빗살의 단면은 3.81×0.3 mm이며 각 빗살간의 간격은 0.2 mm이다. 수평방향으로 가해지는 외력은 100 kN이

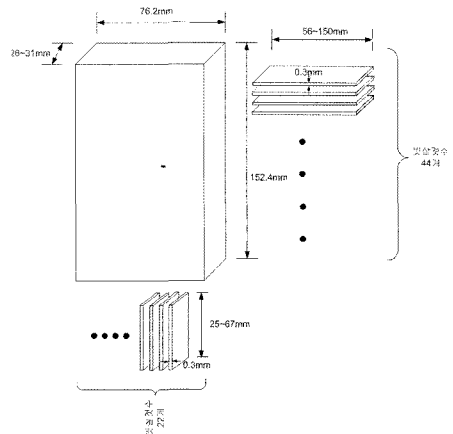


그림 8. Bobet(2001)에서 적용한 실험체 적용시 빗살구조의 제원

며 사용한 철의 탄성계수는 2.06×10<sup>11</sup> N/m<sup>2</sup>이다. 간격과 폭을 고려한 빗살의 개수는 44개이며 각 빗살이 받는 외력은 2272.7 N(100 kN/44)이다. 또한 계산된 EI값은 20.9 Nm<sup>2</sup>이다. 이상의 값을 식 (5)에 대입하여 빗살 길이  $L$ 을 구하면 150.7 mm가 된다. 이와 같이 좌굴에 의해서 구해진 빗살의 길이는 최대값이 되며 계산된 값 이하의 값이 사용되어야 한다. 빗살길이 하한의 값은 식(7)에서 계산된다. 계산된  $k$  값은 10.4 m<sup>-1</sup>이며 실험체의 길이방향으로 예상되는 변위는 1.5 mm 그리고 마찰계수 0.2를 적용한 수평빗살 선단에서의 마찰력 455 N을 식 (7)에 대입하면 요구되는 수평방향 빗살의 길이는 56 mm가 된다. 따라서 수평방향의 빗살의 길이는 150에서 56 mm 사이의 값을 취할 수 있다.

수직방향의 경우에는 각 빗살의 단면은 수평방향 빗살과 동일하게 3.81×0.3 mm이며 각 빗살간의 간격 또한 0.2 mm를 적용하였다. 간격과 폭을 고려한 수직방향 빗살의 개수는 22개이다. 수직방향으로 가해지는 외력은 250 kN이며 각 빗살이 받는 하중은 11363.6 N(250 kN/22)이다. 결국 동일한 단면적이 사용되므로 계산된 EI 값은 20.9 Nm<sup>2</sup>이다. 이상의 값을 식 (5)에 대입하면 빗살의 길이는 67.4 mm가 계산된다. 처짐을 고려한 빗살의 길이를 계산하면 수직방향 빗살의 경우 움직임의 방향이 수평방향이 되므로 이때 적용한 변위의 값은 0.7 mm를

적용하였다. 수평방향으로 계산된  $k$  값은  $23.3\text{m}^{-1}$ 이며 마찰계수 0.2를 적용한 수직빗살 선단의 마찰력은 2273 N이다. 이상의 값을 식 (7)에 대입하여 계산하면 25.5 mm가 계산된다. 따라서 수직 빗살의 길이는 67.4 mm에서 25.5 mm 범위내에서 결정되어야 할 것이다.

그림 4, 6과 같이 크기  $400\times 400$  mm 조건의 경우 사용 가능한 빗살구조의 제원에 대한 설계내용은 다음과 같다. 실험체의 두께를 100 mm로 가정시 빗살의 폭을 4 mm로 한다면 빗살과 실험체가 닿는 단면의 제원은  $100\times 4$  mm<sup>2</sup>이다. 각 빗살간의 간격을 0.2 mm로 가정하면 각 면에서 요구되는 빗살의 개수는 95개가 된다. 또한 가압하는 수직응력을 50 MPa, 수평응력을 5 MPa로 가정할 경우 각 빗살당 작용하는 수직하중은 21,053 N, 수평하중은 2,105 N이다. 빗살의 탄성계수는  $2.0\times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>이므로 EI 값은 107 Nm<sup>2</sup>이다. 이상의 입력값을 이용하여 좌굴을 고려한 수직 및 수평방향의 빗살의 길이는 112, 354 mm이다. 또한 처짐을 고려한 빗살의 수직 및 수평방향의 길이는 각각 40와 137 mm이다. 이때 수평방향 빗살의 허용처짐은 실험체의 1% 압축율에 상응하는 4 mm를 수직방향 빗살은 1 mm를 적용하였다. 또한 작용하는 마찰계수는 이전과 동일하게 0.2를 적용하였다. 이상의 내용을 그림으로 나타내면 그림 9와 같다.

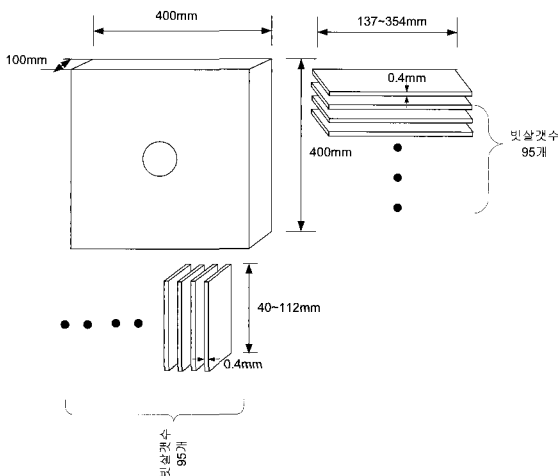


그림 9. 400 mm×400 mm 실험체 적용시 요구되는 빗살구조의 제원

## 5. 결 론

암석 실험에 있어 암반의 거동관측을 위한 모델실험의 경우에는 적절한 경계조건의 묘사가 상당히 중요하다. 그 이유는 모델실험의 결과를 바탕으로 수치해석 또는 현장실험을 통하여 모델 실험의 결과에 대한 검증이 이루어지기 때문이다. 특히 실내모델 실험의 경우에는 일반적으로 실험체가 작은 크기이므로 응력 및 변형율의 변화가 급격하게 이루어진다. 따라서 국부적인 관측이 요구되는 경우 경계조건에 따른 실험결과와 왜곡은 필연적으로 발생하며 이를 적절하게 보정하는 방법도 쉽지 않다. 결국, 경계조건에서의 교란을 제거하기 위한 방법은 실내실험에 있어 가장 기본적으로 고려되어야 할 사항이다.

본 연구에서는 암석실험에 있어 실험체와 경계면상에서 발생하는 마찰저항을 감소시키기 위하여 사용하는 빗살구조의 하중재하판의 설계기법에 대한 내용을 소개하였다. 기존의 좌굴응력을 바탕으로 이루어지는 빗살의 단면설계기법이 빗살길이의 상한값을 제안하는 방법이라면 본 논문에서 제안하고 있는 처짐을 고려한 방법은 빗살길이의 하한값을 제안하는 방법이라 볼 수 있다. 따라서 이상의 두 가지 방법을 적용하여 적절한 빗살의 길이를 결정하여 하중 재하판을 제작하는 것이 경계면상에서의 마찰저항 저감에 있어 타당할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

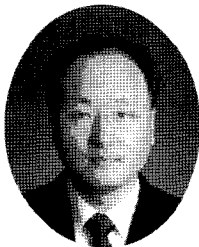
본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술 연구)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

## 참고문헌

1. 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.
2. Brown E.T., Gonano, L.P. (1974), "Improved compression test technique for soft rock", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, No. GT2, pp. 196-199.
3. Gerstle, K. H., Linse, D. L., Bertacchi, P., Kotosovos,



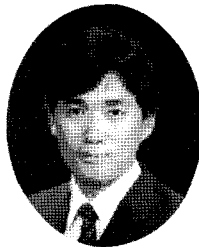
- M. D., Ko, H., Newman, J. B., Rossi, P., Schikert, G., Taylor, M. A., Traina, L. A., Zimmerman, R. M., Bellotti, R. (1976), "Strength of concrete under multiaxial stress state", Douglass McHenry International Symposium of Concrete and Concrete Structures, pp. 103-131.
4. Hilsdorf, H. K. (1965), "Die Bestimmung der ziveiachsigen Festigkeit von Benton" (The experimental determination of the biaxial strength of concrete), Proceedings, Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, Berlin, Germany, Vol, 173.
5. Jaeger, J. C., Cook, N. G. (1979), "Fundamentals of rock mechanics", Third Edition, Chapman and Hall.
6. Lee, S. K., Song, Y. C., Han, S. H. (2004), "Biaxial behavior of plain concrete of nuclear Containment building", Nuclear Engineering and Design, Vol. 227, pp. 143-153.
7. Vonk, R. A. (1992), "Softening of concrete loaded in compression", Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology.



**사 공 명**

한국철도기술연구원  
궤도토목연구본부  
선임연구원

E-mail: rockcore@krri.re.kr



**이 준 석**

한국철도기술연구원  
궤도토목연구본부  
본부장

E-mail: jslee@krri.re.kr



**김 성 수**

삼성물산  
국내토목영업팀  
부장

E-mail: sungsoo.kim@samsung.com