

철근 콘크리트 부재의 부착거동에 관한 실험적 연구
An Experimental Investigation on the Bond Characteristics
of Reinforced Concrete Structure

오 병환* 이 성로** 방 기성***
Oh Byung Hwan Lee Seong Lo Bang Ki Sung

ABSTRACT

The transfer of forces across the interface by bond between concrete and steel is of fundamental importance to many aspects of reinforced concrete behavior. Bond stress - slip relationships were studied using a symmetrical tension test specimen. This type of test is intended to simulate conditions in the tension zone of a concrete beam between primary cracks and below the neutral axis. These relationships between local bond stress and local slip are quite different at different locations along the bar. The present study allows more accurate analysis of reinforced concrete structures by employing more realistic bond stress-slip relations.

1. 서론

철근 콘크리트가 하중의 작용에 대하여 충분한 강도와 강성을 가지는 구조재료로서의 구실을 다하기 위해서는 콘크리트와 철근이 각각 충분한 강도를 가지는 것이 필요할 뿐만 아니라, 이 양자 사이의 부착강도가 충분해야 하고, 또 인장축 콘크리트에 많은 균열이 발생된 상태에서도 철근이 콘크리트와 항상 일체적으로 작용할 수 있도록 설계 시공되어 있어야 한다.

이러한 철근 콘크리트 구조부재의 다양한 거동중에서도 콘크리트와 철근의 부착강도를 통한 철근으로부터 콘크리트에 대한 힘의 전달은 균열의 전파현상과 함께 중요한 연구 과제로 지적되어 왔다.

철근콘크리트 부재의 부착면에서의 특성은 콘크리트 단면에서 발생하는 균열의 폭, 균열 간격 그리고 인장증강 (tension - stiffening) 현상, 부착면의 거칠기, 부재의 강도 등에 의해 결정되어지며, 특히 최근에 이르러 철근 콘크리트 구조물에 대한 유한요소해석의 광범위한 이용과 함께 부착응력 (bond stress) 과 부착슬립 (bond slip)에 대한 보다 정량적인 연구결과가 요구되어 지고 있다.

부착거동에 대한 실험적 연구에 있어서의 근본적인 어려움은 내부에 매몰되어 있는 철근과 콘크리트의 부착면에서의 변형도 측정과 부착면에서 발생하는 슬립, 2차 균열 (secondary cracking) 현상을 관찰하는 일로서 이에 대한 연구로는 Nilson이 철근내부에 스트레인 게이지를 장치하고 매몰콘크리트 스트레인 게이지를 통해 철근과 콘크리트의 변형도 차를 구하여 슬립량을 계산해냈다.

그러나, 부착면에서 2차균열이 발생하면 콘크리트의 스트레인 게이지는 기능을 상실하게 되며 이형철근의 경우 철근마디의 영향으로 인하여 변형도의 분포가 일정치 않게되어 실험적 오차가 크게 나올 수 있다.

Shah는 Nilson의 실험적 단점을 보완하기 위해 새로운 실험모델을 개발하고 현미경을 통하여 슬립을 관찰할 수 있는 방법을 고안하여 극부 부착응력과 극부슬립의 관계를 연구하였다.

본 연구에서는 실험을 통하여 콘크리트에 매몰된 철근의 변형도를 측정하고 극부 부착응력의 분포를 구하고자 하며, 극부 부착슬립을 측정하여 극부 부착응력과 극부슬립의 관계를 구하고, 반복하중하에서의 부착력, 슬립 및 철근변형도 등의 변화특성을 분석하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 철근콘크리트의 부착거동 실험

2.1 실험개요

본 실험에서 제작된 시편은, 철근 콘크리트 힘부재에서 중립축하단의 인장축 콘크리트에서 발생하는 균열과 균열사이의 철근과 콘크리트의 부착면에서의 부착거동과 부합되도록 모형화 한것으로 그림 1과 같이 두가지 종류로 되어 있다.

극부부착응력 (local bond stress)을 측정하는데 어려운 문제로 대두되어 온 콘크리트 내부의 철근의 변형도를 측정하는 문제를 해결하기 위해, 본 실험에서는 철근을 양분하고 철근단면에 가는 홈을 파서 이 홈에 스트레인 게이지를 부착시키고 게이지에 연결된 전선은 양 홈을 통하여 철근중으로 노출시켰다.

그림 1에서 B형태의 시편은 철근의 변형도 측정은 가능하나 부착면에서의 슬립관찰은 불가능하므로 이런 단점을 보완하기 위하여 A형태의 시편을 제작하였다.

A형태와 B형태의 인장하중에 대한 역학적 거동은 실제로 완전하게 부합되지는 않으나, Shah에 의해 수행된 실험결과에 따르면 비교

* 정희원 서울대학교 토목과 부교수

** 정희원 서울대학교 토목과 박사과정수료

***정희원 서울대학교 토목과 석사

적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

2.2 실험시편의 제작

2.2.1 철근의 가공

본 실험에서 사용된 철근은 철근의 가공으로 인해 단면이 감소되는 것을 고려하여 비교적 지경이 큰 D25와 D22 철근을 선택하였고, 철근가공시 정확히 1/2단면이 되도록 절삭하여 B형 시편과 같이 두 단면을 접합시킬 경우 단면의 손실이 없도록 하였다. 또한 철근에 스트레인 게이지를 용이하게 접착시킬 수 있도록 철근의 종방향으로 가는 홈을 팠다.

가공된 철근에는 콘크리트 타설 하루전에 순간접착제를 사용하여 스트레인 게이지를 접착시켰으며, 자동제어 인장시험기에 본 시편을 용이하게 장치할 수 있도록 부속장치를 제작하여, 시편 양단의 나사홈을 너트로 고정시켜서 하중전달이 되도록 하였다.

2.2.2 시편의 제작 및 양생

실험시편은 그림 1에서와 같이 두종류로 제작하였으며, 시편의 성격상 수중양생이 불가하므로 콘크리트 타설 후 실험실에서 습윤양생을 하였고, 10일 후에 거꾸집을 제거하였다.

슬립의 관측점은 변형도 측정점과 동일한 위치에 설정하였으며, 슬립의 관측이 용이하도록 하기위해 각각의 측정점에 부착면의 횡방향으로 1mm의 적색선을 긋고 그위에 0.5mm의 철선을 순간접착제로 접착시킨 다음, 철근과 콘크리트의 경계면에서 예리한 메스로 작은 압력을 가하여 부착면에서 철선이 절단되게 하였다.

2.3 실험방법 및 측정

자동제어 인장시험기에 실험시편을 장치하고 Digital Strain Indicator에 시편의 스트레인 게이지선을 연결시킨 다음, 시험기의 인장하중이 부속장치를 통하여 시편의 양단 철근으로 전달되게 하였으며, 자동제어 인장시험기의 재하속도는 0.2mm/min으로 하였다.

최대 인장하중은 8ton으로 하고 0ton에서 하중단계마다 1ton씩 증가시켜 나갔으며 각 하중단계마다 철근의 변형도를 자동 측정하였다.

콘크리트와 철근의 경계면에서 분리된 상태로 접착된 0.5mm 철선의 상대변위가 슬립량을 나타내는 바, 시편의 전면에서 상하좌우로 이동가능하게 부착된 현미경으로 슬립을 관찰하였다. 이때 현미경은 내부에 조명장치를 부착하여 슬립의 관측을 용이하게 하였다.

반복하중의 경우, 자동제어 인장시험기의 특성을 고려하여 인장하중에 대해서만 반복하중을 가하였으며, 하중을 0ton까지 감소시키지 않고 100kg까지만 감소시켰는데, 이는 인장하중을 0ton까지 감소시키는 과정에서 의외로 발생할 수 있는 압축하중을 방지하기 위해서였다. 전체적인 실험과정은 앞에서 설명한 바와 같이 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 철근변형도와 극부부착응력 (local bond stress)

시편에 부착된 스트레인 게이지로부터 구한 콘크리트 내부의 철근 변형도는 그림 2와 같다.

콘크리트 내부의 철근 변형도 분포는, 시편의 양단에서 콘크리트로 구속되지 않은 자유단의 철근 변형도와 유사한 값을 나타내며, 시편의 중심으로 함할수록 점차 감소해 가는 경향을 보인다.

철근변형도의 이러한 변화는 철근의 변위 (displacement)가 콘크리트와 철근의 부착면에서 부착강도 (bond strength)에 의해 구속되고 있음을 의미하며, 구속된 변위의 양만큼 감소하는 철근의 응력은 콘크리트가 부담하게 된다.

따라서 그림 2에서 보는 바와 같이 철근의 변형도가 가장 작은 중심 단면에서의 콘크리트의 응력이 최대가 될 것이라는 것은 쉽게 예측할 수가 있다.

그림 3에서와 같이 임의의 미소구간 dx를 정의했을때, 미소구간 dx내의 변형도 변화량을 $d\epsilon_s$ 라 하면 철근인장력의 변화량 ΔT 가 존재하게 되고, 평형조건에 의해 ΔT 에 저항하는 응력을 U (극부부착응력)라 정의하면 U 는 철근 주변에 전단응력의 형태로 분포하게 되며 식 (1)과 같이 된다.

$$T + \Sigma_0 \cdot U \cdot dx = T + \Delta T$$

$$\Delta T = \Sigma_0 \cdot U \cdot dx$$

$$U = \Delta T / \Sigma_0 \cdot dx = \frac{d\epsilon_s \cdot E_s \cdot A_s}{dx \cdot \Sigma_0} \quad (1)$$

그림 2의 오른쪽은, 실험을 통하여 측정된 철근의 변형도와 식 (1)을 이용하여 각 시편에 대한 극부부착응력을 계산하여 그 결과물 그래프로 나타낸 것이다.

콘크리트의 측면에서 생각하면 이러한 극부부착응력은 부착면에서 콘크리트에 작용하는 전단력 형태의 외력으로 볼 수 있으며, 극부부착응력 U 는 미소구간 dx 내의 철근응력의 변화량에 비례한다. 따라서 극부부착응력은 철근응력의 일부가 콘크리트에 전달되는 것으로 볼 수 있으므로 실제 실험에서 철근변형도 측정시 발생하는 오차는 부착응력의 계산에 큰 영향을 미치게 된다.

특히 이형철근의 경우 철근마디의 영향으로 변형도의 분포가 일정치 않고, 또한 스트레인 게이지가 실험시편의 종방향 중심선을 향하여 경사지게 접착되었을 경우 실제보다 큰 변형도가 측정되므로 세심한 주의를 기울여야 한다.

3.2 극부슬립 (local slip)

그림 4에서는 실험에서 얻어진 시편 중심으로부터 양단까지의 극부슬립 분포를 나타내고 있다.

일반적으로 시편중앙에서는 슬립이 발생하지 않으며 양단으로 함할수록 슬립량은 점차

증가한다. 슬립현상의 일차적인 원인은 부착면에서 콘크리트와 철근의 변형도가 다르게 분포하는데 있다. 따라서 실험시편에 인장하중이 작용하면 철근은 부착면에서 미끄러지거나 이동하려는 경향을 갖게 될 것이다. 하중이 증가함에 따라 원형철근은 곧 화학적 부착력에 손상을 입게 되고 슬립이 발생하게 되나 이형철근은 마디와 마디사이의 콘크리트의 맞물림 등에 의해 슬립에 저항하게 된다. 그러나 하중이 계속적으로 증가하면 마디와 마디사이의 콘크리트는 지압력에 의해 파쇄현상이 발생하게 되고, 마디에서 발생하는 원주응력(radial stress)에 의해서 콘크리트는 철근으로부터 분리되는 응력을 받게 된다. 이형철근의 슬립현상은 이러한 원인으로 발생하게 되며 2차근열이나 내부근열 등도 슬립에 영향을 미치게 된다.

그림 4에서 보면 시편양단에서 슬립은 증가현상이 둔화되거나 감소하는 경향을 보이는데, 이는 양단부근에서 발생하는 2차근열의 결과로 사료되어 진다.

3.3 극부부착응력과 슬립의 관계

그림 5는 실험을 통하여 측정된 측정점 1, 2, 3에 대한 극부부착응력과 극부슬립의 관계에 대한 그래프이다. 이들의 관계는, 그림에서 보는 바와 같이 양단으로부터 중심에 가까워 질수록 작은 슬립량에 대하여 극부부착응력이 급격하게 증가하고, 시편의 양단에서는 부착응력의 증가와 무관하게 슬립량이 증가하는 양상을 보이고 있다.

이러한 현상은 철근과 콘크리트의 부착력이 악화되어 가고 있음을 의미하며, 계속적으로 하중이 증가한다면 철근과 콘크리트의 분리현상과 함께 접선인장응력(circumferential stress)의 증가로 인해 부착파괴(bond-failure)가 발생하게 될 것이다.

철근콘크리트 구조물에 대한 유한요소해석의 연구에서 극부부착응력과 극부슬립의 관계는 근열의 전파와 함께 중요한 요소이다. 이러한 필요성에 따라 Nilson은 Bresler와 Bertero의 실험결과를 이용하여 식 (2)를 제안하였다.

슬립 [S]과 부착응력 [U]의 단위를 각각 「inch」, 「psi」로 정의하면 식(2)는 다음과 같다.

$$U = 3606(10^3S) - 5356(10^3S)^2 + 1986(10^3S)^3 \quad (2)$$

위의 식을 슬립량 S에 대하여 미분하면 이 값은 극부부착응력과 극부슬립의 관계곡선의 접선을 의미하며 이를 부착강성(Bond Stiffness)이라 정의할 수 있다.

Nilson은 부착강성을 부착면에서의 스프링 강성 K로 보고 강성매트릭스를 조합하여 비선형 유한요소해석에서 부착면의 특성을 모델링하였다.

Mirza는 62개의 시편으로 부착에 관한 실험을 수행하고 그 결과를 다음과 같이 제안하였다.

$$U = 1.95 \times 10^6 S - 2.35 \times 10^9 S^2 + 1.39 \times 10^{12} S^3 - 0.33 \times 10^{15} S^4 \quad (3)$$

식 (2), (3)은 평균적 의미의 부착응력과 슬립에 대한 관계를 나타낸 것으로, 본 실험의 극부 부착응력과 슬립에 대한 결과와는 정확하게 부합하지 않는다.

Nilson은 또다른 실험을 통하여 새로운 식을 제안했다.

$$U = 3100(1.43C + 1.50)S\sqrt{f_c'} \quad (4)$$

$$U \leq (1.43C + 1.50)\sqrt{f_c'}$$

위의 식은 시편 양단으로부터 거리변화에 따른 변수를 고려했으며, 콘크리트 강도의 영향을 고려했다. 따라서 식 (2), (3)에 비해 극부부착응력과 극부슬립과의 관계를 구체적으로 표현하고 있으나, 근열간격이나 시편의 크기에 무관하게 양단으로부터 C만큼 떨어진 곳의 슬립이 항상 일정한 값을 갖게 된다고는 생각하기 어렵다.

또한 콘크리트 피복의 두께, 철근의 단면적 등 고려해야 할 변수도 많이 남아 있다.

본 연구에서는, 이러한 현상의 다변성을 고려하여 양단으로부터 위치에 따라 변화해가는 부착-슬립 관계를 실험을 통하여 관찰하였다.

3.4 반복하중실험의 결과 및 분석

반복하중 하에서 부착거동에 관한 실험을 통하여, 정성적인 측면에서 철근의 변형도 변화, 슬립의 증가현상, 부착응력의 저하현상을 연구하였다.

그림 6은 반복하중 하에서 철근의 변형도 증가현상을 보여주고 있다. 시편의 1, 2, 3 각 점에서 반복하중이 계속됨에 따라 일정하중(5ton)에서 변형도가 증가해가는 현상을 보이고 있으며, 반복하중으로 인해 콘크리트의 부착강도가 저하되고, 따라서 시편의 각 지점에서 변형도의 차가 점차 작아지는 경향도 함께 보이고 있다.

그림 7은 반복하중 하에서 슬립의 증가현상을 보여주고 있는데, 원형철근이 이형철근에 비하여 급격한 증가현상을 보이고 있으며, 8회의 반복하중에서 이미 부착면에서의 부착강도는 상실되었다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 또한 반복하중 하에서 극부부착응력의 감소현상을 측정하였으며, 하중이 반복됨에 따라 부착강도가 저하되고, 철근 변형도의 본포곡선이 점차 완만해짐에 따라 부착응력은 감소하게 되는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 철근 콘크리트 부재의 부착거동에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 이에 대한 결과를 몇가지로 요약하면 다음과 같다.

1) 극부슬립의 관찰을 용이하게 하기위해 새롭게 개발된 시편모델을 이용하여 극부슬립을 관찰하였고, 극부부착응력을 측정하여 극부슬립과의 관계를 규명하였다.

2) 본 연구에서는 콘크리트의 피복두께, 철근직경, 콘크리트강도 등의 영향을 고려하여 부착실험을 수행하였으며, 시편의 양단으로부터 중심을 향하여 관측지점의 위치가 변화함에 따라 부착응력-슬립의 관계도 규명하고자 하였다.

3) 반복하중 하에서 전반적인 부착강도의 감소현상과 슬립의 증가현상, 변형도의 증가현상을 파악하였으며, 특히 원형철근의 슬립은 반복하중 하에서 급격한 증가현상을 보임을 알수 있었다.

6. 참고문헌

1. Kemp, E.L, and Wilhelm, W.J., "Investigation of the parameters influencing bond cracking," ACI Journal, Vol.76, Jan., 1979, pp.47-71.
2. Mirza, S.M, and Houde, J., "Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete," ACI Journal, Vol.76, Jan., 1979, pp.19-47.
3. Bazant, Z.P., and Byung H., Oh, "Spacing of cracks in reinforced concrete," the Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No.9, Sept., 1983, pp.2066-2085.
4. Bazant, Z.P., and Byung H., Oh, "Crack spacing in reinforced concrete, Approximate solution," the Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No.9, Sept., 1983, pp.2207-2215.
5. Edwards, A.D., and Yannopoulos, P.J., "Local bond stress to slip relationships for hot rolled deformed bars and mild steel plain bars," ACI Journal, Vol.76, March, 1979, pp.405-421.
6. Clark, C.R., and Johnston, D.W., "Early loading effects on bond strength," ACI Journal, Vol.80, Nov.-Dec., 1983, pp.532-539.
7. Jiang, D.H., Shah, S.P., and Andonian, A.T., "Study of tensile forces by bond," ACI Journal, Vol.81, May-June, 1984, pp.251-259.
8. Kemp, E.L., "Bond in reinforced concrete : Behavior and design criteria," ACI Journal, Vol.83, Jan.-Feb., 1986, pp.50-57.
9. Nilson, A.H., "Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method," ACI Journal, Vol.65, Sept., 1968, pp.757-968.
10. Venkateswarlu, B., and Gesund, H., "Cracking and bond slip in concrete beams," Journal of structural division, ASCE, Vol. 98, No.still, Dec., 1972, pp.1663-2685.
11. Somayaji, S., and Shah, S.P., "Bond stress versus slip relationship and cracking response of tension members," ACI Journal, Vol.78, May-June, 1981, pp.217-225.
12. Lutz, L.A., and Gergely, P., "Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete," ACI Journal, Vol.64, Nov., 1967, pp.711-721.
13. Yukimasa GoTo, "Cracks formed in concrete around deformed tension bars," ACI Journal, Vol.68, April, 1971, pp.244-251.

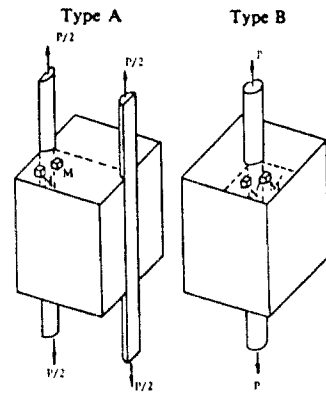


그림 1. 시편의 형태

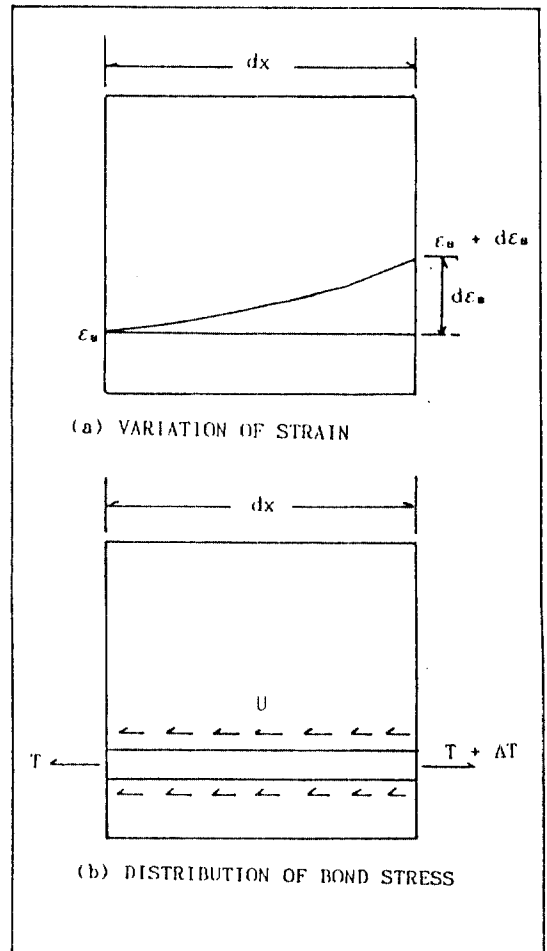


그림 3. 변형도의 변화 및 부착응력의 분포

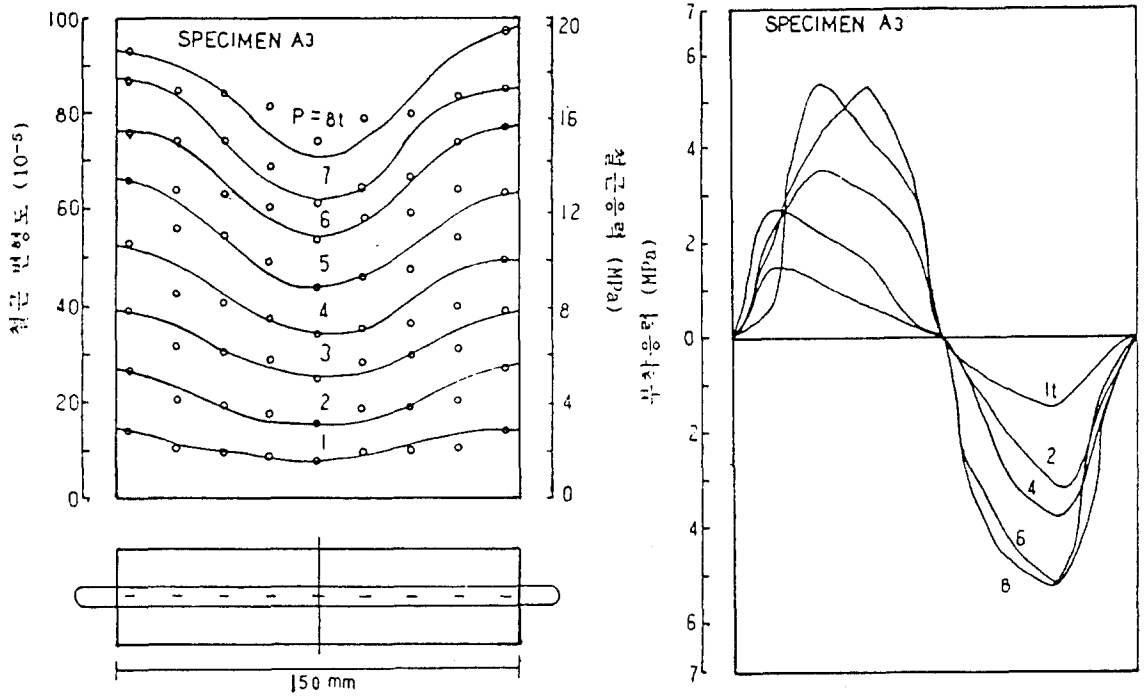


그림 2. 철근변형도 및 부착응력 분포

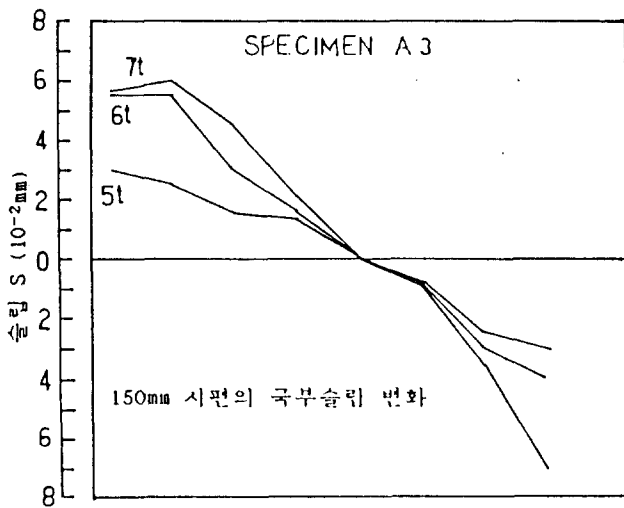


그림 4. 국부슬립의 분포

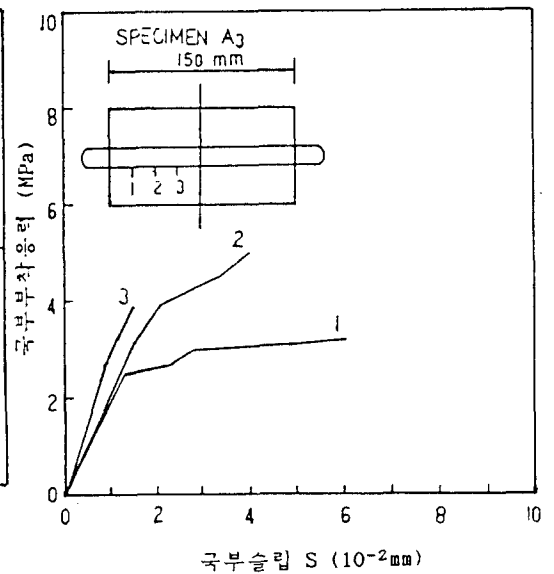


그림 5. 국부부착응력과 국부슬립의 관계

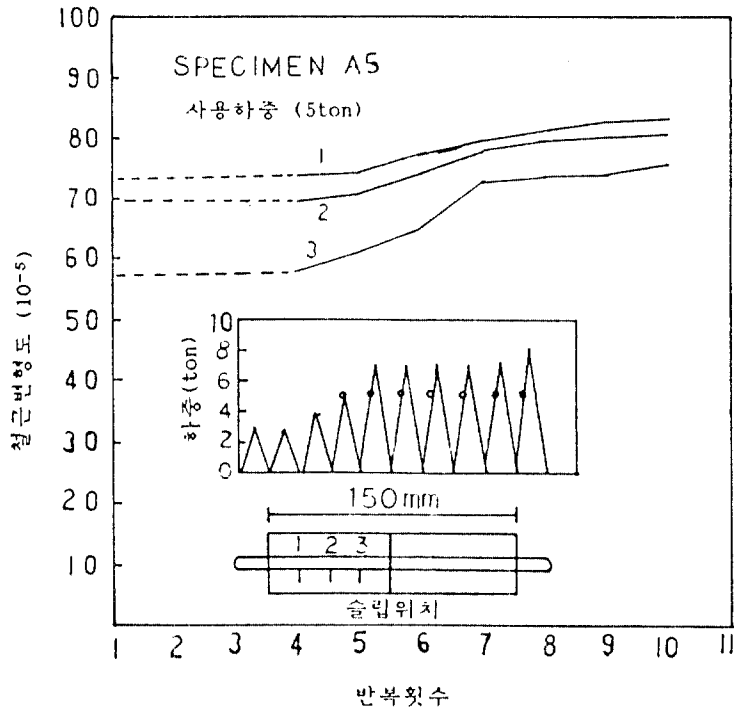


그림 6. 반복하중 하에서 변형도의 증가현상

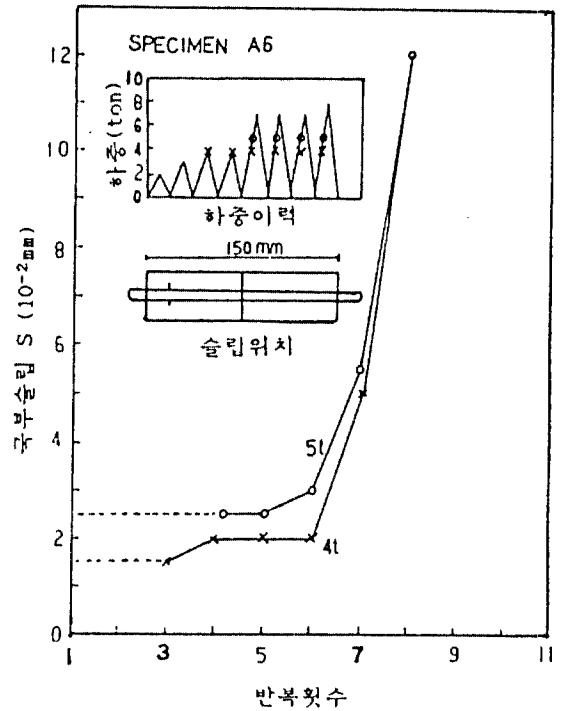
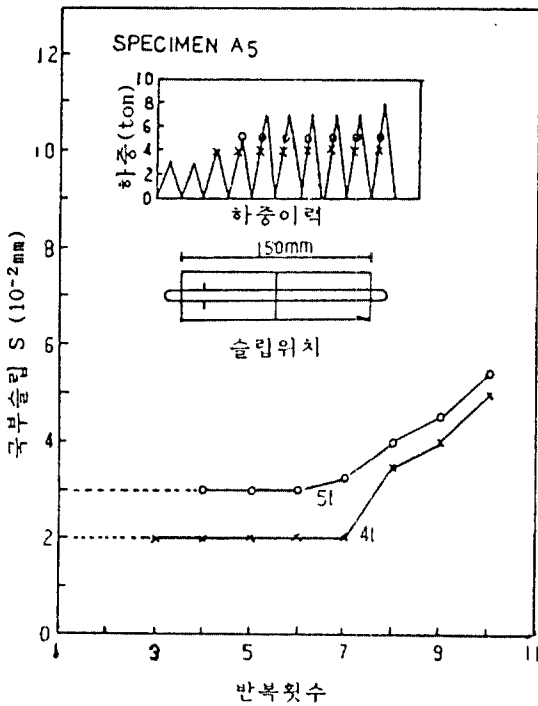


그림 7. 반복하중 하에서 슬립의 증가현상