

# 콘크리트 강도에 따른 균열거동과 부착특성

김 우 (전남대학교 공과대학 토목공학과, 공학박사)

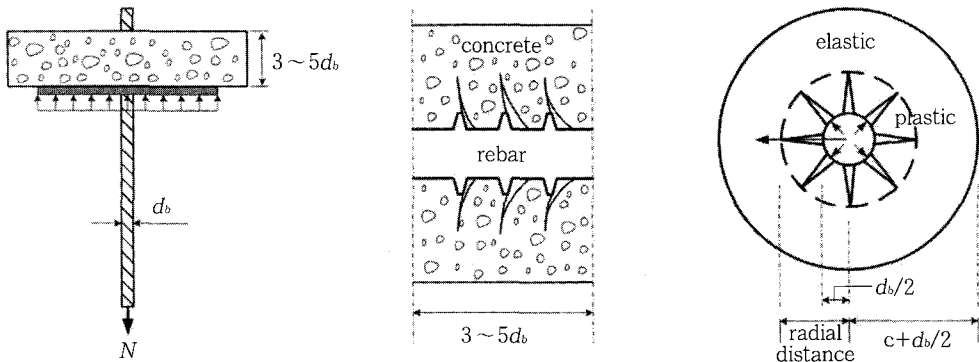
## 1. 서 론

철근과 콘크리트 사이 경계면에서 부착응력은 많은 변수에 따라 변하는 복잡한 현상 중의 하나이다. 지금까지 주로 많이 적용하는 접근방식은 가장 단순하게 이상화한 것으로 철근 매입길이에 등분포로 작용하는 전단응력으로 가정하는 방법이다. 그러나 철근의 매입길이가 비교적 길면 길이방향 부착응력의 분포는 콘크리트 피복두께, 콘크리트 강도 및 철근 직경에 따라 달라질 뿐만 아니라, 매입길이에 따라 달라진다.

이러한 이유 때문에 현재까지 부착에 관한 대부분의 연구는 철근의 매입길이가 짧으면 길이방향의 부착응력은 거의 등분포 상태로 된다는 이론에 근거하여 <그림-1a>와 같이 철근의 매입길이가 비교적 짧

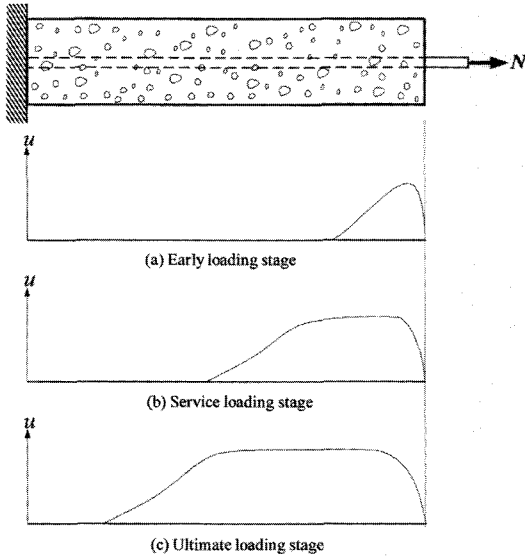
은 시험체를 이용하여 수행하였다. 이러한 연구의 대표적인 것은 Tepfers(1979)가 제안한 부분 균열된 두꺼운 원통 가설이다. 이 가설은 <그림-1b, 1c>에 나타난 것과 같이 내부에 부분적으로 균열된 콘크리트와 철근을 외부의 비균열 콘크리트의 구속력이 쪼갠응력에 저항한다는 부분소성가정(Partial Plastic Assumption)으로서, 이때 철근 마디의 췌기 작용(Wedging Action) 각  $\theta$ 를  $45^\circ$ 로 간주하였다.

그러나 철근의 매입길이가 비교적 길면 길이방향 부착응력 분포는 콘크리트 피복두께, 콘크리트 강도 및 철근 직경에 따라 달라질 뿐만 아니라, 매입길이에 따라서도 변화한다. 또한, 철근의 매입길이가 길면, 앞에서 서술한 경우와 다르게 부착응력의 분포는 작용하중 크기에 따라서 변화하는데, <그림-2>에 보인 바와 같이 초기 하중단계에서는 최대 부착



(a) Specimen geometry (b) Longitudinal section with cracks (c) Cross-section indicating material state

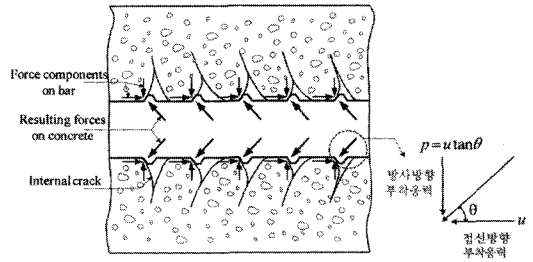
<그림-1> 매입길이가 짧은 시험체의 Local Bond Test



〈그림-2〉 철근 매입길이가 긴 시험체의 하중단계별 부착응력 분포

응력 지점이 하중단 근처에 발생하여 하중이 증가함에 따라 내부로 이동한다(Azizinamini, 1993). 이러한 경우 콘크리트의 피복이 충분히 두껍다면 철근의 뿔힘에 의해 극한상태에 도달할 것이며, 이때의 부착응력은 등분포 형태에 가까울 것이다. 반면에 피복이 매우 얇은 경우라면, 낮은 하중단계에서 하중단 근처에서 유발되는 최대 부착응력에 의해 유발된 쪼갬응력이 피복 콘크리트에 균열을 발생시킬 것이다. 위와 같은 관점에서 본다면, 실제의 인장 또는 휨부재의 인장부와 철근 겹침이음부의 피복 콘크리트 파괴강도는 짧은 매입길이를 갖는 실험체의 결과와는 다를 수 있다. 즉, Tepfer의 이론은 콘크리트 피복두께 방향만의 부분소성 개념을 적용한 것으로, 철근 길이방향의 소성 정도와 하중단계별로 다른 응력분포 형태를 반영하지 않는 것이다.

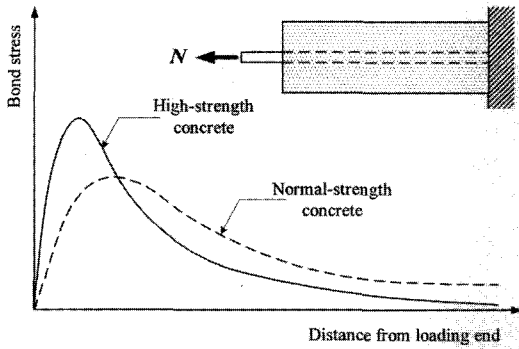
철근과 콘크리트 사이의 부착저항은 초기 하중단계에는 접촉과 마찰이 존재하지만 약간만 하중이 증가하면 이러한 저항력은 순간 상실되고, 〈그림-3〉에 나타난 것처럼 철근마디의 기계적 쪼기작용(wedging action)에 의해 철근의 뿔힘에 저항하게 된



〈그림-3〉 부착 전달 기구

다. 이 부착 저항력은 같은 크기의 반대 방향 지압력으로 콘크리트에 작용하게 되는데, 〈그림-3〉에 나타난 것과 같이 경계면에 대해 일정한 각  $\theta$ 를 갖고 있다. 따라서 이 지압력은 길이방향 부착응력  $u$ 와 방사방향 압력  $p$ 의 성분으로 분리되어 콘크리트에 작용하고 서로 다른 형태의 균열을 발생시킨다. 즉, 철근으로부터 전달되는 축력은 부착응력  $u$ 에 의해 콘크리트에 축력의 일부를 전달하여 횡방향균열을 발생시키며, 지압응력  $p$ 는 철근을 따라 쪼갬균열을 발생시킨다. 만약 부착응력의 크기 및 길이방향 분포 등의 부착특성이 다르다면, 인장부재의 균열거동이 변할 것이다.

부착에 관한 여러 연구 결과(Azizinamini, 1993 ; Hungspreug, 1981)에 의하면 고강도 콘크리트일수록 최대 부착응력이 증가하며 하중단 쪽으로 집중하는 현상이 나타난다고 알려져 있다. 이러한 거동을 탄성이론으로 살펴보면, 콘크리트의 탄성계수는 강도의 함수인 반면에 철근의 탄성계수는 일정하기 때문에, 철근과 콘크리트로 구성된 합성구조계의 응력장은 콘크리트 강도에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 더욱이 고강도 콘크리트일수록 재료적 취성이 증가하기 때문에 높은 하중단계에서 응력재분배 능력이 감소한다. 이러한 고강도 콘크리트의 응력집중현상의 증가와 응력재분배 기능의 감소는 인장 부재에서 하중의 증가에 따라 연속적으로 발생하는 균열의 간격이 변화하며, 전체적인 유효강성이 달라질 것이다. 본 연구는 앞에서 언급한 문제를 조사하기 위한 것으로서, 〈그림-5〉와 같은 매입길이가 상대

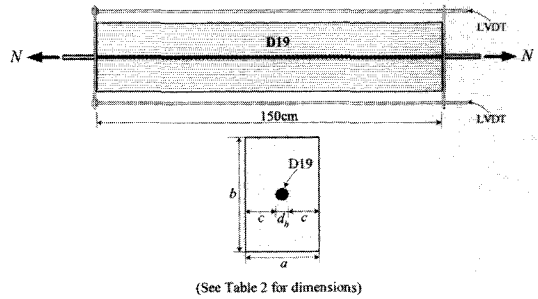


〈그림-4〉 콘크리트 강도에 따른 부착응력 분포 (Pullout Test)

적으로 긴 직접인장시험체를 콘크리트 강도와 피복 두께에 대한 철근직경의 비( $c/d_b$ )를 주 변수로 하여 각 변수별로 2개씩 총 36개를 제작하여 인장시험을 수행하였다. 그리고, 이 실험으로 구한 결과를 이용하여 하중 증가에 따른 균열거동과 균열간격을 분석하고, 콘크리트 강도에 따른 부착특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험

본 연구에서 사용된 시험체는 〈그림-5〉와 같이 150cm 길이의 직접인장시험체로, 1개의 D19 철근을 단면의 중심에 배치시켰다. 모든 시험체는 단면적( $A_c \approx 230\text{cm}^2$ )과 철근비( $\rho = 0.0124$ )를 일정하게 유지하면서 피복두께를 변화시키기 위해 변장비가 다른 직사각형 형태로 하여  $c/d_b$ 가 1.0에서 3.5까지



〈그림-5〉 시험체 제원

0.5씩 증가되도록 단면을 결정하였다.

콘크리트는 〈표-1〉과 같은 배합을 적용하여서 보통강도 콘크리트(NSC, 25MPa), 중간강도 콘크리트(MSC, 60MPa) 및 고강도 콘크리트(HSC, 80MPa)의 3종류로 하여 〈표-2〉에 정리한 것과 같이 총 36개의 시험체를 제작하였다. 양생 중에 발생하는 건조수축량을 줄이기 위하여 타설 후 거푸집 탈형까지 3일 동안은 습윤양생을 하였고, 그후부터 시험 전까지의 약 4주에서 6주까지 수증양생을 하였다.

하중은 변위제어방식을 적용하였으며, 시험체 양단 사이의 길이방향 신장량은 〈그림-5〉에 나타낸 바와 같이 인장시험체의 양쪽 하중단에 철근과 같이 거동을 할 수 있는 변위계 지지판 설치용 클램프를 부착한 후에 4개의 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하고, 그 평균값을 이용하여 하중-변위 관계를 조사하였다. 각 하중단계마다 발생한 균열을 기록하여 전체적인 균열거동을 파악하였다.

〈표-1〉 콘크리트 배합설계

Design Strength (MPa)	W/C	S/A (%)	Slump (cm)	Unit Weight ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				Admixture ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		Test Strength (MPa)
				Cement	Water	Sand	Gravel	S.F	M-150	
25	0.60	45	15	385	229	810	991	0	0	25.4
60	0.25	37	15	550	138	662	1105	0	11	60.7
88	0.20	38	15	650	153	578	950	98	13	80.4

Note) 1) SF : Silica Fume, M-150 : 국내 D사의 고성능 감수제(Mighty 150)

2) M-150 : 시멘트량의 2.0%, 3) Silica Fume : 순수 Silica Fume 기준으로 시멘트량의 15%

〈표-2〉 시험체 제원 및 실험결과

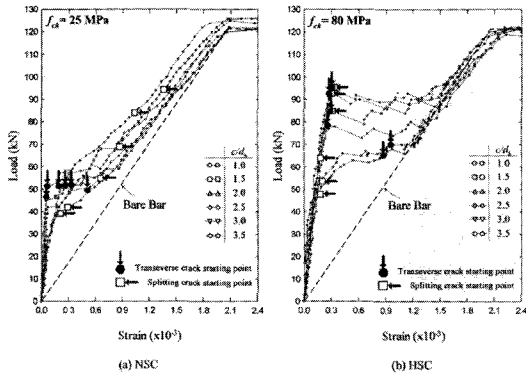
Specimen	Cover Thickness Ratio ( $c/d_s$ )	Cross Sectional Dimensions $a \times b$ (mm)	Measured Concrete Strength		Initial Cracking Load		Number of Transverse Crack (each)	Average Crack Spacing (cm)	Length of Splitting Crack cm(%)		
			Compressive Strength $f_{ca}$ (MPa)	Tensile Strength $f_{ct}$ (MPa)	Transverse Crack $N_{tr}$ (kN)	Splitting Crack $N_{sp}$ (kN)					
N 10-A	1.0	60 × 385	25.4	1.96	55	42	7	18.8	65(43)		
N 10-B					54	36	10	13.6	69(46)		
N 15-A	1.0	80 × 290			55	39	8	16.7	72(48)		
N 15-B					46	46	12	11.5	81(54)		
N 20-A	2.0	100 × 230			51	53	10	13.6	76(51)		
N 20-B					48	62	9	15.0	59(39)		
N 25-A	2.5	115 × 200			52	68	7	18.8	51(34)		
N 25-B					47	84	9	15.0	29(19)		
N 30-A	3.0	135 × 170			51	84	6	21.4	35(23)		
N 30-B					52	86	5	25.0	26(17)		
N 35-A	3.5	150 × 155			45	93	4	30.0	5(3)		
N 35-B					50	93	6	21.4	18(12)		
M 10-A	1.0	60 × 385			60.7	3.34	60	41	11	12.5	110(73)
M 15-A	1.5	80 × 290					76	46	12	11.5	101(67)
M 15-B							75	37	15	9.4	116(77)
M 20-A	2.0	100 × 230					62	42	14	10.0	77(51)
M 20-B							71	46	14	10.0	88(59)
M 25-A	2.5	115 × 200					73	69	11	12.5	84(56)
M 25-B			81	64			14	10.0	68(45)		
M 30-A	3.0	135 × 170	71	77			13	10.7	76(51)		
M 30-B			79	80			9	15.0	68(45)		
M 35-A	3.5	150 × 155	77	85			10	13.6	66(44)		
M 35-B			77	84			8	16.7	54(36)		
H 10-A	1.0	60 × 385	80.4	3.53			68	50	11	12.5	102(68)
H 10-B							73	44	14	10.0	117(78)
H 15-A	1.5	80 × 290					71	54	16	8.8	100(67)
H 15-B							73	48	16	8.8	107(72)
H 20-A	2.0	100 × 230					83	64	15	9.4	106(71)
H 20-B							81	64	16	8.8	110(73)
H 25-A	2.5	115 × 200					86	86	12	11.5	85(53)
H 25-B					81	72	14	10.0	90(60)		
H 30-A	3.0	135 × 170			94	94	12	11.5	47(31)		
H 30-B					94	94	9	15.0	50(33)		
H 35-A	3.5	150 × 155			94	94	12	11.5	38(25)		
H 35-B					97	97	13	10.7	37(25)		

Note) In all specimens, a D19 was placed at the center of the section( $f_c=430\text{MPa}$ ,  $\rho=0.0124$ )

### 3. 실험 결과 및 분석

35개의 직접인장실험에서 얻어진 횡방향균열 및

조깅균열 발생하중, 균열간격 및 조깅균열 분포율 등을 〈표-2〉에 정리하고, 하중-변형률 관계를 NSC 와 HSC로 구분하여 〈그림-6〉에 나타내었다.

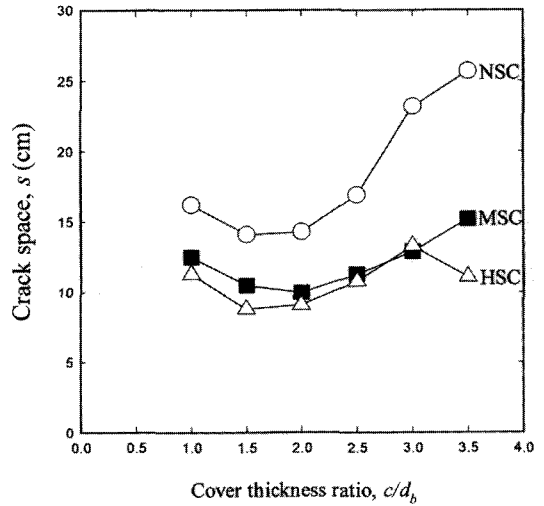


〈그림-6〉 콘크리트 강도에 따른 하중-변형률 곡선

〈표-2〉에 정리된 실험결과를 살펴보면, 인장시험체의 쪼갬균열과 횡방향균열은 모두 인장균열이기 때문에 그 발생하중은 콘크리트 인장강도에 비례하여야 함에도 불구하고, 〈그림-7〉에 나타난 것과 같이 횡방향균열하중  $N_{tr}$ 은 인장강도에 비례하여 증가하는데 반해, 쪼갬균열하중  $N_{sp}$ 는 콘크리트 강도의 증가와는 상관없이 일정하다.

또한 고강도 콘크리트일수록 횡방향 균열간격이 작아지고, 철근과 콘크리트의 부착을 제거하는데 중요한 영향을 주는 쪼갬균열의 분포비율이 훨씬 크다는 결과를 확인할 수 있다.

이러한 균열거동(횡방향균열하중, 쪼갬균열하중, 균열간격)의 차이를 분석한다면 콘크리트 강도변화

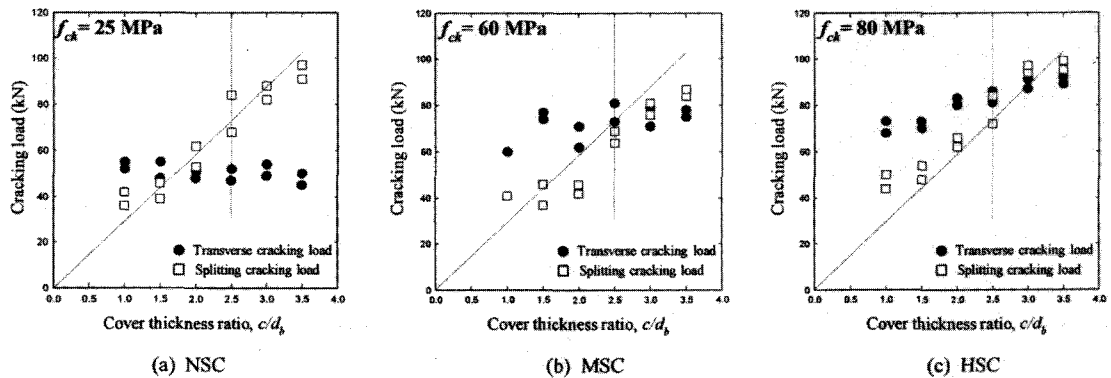


〈그림-8〉 평균균열 간격

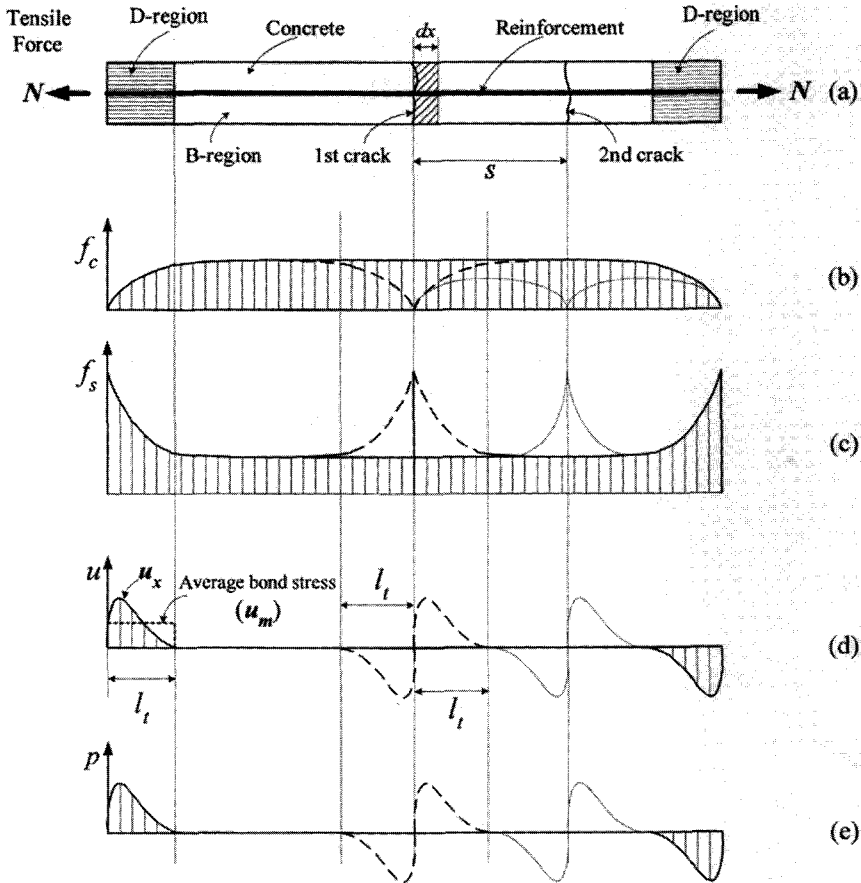
에 따른 부착특성의 차이를 상대적으로 규명할 수 있을 것이다.

### 가. 횡방향균열강도 분석

〈그림-9a〉와 같은 각형 인장 부재에 축인장력을 작용시키면, 초기 하중단계인 비균열 단계에서는 부재의 양단 일부 구간(D-구간: 철근과 콘크리트의 변형률이 변화하는 응력교란구간)을 제외한 전구간(B-구간: 철근과 콘크리트의 변형률이 동일한 응력



〈그림-7〉 횡방향균열 및 쪼갬균열 발생하중



(a) 콘크리트 응력 (b) 철근 응력 (c) 부착응력 (d) 방방향 응력

<그림-9> 인장시험체의 철근과 콘크리트에 발생하는 응력 및 부착응력 분포

연속 구간)의 철근과 콘크리트는 완전부착에 의해 동일한 인장변형률을 갖게 되며, 탄성환산단면적과 콘크리트 탄성계수  $E_c$ 를 갖는 인장재로 간주하여 다룬다(<그림-9b, 9c)의 굵은 실선). 하중이 증가하면, 어떤 순간에 콘크리트의 응력이 콘크리트 인장 강도  $f_{ct}$ 에 도달하여 첫 균열이 발생한다(<그림-9b)의 굵은 점선).

이때 균열면에서의 콘크리트 응력  $f_c=0$ 이 되며, 모든 작용인장력  $N$ 은 철근이 담당하게 된다. <그림-9c)의 굵은 점선으로 나타낸 것과 같이 균열면의 양 근접구간은 부착에 의해 철근 인장력의 일부

가 콘크리트에 전달되는 D-구간이 형성된다. 이 D-구간의 길이, 즉 균열에 의해 잃어버린 콘크리트 인장응력이 완전히 회복되는 전달길이(transfer length :  $l_t$ )는 부착특성에 따라 다르다.

실제로 균열과 균열 사이의 철근 표면의 부착응력 분포는 비선형으로, 정확하게 파악 한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이러한 복잡한 부착특성 중에서 횡방향균열에 영향을 주는 부착응력은 정확한 분포 상태가 아니고 단지 철근의 전달길이 내에서 부착을 통해 콘크리트로 전달된 총 인장력  $N_c$ 이기 때문에, 균열면에서  $l$ 만큼 떨어진 단면의  $N_c$ 가 다

시 콘크리트의 인장균열 발생하중에 도달하여 새로운 횡방향균열 발생이 가능하게 된다. 이 새로운 균열 발생가능 단면의 인장응력 분포상태는 하중단계와 피복두께 등에 따라 전단지연(shear lag) 효과가 다르기 때문에 복잡한 형태의 비선형 형태를 갖고 있다.

그러나 비교적 얇은 피복두께에서는 등분포 응력상태로 가정할 수 있으며, 이 가정은 현행의 많은 설계식에 적용되고 있다. 따라서 이러한 가정에서 콘크리트 인장시험체의 횡방향균열 발생 순간의 상태를 평형조건으로 표현하면 다음과 같다.

$$A_c f_{ct} = \pi d_b \int_0^h u_x dx \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $A_c$ 는 콘크리트 단면적이고,  $d_b$ 는 철근 직경이며,  $u_x$ 는 전단길이 방향으로 변하는 부착응력이다. 또한 이러한 상태의 횡방향균열하중  $N_{tr}$ 은

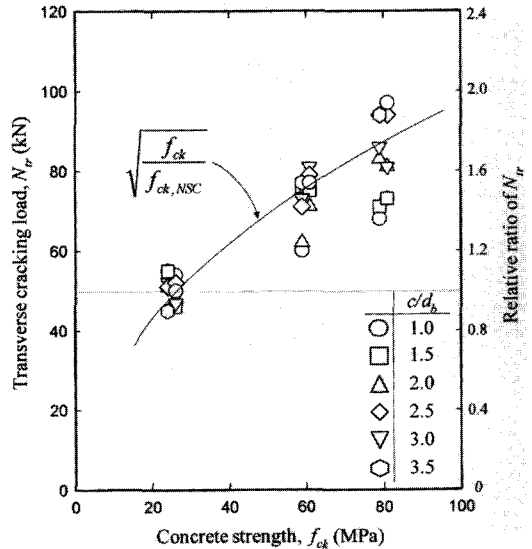
$$N_{tr} = A_c f_{ct}(1+n\rho) \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $n$ 은  $E_s/E_c$ 로 정의된 탄성계수비이고,  $\rho$ 는 철근비이다.

본 연구에서 수행한 실험에서 측정된 횡방향균열하중을 <그림-10>에 콘크리트 강도 함수로 나타낸 결과를 살펴보면, 고강도 콘크리트일수록 인장강도가 커지기 때문에  $N_{tr}$ 은 증가하고 있다. 그 증가율은 ACI(ACI-318, 1999)의 제곱근 압축강도 증가율에 만족할 만큼 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

균열과 균열사이의 철근 표면의 실제 부착응력분포는 비선형으로, 정확하게 파악한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 어떤 단순화 또는 이상화가 필요하게 되는데, 여기서는 D-구간에서 부착응력의 크기가 일정하다는 평균부착응력 개념을 적용한다면,  $l_t$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다(<그림-9d> 참조).

$$l_t = \frac{1}{u_m} \int_0^h u_x dx \dots\dots\dots (3)$$



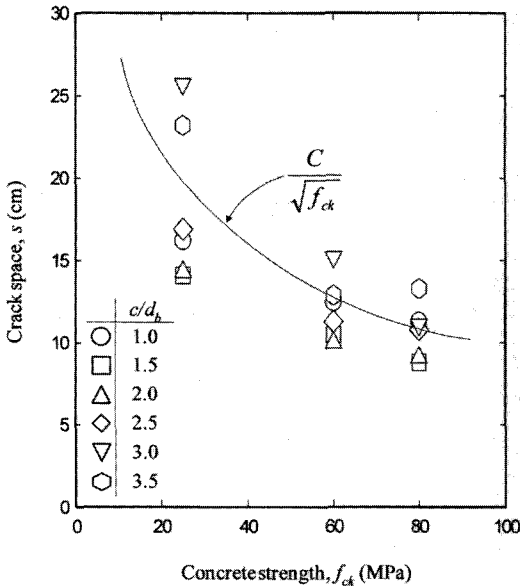
<그림-10> 콘크리트 강도에 따른 횡방향균열 발생하중

여기서  $u_m$ 은 전단길이내의 평균부착응력이다. 이러한 평균부착응력 개념을 적용할 때의 횡방향균열하중  $N_{tr}$ 은 식 (1), (2) 및 (3)의 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{tr} = \pi d_b(1+n\rho) u_m l_t \dots\dots\dots (4)$$

인장부재의 다른 조건을 동일하게 하고 콘크리트 강도만을 변화시켰을 경우에 식 (4)를 적용하여  $N_{tr}$ 의 변화를 살펴보면, 영향을 줄 수 있는 변수는  $n$ ,  $u_m$ 과  $l_t$ 이다. 이 중에서  $n$ 은 현실적인 철근비인 0.005 ~ 0.02에서는 불과 약 5퍼센트 미만의 차이가 발생하기 때문에 생략할 수 있다. 따라서  $N_{tr}$ 에 영향을 주는 주요 변수는  $u_m l_t$ 가 되는데, 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 수행한 실험 결과에 의하면  $N_{tr}$ 은 식 (2)의 표현대로 콘크리트 인장강도의 변화율과 같았다. 이러한 결과는 다음 식과 같은 조건이 항상 성립된다고 할 수 있다.

$$\left( \frac{u_m l_t}{\sqrt{f_{ck}}} \right)_{NSC} = \left( \frac{u_m l_t}{\sqrt{f_{ck}}} \right)_{HSC} \dots\dots\dots (5)$$



〈그림-11〉 콘크리트 강도에 따른 평균균열 간격

인장부재에 변형을 더욱 증가시키면 점차적으로 균열이 발생하게 되는데, 전 인장부재에 D-구간이 서로 중첩될 때까지 계속해서 균열이 발생할 것이다. 위와 같은 논리로 판단한다면, 가장 짧은 균열 간격은  $l$ 가 될 것이며, 가장 긴 간격은  $2l$ 가 된다고 생각할 수 있다. 본 연구의 실험에서 관찰된 균열간격(〈표-2〉 참조)을 〈그림-11〉에 콘크리트 강도 함수로 나타냈는데, 고강도 콘크리트일수록 균열간격이 현저히 작아지고 있다는 것을 알 수 있다.

각 시험체의 균열간격을 통계분석 해보면 〈그림-11〉에 나타난 바와 같이 모든 피복두께에서 콘크리트 강도에 따른 균열간격  $s$ 는  $(f_{ck})^{-0.5}$ 에 비례관계가 있다고 할 수 있다. 따라서 앞에서 언급한 전달길이  $l$ 는 균열간격  $s$ 에 직접 비례하기 때문에 고강도 콘크리트의  $l$ 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$l_{HSC} = \left( \frac{\sqrt{f_{ck, NSC}}}{\sqrt{f_{ck, HSC}}} \right) l_{NSC} \dots\dots\dots (6)$$

실험 결과인 이 식을 식 (5)에 대입하여 정리하면, 모든 조건이 동일하고 콘크리트 강도만이 변화

할 경우의 평균부착응력은 항상 다음과 같은 조건이 성립된다고 할 수 있다.

$$\left( \frac{U_m}{f_{ck}} \right)_{NSC} = \left( \frac{U_m}{f_{ck}} \right)_{HSC} \dots\dots\dots (7)$$

이 식은 콘크리트 강도가 증가하면 전달길이내의 평균부착응력은 콘크리트 압축강도에 직접 비례하여 증가한다는 의미가 된다. 이러한 결과는 현재의 구조설계 기준에서 채택되고 있는 개념에 의한 결과와는 크게 다르다. 지금까지 평균부착강도  $u_m$ 은 콘크리트 인장강도  $f_{ct}$ (또는  $\sqrt{f_{ck}}$ )에 직접 비례한다고 알려져 있다.

나. 쪼갬균열강도 분석

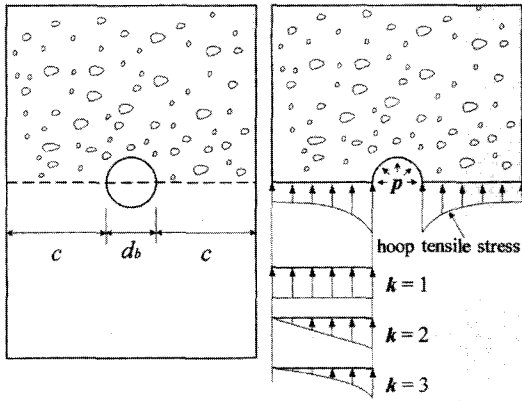
〈그림-9a〉에 보인 각형 인장부재 중의 길이  $dx$ 를 갖는 한 단면요소는 〈그림-12a〉에 나타난 것처럼 직경  $d_b$ 인 철근 하나를 포함하고 순피복두께  $c$ 를 갖는다.

부재에 인장력이 작용하면 〈그림-3〉에 나타난 것과 같이 방사성분의 압력  $p$ 가 콘크리트에 작용하게 되어 피복 콘크리트에 환인장응력(hoop tensile stress)이 유발된다. 이러한 인장응력의 피복두께 방향분포는 여러 요인에 따라 달라지는 상당히 복잡한 형태일 것이다(〈그림-12b〉 참조). 만약 최대 인장응력이 콘크리트의 인장강도  $f_{ct}$ 와 같을 때 쪼갬 균열이 시작되어, 그후 약간의 하중 또는 변형이 증가하면 쪼갬균열은 순간 표면까지 발생한다. 이 순간의 상태를 평형조건으로 표현하면 다음과 같다.

$$pd_s dx = \frac{2}{k} cf_{ct} dx \dots\dots\dots (8)$$

여기서  $k$ 는 콘크리트 응력분포 형태에 따라 달라지며, 등분포이면  $k=1$ , 삼각형분포이면  $k=2$ 이고, 2차함수 형태이면  $k=3$ 이 된다. 〈그림-3〉에 나타난 것과 같이 압력  $p=u \tan \theta$ 로 표현할 수 있다. 그런데 쪼갬균열의 발생위치는 횡방향균열면 또는 하





(a) Section dimension (b) Concrete stress distribution

〈그림-12〉 쪼갬균열 발생 기구

중단에서부터 발생하여 순간 철근을 따라 발전되는 것으로 관찰되었다. 이것은 최대 부착응력  $u_{max}$ 의 위치에서 시작하여 전달길이 구간으로 순간 확장된다고 할 수 있기 때문에 전달길이내의 평균부착응력 개념을 적용할 수 있다고 하겠다. 따라서 쪼갬균열 발생직전의 전달길이 구간내의 평균압력  $p_m$ 은  $u_m \tan\theta$ 와 동일하며, 이 값을 식 (8)에 대입하여 정리하면,

$$u_m \tan\theta = \frac{2}{k} \left( \frac{c}{d_b} \right) f_{ct} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 쪼갬균열 발생하중을  $N_{sp}$ 라 하고, 그 순간의 평균부착응력  $u_m$ 은

$$u_m = \frac{N_{sp}}{\pi d_b l} \dots\dots\dots (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하여 쪼갬균열하중을 구하면,

$$N_{sp} = \left( \frac{2\pi}{k \tan\theta} \right) c l f_{ct} \dots\dots\dots (11)$$

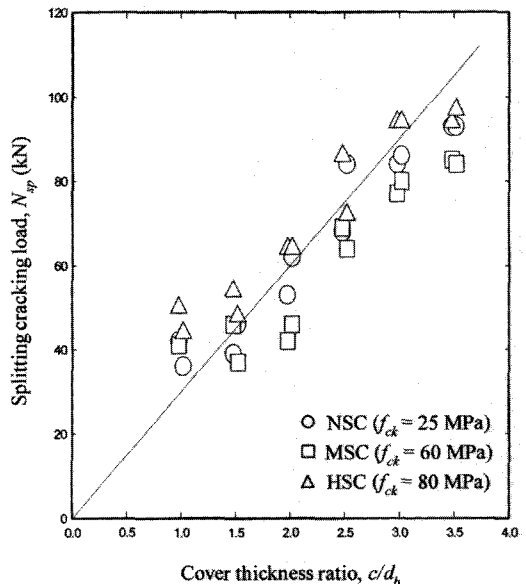
이식 우변의 괄호항을 상수로 취급한다면(Tepfer의 이론대로라 하고, 현실적인  $c/d_b$ 에서  $k$ 값은 일

정하다고 가정),  $N_{sp}$ 에 영향을 주는 주요변수는 피복두께  $c$ , 전달길이  $l$  그리고 콘크리트 인장강도라는 것을 알 수 있다.

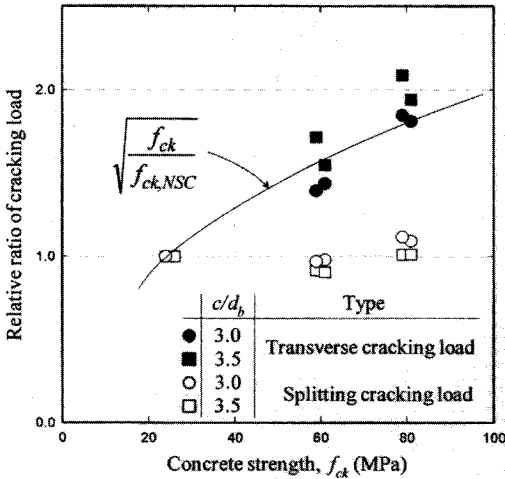
본 연구에서 수행한 실험에서 측정된  $N_{sp}$ 를 피복두께의 함수로 〈그림-4〉와 〈그림-13〉에 나타냈다. 이 결과는 식 (11)에 의한 예측대로 피복두께에 비례하여  $N_{sp}$ 가 증가하고 있다. 다만, 두꺼운 피복에서 그 증가율이 약간 둔해지는 것은 두꺼운 피복일수록 쪼갬인장응력 분포도가 불균등해지는 경향이 있어서  $k$ 값이 약간 증가하기 때문일 것이다.

두꺼운 피복을 갖는 시험체에서 측정된  $N_{tr}$ 과  $N_{sp}$ 의 상대적 증가율을 콘크리트 압축 강도의 함수로 〈그림-14〉에 나타내었는데, 콘크리트 압축강도 증가에 따른 두 종류의 균열하중의 변화 경향이 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 횡방향균열하중  $N_{tr}$ 은  $f_{ck}$ 의 증가에 따라 증가하는데 그 증가율은 통상의 인장강도 증가율인  $\sqrt{f_{ck}}$ 에 대략 일치하고 있다. 그러나 쪼갬균열하중  $N_{sp}$ 는  $f_{ck}$ 의 변화와는 상관없이 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 상당히 새로운 것으로서 현재의 구



〈그림-13〉 피복두께에 따른 쪼갬균열 발생하중



〈그림-14〉 횡방향균열 및 쪼갬균열 발생하중의 콘크리트 강도에 따른 상대적 증가율

조설계기준의 접근 방식과는 크게 다르다고 할 수 있다. 왜냐하면, 콘크리트 압축강도가 증가하면 콘크리트 쪼갬인장강도  $f_{sp}$ 도 따라서 증가하기 때문에 당연히  $N_{sp}$ 도 증가한다고 생각하기 때문이다.

이러한 개념과는 상반되게 실험 결과가 산출된 원인을 식 (11)을 이용해 설명한다면, 다음과 같은 조건이 성립되어야만 한다.

$$(lf_{ct})_{nsc} = (lf_{ct})_{hsc} \dots\dots\dots (12)$$

식 (12)의 의미는  $f_{ct}$ 가 통상대로  $(f_{ck})^{0.5}$ 에 비례한다면, 전달길이  $l$ 는  $(f_{ck})^{-0.5}$ 에 비례하여야만 한다는 의미가 된다. 즉, 전달길이는 콘크리트 압축강도의 제곱근에 역비례하여 짧아진다는 의미가 된다. 이 사실은 실험에서 측정된 균열간격의 경향인 식 (6)과 동일한 의미가 되며, 이것을 재확인하는 결과라고 하겠다.

### 다. 콘크리트 강도 변화에 따른 부착특성 모델링

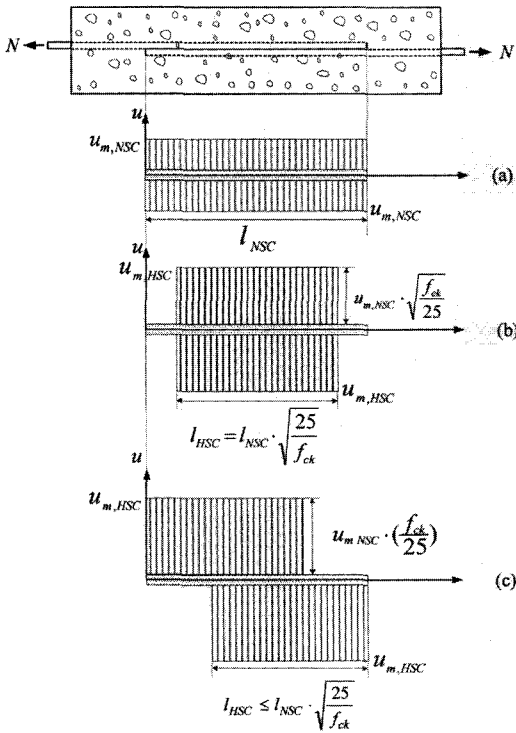
지금까지 기술한 직접인장시험체의 횡방향균열강

도  $N_{tr}$ 와 그 균열간격  $s$  그리고 쪼갬균열강도  $N_{sp}$ 를 이용하여 콘크리트 강도 변화에 따른 부착특성의 상대적 변화 경향을 추론하였다. 이 추론 과정에서 현행의 구조설계 기준에서 적용하고 있는 소성이론 (plastic theory ; 철근 매입깊이에 따라 부착응력이 등분포한다는 평균부착응력 개념)을 적용하였다.

이러한 분석 결과로, 식 (7)과 식 (12)의 두 조건이 산출되었다. 즉, 소성이론을 바탕으로 콘크리트 압축강도 증가에 따른,

- (1) 평균부착응력  $u_m$ 의 크기는 콘크리트 압축강도  $f_{ck}$ 에 비례하여 증가하며,
- (2) 전달길이(또는 균열간격  $s$ )는 콘크리트 인장강도  $f_{ct}$ 에 반비례하여 감소한다.

이 추론 결과를 도해적으로 표현하면 〈그림-15〉와 같이 나타낼 수 있다. 일반적으로 사용되고 있는 보통강도 콘크리트는 20MPa ~ 30MPa 범위라고 할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 현실적인 정량화를 위해 25MPa를 보통강도라고 정하고, 콘크리트 인장강도  $f_{ct}$ 는 압축강도  $f_{ck}$ 의 제곱근 법칙을 따른다고 가정하면, 〈그림-15c〉에 나타난 것과 같이 사용하중상태에서 철근과 고강도 콘크리트 경계면에 유발되는 평균부착응력은 계수  $f_{ck}/25$ 에 비례하여 증가하고, 전달길이(또는 균열간격)은  $(25/f_{ck})^{0.5}$ 에 비례하여 줄어든다고 할 수 있다. 현행의 콘크리트 구조설계기준(건설교통부, 1999)의 철근의 정착 및 겹침이음길이를 산정할 때 적용하는 설계식에서는 콘크리트 강도를  $\sqrt{f_{ck}}$  항으로 반영하고 있다. 이 설계식은 일반적인 부착과파가 뿔힘 또는 쪼개짐 형태를 갖는 콘크리트 인장과파의 일종이기 때문에, 콘크리트 강도가 증가하면 인장강도가 증가하므로 그 만큼 정착길이를 감소시킬 수 있다는 이론적 배경에서 설정된 것이며, 이것은 〈그림-15b〉에 나타난 것과 같이 보통강도 콘크리트에서와 같이 동일한 철근길이에서의 평균부착 응력분포에 해당하는 개념이다. 그러나 이러한 근거는 본 연구에서 수행한 실험결과를 설명하는데 한계가 있다. 즉, 횡방향균열과 쪼갬균열은 모두 인장균열이므로 이들 균열발생하중은 콘



〈그림-15〉 등분포부착응력 모델

크리트 인장강도 증가에 비례하여 증가하여야 함에도 불구하고, 〈그림-14〉에 나타난 본 실험 결과에 의하면 횡방향균열하중은 인장강도에 비례하여 증가하지만 쪼갬균열 하중은 인장강도의 증가와는 상관없이 일정하게 나타났다.

이러한 결과로부터 이형철근의 부착 저항은 본질적으로 철근의 마다가 주변 콘크리트에 지압으로 작용하는 저항 메커니즘에 바탕을 두고 있다고 결론 지을 수 있다.

따라서 쪼갬 균열이 방지되어 있는 경우에는 부착 강도가 콘크리트 압축강도에 비례하여 증가할 것이며, 이로 인해 균열면의 철근인장력이 효율적으로 콘크리트에 전달되어 전달길이(또는 균열간격)가 짧아지기 때문에 정착길이는  $\sqrt{f_{ck}}$  항 보다는  $f_{ck}$  항으

로 반영하여야 할 것이다. 반면에 쪼갬 균열이 방지되어 있지 않는 경우에는 지압저항 메커니즘에 의해 유발되는 방사방향 압력  $p$ 가  $f_{ck}$  항에 비례하여 증가하기 때문에 쪼갬균열이 훨씬 쉽게 발생하게 된다.

위와 같은 결과에 의하면, 현행 구조설계기준의 정착길기와 겹침길이를 계산하는데 적용하는 철근의 매입길이에서 등분포 부착응력 가정은 고강도 콘크리트에서 적용하여서는 안된다고 할 수 있다. 고강도 콘크리트에서는 등분포 부착응력 분포가정을 적용할 수 있는 어떤 한계길이가 존재하며, 그 이상의 철근 매입길이에서는 이 등분포 가정이 적용되지 않는다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

직접인장실험에서 관찰된 횡방향균열강도와 그 균열간격 그리고 쪼갬균열강도의 변화를 분석하여 콘크리트 강도 변화에 따른 부착특성의 상대적 경향을 추론하였다. 이 추론 과정에서 현행의 설계기준에서 적용하고 있는 소성가정(plastic assumption; 철근 매입 길이에 따라 부착응력이 등분포한다는 평균부착응력 개념)을 적용하였다. 이러한 분석 결과에 의해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 콘크리트 강도만을 변화시키고 다른 조건을 동일하게 했을 때, 평균부착응력  $u_m$ 의 크기는 콘크리트 압축강도  $f_{ck}$ 에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 콘크리트 강도가 증가할수록 횡방향균열 간격(또는 전달길이)는 콘크리트 인장강도  $f_{ct}$ 에 반비례하여 작아지는 것으로 나타났다.

(3) 위 두 결과는 현행 구조설계기준의 정착과 이음길이에 대한 접근방식 즉, 철근 매입길이에 부착응력이 등분포한다는 개념과는 차이가 있는 것으로서, 고강도 콘크리트에서는 등분포 부착응력 분포가정을 적용할 수 있는 어떤 한계길이가 존재하며, 그 이상의 철근 매입길이에서는 이 등분포 가정이 적용되지 않는다고 할 수 있다. ▲