

---

# 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 중요변수에 대한 실험연구

Experimental Examination of Influential Variables  
on Unbonded Tendon Stresses



임재형\*

Lim, Jae-Hyung



문정호\*\*

Moon, Jeong-Ho



이리형\*\*\*

Lee, Li-Hyung

---

## ABSTRACT

This paper describes an experimental study planned to examine the effects of important design variables which were used in the proposed equation by authors. Fourteen beams and slabs were designed with the variables, such as effective prestress, concrete strength, amount of tendons, amount of bonded reinforcements, loading type, and span/depth ratio. Then, deflections and tendon stresses were measured and compared according to the parametric variations of the selected variables. It was found that the tendon stress increment decreases as the level of effective prestress or the amount of unbonded tendons and bonded reinforcements increases. Also, the contributions of concrete strength, and loading type were observed to affect on the tendon stresses. However, the stress increments of unbonded tendon were minimal at high values of span/depth in contrast with the ACI code.

keywords : prestressed concrete, unbonded tendon, effective prestress, span/depth ratio, tendon stress

---

\* 정회원, (주) ALT 구조 이사

\*\* 정회원, 한남대학교 건축공학과 조교수

\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내  
주시면 1999년 8월 호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서론

본 연구와 관련한 이전의 연구<sup>(1)</sup>에서는 기존연구의 고찰과 해석적 연구를 통하여 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 변수들을 찾아내었고, 해석적 모델도 제안<sup>(2)</sup>하였다. 또한, 찾아낸 변수들이 비부착 긴장재의 극한응력에 미치는 영향의 정도도 분석<sup>(3)</sup>하였다. 그 결과, 현행의 ACI 기준과 같이 일부 특정변수의 사용 및 국부적인 적합조건(local compatibility)을 사용한 해석보다는 전체적인 적합조건(global compatibility)을 사용한 해석이 비부착 긴장재의 응력을 평가하는데 바람직하며, 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 중요변수는 유효프리스트레스, 콘크리트 강도, 긴장재 양, 일반철근 양, 스패/츄비, 작용하중의 형태임을 알았다.

따라서, 본 연구에서는 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 변수별 효과에 관한 해석적 연구<sup>(3)</sup>결과로부터 얻어진 중요변수 즉, 유효프리스트레스, 콘크리트 강도, 긴장재 양, 인장철근 양, 스패/츄비, 작용하중의 형태들을 적절히 조합하여 종합적으로 비부착 긴장재의 응력을 고찰할 수 있는 실험을 실시하였다. 그 결과로 본 연구자들에 의해 제안된 설계식의 타당성을 검증하며, 각 변수별 효과에 대하여서도 분석하였다.

# 2. 실험

## 2.1 실험체 계획 및 제작

연구대상 건물은 아파트 단지의 부속동인 지하 주차장으로, 1/2.5 크기로 모델링하였다. 실험체 수는 총 14개인데, 철근콘크리트 극한강도 설계 기준<sup>(4)</sup> (ACI 318-95<sup>(5)</sup>)와 동일)에 따라 설계하였다. 실험에 사용된 변수는 변수별 해석적 연구<sup>(3)</sup>를 통하여 분석한 결과, 유효프리스트레스( $f_{se}$ ), 콘크리트 강도( $f'_c$ ), 긴장재 양( $A_{ps}$ ), 인장철근 양( $A_s$ ), 스패/츄비( $L/d_p$ ), 작용하중 형태( $f$ ) 등으로 결정하였다.

구성된 실험체를 자세히 분류하여 보면, 기준 실험체 1개(A-1)와 유효프리스트레스( $f_{se}$ )를 변수로 한 실험체 2개(B-계열), 콘크리트 강도( $f'_c$ )

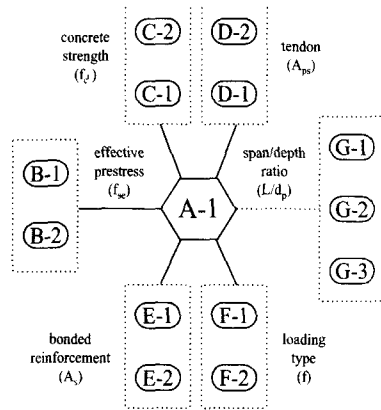


Fig. 1 Relationship of specimens

Table 1 Specimen list

Specimen	Loading type	$f_{se}$	$f'_c$ (MPa)	$\rho_p$	$\rho_s$	$L/d_p$	
A-1	4-point (Uniform)	$0.6f_{pu}$	23.4	0.00256	0.00242	17.5	
B-1		$0.7f_{pu}$	23.5				
B-2		$0.5f_{pu}$	23.5				
C-1		0.6 $f_{pu}$	38.4				0.00171
C-2			52.9				0.00341
D-1			23.5				0.00256
D-2			23.5				0.00485
E-1		2-point	0.6 $f_{pu}$				23.5
E-2	23.5			0.00216	30		
F-1	1-point	0.6 $f_{pu}$	23.5	0.00146	0.00216	45	
F-2							
G-1							
G-2	4-point (Uniform)	0.6 $f_{pu}$	23.5	0.00146	0.00216	45	
G-3							

\* NOTE : Tendon profile = Straight  
 $f_{pu}$  = 1860 MPa Grade  
 $f_y$  = 420 MPa Grade  
 $\phi 6$  = 0.1982 cm<sup>2</sup> (3-wire strand)  
 $D8$  = 0.50 cm<sup>2</sup> (Deformed bar)

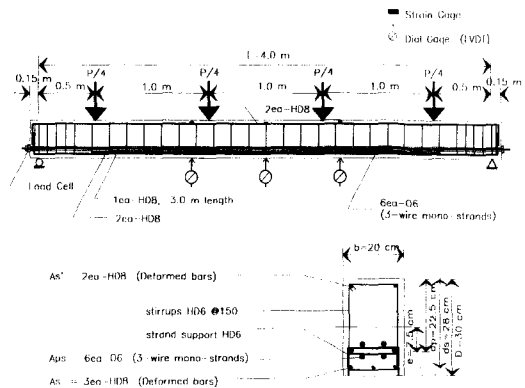


Fig. 2 Details of specimen(A-1)

를 변수로 한 실험체 2개(C-계열), 긴장재 양( $\rho_p$ )

을 변수로 한 실험체 2개(D-계열), 인장철근 양 ( $\rho_s$ )을 변수로 한 실험체 2개(E-계열), 작용하중의 형태를 변수로 한 실험체 2개(F-계열), 그리고 다른실험체와 독립적으로 스패ن/츄비( $L/d_p$ )를 변수로 한 실험체 3개(G-계열)이다. 이러한 실험체의 상호관계를 Fig. 1에 나타내었다.

실험체의 크기는 실험실 여건을 고려하여 스패를 4m로 하였다. 그리고, G-계열 실험체를 제외한 11개 실험체의 단면을 20x30cm의 장방형 단면으로 하였으며, G-계열 실험체는 폭이 60cm, 높이는 각각 12, 15, 25cm로 하였다. 실험체 일람을 Table 1에 나타내었고, 대표적인 실험체의 상세는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 실험체의 상세에는 철근과 긴장재에 실험과정 중 발생하는 응력의 분포를 알아보기 위한 Wire Strain Gage(이하 "WSG"라고 한다)의 부착위치를 표시하였고, 스패의 중앙부와 소성힌지 길이의 양끝단이라고 판단되는 지점에 부재의 변위를 알아보기 위한 다이알게이지(이하 "LVDT"라고 한다)의 설치위치를 표시하였다.

실험체 제작에 사용된 긴장재는 1가닥의 지름이 2.9mm인 2종 3연선(Low relaxation 3-wire strand)이다. 비부착긴장재용으로 사용되는 긴장재는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 PE관에 구리사와 긴장재가 공장에서 삽입되어 단일강연선(mono-strand) 제품으로 생산된 것이다.

긴장재에는 소정의 위치에 철근용 1mm-WSG를 부착하였는데, 부착방법은 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 WSG가 부착될 위치에 PE관을 길이 8cm로 절단하고, 긴장재의 표면을 사포로 표면처리한 후, WSG를 부착하고 방수용 페이스트로 도포하였다. 그리고, 내경이 PE관보다 1mm정도 큰 알루미늄관을 사용하여 실험시 긴장재의 이동을 원활하게 하면서 WSG가 손상을 받지 않도록 조치하였다.

## 2.2 재료시험

본 실험에 사용된 철근 및 콘크리트의 재료적 특성 및 강도를 알아보기 위하여 KS 규정에 따라 재료시험을 실시하였다. 긴장재는 2.9mm의 강연선이 3가닥으로 꼬아져 있기 때문에 철근의

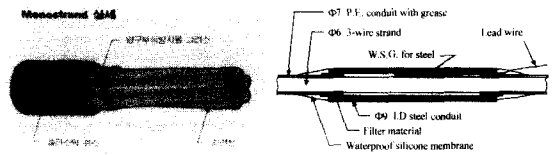


Fig. 3 Unbonded mono-strand

Fig. 4 Adhesion of WSG on tendon

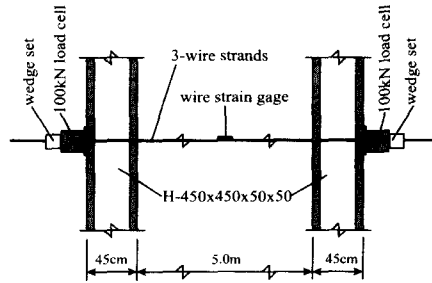


Fig. 5 Material property test of tendon

Table 2 Material characteristics of tendon

	Elastic Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Yield Strain ( $\times 10^{-6}$ )	Max. Stress (MPa)
3-wire strand	$1.88 \times 10^5$	1875.5	9976	2108.7

재료시험과 같이 실험을 실시하면 정확한 재료적인 특성을 알 수 없다. 그리고, Freymuth<sup>(6)</sup>에 의하면 긴장재의 재료적 특성, 특히 탄성계수는 시험방법, 시험장비, 제품의 종류, 제작회사에 따라  $\pm 2.5 \sim \pm 5.0\%$  정도의 오차가 발생할 수 있는 것으로 보고되어 있으므로 긴장재 제작사의 시험방법 및 외국문헌을 참고하여 기초실험을 실시하였다.

따라서 3가닥의 강연선이 꼬아져 만들어진 긴장재의 재료시험은 각각의 강연선이 동일한 응력을 부담할 수 있도록 재료시험을 실시하여야 하고, 이때 3가닥의 강연선이 각각 부담하는 응력과 변형을 측정하여 등가탄성계수로 환산하여야 한다.

이에 대한 시험으로 Fig. 5에서와 같이 긴장재를 가력프레임에 설치하고 긴장장치를 이용하여 재료시험을 실시하였다. Fig. 5에서와 같은 재료시험은 가력프레임의 양단에 로드셀을 설치하여 하중단계별 가력하중을 측정하였고, 이와 동시에 긴장재의 중앙부에서 3가닥의 강연선중에 1가닥

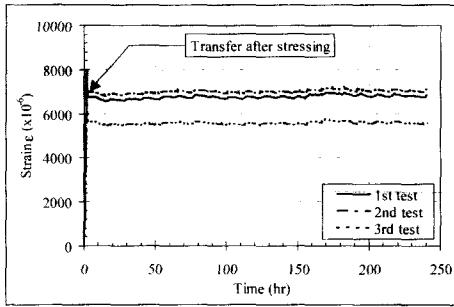


Fig. 6 Strain variation of tendon with time

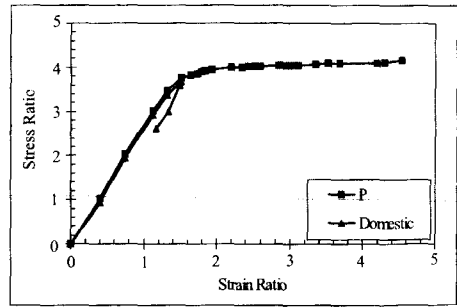


Fig. 8 Stress-strain curve of tendon

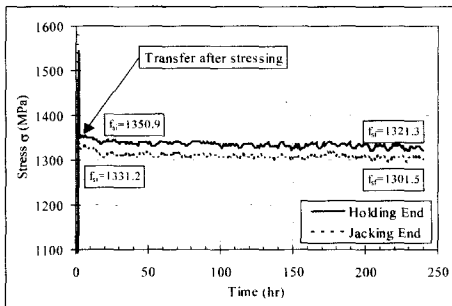


Fig. 7 Stress variation of tendon with time

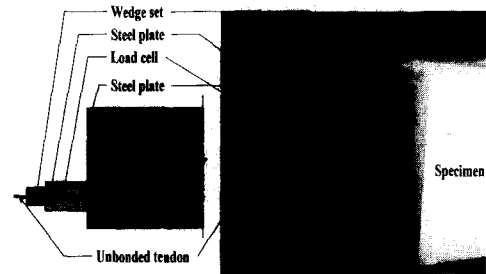


Fig. 9 Installation of load cell for measurement of stress

의 강연선에 WSG를 부착하여 하중단계별로 긴장재의 변형도를 측정하였다. Fig. 5에 의한 재료시험으로 긴장재의 탄성계수 및 그 외의 재료적인 특성을 파악하였고, 약 250시간동안 긴장재의 릴렉세이션 손실(relaxation loss)도 측정하였다.

긴장재는 항복강도 주위에서 항복강도가 정확하게 형성되지 않고 곡선모양으로 형성되기 때문에 항복강도를 결정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 긴장재의 항복강도를 결정하기 위하여 1.0% elongation 방법을 사용하였다. 긴장재의 탄성계수는 긴장재의 양단에 설치되어 있는 로드셀과 긴장재의 중앙부에 부착되어 있는 WSG의 값을 탄성범위내에서 가력하중 단계별로 측정하여 초기의 접선계수(tangent modulus)로 구하였고, 재료시험결과를 Table 2에 나타내었다.

또한, 본 실험에 사용된 긴장재의 프리스트레스에 의한 릴렉세이션 손실을 검토하기 위하여 재료적인 특성을 파악하는 재료시험을 실시한 후, 시간에 따른 프리스트레스 손실에 대한 재료시험을 실시하였는데, 최초의 긴장력은 약  $0.73f_{pu}$ 이

고, 정착 후에 긴장력은 약  $0.63f_{pu}$ 이며, 시험 경과시간은 약 250시간(약10일)이다. 시험을 실시한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에서 시간의 경과에 따른 변형도 변화와 응력도 변화에 대한 그래프로 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 3개의 시험편 모두에서 프리스트레스에 의한 릴렉세이션 손실은 거의 나타나지 않고 있으며, Fig. 7에 나타난 바와 같이 정착 후에 나타나는 긴장응력과 250시간 후의 긴장응력을 비교한 결과, 릴렉세이션 손실은 평균 약 2.2% 정도의 손실량을 나타내고 있다.

### 2.3 정착구 및 긴장장치

정착구는 긴장재가 소정의 긴장력을 유지할 수 있도록 하는 중요한 역할을 한다. 따라서 정착구에 대한 성능을 파악하기 위하여 국내에서 생산되는 약 10개회사의 정착구와 외국의 P사의 정착구를 구입하여 사용 긴장재가 보유하고 있는 재료적 특성을 충분히 발휘하는지를 검증하였다. 검증은 긴장재의 양단에 각각 국내산 정착구와 외국의 P사 제품을 사용하여 재료시험을 실시하

었는데, 재료시험결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 국내산 정착구는 긴장재가 보유하고 있는 인장응력에 도달하지 못하고 항복하중 근처에서 3가닥의 강선중 1가닥의 강선이 정착구와 만나는 부분에서 절단되는 파괴양상을 나타내었다. 그러나 P사에서 제작한 3연선용 정착구를 사용하여 긴장재의 인장시험을 실시한 결과, Fig. 8에서와 같이 사용긴장재가 보유하고 있는 항복응력을 지나 파단될 때까지 켜기가 맞물리는 위치에서 뿐 아니라 어느곳에서도 긴장재가 전혀 손상되지 않았다. 따라서 P사의 정착구를 사용하였다.

본 실험에 사용된 긴장장치는 긴장재에 가려지는 긴장력이 25kN이하이므로 60kN 용량의 수동펌프를 사용하였다. 그러나 본 실험에서는 사용빈도와 온도 등에 의해 변화되는 유압의 오차도 실험에 반영되지 않도록 하기 위하여 Fig. 9와 같이 주문제작한 로드셀을 실험체의 마구리에 정착구와 함께 설치하고, 긴장시부터 실험완료시까지 계속적으로 긴장재의 응력을 측정하였다.

## 2.4 실험방법

### 2.4.1 긴장방법

긴장재에 긴장력을 도입할 때, Fig. 10과 같이 스패에서 발생하는 마찰에 의한 긴장력의 손실에 대한 특성<sup>(7)</sup>도 고려하였다. 초기에는 긴장재에 부착된 WSG의 리드선이 끊어지지 않도록 양단부에서 반복적으로 긴장재가 10mm씩 늘어날 때까지 긴장하는 것으로 하였으며, 소정의 유효프리스트레스에 도달되었을 때는 로드셀과 긴장장치에서 측정된 긴장력의 값을 분석하였고, 정착후 손실될 긴장력을 고려하면서 긴장행위를 중단하였다. 긴장재에 가해지는 소정의 긴장력의 크기는 양단부에 각각 2개씩 설치되어 있는 긴장력 측정용 로드셀 값의 평균크기로 결정하였다.

### 2.4.2 하중가력방법

실험은 단순보에 대한 휨실험이므로 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 단순지지되어 있는 보의 상부에서 1000kN 용량의 복동식 오일잭으로 하중을 가력하고 오일잭에 부착되어 있는 1000kN 용량

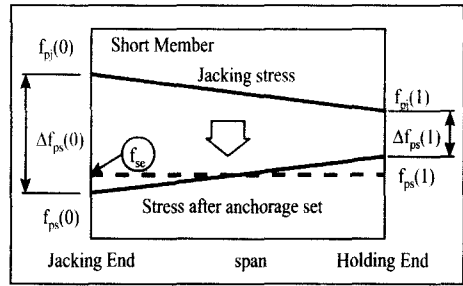


Fig. 10 Influence of anchorage set

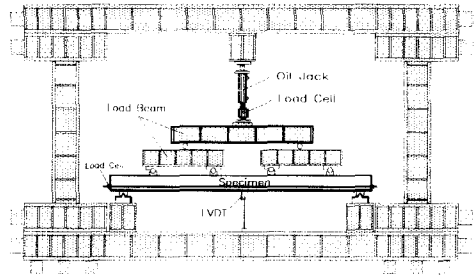


Fig. 11 Setting of specimen

의 로드셀로 가력하중의 크기를 측정하였다. 하중의 가력은 가력하중의 이력에 따라 실시하였다. 설치된 실험체의 안정화를 도모하고 비부착 긴장재에 도입되어 있는 유효프리스트레스의 안정화를 도모하기 위하여 예측된 균열하중의 60%에 해당하는 하중으로 초기에 2회 반복가력하였고, 이후 균열하중, 항복하중순으로 반복가력하였다. 항복하중이후에는 변위제어방식으로 중앙부 변위량이 25mm, 50mm, 75mm, 100mm 일때로 1회씩 순차적인 반복가력을 실시하였다.

## 2.5 실험결과 및 분석

### 2.5.1 균열 및 파괴상황

본 연구에서 실험된 실험체는 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 변형능력을 확보할 수 있는 방안으로 ACI 규준에서 규정하고 있는  $\phi M_n > 1.2M_{cr}$ 에 따라 계획하였다. Table 3에서도 알 수 있듯이, 균열하중에 대한 최대하중의 비가 대부분 2.0이상으로 나타나고 있기 때문에 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 실험체 설계는 적절한 것으로 판단되었다. 파괴형태를 살펴보면, 대부분의 실험체들에서 초기균열의 발생위치는 최대 모멘

Table 3 Experimental results

Specimen	$F_{se}$ (kN)	$F_{ps}$ (kN)	$\Delta F_{ps}$ (kN)	$P_{cr}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$\frac{P_{max}}{P_{cr}}$	$\delta_{max}$ (mm)
A-1	22.25	32.93	10.68	57.33	124.66	2.17	73.8
B-1	25.77	34.79	9.02	55.86	118.58	2.12	72.8
B-2	18.82	32.14	13.32	44.59	114.17	2.56	90.2
C-1	21.85	33.42	11.57	56.84	119.27	2.09	74.8
C-2	22.15	35.67	13.52	61.74	131.02	2.12	97.6
D-1	22.25	35.87	13.62	40.18	95.55	2.37	97.4
D-2	22.15	32.14	9.99	59.78	138.77	2.32	69.2
E-1	22.15	32.83	10.68	52.92	120.05	2.26	74.0
E-2	21.95	28.81	6.86	55.86	132.69	2.37	48.8
F-1	22.05	33.04	10.99	40.18	78.92	1.96	97.4
F-2	22.05	31.75	9.70	27.44	55.27	2.01	71.8
G-1	22.05	36.95	14.90	100.94	228.44	2.26	122.4
G-2	22.05	32.63	10.58	34.01	66.05	1.94	118.4
G-3	22.05	32.34	10.29	15.78	31.07	1.96	166.6

$F_{se}$ : Effective Prestress/lea       $P_{max}$ : Maximum Load  
 $F_{ps}$ : Ultimate Tendon Stress/lea       $P_{cr}$ : Initial Cracking Load  
 $\Delta F_{ps}$ : Tendon Stress Increase/lea       $\delta_{max}$ : Maximum Deflection

트가 발생하는 중앙부에서 인장철근의 위치까지 수직균열인 미세균열로 나타났으며, 점증적으로 하중이 증가하면서 항복하중에 도달할 때까지 좌우로 일정한 간격의 수직 휨균열이 지지부로 확산되는 양상을 보였다.

항복하중이후에는 휨균열의 확산범위가 소성힌지로 가정한 범위에서 중단되고 기준에 발생한 균열과 균열사이에서 새로운 균열이 발생하였다. 그리고, 최대 휨모멘트 구간에서 균열의 폭이 증가되면서 압축측콘크리트 연단까지 휨균열이 진행되었다. 이후 최대하중직전까지 1~3개의 균열폭이 주변의 균열폭보다 넓어졌고, 최대하중에 도달하면서 중앙부 압축측 콘크리트의 압괴에 의한 파괴가 발생되었다.

이상과 같이 본 연구에서 실험된 실험체의 최종파괴 현상은 변수별 종류에 무관하게 그 양상은 거의 동일하였다. 그러나, 긴장재의 양을 변수로한 D-계열 실험체와 일반철근의 양을 변수로한 E-계열 실험체에서 긴장재의 양과 일반철근의 양이 많을수록 균열의 확산범위가 약간 더 크게 나타났으며, 균열과 균열사이의 간격이 더 좁게 나타났다. 그리고 작용하중의 형태에 따른 최종파괴의 상태를 분석하여 보면, 2점 집중하중과 등분포하중(4점 집중하중)의 경우에는 소성힌지 범위가 비슷하게 나타났으며, 1점 집중하중이 작용할 경우에는 다른 하중의 형태보다 소성힌지의 범위

가 짧게 나타났다.

### 2.5.2 하중-변위 곡선

본 연구에서 실험된 실험체에 대한 점증반복하중의 하중-변위 곡선을 포락선으로 간략화하여 변수별로 Fig. 12에 나타내었다. 변위는 스패의 중앙부에서 측정된 값이다.

Fig. 12(a)에 나타낸 유효프리스트레스 크기를 변수로한 실험체에서 초기강성의 크기는 유효프리스트레스 크기의 변화와 관계없이 동일하게 나타나고 있으며, 최대내력에서도  $0.6f_{pu}$ (A-1 실험체)를 기준으로  $\pm 6.7\%$ 의 차이를 나타내고 있다. 그러나, 항복내력 및 변형능력에 있어서 유효프리스트레스가  $0.7f_{pu}$ (B-1 실험체)와  $0.6f_{pu}$ (A-1 실험체)인 경우에는 비슷하게 나타났으나,  $0.5f_{pu}$ (B-2 실험체)인 경우에는  $0.7f_{pu}$ 와  $0.6f_{pu}$ 인 실험체보다도 항복점이 약 20%정도 작게 나타나고 있다. 이는 부분 프리스트레스드 콘크리트 부재의 항복이 긴장재의 항복으로 결정되기보다는 일반철근이 항복한 경우에 발생하기 때문으로 유효프리스트레스 크기의 영향이라고 사료된다.

Fig. 12(b)에 나타낸 콘크리트 강도를 변수로한 실험체에서는 콘크리트 강도의 변화에 무관하게 초기의 강성, 항복하중 및 최대하중근처까지의 하중-변위 곡선이 비슷하였으며, 최대하중이후의 하중감소추세에서는 콘크리트 강도에 관계없이 취성파괴의 형태를 나타내고 있다. 그러나 변위량이 동일한 위치에서 콘크리트 강도가 가장 높은 고강도(60MPa)로 제작된 C-2 실험체에서는 계속적인 하중의 증가형태를 나타내고 있으나, 저강도(30MPa)로 제작된 A-1 실험체에서는 압축측 콘크리트가 압괴를 일으키면서 급격한 하중의 저하현상을 보이고 있다. 이는 평형방정식에서 콘크리트 강도증가에 의한 압축력의 증가는 더 많은 긴장재의 응력증가를 발생시키기 때문에 판단된다. 따라서, 프리스트레스드 콘크리트 구조에서는 긴장재의 재료적인 전체강도를 극대화로 활용한다는 측면에서 고강도 콘크리트를 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

Fig. 12(c)에 나타낸 긴장재 양을 변수로한 실험체에서는 초기균열이후의 하중-변위 곡선의 상태가 모두 상이하게 나타났다. 긴장재 양이 적은 D-1 실험체에서는 연성적인 거동의 형태를 나타

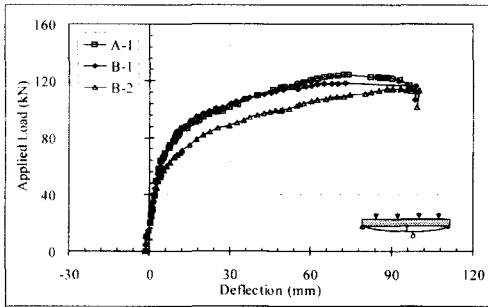


Fig. 12(a) Influence of effective prestress

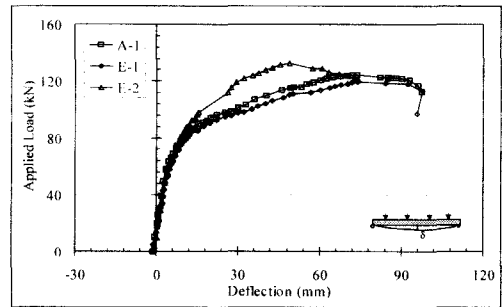


Fig. 12(d) Influence of amount of reinforcement

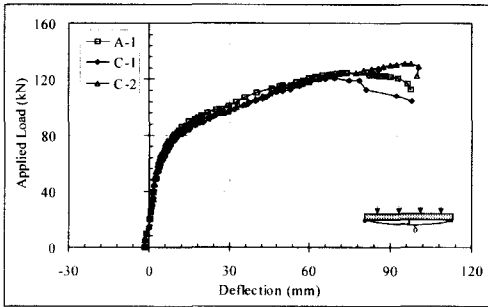


Fig. 12(b) Influence of concrete strength

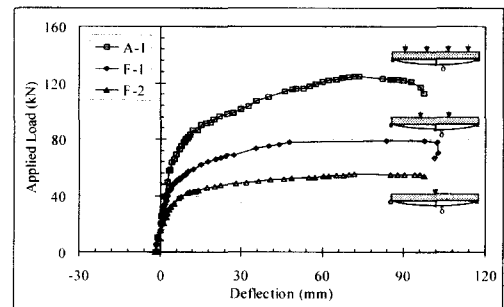


Fig. 12(e) Influence of loading type

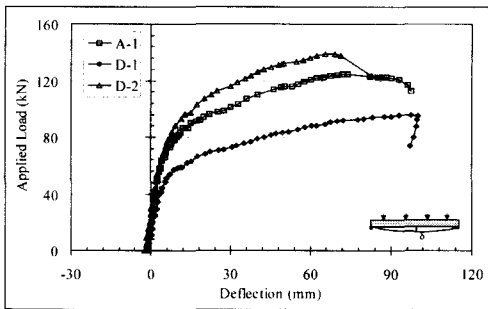


Fig. 12(c) Influence of amount of tendon

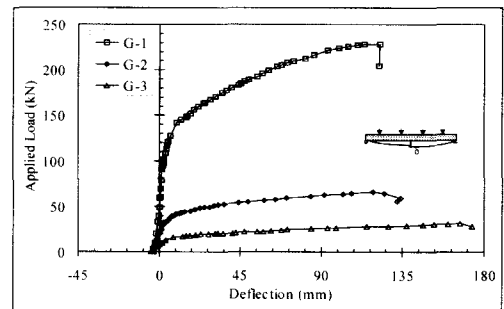


Fig. 12(f) Influence of span/depth ratio

내고 있으나, 긴장재 양이 많은 D-2 실험체에서는 압축축콘크리트의 압괴에 의한 압축파괴의 형태로 최대하중이후 취성적인 거동을 나타내고 있다. 이는 단면에서 인장측에 보강된 보강재의 양이 압축축 콘크리트가 부담하는 압축력과 평형을 이룰수 있는 양보다 많기 때문에 발생된 현상으로 판단된다. 따라서 콘크리트 강도와 긴장재 양에 대한 조합비율은 프리스트레스트 콘크리트 부재의 변형능력에 영향을 미치는 중요한 요소라고 판단된다.

이와 같은 현상은 Fig. 12(d)에 나타난 일반철근, 즉 인장철근의 양에 대한 변수로 제작된 실험체에서도 나타나고 있다. ACI 규준에서 규정하

는 0.2%이상인 일반철근 양을 0.24%, 0.32%로 배근한 A-1, E-1 실험체에서는 최대하중이후의 하중의 감소부분까지 하중-변위 곡선이 거의 동일한 형태의 거동을 나타내고 있으며, 0.49%로 배근된 E-2 실험체에서는 A-1, E-1 실험체보다도 최대내력이 약 6%정도 높게 나타나고 있으나, 최대하중까지 연성적인 거동의 형태를 나타내지 못하고 있다.

따라서 긴장재와 일반철근의 조합에 의한 보강지수 및 일반철근의 양은 비부착 긴장재를 갖는 부재의 휨거동에 영향을 주는 것으로 판단된다. 이 때문에 현행의 ACI 규준에서 반영되고 있지 않은 일반철근 양에 대해서도 비부착 긴장재의

극한응력을 평가하는데 이를 고려하여야 할 것이다.

Fig. 12(e)에 나타난 작용하중의 형태에 대한 변수를 고려한 실험체에서는 단면의 형태가 동일함에도 불구하고 항복내력, 최대내력의 크기가 상이하게 나타나고 있으며, 그외의 거동의 특성은 거의 동일하였다. 동일한 단면에서 역학적인 산술에 의해 작용하중의 형태에 따라 항복내력 및 최대내력의 차이가 발생하고, 이 차이는 단면의 응력분포에서 인장력과 압축력의 차이를 나타내며 긴장재의 응력증가량의 차이를 나타낸다. 따라서, 작용하중의 형태에 따라 비부착 긴장재를 갖는 부재의 하중-변위 곡선은 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

그리고 Fig. 12(f)에 나타난 스패/춤 비를 변수로 고려한 실험체의 비교에서 알 수 있듯이, 스패/춤 비가 큰 실험체(G-3 실험체)는 스패/춤 비가 작은 실험체(G-1 실험체)보다도 변형능력면에서 우수하였으며, 스패/춤 비가 18에서 30으로 커질 때, 최대내력은 1/3로 감소하였으나, 스패/춤 비가 30에서 45로 커질 때, 최대내력은 1/2로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 스패/춤 비의 비례적인 증가에 따라 최대내력의 비례적인 감소를 나타내지 못하고 있으므로, 스패/춤 비가 증가할수록 스패/춤 비의 효과는 감소하는 것으로 판단된다.

### 2.5.3 하중-긴장재의 응력증가량 곡선

실험체에 대한 하중-긴장재의 응력증가량 곡선을 포락선으로 간략화하여 변수별로 Fig. 13에 나타내었다. 긴장재의 응력은 정착구와 실험체와의 사이에 설치된 로드셀 값의 평균으로 하였다. 모든 실험체에 대한 하중-긴장재의 응력증가량 곡선은 하중-변위 곡선과 비슷한 양상을 보이고 있다.

Fig. 13(a)에 나타난 유효프리스트레스 크기를 변수로 한 실험체의 비교에서 항복하중까지의 응력증가량은 유효프리스트레스의 크기에 관계없이 동일한 응력증가량을 나타내고 있다. 그러나 유효프리스트레스의 크기가 작을수록 항복하중이후의 긴장재의 응력증가량은 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이는 부재 단면에 대한 힘의 평형방

정식이 유효프리스트레스  $f_{sc}$ 가 아닌 긴장재의 극한응력  $f_{ps}$ 에 따라 결정되기 때문이다. 따라서 구성재료가 동일한 단면이고 긴장재의 극한응력이 동일할 때  $f_{ps} = f_{sc} + \Delta f_{ps}$ 에서 유효프리스트레스  $f_{sc}$ 가 증가하면 증가할수록 응력증가량  $\Delta f_{ps}$ 가 적어지게 되는 현상때문으로 판단된다.

Fig. 13(b)에 나타난 콘크리트 강도를 변수로 한 실험체에서는 콘크리트 강도의 변화에 무관하게 최대하중근처까지의 하중-긴장재의 응력증가량 곡선이 동일하게 나타나고 있다. 그러나, 콘크리트 강도가 증가하면 증가할수록 긴장재의 응력증가량이 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 콘크리트 강도의 증가가 단면의 압축력을 증가시키고, 평형방정식에서 긴장재의 극한응력을 증가시키는 원인으로 작용하기 때문에 콘크리트 강도가 증가할수록 긴장재의 응력증가량이 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 13(c)와 Fig. 13(d)에 나타난 긴장재 양과 일반철근의 양을 변수로 한 실험체의 비교에서는 항복하중까지의 긴장재 응력증가량과 항복하중이후의 긴장재 응력증가량의 형태가 다른변수의 실험체군에서와 동일하게 나타나고 있으나, 최종적인 긴장재의 응력증가량은 긴장재 양과 일반철근 양이 증가하면 증가할수록 적게 나타나고 있다. 이는 평형방정식에서 긴장재 양이 증가하면 증가할수록 동일한 인장력에서 한가닥의 긴장재에 발생하는 인장응력은 감소하고 일반철근 양이 증가하면 증가할수록 긴장재가 부담하는 인장력이 감소하는 현상때문으로 사료된다.

Fig. 13(e)에 나타난 작용하중 형태별 변수를 고려한 실험체의 하중-긴장재 응력증가량 비교에서 최대내력이라고 판단되는 점에서의 긴장재 응력은 등분포하중(4점 집중하중) 및 2점 집중하중이 작용하는 경우에 비슷하였고, 1점 집중하중이 작용하는 경우에는 다른 하중의 형태보다 조금 작게 나타나고 있다. 그러나 F-계열 실험체에서 최대하중이후의 하중감소가 미소하여 최대하중이라고 판단되는 점의 구분이 불명확하기 때문에 긴장재의 응력은 육안의 관찰에 의해 모든 하중의 형태에서 비슷한 것처럼 보이고 있다. 이 때문에 작용하중에 의한 변수는 긴장재의 응력에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 그러나 최종과



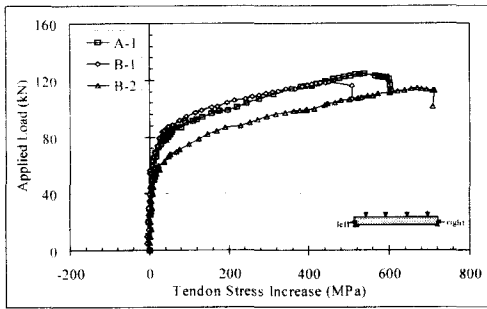


Fig. 13(a) Stress increase by effective prestress

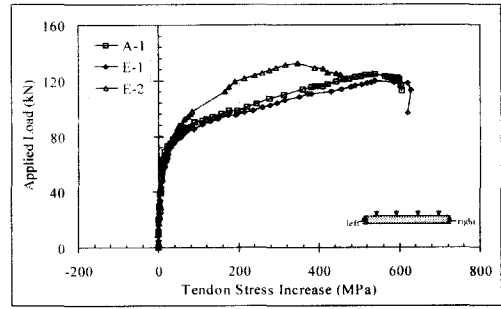


Fig. 13(d) Stress increase by amount of reinforcement

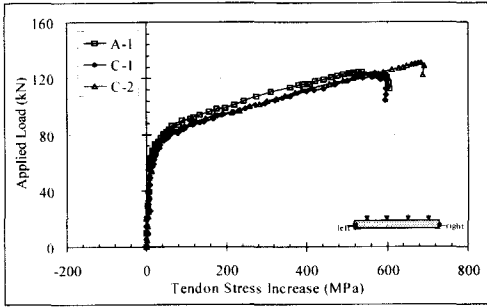


Fig. 13(b) Stress increase by concrete strength

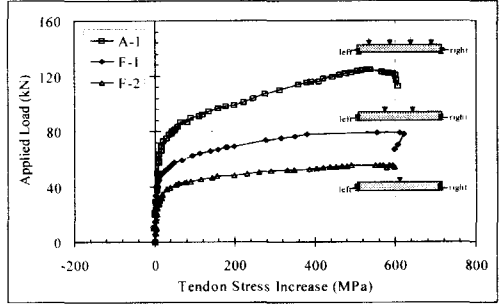


Fig. 13(e) Stress increase by loading type

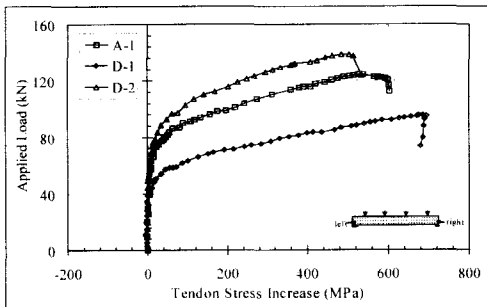


Fig. 13(c) Stress increase by amount of tendon

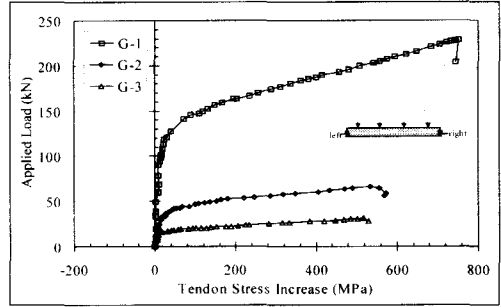


Fig. 13(f) Stress increase by span/depth ratio

곡형태에서 긴장재의 응력증가량에 영향을 미치는 소성힌지길이를 분석하면 등분포하중(4점 집중하중) 및 2점 집중하중이 작용한 경우에 소성힌지 길이가 비슷하였고, 1점 집중하중이 작용한 경우에는 조금 적게 나타났다. 따라서 상기와 같이 하중-긴장재의 응력증가량 곡선과 소성힌지 길이에 대한 해석방법의 차이 때문에 작용하중 형태의 영향을 정확하게 분석하기 위해서는 보다 많은 추가적인 실험이 필요하지만, 본 연구의 하중-긴장재의 응력증가량곡선에서 수치적으로 최대하중이라고 판단되는 점에서의 긴장재 응력과 최종파괴형태에서의 소성힌지 길이를 분석할 때,

작용하중별 변수는 긴장재의 응력에 영향을 미칠 수 있다고 사료된다.

Fig. 13(f)에 나타난 스패/츄름 비의 변수를 고려한 실험체의 비교에서 스패/츄름 비가 작은 G-1 실험체(스패/츄름 비=18)는 스패/츄름 비가 큰 G-2 실험체(스패/츄름 비=30) 및 G-3 실험체(스패/츄름 비=45)와 긴장재의 응력증가량 차이가 크게 나타나고 있다. 그리고 스패/츄름 비가 큰 G-2 실험체(스패/츄름 비=30) 및 G-3 실험체(스패/츄름 비=45)에서 긴장재의 응력증가량은 거의 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 따라서 스패/츄름 비가 큰 부재에서 스패/츄름 비의 효과는 적은 것으로 판단된다.

### 2.5.4 변수별 효과 분석

본 연구의 실험에서 선정된 변수별로 비부착 긴장재의 응력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각각의 변수에 대한 실험결과를 최대하중점에서의 비부착 긴장재의 응력증가량으로 비교하여 Fig. 14에 나타내었다.

유효프리스트레스 크기의 변화에 따른 비교에서 알 수 있듯이 유효프리스트레스 크기가 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 감소하는 것으로 나타나고 있는데, 이는 유효프리스트레스가 비부착 긴장재의 응력을 평가하는데 영향을 미치는 변수임을 말해주는 것이다.

콘크리트 강도의 변화에 따른 비교에서 알 수 있듯이, 콘크리트 강도의 증가에 따른 비부착 긴장재의 응력증가량이 미소하나마 비선형적인 증가의 형태를 나타내고 있기 때문에 현행의 ACI 규준식에서 처럼 콘크리트의 강도에 대한 변수를 선형적인 형태로 고려하는 것보다는 비선형적인 형태의 변수로 고려하는 것도 바람직하다고 사료된다.

긴장재 양의 변화에 따른 비교에서 알 수 있듯이 긴장재의 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 비선형적인 감소의 형태를 나타내고 있다. 따라서 현행의 ACI 규준식과 같이 비부착 긴장재의 극한응력을 예측하는데 긴장재의 양에 대한 변수를 바람직한 형태로 고려하고 있는 것으로 판단된다.

인장철근 양의 변화에 따른 비교에서 알 수 있듯이 인장철근의 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 감소의 형태를 나타내고 있으므로 비부착 긴장재의 극한응력을 평가할 때, 인장철근의 양에 대한 효과도 고려하는 것이 바람직하다고 사료된다.

작용하중의 형태에 따른 비교에서 알 수 있듯이, 최대하중이라고 판단되는 점에서 작용하중의 형태가 등분포하중(4점 집중하중)일 경우와 2점 집중하중일 경우의 긴장재의 응력증가량은 비슷한 값을 나타내고 있으나, 1점 집중하중에 대한 결과는 등분포하중 및 2점 집중하중에 의한 결과보다 긴장재의 응력증가량이 적게 나타나고 있다. 따라서 작용하중의 형태도 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미칠 수 있다고 사료된다.

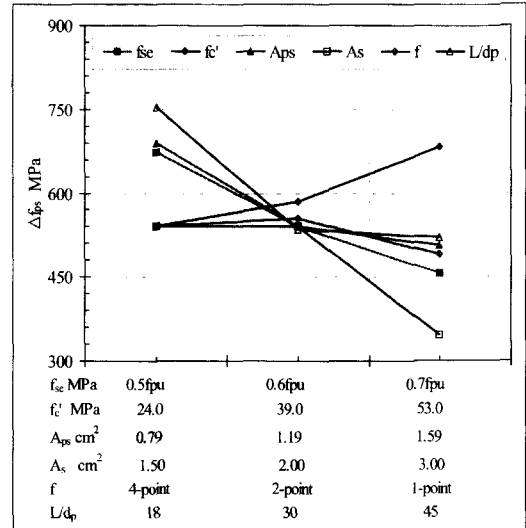


Fig. 14 Comparison of experimental results( $\Delta f_{bs}$ )

스팬/춤 비의 변화에 따른 비교에서 알 수 있듯이 스패/춤 비가 30정도 이전에는 비부착 긴장재의 응력증가량이 급격히 감소하는 것으로 나타나고 있으나, 30이후에는 비부착 긴장재의 응력증가량이 일정하게 나타나고 있다. 이는 현행의 ACI 규준식에서 처럼 스패/춤 비가 35이상인 슬래브와 같은 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력을 평가할 때, 스패/춤 비의 효과를 과대평가하고 있다고 사료되며, 스패/춤 비가 큰 부재에 대해서는 스패/춤 비의 효과에 대해 재고찰되어야 한다고 사료된다.

### 3. 결론

- (1) 유효프리스트레스 크기가 증가할수록 비부착 긴장재의 응력증가량은 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 현행의 규준에서 고려하고 있는 콘크리트 강도와 긴장재 양은 비부착 긴장재의 응력에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (3) 현행의 규준에서 고려하고 있지 않은 일반철근 양과 작용하중의 형태도 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (4) 등분포하중(4점 집중하중)과 2점 집중하중이 작용할 경우에는 긴장재의 응력을 동일하게 평가할 수 있다고 사료된다.

(5) 스패ن/츄름 비가 큰 부재에서 긴장재의 응력 변화가 거의 나타나지 않았기 때문에 스패น/츄름 비가 큰 부재에서 스패น/츄름 비의 효과는 비교적 적은 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 금호건설기술연구소와 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터와의 공동연구 결과의 일부분임.

### 참고문헌

1. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스드 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력 평가에 관한 연구(I) -기존연구 및 ACI 규준식의 고찰-", 한국콘크리트학회 논문집 제9권 4호, 1997. 8, pp 167-176.
2. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스드 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력 평가

에 관한 연구(II) -변형도 적합조건을 이용한 설계식의 제안-", 한국콘크리트학회 논문집 제9권 5호 1997. 10, pp 105-114.

3. 임재형, 이리형, "비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 변수별 효과에 관한 해석적 연구", 대한건축학회 논문집 제13권 10호 1997. 10, pp 291-300.
4. 대한건축학회 철근콘크리트 구조위원회, "극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산규준 및 해설", 대한건축학회, 기문당, 1994 개정판.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1995, 369 pp.
6. Freyermuth, C. L., "Rational application of the elongation tolerance for posttensioning tendons", ACI Journal, Nov.-Dec., 1991, pp 730-737.
7. Naaman, A. E., "Prestressed concrete analysis and design - Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp 149-181.

### 요 약

본 연구와 관련한 이전의 연구에서는 기존연구에서 제시한 설계식 및 현행의 ACI 규준식에 대한 문제점을 분석하고 그 결과에 의해 비부착 긴장재의 극한응력을 평가할 수 있는 새로운 설계식을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 설계식에서 제안된 주요변수가 비부착 긴장재의 응력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 총14개의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 변수는 유효프리스트레스, 콘크리트 강도, 긴장재 양, 일반철근 양, 작용하중 형태, 스패/츄름 비 등이다. 실험결과에서는 유효프리스트레스가 증가하면 증가할수록, 그리고 긴장재 및 일반철근의 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 감소함을 알았다. 그리고 콘크리트 강도 및 작용하중의 형태도 긴장재의 응력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 스패/츄름 비가 높은 경우에 현행의 ACI 규준식과는 상이하게 스패/츄름 비가 긴장재의 응력에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다.

(접수일자 : 1998.9.24)