

# 용접 절단에 의한 긴장력 도입 방법이 프리텐션 부재의 콘크리트 응력에 미치는 영향 분석

## The Effect of the Flame Cutting of a Tendon on the Surrounding Concrete in Pretensioned Prestressed Member

김 장 호\* · 문 도 영\*\* · 지 광 습\*\*\* · 김 규 선\*\*\*\* · 박 경 래\*\*\*\*\*

Kim, Jang-Ho · Moon, Do-Young · ZI, Goang-seup · Kim, Gyu-Seon · Park, Kyoung-Lae

### ABSTRACT

This paper describes the dynamic shock effects on the pretensioned concrete member by the detensioning using finite element analysis. The investigation was performed by linear and nonlinear dynamic analysis. In nonlinear dynamic analysis, Brittle Cracking Model was applied for concrete behavior. It was shown that the amplitude of stress wave was significantly decreased when time for cutting of tendon was above 0.05sec. The maximum stress values obtained from linear and nonlinear dynamic analysis was nearly same. However, the position for the maximum tensile stresses were different.

*Keywords:* Pretension, Flame cutting, Linear dynamic analysis, Nonlinear dynamic analysis

## 1. 서 론

프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 전달길이는 긴장재의 긴장력이 유효 프리스트레스 응력으로 전달되는데 필요한 길이로, 단부 거동을 반영하기 때문에 중요한 요소 중 하나이다. 선행 연구에 따르면 전달길이는 여러 가지 인자의 영향을 받으며, 이 중 긴장력 도입 방식의 차이에 따라 순간 전달(Sudden Release)보다 지연 전달(Gradual Release)에서 더 큰 전달길이가 유발되는 것으로 알려져 있다(Russell and Burns, 1997; 오병환과 김의성, 2000). 순간 전달 방식은 대표적으로 용접 절단(Flame Cutting)에 의한 긴장력 도입이 있다. 긴장재를 용접 절단에 의해 절단 시 순간적으로 긴장력이 도입되며, 긴장재 절단에 의한 충격으로 인해 동적 효과가 발생한다는 보고가 있다(Belhadj and Bahai, 2001). 이에 본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 용접 절단 시 프리텐션 부재가 받는 동적 영향을 긴장력 도입 시간에 따라 확인하였으며, 선형 해석과 비선형 해석에 따른 콘크리트 응력을 고찰하였다.

## 2. 동적 선형 해석

### 2.1. 해석 개요

- 
- \* 학생회원 · 고려대학교 건축 · 사회 환경공학과 석사과정 Email: tiga00@korea.ac.kr
  - \*\* 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회 환경공학과 BK21 연구교수 Email: dymoon@naver.com
  - \*\*\* 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회 환경공학과 조교수 Email: g-zi@korea.ac.kr
  - \*\*\*\* 정회원 · 한국시설안전기술공단, 교량실 차장 Email: gskim68@naver.com
  - \*\*\*\*\* 정회원 · 삼성건설 토목사업본부 인천대교 설계 과장 Email: grinder.park@samsung.com

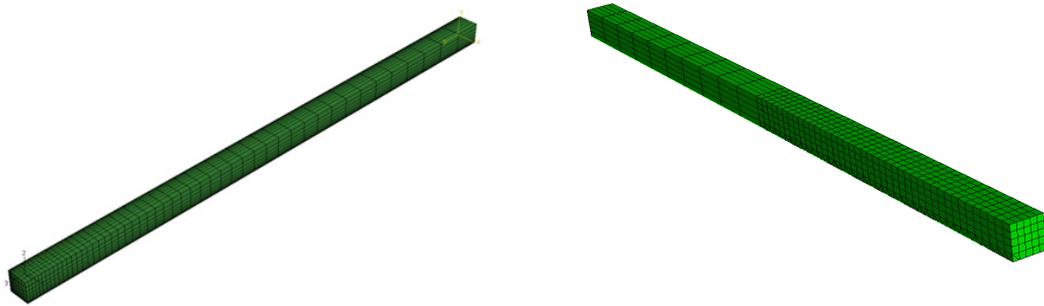
프리텐션 부재에서 사전 긴장된 긴장재의 절단 시 발생하는 동적 하중에 의한 콘크리트의 응력을 고찰하기 위한 동적 선형 해석은 ABAQUS Standard 프로그램을 사용하여 수행하였다. 해석에 사용된 유한 요소 모델은 150mm×150mm×4000mm 크기의 프리텐션 부재에서 부재의 대칭성을 고려하여 부재의 1/8인 75mm×75mm×2000mm의 크기로 모델링을 하였다(그림 1(a)). 모델의 요소는 'Seed Edge : Biased'를 사용하여, 긴장재가 위치한 부분과 긴장력이 도입되는 부분의 요소의 개수를 증가하여 해석을 수행하였다.

## 2.2. 해석 변수

본 해석에서 콘크리트 응력에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 절단 시간이다. 따라서 본 해석에서는 절단 시간을 주된 변수로 하였으며, 가장 위험한 해석 경우로써 그림 2(a)와 같이 절단 시간이 0초인 경우와 그림 2(b)와 같이 절단 시간이 0.05초인 경우로 나누어 해석을 수행하였다.

## 2.3. 해석 조건

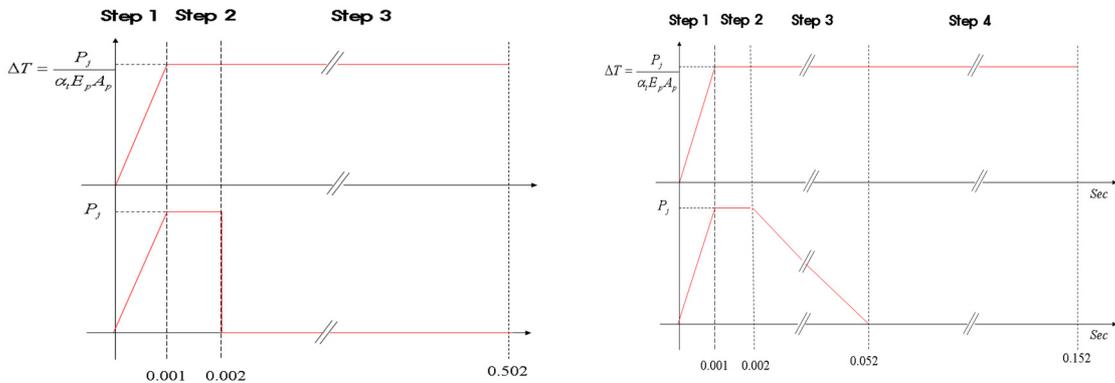
하중 재하는 긴장력의 도입과 절단에 의한 동적 하중을 동시에 고려하기 위하여 온도 하중과 집중 하중을 이용하여 그림 2와 같이 단계별로 입력하였다. 또한, 표 1의 재료 물성치를 사용하여 해석을 수행하였다. 본 해석은 선형 해석을 수행하였기 때문에 콘크리트 물성치의 경우에도 기본적인 탄성계수와 포아송비 만을 사용하였다.



(a) 동적 선형 해석 모델

(b) 동적 비선형 해석 모델

그림 1. 유한 요소 모델



(a) 절단시간 0초인 경우(T1)

(b) 절단시간 0.05초인 경우(T2)

그림 2. 단계별 하중재하 곡선

표 1. 동적 선형 해석 모델 물성치

	강재	콘크리트
탄성계수 [GPa]	200	32.2
포아송비	0.3	0.2

### 3. 동적 비선형 해석

#### 3.1. 해석 개요

본 논문의 동적 비선형 해석은 콘크리트의 재료 비선형을 고려한 해석으로 긴장재는 선형 거동으로 가정했으며, ABAQUS Explicit 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 유한 요소는 선형 해석과 동일한 크기의 모델에서 4절점 입체 요소와 8절점 정방형 요소를 혼합하여 사용했다(그림 1(b)). 단면의 중앙부는 긴장재의 긴장력 도입으로 급격한 응력의 변화를 나타내는 부분이므로, 해의 수렴성을 개선하기 위하여 4절점 입체 요소를 사용했고, 그 외의 부분은 8절점 정방형 요소를 사용했다. 해석 시간은 전장의 해석 변수에서 T2에 대하여 고려하였으며, 시간은 해석 시간을 고려하여 그림 2의 step4에서 0.001초만 해석하였다.

#### 3.2. 해석 모델

콘크리트의 재료 모델은 해석에 용이한 Brittle Cracking 모델을 사용하였다. 본 재료 모델은 콘크리트의 균열 거동을 효과적으로 모사하기 위하여 개발되었으며, Smeared 균열 모델 이론에 근거하고 있다. 또한 재료 항복의 조건은 Rankine 모델을 사용하고 있으며, 따라서 주인장 응력이 인장강도를 초과하는 경우 균열이 발생하는 것으로 가정한다. 또한 본 재료 모델은 Mode I의 파괴 모드에 기초하여 입력되는데, Shear retention 계수를 입력함으로써 Mode II의 파괴 거동도 모사할 수 있도록 개발되었다. 균열 발생 후 응력-변형률 구성방정식은 그림 3~4와 같다. 특히 그림 4의 Shear retention 계수는 식 (1)과 같이 정의 되며  $\varepsilon_{\max}^{ck}$  는 0.003,  $p$ 는 1을 사용하였다.

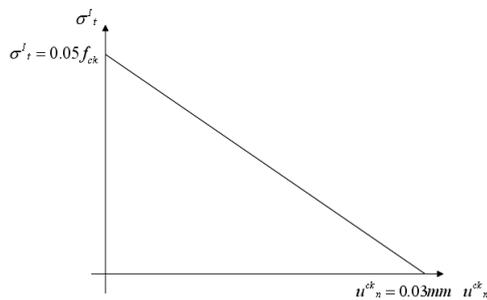


그림 3. 균열 발생 후 응력-변위 관계

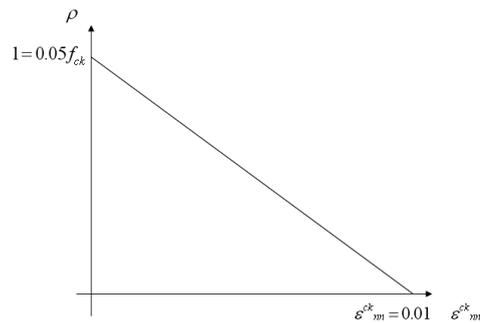


그림 4. Shear retention factor와 변형률과의 관계

$$\rho(\varepsilon_{nn}^{ck}) = \left(1 - \frac{\varepsilon_{nn}^{ck}}{\varepsilon_{\max}^{ck}}\right)^p \quad (1)$$

## 4. 해석결과

### 4.1. 동적 선형 해석 결과

동적 선형 해석 결과는 특정 절점에서 시간에 따른 콘크리트 응력 변화와 Path에서 거리에 따른 응력 변화를 고찰하였다(그림 5).

T1과 T2의 종방향 응력을 시간에 따른 함수로 고찰한 결과, 결과 값의 차이는 매우 미세하나, T1의 경우 충격으로 인한 응력파의 경향이 확인한 반면, T2의 경우에는 매우 안정적인 응력 결과를 나타낸다(그림 6).

긴장재의 절단 후 시험체의 중심부에는 큰 압축 응력이 발생되며(그림 6(a)), 표면에는 0.2MPa 정도의 인장 응력이 발생하는 것으로 나타났다. T1의 경우 표면부의 응력파의 진폭이 절점 5611에서 보다 절점 6161에서 크다. 이는 부재 중앙부로 갈수록 본 모델에서 생략된 대칭부로부터 전달되는 응력파와 합쳐짐으로써, 진폭이 더욱 커지기 때문이다. 그러나 표면에 발생하는 인장 응력은 극히 적은 것을 알 수 있다.

"Path A"의 거리에 따른 횡방향의 응력에서 T1의 해석 결과는 단부로부터 약 8cm 떨어진 콘크리트 표면에 긴장재의 절단 직후 횡방향 인장 응력이 2.2MPa 발생하였고, 다음 단계에서는 응력이 0.9MPa로 크게 저하됨을 알 수 있다(그림 7(a)). 그러나 T2의 해석 결과에서는 해석 단계와 관계없이 약 1.4MPa의 인장 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 차이는 T1의 해석에서는 절단 시간이 매우 작으므로 충격에 의하여 응력이 크게 흔들렸기 때문이다. 따라서 실제 실험에서 콘크리트 표면에 발생하는 응력은 1.4MPa 이하인 것을 알 수 있다. 또한 "Path A"의 거리에 따른 종방향 응력은 단부에서 중앙부까지 전반적으로 압축 응력 상태에 있음을 확인할 수 있다(그림 7(b)).

그림 7(c)에서 해석 시간 0.502초에서의 강선 종방향 응력을 시험체의 단부로부터 중앙부까지 거리에 대한 함수로 나타내면, 단부로부터 약 25cm 위치까지 긴장력의 변화가 크고, 이후 안정되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이를 통해 전달길이가 약 25cm임을 알 수 있다.

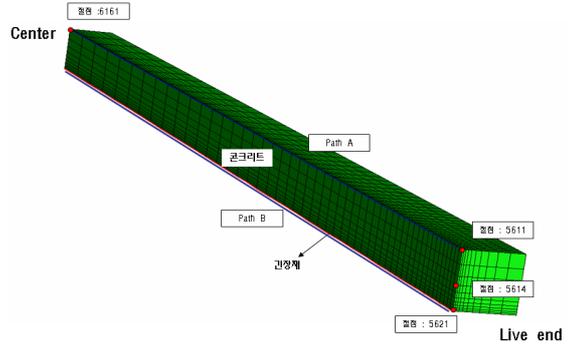
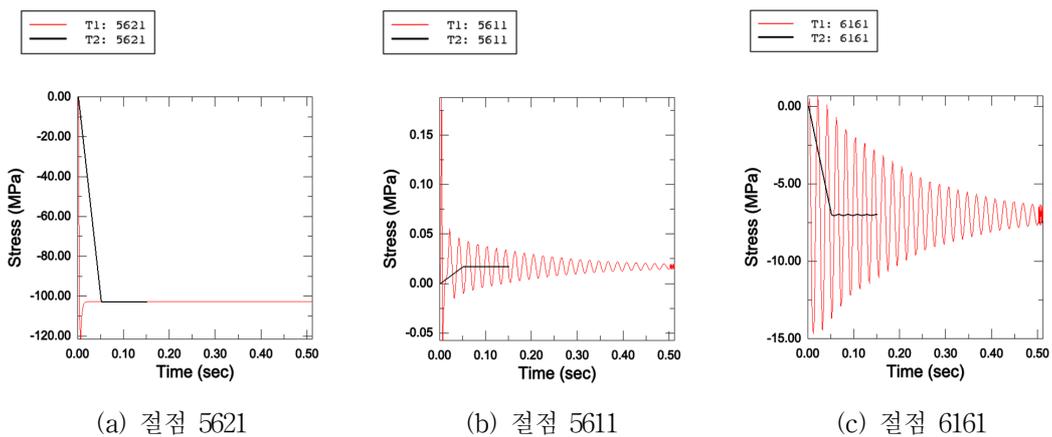


그림 5. 해석 모델의 모니터링 절점들과 Path

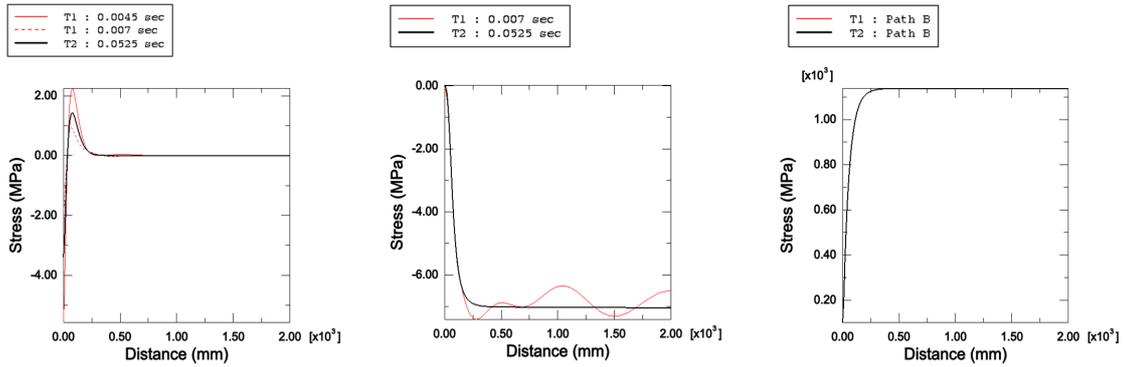


(a) 절점 5621

(b) 절점 5611

(c) 절점 6161

그림 6. 절단 시간에 따른 종방향 응력



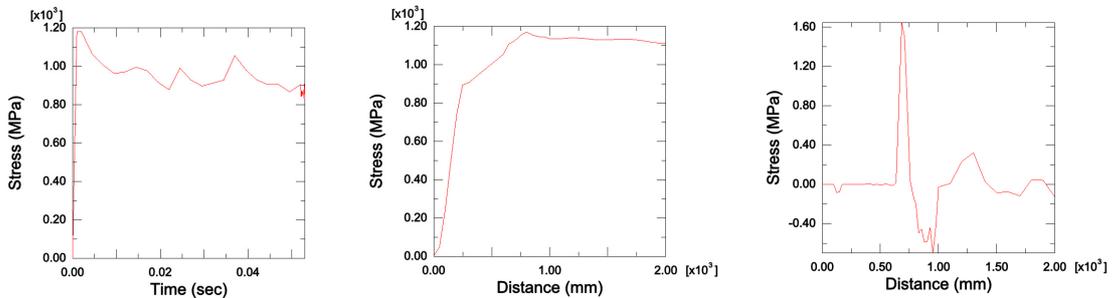
(a) Path A 횡방향 응력      (b) Path A 종방향 응력      (c) Path B 종방향 응력

그림 7. Path에 따른 종·횡방향 응력

#### 4.2. 동적 비선형 해석 결과

단부로부터 30cm 떨어진 강선의 절점에서의 시간에 따른 종방향 응력은 절단 단부에서의 동적 효과로 인하여 330MPa 정도의 긴장력 손실이 있다. 이를 탄성 계수로 나누어 변형률의 손실량을 계산하면,  $1650\mu\epsilon$  정도의 손실이 발생한 것이다. 동적 선형 해석 결과 동일한 위치에서 변형률의 변화가  $240\mu\epsilon$ 에 불과한데 반하여 비선형 해석 결과 7배 정도의 변형률 손실이 발생하는 것으로 나타났다. 비선형 해석 모델이 선형 해석보다는 단부 긴장력 도입에 의한 콘크리트 손상을 적절히 모사하고 있음을 알 수 있다. 그림 8(b)의 "Path B"의 종방향 응력으로 나타낸 긴장재의 응력 결과에서 해석 결과 도출된 전달길이는 75cm를 상회하는 것으로 나타났다.

콘크리트표면에 긴장재의 절단으로 인해 발생하는 응력으로 "Path A"의 횡방향 인장 응력을 확인하면(그림 8(c)), 최대 인장 응력은 약 1.62MPa로 동적 선형 해석 결과와 거의 유사한 응력결과를 나타내고 있다(그림 7 참조). 그러나 최대 응력의 발생 위치는 상이하다. 동적 선형 해석 결과에서는 최대 응력 발생 위치가 단부에서 8cm 이격된 위치였으나, 본 해석에서는 약 70cm정도 이격된 위치로 전달길이에 해당하는 위치에서 가장 큰 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 단부 콘크리트의 균열로 인해 에너지가 소산됨으로 단부에서는 최대 응력이 발생하지 않다가 손상이 없는 부분에서 응력이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 동적 선형 해석 결과와 동적 비선형 해석 결과를 비교할 때, 발생하는 응력의 수준은 동일하지만, 발생하는 위치가 다른 것으로 예측된다.



(a) 긴장재 응력 (단부에서 30cm 위치)      (b) 긴장재의 종방향 응력 결과      (c) 콘크리트 표면 횡방향 응력 결과

그림 8. 동적 비선형 해석 결과

## 5. 결론

동적 선형 해석을 통해 절단 시간에 의한 영향을 고찰하였다. 동일한 해석 모델에 절단 시간을 0초인 경우(T1해석 경우)와 0.05초인 경우(T2해석 경우)를 해석한 결과, 0.05초만 되어도 동적인 효과가 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 표면의 횡방향의 인장 응력이 2.2MPa과 1.4MPa인 것으로 각각 나타났다. 또한 단부로부터 8cm 이격된 위치에서 횡방향의 최대 응력이 발생하는 것으로 나타났다.

콘크리트의 비선형을 고려한 동적 비선형 해석 결과, 표면 콘크리트의 응력은 동적 선형 해석 결과와 유사한 1.6MPa의 응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 발생 위치는 약 70cm 정도의 전달길이가 끝난 위치에서 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 해석 결과로부터 긴장재의 용접 절단으로 발생 가능한 본 부재의 횡방향 응력의 크기는 약 1.5MPa에서 2MPa 정도인 것을 알 수 있으며, 발생 위치는 단부로부터 전달길이 만큼 이격된 콘크리트의 표면에서 발생하는 것으로 판단된다. 또한 이와 같은 응력 수준은 긴장재의 절단의 영향만으로는 균열이 발생할 수 있는 수준은 아니지만, 수화열에 의한 복잡한 응력 거동 등과 복합되어짐으로써, 최악 조건이 복합된다면 균열의 발생도 충분히 우려된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국시설안전기술공단에서 위탁 수행한 ‘프리텐션 구조물의 Detensioning에 따른 단부거동평가’ 용역 및 05첨단융합 B01의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 오병환, 김의성 (2000) 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전달길이 평가 및 영향 인자 연구, **대한토목학회 논문집**, 20(6-A), pp.945~956.
- 지광습, 김장호, 김규선 (2007) 프리텐션 콘크리트 구조물의 디텐셔닝 거동, **한국콘크리트학회 2007년도 가을 학술발표회 논문집**, 19(2), pp.181-184.
- Belhadj, A., Bahai, H. (2001) Friction-slip: an efficient energy dissipating mechanism for suddenly released prestressing bars, *Engineering Structures*, 23, pp.934~944.
- Oh, B.H., Kim, E.S. (2000) Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned, Prestressed Concrete Members, *ACI Structural Journal*, 97(6), pp.821~830.
- Russell, B.W., Burns, N.H. (1996) Measurement Transfer Lengths of 0.5 and 0.6 in. Strands in Pretensioned Concrete, *PCI Journal*, 41(5), pp.44~65.
- Russell, B.W., Burns, N.H. (1997) Measurement of Transfer Lengths on Pretensioned Concrete Elements, *Journal of Structural Engineering*, 123(5), pp.541~549.
- Steinberg, E., Beier, J.T., Sargand, S. (2001) Effects of Sudden Prestress Force Transfer in Pretensioned Concrete Beams, *PCI Journal*, 46(10), pp.64~75