

차세대 강구조 설계 기술



김 승 역*

1. 서 론

현재 강구조의 설계방법으로 1920년대에 미국에서 개발된 허용응력설계(ASD) 및 1980년대에 개발된 하중저항계수설계(LRFD)가 사용되고 있다. 이 방법은 실제 구조시스템이 비선형비탄성 거동을 함에도 불구하고 선형탄성거동을 하는 것으로 가정하여 해석한 후 비선형비탄성 거동은 개별부재의 강도 검토에서 함축적으로 고려하고 있기 때문에 해석과 설계간에 모순이 있는 설계방법이다. 이러한 해석 및 설계방법은 컴퓨터가 개발되기 전에는 불가피하게 사용할 수 밖에 없었으나, 지난 10년간 컴퓨터의 놀라운 발전으로 지난날 사용하였던 불합리한 가정을 극복할 수 있는 새로운 해석/설계기법을 개발사용할 수 있는 토대가 마련되었다. 즉 hardware 환경은 마련되어 있으므로 새로운 해석을 수행할 수 있는 software를 개발할 적절한 시기라고 할 수 있다. 선진국에서는 이러한 인식아래 비선형비탄성 해석기법을 직접 적용하여 강구조 설계를 하는 연구가 활발하다. 이러한 해석법을 구미에서는 “고등해석(Advanced

Analysis)” 이라고 지칭하며 고유명사처럼 사용하고 있다. 즉 고등해석이란 해석시 구조시스템의 비선형 비탄성 거동을 직접 고려함으로써 해석 후 개별부재의 강도검토가 필요 없는 매우 편리한 해석 및 설계기법을 의미한다. 본 기술을 설계에 적용할 경우 개별부재의 강도검토에 소요되는 설계시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라, 비탄성 모멘트 재분배 효과에 의한 부재단면의 크기를 절감할 수 있어 관련산업에 그 파급효과가 크리라고 판단된다.

2. 종래 설계방법

종래의 강구조 설계방법인 ASD 및 LRFD는 세 단계의 과정 즉: (1) 구조시스템 해석; (2) 유효길이계수(K-factor) 계산; 및 (3) 개별부재의 강도검토가 필요하다. 이 방법은 실제 구조물이 비선형 거동을 하는데도 불구하고 선형해석을 수행한 후 설계식에서 비선형 효과를 함축적으로 고려한다 (그림 1, 그림 2). ASD나 LRFD가 현재까지 널리 사용되는 방법임에도 불구하고 이 방법은 다음과 같은 간과할 수 없는 문제를 내포하고 있다.

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과, 교수

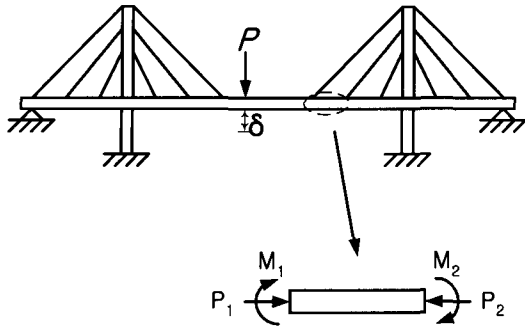


그림 1 종래 설계방법

- (1) 실제 구조물이 비선형비탄성 거동을 하는데도 불구하고 선형탄성해석을 수행하므로써 기본적인 접근방법에 문제가 있다.
- (2) 구조시스템의 실제 파괴 모드는 K-factor를 기반으로 하는 구조시스템의 탄성좌굴모드와 일반적으로 일치하지 않는다. 따라서 구조시스템과 개별부재간에 강도와 안정에 대한 상호작용을 고려하지 못하기 때문에 구조시스템의 붕괴에 대한 안전율을 정확히 제시할 수 없다.
- (3) 시방서에 주어진 개별부재의 강도검토식은 비선형거동을 하는 구조시스템과의 적합조건을 고려하지 못하므로 개별부재와 구조시스템에 속한 각 부재 사이에 적합조건이 성립하지 않는다. 결론적으로 구조시스템의 변형 하에 있는 각 부재가 그들의 설계하중을 지지할 수 있는지 확인할 수 없다.
- (4) 종래의 방법으로는 구조시스템의 실제 거동을 파악할 수 없으므로 구조시스템이 좌굴에 의하여 파괴되는 것인지 소성현저 발생에 의하여 파괴되는 것인지 알 수 없다.
- (5) 종래의 방법은 해석에서부터 설계에 이르기까지 일괄적인 컴퓨터 활용이 불가능하다. 그 이유는 구조시스템의 해석 후 K-factor를 계산하는데 있어서 설계자의 판단이 필요하기 때문이다.

위와 같은 종래 설계방법의 문제점을 극복할 수 있는 방법은 구미에서 고등해석이라고 칭하는 비선형 및 비탄성해석을 직접 수행하는 방법 뿐이다.

3. 차세대 설계방법

차세대 설계에서는 비선형비탄성해석 즉 고등해석을 통하여 개별부재의 강도가 고려된 전체 구조시스템의 하중지지능력을 산정한 후, 구조 시스템에 가해진 극한하중과 비교하는 것으로 설계가 완료된다. 종래 설계방법은 마치 “사과”를 “오렌지”라고 가정 한 후 각종 화장품을 발라서 사과를 만들어 가는 과정으로 비유한다면, 고등해석은 불합리한 가정을 배제하고 “사과”의 본질을 그대로 받아드림으로써 종래 설계방법의 문제를 완전히 제거할 수 있는 방법이라 하겠다 (그림 2). 컴퓨터기술의 발전으로 구조시스템과 그에 속한 개별부재의 거동과 강도를 직접 결정할 수 있는 고등해석이 가능하게 되었다. 그림 3에 차세대 설계방법과 종래설계 개념을 비교하였다.

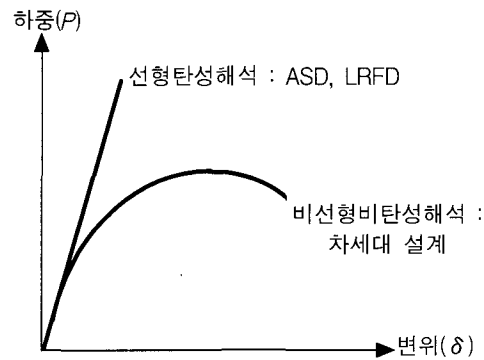


그림 2 하중-변위 관계

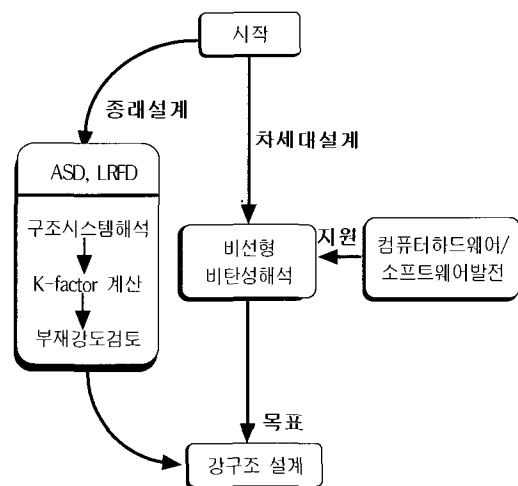


그림 3 종래 설계와 차세대 설계

ABAQUS 및 ADINA 등의 상용프로그램을 사용하여 비선형비탄성해석을 할 수 있으나 부재 단면을 세분화하여야 하기 때문에 요소의 수가 너무 많아져 실용적이지 못하며 경제성도 없다. 따라서 차세대 설계기술은 강구조의 단위부재를 한 개 혹은 두 개의 요소로 이상화하면서 재료적 비탄성 및 기하학적 비선형 효과를 동시에 고려할 수 있는 실용적인 강구조 설계기술이다. 이 기술을 설계실무에 사용할 경우 설계시간을 현격히 단축할 수 있을 뿐 아니라, 강구조물의 거동을 정확히 예측할 수 있기 때문에 구조물의 안전 확보와 비탄성 모멘트 재분배로 인한 단면 절감 등의 장점이 있다. 이 기술은 토목 및 건축분야 강구조의 설계방법으로 사용될 수 있으며 대상구조물로는 (1) 교량(라멘교, 트러스교, 아치교 및 사장교) (2) 항만구조물, (3) 건축구조물, (4) 플랜트 구조물, (5) 지하철 및 교량의 가시설 등이 있다.

차세대 설계기술은 지난 수십년간 사용되어온 ASD 및 LRFD의 문제점을 극복할 수 있는 한차원 높은 핵심 설계기술이다. 유럽에서는 차세대 설계기술인 고등해석을 시방서에 이미 채택하여

설계에 사용하고 있으며 미국의 경우 ASCE 산하 SSRC(Structural Stability Research Council)에서 고등해석을 시방서에 채택하기 위한 연구가 활발하다. 선진국에서는 본 설계기술을 ASD나 LRFD를 대체할 수 있는 차세대기술로 집중 연구 육성하고 있는 바 국내에서도 머지 않아 새로운 설계기술로 정착되어 적극 활용될 것이다.

4. 종래 및 차세대 설계 비교

종래의 설계방법 및 차세대 설계방법의 핵심사항을 비교하면 표 1과 같다.

5. 국내외 기술동향 및 수준

5.1 국외의 기술동향 및 수준

구미 선진국에서는 차세대 설계방법인 고등해석의 장점을 인식하고 이를 설계 시방서에 반영하기 위한 연구가 활발하다. 미국의 경우 SSRC에서 고등해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 유럽 시방서에서는 고등해석을 설계방법으

표 1 종래 설계와 차세대 설계 비교

구분	항목	ASD, LRFD	차세대 설계
기술적 측면	설계단계	3단계 : 해석, K-factor 계산, 개별부재강도 검토	1단계 : 해석시 개별부재를 포함한 시스템의 강도 검토
	해석방법	선형탄성해석	비선형비탄성해석
	거동예측	구조물의 실제거동 예측 불가	구조물의 실제거동 예측
	설계합리성	구조물은 탄성해석하고, 설계식에 비탄성 고려하여 상호 모순	해석과 강도검토를 비선형비탄성 해석으로 수행하여 합리적
	안전율 평가	개별 부재 강도에 대한 안전율 평가	전체 구조시스템에 대한 안전율 평가 : 진일보된 방법
	컴퓨터 활용 설계	해석 후 K-factor 계산 필요하여 컴퓨터 일괄 활용 불가	K-factor 계산 필요 없어 컴퓨터 일괄 활용 가능
	개별부재 강도 검토	해석 후 개별부재 강도 검토 필요	해석시 구조시스템의 일부로서 자동 검토 완료
	비탄성 모멘트 재분배	탄성해석 수행하여 비탄성 모멘트 재분배 불가	비탄성해석 수행하여 비탄성 모멘트 분배 가능
경제적 측면	설계비	해석 후 개별부재의 강도검토 필요하여 구조 설계비 절감 불가	해석 후 개별부재의 강도검토 필요없어 구조 설계비 절감
	공사비	탄성해석하므로 부정정구조물의 강재 단면 절감 불가	비탄성 모멘트 재분배 효과에 의한 부정정 구조물의 강재 단면 절감

로 채택하고 있다.¹⁾ 호주에서도 고등해석에 대한 연구가 활발하다.²⁾

현재 구미 선진국에서는 이차원 고등해석 기술은 이미 완성되었으며, 삼차원 구조물의 고등해석에 대한 연구가 거의 완성단계에 이르고 있다. 국부좌굴, 횡비틀림좌굴 및 뒹좌굴 등을 고등해석에 접목시키는 연구는 현재 진행 중에 있다 (표 2).

5.2 국내의 기술동향 및 수준

이차원 강구조에 대한 고등해석기술은 세종대학교 강구조연구실에서 미국 대학과 공동으로 개발한 바 있어 선진국과 대등한 기술수준에 있다.³⁾ 그 이후 경북대학교 및 삼성중공업 연구소 등에서 고등해석기법을 활용하여 최적설계 및 분포하중에 대한 연구를 각각 수행한 바 있다.

삼차원 고등해석기술의 경우 선진국 기술수준에 도달하기 위하여 현재 연구를 활발히 수행하고 있는 중이다(표 2). 특히 세종대학교 강구조연구실이 과학기술부로부터 2000년도에 국가지정연구실로 선정되어 앞으로 수년내에 기술수준이 선진국 수준에 도달할 전망이다.

6. 향후 전망 및 결론

차세대 설계기술 즉 고등해석기술은 매우 편리한 직접 설계기술이기 때문에 약 5년 후면 유럽에 이어 미국을 비롯한 선진 각국에서 고등해석기법을 설계시방서로 채택할 전망이며 국내에서도 선진국의 추세를 따라갈 것으로 판단된다. 또한 기존 구조물의 유지관리 및 성능개선의 필요성이 증대됨에 따라 구조물의 실제 거동을 정확히 예측할 수 있는 실용적인 고등해석기법의 수요가 더욱 증가할 것이다.

차세대 설계기술은 토목 및 건축분야의 강구조물 설계에 매우 편리하게 활용할 수 있는 기술로서 국내에 약 300여개의 설계회사, 건설회사, 공사 및 연구소에서 사용할 수 있다.⁴⁾ 본 설계기술은 종래의 ASD 및 LRFD의 대체 설계기법으로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 종래의 설계방법으로 결정된 부재 치수를 최종적으로 검토하는 도구로 혹은 구조물의 안전진단 도구로도 적극 활용할 수 있다. 현재 장대교량 및 초고층 빌딩의 건설로 인하여 강구조가 활발히 사용되고 있는 바 기술 수요가 더욱 증가될 전망이다.

고등해석 Software의 국내시장 규모는 약 120억원

표 2 국내외 기술동향 및 수준

기술항목	국외		국내	
	연구기관	완성도	연구기관	완성도
이차원 강구조의 직접설계	SSRC(미국)	100%	세종대학교 경북대학교 삼성중공업 연구소	100% 80% 80%
	Cornell Univ. (미국)	100%		
	Purdue Univ. (미국)	100%		
	ECCS(유럽)	100%		
	Sydney Univ. (호주)	100%		
삼차원 강구조의 직접설계	SSRC(미국)	80%	세종대학교 삼성중공업 연구소	60% 40%
	Cornell Univ. (미국)	90%		
	Purdue Univ. (미국)	90%		
	ECCS(유럽)	30%		
	Sydney Univ. (호주)	90%		
삼차원 강구조의 국부좌굴, 뒹좌굴 및 횡비틀림좌굴을 고려한 직접설계	SSRC(미국)	20%	세종대학교	10%
	Cornell Univ. (미국)	40%		
	Purdue Univ. (미국)	20%		
	Sydney Univ. (호주)	40%		

에 이를 것으로 추산된다.⁴⁾ 이 외에도 차세대 설계시스템을 사용하였을 경우 설계비의 절감 효과 및 강재 물량 절감 효과에 의한 건설비 절감액은 매년 약 1,300억원으로 추정된다.⁵⁾ 세계시장 규모는 국내시장 규모의 수십배에 달하는 것으로 추산된다.

고등해석을 이용한 차세대 설계방법에 대하여 좀 더 자세한 것을 알고 싶은 분은 세종대학교 토목환경공학과 강구조연구실 홈페이지(<http://steel.sejong.ac.kr>)를 참조하시기 바랍니다. 2차원 강구조의 고등해석 프로그램(Practical Advanced Analysis Program : PAAP) 및 관련 구조해석 프로그램을 down 받을 수 있습니다.

참 고 문 헌

1. ECCS, *Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames with Rigid Joints*, Technical Committee 8-Structural stability technical working group 8.2-system, Publication No. 33, 1984, pp. 20
2. Clarke, M. J., Bridge, R. Q., Hancock, G. J., and Trahair, N. S., Benchmarking and verification of second-order elastic and inelastic frame analysis program, in SSRC TG 29 Workshop and Nomograph on plastic hinge based methods for advanced analysis and design of steel frames, White, D. W. and Chen, W. F., Eds., SSRC, Lehigh University, Bethlehem, PA, 1992
3. Chen and Kim, *LRFD Steel Design Using Advanced Analysis*, CRC Press, 1997, pp. 441
4. 대림기술정보(주), Daelim Technology Information, 1998, pp. 16
5. POSCO 경영연구소, 1999년 수요조사, 2000 