강재의 단면형상에 따른 내화피복두께 산정 연구

Study on the Determination of Fire Protection Thickness based on Section Factor

정 청 운* 지 남 용** 권 인 규***
Jung, Chung woon Jee, NamYong Kwon, In-Kyu

Abstract

Traditionally, the thickness of fire protection materials of structural elements such as beam and column have been decided by fire test using the predominant steel section of H-300×300×10×15 for column and H-400×200×8×13 for beam in Korea. But this way of determination of fire protection thickness yields very unduly results. Because the temperature-increment rate of structural steel elements depends mainly on magnitude of their cross-areas. In general, the thicker size of cross-areas for structural elements, the lower temperature shows up. It had already proved that the fire protection thickness only depends on the size of cross-areas and the fire protection method for three-side or four-side exposed conditions in European countries, the United State of America and so on. To demonstrate there would be differences among various cross-areas for structural elements, we conducted several fire tests with full-scale specimens of beams and columns. For the determination of critical temperature for steel section when the fire resistant performance is needed to be decided, we conducted with a loaded fire test for beam and column, respectively. The small column in 1.0 meter length and beam in 1.5 meter length were used in order to deprive the rational fire protection thickness of structural elements such as beam and column, respectively. After test, we could obtain there were significant temperature lags between higher cross-areas and lower cross-areas. The critical temperature of steel as a criterion is used 538℃ for column and 593℃ for beam which is from ASTM E 119 because we don't make provisions as critical temperature by elements. We could consider that the best way of determination of fire protection thickness is using the following multi-regression equation which was deprived from several fire tests using the concept of section factor, FR(column) = 0.17 +5191.49t A/Hp + 40.77t, FR(beam) = 0.25 +6899.31t A/Hp + 32.60t(where, FR means fire resistant time, t means thickness, A means cross-area and Hp means heated parameter)

키 워 드 : 구조부재, 내화피복, 단면형상계수,
Keywords : *structural element, fire protection, section factor,*

1. 서 론

현재 국내에서 강재의 화재에 대한 성능을 향상시키기 위해 사용되고 있는 피복 재료에 대한 성능평가의 경우 단일규격(기둥: H-300×300×10×15, 보: H-400×200 ×8×13)의 강재를 대상으로 비재하 시험을 통한 기준온도(538℃)의 초과여부로 성능을 평가하고 있다. 그러나 강재는 동일한 가열조건에서 화재에 노출된 면적이나 단면적에 따라 강재온도상승은 달라지고 때문에 현재 피복 재료의 성능평가방법에 의한 피복두께 산정에 문제를 가지고 있다. 이에 현재 선진외국에서는 강재 단면적(영국) 또는 단위중량(미국)에 대한 피복길이의 비를 단면형상계수로 설정하여 이에 따라 강재가 기준온도에 도달하는 시간으로서 피복 재료의 두께를 산정하고 있으며 각각의 내화피복재료에는 단면형상에 따라 시간별로 피복두께가 명시되어 있다. 이때 판정기준으로 쓰이고 있는 기준온도는 많은 시험에 의한 다양한 상황과 안전율을 고려하여 영국은 550℃ 미국은 538℃(1000F)를 쓰고 있으며 콘크리트 T형보부재의 경우에는 그 기준온도를 620℃(영국), 593℃(미국)로 기준온도를 높게 두고 있다. 본 연구에서는 강재의 단면적에 대한 내화피복길이의 비로서 단면형상계수를 설정하고 기둥과 보에 따라 기준온도를 구분하여 (주)벽산에서 생산되는 비팽창성 뿜칠계 내화피복재료의 단면형상에 따른 기둥과 보의 내화피복두께 산정표를 만들어 피복 재료에 따른 적정 내화피복두께의 설정방법을 제시하고자 한다.

* 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정
** 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사
*** 포항산업과학연구원 건축구조연구팀 책임연구원, 공학박사

2. 구조용 강재의 온도변화

2.1 강재 규격에 따른 강재 온도변화

서로 다른 규격의 강재들의 표준온도가열곡선에 의한 가열하에서 시간에 따른 온도분포곡선을 보면 그림1에서 보이는 것처럼 강재의 단면적과 화재에 노출된 면적에 따라 강재의 평균온도 상승률이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 현행 단일규격(기둥: H-300×300×10×15, 보: H-400×200×8×13)의 강재를 대상으로 온도를 측정하여 피복두께의 성능적합여부를 판단하는 것은 현재 건축구조재로 쓰이고 있는 다양한 규격의 강재를 고려하지 않은 것으로서 강재의 적정 피복두께 산정이 적합하지 않음을 보여준다.

표 1. 비재하가열시험내역

구분	강재의 종류	온도측정 개소	피복	목적
기둥	H-100×100×6×8	12개소	무피복	강재 단면크기에 따른 온도상승 분석
	H-800×800×40×40			
보	H-200×100×5.5×8	12개소		
	H-400×200×8×13			
	H-600×300×14×23			

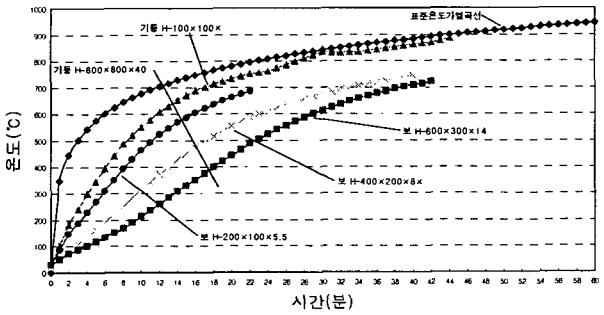

그림 1. 규격에 따른 강재 평균온도변화

2.2 부재에 따른 강재 피복재료 평가시 기준온도

동일 규격과 동일한 피복두께 강재(표2, 표3)의 재하가열시험과 비재하가열시험을 실시한 결과 강재의 평균온도 분포곡선은 보의 경우 그림3과 같은 결과를, 기둥의 경우 그림4와 같은 결과가 나타났다. 이는 재하가열시와 비재하가열시 시간에 따른 강재의 온도변화는 유사함을 보여주는 것으로서 비록 피복재료의 특성에 따라 약간의 온도변화의 차이는 있으나 하중에 관계없이 강재의 온도변화는 동일한 것으로 간주할 수 있음을 보여준다. 즉, 재하가열시험시 변형량, 변형률로서 측정된 하중지지력의 한계시간에서의 온도와 비재하시험시 같은 시간상의 온도는 유사하며 온도를 이용하여 강재의 구조적 한계를 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

표 2. 보부재 시험내역

가열 방법	규 격	Hp/A (m-1)	부재	피복 (mm)	온도 측정 개소
재하	H-400×200×8×13	188	보	20	12
비재하	H-400×200×8×13	188	보	20	12

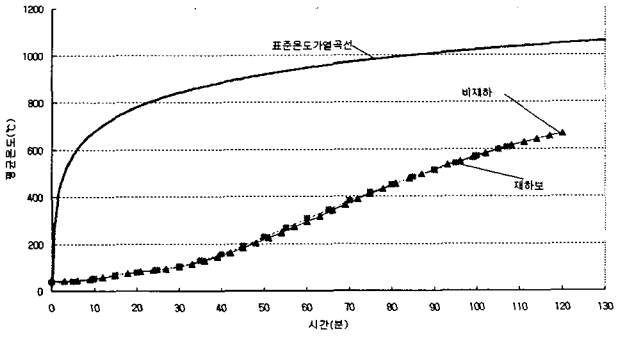

그림 2. 보부재 재하가열시험과 비재하가열시험시 평균온도변화

표 3. 기둥부재 시험내역

가열 방법	규 격	Hp/A (m-1)	부재	피복 (mm)	온도 측정 개소
재하	H-400×200×8×13	165	기둥	20	12
비재하	H-400×200×8×13	165	기둥	20	12

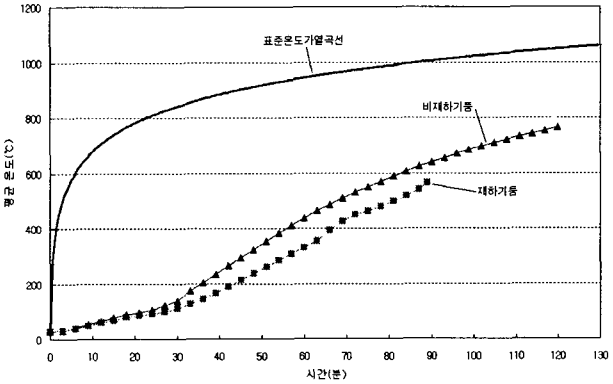

그림 3. 기둥부재 재하가열시험과 비재하가열시험시 평균온도변화

KS F 2257-1,6,7(건축구조부재의 내화시험방법-일반사항, 보의 성능조건, 기둥의 성능조건)에서 규정하고 있는 시험방법에 따라 건축구조재로 쓰이는 강재를 대상으로 보와 기둥부재의 재하시험을 통한 구조적 한계시의 강재온도는 표4(보부재), 표5(기둥부재)와 같다.

보부재의 경우 구조적 한계시점의 강재 평균온도는 675℃,720℃ 최고온도 716℃, 866℃를 나타내는 반면 기둥부재의 경우 평균온도 542~566℃, 최고온도 624~691℃를 나타내고 있다. 이는 부재에 따라 구조적 한계시 강재의 온도가 다르다는 것을 의미하며 강재의 온도를 이용하여 피복두께를 산정할 경우 기둥과 보에 따라 그 기준을 변화시켜야 함을 알 수 있다. 이에 ASTM E 119에서는 재하시험과 함께 기둥 538℃, 보 593℃와 같이 부재에 따라 한계온도를 제시하고 있으며 영국의 ASFPCM에서는 기둥 550℃, 보 620℃를 부재의 한계온도로 하고 있다. 그러나 국내 KS에서는 부재에 따른 한계온도의 규정이 명시되어 있지 않아 본 연구에서는 피복두께 산정시 기준온도로 ASTM E 119에서 제시하고 있는 기둥과 보의 한계온도를 내화피복산정시 기준온도로 사용하였다.

표 4. 보부재 재하시험

규격	피복두께 (mm)	내화성능 시간(분)	구조적한계시 도달온도(°C)	
			평균	최고
400×200×8×13	5	72	720	866
400×200×8×13	0	20	675	716

표 5. 기둥부재 재하시험

규격	피복두께 (mm)	내화성능 시간(분)	구조적한계시 도달온도(°C)	
			평균	최고
200×100×5.5×8	40	185	558	687
400×200×8×13	20	89	566	691
400×200×8×13	0	11	542	624

3. 단면형상계수와 부재에 따른 피복두께 산정

3.1 단면형상계수

큰 주장(周長)을 가진 강재 단면은 작은 주장을 가진 강재보다 더 많은 열을 받으며 단면적이 큰 강재단면이 열저하(heat sink)가 크다. 그러므로 동일한 온도상승 조건하에서 작고 두꺼운 강재 단면은 크고 얇은 강재 단면 보다 강재 온도의 상승속도가 느리게 된다. 즉, 단면형상계수는 강재 단면이 화재와 같은 고열 하에서 가열될 때 온도 상승속도를 측정하는 하나의 수단으로서, 단면형상계수가 클수록 더 많은 내화피복재를 요구하게 된다.

영국, 프랑스 등의 유럽지역, 호주, 뉴질랜드, 미국, 일본 등에서는 이러한 단면형상계수를 실용화하고 있지만 국내에서는 개념도입이 되지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 단면형상계수(Hp/A)의 개념을 근간으로 하여 구조용 강재의 단면형상계수에 의한 내화피복두께 설정을 위한 조건을 표6과 같이 정하였다.

표 6. 단면형상계수 설정을 위한 인자

단면형상별	적용부위별	피복재료
· H형 단면	· 기둥 : 4면노출 · 보 : 3면노출	· (주)벽산의 비팽창성 뿜칠재료

단면형상계수의 산정을 위한 내화피복길이의 계산은 3면이 피복이 되는 보부재의 경우, Hp = 3B+2H-2t, 4면이 화재에 노출되는 기둥부재의 경우는 Hp = 4B+2H-2t로 행한다(단, 여기서 B는 플랜지의 폭, H는 웨브의 높이, t는 웨브의 두께임). KS D 3502(열간 압연 형강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)에서 규정하는 다양한 치수와 단면의 H형강을 대상으로 단면형상계수를 산정한 결과의 일부는 표7과 같다.

표 7. 강재의 단면형상계수

공칭 치수	치수 H × B	t1	t2	r	단면적	단위 중량	단면형상계수 (Hp/A) 3면 노출	4면 노출
mm	mm	mm	mm	mm	㎠	kg/m	m-1	m-1
100×100	100×100	5	7	8	18.85	14.8	259.9	313.0
125×60	125×60	4.5	6.5	8	13.39	10.5	314.4	359.2
125×125	125×125	6.5	9	10	30.31	23.8	201.9	243.2
150×75	150×75	5	7	8	17.85	14.0	288.5	330.5
200×100	200×100	5.5	8	11	27.16	21.3	253.7	290.5
200×125	250×125	6	9	12	37.66	29.6	229.2	262.3
300×150	300×150	6.5	9	13	46.78	36.7	221.7	253.7

3.2 내화피복 기준을 위한 상관식

단면형상과 피복두께에 따른 비재하 가열 실험체의 부재별 기준온도 도달시간은 표8과 같으며, 사용된 비재하 가열 실험시의 강재온도 분포는 그림4와 같다.

표 8. 비재하가열시험결과

부재 \ 구분	단면형상계수 (m-1)	피복두께 (mm)	기준온도 도달시간(분) 538 (기둥)	593 (보)
300×150×6.5×9	221.7	33	122	130
300×150×6.5×9	221.7	12	65	72
150×150×7×10	220.7	5	31	35
350×175×7×11	191.8	22.5	107	117
350×175×7×11	191.8	33	142	153
200×200×8×12	186.4	40	192	208
250×175×7×11	177.6	22.5	102	113
250×175×7×11	177.6	19	81	85
250×250×14×14	142.5	12	75	82
350×350×12×19	119.4	15.5	79	82

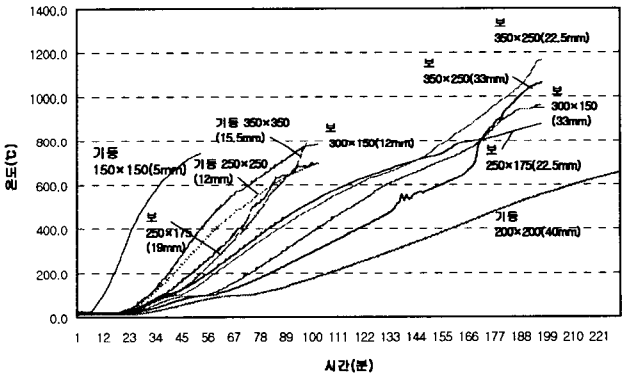

그림 4. 비재하가열시험에 의한 피복강재의 평균온도변화

단면형상계수별, 피복두께별로 도출된 내화시간을 바탕으로 기둥부재와 보부재의 기준온도를 가지고 다중 선형회귀분

석을 실시하였다. 단면형상계수에 따른 내화피복두께 산정 회귀식은 (식1)—기둥부재, (식2)—보부재와 같고, 회귀식의 결정계수(R2)가 기둥은 0.94, 보는 0.89로 나타나 충분한 유의도가 있음을 나타내고 있다.

내화시간(기둥)= 0.17 + 5191.49t A/Hp + 40.77t -(식1)
내화시간(보) = 0.25 + 6899.31t A/Hp + 32.60t -(식2)
(여기서 t: 내화피복두께, A: 강재 단면적, Hp: 주장)

도출된 회귀식에 따라 비팽창성 뿜칠재료를 사용한 기둥과 보의 내화피복두께를 표9, 10과 같이 유도하였으며 본 연구에서 사용한 (주)벽산의 비팽창성 뿜칠계 내화피복재료의 경우 최대피복두께가 40mm로 되어 있어 산정식에 의한 피복두께가 40mm를 초과하는 부분은 나타내지 않았다.

표 9. 기둥부재 강재단면계수에 따른 내화피복두께 산정표

Hp/A	내화성능에 대한 피복건조두께(mm)-기둥		
	1시간	2시간	3시간
70	7	16	25
90	8	19	29
110	9	21	32
130	10	23	35
150	11	24	38
170	12	26	40
190	12	27	-
210	13	28	-
230	13	29	-
250	13	30	-
270	14	31	-
290	14	31	-

표 10. 보부재 강재단면계수에 따른 내화피복두께 산정표

Hp/A	내화성능에 대한 피복건조두께(mm)-보		
	1시간	2시간	3시간
70	6	13	21
90	7	16	25
110	8	18	29
130	9	20	32
150	10	22	35
170	10	24	38
190	11	25	40
210	11	27	-
230	12	28	-
250	12	29	-
270	13	30	-
290	13	31	-

종래 내화피복두께 산정을 위해 사용되는 기둥부재 H-300×300×10x15(Hp/A:148.6)와 보부재로 쓰이는 H-400×200×8×13(Hp/A: 164.5) 의 경우, 단면형상계수에 따른 내화피복두께는 1시간의 경우 11mm, 10mm, 2시간의 경우 각각 24mm로서 현행 내화구조 평가기준에 의한 약 20mm 및 30mm의 내화피복두께 보다 각각 약 45% 및 20% 절감할 수 있으며, 3시간에서는 현행의 피복량과 거의 동등한 결과를 보였다.

4. 결론

구조용 강재를 대상으로 강재 단면적, 내화피복길이 및 피복공법에 따라 단면형상계수를 산정하고, 내화성능시험 및 평가를 통하여 합리적인 강재의 내화피복두께 설정을 위한 방안 제시를 목적으로 한 연구결과에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) H-300×300×10×15(Hp/A: 148.6)의 경우, 기둥부재로 사용될 때는 1시간의 경우 11mm, 2시간의 경우 24mm, 3시간의 경우는 38mm로 설정되지만 보부재로 사용될 경우 1시간의 경우 10mm, 2시간의 경우 22mm, 3시간의 경우 35mm로서, 보부재의 경우 기둥부재에 비해 좀더 경제적인 피복두께를 설정할 수 있으며, 이는 보부재의 한계온도가 기둥보다 높기 때문이다.

2) 한계온도에 따른 내화시간의 설정과 내화시험에 소요되는 비용과 시험의 용이성을 고려한 비재하 가열실험값을 이용한 내화피복두께 산정식은 다음과 같다. 내화시간(기둥) = 0.17 + 5191.49t A/Hp + 40.77t, 내화시간(보) = 0.25 + 6899.31t A/Hp + 32.60t, 이 회귀식에 따른 내화피복두께는 현행 기둥 및 보 부재의 대표단면에 의해 평가되는 1, 2시간의 내화시간의 피복두께에 비해서 약 45%, 20%의 피복절감 효과를 보였다.

참 고 문 헌

1) Fire Protection for Structural Steel in buildings(2nd Edition-Revised),ASFPCM(1999)
2) KS F 2257-1,6,7 건축구조부재의 내화시험방법(1999)
3) BS 5950 Structural Use of Steelwork in Building Part 8(1995)
4) ASTM E 119 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials(1995)
5) 강구조 내화성능 평가 및 기준연구, 한국건설기술원/포항산업과학연구원(1999.10)
6) 구조용 강재의 고온특성연구, 포항산업과학연구원(2002.8)
7) 강재 단면형상계수 표준화 연구, 한국건설기술원/포항산업과학연구원(2002.8)