

석탑문화재 손상 유형 및 영향 요인에 따른 손상도 평가

Damage Assessment According to Damage Types and Influential Factors of Stone Pagoda Structure

김 호 수* 홍 석 일** 전 건 우*** 김 덕 문**** 박 찬 민*****
Kim, Ho-Soo Hong, Souk-il Jeon, Gun-Woo Kim, Derk-Moon Park, Chan-Min

Abstract

Stone pagoda structures have continued to be aged due to the combination of various damage factors. However, some studies on nonstructural damage have been carried out, but assessment studies on structural damage have not been done in various ways. Therefore, in this study, structural and nonstructural influencing factors according to the damage types are classified and the damage assessment according to the structural influencing factors affecting the behavior of the stone pagoda structure is performed. In addition, the damage rating classification criteria for each type of structural damages or damage locations are presented, and the damage index is calculated by providing the criteria for the classification of damage according to the degree of damage to which the damage is caused. Therefore, this study can evaluate quantitatively the damage status of stone pagoda structures.

Keywords : Stone pagoda structure, Damage type, Influential factor, Damage index, Damage assesment

1. 서론

석탑문화재는 오랜 기간 야외에 노출됨으로써 자연재해와 더불어 물리적, 화학적, 생물학적, 구조적, 인위적 요인과 같은 다양한 손상 요인들이 복합적으로 작용하여 노후화가 지속되고 있어서 석탑문화재의 손상에 대한 평가 및 대책 방안이 필요하다. 석탑문화재의 비구조적 손상에 관한 연구는 일부 수행되고 있으나, 구조적 관점에서의 손상 평가 연구는 다양하게 이루어지지 못하고 있다. 또한 정기 조사 및 정밀 안전 진단의 경우에도 구조적 손상에

대한 육안 조사, 정밀 조사 등이 이루어지고 있지만 이를 정량화 및 지표화 시킬 수 있는 기준이 없어 정성적으로 석탑의 상태를 평가하고 있는 실정이다.

이러한 석탑문화재는 일반 구조물과 달리 문화재로서의 특수성과 축조 형식에 따른 다양한 구성 형식이 존재하며, 손상 유형에 따른 구조적 안전성 확보를 위해서도 체계적인 손상 유형의 분류와 손상 요인 분석 및 손상 평가 방안이 필요하다.

따라서 석탑문화재에 발생하는 손상 유형에는 다양한 손상 요인이 복합적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에 본 연구에서는 손상 유형에 따른 구조적, 비구조적 영향 요인을 구분하고 석탑구조물의 거동에 영향을 미치는 구조적 영향 요인에 따른 손상도 평가를 집중적으로 수행한다.

이와 더불어 구조적 손상 유형별 및 손상 위치별 손상 등급 분류 기준을 제시하고, 손상 정도에 따른 등급 분류 기준을 제시하여 손상 지수를 산정함으로써 석탑문화재의 손상도를 평가하고자 한다.

2. 석탑문화재 손상 유형 및 영향 요인

* 교신저자, 정회원, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Cheongju Univ.
Tel: 043-229-8483 Fax: 043-229-8483
E-mail: hskim@cju.ac.kr

** 정회원, 청주대학교 건축공학과 겸임교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Cheongju Univ.

*** 학생회원, 청주대학교 건축공학과, 석사과정
Dept. of Architectural Engineering, Cheongju Univ.











**** 정회원, 국립문화재연구소 안전방재연구실 실장
Safety and Disaster Prevention Division, National
Research Institute of Cultural Heritage

***** 정회원, 국립문화재연구소 안전방재연구실 연구사
Safety and Disaster Prevention Division, National
Research Institute of Cultural Heritage

2.1 석탑문화재 손상 유형 분류

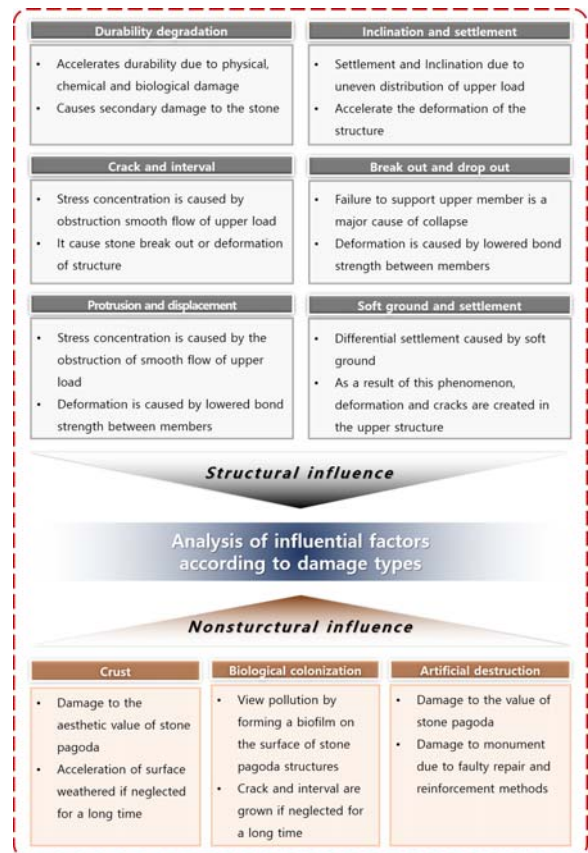
석탑문화재는 장기간 외부 환경에 노출되어 다양한 손상 유형이 발생한다. 일반적으로 석탑문화재의 단위 석재에는 내구성 저하, 균열 및 이격, 파손 및 탈락, 변형, 백화, 변색, 지의류 등이 광범위하게 발생하며, 석탑문화재의 전체적인 기울어짐 및 침하 등도 발생한다. 석탑에 발생하는 구조적 손상 유형과 비구조적 손상 유형은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Classification of damage types for stone pagodas

Damage types	
	
(a) Crack	(b) Interval
	
(c) Break out	(d) Protrusion and drop out
	
(e) Inclination	(f) Settlement
	
(g) Durability degradation	
	
(a) Corrosion	(b) Efflorescence
	
(c) Discoloration	(d) Lichen

2.2 손상 유형에 따른 영향 요인

석탑문화재의 손상 유형은 물리적 요인, 화학적 요인, 생물학적 요인, 구조적 요인, 인위적 요인의 5가지로 구분한다. 물리적 요인에 의한 손상은 균열, 박리·박락, 탈락 등이 있으며 이러한 손상이 발생할 경우 석탑의 부재간 접촉면이 줄어들어 편심 하중이 발생하거나 불안정한 지지로 석탑문화재에 위험을 초래한다. 또한 구조적 요인에 의한 손상은 이격, 파손, 침하, 기울어짐 등이 있으며, 이러한 손상은 불균등한 하중에 의한 전도 등을 유발한다. 이와 더불어 물리적, 화학적, 생물학적 풍화의 복합적인 영향에 의한 석재의 내구성 저하는 파손, 균열, 박리·박락 등 여러 가지 손상에 영향을 미치는 2차적인 손상으로서 고려되어야 한다. 화학적 요인, 생물학적 요인 및 인위적 요인 등의 손상은 구조물의 거동에는 큰 영향을 미치지 않지만 석탑문화재의 미관을 해치며 장기적으로 석재의 풍화를 촉진시킨다.



<Fig. 1> Analysis of influential factors according to damage types

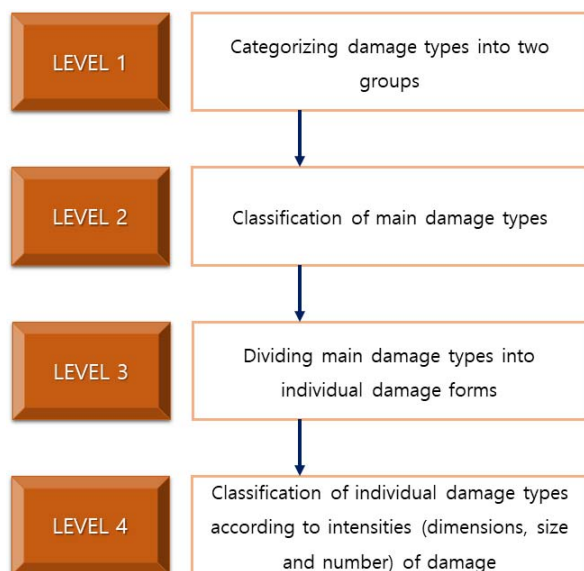
3. 석탑문화재 손상도 분석 방안

3.1 석탑문화재 손상도 분석 절차

석탑문화재의 손상도 분석 및 지표화 작업을 실시하기 위해서는 수행된 정기 조사 및 정밀 안전 진단 내용을 바탕으로 손상도 분석이 필요한 대상 석탑문화재를 선정하고, 손상 유형을 분류한 후 석탑문화재의 손상도 분석을 수행한다. 손상도 분석은 손상 유형을 체계적으로 분류하고, 손상 유형에 따른 손상 정도의 등급을 분류하여 손상 유형의 종합적인 평가를 수행한다.

손상 유형의 단계별 분류는 크게 4단계로 진행되며, 본 연구에서는 구조물의 거동에 영향을 미치는 구조적 손상에 대해서 분류한다.

LEVEL 1 단계에서는 손상 유형을 'Group 1(석재의 손실 및 파손)', 'Group 2(구조적 손상)'와 같이 2개의 주요 그룹으로 분류한다. LEVEL 2에서는 손상 유형의 각 그룹을 주요 손상 유형으로 세분화하며, 이는 LEVEL 3에서 개별 손상 유형으로 더욱 세분화 된다. 마지막으로 LEVEL 4에서는 각 손상 유형을 손상 강도에 따라 분류한다.



(Fig. 2) Step-by-step classification system of damage types

손상 유형의 표준 강도는 정해진 기준이 없으며, 문화재나 해당 지역에서 조사된 강도 범위를 합리적으로 설정해야 한다. 그러나 문화재나 지역에 따라 강도가 다르게 설정되면 통일성이 없어지기 때문에 하나의 기준으로 통일해야 한다. Group 1은 석재의 손실 및 파손을 세분화 하고 부피 또는 면적비를 통해 평가하며, Group 2는 구조적 손상의 손상 강도를 각각 분류하여 손상도를 평가한다.

3.2 석탑문화재 손상 등급 분류 기준

석탑문화재의 손상 유형에 따른 손상 등급 분류를 이용하여 손상 지수를 산정하기 위해 구조물의 거동에 영향을 크게 미치는 구조적 손상 유형에 대해 적용한다. 손상 유형은 구조적 영향 요소와 관련된 손상에 대해서 손상 등급 분류를 실시하며, 손상 유형별 및 손상 위치별 손상 정도의 등급화를 실시하였다.

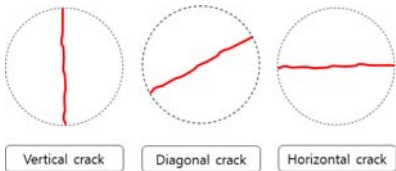
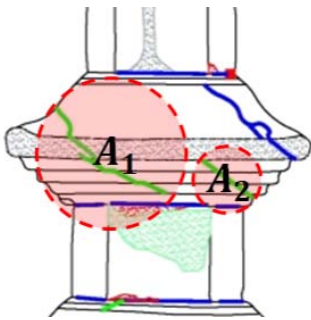
파손, 박리, 돌출 및 탈락 등과 같이 부재의 일부분이 떨어져 나가거나 정면으로 이동하는 손상 형태는 'Group 1(재료의 손실 및 파손)'로 그룹화 하였으며, 균열, 이격, 내구성 저하, 침하, 기울어짐과 같이 부재에 직접적인 영향을 미치는 손상은 'Group 2(구조적 손상)'로 그룹화 하여 손상 등급을 분류하였다.

Group 1의 파손과 박리는 부재 및 손상 부위의 부피로 평가하는 것이 좋으나 문화재의 특성상 해체를 하지 않으면 부재의 깊이를 정확하게 알 수 없으므로 부피에 대한 평가가 아닌 면적에 대한 손상 등급 분류를 실시하였다. 또한 정기 조사 및 정밀 안전 진단 자료에 돌출 및 탈락에 대한 자료가 미흡하기 때문에 손상 등급 분류 시 4개의 입면을 모두 평가한다. 따라서 어느 한 면에 발생한 좌우 부재간 이격을 다른 한 면의 돌출 및 탈락으로 반영하여 부재의 폭에 대한 좌우 부재간 이격 길이를 돌출 길이로 반영한 비율로서 손상 등급을 분류한다.

Group 2 균열의 경우 균열이 발생한 부분뿐만 아니라 주변에 균열이 발생하지 않은 부분에도 영향을 미치기 때문에 균열 길이를 지름으로 하는 원의 면적에 대한 부재의 입면면적비로 손상 등급을

분류한다. 균열에 의한 손상 등급 분류 기준 및 적용 방안은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Classification and application of cracks

	$Crack\ criterion = \frac{A_C}{A_A} \times 100$
	$A_C =$ The circle area that diameter is the crack length
Crack classification criteria	$A_A =$ Elevation area of member
	
Application	
	Damage classification by crack of roof stone
	$Crack\ criteria = \frac{A_1 + A_2}{A_A} \times 100$

석탑문화재에 발생하는 이격은 면석과 우주 등이 벌어지는 좌우 부재간의 이격, 면석과 갑석과 같이 판석과 면석 사이에 발생하는 상하 부재간 이격으로 구분할 수 있다. 좌우 부재간 이격은 하중의 전달 경로를 바꿀 수 있으며, 응력집중 현상을 유발할 수 있기 때문에 상부 부재에 닿고 있는 부재의 길이 변화율로서 손상 등급을 평가하며, 상하 부재간 이격은 적심유출, 응력집중 현상을 유발할 수 있으므로 이격이 발생한 상하 부재의 높이 중 최소값에 대한 상하 부재간 이격 길이에 대한 비율로 손상 등급

을 평가한다. 이와 더불어 다중 부재로 구성된 석탑의 경우 통줄눈으로 된 석탑이 존재한다. 그러나 좌우 부재 사이 이격의 손상 등급 분류 기준의 경우 상부 부재에 닿고 있는 길이 비율이지만 통줄눈의 경우 상부 부재에 닿고 있는 길이를 정확하게 알 수 없으므로 부재 폭에 대한 이격 길이비로서 손상 등급을 평가한다.

내구성 저하에 대한 손상도를 평가할 경우 일반적으로 초음파 속도를 측정하고 초음파 속도를 이용한 압축강도 추정식을 통해 부재의 강도를 비교한다. 그러나 압축강도 추정식이 정확하지 않은 계산식이므로 국립문화재연구소(2012)¹⁾에서 제시한 풍화도 지수를 통해 내구성 저하에 대한 손상 등급을 평가한다.

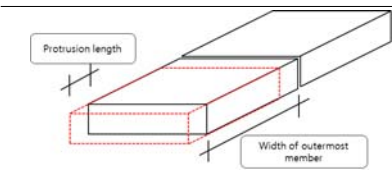
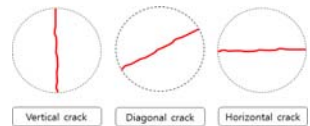
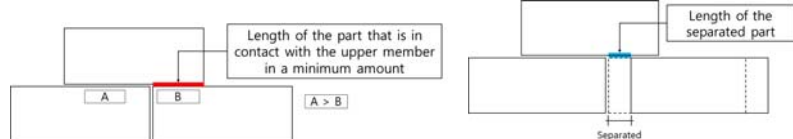
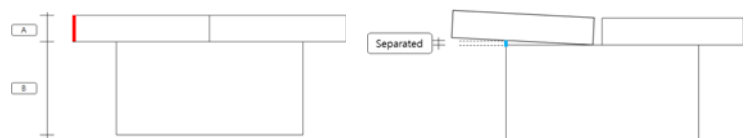
석탑문화재의 침하와 기울어짐에 대한 손상 정도 분류는 정해진 것이 없기 때문에 일반적으로 가장 많이 사용되는 Bjerrum의 각 변위 한계를 사용하여 손상 등급을 평가한다²⁾.

또한 손상 유형별 석탑구조물의 거동에 영향을 미치는 정도에 따라 가중치를 부여하여 각 손상에 따른 손상 정도의 등급 분류를 다르게 설정하였다. 파손은 부재의 일부가 떨어져 나가면서 응력집중 현상을 발생시켜 석탑에 큰 영향을 미치므로 가중치를 더 부여하였고, 박리의 경우 표면이 일부 떨어져 나가는 현상으로 비교적 석탑에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 적은 가중치가 부여되었다. 돌출 및 탈락과 이격의 경우 파손, 박리와 달리 길이비로 측정되므로 적절한 손상 등급이 평가될 수 있도록 손상 정도에 따른 등급 분류를 설정하였다.

균열의 손상 정도에 따른 등급 분류 기준은 균열 길이를 원의 면적으로 변환하여 손상 등급을 평가하기 때문에 크기가 작은 균열부터 관통 균열까지 모두 반영될 수 있도록 손상 정도의 비율을 설정하였다.

이와 더불어 석탑의 손상 위치에 따라 손상 유형이 미치는 영향이 다르기 때문에 석탑을 기단부, 탑신 하부, 탑신 상부로 구분하여 손상 위치에 따른 가중치를 반영하였으며, 침하 및 기울어짐과 같은 손상의 경우 단일 부재에 발생하는 손상이 아닌 석탑문화재 전체에 발생하는 손상이므로 구조물 전체에 대해서 손상 등급을 평가하였다.

〈Table 3〉 Classification standard of damage ratings according to structural factors of stone pagoda structures

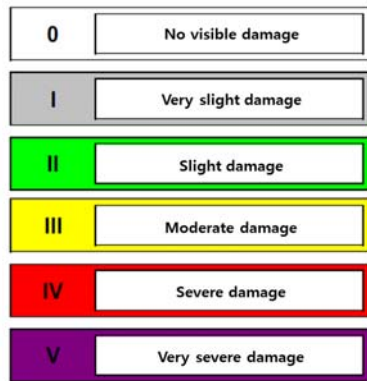
Damage types		Damage classification criteria	
Group 1 Loss and break out of stone material	Break out	- Calculation of the area ratio of damaged part (Use the elevation area)	
	Exfoliation	- Calculation of the area ratio of exfoliated part (Use the elevation area)	
	Protrusion and drop out	- Calculated as the ratio of the protrusion length to the width of the outermost member	
			Protrusion and drop out criterion = $\frac{\text{Protrusion length}}{\text{Width of outermost member}} \times 100$
	Crack	- The ratio of circle area that diameter is the crack length and the elevation area of the member $\text{Crack criterion} = \frac{A_C}{A_A} \times 100$ A_C = Circle area whose diameter is the crack length A_A = Elevation area of member 	
Interval	- Calculated as the ratio of separation length to the length of member with a small contact 	Separation criteria between right and left members = $\frac{\text{Length of the part where the separation occurred}}{\text{The minimum value of length in contact with upper member}}$	
Group 2 Structural damage	Interval		Separation criteria between upper and lower members = $\frac{\text{Separation length between upper and lower members}}{\text{The minimum value of height of upper and lower members}}$
	Durability degradation	- Evaluation of weathering index by ultrasonic velocity $\text{Weathering index } (k) = \frac{\text{Ultrasonic velocity of fresh stone} - \text{Ultrasonic velocity of weathering stone}}{\text{Ultrasonic velocity of fresh stone}}$	In case of straight joint, separation criteria = $\frac{\text{Distance of separation between right and left members}}{\text{Minimum width of left and right}}$
Settlement	- Based on the measured settlement amount, calculate each angular displacement for each member and then select the most vulnerable value $\text{Angular displacement due to settlement} = \frac{\delta}{D}$ δ : Vertical displacement (Using maximum variation value by longitudinal member) D : Width of stylobate		
Inclination	- Estimation of slope according to inclination of stone pagoda structure $\text{Slope} = \frac{\delta}{H}$ δ : Maximum horizontal displacement (Use the maximum value of the top floor horizontal displacement) H : Height of stone pagoda		

<Table 4> Classification grade according to damage types and locations of stone pagoda structures

Damage types	Damage grade	Damage locations				
		Stylobate	Lower body	Upper body	Whole structure	
Group 1 Loss and break out of stone material	Break out	0	Less than 5%	Less than 10%	Less than 15%	-
		1	5~10%	10~15%	15~20%	-
		2	10~15%	15~20%	20~25%	-
		3	15~20%	20~25%	25~30%	-
		4	20~25%	25~30%	30~35%	-
	5	More than 25%	More than 30%	More than 35%	-	
	Exfoliation	0	Less than 20%	Less than 25%	Less than 30%	-
		1	20~30%	25~35%	30~40%	-
		2	30~40%	35~45%	40~50%	-
		3	40~50%	45~55%	50~60%	-
		4	50~60%	55~65%	60~70%	-
	5	More than 60%	More than 65%	More than 70%	-	
	Protrusion and drop out	0	Less than 3%	Less than 4%	Less than 5%	-
		1	3~6%	4~8%	5~10%	-
		2	6~9%	8~12%	10~15%	-
3		9~12%	12~16%	15~20%	-	
4		12~15%	16~20%	20~25%	-	
5	More than 15%	More than 20%	More than 25%	-		
Group 2 Structural damage	Crack	0	Less than 5%	Less than 10%	Less than 15%	-
		1	5~10%	10~15%	15~20%	-
		2	10~15%	15~20%	20~25%	-
		3	15~25%	20~30%	25~35%	-
		4	25~35%	30~40%	35~45%	-
	5	More than 35%	More than 40%	More than 45%	-	
	Interval	0	Less than 3%	Less than 4%	Less than 5%	-
		1	3~6%	4~8%	5~10%	-
		2	6~9%	8~12%	10~15%	-
		3	9~12%	12~16%	15~20%	-
4		12~15%	16~20%	20~25%	-	
5	More than 15%	More than 20%	More than 25%	-		
Durability degradation	0	0	0	0	-	
	1	0~0.2	0~0.2	0~0.2	-	
	2	0.2~0.4	0.2~0.4	0.2~0.4	-	
	3	0.4~0.6	0.4~0.6	0.4~0.6	-	
	4	0.6~0.8	0.6~0.8	0.6~0.8	-	
5	0.8~1.0	0.8~1.0	0.8~1.0	-		
Settlement	0	-	-	-	Less than 1/900	
	1	-	-	-	1/900~1/750	
	2	-	-	-	1/750~1/500	
	3	-	-	-	1/500~1/250	
	4	-	-	-	1/250~1/150	
5	-	-	-	More than 1/150		
Inclination	0	-	-	-	Less than 1/750	
	1	-	-	-	1/750~1/500	
	2	-	-	-	1/500~1/250	
	3	-	-	-	1/250~1/150	
	4	-	-	-	1/150~1/50	
5	-	-	-	More than 1/50		

3.3 손상도 분석을 통한 손상 지수 산정

3.2절에 제시된 손상 등급 분류 기준 및 등급 분류를 통해 석탑문화재의 손상 유형에 따른 손상 등급을 정량적으로 평가하기 위해 손상 범주와 손상 지수를 이용하여 손상에 대한 정량적인 평가를 실시한다. 손상 범주를 통해 손상 유형에 대한 등급 설정이 이루어지고, 손상 지수를 통해 석탑문화재의 손상에 대한 지표화가 수행된다. 손상 범주는 <Fig. 3>과 같이 '눈에 띄는 피해 없음'부터 '매우 심각한 손상'까지 6가지의 등급으로 분류된다.



<Fig. 3> Classification of damage category

손상 피해의 정량화 및 지표화를 위한 손상 지수는 Fitzner & Heinrichs(2002)⁵⁾의 연구 자료에서 제시한 <Table 5>의 식을 통해 산정되며, 손상 범주의 정량적 평가를 기반으로 실시한다.

<Table 5> Linear and progressive damage index

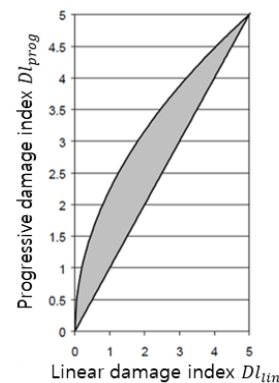
Linear damage index	$Dl_{lin} = \frac{(A \cdot 0) + (B \cdot 1) + (C \cdot 2) + (D \cdot 3) + (E \cdot 4) + (F \cdot 5)}{100}$ \downarrow $\frac{B + (C \cdot 2) + (D \cdot 3) + (E \cdot 4) + (F \cdot 5)}{100}$
	$Dl_{prog} = \sqrt{\frac{(A \cdot 0^2) + (B \cdot 1^2) + (C \cdot 2^2) + (D \cdot 3^2) + (E \cdot 4^2) + (F \cdot 5^2)}{100}}$ \downarrow $\sqrt{\frac{B + (C \cdot 4) + (D \cdot 9) + (E \cdot 16) + (F \cdot 25)}{100}}$
<p>A = Ratio (%) - damage category 0 D = Ratio (%) - damage category 3 B = Ratio (%) - damage category 1 E = Ratio (%) - damage category 4 C = Ratio (%) - damage category 2 F = Ratio (%) - damage category 5</p>	
$\sum_A^F = 100 \quad 0 \leq Dl_{lin} \leq 5 \quad 0 \leq Dl_{prog} \leq 5$	

선형 손상 지수는 각 손상 범주에 대한 면적 비율을 이용하여 전체적인 손상 비율을 나타내는 반면에 누적 손상 지수는 높은 손상 피해율을 나타낸다. 예를 들어 <Table 6>과 같이 A, B, C, D 모두 같은 선형 손상 지수를 나타내지만, 손상 범주가 낮은 A는 누적 손상 지수와 선형 손상 지수가 동일하다. 그러나 D의 경우 누적 손상 지수와 선형 손상 지수가 1.2정도 차이가 발생한다. 이러한 차이는 같은 값의 선형 손상 지수를 가지는 경우 누적 손상 지수가 클수록 보존 대책의 필요성과 긴급성을 평가하는데 사용할 수 있다.

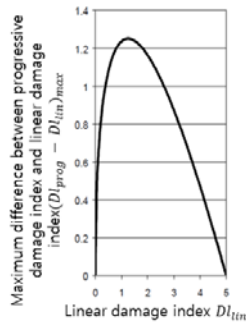
<Table 6> Linear damage index and range of progressive damage index for different proportions of damage categories

	A	B	C	D
Damage category 0	-	40	60	80
Proportion of damage categories - area (%)	100	30	10	-
Damage category 1	-	20	10	-
Damage category 2	-	10	10	-
Damage category 3	-	-	10	-
Damage category 4	-	-	-	20
Damage category 5	-	-	-	-
Linear damage index (Dl_{lin})	1.0			
Progressive damage index (Dl_{prog})	1.0	1.4	1.7	2.2
Need/Urgency of preservation				

또한 <Table 5>의 식의 계산 결과에 따르면 선형 및 누적 손상 지수는 모두 0에서 5.0 사이의 범위로 나타나며, 이를 바탕으로 <Fig. 4>, <Fig. 5>와 같이 그래프로 나타낼 수 있다^{5),6)}.



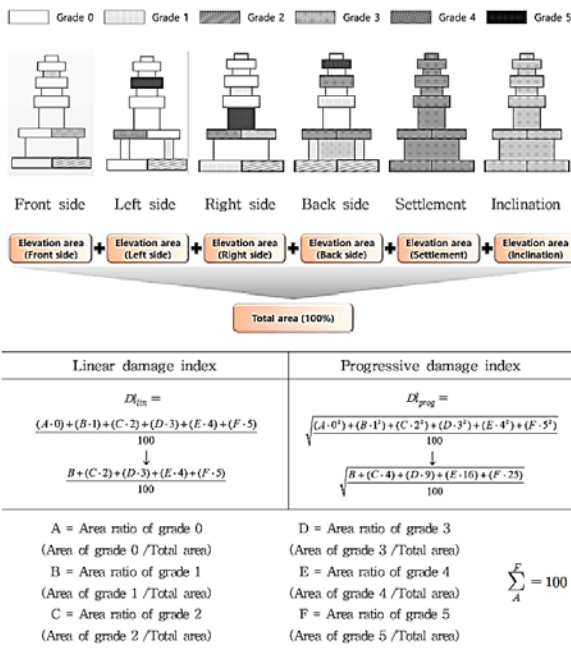
<Fig. 4> Range of the relation between linear damage index and progressive damage index



〈Fig. 5〉 Maximum difference between progressive damage index and linear damage index

〈Fig. 4〉의 경우 각 선형 손상 지수에 상응하는 누적 손상 지수 사이의 관계되는 범위를 나타내며, 〈Fig. 5〉는 각 선형 손상 지수에 대해 누적 손상과 선형 손상 지수간의 상응하는 최대 차이를 나타낸다.

이러한 손상 지수 산정을 통해 석탑문화재의 전체적인 손상도를 평가하기 위해서 석탑 4개의 입면과 침하 및 기울어짐을 각각 1면으로 산정하여 총 6개 면을 전체 면적으로 하고, 전체 면적에 대한 부재별 손상 등급의 분포 비율을 통해 〈Fig. 6〉과 같이 손상 지수 산정 및 손상도를 평가한다. 이 때 침하와 기울어짐에 대한 면적은 4개의 입면면적의 평균값으로 산정하며, 부재별 손상 등급에 따라 전체 면적에 대한 면적비로서 손상도를 평가한다.



〈Fig. 6〉 Damage assessment plan using damage index

3.4 손상 지수 평가를 통한 손상도 등급화 방안

손상 유형별 손상 지수를 지표화 하기 위해 0~5.0 사이의 손상 지수를 6단계로 구분하여 손상 단계별 등급으로 분류하고, 각 단계별 손상도와 손상 상태를 제시한다. 손상도 평가 결과를 통해 얻어진 손상 지수 값을 바탕으로 〈Table 7〉을 통한 손상도 등급화가 수행될 수 있다.

〈Table 7〉 Damage rating based on damage index

Damage index	$0.0 \leq D_{lin} < 0.5$		
Damage grade	D0	Damage degree	No damage
Damage status	No visible damage		
Damage index	$0.5 \leq D_{lin} < 1.5$		
Damage grade	D1	Damage degree	Very slight damage
Damage status	Minor defects appear in the structure and there is little damage		
Damage index	$1.5 \leq D_{lin} < 2.5$		
Damage grade	D2	Damage degree	Slight damage
Damage status	In the state where slight defect occurs, requiring continuous observation by the eye		
Damage index	$2.5 \leq D_{lin} < 3.5$		
Damage grade	D3	Damage degree	Moderate damage
Damage status	Maintenance is not required immediately, but precision investigation or automatic measurement monitoring is required		
Damage index	$3.5 \leq D_{lin} < 4.5$		
Damage grade	D4	Damage degree	Severe damage
Damage status	Defects occurred in the main members, urgent repair and reinforcement is required and it is necessary to decide whether to restrict use or not		
Damage index	$4.5 \leq D_{lin} < 5.0$		
Damage grade	D5	Damage degree	Very severe damage
Damage status	Conditions requiring immediate repair and reinforcement or dismantling restoration due to serious defects in major members		

4. 손상도 평가의 적용 사례

본 연구에서는 문경 내화리 삼층석탑을 대상으로 손상 유형을 분류하고, 손상 등급 분류 기준에 따라 부재별 손상 범주를 분류하여 손상 지수를 산정하였다. 우선 문경 내화리 삼층석탑의 손상 유형은 훼손도, 초음파 측정 자료, 변위·변형 자료 등의 현황 자료^{3),4)}를 참고하여 분류하였다. 파손, 박리, 돌출 및 탈락, 균열, 내구성 저하의 경우 부재별 손상 발생 여부를 분석하여 손상이 발생한 부재의 개수를 정리하였다. 반면 이격은 부재간 접촉면에 발생하기 때문에 이격이 발생한 부재 접촉면의 개수를 파악하였으며, 침하와 기울어짐은 손상 발생 여부에 따라 구조물 전체에 대해서 정리하였다. <Table 8>은 문경 내화리 삼층석탑에 발생한 손상 유형별 손상 부재수를 파악하여 정리한 것이다.

<Table 8> Damage types of three story stone pagoda in Mungyeong Naehwa-ri

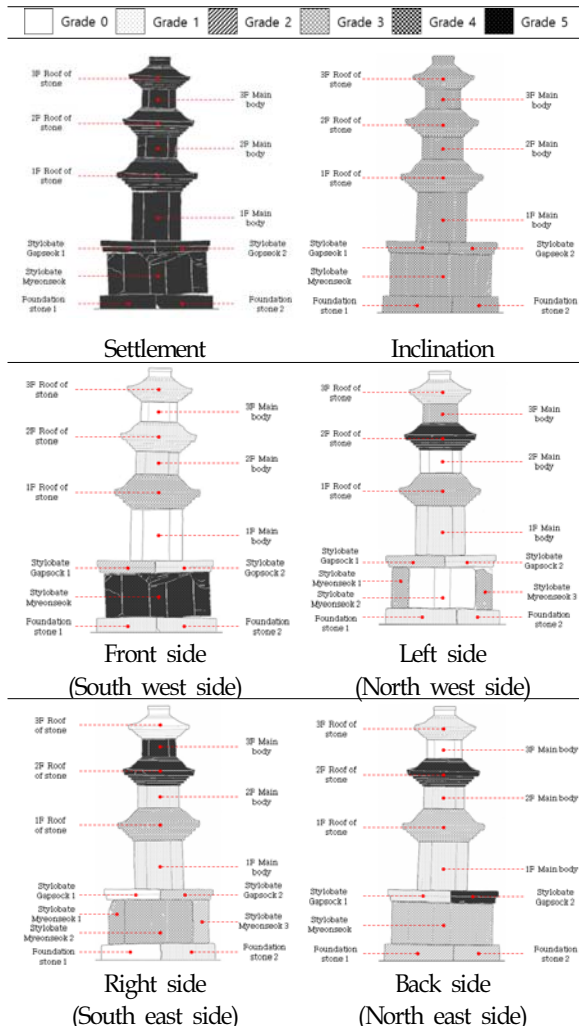
Classification	Damage types				
	Loss and break out of stone material				Protrusion and drop out
	Break out	Exfoliation			
Front side (South west side)	6	3			2
Left side (North west side)	8	3			3
Right side (South east side)	9	3			1
Back side (North east side)	5	0			2
Total	28	9			8
Classification	Structural damage				
	Crack	Interval	Durability degradation	Settlement	Inclination
Front side (South west side)	1	9	11		
Left side (North west side)	2	6	13		
Right side (South east side)	3	9	13	1	1
Back side (North east side)	3	8	11		
Total	9	32	48	1	1

문경 내화리 삼층석탑의 개별 부재에 따른 손상 유형 분류 및 손상도 평가를 수행하였으며, 각 방향의 개별 부재의 손상 등급과 손상 지수를 검토한 결과 배면(북동측), 정면(남서측), 우측면(남동측), 좌측면(북서측) 순으로 크게 나타났으며, 손상 지수는 각각 2.33, 2.19, 2.16, 1.71로 나타났다. 또한 침하와 기울기의 손상 등급 평가를 위해 변위 및 변형 자료를 평가한 결과 문경 내화리 삼층석탑의 최상층 수평 변위는 85mm, 지대석의 최대 수직 변위는 47mm로 나타났다. 이를 이용하여 산정한 각 변위는 침하 9/383(1/42), 기울어짐 18/911(1/51)로 산정되며, 손상 등급은 각각 5등급과 4등급으로 나타나 구조적 안전성에 영향이 있을 것으로 판단된다. 문경 내화리 삼층석탑의 각 위치별 및 구조물 전체별 손상도 평가는 <Table 9>에 요약되어 있다.

<Table 9> Damage evaluation sheet of three story stone pagoda in Mungyeong Naehwa-ri

Location	Assessment of damage	
	Grade	Percentage
Front side (South west side)	0	18.98 %
	1	36.95 %
	2	3.72 %
	3	13.42 %
	4	0.00 %
	5	26.94 %
Linear damage index		2.19
Left side (North west side)	0	22.92 %
	1	37.35 %
	2	4.29 %
	3	25.82 %
	4	0.00 %
	5	9.61 %
Linear damage index		1.71
Right side (South east side)	0	16.97 %
	1	26.04 %
	2	8.21 %
	3	35.02 %
	4	0.00 %
	5	13.77 %
Linear damage index		2.16
Back side (North east side)	0	4.06 %
	1	30.68 %
	2	12.12 %
	3	39.22 %
	4	9.67 %
	5	4.25 %
Linear damage index		2.33
Settlement	Grade 5 (Angular displacement : 1/42)	
Inclination	Grade 4 (Angular displacement : 1/51)	
Whole structure	0	10.51 %
	1	21.86 %
	2	4.70 %
	3	18.83 %
	4	18.26 %
	5	25.83 %
Linear damage index		2.90
Progressive damage index		3.39

〈Table 10〉 Damage mapping of three story stone pagoda in Mungyeong Naehwa-ri



방향에 따른 부재 전체의 손상 등급을 검토한 결과, 파손은 네 방향에서 고르게 나타나며 입면면적이 비교적 큰 기단면석에 가장 많이 발생하여 손상 지수에 영향을 크게 영향을 끼친다. 박리의 경우 석탑 전체에 부분적으로 발생하였으나 그 면적이 크지 않고 구조적으로 큰 영향을 미치지 않아 손상 지수 산정에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한 석탑의 방위별 손상 지수는 크지 않으나 2층 옥개석 균열이 정면을 제외한 4개면에서 크게 발생하였으므로 2층 옥개석에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

석탑 전체에 대한 손상도를 평가한 결과, 석탑 전체 면적에 대한 손상 등급 비율은 0등급 10.51%,

1등급 21.86%, 2등급 4.70%, 3등급 18.83%, 4등급 18.26%, 5등급 25.83%로 나타난다. 방향에 따른 손상도 분석에서는 4등급과 5등급의 손상 등급을 가진 부재가 적으나 석탑 전체에 대한 손상도 평가에서는 4등급과 5등급의 비율이 크게 나타난다. 이는 침하와 기울어짐에 대한 면적 비율이 16.67%로 크기 때문에 높은 손상 등급을 가진 침하와 기울어짐의 영향이 큰 것으로 판단된다. 이에 따라 석탑 전체에 대한 선형 손상 지수는 2.90, 누적 손상 지수는 3.39로 나타났다. 여기서 선형 손상 지수와 누적 손상 지수와와의 차이는 0.49로 나타나게 되는데 이는 높은 손상 등급의 비율이 높기 때문에 차이가 나는 것으로 판단되며, 선형 손상 지수와 누적 손상 지수와와의 차이가 커질수록 보존 대책의 필요성과 긴급성이 커지는 것을 나타낸다.

문경 내화리 삼층석탑의 정기 조사 및 정밀 안전 진단 결과⁴⁾, 큰 구조적 문제점은 없으나 정기적인 계측 관리를 통한 상시 모니터링 또는 집중적인 관찰이 필요하다는 것으로 보아 정기 조사 및 정밀 안전 진단 자료도 손상도 등급이 D3에 해당된다고 할 수 있다. 또한 손상도 분석을 통해 문경 내화리 삼층석탑의 손상도를 분석한 결과 손상 지수가 2.90이므로 D3으로 나타났다. 이에 따라 문경 내화리 삼층석탑의 손상도 평가 결과와 기존에 실시한 정기 조사 및 정밀 안전 진단 결과를 비교해 본 결과 모두 D3으로 유사하게 나타난 것으로 보아 손상도 평가만으로도 석탑의 상태를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

〈Table 11〉 Damage assesment comparison results

Name	Stone pagoda in Mungyeong Naehwa-ri
Linear damage index	2.90
Progressive damage index	3.39
Differences between linear damage index and progressive damage index	0.49
Damage grade	D3
Regular survey results	D3
Precision safety diagnosis results	D3

5. 결론

1) 본 연구에서는 석탑문화재의 손상 유형을 분류하고, 구조적 손상에 따른 손상 등급 분류 기준을 제시하고, 손상 정도에 따른 손상 등급을 분류하여 부재별 손상도를 평가하고 손상 지수를 이용하여 석탑문화재의 전반적인 손상도 평가 방안을 제시하였다.

2) 석탑문화재에는 여러 가지 손상 중 균열, 이격, 파손, 돌출 및 탈락, 기울어짐, 침하, 내구성 저하 등의 손상은 구조적으로 영향을 미치는 것으로 판단되어 구조적 손상으로 분류하였다. 반면 부식, 백화, 변색, 지의류 등의 손상은 구조적으로 크게 영향을 미치지 않고 부재 표면에 영향을 미치므로 비구조적 손상으로 분류하였다.

3) 손상도 평가의 경우 정기 조사 및 정밀 안전 진단의 주관적인 석탑의 상태 평가를 정량화 및 지표화 시키기 위해 개발되었으며, 구조물의 거동에 크게 영향을 미치는 구조적 손상에 대해서 손상 유형별 및 손상 위치별 손상 등급 분류 기준 및 손상 정도의 등급 분류를 제시하였다. 이와 더불어 석탑문화재의 전반적인 손상도를 평가하기 위한 손상 지수를 제시하고 손상 지수에 따른 손상도 등급을 제시하였다.

4) 문경 내화리 삼층석탑의 손상도 평가 결과, 정기 조사 및 정밀 안전 진단 결과와 유사하게 나타나 손상도 평가만으로도 석탑의 상태를 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 힘의 흐름상 주요 위치에 있는 일부 부재에 심각한 손상이 발생할 경우 구조물 전체적으로 위협할 수 있으므로 석탑 전체에 대한 평균적인 손상 평가뿐만 아니라 부재별, 입면별 손상 평가가 동반되어야 할 것으로 판단된다.

5) 본 연구에서 제안된 손상도 평가 방법이 실무에 적용된다면 기존에 정성적으로 석탑의 상태를 평가하는 방법에서 벗어나 정량적으로 석탑의 상태를 판별할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 연구의 손상도 평가 기법이 석탑의 다양한 손상 유형을 모두 반영하기 어려우므로 지속적인 연구를 통해 보완한다면 석탑문화재의 손상도를 체계적으로 평가하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2017년 문화재청 국립문화재연구소의 연구용역지원으로 수행되었음. 또한 이 논문은 2017~2018년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임.

References

1. National Research Institute of Cultural Heritage, "Nondestructive Evaluation of Weathering Degree for Stone Cultural Heritage using Ultrasonic Test", 2012
 2. National Research Institute of Cultural Heritage, "Research on Classification of Stone Pagoda Damage Types and Damage Assessment", 2017
 3. National Research Institute of Cultural Heritage, "Stone pagoda of Gyeongsangbuk-do VIII", 2014
 4. Mungyeong City, "Mungyeong Naehwa-ri Three Story Stone Pagoda Precision Safety Diagnosis Report", 2016
 5. Fitzner, B., & Heinrichs, K., "Damage diagnosis on stone monuments - weathering forms, damage categories and damage indices", Understanding and managing stone decay, Charles University, Prague, The Karolinum Press, 2002.
 6. Fitzner, B., Heinrichs, K., & La Bouchardiere, D. (2002). Damage index for stone monuments, Proceedings of the 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Sevilla, Spain, pp.315~326
- Received : April 20, 2018
 - Revised : May 14, 2018
 - Accepted : May 15, 2018