

# 통계적 방법을 이용한 복합조직강의 변형률과 보이드 성장거동에 관한 연구

오경훈\*(경희대 대학원 기계공학과), 유용석\*\*(CANTIBio.Inc),  
오택열\*\*\*(경희대 기계산업시스템공학부)

## A Study on Strain-Void Growth Mechanism of Dual Phase Steel by Statistical Method

K. H. Oh(Mech. Eng. Dept., KHU), Y. S. Yu(CANTIBio.Inc),  
T. Y. Oh(Mech & Indus. Eng. Dept., KHU)

### ABSTRACT

Ductile fracture of dual phase steel begins with void nucleation, at martensite-ferrite interface of deformed martensite particle. In this study, void nucleation, growth, and coalescence under various strain were studied in dual phase steel. Therefore, by means of the heat treatment of low carbon steel, the study deals with void nucleation and growth for ferrite grain size and martensite volume fraction of dual phase steel using statistical method.

Void nucleation and growth with increasing strain are shown depend upon the ferrite grain size. Voids volume fraction generally increase as ferrite grain size decrease.

**Key Words :** Dual phase steel(복합조직강), Void nucleation(보이드 발생) Void volume fraction(보이드 체적분률), Statistical method(통계학적 방법), martensite volume fraction(마텐사이트 체적률)

### 1. 서론

일반 철강재료는 강도를 높이면 연성이 감소하고, 연성을 높이면 강도가 떨어지는 경향이 있으나 복합조직강은 연성인 페라이트와 강도를 높여주는 마텐사이트로 구성된 복합조직으로 동일한 강도 수준에서 HSLA강보다 뛰어난 성형성을 갖는 특징 때문에 관심이 증대되어 왔다. 보이드 성장과 관련한 연성파괴에 대한 연구 동향은 다음과 같다.

1960년대 초 Rogers는 소성변형하는 동안 성장한 내부 보이드가 결합하여 넥킹현상과 Cup and Cone 파괴현상이 발생하며<sup>(1)</sup>, Gurland & Plateau는 보이드와 연성파괴의 현상학적 관계를 규명하였다.<sup>(2)</sup> McClintock, Rice & Tracy는 보이드 성장은

응력 증가와 함께 지수적으로 증가한다고 예측하였고<sup>(3,4)</sup>, 1970년대 초 Needleman은 연성재료에서 미소크랙을 발생시키는 중요한 요인인 보이드에 대한 발생 기전과 보이드간의 상호작용에 대해 설명하였다<sup>(5)</sup>. Gurson는 국부적인 소성 유동에서 특징적인 과정을 관찰하여 porous 연성 재료에 대한 유동법칙과 항복조건을 수학적 방법으로 확립시켰고<sup>(6)</sup>, Tvergaard는 구성 방정식에 따라 연속체 모델에서 Gurson의 항복 조건에 수정계수를 사용하여 보다 정확한 항복조건을 제시하였다<sup>(7)</sup>.

Hancock는 보이드 간의 상호작용을 보이드 변형으로 설명하였고<sup>(8)</sup>, Hom & McMeeking은 3차원 모델에서 거시적인 응력-변형을 거동을 조사하였다<sup>(9)</sup>.

1990년대 초 Tvergaard & Hutchinson은 보이드가

주지 않는다고 하였다<sup>(10)</sup>. 최근에는 유한요소법을 이용한 다양한 3차원 해석과 공간적 배열의 영향, 파라메타의 선정 기준과 각 파라메타에 대한 임계 기준을 대해 연구되어지고 있다<sup>(11)(12)</sup>.

재료의 파괴는 연성-취성의 거시적 파괴양상은 미시적 파괴과정과 밀접한 관계가 있으며, 미시적 파괴과정은 근본적으로 보이드의 발생, 성장과 관련이 있다. 2상 이상의 복합조직에 대해 각 상간에 존재하는 역학적 구속성으로 기인하는 내부 유동응력과 변형률에 관련하여 보이드 성장거동을 합리화하는 것은 연성파괴연구에 있어 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 보이드 발생 및 성장에 관한 연성파괴이론인 수정 Tvergaard -Gurson이론과 Needleman의 보이드 생성에 관한 통계학적 방법<sup>(13)</sup>을 복합조직강에 적용시켜, 복합조직강의 여러 미시조직 인자 중 grain size와 결합형태를 변화시켜 동일한 마텐사이트 체적분율을 갖는 복합조직강의 비선형 응력-변형거동을 관찰하고 각 상내에 존재하는 국부변형률 분포와 보이드 성장거동의 연관성을 규명하고 합리화하는데 그 목적이 있다.

## 2. Gurson-Tvergaard의 소성 모델

Gurson은 초기 보이드를 포함한 연성 재료를 강 완전소성체와 Von-mises 항복조건을 따르는 연속체로 가정하고, 보이드의 생성을 소성유동거동을 이용하여 간접적으로 해석함으로써, 단일 구형 보이드를 기본 모델로 하는  $\Phi(P, \sigma_y, f) = 0$ 를 항복조건으로 제시하였다.

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(-\frac{3}{2} q_2 \frac{P}{\sigma_y}\right) - (1 + (q_1 f^*)^2) \quad (1)$$

$f^*$ 는 보이드 체적분률  $f$ 의 함수이다.

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + f_{uc}(f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_e$ 는 Von Mises 유효응력,  $\sigma_y$ 는 단축 응력상태의 항복응력,  $P$ 는 정수압 응력,  $f^*$ 는 보이드 체적분률률 나타낸다.

식(1)에서  $q_i = 1(i=1, 2)$ 일 때 Gurson의 항복조건식이며, Tvergaard는  $q_1 = 1.5$ ,  $q_2 = 1.0$ 로 제안하였다.

Gurson의 모델과 고전적인 소성 모델과 가장 큰 차이점은 Gurson의 모델은 정수압응력과 보이드의 의존성을 보이지만 고전적인 소성모델에서는 독립적이란 것을 알 수 있다.

$f=0$ 에 대해서는 Von-mises 항복조건과 일치하며, 위의 항복 조건식을 항복 궤적과 응력-변형률 곡선을 나타내면 다음과 같다.

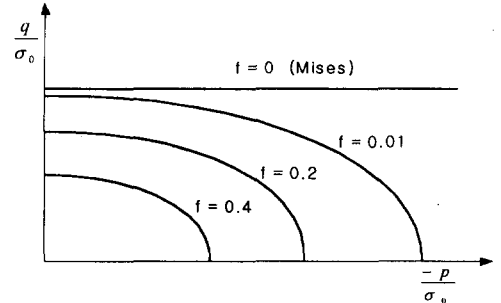


Fig. 1 Schematic of the yield surface in  $p$ - $q$  plane

Gurson은 거시적인 소성변형률의 증가량은 식(3)과 같이 표현된다.

$$d\varepsilon^P = d\Lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \quad (3)$$

$\Lambda$ 은 재료의 가공 경화 거동과 거시적인 응력에 의해 결정되고, 모재에서 미시적인 등가 소성변형률  $d\varepsilon^P$ 는 다음과 같이 표현된 등가 소성일로부터 얻어낼 수 있다.

$$(1-f)\sigma_y d\varepsilon^P = \sigma_i d\varepsilon^P \quad (4)$$

여기서  $(1-f)$ 는 모재의 체적분률이다.

변형이 증가하는 동안 보이드 체적변형률 변화는 새롭게 생성되는 보이드와 생성된 보이드의 합체, 성장을 반복하며 식(5)과 같이 쓸 수 있다.

$$df = df_g + df_N \quad (5)$$

보이드 성장 변화율은

$$df_g = (1-f)d\varepsilon^P \quad (6)$$

Gurson에 의하면 보이드 발생률은 두 개의 파라미터의 관계로 표현되어진다.

$$df_N = A(d\bar{\sigma}) + B(P) \quad (7)$$

식(7)의  $A$ 와  $B$ 는 유동응력의 변화량과 정수압 응력의 변화량에서 보이드 발생에 의존하는 파라미터이다.

보이드 발생과 국부 유동과의 관계를 Gurson은 평면변형률상태에서 보이드 발생은 모재의 등가 소성변형률과 연관시켰고, Chu & Needleman에 의해 보이드 생성에 관한 통계적 방법을 제시되었다<sup>(14)</sup>

$$df_N = A d(\bar{\sigma}) = A(d\bar{\epsilon}^P) \quad (8)$$

$$A = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{\epsilon}^P - \epsilon_N}{S_N}\right)^2\right\} \quad (9)$$

식(9)의  $\epsilon_N$ 는 보이드 생성시 평균 분산값,  $S_N$ 은 보이드의 표준편차값 그리고  $f_N$ 은 보이드 체적분율을 나타낸다.  $A$ 는 소성 변형률과 정수압 응력의 의존도를 나타낸다.

### 3. 실험방법

본 실험에서는 구조용 저탄소강 SM10C를 시편으로 사용하였으며 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt%)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Cr
SM10C	0.11	0.19	0.54	0.04	0.12	0.033

위의 시편을 열처리 조건에 따라 열처리하여 미시조직의 연결형태에 따라 페라이트가 마텐사이트를 둘러싸인 형태를 고립형(Type F), 마텐사이트가 페라이트를 둘러싼 형태를 연결형(Type M)라 칭하였고, grain size가 큰 것부터 차례로 1, 2, 3의 첨자를 부여하였다.

### 4. 유한요소해석

본 해석에서는 Gurson의 소성모델을 기초로 하여 유한요소 해석을 수행할 수 있는 상용 유한요소 프로그램 ABAQUS/standard를 사용하였다.

유한요소해석을 위한 모델은 Fig.2와 같이 열처리한 시편의 미시조직을 촬영하여, 지름의 길이와 같은 가로×세로가 14×14(mm)를 갖는 정사각형에

투영시키고 삼각형 요소로 모델링하였다. Grain size은 Type M과 Type F의 크기순으로 50 : 25 : 10로 하고, 마텐사이트 체적률(MVF)는 모든 모델에 대해 50%로 적용하였다.

경계조건은 중심(C-D)은 x 변위는 구속 ( $u_x = 0$ )시키고, 하단부(A-B)의 절점들은 x, y 변위를 구속 ( $u_i = 0$ )시켰으며, 상단(E-F)에는  $u_x = 0$ ,  $u_y = 5$ 의 변위를 주었다. 나머지 모든 절점들은 자유롭게 움직일 수 있도록 경계조건을 주고 평면 변형률 상태로 해석하였다.

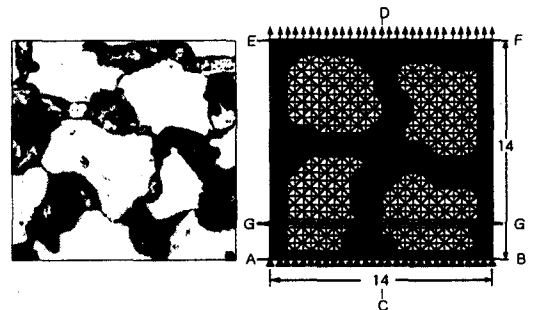


Fig. 2 Finite element model of type M1

통계적 방법을 이용한 보이드 생성거동의 유한요소 해석 파라미터는 Tivergaard의 수정계수와 Needleman의 보이드 생성계수를 사용하였고 TABLE 2에 정리하였다.

Table 2 Parameters of Gurson's yield function and void nucleation for finite element analysis

Parameter of Gurson's yield function				*Void Nucleation		
$q_1$	$q_2$	$q_3$	$r$	$\epsilon_N$	$S_N$	$f_N$
1.5	1.0	2.25	1	0.3	0.1	0.04

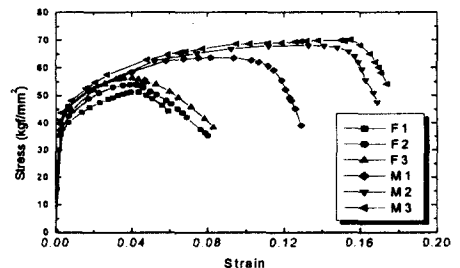


Fig. 3 Stress-strain curve by FEM

Fig.3은 유한요소해석을 통하여 응력-변형률 곡선을 얻어낸 그림이다. 연결재가 고립재보다 항복강도 및 파괴강도가 높게 나타났는데 이것은 종전의 연구결과와 일치하였다.

## 5. 결과 및 고찰

본 연구에서 유한요소해석을 수행한 결과 각 상 내에 존재하는 응력-변형률의 구배는 매우 복잡한 양상을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 절에서는 주어진 변형률 수준에서 Von-Mises 항복응력을 기준으로 보이드의 체적분률을 살펴보고자 한다.

각 상 내에 응력-변형률의 내부 분포를 Gurson의 소성모델과 각 변형률 단계에서 Needleman의 통계적 방법으로 보이드의 체적분률을 계산하였다.

### 5.1 변형률과 보이드 체적분률과의 관계

해석결과는 모든 시편에서 변형률의 증가와 함께 보이드 체적분률이 증가하였고, grain size가 감소할수록 보이드 체적분률은 증가하였다. 연결재보다 고립재가 변형률의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

Fig.4는 M1재의 축방향 국부변형률이 10%, 30%, 60%일 때의 Fig.2의 G-G선상에 존재하는 유한요소의 보이드 체적분률을 나타낸 것으로 변형률이 증가하면 보이드의 체적분률은 지수적으로 증가하였다. 이는 서로 다른 성질을 갖는 두 상이 내부에 존재함으로써 내부적으로 응력의 불균일이 발생하고, 이것이 내부 변형률에 영향을 주며 두 상간의 변형률의 불일치현상을 야기시킴으로써 보이드의 성장과 체적분률을 증가시킨다.

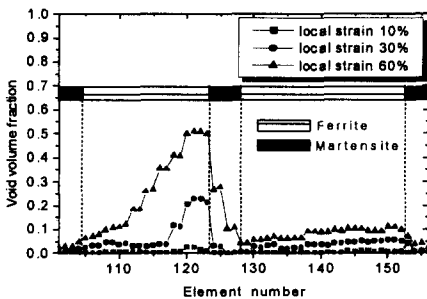


Fig.4 Void volume fraction of M1 along G-G

Fig.5는 Fig.2의 G-G선 상에 존재하는 유한요소의 국부변형률을 나타낸 것으로 내부 변형률은 페라이트상에서 가장 크고 마텐사이트상에서 가장 작

게 나타나며, 변형률이 마텐사이트상에서 최소가 되는 이유는 연성인 페라이트상이 더 큰 전변형률을 가지기 때문이다. 또 마텐사이트의 최대변형은 페라이트상과 적합성을 유지하기 위해 페라이트상과의 계면에서 발생한다. 페라이트상의 최대변형은 마텐사이트상으로 구속되는 곳으로부터 중앙에서 발생한다.

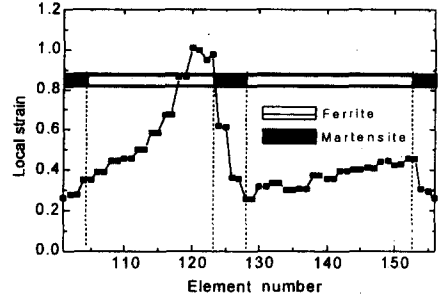


Fig. 5 Local strain of M1 along G-G

Fig.6은 Von-Mises 유효응력을 나타낸 것으로 응력분포는 마텐사이트상에서 높게 나타나고, 최대응력은 마텐사이트의 변형이 가장 높을 때 나타난다. 전체적인 응력은 단축 인장방향을 가지지만 내부적으로 성질이 다른 두 상의 존재하기 때문에 매우 복잡한 응력분포를 가지기 때문에 보이드 생성은 응력과 변형의 불일치 구간인 계면에서 보이드 생성의 가능성이 가장 높게 나타나고, 응력집중이 최대가 되고 변형이 가장 작은 마텐사이트상의 중앙부분에서 입자의 파괴가 유발되며 이것이 보이드의 생성의 원인이 됨을 예측할 수 있다.

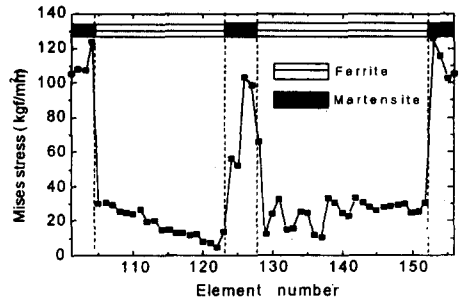


Fig. 6 Mises stress of M1 along G-G

Fig.7은 Fig.2의 G-G단면의 국부 변형률 변화에 따른 보이드의 생성, 성장 그리고 체적분률을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보여지는 것처럼, 초기에

만 보이드가 서서히 발생하지만, 변형률이 약 30% 부터 변형률이 증가하더라도 더 이상의 보이드가 발생하지 않고 일정하게 유지되고, 보이드의 성장 곡선은 보이드의 체적분률곡선과 거의 동일하게 나타나는데, 이는 보이드의 성장이 보이드의 발생보다 변형률에 더 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

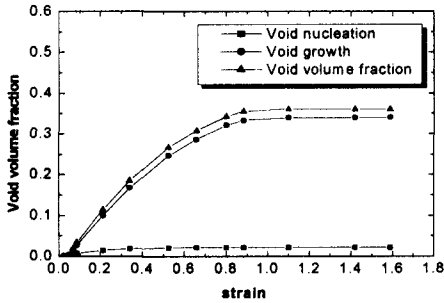


Fig.7 Void volume fraction, nucleation and growth of M1(strain=60%)

### 5.2 Grain size와 보이드 체적분률과의 관계

복합조직강의 고립재와 연결재를 grain size를 변화시켜 해석한 결과 grain size가 변화함에 따라 보이드 체적분률도 변화하게 되는데, 이는 상 내부의 응력 및 변형률의 분포가 grain size가 감소에 따라 보다 복잡한 양상을 가지기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 내부 응력의 복잡성은 유한요소 모델을 이용하여 확인할 수 있다.

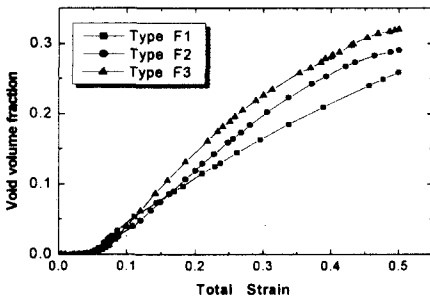


Fig. 8 Void volume fraction vs. total strain of type F

Fig. 8과 Fig. 9은 고립재와 연결재에 대해서 grain size가 변화할 때 전변형률에 대한 보이드 체적분률을 나타내었다.

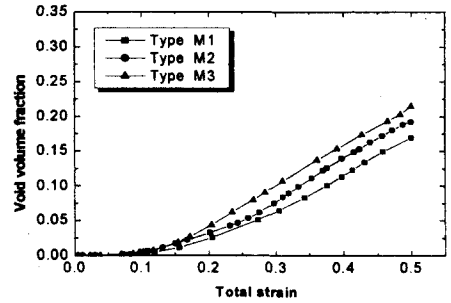


Fig. 9 Void volume fraction vs total strain of type M

Fig. 8와 Fig. 9을 살펴보면 고립재와 연결재 모두 grain size가 작아질수록 보이드 체적분률이 증가하는 경향이 있는데 이는 동일한 마텐사이트 체적률에서 grain size만이 변화하므로 grain size가 작을수록 보다 복잡한 내부 응력의 분포와 두 상의 계면사이에서 변형률의 불연속 구간이 증가하기 때문으로 생각된다.

동일한 변형률에서 보이드 체적분률은 고립재가 연결재보다 높게 나타나고 있다. 그리고 고립재인 경우 변형률이 약 5%에서 보이드가 발생하여 급격하게 증가하다 약 40%부근부터 완만한 곡선을 이루는 반면, 연결재인 경우에는 약 10%에서 보이드가 발생하여 처음에는 완만하게 진행되다 서서히 증가하는 경향을 보이고 있다.

고립재와 연결재 모두 grain size에 관계없이 전변형률과 지수적인 관계를 나타내고 있으며, 고립재가 연결재보다 각 변형률별로 약 10%~20%정도 더 높게 나타나고 있다.

## 6. 결 론

동일한 마텐사이트 체적률을 갖는 복합조직강의 grain size와 연결형태를 고려하여, 수정 Tvergaard-Gurson 이론을 적용, 변형률과 보이드의 성장거동을 통계적 방법으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 변형률이 증가함에 따라 보이드 체적분률은 지수함수의 형태로 증가하며, 고립재가 연결재보다 적은 변형률에서 보이드가 발생하였다.
2. 보이드 체적분률은 마텐사이트상과 페라이트상의 계면에서 최대로 나타나고, 또한 변형률이 가장 크게 발생하는 페라이트상에서도 비교적 높게

나타났다.

3. Grain size가 감소함에 따라 고립재와 연결재 모두 보이드 체적분률은 증가하는데, 이는 상 내부의 응력 및 변형의 분포가 grain size가 감소함에 따라 보다 복잡해지고 변형률의 불일치 구간이 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

4. 고립재가 연결재보다 각각의 grain size에 대해 각 변형률별로 약10~20%정도 많은 보이드 체적분률을 나타냈으며, 이것은 연결재가 고립재보다 인장강도가 높다는 것과 일치한다.

5. 내부 응력분포는 마텐사이트상에서 높은 응력이 작용하고, 변형률은 페라이트상에서 높으며, 보이드 체적분률은 변형률이 큰 페라이트상에서 높게 나타났다. 이는 보이드의 체적분률이 응력보다 변형률의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) Rogers, H. C, Metals, Trans. Metallurgical Society of AIME, Vol.218, pp.498-506, 1960.
- (2) Gurland, J., and Plateau, J., Transactions of the ASM., Vol.56, pp.443-454, 1963.
- (3) McClintock, F. A., Journal of Applied Mechanics, Vol.35, pp.368-371, 1968.
- (4) Rice, J.R, and Tracey, D.M., J. Mech. Phys. Solids, Vol. 17, pp.201-217,1969.
- (5) Needleman,A., Journal of Applied Mechanics, Vol. 39, pp.964-970, 1972.
- (6) A.L. Gurson, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 99, pp.2-15, 1977.
- (7) Viggo Tvergaard, International Journal of Fracture, Vol.17, pp. 389-407, 1981.
- (8) R.D. Thomson and I. W. Hancock, International Journal of Fracture, Vol.26, pp.99-112, 1984.
- (9) C.L. Hom and R.M. McMeeking, Journal of Applied Mechanics, Vol. 55, pp. 309-317, 1989.
- (10) V. Tvergaard and J.W. Hutchinson, Journal of Applied Mechanics, Vol.60, pp. 807-812, 1993.
- (11) Z. L. Zhang, Faigue Fract. eng Mater.

- Struct, Vol. 19, No.5, pp. 561-570, 1996.
- (12) M. Kuta and D.Z.Sun, International Journal of Fracture, Vol.81, pp.235-258.1996
- (13) C. C. Chu and A. Needleman, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.102, pp.249-256, 1980.
- (14) S. H. Goods and L. M. Brown, Acta. Metall, Vol. 27, pp.1-15, 1979.