

# 상변화 고정방식에 의한 마이크로 박벽 구조물의 쾌속제작

신보성<sup>#</sup>

## Rapid Manufacturing of Microscale Thin-walled Structures by Phase Change Workholding Method

Bo Sung Shin<sup>#</sup>

### ABSTRACT

To provide the various machining materials with excellent quality and dimensional accuracy, high-speed machining is very useful tool as one of the most effective rapid manufacturing processes. However, high-speed machining is not suitable for microscale thin-walled structures because of the lack of the structure stiffness to resist the cutting force. A new method which is able to make a very thin-walled structure rapidly will be proposed in this paper. This method is composed two processes, high-speed machining and filling process. Strong workholding force comes out of the solidification of filling materials. Low-melting point metal alloys are used in order to minimize the thermal effect during phase change and to hold arbitrary shape thin-walled structures quickly during high-speed machining. To verify the usefulness of this method, we will show some applications, for examples thin-wall cylinders and hemispherical shells, and compare the experimental results to analyze the dimensional accuracy of typical parts of the structures.

**Key Words** : Filling Process(충진 공정), Low-melting Point Metal Alloys(저융점 금속 합금), High-speed Machining(고속 가공), Thin-walled Structures(마이크로 박벽 구조물), Phase Change(상변화)

### 1. 서론

금형을 빠른 시간 내에 정밀한 형상으로 제작하기 위하여 여러가지 단계의 가공공정들이 필요하다. 이 중에서 정삭가공, 연삭가공 및 방전가공에 의한 마무리 가공시간이 전체 가공 시간의 대부분을 차지하고 있다. 특히 최근 들어 주축회전 및 이동 속도의 고속화 기술이 활발히 진행됨에 따라 마무리 공정 중에서도 연삭가공 및 방전가공공정이 고속가공으로 대체되고 있는 추세이다. 이러한 신제품의 개발 사이클을 점차 단축하고 사용

자 요구에 신속히 대응하고 최종 제품의 품질을 고급화할 뿐만 아니라 최종 제품의 정밀도를 높이기 위한 다각적인 고속 가공 기술 개발이 진행되고 있다.<sup>1,2</sup> 실제적으로 고속 절삭가공에 의한 시금형 쾌속제작공정에 있어서 마무리 제작 시간은 황삭 가공보다 훨씬 많은 시간이 소요된다. 특히, 마이크로급의 얇은 벽과 같은 구조물을 가공하기 위해서는 방전가공(EDM, Electrical Discharge Machining)이 불가피하였다.

본 논문에서는 고속 가공만으로 마이크로 박벽 구조물을 쾌속 제작하는 새로운 방법을 제안하

<sup>\*\*\*</sup> 접수일: 2005년 1월 25일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

<sup>#</sup> 교신저자: 부산대학교 ERC/NSDM

E-mail [bosung@pusan.ac.kr](mailto:bosung@pusan.ac.kr), Tel: (051) 510-2787

였다. 임의 형상의 공작물을 고정(workholding)하기 위하여 사용되는 저융점의 충전의 상변화(phase-change)에 의해 높은 충전저항(filling resistance)을 응용하여 박벽 고속가공시 충분한 공작물 고정력을 갖게 하였다.<sup>3,4</sup> 이 방식에 의하면 보다 쉽고 빠르게 얇은 박벽 형상구조물을 신속히 제작 가능하며, 저융점 금속이 사용되므로 열변형에 의한 후 변형과 치수 변화가 없는 장점이 있다. 궁극적으로는 방전 가공만으로 가능한 마이크로급 박벽 가공이 고속 가공 만으로 실현 되기 때문에 금형 제작비용과 시간을 획기적으로 단축 시킬 수 있다. 따라서 알루미늄 재료를 이용한 몇 가지 형상의 박벽 구조물을 제작하여 직접 보여줌으로써 본 공정의 유용성을 보여주고자 한다.

## 2. 충전 공정

### 2.1 저융점 충전제

먼저 적합한 충전제를 선택하기 위한 기준은 다음과 같다. 첫째, 환경에 친화적이어야 한다. 둘째 열변형부가 적어야 하며 액상과 고상 변화시 온도 차가 낮아야 한다. 셋째 재료형상이 자동화 및 유연성의 확보에 적합하여야 한다. 따라서 충전제는 Table 1 과 같이 저융점 금속 합금(low-melting point metal)들 가운데서 선택하였으며, 재료의 가격, 용융 온도, 열 팽창계수(CTE, coefficient of thermal expansion) 및 환경친화성 등을 고려하여 비납 합금(lead-free alloys) 중의 Bi-42Sn 재료를 선정하였다.<sup>5</sup>

Table 1 Material properties of various filling materials

	Metal Cost/Kg (US \$)	Melting Range(°C)	Tensile Strength(MPa)	Elongation (%)	Wetting Angle(°)	CTE (×10 <sup>-6</sup> /K)
Sn-37Pb	5.87	183	19 (21°C)	-	-	21
Bi-42Sn	7.79	139	41	20 (21°C)	43 ± 8 (195°C)	15
Sn-20In-28Ag	51.65	179-189	46.9	47	44 ± 8 (21°C)	20
Sn-9Zn	7.99	199	64.8	*45	*37 ± 7 (215°C)	-
Sn-5Sb	8.36	232-240	31 (21°C)	25 (21°C)	37 (-)	-

### 2.2 충전 저항 실험

Fig. 1 에서는 보는 바와 같이 본 논문에서는 공작물 충전 저항을 측정하기 위하여 만능 인장 시험기 (universal tensile tester)를 이용한 추출방법 (extracting method)을 이용하였다. 이때 인장시험의 속도 효과를 최소화하기 위하여 0.01mm/sec 로 제어하여 인장력을 측정함으로써 충전저항을 측정하였다. Fig. 2 는 실험에 사용된 충전용기(bath)와 추출 원형봉(extracting circular bar)의 칫수를 보여준다. Fig. 3 에서는 충전 깊이에 따른 충전 저항의 변화를 보여준다. 즉, 충전깊이가 깊어질수록 충전저항이 급격히 증가됨을 알 수 있다. Fig. 4 는 충전 깊이가 70.0 mm 인 경우 순간적인 최대 충전 저항이 3.45 kN 의 강력한 저항값을 나타냄을 보여 주고 있다. 실제적으로 이러한 측정값은 고속가공시 발생하는 절삭력에 비해 충분히 높은 값이기 때문에 얇은벽 구조물 제작시 충분한 고정력을 갖고 있음을 알 수 있다.

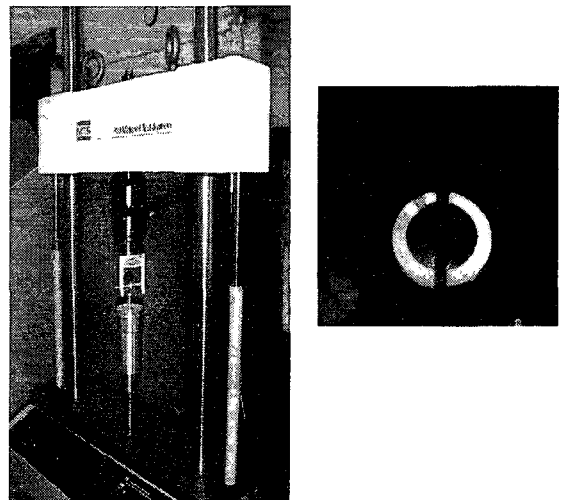


Fig. 1 Experimental set-up for the workholding force on a tensile test machine

## 3. 제작공정

### 3.1 마이크로급 박벽 제작공정 설계

정밀금형 및 가공품의 마지막 공정에 주로 사용되는 EDM 방식에 의존한다. 그러나, 본 논문에서는 고속절삭가공만으로 마이크로급의 박벽 구조물을

직접적으로 빠른 시간 내에 제작하는 것이 목적이다. 통상적으로 벽두께 1.0mm, 높이 10.0mm (벽두께와 벽높이의 비: 10)의 구조물을 고속가공으로 가공 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 본 논문에서는 Fig. 5 와 같이 충전공정을 이용하여 마이크로급의 얇은 벽을 제작하는 공정을 제안하였다.

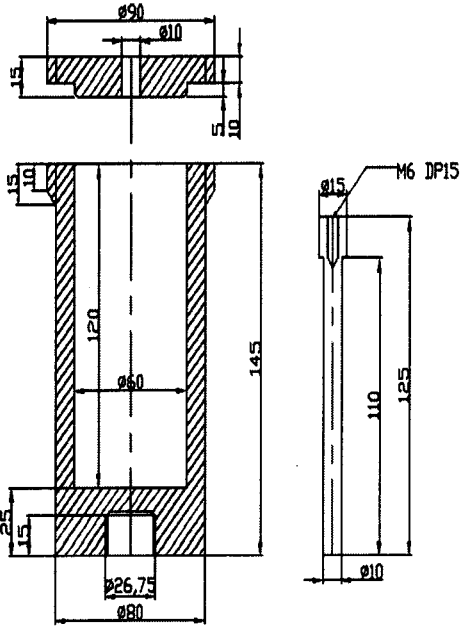


Fig. 2 Dimensions of the test device for workholding force

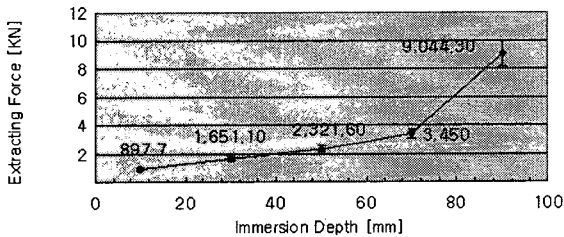


Fig. 3 Workholding force vs. immersion depth

그림에서 보는 바와 같이 가공절차는 매우 간단하다. 먼저 충전공정으로 내/외벽면을 가공한 후 가공영역을 채워서 다음의 가공공정의 절삭가공에 견딜 수 있게 공작물을 고정시킨다. 충전상태가 액상에서 고상으로 상변화가 일어나서 앞 절에서 설명한 바와 같이 충분한 고정력이 발생한 다음,

얇은 박벽 구조물의 외/내면을 절삭가공하고 이후 충전물을 녹여냄으로써 최종설계시 원하는 박벽의 치수를 마이크로급으로 제작할 수 있었다

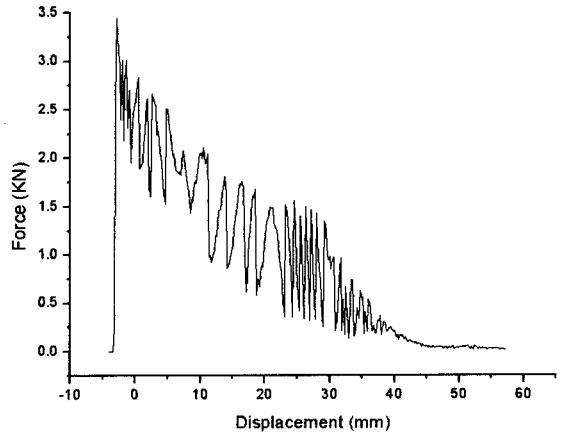


Fig. 4 Workholding force change at an immersion depth of 70 mm

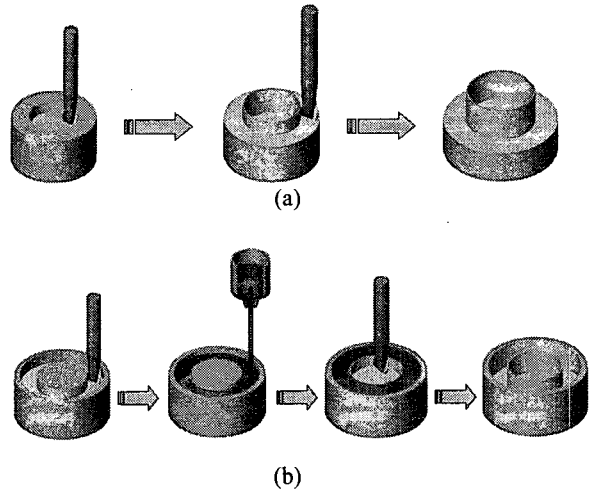


Fig. 5 Schematic diagrams of high-speed machining of a thin-walled cylinder: (a) without filling, (b) with filling

### 3.2 중공 실린더형 박벽제작

먼저 무충진공정과 충전공정의 경우 중공실린더형 박벽 높이를 10mm 로 설정하고, 고속가공기는 자체개발한 HisRP 1호기를 실험에 사용하였다. 6-8 고속가공의 실험조건은 회전수 50,000 rpm, 이

송속도 6,000 mm/min 이고 고속절삭공구는 플랫폼 엔드밀(flat endmill)로서 직경이 10.0mm 를 사용하였다. Fig. 6 에서는 무충진공정에서 가공한 박벽두께 35 $\mu$  m, 20 $\mu$  m 및 10 $\mu$  m 를 보여준다. Fig. 7 은 충진공정을 사용하여 박벽두께 35 $\mu$  m 및 20 $\mu$  m 의 실험결과를 보여준다. Fig 8 은 이들 결과를 정리한 것으로써, 무충진의 경우 CASE I, II, III 및 충진의 경우 CASE IV, V 의 경우를 비교하여 보여준다. 이들 결과로부터 무충진의 경우 박벽 실린더의 높이 및 직경은 각각 최대 0.9% 및 0.9%의 값을 가짐을 알 수 있었다. 두께오차는 약 8.0%에서 16.0%의 값을 보여주며, 심지어 박벽 두께가 10 $\mu$  m 의 경우 74.0%의 오차값을 보여준다.

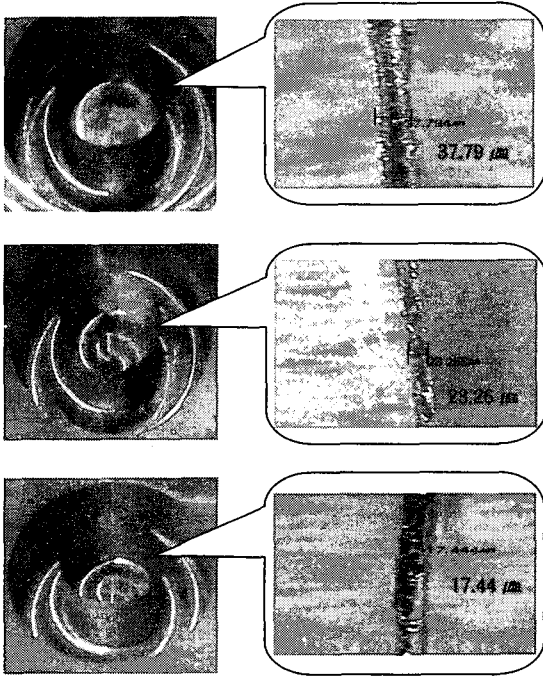


Fig. 6 Thin-walled cylinders machined without filling: (a) CASE I:  $t = 0.035$  mm, (b) CASE II:  $t = 0.020$  mm, (c) CASE III:  $t = 0.010$  mm

이러한 값으로부터 무충진의 경우 마이크로 박벽을 만들 수 있는 실험적인 한계값은 박벽두께가 약 30 $\mu$ m 임을 알 수 있다. 한편 충진공정을 이용하였을 때는 실린더 높이와 직경의 오차값이 각각 1.5% 및 0.2%의 값을 나타내며, 두께 오차는 20 $\mu$  m 의 경우 약 3.8%의 값을 가짐을 보여준다.

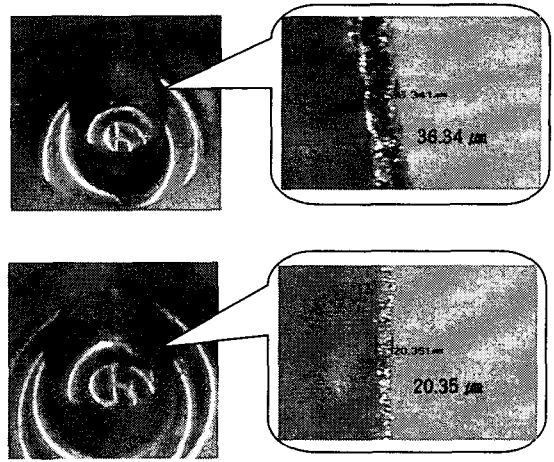


Fig. 7 Thin-walled cylinders machined with filling: (a) CASE IV:  $t = 0.035$  mm, (b) CASE V:  $t = 0.020$  mm

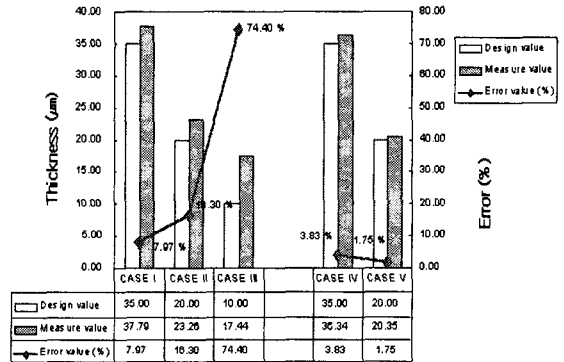


Fig. 8 Measured thickness and errors in thin-walled cylinders

### 3.3 반구형 박벽 구조물제작

제안된 박벽 구조물 제작공정의 유용성을 확인하기 위하여 좀더 복잡한 구조물인 중공 반구형 구조물을 제작하였다. 가공 가능한 최소한의 가공 두께는 중공실린더와는 달리 입체적으로 박벽면을 가공하여야 하기 때문에 앞 절의 가공결과와 차이가 난다. Fig. 9 와 같이 가공물을 고정하기 위하여 브릿지(bridge) 구조를 사용하지 않았을 경우와 사용한 경우에 반구 박벽의 최소두께는 Fig. 10 과 11 와 같이 약 500 $\mu$  m 및 약 35  $\mu$  m 정도의 한계값

을 가진다.

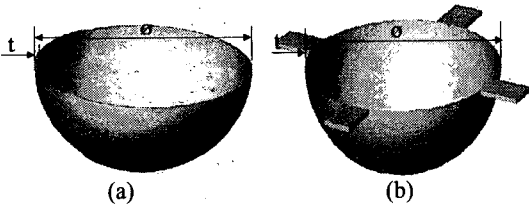


Fig. 9 CAD Models of hemispherical shells: (a) without bridge, (b) with bridges

브릿지가 없는 CASE I 경우 21.0mm의 설계치에 대하여 오차는 0.5 - 6.6%의 범위를 가지며, 두께는 500 $\mu$ m에 대해 6.0%의 오차를 나타내었다.

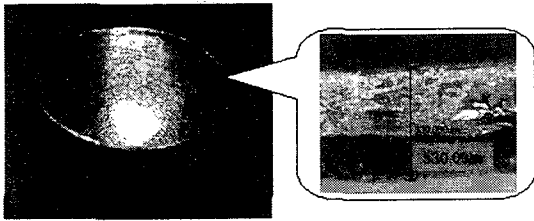


Fig. 10 A hemispherical shell without bridges, CASE I:  $t = 0.5$  mm

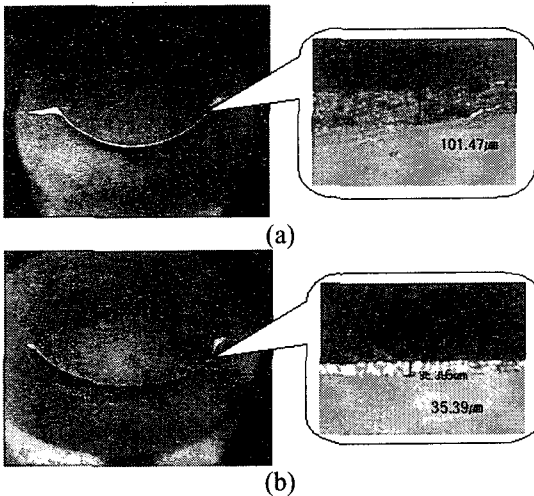


Fig. 11 A hemispherical shell with bridges: CASE II:  $t = 0.1$  mm, (b) CASE III:  $t = 0.035$  mm

또한 브릿지가 있는 경우인 CASE II와 III의 경우는 직경 및 두께의 오차가 각각 0.5 - 2.0%, 1.1 -

1.2% 범위 내에 있었다. Fig. 12는 이들 결과를 정리한 것으로, 반구와 같이 복잡 형상면을 가진 박벽 구조물의 경우에는 브릿지 구조와 충전공정을 이용하여 약 35  $\mu$ m의 박벽 두께로 제작 가능함을 보여준다.

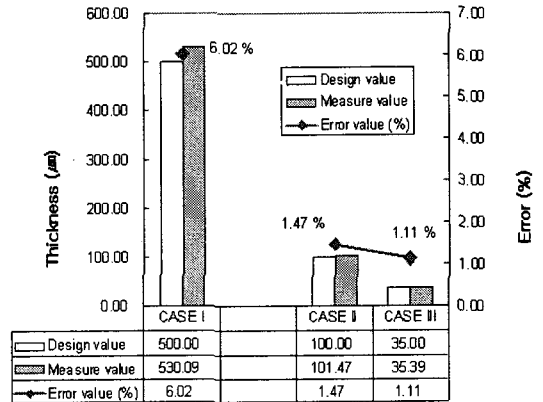


Fig. 12 Measured thickness and errors of hemispherical shells

#### 4. 결론

본 논문에서는 고속가공과 상변화 충전방식을 결합하여 마이크로급의 금속 박벽 구조물을 쾌속 제작하는 새로운 방안을 제시하고, 중공 실린더형 및 중공 반구형 박벽구조물을 제작하여 본 가공법의 유용성을 보여주었다. 이러한 기초 실험을 통해 다음의 결론을 얻었다.

첫째, 실린더형 박벽 구조물의 경우, 충전공정 없이는 박벽두께를 약 35 $\mu$ m 이하로 제작할 수 없거나 측정오차가 10%이상 벗어난다. 하지만 충전공정을 도입하여 오차를 5%이내에서 20 $\mu$ m 까지 제작 가능하였다.

둘째, 중공 반구형 박벽 구조물의 경우, 브릿지를 사용하지 않을 경우, 약 500 $\mu$ m의 박벽 두께에서 6%의 오차를 가지는 가공한계를 얻었지만, 브릿지 구조를 남기는 경우에는 박벽두께를 35 $\mu$ m 까지 한계두께를 가진 구조물을 오차범위 2.0% 이내로 양호한 가공결과를 얻었다. 이는 충전공정으로 가공하더라도 반구형의 경우는 원소재에 부착되는 브릿지의 효과가 더욱 중요하다는 사실을 보여준다.

향후 본 연구의 결과를 바탕으로 마이크로급 복잡형상 미세 박막을 갖는 다양한 금속 시제품 및 금형에 적용할 예정이다.

Whang, K.H., "A New Rapid Manufacturing Process for Multi-face High-speed Machining," *Int J Adv Technol*, Vol. 22, pp. 68-74, 2003.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 교내 학술 연구비 (4년 과제)에 의한 연구임

## 참고문헌

1. Nakagawa, T., "High-Speed Milling for Die and Mold Making," *Proc. of AFDM'99*, pp.11-18, 1999.
2. Shin, B.S., Choi, D.S., Yang, D.Y., Lee, S.H., Yoon, K.K., Whang, K.H., Sarma, S.E., Lee, E. "Rapid Prototyping System Using Universal Automated Fixturing Technology," 8<sup>th</sup> European Conference on RP, May 2000.
3. Gandhi, M.V., Thompson, B.S. and Mass, D.J., "Adaptable Fixture Design: An Analytical and Experimental Study of Fluidized Bed Fixturing," *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, Vol. 108, pp.155-121, 1986.
4. Shin, B.S., Yang, D.Y., Choi, D.S., Kim, K.D., Lee, E.S., Je, T.J., Whang, K.H., "Development of Automatic Filling Process using Low-Melting Point Metal for Rapid Manufacturing with Machining Process," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 88-94, 2002.
5. Abtew, Mulugeta, Sevaduray, Guna, "Lead-free Solders in Microelectronics," *Materials Science and Engineering*, Vol. 27, pp.95-141, 2000.
6. Shin, B.S., Yang, D.Y., Choi, D.S., Lee, E.S., Whang, K.H., "Method and Apparatus for Rapidly Manufacturing 3-Dimensional Shaped Products using Machining and Filling Process," Korea Patent No. 0383880, 2003.
7. Shin, B.S., Yang, D.Y., Choi, D.S., Lee, E.S., Je, T.J., Whang, K.H., "Development of Rapid Manufacturing process by High-speed Machining with Automatic Fixturing," *J. Mater. Proces. Technol.* Vol. 130-131, pp. 363 - 371, 2002.
8. Shin, B.S., Yang, D.Y., Choi, D.S., Lee, E.S., Je, T.J.,